

平成11年度 地熱探査技術等検証調査
貯留層変動探査法開発

テーマ2 重力探査法開発

報 告 書
(要 約)

平成 12 年 3 月

NEDOBIS

E97014

新エネルギー・産業技術総合開発機構

NEDO 図書・資料室



010016730-3

平成11年度 地熱探査技術等検証調査
貯留層変動探査法開発

テーマ2 重力探査法開発

報 告 書
(要 約)

平成 12 年 3 月

新エネルギー・産業技術総合開発機構

ま え が き

エネルギー供給構造の脆弱な我が国において、石油に代わる新エネルギー・再生可能エネルギーの開発並びにその導入に対する期待は、昨今の酸性雨問題及び炭酸ガスによる温室効果等の地球環境問題と相俟って、急速に高まっています。新エネルギー・産業技術総合開発機構は、石油代替エネルギー導入促進の中核団体として創立以来19年余を経ましたが、その中でも地熱エネルギーの技術開発並びに開発促進を重要な柱として努めているところであります。

当機構が通商産業省からの補助金により実施している「地熱探査技術等検証調査 貯留層変動探査法開発」では、開発初期の貯留層評価、運転開始後の発電所の出力安定維持、さらに既開発地区周辺に存在する貯留層の抽出に有効な技術の開発を目指し、断裂水理探査法、重力探査法、電気・電磁気探査法、地震波探査法、貯留層変動予測技術及び貯留層変動予測技術（モデリング支援技術）の開発を実施いたしております。本報告書は、平成11年度に実施した「平成11年度地熱探査技術等検証調査 貯留層変動探査法開発 重力探査法開発」の結果を取りまとめたものであります。

本技術開発は、通商産業省工業技術院ニューサンシャイン計画推進本部並びに当機構の貯留層変動探査法開発委員会のご指導、ご協力を得ております。また通商産業省工業技術院地質調査所とは研究協力体制を敷いて技術的な協力を、現地実験に際しては、福島県河沼郡柳津町および三島町のご協力を得ております。なお、本技術開発は奥会津地熱株式会社及び東北電力株式会社に委託して実施いたしました。これら関係各位に対し、深く感謝申し上げる次第であります。

平成12年3月

新エネルギー・産業技術総合開発機構
理 事 長 松 井 秀 行

目 次

Summary

I 総 説	1
I-1 開発計画	1
I-1-1 開発目的	1
I-1-2 開発内容	1
1. 研究開発項目	1
2. 委託業務の実施場所	1
I-2 開発実施要領	2
I-2-1 推進体制及び研究開発組織	2
1. 研究開発組織及び管理体制	2
2. 研究者担当者氏名及び担当業務	3
I-2-2 貯留層変動探査法開発委員会	4
I-2-3 他からの指導、協力者及び指導、協力事項	4
I-2-4 研究発表、講演、文献、特許等の状況	5
I-3 開発成果の概要	6
I-3-1 前年度までの成果の概要	6
1. 重力測定ネットワークシステム構築	6
2. 坑内重力計	7
3. 解析・評価	8
I-3-2 平成11年度事業の成果の概要	9
1. 重力測定ネットワークシステム構築	9
2. 坑内重力計	10
3. 解析・評価	10
(1) 重力変動解析	10
(2) 精密重力測定法の検討	10
(3) 貯留層ヒストリーマッチング・変動予測	11
I-4 今後の課題	12
I-4-1 重力測定ネットワークシステム構築	12
I-4-2 坑内重力計	12
I-4-3 解析・評価	12
II. 開発内容	14
II-1 貯留層変動探査法開発	14
II-1-1 貯留層変動探査法開発の概要	14
1. 断裂推理探査法開発	14
2. 探査ネットワークシステム開発	14
II-1-2 貯留層変動探査法開発の研究開発テーマ	14

II-2 重力探査法開発の開発計画	17
II-2-1 目的	17
II-2-2 研究開発の課題	17
II-2-3 研究開発項目	17
1. 重力測定ネットワークシステム構築	17
2. 坑内重力計	18
3. 解析・評価	18
II-2-4 研究開発計画	20
1. 全体計画	20
2. 本年度の計画	22
II-3 開発内容	25
II-3-1 重力測定ネットワークシステム構築	25
1. 重力測定点及び地下水位観測井の整備	25
(1) 重力測定点の新設、移設及び改修	25
(2) TDR 土壌水分計の設置	25
2. 重力計検定	25
(1) 筑波点検線における重力計検定	30
(2) 日本縦断路線における重力計検定	33
3. 標高測定	39
(1) 使用機器	39
(2) 測定方法	39
(3) データ処理方法	45
(4) データ処理結果	46
(5) 標高変動計算	67
4. 重力測定	93
(1) 使用機器	93
(2) 測定方法	93
(3) データ処理方法	94
(4) データ処理結果	96
(5) 重力変動計算結果	127
5. 地下水位測定	129
(1) 使用機器	129
(2) 測定方法	129
(3) 測定結果	211
6. その他の連続測定	211
(1) 使用機器	216
(2) 測定方法	216
(3) 測定結果	217
II-3-2 坑内重力計	231

1. モデル計算	231
(1) 貯留層挙動シミュレーション	231
(2) 坑内重力計	232
(3) 重力計算の方法	232
(4) 計算結果	239
II-3-3 解析・評価	265
1. 重力変動解析	265
(1) 重力変動と浅層地下水位変動の相関性の検討	265
(2) 不飽和帯密度変動	265
2. 精密重力測定法の検討	265
(1) 精密潮汐補正法に関する検討	265
(2) 鉛直重力勾配に関する検討	271
(3) その他の要因による測定誤差の除去方法に関する検討	280
3. 貯留層ヒストリーマッチング・変動予測	287
(1) 地熱概念モデル	287
(2) 自然状態シミュレーション	288
(3) 坑井ヒストリーマッチング	290
(4) 地上における重力変動計算	307
III. 評 価	313
III-1 重力測定ネットワークシステム構築	313
III-2 坑内重力計	313
III-3 解析・評価	313
III-3-1 重力変動解析	313
III-3-2 精密重力測定法の検討	314
III-3-3 貯留層ヒストリーマッチング・変動予測	314
IV. 今後の課題	315
IV-1 重力測定ネットワークシステム構築	315
IV-2 坑内重力計	315
IV-3 解析・評価	315
IV-3-1 重力変動解析	315
IV-3-2 精密重力測定法の検討	316
IV-3-3 貯留層ヒストリーマッチング・変動予測	316
V. まとめ	319
参考文献	321
巻末資料A	327
巻末資料B	329
巻末資料C	331

図表目次

第II-1-1 図	貯留層変動探査法開発の体系図	16
Fig. II-1-1	Concept of Development of Technology for Reservoir Mass and Heat Flow Characterization	
第II-3-1-1 図	地下水位観測井位置及び重力測定点位置図	27
Fig. II-3-1-1	Location map of groundwater level monitoring wells and gravity stations.	
第II-3-1-2 図	筑波点検線測定点位置図	31
Fig. II-3-1-2	Location map of the gravity stations in Tsukuba Calibration Range.	
第II-3-1-3 図	重力計検定結果	35
Fig. II-3-1-3	Results of the gravimeter calibration.	
第II-3-1-4 図	GPS測量位置及びレベル測量路線図	41
Fig. II-3-1-4	Location map of GPS measurement site and leveling route.	
第II-3-1-5 図	重力連続観測所の外観	43
Fig. II-3-1-5	The exterior of the gravity monitoring facility.	
第II-3-1-6 図	GPS基線解析による測定点No.9の橢円体高の変化 (1997年度)	47
Fig. II-3-1-6	Ellipsoidal height change at station No.9 in 1997.	
第II-3-1-7 図	GPS基線解析による測定点No.9の橢円体高の変化 (1998年度)	48
Fig. II-3-1-7	Ellipsoidal height change at station No.9 in 1998.	
第II-3-1-8 図	GPS基線解析による測定点No.3125の橢円体高の変化 (1999年度)	49
Fig. II-3-1-8	Ellipsoidal height change at station No.3125 in 1999.	
第II-3-1-9 図	GPS最適測定期間長の検討	51
Fig. II-3-1-9	An examination for the optimum length of GPS survey term.	
第II-3-1-10 図	レベル測量基準点における標高決定	59
Fig. II-3-1-10	Determination of elevations at reference stations for leveling	
第II-3-1-11 図	標高変動図 (1997年度秋季～1998年度春季)	69
Fig. II-3-1-11	Elevation changes from November 1997 to May 1998.	
第II-3-1-12 図	標高変動図 (1998年度春季～1998年度夏季)	71
Fig. II-3-1-12	Elevation changes from May 1998 to August 1998.	
第II-3-1-13 図	標高変動図 (1998年度夏季～1998年度秋季)	73
Fig. II-3-1-13	Elevation changes from August 1998 to November 1998.	
第II-3-1-14 図	標高変動図 (1998年度秋季～1999年度春季)	75
Fig. II-3-1-14	Elevation changes from November 1998 to May 1999.	
第II-3-1-15 図	標高変動図 (1999年度春季～1999年度夏季)	77
Fig. II-3-1-15	Elevation changes from May 1999 to August 1999.	
第II-3-1-16 図	標高変動図 (1999年度夏季～1999年度秋季)	79
Fig. II-3-1-16	Elevation changes from August 1999 to November 1999.	

第II-3-1-17図	標高變動図 (1997年度秋季～1998年度夏季)	81
Fig. II-3-1-17	Elevation changes from November 1997 to August 1998.	
第II-3-1-18図	標高變動図 (1997年度秋季～1998年度秋季)	83
Fig. II-3-1-18	Elevation changes from November 1997 to November 1998.	
第II-3-1-19図	標高變動図 (1997年度秋季～1999年度春季)	85
Fig. II-3-1-19	Elevation changes from November 1997 to May 1999.	
第II-3-1-20図	標高變動図 (1997年度秋季～1999年度夏季)	87
Fig. II-3-1-20	Elevation changes from November 1997 to August 1999.	
第II-3-1-21図	標高變動図 (1997年度秋季～1999年度秋季)	89
Fig. II-3-1-21	Elevation changes from November 1997 to November 1999.	
第II-3-1-22図	西山－会津若松往復重力測定結果	97
Fig. II-3-1-22	Gravity change at the gravity station No.1995 relative to the First Order Gravity Station "Aizu-Wakakamatsu"	
第II-3-1-23図	重力巡回測定結果図 (水位観測井No.1, 重力測定点No.87)	103
Fig. II-3-1-23	Results of patrol gravity measurement at the monitoring well site No.1 (Gravity Station No.87).	
第II-3-1-24図	重力巡回測定結果図 (水位観測井No.2, 重力測定点No.92)	105
Fig. II-3-1-24	Results of patrol gravity measurement at the monitoring well site No.2 (Gravity Station No.92).	
第II-3-1-25図	重力巡回測定結果図 (水位観測井No.3, 重力測定点No.48)	107
Fig. II-3-1-25	Results of patrol gravity measurement at the monitoring well site No.3 (Gravity Station No.48).	
第II-3-1-26図	重力巡回測定結果図 (水位観測井No.4, 重力測定点No.2046)	109
80		
Fig. II-3-1-26	Results of patrol gravity measurement at the monitoring well site No.4 (Gravity Station No.2046).	
第II-3-1-27図	重力巡回測定結果図 (水位観測井No.5, 重力測定点No.2125)	111
81		
Fig. II-3-1-27	Results of patrol gravity measurement at the monitoring well site No.5 (Gravity Station No.2125).	
第II-3-1-28図	重力巡回測定結果 (水位観測井No.6, 重力測定点No.41)	113
Fig. II-3-1-28	Results of patrol gravity measurement at the monitoring well site No.6 (Gravity Station No.41).	
第II-3-1-29図	重力巡回測定結果 (水位観測井No.7, 重力測定点No.58)	115
Fig. II-3-1-29	Results of patrol gravity measurement at the monitoring well site No.7 (Gravity Station No.58).	
第II-3-1-30図	重力巡回測定結果 (水位観測井No.8, 重力測定点No.121)	117
Fig. II-3-1-30	Results of patrol gravity measurement at the monitoring well site No.8 (Gravity Station No.121).	
第II-3-1-31図	重力巡回測定結果 (水位観測井No.9, 重力測定点No.129)	119

Fig. II -3-1-31	Results of patrol gravity measurement at the monitoring well site No.9 (Gravity Station No.129).	
第II-3-1-32図	重力巡回測定結果 (水位観測井No.10, 重力測定点No.130) -----	121
Fig. II -3-1-32	Results of patrol gravity measurement at the monitoring well site No.10 (Gravity Station No.130).	
第II-3-1-33図	重力連続測定結果 -----	125
Fig. II -3-1-33	Results of continuous gravity measurement at the gravity station No.2125.	
第II-3-1-34図	重力変動図 (1997年度秋季～1998年度春季, 標高補正前) -----	137
Fig. II -3-1-34	Gravity changes from from November 1997 to May 1998 (before elevation correction).	
第II-3-1-35図	重力変動図 (1998年度春季～1998年度夏季, 標高補正前) -----	139
Fig. II -3-1-35	Gravity changes from from May 1998 to August 1998 (before elevation correction).	
第II-3-1-36図	重力変動図 (1998年度夏季～1998年度秋季, 標高補正前) -----	141
Fig. II -3-1-36	Gravity changes from from August 1998 to November 1998 (before elevation correction).	
第II-3-1-37図	重力変動図 (1998年度秋季～1999年度春季, 標高補正前) -----	143
Fig. II -3-1-37	Gravity changes from from November 1998 to May 1999 (before elevation correction).	
第II-3-1-38図	重力変動図 (1999年度春季～1999年度夏季, 標高補正前) -----	145
Fig. II -3-1-38	Gravity changes from from May 1999 to August 1999 (before elevation correction).	
第II-3-1-39図	重力変動図 (1999年度夏季～1999年度秋季, 標高補正前) -----	147
Fig. II -3-1-39	Gravity changes from from August 1999 to November 1999 (before elevation correction).	
第II-3-1-40図	重力変動図 (1997年度秋季～1998年度夏季, 標高補正前) -----	149
Fig. II -3-1-40	Gravity changes from from November 1997 to August 1998 (before elevation correction).	
第II-3-1-41図	重力変動図 (1997年度秋季～1998年度秋季, 標高補正前) -----	151
Fig. II -3-1-41	Gravity changes from from November 1997 to November 1998 (before elevation correction).	
第II-3-1-42図	重力変動図 (1997年度秋季～1999年度春季, 標高補正前) -----	153
Fig. II -3-1-42	Gravity changes from from November 1997 to May 1999 (before elevation correction).	
第II-3-1-43図	重力変動図 (1997年度秋季～1999年度夏季, 標高補正前) -----	155
Fig. II -3-1-43	Gravity changes from from November 1997 to August 1999 (before elevation correction).	
第II-3-1-44図	重力変動図 (1997年度秋季～1999年度秋季, 標高補正前) -----	157
Fig. II -3-1-44	Gravity changes from from November 1997 to November 1999 (before elevation correction).	

第II-3-1-45図	重力変動図 (1997年度秋季～1998年度春季, 標高補正後)	159
Fig. II-3-1-45	Gravity changes from from November 1997 to May 1998 (after elevation correction).	
第II-3-1-46図	重力変動図 (1998年度春季～1998年度夏季, 標高補正後)	161
Fig. II-3-1-46	Gravity changes from from May 1998 to August 1998 (after elevation correction).	
第II-3-1-47図	重力変動図 (1998年度夏季～1998年度秋季, 標高補正後)	163
Fig. II-3-1-47	Gravity changes from from August 1998 to November 1998 (after elevation correction).	
第II-3-1-48図	重力変動図 (1998年度秋季～1999年度春季, 標高補正後)	165
Fig. II-3-1-48	Gravity changes from from November 1998 to May 1999 (after elevation correction).	
第II-3-1-49図	重力変動図 (1999年度春季～1999年度夏季, 標高補正後)	167
Fig. II-3-1-49	Gravity changes from from May 1999 to August 1999 (after elevation correction).	
第II-3-1-50図	重力変動図 (1999年度夏季～1999年度秋季, 標高補正後)	169
Fig. II-3-1-50	Gravity changes from from August 1999 to November 1999 (after elevation correction).	
第II-3-1-51図	重力変動図 (1997年度秋季～1998年度夏季, 標高補正後)	171
Fig. II-3-1-51	Gravity changes from from November 1997 to August 1998 (after elevation correction).	
第II-3-1-52図	重力変動図 (1997年度秋季～1998年度秋季, 標高補正後)	173
Fig. II-3-1-52	Gravity changes from from November 1997 to November 1998 (after elevation correction).	
第II-3-1-53図	重力変動図 (1997年度秋季～1999年度春季, 標高補正後)	175
Fig. II-3-1-53	Gravity changes from from November 1997 to May 1999 (after elevation correction).	
第II-3-1-54図	重力変動図 (1997年度秋季～1999年度夏季, 標高補正後)	177
Fig. II-3-1-54	Gravity changes from from November 1997 to August 1999 (after elevation correction).	
第II-3-1-55図	重力変動図 (1997年度秋季～1999年度秋季, 標高補正後)	179
Fig. II-3-1-55	Gravity changes from from November 1997 to November 1999 (after elevation correction).	
第II-3-1-56図	地区別重力変動図 (生産領域－血の池沢)	181
Fig. II-3-1-56	Gravity changes in production zone (Chinoikezawa district).	
第II-3-1-57図	地区別重力変動図 (生産領域－大安沢)	183
Fig. II-3-1-57	Gravity changes in production zone (Ohyasuzawa district).	
第II-3-1-58図	地区別重力変動図 (生産領域－6Tサイト付近)	185

Fig. II-3-1-58	Gravity changes in production zone (neighbourhood of 6T site).	
第II-3-1-59図	地区別重力変動図 (生産領域-猿倉沢)	187
Fig. II-3-1-59	Gravity changes in production zone (Sarukurazawa district).	
第II-3-1-60図	地区別重力変動図 (生産領域/還元領域-P2基地付近)	189
Fig. II-3-1-60	Gravity changes in production zone / reinjection zone (neighbourhood of P2 site).	
第II-3-1-61図	地区別重力変動図 (還元領域-老沢)	191
Fig. II-3-1-61	Gravity changes in reinjection zone (Oizawa district).	
第II-3-1-62図	地区別重力変動図 (周辺領域-砂子原)	193
Fig. II-3-1-62	Gravity changes in surrounding area (Sunagohara district).	
第II-3-1-63図	地区別重力変動図 (周辺領域-五畳敷)	195
Fig. II-3-1-63	Gravity changes in surrounding area (Gojohjiki district).	
第II-3-1-64図	地区別重力変動図 (周辺領域-牧沢)	197
Fig. II-3-1-64	Gravity changes in surrounding area (Makizawa district).	
第II-3-1-65図	地区別重力変動図 (周辺領域-久保田)	199
Fig. II-3-1-65	Gravity changes in surrounding area (Kubota district).	
第II-3-1-66図	地区別重力変動図 (周辺領域-胃中)	201
Fig. II-3-1-66	Gravity changes in surrounding area (Kabuchu district).	
第II-3-1-67図	地区別重力変動図 (周辺領域-湯八木沢)	203
Fig. II-3-1-67	Gravity changes in surrounding area (Yuyagisawa district).	
第II-3-1-68図	地区別重力変動図 (周辺領域-四ッ谷)	205
Fig. II-3-1-68	Gravity changes in surrounding area (Yotsuya district).	
第II-3-1-69図	地区別重力変動図 (周辺領域-大谷)	207
Fig. II-3-1-69	Gravity changes in surrounding area (Ohtani district).	
第II-3-1-70図	地区別重力変動図 (周辺領域-大成沢)	209
Fig. II-3-1-70	Gravity changes in surrounding area (Ohnarusawa district).	
第II-3-1-71図	地下水位連続測定結果	214
Fig. II-3-1-71	Results of continuous groundwater level measurement in the monitoring wells.	
第II-3-1-72図	水位巡回測定結果	218
Fig. II-3-1-72	Results of patrol groundwater level measurement in the monitoring wells.	
第II-3-1-73図	連続測定結果 (大気圧・気温・降水量・孔内水温)	220
Fig. II-3-1-73	Results of meteorological measurements at the gravity station No.2125 and No.48.	
第II-3-1-74図	TDR 土壌水分率連続測定結果	221
Fig. II-3-1-74	Results of TDR water content measurements at the gravity station No.2125	
第II-3-1-75図	TDR 土壌水分率測定装置のレイアウト	223
Fig. II-3-1-75	Layout of TDR equipments.	
第II-3-1-76図	降雨によるTDR土壌水分率の変化	225

(1999年 8 月11日～1999年 8 月12日)

Fig. II-3-1-76	Change in TDR water content due to rain fall (Augst 11-Augst 12, 1999).	
第II-3-1-77図	降水量と地下水位の変化 (1999年 8 月11日～1999年 8 月12日) —	227
Fig. II-3-1-77	Change in precipitation and groundwater level (Augst 11-Augst 12, 1999).	
第II-3-2-1図	シミュレーショングリッドの鉛直方向の構造 —————	233
Fig. II-3-2-1	Vertical structure of reservoir simulation grid.	
第II-3-2-2図	シミュレーショングリッドの水平方向の構造 —————	234
Fig. II-3-2-2	Horizontal structure of reservoir simulation grid.	
第II-3-2-3図	シャトルタイプ坑内重力計概念図 —————	235
Fig. II-3-2-3	Shuttle-type borehole gravimeter.	
第II-3-2-4図	坑内重力計とその計測の概念図 —————	236
Fig. II-3-2-4	Concept of borehole gravity measurement.	
第II-3-2-5図	坑井位置図 —————	237
Fig. II-3-2-5	Well location map.	
第II-3-2-6図	生産開始後の坑内重力変動 (15T井) —————	241
Fig. II-3-2-6	Gravity changes after production-start along the well 15T.	
第II-3-2-7図	生産開始後の坑内重力変動 (21T井) —————	243
Fig. II-3-2-7	Gravity changes after production-start along the well 21T.	
第II-3-2-8図	生産開始後の坑内重力変動 (23P井) —————	245
Fig. II-3-2-8	Gravity changes after production-start along the well 23P.	
第II-3-2-9図	生産開始後の坑内重力変動 (19R井) —————	247
Fig. II-3-2-9	Gravity changes after production-start along the well 19R.	
第II-3-2-10図	生産開始後の坑内鉛直重力差 (15T井) —————	249
Fig. II-3-2-10	Vertical gravity difference after production-start along the well 15T.	
第II-3-2-11図	生産開始後の坑内鉛直重力差 (21T井) —————	251
Fig. II-3-2-11	Vertical gravity difference after production-start along the well 21T.	
第II-3-2-12図	生産開始後の坑内鉛直重力差 (23P井) —————	253
Fig. II-3-2-12	Vertical gravity difference after production-start along the well 23P.	
第II-3-2-13図	生産開始後の坑内鉛直重力差 (19R井) —————	255
Fig. II-3-2-13	Vertical gravity difference after production-start along the well 19R.	
第II-3-2-14図	生産開始後の坑内鉛直重力差の変動 (15T井) —————	257
Fig. II-3-2-14	Changes in vertical gravity difference after production-start along the well 15T.	
第II-3-2-15図	生産開始後の坑内鉛直重力差の変動 (21T井) —————	259
Fig. II-3-2-15	Changes in vertical gravity difference after production-start along the well 21T.	
第II-3-2-16図	生産開始後の坑内鉛直重力差の変動 (23P井) —————	261
Fig. II-3-2-16	Changes in vertical gravity difference after production-start along the well 23P.	
第II-3-2-17図	生産開始後の坑内鉛直重力差の変動 (19R井) —————	263

Fig.II-3-2-17	Changes in vertical gravity difference after production-start along the well 19R.	
第II-3-3-1図	No.5孔における重力変動と水位変化及びTDR水分率の比較	267
Fig.II-3-3-1	Comparison among gravity change, groundwater level change and change in TDR water content at monitoring well site No.5.	
第II-3-3-2図	連続重力測定結果に対する精密潮汐補正及び気圧変動補正の効果	270
Fig.II-3-3-2	Effect of precise tidal correction and barometric correction on continuous gravity record.	
第II-3-3-3図	鉛直重力勾配測定位置図	272
Fig.II-3-3-3	Location map of VGG measurement point	
第II-3-3-4図	各測定ポイントにおける鉛直重力勾配の高度相関図	278
Fig.II-3-3-4	Plots of gravity difference against height above ground showing the variation in VGG from site to site.	
第II-3-3-5図	柳津西山地域における鉛直重力勾配測定値のヒストグラム	279
Fig.II-3-3-5	Histogram showing frequency distribution of measured VGG values at Yanaizu.	
第II-3-3-6図	測定点No.1995における重力計の短期ドリフト	282
Fig.II-3-3-6	Short term drift in gravimeter readings observed at gravity station No.1995.	
第II-3-3-7図	重力計較正の効果	283
Fig.II-3-3-7	Effect of gravimeter calibration.	
第II-3-3-8図	重力連続測定結果にみられる振動等によるノイズ	284
Fig.II-3-3-8	Random noise caused by vibration on continuous gravity record.	
第II-3-3-9図	重力定期測定結果にみられる気圧変動の影響	285
Fig.II-3-3-9	Effect of barometric change on seasonal gravity survey results.	
第II-3-3-10図	貯留層モデルのグリッドレイアウト	289
Fig.II-3-3-10	Grid layout of reservoir model	
第II-3-3-11図	レイヤー1～3における自然状態温度分布	293
Fig.II-3-3-11	Natural state temperature distribution at layer 1, 2 and 3	
第II-3-3-12図	レイヤー4～6における自然状態温度分布	295
Fig.II-3-3-12	Natural state temperature distribution at layer 4, 5 and 6	
第II-3-3-13図	レイヤー7～9における自然状態温度分布	297
Fig.II-3-3-13	Natural state temperature distribution at layer 7, 8 and 9	
第II-3-3-14図	坑井平衡地層温度と自然状態シミュレーション温度の比較 (19R, 29R, 0A-6, 17T)	299
Fig.II-3-3-14	Comparison of interpreted and simulated temperature for 19R, 29R, 0A-6 and 17T	
第II-3-3-15図	坑井平衡地層温度と自然状態シミュレーション温度の比較 (06T, 15T, 24P, SR-1)	301
Fig.II-3-3-15	Comparison of interpreted and simulated temperature for 06T, 15T, 24P and SR-1	

第II-3-3-16図	貯留層圧力と自然状態シミュレーション圧力との比較	303
Fig. II-3-3-16	Comparison measured pressure and simulated natural state pressure	
第II-3-3-17図	坑井ヒストリーマッチング結果（生産井14T, 15T）	305
Fig. II-3-3-17	Results of enthalpy matching for 14T and 15T	
第II-3-3-18図	発電所試運転時から3年後における実測重力変動分布と 計算重力変動分布の比較	309
Fig. II-3-3-18	Comparison of measured and simulated gravity change after 3 years operation	
第II-3-3-19図	発電所試運転時から3年後におけるガス飽和度計算結果 （レイヤー6, 7, 9）	311
Fig. II-3-3-19	Simulated gas saturation after 3 years operation (layer 6, 7 and 9)	
第II-2-1表	重力探査法開発計画	20
Table II-2-1	Research Task of Gravity Monitoring.	
第II-2-2表	重力探査法開発年度計画	21
Table II-2-2	Schedule of Gravity Monitoring.	
第II-2-3表	平成11年度 実施工程表	24
Table II-2-3	Schedule of Development of Gravity Monitoring.	
第II-3-1-1表	新設・改修・移設測定点一覧	29
Table II-3-1-1	List of the gravity stations built, restored or removed.	
第II-3-1-2表	筑波点検線における重力計検定結果一覧表	37
Table II-3-1-2	List of the gravimeter calibration results in Tsukuba Calibration Range.	
第II-3-1-3表	日本縦断路線における重力計検定結果一覧表	38
Table II-3-1-3	List of the gravimeter calibration results based on the measurements at JGSN96 gravity stations.	
第II-3-1-4表	G P S 基線解析結果の総括	50
Table II-3-1-4	Summary of GPS baseline analysis.	
第II-3-1-5表	レベル測量成果一覧表（1999年度春季）	53
Table II-3-1-5	List of elevations determined by the leveling in spring 1999.	
第II-3-1-6表	レベル測量成果一覧表（1999年度夏季）	55
Table II-3-1-6	List of elevations determined by the leveling in summer 1999.	
第II-3-1-7表	レベル測量成果一覧表（1999年度秋季）	57
Table II-3-1-7	List of elevations determined by the leveling in autumn 1999.	
第II-3-1-8表	決定標高値一覧表	61
Table II-3-1-8	Summary of the elevations of gravity stations in Yanaizu-Nishiyama geothermal field since 1997.	
第II-3-1-9表	標高変動一覧表	91
Table II-3-1-9	List of elevation changes.	
第II-3-1-10表	重力値一覧表	99
Table II-3-1-10	List of the gravity in Yanaizu-Nishiyama geothermal field since 1997.	

第II-3-1-11表	重力巡回測定結果一覧表	102
Table II-3-1-11	List of patrol gravity measurement results at the monitoring well sites.	
第II-3-1-12表	重力変動一覧表	130
Table II-3-1-12	List of gravity changes.	
第II-3-1-13表	水位連続測定結果総括	212
Table II-3-1-13	Summary of continuous groundwater level measurement results.	
第II-3-1-14表	連続測定所における降水量	229
Table II-3-1-14	Summary of precipitation recorded at continuous gravity monitoring facility.	
第II-3-3-1表	重力変動と水位変動の相関性	266
Table II-3-3-1	Correlation between gravity change and groundwater change.	
第II-3-3-2表	Baytap-Gによる潮汐解析結果	268
Table II-3-3-2	Results of tidal analysis by BAYTAP-G.	
第II-3-3-3表	柳津西山地熱地域における潮汐モデル	269
Table II-3-3-3	Tidal model in Yanaizu-Nishiyama geothermal field.	
第II-3-3-4表	鉛直重力勾配測定結果一覧表（平成11年度）	275
Table II-3-3-4	List of VGG measurement results (1999) .	
第II-3-3-5表	世界他地域における鉛直重力勾配測定値の範囲	277
Table II-3-3-5	Range of values for VGG measured in different parts of the world.	
第II-3-3-6表	自然状態シミュレーションの条件	291
Table II-3-3-6	Formation properties, boundary and initial conditions used in natural state simulation.	
第V-1表	平成11年度 重力探査法開発のまとめ	321
Table V-1	Summary of Development of Gravity Monitoring (FY 1999)	
第V-2表	重力探査法開発のこれまでの成果と今後の計画	323
Table V-2	Results and Plans of Development of Gravity Monitoring	

Development of Technology for Reservoir Mass and Heat Flow Characterization
- Monitoring and Modeling of Reservoir Mass and Heat Flows -
Theme 2 : Gravity Monitoring

Development of Technology for Reservoir Mass and Heat Flow Characterization
- Monitoring and Modeling of Reservoir Mass and Heat Flows -
Theme 2 : Gravity Monitoring

Summary

I -1. Purpose of research

The purpose of this research is development of techniques that advance reservoir simulation with the history matching of gravity monitoring data for reservoir mass changes with production of geothermal fluid.

I -2. Research task

I -2-1. Development of gravity monitoring system

Gravity monitoring for reservoir mass change with production of geothermal fluid is carried out in Yanaizu-Nishiyama geothermal field, Fukushima pref., Japan. To grasp gravity changes associated with groundwater level changes, continuous measurements of gravity and groundwater level at monitoring well sites are operated in the survey area.

I -2-2. Analysis and evaluation of gravity monitoring data

1. Preliminary study on the precise gravity survey method

Evaluation for the precise gravity survey method is carried out using field survey data corrected in Yanaizu-Nishiyama geothermal field.

2. Reservoir history matching and simulation

Reservoir history matching between gravity observation data in the field and calculations with “a gravity post processor” is carried out to update the reservoir model that made of history matching with temperature and/or pressure data.

I -2-3. Borehole Gravity Meter

The applicability of borehole gravity measurement on geothermal reservoir monitoring is examined through numerical simulation and field test.

I -3. Summary of research results

I -3-1. Development of gravity monitoring system

(1) Maintenance of the monitoring facilities

Two gravity stations were removed or restored.

Water content reflectmeter is installed to evaluate the gravimetric effect of water contents in

vadose zone. It was installed at the monitoring well site No.5 and has been operated since July 1999.

(2) Gravimeter calibration

The gravimeter calibrations were carried out in Tsukuba Calibration Range of Geographical Survey Institute. Calibration factors for Scintrex CG-3M gravimeters were determined by these operations. To improve the precision on the calibration factors to be determined, Additional gravimeter calibration was conducted on the route through from Hokkaido to Okinawa. According to the test results, calibration factors of the gravimeters have been changing slowly since 1997.

(3) Continuous measurements of gravity and groundwater level and Bi-weekly gravity measurement at the monitoring well sites.

At monitoring well site No.5, Continuous measurement of gravity and groundwater level have been conducted. At the other nine monitoring well sites, continuous gravity measurements of groundwater level have also been conducted. At these sites, Bi-weekly gravity measurements have been carried out.

(4) Seasonal gravity survey

To keep up the stable observation of gravity change, a new Scintrex CG-3M gravimeter was installed in this fiscal year. Three seasonal gravity surveys were conducted in April, July and October.

(5) GPS measurement and Leveling

Leveling was carried out with seasonal gravity surveys to monitor the elevation change at each gravity station. In the same term as leveling, GPS measurements were conducted at GPS station at well site No.5. Height change of the station was calculated by baseline analysis with GPS data corrected at three observations GEONET station of Geographical Survey Institute.

According to the results, it is concluded that averaging of 5-7 days of the ellipsoidal heights may be effective in stabilizing the GPS measurements.

I -3-2. Borehole gravity meter

Borehole gravity response was calculated using density change distribution model derived from latest reservoir simulation for Yanaizu-Nishiyama geothermal field.

The results shows that gravity changes expected at wells in production zone are larger more than ten times of gravity change at a well located in injection zone.

I -3-3. Analysis and evaluation of gravity monitoring data

1. Analysis of gravity data

(1) Effect of shallow groundwater level change

Correlation between groundwater level changes and gravity changes were examined at ten monitoring well sites. In some wells, gravity changes were correlated very well with groundwater level changes.

(2) Effect of density change in vadose zone

Using the data recorded by water content reflectmeter at the monitoring well site No.5, changes of water content in vadose zone were monitored precisely. Relationship between changes of the water content and groundwater level change after rainfall was understood. At the monitoring well site No.5, because permeability in vadose zone is assumed very high, the changes of water content in vadose zone should be correlated with gravity data as well as groundwater level changes.

2. Precise gravity measurement

(1) Vertical gravity gradient

Local variation of vertical gravity gradient is larger than expected. The error due to local variation of vertical gravity gradient is negligible with small elevation change because the error expected to be about 5 μgal maximum for 10 cm of elevation change.

(2) Precise tidal correction

A tidal model was established using eight months of gravity data by the tidal analysis program "BAYTAP-G". Precise tidal corrections were applied to all the gravity data corrected in this project using the tidal model. Seasonal gravity survey results after the precise tidal correction shows gravity changes correlated with the production suspension due to the maintenance of power station facilities in 1998.

(3) Study on noise reduction method

Errors due to short-term drift of gravimeter, change in gravimeter calibration factors, vibration of gravimeter and barometric pressure change were examined. Noise reduction methods for these errors were summarized.

3. Reservoir history matching and simulation

I -4. Future subjects

I -4-1. Development of gravity monitoring system

(1) Gravity measurement at the monitoring well sites

To examine the effect of seasonal groundwater level change on the gravity measurement, gravity measurement should be continued at the monitoring well sites. The measurement interval can be expanded to three weeks.

Quantitative evaluation for the correlation among gravity change, groundwater level change and change of water content in vadose zone is recommended.

(2) Seasonal gravity survey

To grasp long-term gravity change relates with steam production, gravity survey covering whole survey area should be continued at least once a year. Because the production suspension is planned in next fiscal year, a few times of gravity survey concentrated around the production zone with shorter interval are recommended to grasp short-term gravity change related with changes of production. Additional continuous

gravity measurement is also recommended near or inside the production zone.

(3) GPS measurement and leveling

To grasp the elevation change at gravity stations, leveling during annual gravity survey is recommended. To check the short-term elevation change related with the production suspension, monitoring of elevation change around the production zone by GPS measurements is recommended.

(4) Database check-in

All the data corrected should be checked in to the database.

I -4-2. Borehole gravity meter

The field test for borehole gravity meter should be suspended at least in the next year. A feasibility study of the gravity meter using the gravity post processor is recommended.

I -4-3. Analysis and evaluation of gravity monitoring data

1. Analysis of gravity data

Quantitative evaluation for the correlation among gravity change, groundwater level change and change of water content in vadose zone is recommended. The possibility and necessity of the correction for the groundwater level change and change of water content in vadose zone should be discussed.

Monitoring of water content in vadose zone should be continued.

2. Study on the precise gravity survey method

Factors to obstruct precise gravity measurement for reservoir monitoring should be checked. Necessities of reduction and its optimal method should be examined.

3. Reservoir history matching and simulation

I -4. Future subjects

I -4-1. Development of gravity monitoring system

It is necessary to check again the drainage for the inflow protection from casing head at each monitoring well.

Number of troubles in gravimeters is increasing gradually because of their high working rate. Due to these troubles, we forced to change the gravimeter for continuous measurement and to suspend the circuit measurement for more than one month. To stabilize the measurement conditions, additional introduction of a gravimeter is strongly recommended.

To study on the influence of seasonal level change of the groundwater, extension of the seasonal gravity survey (three times / year) and the circuit gravity measurement around the monitoring wells (one round / two weeks) are recommended for the next fiscal year.

To avoid the elevation error derived from short-term GPS measurement, elevation difference should be determined by the leveling in the next fiscal year. Using new GPS measurement system introduced at continuous measurement facility in 1999, long-term GPS measurement will be carried out to determine the elevation of the site as a reference station for the leveling. These data will be useful for the examination of the precision for the GPS measurement in this area.

I -4-2. Borehole gravity meter

The improvement of the reservoir model is necessary to implement examination precision better about the borehole gravimeter and needs the reservoir simulation which used the improved model.

Moreover, it is necessary to check the gravity in the well which used a gravity postprocessor.

Also, the examination such as the experiment place and the selection of test well is necessary.

I -4-3. Analysis and evaluation of gravity monitoring data

1. Analysis of gravity data

Further noise reduction for the gravity data must be required to correlate with the groundwater level change.

TDR technique should be examined to monitor the density change in vadose zone, and the gravity effects of density change in vadose zone at Yanaizu field.

2. Study on the precise gravity survey method

(1) Precise Tidal Correction

Further examination should be required for the tidal model before the application to the precise tidal correction to see if the tidal model is valid constantly.

Reduction of barometric response should be done for all the gravity data, and the effectiveness of the reduction should be evaluated.

Because the transient drift of the gravimeter will converge with time, the better results will be expected for the longer measurement. The proper analysis method should be developed to increase the survey production rate with acceptable level of drift noise.

(2) Vertical Gravity Gradient

(a) The very low value of VGG at Site 300 (-243.7 microgal/m) be further investigated by repeating the measurements at and in the vicinity of this site.

(b) Some further VGG measurements be made at additional sites.

(c) Since the VGG is constant within a height range up to 1.6m, fewer measurements need to be made at each site, and therefore a smaller and more portable tower could be used. Such a tower need be about only 0.5-1.0m high and need only be sufficiently large to support the gravity meter itself.

3. Reservoir history matching and simulation

The geothermal natural state and historical matching will be simulated based on the constructed geothermal conceptual model. After this geothermal model is satisfied with both natural state data and well monitoring data, the matching to the gravity monitoring data will be simulated.

I 総 説

Ⅰ．総 説

Ⅰ－１ 開発計画

Ⅰ－１－１ 開発目的

地熱流体生産活動によって生じる重力の変化を捉えることにより，貯留層の広がりや将来の変動を的確に予測する技術を開発し，開発初期の貯留層評価，運転開始後の発電所の出力安定維持，さらに既開発地区周辺に存在する貯留層の抽出にも有効な技術を確立する。

Ⅰ－１－２ 開発内容

１．研究開発項目

(1) 重力測定ネットワークシステム構築

貯留層変動に伴う重力変化を捉えるため，東北電力(株)柳津西山地熱発電所（平成7年5月運開，定格出力65MW）が位置する福島県河沼郡柳津西山地区にて重力測定点および水位観測点を設置し，重力測定ネットワークシステムを構築する。さらに重力測定を実施し，既存データとともに解析し，ネットワークシステム構築に資する。

(2) 坑内重力計

地熱調査における坑内重力計適用の可能性とその利用法について検討を行う。

(3) 解析・評価

精密重力測定に関する検討を行うとともに，貯留層ヒストリーマッチングおよび変動予測の方法について検討を行う。

２．委託業務の実施場所

奥会津地熱株式会社 東京都中央区日本橋本町3丁目2番13号

同 西山事業所 福島県河沼郡柳津町大字砂子原上ノ平1034番地1

東北電力株式会社 宮城県仙台市青葉区一番町三丁目七番一号

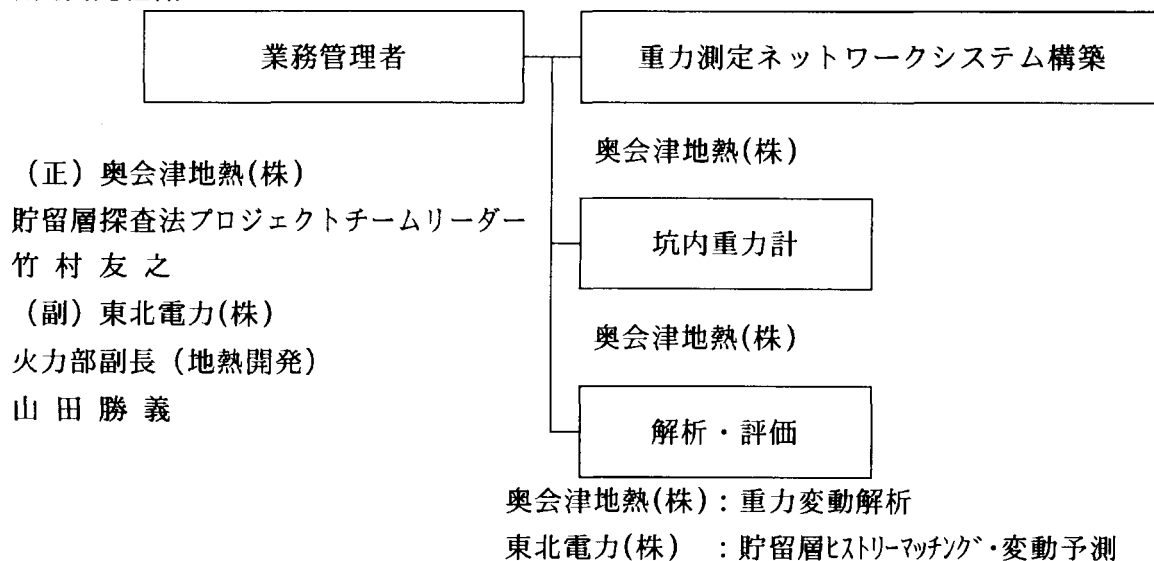
野外試験場 東北電力(株)柳津西山地熱発電所周辺地域
(福島県河沼郡柳津町西山地区，一部三島町地内)

1-2 開発実施要領

1-2-1 推進体制及び研究開発組織

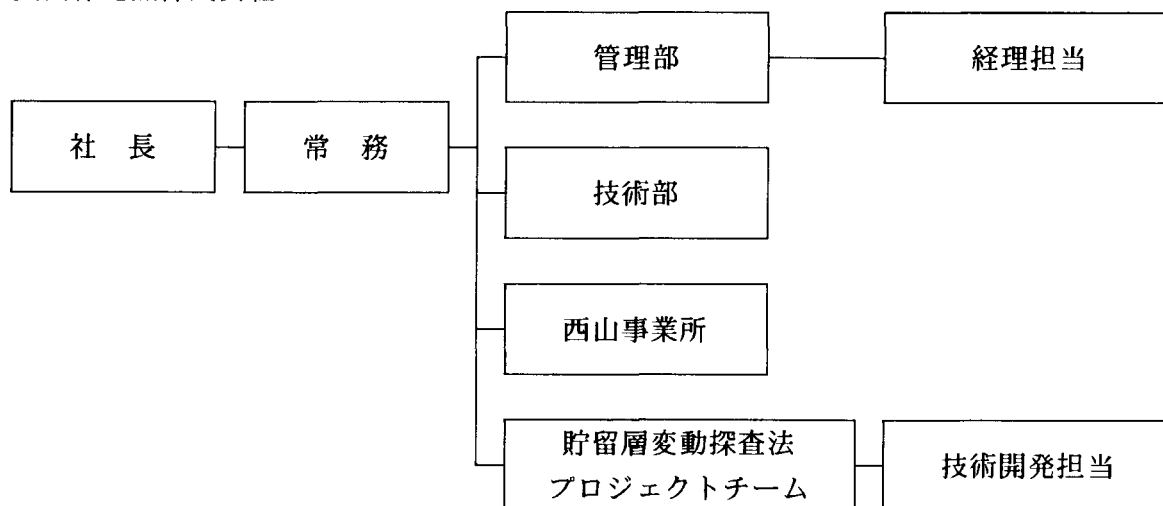
1. 研究開発組織及び管理体制

(1) 研究開発組織

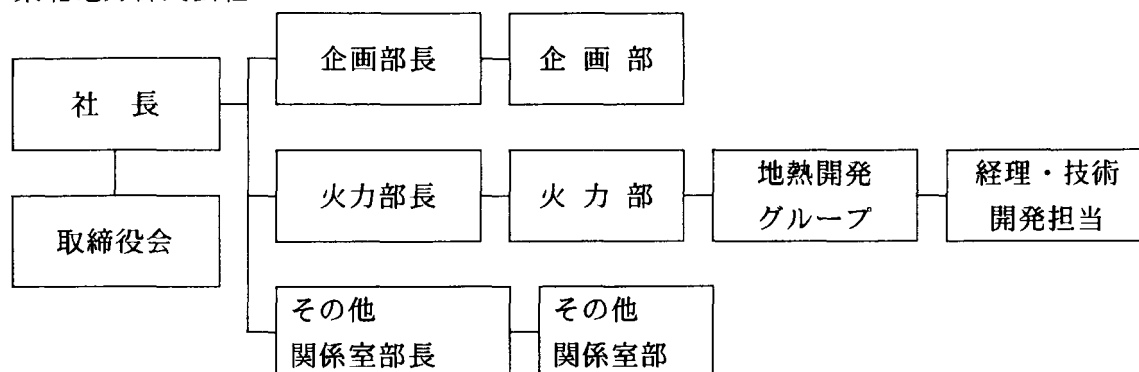


(2) 管理体制

奥会津地熱株式会社



東北電力株式会社



2. 研究者担当者氏名及び担当業務

(1) 奥会津地熱株式会社

氏 名	所属・役職	担 当
竹 村 友 之	貯留層変動探査法プロジェクトチーム チームリーダー	解析・評価
迫 垣 内 薫	貯留層変動探査法プロジェクトチーム 研究員	重力測定ネットワークシステム
瀬 尾 邦 夫	貯留層変動探査法プロジェクトチーム 研究員	坑内重力計
門 脇 正 和	貯留層変動探査法プロジェクトチーム 研究員	坑内重力計
横 本 誠 一	貯留層変動探査法プロジェクトチーム 研究員	重力測定ネットワークシステム 解析・評価
佐 伯 和 宏 (H11.4-H11.5)	貯留層変動探査法プロジェクトチーム 研究員	重力測定ネットワークシステム
太 田 洋 文 (H11.6-H12.3)	貯留層変動探査法プロジェクトチーム 研究員	重力測定ネットワークシステム

(2) 東北電力株式会社

氏 名	所属・役職	担 当
山 田 勝 義	火力部課長（地熱開発）	解析・評価
三 村 高 久	火力部副長（地熱開発）	解析・評価
大槻 健太郎	火力部（地熱開発）	解析・評価
山野辺 宏	火力部（地熱開発）	解析・評価
内ヶ崎 健一郎 (H11.4-H11.7)	火力部（地熱開発）	解析・評価
石 崎 潤 一 (H12.1-H12.3)	火力部（地熱開発）	解析・評価

1-2-2 貯留層変動探査法開発委員会

地熱探査技術等検証調査、貯留層変動探査法開発に関する審議を行うため、以下の委員会及び部会が新エネルギー・産業技術総合開発機構に設けられている。

(1) 貯留層変動探査法開発委員会

(役職・所属は平成12年3月現在)

	氏 名	所属・役職
委員長	小 川 克 郎	名古屋大学大学院理学研究科 地球惑星理学専攻 教授
委 員	秋 林 智	秋田大学工学資源学部 地球資源学科 教授
//	石 戸 恒 雄	工業技術院地質調査所地殻熱部 地殻熱貯留層研究室 室長
//	岩 田 峻	同和鉱業(株)資源開発本部 資源開発部 地熱部長
//	江 原 幸 雄	九州大学大学院工学研究科 地球資源システム工学専攻 教授
//	金 原 啓 司	工業技術院地質調査所地殻熱部 部長
//	津 宏 治	四国工業技術研究所 所長
//	新 妻 弘 明	東北大学大学院工学研究科 地球工学専攻 教授
//	林 正 雄	九州産業大学工学部 土木工学科 教授
//	春 口 健 次	九州電力(株)火力部 地熱課 課長
//	森 山 清 治	出光大分地熱(株)滝上事業所 所長
//	山 下 正 人	東京電力(株)火力部 火力エンジニアリングセンター 設備技術グループ 課長

(2) 探査・解析法部会

	氏 名	所属・役職
部会長	石 戸 恒 雄	工業技術院地質調査所地殻熱部 地殻熱貯留層研究室 室長
委 員	内 田 利 弘	工業技術院地質調査所地殻物理部 地殻構造研究室 室長
//	木 村 繁 男	金沢大学工学部機能機械工学科 教授
//	杉 原 光 彦	工業技術院地質調査所地殻熱部 地殻熱貯留層研究室 主任研究官
//	田 籠 功 一	西日本技術開発株式会社地熱部 地殻開発室 課長
//	西 祐 司	工業技術院地質調査所地殻熱部 地殻熱探査研究室 主任研究官
//	福 田 洋 一	京都大学大学院理学研究科 地球惑星科学地球物理学教室 助教授
//	藤 光 康 宏	九州大学大学院工学研究科 地球資源システム工学専攻 助教授
//	古 谷 茂 継	出光大分地熱株式会社 滝上事業所 所長代理
//	三ヶ田 均	シェルパ・ルジエ(株)マーケティング本部 検層解析プロダクトライン専門課長
//	茂 木 透	北海道大学大学院理学研究科 付属地震火山研究観測センター
//	矢 野 雄 策	工業技術院地質調査所地殻熱部 地殻熱探査研究室 主任研究官
//	六 川 修 一	東京大学大学院工学系研究科 地球システム工学専攻 助教授

1-2-3 他からの指導、協力者及び指導、協力事項

- ・ 重力計検定に際して、日本各地の一等重力点における測定で建設省国土地理院、北海道大学、鹿児島地方気象台、沖縄気象台の各位に便宜を図っていただいた。
- ・ 西山-会津若松往復重力測定に際して、一等重力点「会津若松」の測定で若松測候所の各位に便宜を図っていただいた。

I - 2 - 4 研究発表, 講演, 文献, 特許等の状況

口頭発表: 1999年6月物理探査学会第100回学術講演会

「貯留層変動モニタリングのための重力探査法の開発 (その1)」

口頭発表: 21st New Zealand Geothermal Workshop

「Monitoring of gravity changes associated with geothermal power production at YANAIZU-NISHIYAMA, JAPAN」

1-3 開発成果の概要

1-3-1 前年度までの成果の概要

1. 重力測定ネットワークシステム構築

福島県柳津西山地区をモデルとして、地熱流体生産活動に伴う貯留層変動を重力変動として把握するための重力モニタリングの準備作業を実施するとともに、測定作業を開始した。

重力モニタリングのための準備作業として、重力測定点の適正配置の検討、GPS測量を導入した水準測量方法の検討、使用する重力計の較正法の検討、地下水位と重力変動との関係を把握するための地下水位観測井配置の検討と観測井の掘削、重力・大気圧・気温・降水量・地下水位・孔内温度の連続観測方法の検討等を行った。また、測定作業として、本システムによる4回の重力定期測定と1回の水準測量及び3回のGPS測量を実施するとともに、重力・地下水位等の定点での連続測定を実施した。主な、実施内容は以下の通りである。

(1) 重力測定点

柳津西山地区では地熱流体生産・還元地域を中心に既往の重力モニタリングとして83点の重力測定点が配置されていたが、地熱流体生産活動に伴う重力変動がこれらの測定点にも及んでいることから、既往の重力測定領域の外側に測定領域を広げ、計138点の重力測定点で重力測定を実施した。

(2) 重力計の検定

国土地理院により重力測定が実施されている筑波点検線においてScintrex CG-3M重力計の検定を実施し、重力測定と測定データ処理の仕様を設定するとともに、各重力計固有の較正係数を求めた。

(3) 重力定期測定・連続測定

上記で設定した測定仕様に基づき、4回の重力の定期測定を実施するとともに、重力測定点の1つ（水位観測井No.4→No.5に移設：後述）に重力連続測定用の測定施設を設け、重力の連続測定を実施した。

(4) GPS測量仕様の設定

GPS測量システムの導入に伴い、GPS測量の基準点を福島県大沼郡新鶴村の二等三角点「境野」に定めるとともに、GPS測量による重力測定点の測量方法を定めた。なお、GPS測量は静止測位法によることとし、GPS基線測量解析に必要な基準点の位置座標変換には飛田（1994）による変換方法を採用した。

(5) GPSおよびレベル測量の実施

本調査では水準測量の精度と能率の向上を図る目的でGPS測量システムを導入して、レベル測量に並行してGPS測量を実施した。導入したGPS受信装置は、Trimble

Navigation社製4800 GPS受信装置（2周波数型）と4600LS GPS受信装置（1周波数型）である。

GPS測量の結果、短時間の測定では対流圏遅延等による有意な測定誤差が観測され、十分な精度で安定した楕円体高値を得るには長時間の測定を行うことや数点の電子基準点を用いた基線解析を行う等の何らかの対応が必要であることがわかった。

（6）地下水位観測井の掘削

地下水位の変動が重力変動に及ぼす影響を把握するため地下水位モニタリングのための観測井を10箇所にて掘削した。掘削位置は既往モニタリング結果と地形等を考慮して選定した。

（7）地下水位連続観測の実施

地下水位の連続観測地点として選定したNo.4孔に隣接して気圧計・温度計・雨量計を設置し、重力の連続測定とともに、孔内水位、大気圧・気温・降水量の連続観測を実施した。

その後の観測で、No.4孔には宙水が存在するものの、不圧地下水層が存在せず、連続観測地点を移設する必要があることがわかったため、No.5孔に移設した。これに伴い重力連続測定点もNo.4孔近接地からNo.5孔近接地に移設した。

（8）巡回測定（重力測定・地下水位測定）

平成10年度には、重力連続観測所の設置されていない水位観測井における重力変動をより連続的に捕らえるために、水位観測井掘削地点10箇所において定期測定期間を除く158日（1箇所あたり1回／日）の重力測定を実施した。

（9）コアサンプル試験

水位観測井掘削時に採取したコアサンプルのうち、帯水層と目される層準またはその周囲の不透水層と考えられる層準のものを選び、比重試験・土粒子の密度試験・含水比試験を実施し、湿潤密度・乾燥密度・土粒子の密度・自然含水比・間隙比及び飽和度を求めた。

2．坑内重力計

地熱貯留層モニタリングのために坑内重力測定を利用するための技術および機器に関して、文献調査と海外・国内の動向調査を実施した。この調査により、坑井内での重力測定を商業的に実施しているのは、米国にあるEDCON社ただ一つであること、利用可能な坑井内重力測定装置を所有するのはEDCON社のみであること、および現存する利用可能な坑井内重力測定装置のセンサーはすべてLaCoste & Romberg, Inc.（以下「LaCoste & Romberg社」と呼ぶ）製のものであることがわかった。

また、EDCON社の坑井内重力測定装置のうち、外径5.25インチのものは、深度2,000mの250℃の環境下にある地熱井で、坑井傾斜角が鉛直方向から14度以内であれば検層可能であること、および日本国内で比較的高温（200℃位）な坑井内で重力測定をする場合、1坑あたり1,000万円強で測定可能であるが、検層会社の費用が別途1,000万円必要であることがわかった（EDCON社情報）。

上述のような状況を考慮し、奥会津地熱地域内で観測可能と考えられる19R井，9T井を対象に，貯留層挙動シミュレーションにより貯留層密度を計算し，その密度の時間及び空間変化が重力にどのような変化をもたらすかの計算を実施した。これらの2坑井を対象にした計算結果は，地熱流体生産活動にともなう重力差分値の経時変化は微少であるというものであり，奥会津地熱地域内で現地試験を行ったとしても有益なものになる可能性は低いことがわかった。奥会津地熱地域内で現地試験は無理だとしても，同様なシミュレーションを生産井対象に行い，坑内重力計調査の有効性について評価することが必要と考えられる。

3. 解析・評価

(1) 重力変動解析

1) 浅層地下水位変動

地下水位連続観測記録と降水量連続観測記録の対比等から，記録された地下水位に関する考察を行った。全ての坑井における水位に，振幅の大小はあるが降雨と相関のある急激な水位変動が認められた。また，一部の観測井では複数の帯水層からの合成水位と考えられる水位変動が認められた。

2) 不飽和帯密度変動

文献調査により，不飽和帯密度変動が重力測定値に $5\sim 8\mu\text{gal}$ 以上の影響を与える可能性があることが分かった。不飽和帯の水分飽和度の測定方法として，TDR法水分測定装置が適当であるとの結論を得た。

(2) 精密重力測定法の検討

1) 鉛直重力勾配補正の適用性評価

本年度実施した柳津西山地域の7カ所での鉛直重力勾配測定により，以下の点がわかった。

- ・平成10年度調査の各測点で測定された鉛直重力勾配値は， $-244\sim -333\mu\text{gal/m}$ である。この中で1測点を除いた測定点での鉛直重力勾配値は $-289\sim -333\mu\text{gal/m}$ で，標準的な鉛直重力勾配値に対し， $6\sim 8\%$ の範囲内に収まっている。
- ・全ての鉛直重力勾配測定点において，鉛直重力勾配と標高との相関性，鉛直重力勾配値と地上からの高さ（地上から1.6m程度まで）と相関性，及び鉛直重力勾配とブーゲー異常との相関性は見られない。
- ・測定点によって鉛直重力勾配値変化が確認されたので，さらに測定箇所を増やし，変化を与える原因とその地域性や補正の必要性等について評価が必要となった。

2) 潮汐補正の適用性評価

潮汐解析プログラム”BAYTAP-G”を用いた重力連続観測データの解析から，本地域における精密な潮汐モデルを推定し，従来の潮汐補正では補正できなかった地球潮汐の影響を軽減することができた。また，従来の処理結果との比較により，従来の潮汐補正済みデータには1日で最大振幅 $10\mu\text{gal}$ 程度の補正漏れが含まれていることが明らかになった。

3) その他の要因による測定誤差の除去方法に関する検討

潮汐解析プログラム”BAYTAP-G”を用いた重力連続観測データ及び大気圧連続観測デー

タの解析から、大気圧変動に対する重力応答係数を得て、大気圧変動の影響の補正が可能となった。また、1地点における測定データの検討から、重力計の過渡的なドリフトが存在し、このドリフト特性が重力計によって異なることが確認できた。

(3) 貯留層ヒストリーマッチング・変動予測

平成10年度までに地点情報や坑井基礎データの取り纏め、坑井の透水性解析、平衡地層温度の解析、貯留層圧力分布の解析等を行うと共に、これらのデータを総合し地熱概念モデルの構築を行なった。

各種坑井データの解析を行うためには各坑井位置、ヒストリー等の基礎データの把握が必要であるため、坑井基礎データの取り纏めを行なった。

スピナー検層、温度検層および逸泥データを基に、各坑井ごとに透水ゾーンの位置特定および大きさを3段階に区分した。また、生産井の主要フィードゾーン位置および還元井の主要インジェクションゾーン位置の推定も行なった。

温度検層データを基に各坑井ごとに平衡地層温度を推定し、温度プロファイルの特徴および断層分布から5地域に分け、比較検討した。

スタティック時の圧力検層データから、本地域の標高に対する貯留層圧力分布の関係を推定した。

これらの解析結果を基に、地下の流体流動等を検討し、地熱概念モデルを構築した。

1-3-2 平成11年度事業の成果の概要

1. 重力測定ネットワークシステム構築

(1) TDR土壌水分計の設置

連続観測所近傍にTDR土壌水分計を設置（センサー深度0.35mから0.4m毎、6レベル）し、連続測定を開始した。

(2) 重力計検定

国土地理院により重力測定が実施されている筑波点検線においてScintrex CG-3M重力計の検定を実施し、重力測定と測定データ処理の仕様を設定するとともに、各重力計固有の較正係数を求めた。また、検定精度の向上を目的として日本縦断路線における重力計検定を実施した。その結果重力計の較正係数の経年変動があることが明らかになった。

(3) 地下水位連続観測・重力連続測定・重力巡回測定

連続観測所(No.5地点)にいて、重力、地下水位共に24時間連続観測を実施し、その他の9地点の観測点では、地下水位の24時間連続観測を実施した。また、各水位観測井近傍の測定点における重力巡回測定を1回/2週（3日/回）実施した。また、連続観測所において大気圧・気温・雨量の連続観測を実施した。

(4) 重力定期測定

生産・還元による重力変動の状況をより安定的に把握するため、Scintrex社CG-3M型重力計1台を追加増強し、4月に第1回目、7月に第2回目、10月に第3回目の重力測定を実

施した。

(5) GPS及びレベル測量

重力定期測定と同時期に3回のレベル測量を実施した。またこれと同時に重力連続観測点近傍（No.3125）でGPS測定を実施し、GPS測定結果と電子基準点データを用いた基線解析で、5日～1週間程度の解析結果の平均値をとれば、十分な精度で安定した橢円体高値が得られることがわかった。そこで平成10年度に実施したGPS測定結果のうち長時間の2周波数型受信機による測定を実施していた測定点No.9のデータの再解析を実施し、これら2点をレベル測量の基準点に変更し、標高値の再計算を実施した。

(6) データベース登録

データベース登録を継続実施した。

2. 坑内重力計

坑内重力計のモデル計算のため、最新の貯留層シミュレーションモデルを使用して柳津西山地域の坑井でのモデル計算を行った。計算の結果、蒸気生産領域中心部に位置する坑井では、還元領域に位置する坑井に比較して、1桁大きい重力変動値が得られた。

3. 解析・評価

(1) 重力変動解析

1) 浅層地下水位変動

重力巡回測定と地下水位連続観測の結果を用いて浅層地下水位変動と重力変動との相関関係の解析を行った。これまでの解析によって、連続観測所の地下水位と重力の変動に相関性が認められることを確認した。

2) 不飽和帯密度変動

連続観測所近傍に設置したTDR土壌水分計での測定により、不飽和帯での土壌水分率の変化が十分な精度で把握できるとともに、降雨後の不飽和帯の土壌水分率変化と浅層地下水位の水位変動との関係を把握することができた。また、設置場所での不飽和帯の透水性が非常に高く、重力変動との相関性については浅層地下水位変動とあわせ検討する必要があることがわかった。

(2) 精密重力測定法の検討

1) 鉛直重力勾配補正の適用性評価

鉛直重力勾配値の地域的な変化の原因を特定するには至らなかったが、その変化は地域的に狭い範囲で比較的大きな測定値幅をもって分布することがわかった。しかし、現在使用している鉛直重力勾配値との違いに起因する誤差の大きさは、標高変動10cmに対し $5\mu\text{gal}$ を超える程度であり、標高変動が小さければ無視できる程度であることが確認された。

2) 精密潮汐補正の適用性評価

これまでのデータを基に、柳津西山地域での精密潮汐補正モデルを構築した。このモ

デルにしたがって本調査で測定した全重力データの精密潮汐補正を行った。補正処理後の重力定期測定データに対する時系列変動解析の結果、1998年度の柳津西山地熱発電所の定期改修前後において、蒸気生産量の変化に対応した時間的・平面的な重力変動が捉えられていることを確認した。

3) その他の要因による測定誤差の除去方法に関する検討

重力計の短期ドリフト、重力計感度の経時変化、振動等のランダムノイズ、気圧変動の4つの誤差要因について検討し、除去方法について考察した。

(3) 貯留層ヒストリーマッチング・変動予測

昨年度構築した数値シミュレーションブロックモデルを用いて、 CO_2 を考慮した自然状態シミュレーションを実施した。自然状態シミュレーション結果は平衡地層温度及び貯留層圧力分布と概ね良いマッチングが得られた。また、この自然状態シミュレーションモデルを初期条件として、坑井ヒストリーマッチングを実施中である。坑井ヒストリーマッチングはまだ十分なマッチングができていないものの、モデルの妥当性を検討するために現段階でのベストモデルに基づき地上重力変動を試算し重力変動実測値と比較した結果、全般的傾向の特徴は概ね合っていることを確認した。

1-4 今後の課題

1-4-1 重力測定ネットワークシステム構築

1. 地下水位連続観測・重力連続測定

水位変動，特に季節的な水位変動に対する重力変動を検討するため，本年度より長く(1回/3週間程度)するものの，さらにデータの取得を継続する必要がある。

地下水位変動と重力変動との相関性評価を定量的に行うとともに，不飽和帯の密度変動と関連付けて評価する必要がある。

2. 重力定期測定

平成12年度に予定されている定期修繕工事前後での生産量変化に対する重力変動を捕らえ，本年度捕捉した柳津西山地域の蒸気生産量変化と重力変動との相関性をより明らかにするために，生産領域近傍に連続観測所を新設する必要がある。また，今後も年周期の重力変動を把握するために，1回/年の重力定期測定の継続が必要である。さらに，平成12年度に予定されている柳津西山発電所の定期修繕工事のタイミングを活用し，工事前後の蒸気生産量の変化に伴う重力変動の把握が望まれる。そのためには，生産領域を中心とした重力の集中測定の実施が必要である。

3. GPS及びレベル測量

柳津西山地域の標高変動を把握するため，1回/年の重力定期測定時にレベル測量を実施することが必要である。また，前述した重力の集中測定期間中の短期的な標高変動を把握するため，生産領域周辺でGPS測量を実施することが必要である。

4. データベース登録

平成12年度も引き続きデータベースへのデータ登録の継続が必要である。

1-4-2 坑内重力計

坑内重力計現地試験については，実施個所選定の問題もあり平成12年度は見送ることとし，重力ポストプロセッサを導入した坑内重力計の適用性の検討を行うことが望ましい。

1-4-3 解析・評価

1. 重力変動解析

重力変動に対する地下水位変動及び不飽和帯密度変動の影響の程度を把握し，重力変動から除去する必要性の有無及び，必要ある場合には適切な補正方法を明らかにする必要がある。

不飽和帯水分率の変動データ量を増やすため，平成12年度もTDR土壤水分計での測定を継続実施する必要がある。

2. 精密重力測定法の検討

貯留層変動に伴う重力変動捕捉ためにノイズとなる要因を再確認し，その除去について

除去の必要性の有無及び、必要ある場合には適切な補正方法を検討する必要がある。

3. 貯留層ヒストリーマッチング・変動予測

本年度実施した自然状態シミュレーション計算，地上重力変動計算等の結果から現行のシミュレーションモデルが概ね妥当であることが確認できたが，今後詳細なシミュレーション解析を行うために以下の課題がある。

(1)シミュレーションブロックモデルの修正

現行のシミュレーションブロックモデルに対して，以下の修正を行う必要がある。

1)Voronoi分割化

現行のシミュレーションブロックモデルには非Voronoi分割のブロックが含まれている。非Voronoi分割の場合，そのブロック境界における流束の値が不自然なものとなることが指摘されている。重力計算においては，基本的に流束値は関与しないので問題無い可能性があるが，計算の整合性を取る観点からVoronoi分割となるように修正する必要がある。

2)浅部レイヤーの細分化

二相領域の生成・拡大等の変化は重力変動の主要因になり得る。現行のブロックモデルは浅部レイヤー厚さが300～500mとしているが，二相領域の変化を精度良く模擬するためにはレイヤー厚さが大きい可能性があるため，現行ブロックモデルの浅部におけるレイヤー細分化を検討する必要がある。

(2)坑井ヒストリーマッチングにおけるMINCモデルの適用

本地域の殆どの生産井近傍周辺でエクセスエンタルピーが発生していることが考えられることから，坑井ヒストリーマッチングの際に十分なマッチングを得るためにはMINCモデルの適用を図る必要がある。

今後はこれらの課題を検討し，自然状態の再現および坑井ヒストリーマッチングの両者を満足できるモデルが構築できた後に重力モニタリングデータとのマッチングへと進み，重力変動と地熱流体挙動の因果関係の検討を行うこととなる。

II 開発内容

II. 開発内容

II-1 貯留層変動探査法開発

II-1-1 貯留層変動探査法開発の概要

貯留層変動探査法開発は、貯留層を形成する断裂系の水理特性を明らかにし、地熱流体生産に伴って生じる貯留層の変化を捉え、貯留層の広がりや将来の変動を的確に予測する技術を開発し、開発初期の貯留層評価、運転開始後の発電所の出力安定維持、さらに既開発地区周辺に存在する貯留層の抽出にも有効な技術確立することを目的としている。

貯留層変動探査法開発は、貯留層を形成する断裂群の水理特性を明らかにする「断裂水理探査法開発」と、地熱流体生産に伴う地熱貯留層の変動を捉える各種探査手法および長期的な地熱流体生産の予測を可能とする貯留層変動予測技術の開発からなる「探査ネットワークシステム開発」から構成されている。

貯留層変動探査法開発の体系図を第II-1-1図に示す。

1. 断裂水理探査法開発

断裂水理探査法開発では、坑井を利用した坑井水理試験法と新たな検層技術である透水率検層法の開発を目指している。

2. 探査ネットワークシステム開発

探査ネットワークシステム開発では、地熱流体生産または長期噴出試験時に発生する重力、自然電位、比抵抗、微小地震等の変化を観測し、貯留層の変動域を把握する技術の開発、およびこれらのデータを総合的に解析することにより貯留層変動の状況を精緻に予測し、貯留層探査や貯留層管理に貢献する技術の開発を目指している。

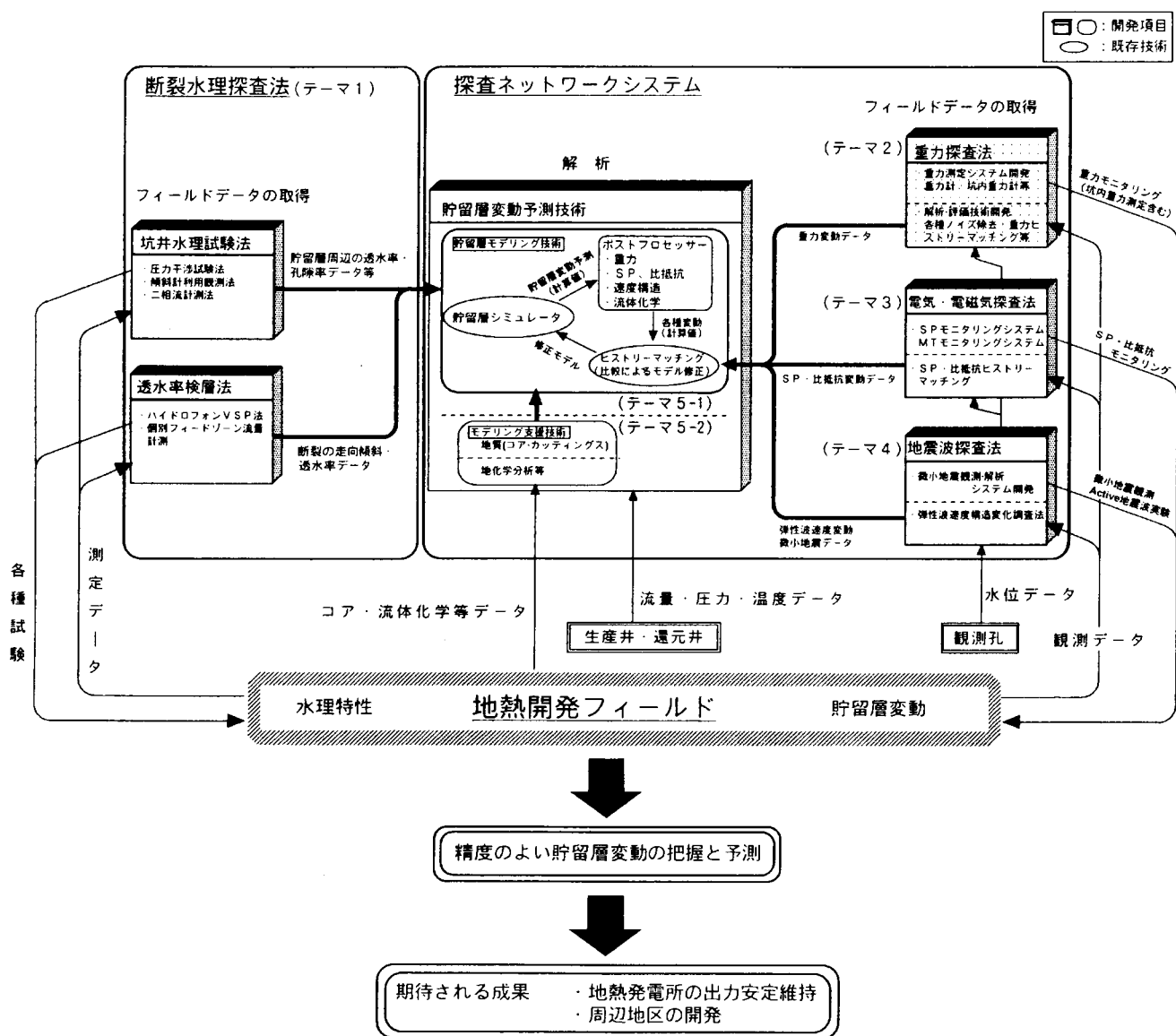
本開発は、重力探査法、電気・電磁気探査法、地震波探査法、貯留層変動予測技術からなる。

II-1-2 貯留層変動探査法開発の研究開発テーマ

貯留層変動探査法開発では、技術開発の内容を考慮して以下の6つのテーマに区分され委託研究が実施されている。

- テーマ1 断裂水理探査法開発
- テーマ2 重力探査法開発
- テーマ3 電気・電磁気探査法開発
- テーマ4 地震波探査法開発
- テーマ5-1 貯留層変動予測技術
- テーマ5-2 貯留層変動予測技術（モデリング支援技術）

本報告書は、この中の「テーマ2 重力探査法開発」について、平成11年度事業で実施した研究開発内容を取りまとめたものである。



第II-1-1図

Fig. II-1-1

貯留層変動探査法開発の体系図

Concept of Development of Technology for

Reservoir Mass and Heat Flow Characterization.

II-2 重力探査法開発の開発計画

II-2-1 目的

本研究開発は探査ネットワークシステム開発の一環として実施するもので、地熱流体生産活動に伴う貯留層の変動を重力変動として捕捉し、貯留層の広がりや将来の変動を的確に予測する技術を開発し、開発初期の貯留層評価、運転開始後の発電所の出力安定維持、さらに既開発地区周辺に存在する貯留層の抽出にも有効な探査技術を確立することを目的とするものである。

II-2-2 研究開発の課題

1. 研究課題

柳津西山地区での既往重力モニタリングは我が国では初めての本格的な地熱貯留層変動把握のための重力モニタリングである。これまでのモニタリング結果では、地熱流体生産に伴い生産・還元と整合する重力変動や標高変動が見られる等の成果を得られているものの、下記のような新たな問題が生じてきている。

- ・重力変動・標高変動が調査地域全域に及び、真の地熱流体生産活動に伴う重力変動・標高変動の把握が困難になっている。
- ・重力値に影響を及ぼすと考えられる地下水位変動が把握できていない。
- ・地熱流体生産活動や地下水変動では評価できない局所的な重力変動が現れている。

既往データや成果は本研究開発にとって貴重な財産であり、これらのデータや成果は有効に活用する必要がある。しかし、貯留層変動モニタリング手法としての重力探査法技術を確立するためには、適正なコスト評価を含め次の課題を克服する必要がある。

- ・既往重力モニタリング成果を継承するとともに、既往モニタリングでの問題に回答を与える貯留層変動把握のための最適重力モニタリングシステムの構築と、その標準化。
- ・精密重力探査法としての重力測定・GPS測量精度の向上、および生産活動に伴う重力変動に影響を与えるノイズ源の把握とその除去法の確立等重力モニタリングに必要な調査・解析手法の確立。
- ・重力モニタリングデータを用いた貯留層ヒストリーマッチングと変動予測手法の確立。
- ・従来手法にこだわらない新たな重力測定法（特に重力測定値の補正方法、坑井を利用した探査法）の検討・導入。

II-2-3 研究開発項目

本研究開発では上記課題と国内外の研究成果を参照し、以下の研究開発項目を設定した。

1. 重力測定ネットワークシステム構築

地熱流体生産活動に伴う貯留層の変動を把握できる最適測定法について検討し、地熱流体生産地域での重力モニタリングシステムを構築し、その標準化をはかる。

(1) 重力モニタリングシステム設定

- ・既往重力変動結果を考慮した地下水位観測井の掘削
- ・重力変動領域を考慮した重力測定点の新設

- ・GPS水準測量を導入した水準測量システムの設定
- (2) 設定したモニタリングシステムによる定期測定および連続測定の実施
- (3) 設定したモニタリングシステムによる成果の平成11年度での中間評価
- (4) 中間評価に基づく重力測定システム（水準測量・測定点・基準点）の体系化
- (5) 研究開発結果に基づく提案
 - ・最適精密重力モニタリングシステムの提案
 - ・地下水変動に伴う重力変動を評価した地熱流体生産活動に伴う重力変動抽出方法の提案
 - ・測定データの最適データベース提案

2. 坑内重力計

重力場の特性から貯留層の質量変動場により近い坑内に重力計を設置し、従来の地表での重力測定法に加えて坑内重力測定を実施すれば、貯留層変動の情報をより正確に捕捉することができる。石油開発等で使用されている坑内重力計の現状を把握し、地熱地域で利用できる坑内重力計の開発について技術・コストの面からその可能性を検討する。

- (1) 動向調査・文献調査
 - ・坑内重力計の利用状況、開発の現状把握
 - ・坑内重力計の開発の可能性検討
 - ・可搬型超伝導重力計の開発状況の把握
- (2) 貯留層モデル計算とその結果の検証
- (3) 既存システムの検証
- (4) 新規開発必要性の有無の提案
- (5) 開発システム仕様抽出・機器設計

3. 解析・評価

(1) 精密重力測定法の検討

地熱流体生産活動に伴う流体の移動や挙動を把握するための精密重力測定手法およびデータ処理・解析法を開発する。

- ・既往重力モニタリングの測定法とデータの検証
- ・重力モニタリングで考慮すべき問題点の抽出
- ・重力連続測定および鉛直重力勾配の測定の評価
- ・鉛直重力勾配測定結果に基づくフリーエア勾配の適正評価法の提案
- ・重力連続測定結果に基づく潮汐補正係数の抽出と適正評価方法の提案
- ・不飽和帯密度変動による重力測定値への影響評価
- (2) 貯留層ヒストリーマッチング・変動予測

柳津西山地区の貯留層モデルとして、貯留層変動予測技術で開発された貯留層シミュレータを使った貯留層ヒストリーマッチング、およびその成果を基に貯留層変動予測シミュレーションを行い、重力モニタリングデータに基づく貯留層変動予測手法の標準化をはかる。

- ・柳津西山地区での既存データの収集整理

- ・貯留層ヒストリーマッチング・変動予測のためのデータベース構築
- ・ヒストリーマッチングの実施と問題点の抽出とフィードバック
- ・ヒストリーマッチングによる本研究開発の評価，問題点の抽出・解決
- ・ヒストリーマッチング方法のマニュアル作成・貯留層変動予測の実施

II-2-4 研究開発計画

1. 全体計画

本研究開発の全体計画を第II-2-1表に、研究開発の年度展開を第II-2-2表に示す。

第II-2-1表 重力探査法開発計画

TableII-2-1 Research Task of Gravity Monitoring

	研究開発の項目と内容
最終目標 (平成13度末)	重力測定ネットワークシステム構築 ・最適精密重力モニタリングシステムの提案 ・蒸気生産活動に伴う重力変動抽出方法の提案 ・測定データのデータベースへの登録と最適データベース提案 解析・評価 精密重力測定法の検討 ・潮汐補正係数の抽出と適正評価方法の提案 ・フリーエア勾配の適正評価法の提案 貯留層ヒストリーマッチング・変動予測 ・ヒストリーマッチングによる本研究開発の評価、問題点の抽出・解決 ・ヒストリーマッチング方法のマニュアル作成・貯留層変動予測の実施 坑内重力計 ・開発システム仕様抽出・機器設計
平成11年度 目標	重力測定ネットワークシステム構築 地下水位観測井整備 ・観測井坑口の水没防止(坑口かさ上げ等)対策実施 地下水位連続観測・重力連続測定 ・重力連続測定・地下水位連続測定の継続実施 重力定期測定 ・3回(春季, 夏季, 秋季)の重力測定による重力変動状況の把握 ・重力計(1台)の導入による重力測定の安定化 GPS及びレベル測量 ・標高測定(重力定期測定と同時, 基本的にレベル測量)の実施 坑内重力計 ・柳津西山地域及び他地熱開発地域における適用可能性の検討 解析・評価 重力変動解析 - 浅層地下水位変動 ・地下水位変動の重力への影響評価, および適切な補正方法の検討 - 不飽和帯密度変動 ・TDR土壌水分計による測定の実施及び重力変動との関係の検討 精密重力測定法の検討 - 鉛直重力勾配補正 ・地域内数カ所での測定の実施, 局地的な地形の相違, 地下水位・不飽和帯水分率変動の影響の検討 - 潮汐補正 ・精密潮汐補正の実施 貯留層ヒストリーマッチング・変動予測 ・自然状態モデルの作成及びヒストリーマッチングの実施 ・坑井ヒストリーマッチング及び重力ポストプロセッサの導入を前提とした重力計算値と実測値のマッチング計算の実施

第II-2-2表 重力探査法開発年度計画
TableII-2-2 Schedule of Gravity Monitoring

	研 究 開 発 項 目	9	10	11	12	13
		年度	年度	年度	年度	年度
研 究 開 発 計 画	重力測定ネットワークシステム構築					
	地下水位観測井の掘削	→				
	水位計・重力点設置	→				
	重力・地下水位連続観測					→
	重力定期測定					→
	GPSおよびレベル水準測量					→
	解析・評価					
	精密重力測定法の検討					→
	貯留層ヒストリーマッチング・変動予測					→
	坑内重力計					
	動向調査・文献調査	→				
	貯留層モデルの検討および計算		→			
	既存システムの検証・新規開発必要性の有無の提案			→		
	開発システム仕様抽出・機器設計				→	→
	重力モニタリング法提案					→

2. 本年度の計画

(1) 重力測定ネットワークシステム構築

1) 地下水位観測井整備

観測井内への水進入対策を再度チェックし、設備の良好な維持管理を継続する。

2) 地下水位連続観測・重力連続測定

地下水位変動が重力測定に与える影響の把握を目的として、連続観測所における重力連続測定と地下水位連続観測を継続実施する。その他の9地点の観測点では、地下水位は24時間連続観測、重力は定期測定中を除き1回/2週間程度（1回につき3日間測定を実施）の頻度で巡回測定を行う。

3) 重力定期測定

生産・還元による重力変動の状況を把握するため、西山地区において既設及び平成9年度～平成10年度に設置した138カ所の重力測定点で4月、7月及び10月に重力定期測定を実施する。

なお、重力計を新たに1台導入し、重力測定の安定化を図る。

4) G P S 及びレベル測量

重力計算に必要な標高測定を重力定期測定と同時期に実施する。標高測定は、基本的にレベル測量により行い、G P S 測量によりレベル測量基準点の測量を実施し補完を行う。

以上の観測データを継続的に取得することにより、上記の観測方法が、重力測定による貯留層変動モニタリングのネットワークシステムとして有効に機能することを検証する。さらに、本地域での検証結果を踏まえ、地下水位観測井・重力観測点の配置、重力測定の頻度、レベル・G P S 測量方法等に関して、費用対効果を考慮した標準化の指針を検討する。

(2) 坑内重力計

柳津西山地域における既存の貯留層評価結果及び既存の重力ポストプロセッサを用いて、坑内重力値のモデル計算を行い、柳津西山地域でのフィールド試験実施の可能性を検討する。

(3) 解析・評価

1) 重力変動解析

① 浅層地下水位変動

・重力測定ネットワークシステム構築で取得した重力連続測定結果・地下水位連続観測結果を用いて地下水位変動と重力変動との相関関係を解析し、重力測定結果に対する地下水位変動の影響を評価する。

・地下水位変動の影響を除去する適切な補正方法を検討する。

② 不飽和帯密度変動

・昨年度の測定手法に関する検討結果をふまえ、TDR土壌水分計による測定を実施し、不飽和帯中の水分率の変動と重力の変動についての検討を行う。

2) 精密重力測定法の検討

① 鉛直重力勾配補正

- ・周辺地域内の数カ所において1 mの高低差で鉛直重力勾配の測定を実施する。また、鉛直重力勾配測定に対する局地的な地形の相違による影響の検討を実施する。

② 潮汐補正

- ・重力測定ネットワークシステム構築において24時間連続で取得する重力変動データを用いて、本地域に適切な潮汐モデルを確立し、そのモデルを用いて精密潮汐補正を実施する。

③ 貯留層ヒストリーマッチング・変動予測

- ・自然状態モデルの作成及びヒストリーマッチングを行う。
- ・坑井ヒストリーマッチング及び重力ポストプロセッサの導入を前提として、重力変動計算値と実測値とのマッチング計算を行う。

本年度の実施工程を第II-2-3表に示す。

第II-2-3表 平成11年度 実施工程表
TableII-2-3 Schedule of Development of Gravity Monitoring (FY 1999)

業務分担	研究開発項目	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	備 考
奥会津地熱	1. 重力測定ネットワークシステム構築													
	重力・地下水位連続測定	連続観測所:24時間連続他地点:重力は1回/2週程度(定期観測期間を除く)												
	重力定期測定	測定・データ処理			測定・データ処理			測定・データ処理						
	レベル測量及びGPS測定	測定・データ処理			測定・データ処理			測定・データ処理						
	データベース登録												データ登録	
	2. 坑内重力計													
	フィジビリティスタディ											坑井内重力のモデル計算・報告書作成		
	3. 解析・評価													
	(1) 重力変動解析													
	不飽和帯密度変動調査				TDR土壌水分計設置 データ収集・解析・報告書作成									
鉛直重力勾配補正の 適用性評価					フィールド試験		解析・報告書作成							
データ解析(地下水位変動、他)				校正係数検討・GPS基線測量解析他										
東北電力	3. 解析・評価													
	(2) 貯留層ヒストリーマッチング・ 変動予測													
	自然状態モデルの作成 及びヒストリーマッチング				自然状態モデルの作成及びヒストリーマッチング、他									
特記事項														
第1回定期測定(重力測定,水準測量):4/18～5/17					TDR土壌水分計設置:7/27									
第2回定期測定(重力測定,水準測量):7/13～8/12					TDR土壌水分率計測:7/28～									
第3回定期測定(重力測定,水準測量):10/14～11/13					鉛直重力勾配現地測定:8/2～8/9									

II-3 開発内容

II-3-1 重力測定ネットワークシステム構築

1. 重力測定点及び地下水観測井の整備

(1) 重力測定点の新設、移設及び改修

第II-3-1-1図に浅層地下水位観測井と重力測定点の位置を示す。

本調査地域では、1994年度から1997年度まで、東北電力(株)と奥会津地熱(株)の共同研究により年1回の定期的な重力測定とレベル測量が83測定点で実施されてきた。また、これらの測定点の周囲に平成9年度貯留層変動探査法開発 重力探査法開発「地下水位・重力測定」によって更に53測定点が設置され、重力測定とレベル測量及びGPS測量が実施された。平成10年度には、地下水位観測井No.9及びNo.10の近傍に2つの測定点(No.129及びNo.130)を新設し、測定点周囲の状況の変化や測定点の埋没や流失などのやむを得ない理由により10点の改修・移設を実施した。

さらに本年度は、測定点の埋没や欠損などのやむを得ない理由により2点の改修・移設を実施した。また、1999年2月に重力連続観測所の近傍に設置されたGPS測定用アンテナの基部にレベル測量用の基準点No.3125を新設した。GPS測定のアンテナ高はこの点を基準に測定され、レベル測量結果とGPS測定結果がこの点を介して結合されるようになった。なお、No.3135は水準測量専用の点であり、重力測定は実施していない。

ここで、測定点の「新設」とはその地点の重力変動を代表させる点を新しく設置することを指し、「移設」とは既存の測定点を、周辺地形補正值を変更しなければならない程度まで移動させることを指す。また、「改修」は測定点の水平位置は変わらないが、測定点の補修等によって標高を人工的に変化させたものを指す。重力変動及び標高変動を計算する際には、改修・移設された測定点は原則として新設された測定点と同様の扱いをするものとし、改修・移設前の測定点番号に2000を足して(既に改修・移設されたのものを再び改修・移設する場合には1000を足す)番号を変更し区別するものとする。例えば、No.14を改修・移設した場合、改修・移設された測定点の番号はNo.2014とし、過去のNo.14における重力と標高に対する変動は計算しないものとした。

第II-3-1-1表に本年度新設・改修・移設した重力測定点の一覧を示す。また、新設・移設した測定点について、各重力測定点を中心に半径20mの見取図(点の記)を作成した。これらの点の記を巻末資料「新設・移設重力測定点の点の記」として添付する。これらの点の記には、重力測定点を中心とした平・断面図、目標物からの距離、隣接重力測定点番号、方位等が付記してある。また、各重力測定点における周囲の状況及び重力計設置状況の写真を添付している。

(2) TDR土壌水分計の設置

1999年7月に地下水位観測井No.5サイトにTDR土壌水分計を設置した。観測装置の詳細と設置状況についてはII-3-1の6.で述べる。

2. 重力計検定

本年度は昨年度導入したScintrex CG-3M型重力計2台(CG-3M-2 : s/n 9704380 及び

第Ⅱ-3-1-1表 新設・改修・移設測定点一覧
Table Ⅱ-3-1-1 List of the gravity stations built, restored or removed.

測定点番号		工事種別	年月	理由	データの取り扱い
旧	新				
45	2045	改修	1998年7月	除雪作業による損壊	移設前と移設後の変動計算はしない。
101	2101	移設	1998年4月	道路改修による埋没	移設前と移設後の変動計算はしない。

CG-3M-3 : s/n 9704367)に加えて、本年度は同型重力計をさらに1台 (CG-3M-3 : s/n 9704367)を導入した。以下これらの重力計を単に「CG-3M-1」「CG-3M-2」及び「CG-3M-3」と呼ぶ。

重力測定には主としてCG-3M-2及びCG-3M-3を使用した。なお、前年度故障し測定に支障のあったCG-3M-1は、4月初旬まで連続測定に使用した後に筑波点検線で検定を実施し、Scintrex社に修理のため送った。同機は7月に修理を終えて同社より返送された。

(1) 筑波点検線における重力計検定

本調査で使用する重力計の特性を把握するために、昨年度と同様に筑波山麓において重力計検定を実施した。CG-3M-1については修理から帰ってきた7月とその後11月に検定を実施した。導入したばかりのCG-3M-3に関しては7月、9月及び11月にさらに検定を実施した。

測定方法は昨年と同様に建設省国土地理院の筑波点検線の重力測定点No.1, No.3, No.5, No.7, No.8及びNo.10で測定を実施した。第II-3-1-2図にこれらの重力測定点の位置を示す。測定はNo.8を起点として他の測定点を測定し最後にNo.8に戻る簡易法を採用した。

測定データの処理は後述する重力定期測定の際のデータ処理方法と同じ方法で実施した。

筑波点検線の測定点No.8に対するNo.1, No.3, No.5, No.7及びNo.10の測定重力差と建設省国土地理院によって1991年に決定されたこれらの測定点間の重力差を使用して、CG-3M-1, CG-3M-2及びCG-3M-3に関する較正係数(Calibration Correction Factor)を次式によって計算した。この較正係数をこれらの重力計で得た重力差に乗じることにより、国土地理院の筑波点検線を基準とした重力差を得ることができる：

$$k = \frac{\Delta g_i}{\Delta g_m}$$

ただし、ここで k は較正係数、 Δg_i は既知の重力差、 Δg_m は測定した重力差である。なお、建設省国土地理院の筑波点検線重力測定点No.8は実際の測定位置から約1.5mほど離れているが、重力差として建設省国土地理院の値をそのまま用いた。

第II-3-1-3図及び第II-3-1-2表に重力計の検定結果を示す。図の横軸は測定点No.8を基準とした既知の重力差 (Δg_i)、縦軸は測定した重力差から既知の重力差を差し引いたもの ($\Delta g_m - \Delta g_i$)を示す。1台の重力計について計算された係数の平均値をその重力計の較正係数とした。

重力計のCG-3M-1及びCG-3M-3の較正係数は1998年4月からの1年間でかなり変化している。2台の重力計は同時期に検定を実施しており、かつ両者の較正係数は互いに逆方向に変化しているため、この変化は点検線における重力値の変動ではなく、個々の重力計の特性変化に起因するものと考ええる。さらに、CG-3M-3も1999年4月から11月までに較正係数が急激に変化している。このような較正係数の変化は、Carone and Rymer(1999)でも指摘されている。同論文では本調査の2倍近い較正係数の変化が導入後1年間で認められ、その後較正係数の変化は収まっている。

定期測定の重力測定点と重力基準点の重力差は絶対値で最大102mGalである。標高差が200mあると約60mGalの重力差が生じ、本調査のように較正係数が400ppm程度も変化すれ

ば実際に重力変動が無くても $24\mu\text{Gal}$ の重力差の変化が生じてしまう。従って、較正係数の時間変化が大きい重力計を使用して、標高差の大きいあるいは重力差の大きい測定点でのモニタリングを実施する場合には、重力計の較正を精密に行うこと、また測定結果の速報性が要求される場合には調査地域での測定が実施される直前あるいは直後に重力計検定を実施することが必要であると考ええる。また、モニタリング用の測定点の選定の際には、極力測定点間の標高差が小さくなるようにした方が、重力計特性の時間変化の影響を受けにくくなる。

本調査では、定期測定結果及び巡回測定結果に関しては、日本縦断検定路線における検定を含めて5回のCG-3M-3の検定結果を測定時刻で線形補間したものを、較正係数として使用した。連続測定結果に関しては、振幅の小さい短周期の重力変動を論じる際にはCG-3M-2の較正係数の違いは問題にならないため、較正係数による補正を実施していない。

また、CG-3M-1の較正係数がScintrex社における修理の前後で非常に大きく変化していることがわかった。また、修理の前後で重力計の振幅係数であるGCAL1の設定値がScintrex社によって変更されていた。修理後の筑波検定で得られた較正係数は修理前の較正係数に比べかなり大きくなっており、GCAL1の設定値に問題があるように見受けられる。

(2) 日本縦断路線における重力計検定

前項で述べたように、較正係数の経時変化が重力変動測定に影響を及ぼしていることから、調査地域における重力変動測定の議論を行う上で、較正係数の決定精度を把握しておく必要がある。重力測定の誤差が測定路線によってそれほど変わらないと仮定すれば、検定路線における重力差が大きいほど重力測定誤差の寄与は小さくなり、より精密な較正係数の決定が可能になる。そこで、日本国内の一等重力点を利用したより測定範囲の広い重力計検定を実施した。本検定の目的は筑波点検線における較正係数の決定精度の評価にある。これまでもScintrex重力計の一等重力点を利用した検定は都筑・山本(1993)や杉原・野崎(1998)によって実施されており、高精度での検定結果が得られている。

使用した一等重力点は北から、札幌GS・千歳GS・羽田GS・鹿児島GS・那覇GSとした。このうち札幌GS・鹿児島GS・那覇GSでは約16時間の連続測定を実施した。また、検定期間中及びその直前直後に、筑波点検線重力点No.1、鹿児島空港、那覇空港等で臨時測定を実施している。これらの臨時測定は筑波点検線との結合及びデータ解析の補助的な役割をもつ。

下表は柳津西山地域及び重力検定路線における測定重力値の範囲を示したものである：

測定地域名	重力値 (mgal)		重力差 (mgal)
	最大	最小	
柳津西山地域*	979, 899.388	979, 785.501	113.888
筑波点検線**	N/A	N/A	191.277
日本縦断検定路線***	980, 477.549	979, 095.925	1, 381.624

*注) 1999年度秋季定期測定結果による。

**注) 筑波点検線では国土地理院により測定点間の重力差のみが与えられている。

***注) JGSN96重力値。国土地理院測地部(1997)による。

第 II-3-1-2表
Table II-3-1-2

筑波点検線における重力計検定結果一覧表
List of the gravimeter calibration results in Tsukuba Calibration Range.

Date	April 2-3, 1998				November 10, 1998		March 2, 1999	
Gravimeter	CG-3M-1		CG-3M-2		CG-3M-R1		CG-3M-2	
Station No.	Δg_n (mgal)	$\Delta g/\Delta g_n$	Δg_n (mgal)	$\Delta g/\Delta g_n$	Δg_n (mgal)	$\Delta g/\Delta g_n$	Δg_n (mgal)	$\Delta g/\Delta g_n$
1	101.072	0.999258	101.047	0.999505	100.994	1.000030	101.019	0.999782
3	85.142	0.999331	85.122	0.999565	85.067	1.000212	85.093	0.999906
5	59.079	0.999052	59.069	0.999221	59.028	0.999915	59.055	0.999458
7	24.691	0.999230	24.681	0.999635	24.669	1.000122	24.671	1.000041
8	0.000		0.000		0.000		0.000	
10	-90.305	0.999723	-90.325	0.999502				
Calibration Factor (k)		0.999319		0.999486		1.000070		0.999797

Date	April 14-15, 1999				July 7-8, 1999			
Gravimeter	CG-3M-1		CG-3M-2		CG-3M-3		CG-3M-3	
Station No.	Δg_n (mgal)	$\Delta g/\Delta g_n$	Δg_n (mgal)	$\Delta g/\Delta g_n$	Δg_n (mgal)	$\Delta g/\Delta g_n$	Δg_n (mgal)	$\Delta g/\Delta g_n$
1	101.089	0.999090	101.019	0.999782	101.067	0.999307	101.056	0.999416
3	85.156	0.999166	85.097	0.999859	85.133	0.999436	85.125	0.999530
5	59.093	0.998815	59.023	1.000000	59.081	0.999018	59.072	0.999171
7	24.691	0.999230	24.674	0.999919	24.683	0.999554	24.694	
8	0.000		0.000		0.000		0.000	
10	-90.336	0.999380	-90.323	0.999524	-90.341	0.999325	-90.330	0.999446
Calibration Factor (k)		0.999136		0.999817		0.999328		0.999391

Date	September 16, 1999		October 12, 1999		November 25, 1999		November 26, 1999	
Gravimeter	CG-3M-1		CG-3M-3		CG-3M-3		CG-3M-1	
Station No.	Δg_n (mgal)	$\Delta g/\Delta g_n$	Δg_n (mgal)	$\Delta g/\Delta g_n$	Δg_n (mgal)	$\Delta g/\Delta g_n$	Δg_n (mgal)	$\Delta g/\Delta g_n$
1	98.656	1.023729	101.019	0.999782	101.022	0.999753	98.658	1.023708
3	83.105	1.023825	85.099	0.999835	85.104	0.999777	83.112	1.023739
5	57.669	1.023479	59.053	0.999492	59.053	0.999492	57.664	1.023568
7	24.103	1.023607	24.678	0.999757	24.683	0.999554	24.095	1.023947
8	0.000		0.000		0.000		0.000	
10	-88.195	1.023641	-90.320	0.999557	-90.301	0.999767	-88.201	1.023571
Calibration Factor (k)		1.023656		0.999685		0.999669		1.023707

第 II-3-1-3表
Table II-3-1-3

日本縦断路線における重力計検定結果一覧表
List of the gravimeter calibration results based on the measurements at JGSN96 gravity stations.

重力計: CG-3M-2
較正係数: 0.9999728
ドリフト定数項: 4.215041E+03
ドリフト1次係数: -7.846203E-02
ドリフト2次係数: -8.728196E-03

重力計: CG-3M-3
較正係数: 0.9999892
ドリフト定数項: 3.933542E+03
ドリフト1次係数: 1.763923E-01
ドリフト2次係数: -2.465654E-04

重力点	時刻	読み値 (mgal)	予測値 (mgal)	残差 (mgal)
羽田GS	2000/3/28 9:36	3974.493	3974.500	-0.008
千歳GS	2000/3/28 13:08	4636.442	4636.446	-0.004
札幌GS	2000/3/28 15:49	4692.431	4692.422	0.009
札幌GS	2000/3/29 7:40	4692.340	4692.348	-0.008
千歳GS	2000/3/29 9:48	4636.361	4636.349	0.012
羽田GS	2000/3/29 12:33	3974.351	3974.374	-0.023
鹿児島GS	2000/3/29 17:10	3685.995	3685.978	0.017
鹿児島GS	2000/3/30 8:40	3685.894	3685.893	0.001
那覇GS	2000/3/30 16:50	3310.573	3310.574	-0.001
那覇GS	2000/3/31 9:19	3310.474	3310.472	0.002
那覇GS	2000/3/31 9:42	3310.467	3310.469	-0.002
羽田GS	2000/3/31 14:56	3974.075	3974.078	-0.003

重力点	時刻	読み値 (mgal)	予測値 (mgal)	残差 (mgal)
羽田GS	2000/3/28 9:35	3693.370	3693.371	-0.002
千歳GS	2000/3/28 13:07	4355.367	4355.369	-0.002
札幌GS	2000/3/28 15:49	4411.382	4411.378	0.003
札幌GS	2000/3/29 7:40	4411.494	4411.494	0.000
千歳GS	2000/3/29 9:49	4355.498	4355.521	-0.023
羽田GS	2000/3/29 12:32	3693.563	3693.568	-0.006
鹿児島GS	2000/3/29 17:10	3405.215	3405.225	-0.010
鹿児島GS	2000/3/30 8:40	3405.333	3405.338	-0.006
那覇GS	2000/3/30 16:50	3030.121	3030.120	0.001
那覇GS	2000/3/31 9:19	3030.242	3030.240	0.001
那覇GS	2000/3/31 9:43	3030.241	3030.243	-0.001
羽田GS	2000/3/31 14:56	3693.923	3693.935	-0.012

日本縦断検定路線は本調査地域の重力測定範囲の10倍以上、筑波点検線の6倍以上の十分な幅を持つ。これらの重力点間は飛行機による迅速な移動が可能で、移動時間を2時間30分以内にしてレベルリング不足による短期ドリフトの影響を避けることができる。

第II-3-1-3表に検定結果について示す。また、第II-3-1-3図に筑波点検線における結果とともに較正係数を図示した。

3. 標高測定

(1) 使用機器

レベル測量には、公共測量作業規定に準じた二級及び三級レベル測量の仕様を満たす次の機器またはこれと同等以上の機器を用いた。

・二級レベル測量	レベ ル：測器舎製B1型自動レベル スタッフ：インバール製水準標尺
・三級レベル測量	レベ ル：測器舎製B2型自動レベル スタッフ：マイバックス グラスファイバー製水準標尺

G P S 測量には、次の2周波数型受信機1台を使用した：

2周波数型受信機：Trimble Navigation社製 4000Ssi GPS受信装置

なお、これらの測量機器は次の精度を有している：

垂直精度： $10\text{mm} + 1\text{ppm} \times L$ （基線長： $L \leq 10\text{km}$ ）

水平精度： $5\text{mm} + 1\text{ppm} \times L$ （基線長： $L \leq 10\text{km}$ ）

(2) 測 定 方 法

1) レベル測量

第II-3-1-4図に本年度のレベル測量路線を示す。

レベル測量の精度は、公共測量作業規定の仕様を満たす閉合許容誤差（ ε ）とし、閉合距離（ D ）は10km以下とした。

二級レベル測量： $\varepsilon \leq 5 \times D^{1/2} \text{mm}$ （閉合距離： $D \leq 10\text{km}$ ）

三級レベル測量： $\varepsilon \leq 10 \times D^{1/2} \text{mm}$ （閉合距離： $D \leq 10\text{km}$ ）

また、移設した重力測定点について、周辺地形補正に使用するため、重力測定点の中心から20mまでの範囲の地形断面測量を実施した。断面は傾斜を考慮して2断面とし、断面位置及び断面を点の記に記載した。

2) G P S 測量

G P S 測量は静止測位法にて実施した。G P S 受信機1台を重力連続観測所内に設置し、その近傍に設置したアンテナで受信した信号を連続的に記録した。

G P S アンテナの基部にはレベル測量用基準点No.3125が設置されている（第II-3-1-5図参照）。同基準点と他の重力測定点をレベル測量路線で結合することにより、各測

定点の標高を得ることができる。

(3) データ処理方法

本年度は、平成9年度から本年度までに取得されてきた測定データの全てについてデータ処理を実施し、平成9年秋から平成11年秋までの約2年間の標高変動を計算した。データの処理は、1)GPS測量データ解析によるレベル測量基準点(No.3125, No.9)の標高変動の計算、2)レベル測量結果を利用したその他の重力測定点の標高変動の計算の2つの工程で実施した。以下に各工程における解析方法の詳細について述べる。

1) GPS測量データ解析によるレベル測量基準点(No.3125, No.9)の標高変動の計算

平成9年度及び平成10年度の定期測定期間中には、レベル測量基準点として重力測定点No.9において2周波型GPS受信機(Trimble 4800)による測定が数日間ずつ実施されている。また、本年度はレベル測量基準点No.3125においてGPS測量が実施されている。これらの測量基準点の標高を調査地域周辺の電子基準点のGPS測定データを用いた基線解析により決定した。これらの測定点の標高は、①基線解析によるNo.9及びNo.3125における楕円体高の決定、②No.3125における標高の決定、及び③No.9における標高の決定の3つの工程により実施した。以下に各工程の詳細について述べる：

① 基線解析によるNo.9及びNo.3125における楕円体高の決定

ここでは電子基準点を不動点としてその位置座標を与えて、レベル測量基準点の位置を決定した。基線解析の結果が使用する電子基準点によってどのくらい異なるかを検討するために、調査地域周辺の電子基準点3点のデータを用い、各電子基準点からの基線を別々に解析した。

基線解析は下記の要領で実施した：

使用した電子基準点： 金山(950204)・福島南郷(950207)・下郷(950209)

電子基準点座標値： 電子基準点座標値1997(国土地理院, 1998)を使用。

使用したソフトウェア： 基線解析 GPSurvey ver.2.2(Trimble Navigation, Inc.)

座標変換 trns96(飛田, 1997)

精密暦： 米国ジェット推進研究所

(<http://igscb.jpl.nasa.gov/igscb/product/>)より入手。

電離層遅延補正： 実施。

対流圏遅延補正： 同上解析ソフトウェアの標準の気象条件を使用。

対流圏モデル=Saastamoinenの式を使用。

解析区間： 最大1日とする。但し、平成9年度及び平成10年度はNo.9で日中6時間～8時間程度の測定しか実施していないため、解析区間はその測定時間に準ずる。

② No.3125における標高の決定

①で得られたNo.3125における楕円体高から座標変換プログラムtky2wgs ver.3.5(Tobita, 1994)により同地点の標高を計算した。同プログラムはWGS84座標系と

日本測地座標系の変換を行うソフトウェアであり、ジオイドモデルに最新の「日本のジオイド96」を使用している。

③ No.9における標高の決定

平成11年度のNo.9の標高は②で求めたNo.3125の標高とレベル測量によるNo.3125～No.9間の標高差により計算した。

平成9年度及び平成10年度のNo.9の標高は、上記②と同様にして楕円体高から座標変換プログラムtky2wgs ver.3.5によって計算できるが、実際に計算するとNo.9の平成10年度秋季と平成11年度春季の間を境に系統的に10cm近い差を生じる。これは同プログラムによるジオイドモデルの持つ誤差と考えられる。各点におけるWGS84楕円体高と標高の差はその点におけるジオイド高を反映したものであり（ジオイド高は日本測地系の準拠楕円体からのジオイドの高さを指す）、ジオイド面に関する近似が十分でないと標高が所期の精度では求まらない。この標高変動が実際のものであれば平成10年度秋季と平成11年度春季の間で30 μ gal近い重力変動が観測されるはずであるが、実際のNo.9における重力変動はきわめて小さい。

このため、少なくとも平成9年から平成11年にかけてはNo.9の標高変動は殆どないものと仮定して、求めるべき平成9年度及び平成10年度のNo.9における標高の平均値が平成11年度のNo.9の標高平均値と等しくなるように（No.9楕円体高－No.9標高）の値を一定値として定め、標高を決定した。

2) レベル測量結果を利用したその他の重力測定点の標高変動の計算

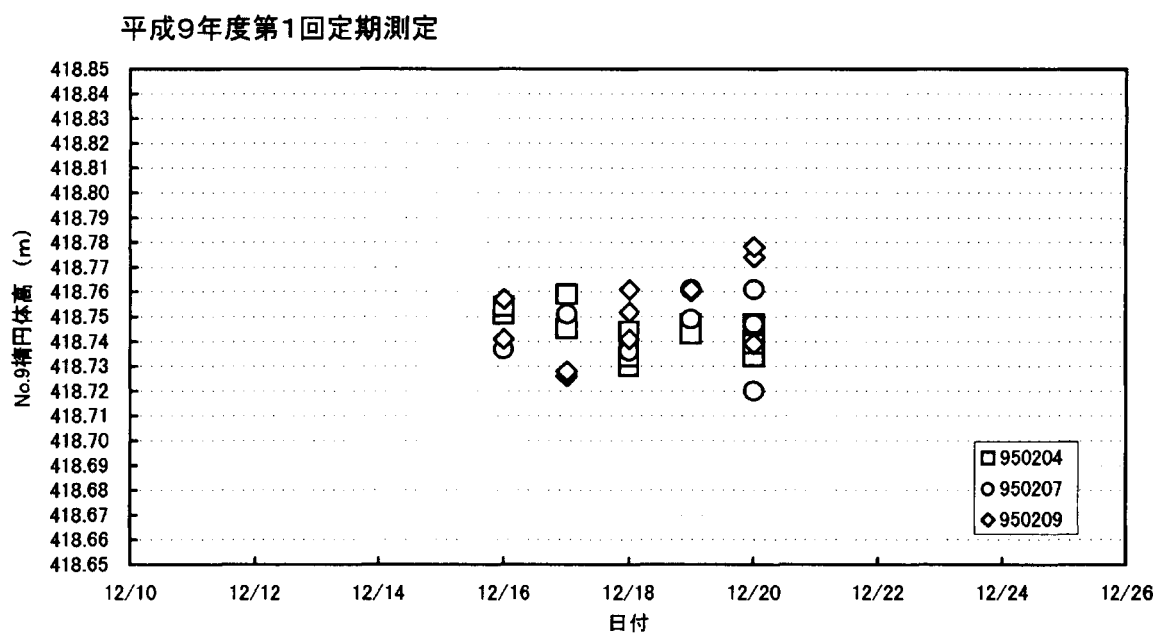
上記1)で決定されたレベル測量基準点における標高と各定期測定レベル測量から得られた標高差データを用いて標高を計算した。平成9年度及び平成10年度の標高についてはNo.9を基準点とし、平成11年度についてはNo.3135を基準点とした。

なお、平成9年度及び平成10年度の測定点の一部では、レベル測量基準点No.9以外のGPS測定点を基点とし、No.9と直接結合のできない測定点がある。これらの測定点の標高は、その前後の定期観測で決定されている標高の線形補間値を標高値として採用した。但し、平成10年度春季に移設された測定点No.3030だけは移設当初にレベル測量を実施できなかったため、線形補間ができなかった。このため、同点の平成10年度の春季及び夏季の標高は、隣接する測定点No.29と同じ変動をすると仮定して計算した。

(4) データ処理結果

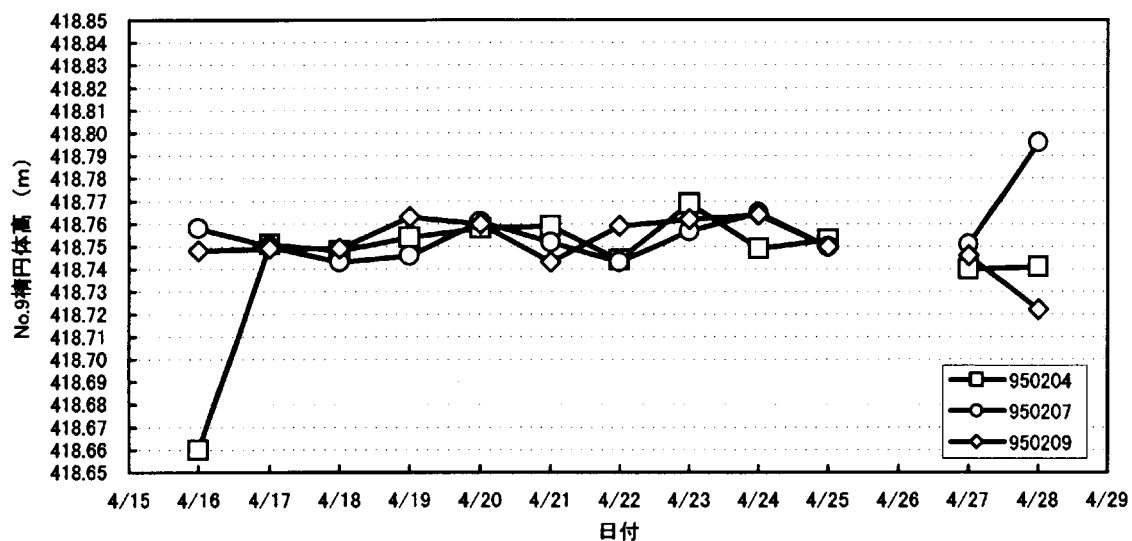
付帯資料にGPS基線解析結果を示す。同資料には結果が解析区間毎の結果が電子基準点別に整理されている。緯度及び経度はほぼ解析区間・電子基準点の別なくばらつきは殆どないが、楕円体高はかなりばらついている。第II-3-1-6～第II-3-1-8図にはGPS基線解析による楕円体高の変化を定期観測別に示す。楕円体高は最大10cm程度の変化があり、特定の日に特定の電子基準点との基線解析だけで楕円体高を決定すると、数cmのオーダーの誤差が生じる可能性があることがわかる。平成10年度及び平成11年度はともに第2回（夏季）の定期測定期間にそのばらつきが最も顕著になり、また、金山（950204）との基線解析結果が低めに、下郷（950205）が高めに解析される傾向が認められる。

第II-3-1-9図に最適なGPS測定期間長を検討した結果について示す。これは平成11年

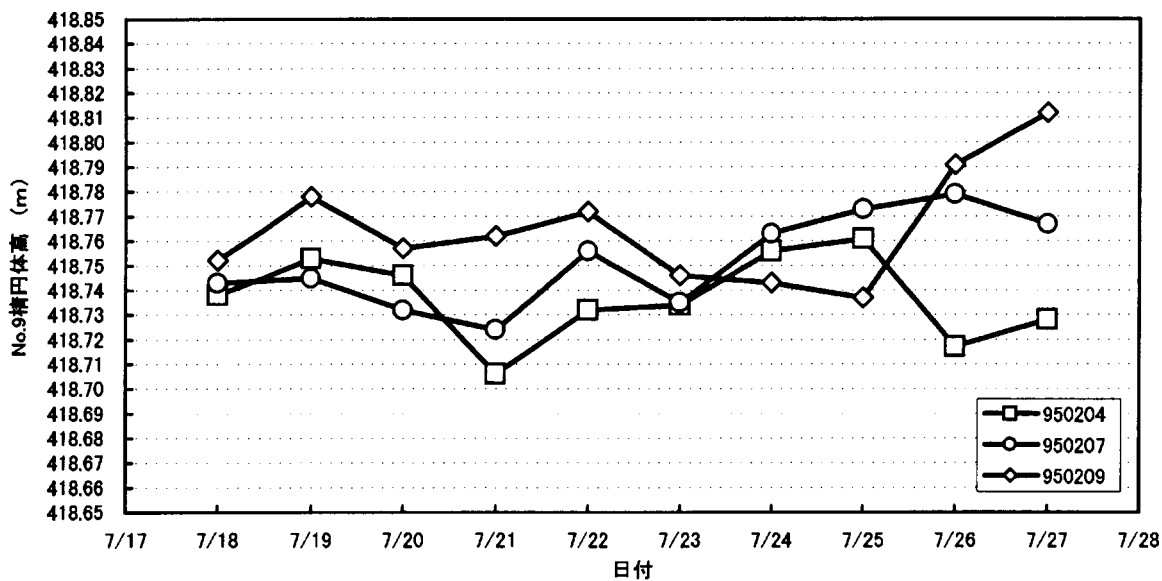


第 II-3-1-6図 GPS基線解析による測定点No.9の楕円体高の変化 (1997年度)
 Fig. II-3-1-6 Ellipsoidal height change at station No.9 in 1997.

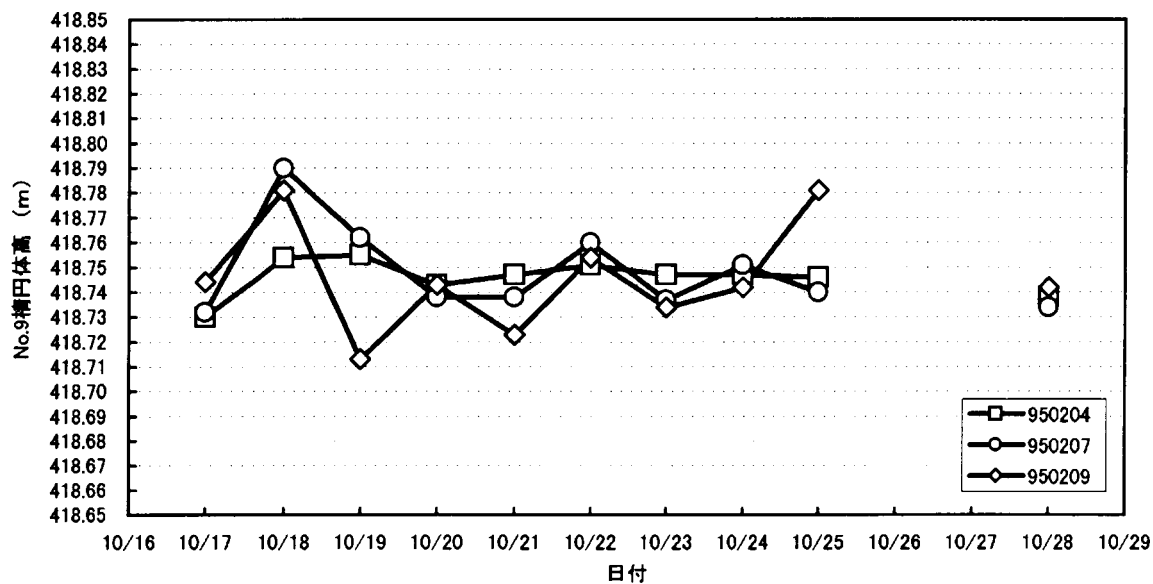
平成10年度第1回定期測定



平成10年度第2回定期測定

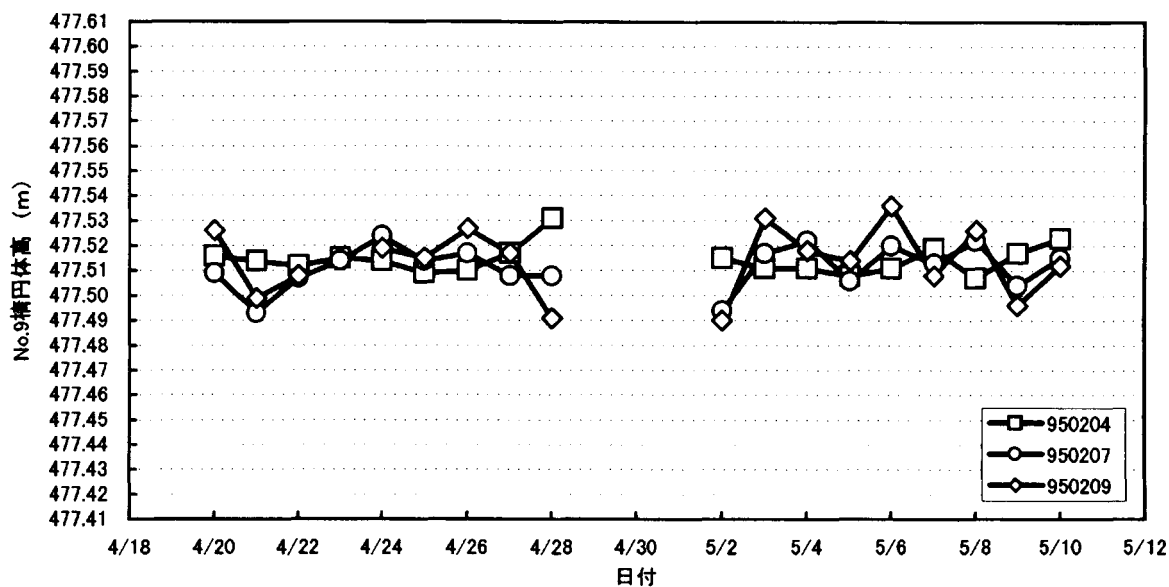


平成10年度第3回定期測定

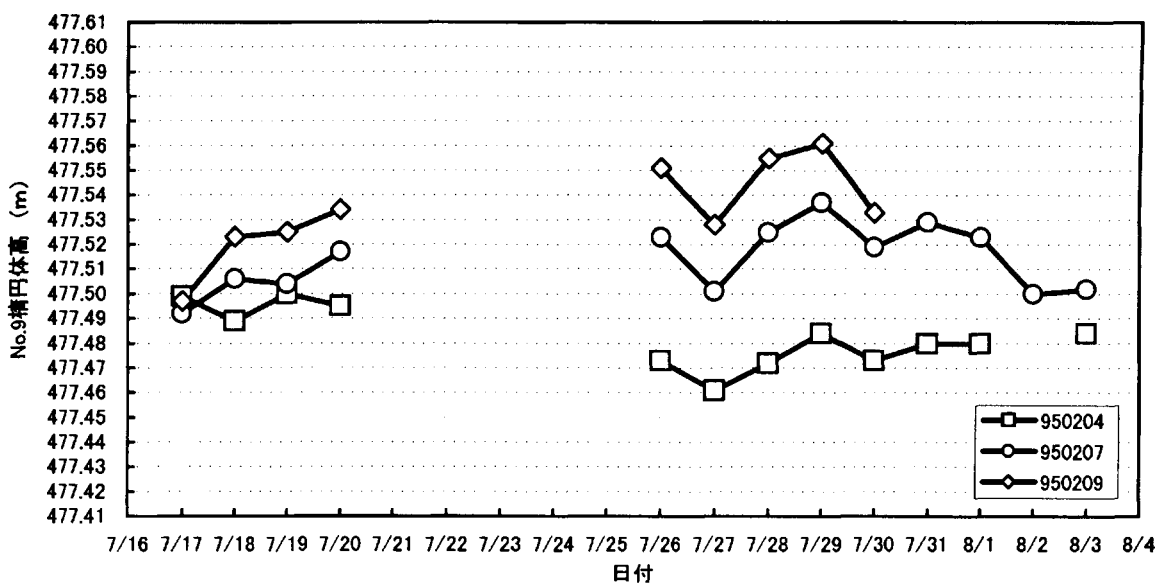


第 II-3-1-7図 GPS基線解析による測定点No.9の楕円体高の変化 (1998年度)
Fig. II-3-1-7 Ellipsoidal height change at station No.9 in 1998.

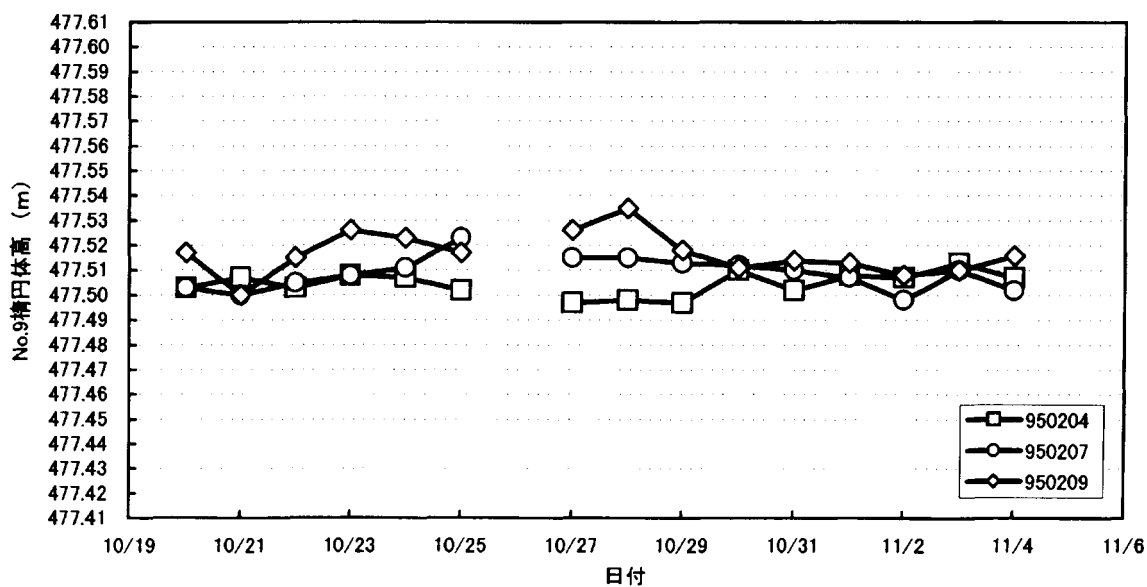
平成11年度第1回定期測定



平成11年度第2回定期測定



平成11年度第3回定期測定



第 II-3-1-8図 GPS基線解析による測定点No.3125の楕円体高の変化 (1999年度)
Fig. II-3-1-8 Ellipsoidal height change at station No.3125 in 1999.

第Ⅱ-3-1-4表 GPS基線解析結果の総括
Table Ⅱ-3-1-4 Summary of GPS baseline analysis.

緯度 (WGS84)				
測定	電子基準点別計算値			平均值
	950204	950207	950209	度 度 分 秒
1997-1	37.4496523	37.4496523	37.4496523	37.4496523 (37 26 58.74822)
1998-1	37.4496523	37.4496523	37.4496523	37.4496523 (37 26 58.74831)
1998-2	37.4496523	37.4496523	37.4496523	37.4496523 (37 26 58.74843)
1998-3	37.4496522	37.4496523	37.4496523	37.4496523 (37 26 58.74817)
1999-1	37.4413110	37.4413111	37.4413111	37.4413111 (37 26 28.71993)
1999-2	37.4413111	37.4413111	37.4413112	37.4413111 (37 26 28.72018)
1999-3	37.4413111	37.4413111	37.4413111	37.4413111 (37 26 28.71996)

経度 (WGS84)				
測定	電子基準点別計算値			平均值
	950204	950207	950209	度 度 分 秒
1997-1	139.7015571	139.7015571	139.7015571	139.7015571 (139 42 5.60566)
1998-1	139.7015571	139.7015571	139.7015571	139.7015571 (139 42 5.60558)
1998-2	139.7015571	139.7015572	139.7015571	139.7015571 (139 42 5.60553)
1998-3	139.7015571	139.7015571	139.7015571	139.7015571 (139 42 5.60564)
1999-1	139.7042038	139.7042039	139.7042039	139.7042039 (139 42 15.13406)
1999-2	139.7042039	139.7042039	139.7042039	139.7042039 (139 42 15.13391)
1999-3	139.7042038	139.7042038	139.7042039	139.7042038 (139 42 15.13393)

楕円体高(WGS84)				
測定	電子基準点別計算値			平均值
	950204	950207	950209	m
1997-1	418.744	418.746	418.752	418.747
1998-1	418.751	418.752	418.754	418.753
1998-2	418.737	418.752	418.765	418.751
1998-3	418.746	418.748	418.746	418.747
1999-1	477.514	477.512	477.514	477.513
1999-2	477.483	477.514	477.534	477.510
1999-3	477.505	477.509	477.517	477.510

*1997年及び1998年は重力測定点No. 9でGPS測定を実施。

*1999年はGPS固定点No.3125でGPS測定を実施。

第Ⅱ-3-1-5表 レベル測量成果一覧表 (1999年度春季) (1/2)
Table Ⅱ-3-1-5 List of elevations determined by the leveling in spring 1999.

No.	標高1 (m)	標高2 (m)	誤差 (mm)	平均標高 (m)	No.	標高1 (m)	標高2 (m)	誤差 (mm)	平均標高 (m)
1001	285.106		—	285.106	2035	449.537		—	449.537
1002	412.689		—	412.689	36	357.660	357.661	1	357.661
1003	334.533		—	334.533	3037	400.281	400.282	1	400.282
1004	425.649		—	425.649	38	469.742	469.745	3	469.744
1005	357.877		—	357.877	39	555.037	555.043	6	555.040
1006	402.305		—	402.305	40	579.086	579.094	8	579.090
1007	331.084		—	331.084	41	506.363		—	506.363
1008	371.327		—	371.327	42	488.106	488.109	3	488.108
2001	324.866	324.865	1	324.866	43	484.158	484.162	4	484.160
2	333.455	333.456	1	333.456	44	456.849	456.850	1	456.850
3	337.021	337.022	1	337.023	45	—	—	—	—
4	344.973	344.975	2	344.974	46	401.692	401.691	1	401.692
5	352.796		—	352.796	47	402.389		—	402.389
6	379.573		—	379.573	48	408.015		—	408.015
7	409.430		—	409.430	49	361.239	361.237	2	361.238
8	413.564		—	413.564	50	348.155		—	348.155
9	377.064		—	377.064	51	398.159	398.160	1	398.160
2010	320.895		—	320.895	3052	544.308	544.317	9	544.313
11	302.178	302.178	1	302.179	53	494.460	494.470	10	494.465
12	336.874	336.867	8	336.871	54	457.656	457.663	7	457.660
13	369.419	369.411	8	369.415	3055	482.303	482.307	4	482.305
2014	371.654	371.653	0	371.654	56	323.251		—	323.251
15	364.581	364.582	0	364.582	57	392.045		—	392.045
2016	376.067		—	376.067	58	424.414		—	424.414
17	375.664		—	375.664	59	426.724		—	426.724
18	386.263		—	386.263	60	340.462	340.462	0	340.462
19	391.327		—	391.327	61	347.039	347.040	1	347.040
2020	403.751		—	403.751	62	368.777	368.777	0	368.777
21	381.100	381.097	3	381.100	63	386.554	386.557	3	386.556
22	312.569		—	312.569	64	419.657	419.659	2	419.658
2023	377.697		—	377.697	65	445.748		—	445.748
24	362.673		—	362.673	66	418.116	418.120	4	418.118
25	353.309		—	353.309	67	465.021	465.028	7	465.025
26	380.109		—	380.109	68	534.392		—	534.392
27	370.794		—	370.794	69	349.897	349.898	1	349.898
28	345.732		—	345.732	70	362.088	362.089	1	362.089
29	349.244		—	349.244	71	379.660	379.660	0	379.660
2030	319.266		—	319.266	2072	402.852	402.851	1	402.852
31	404.479	404.478	1	404.479	3073	351.878	351.878	0	351.878
32	402.693	402.692	1	402.693	74	368.097	368.097	0	368.097
33	400.128	400.127	1	400.128	75	379.406		—	379.406
34	457.845	457.844	1	457.845	76	405.388		—	405.388

第Ⅱ-3-1-5表 レベル測量成果一覧表 (1999年度春季) (2/2)
Table Ⅱ-3-1-5 List of elevations determined by the leveling in spring 1999.

No.	標高1 (m)	標高2 (m)	誤差 (mm)	平均標高 (m)	No.	標高1 (m)	標高2 (m)	誤差 (mm)	平均標高 (m)
77	429.450		—	429.450	119	434.907		—	434.907
78	532.244		—	532.244	120	453.621	453.620	1	453.621
79	375.772		—	375.772	121	427.900	427.896	4	427.898
80	387.641		—	387.641	122	371.411	371.406	5	371.409
81	259.051		—	259.051	123	320.774		—	320.774
82	305.108	305.109	1	305.109	124	301.319		—	301.319
83	310.645	310.646	1	310.646	125	—	—	—	—
2084	295.415	295.411	4	295.413	126	413.273	413.275	2	413.274
85	352.528	352.532	4	352.530	127	451.298	451.295	3	451.297
86	404.456		—	404.456	128	435.846		—	435.846
87	586.973		—	586.973	129	384.237		—	384.237
88	572.320	572.322	2	572.321	130	385.998		—	385.998
89	502.946	502.951	5	502.949	2046	401.848		—	401.848
90	461.566	461.566	0	461.566	2125	435.828		—	435.828
91	405.597	405.592	5	405.595	3125	435.757		—	435.757
92	374.741		—	374.741	1995	285.844		—	285.844
93	428.126	428.131	5	428.129				—	
94	476.413	476.415	2	476.414				—	
95	464.967	464.967	0	464.967				—	
2096	450.169		—	450.169				—	
97	405.646	405.648	2	405.647				—	
98	427.164	427.162	2	427.163				—	
99	436.418	436.412	6	436.415				—	
100	433.233	433.225	8	433.229				—	
2101	474.161	474.157	4	474.159				—	
102	567.291	567.290	1	567.291				—	
103	542.872		—	542.872				—	
104	510.284	510.281	3	510.283				—	
105	513.487	513.489	2	513.488				—	
106	640.575	640.571	4	640.573				—	
107	808.953		—	808.953				—	
108	593.907		—	593.907				—	
109	510.376		—	510.376				—	
110	435.292	435.290	2	435.291				—	
111	417.997		—	417.997				—	
112	403.008	403.007	1	403.008				—	
113	442.086		—	442.086				—	
114	418.282		—	418.282				—	
115	491.990		—	491.990				—	
116	471.394	471.392	2	471.393				—	
117	416.507	416.501	6	416.504				—	
118	367.619	367.622	3	367.621				—	

第Ⅱ-3-1-6表 レベル測量成果一覧表 (1999年度夏季) (1/2)
Table Ⅱ-3-1-6 List of elevations determined by the leveling in summer 1999.

No.	標高1 (m)	標高2 (m)	誤差 (mm)	平均標高 (m)	No.	標高1 (m)	標高2 (m)	誤差 (mm)	平均標高 (m)
1001	285.109		—	285.109	2035	449.525		—	449.525
1002	412.687		—	412.687	36	357.675	357.674	1	357.675
1003	334.533		—	334.533	3037	400.268	400.264	4	400.266
1004	425.647		—	425.647	38	469.684	469.683	1	469.684
1005	357.879		—	357.879	39	554.923	554.922	1	554.923
1006	402.307		—	402.307	40	578.957	578.957	0	578.957
1007	331.090		—	331.090	41	506.335		—	506.335
1008	371.339		—	371.339	42	488.090	488.089	1	488.090
2001	324.852	324.852	0	324.852	43	484.144	484.141	3	484.143
2	333.445	333.446	1	333.446	44	456.845	456.842	3	456.844
3	337.020	337.020	0	337.020	2045	429.415		—	429.415
4	344.974	344.975	1	344.975	46	401.699		—	401.699
5	352.800		—	352.800	47	402.387		—	402.387
6	379.574		—	379.574	48	407.999		—	407.999
7	409.430		—	409.430	49	361.241	361.239	2	361.240
8	413.563		—	413.563	50	348.159		—	348.159
9	377.063		—	377.063	51	398.157	398.159	2	398.158
2010	320.898		—	320.898	3052	544.205	544.201	4	544.203
11	302.192	302.193	1	302.193	53	494.386	494.383	3	494.385
12	336.871	336.876	5	336.874	54	457.601	457.598	3	457.600
13	369.402	369.405	3	369.404	3055	482.237	482.234	3	482.236
2014	371.656	371.656	0	371.656	56	323.261		—	323.261
15	364.582	364.584	2	364.583	57	392.051		—	392.051
2016	376.076		—	376.076	58	424.408		—	424.408
17	375.674		—	375.674	59	426.720		—	426.720
18	386.270		—	386.270	60	340.467	340.468	1	340.468
19	391.335		—	391.335	61	347.040	347.044	4	347.042
2020	403.758		—	403.758	62	368.763	368.764	1	368.764
21	381.088	381.089	1	381.089	63	386.530	386.534	4	386.532
22	312.585		—	312.585	64	419.616	419.617	1	419.617
2023	377.699		—	377.699	65	445.693		—	445.693
24	362.676		—	362.676	66	418.105	418.106	1	418.106
25	353.311		—	353.311	67	464.983	464.984	1	464.984
26	380.111		—	380.111	68	534.316		—	534.316
27	370.794		—	370.794	69	349.898	349.901	3	349.900
28	345.734		—	345.734	70	362.090	362.092	2	362.091
29	349.245		—	349.245	71	379.658	379.663	5	379.661
2030	319.266		—	319.266	2072	402.844	402.845	1	402.845
31	404.472	404.474	2	404.473	3073	351.881	351.880	1	351.881
32	402.685	402.685	0	402.685	74	368.092	368.094	2	368.093
33	400.126	400.124	2	400.125	75	379.395		—	379.395
34	457.827	457.825	2	457.826	76	405.385		—	405.385

第Ⅱ-3-1-6表 レベル測量成果一覧表 (1999年度夏季) (2/2)
Table Ⅱ-3-1-6 List of elevations determined by the leveling in summer 1999.

No.	標高1 (m)	標高2 (m)	誤差 (mm)	平均標高 (m)	No.	標高1 (m)	標高2 (m)	誤差 (mm)	平均標高 (m)
77	429.436		—	429.436	119	434.867		—	434.867
78	532.153		—	532.153	120	453.572	453.567	5	453.570
79	375.763		—	375.763	121	427.862	427.854	8	427.858
80	387.628		—	387.628	122	371.391	371.386	5	371.389
81	259.066		—	259.066	123	320.783		—	320.783
82	305.104	305.108	4	305.106	124	301.336		—	301.336
83	310.635	310.637	2	310.636	2125	435.824			435.824
2084	295.407	295.407	0	295.407	3125	435.754		—	435.754
85	352.494	352.500	6	352.497	126	413.264	413.265	1	413.265
86	404.392		—	404.392	127	451.249	451.241	8	451.245
87	586.875		—	586.875	128	435.819		—	435.819
88	572.234	572.234	0	572.234	129	384.238		—	384.238
89	502.893	502.891	2	502.892	130	386.005		—	386.005
90	461.532	461.529	3	461.531	1995	285.846		—	285.846
91	405.590	405.592	2	405.591					
92	374.756		—	374.756					
93	428.113	428.109	4	428.111					
94	476.384	476.378	6	476.381					
95	464.935	464.931	4	464.933					
2096	450.141		—	450.141					
97	405.636	405.634	2	405.635					
98	427.145	427.143	2	427.144					
99	436.396	436.395	1	436.396					
100	433.208	433.209	1	433.209					
2101	474.132	474.131	1	474.132					
102	567.240	567.235	5	567.238					
103	542.823		—	542.823					
104	510.242	510.244	2	510.243					
105	513.442	513.443	1	513.443					
106	640.485	640.495	10	640.490					
107	808.840		—	808.840					
108	593.819		—	593.819					
109	510.334		—	510.334					
110	435.289	435.288	1	435.289					
111	418.005		—	418.005					
112	402.996	402.998	2	402.997					
113	442.040		—	442.040					
114	418.261		—	418.261					
115	491.938		—	491.938					
116	471.352	471.354	2	471.353					
117	416.482	416.479	3	416.481					
118	367.619	367.621	2	367.620					

第Ⅱ-3-1-7表 レベル測量成果一覧表（1999年度秋季）（1/2）
Table Ⅱ-3-1-7 List of elevations determined by the leveling in autumn 1999.

No.	標高1 (m)	標高2 (m)	誤差 (mm)	平均標高 (m)	No.	標高1 (m)	標高2 (m)	誤差 (mm)	平均標高 (m)
1001				285.106	2035	449.528		—	449.528
1002	412.685		—	412.685	36	357.670	357.668	2	357.669
1003	334.529		—	334.529	3037	400.270	400.269	1	400.270
1004	425.644		—	425.644	38	469.697	469.702	5	469.700
1005	357.870		—	357.870	39	554.945	554.944	1	554.945
1006	402.300		—	402.300	40	578.982	578.982	0	578.982
1007	331.078		—	331.078	41	506.352		—	506.352
1008	371.329		—	371.329	42	488.101	488.100	1	488.101
2001	324.853	324.856	3	324.855	43	484.153	484.153	0	484.153
2	333.451	333.453	2	333.452	44	456.847	456.846	1	456.847
3	337.022	337.025	3	337.024	2045	429.413		—	429.413
4	344.972	344.975	3	344.974	2046	401.843		—	401.843
5	352.795		—	352.795	47	402.384		—	402.384
6	379.569		—	379.569	48	408.008		—	408.008
7	409.426		—	409.426	49	361.239	361.235	4	361.237
8	413.560		—	413.560	50	348.152		—	348.152
9	377.060		—	377.060	51	398.158	398.159	1	398.159
2010	320.895		—	320.895	3052	544.216	544.219	3	544.218
11	302.179	302.182	3	302.181	53	494.392	494.396	4	494.394
12	336.862	336.868	6	336.865	54	457.591	457.595	4	457.593
13	369.398	369.403	5	369.401	3055	482.236	482.237	1	482.237
2014	371.636	371.648	12	371.642	56	323.247		—	323.247
15	364.564	364.574	10	364.569	57	392.044		—	392.044
2016	376.062		—	376.062	58	424.413		—	424.413
17	375.667		—	375.667	59	426.719		—	426.719
18	386.263		—	386.263	60	340.457	340.456	1	340.457
19	391.328		—	391.328	61	347.032	347.030	2	347.031
2020	403.751		—	403.751	62	368.760	368.757	3	368.759
21	381.077	381.088	11	381.083	63	386.534	386.532	2	386.533
22	312.569		—	312.569	64	419.618	419.620	2	419.619
2023	377.690		—	377.690	65	445.697		—	445.697
24	362.665		—	362.665	66	418.096	418.092	4	418.094
25	353.301		—	353.301	67	464.987	464.985	2	464.986
26	380.103		—	380.103	68	534.322		—	534.322
27	370.788		—	370.788	69	349.889	349.892	3	349.891
28	345.727		—	345.727	70	362.081	362.082	1	362.082
29	349.238		—	349.238	71	379.651	379.651	0	379.651
2030	319.257		—	319.257	2072	402.838	402.838	0	402.838
31	404.478	404.477	1	404.478	3073	351.873	351.868	5	351.871
32	402.690	402.685	5	402.688	74	368.088	368.085	3	368.087
33	400.126	400.122	4	400.124	75	379.391		—	379.391
34	457.831	457.830	1	457.831	76	405.386		—	405.386

第 II-3-1-7表 レベル測量成果一覧表 (1999年度秋季) (2/2)
Table II-3-1-7 List of elevations determined by the leveling in autumn 1999.

No.	標高1 (m)	標高2 (m)	誤差 (mm)	平均標高 (m)	No.	標高1 (m)	標高2 (m)	誤差 (mm)	平均標高 (m)
77	429.435		—	429.435	119	434.874		—	434.874
78	532.164		—	532.164	120	453.582	453.592	10	453.587
79	375.755		—	375.755	121	427.864	427.874	10	427.869
80	387.625		—	387.625	122	371.383	371.392	9	371.388
81	259.047		—	259.047	123	320.765		—	320.765
82	305.100	305.099	1	305.100	124	301.312		—	301.312
83	310.629	310.629	0	310.629	2125	435.823		—	435.823
2084	295.412	295.411	1	295.412	3125	435.754		—	435.754
85	352.501	352.504	3	352.503	126	413.267	413.269	2	413.268
86	404.418		—	404.418	127	451.259	451.268	9	451.264
87	586.923		—	586.923	128	435.835		—	435.835
88	572.274	572.277	3	572.276	129	384.235		—	384.235
89	502.921	502.928	7	502.925	130	385.998		—	385.998
90	461.546	461.555	9	461.551	1995	285.843		—	285.843
91	405.594	405.598	4	405.596					
92	374.749		—	374.749					
93	428.115	428.122	7	428.119					
94	476.387	476.396	9	476.392					
95	464.936	464.945	9	464.941					
2096	450.155		—	450.155					
97	405.631	405.633	2	405.632					
98	427.142	427.139	3	427.141					
99	436.393	436.386	7	436.390					
100	433.205	433.196	9	433.201					
2101	474.127	474.116	11	474.122					
102	567.238	567.237	1	567.238					
103	542.816		—	542.816					
104	510.243	510.235	8	510.239					
105	513.441	513.432	9	513.437					
106	640.527	640.516	11	640.522					
107	808.888		—	808.888					
108	593.838		—	593.838					
109	510.336		—	510.336					
110	435.289	435.288	1	435.289					
111	417.999		—	417.999					
112	402.997	402.995	2	402.996					
113	442.050		—	442.050					
114	418.262		—	418.262					
115	491.951		—	491.951					
116	471.360	471.363	3	471.362					
117	416.482	416.484	2	416.483					
118	367.608	367.609	1	367.609					

度のNo.3125における楕円体高（解析結果）の時間変化についての3日・5日・1週間の移動平均を結果を比較したものである。本図では5日以上の移動平均の結果がほぼ1cm以内のばらつきのなかに収まり、5日間以上の測定を実施して平均を行えば重力変動の補正に使用するには差し支えないと考える。

第II-3-1-4表にGPS基線解析結果総括として、付帯資料「GPS基線解析結果」に示した解析結果電子基準点毎の平均値（電子基準点別計算値）と全平均値をまとめた。電子基準点によって特に楕円体高に偏りがあるが、3つの電子基準点の結果を平均するとその変化は比較的安定する。標高の決定には本表で示した全平均値を採用した。

第II-3-1-10図にレベル測量基準点における標高決定の過程を示す。また、第II-3-1-5表～第II-3-1-7表にレベル測量成果一覧表を示す。また、第II-3-1-10図のNo.9及びNo.3125の標高とレベル測量成果（レベル基準点からの標高差のデータ）を使用して計算した各重力測定点の標高を第II-3-1-8表に示す。

(5) 標高変動計算

1) 計算方法

1997年度から本年度までの7つの定期測定で決定された標高データから標高変動を計算した。なお、本年度の第1回定期測定において標高差の大きい測量路線に決定標高に比例して増大する異常な標高変動が認められたため、これらの路線に使用されたスタッフの検定を行ったところ、そのスタッフの1本に狂いが生じていることが明らかになり、第2回目の定期測定からスタッフを交換した。その結果、第1回定期観測で認められた標高変動が第2回目で元に戻るような結果が得られた測定点が見つかった。これらの測定点における本年度第1回定期測定期間における標高はその前後の定期測定における標高値の補間値を代用した。

2) 計算結果

第II-3-1-9表に各重力測定点における標高変動をまとめた。標高変動は、隣り合う定期測定間の標高変動を第II-3-1-11図～第II-3-1-16図に、1997年度秋季の標高に対する変動を第II-3-1-18図～第II-3-1-22図に図示した。以下に各図にみられる特徴について述べる。

① 標高変動(1997年度秋季-1998年度春季, 第II-3-1-11図)

血の池沢上流部を中心とする地熱生産領域およびその西側に顕著な負の変動域がみとめられる。これらの負の変動域は大安沢上流部、猿倉沢上流部を経て25Pサイト（重力測定点No.41）の東側まで伸びている。

② 標高変動(1998年度春季-1998年度夏季, 第II-3-1-12図)

胃中部落東方と25Pサイト東方に顕著な負の変動域が認められる。1997年度秋季からみると生産領域で起きた負の変動が1998年度夏季になって東西の辺縁に移ったように見える。また、砂子原部落中心部から黒沢部落を経てさらに南西方向に伸びる帯状の正の変動域が認められる。

③ 標高変動(1998年度夏季-1998年度秋季, 第II-3-1-13図)

生産領域の血の池沢上流部、大安沢上流部及び猿倉沢に顕著な負の変動域が認められる。生産領域の南側の胃中部落から大成沢部落にかけての広範囲で顕著な正の

変動が認められる。

④ 標高変動(1998年度秋季-1999年度春季, 第II-3-1-14図)

黒沢部落から血の池沢にかけて若干の負の変動が認められるものの、生産領域では顕著な変動は認められない。五畳敷部落南方からR1基地・R2基地を経て25Pサイトに至る帯状の地域に負の変動域が認められる。この負の変動域の中心に近い重力連続観測所No.2125では1999年2月～3月にかけて連続重力測定が重力計の異常な傾斜変動によって困難であったり、水位観測井戸No.5d孔の水位(圧力水頭)がこの期間に10m以上も上昇している。

また、1998年度夏季-1998年度秋季に広範囲に正の変動が認められた生産領域の南側の冑中部落から大成沢部落にかけての地域では負の変動が認められる。この地域における1998年夏季～1999年春季にかけての変動は、1998年秋季の標高に含まれた誤差による偽の変動である可能性がある。

⑤ 標高変動(1999年度春季-1999年度夏季, 第II-3-1-15図)

まとまった顕著な変動は特に認められない。ほとんどの測定点で標高変動の大きさは10mm以内となっている。

⑥ 標高変動(1999年度夏季-1999年度秋季, 第II-3-1-16図)

標高と相関のある異常な変動が認められる。現時点でその原因はまだ不明であるが、1999年度秋季の標高に何らかの誤差が混入しており、これらの誤差が特に標高差の大きい急勾配のある測量路線で正の変動として顕著に現れていると考える。

⑦ 標高変動(1997年度秋季-1998年度夏季, 第II-3-1-17図)

生産領域とその東側に負の変動域が形成されている。但し、その負の変動域の中央に変動量の小さい南北方向の帯状の領域が認められる。また、負の変動量の大きい地域と隣接して正の変動を示す帯状の地域があり、両者は滝谷川断層あるいは小野川原断層といった構造的な境界によって隔てられている。

また、調査地域の北西端には正の変動域が、南東端には負の変動域が認められるようになる。

⑧ 標高変動(1997年度秋季-1998年度秋季, 第II-3-1-18図)

大局的には1997年度秋季-1998年度夏季と変動のパターンは同じであるが、調査地域北西部では正の変動が広がり、南東部では負の変動が認められる。上記(1)～(6)の隣り合う定期観測毎の変動ではよくわからないが、これまでの調査期間を通じて調査地域の北西側は隆起し、南東側が沈降する緩やかな傾動の傾向が認められる。

⑨ 標高変動(1997年度秋季-1999年度春季, 第II-3-1-19図)

生産領域で若干の正の変動が生じたため負の変動域が若干縮小した。また、負の変動域の西側に隣接した帯状の正の変動域もなくなった。

⑩ 標高変動(1997年度秋季-1999年度夏季, 第II-3-1-20図)

上記⑧で指摘した傾動の傾向がさらに強まる。また、1998年秋季から1999年春季にかけて生産領域の北側の一部が局所的に沈降したため、負の変動域の形状に若干の変化があった。

⑪ 標高変動(1997年度秋季-1999年度秋季, 第II-3-1-21図)

上記⑦～⑩の変動のパターンと全く異なる変動の傾向を示す。

第Ⅱ-3-1-9表 標高變動一覽表 (1/2)
Table II-3-1-9 List of elevation changes.

測定点 番号	設置年月日	標高變動値(mm)											
		'97秋~'98春	'97秋~'98夏	'97秋~'98秋	'97秋~'99春	'97秋~'99夏	'97秋~'99秋	'98春~'98夏	'97夏~'98秋	'98秋~'99春	'99春~'99夏	'99夏~'99秋	'99秋~'99春
1	1.9.94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2001	1.10.97	3	7	10	13	17	20	3	3	3	3	3	3
2	1.9.94	3	5	8	10	13	19	3	3	3	3	3	6
3	1.9.94	1	4	3	8	12	16	3	0	4	4	4	4
4	1.9.94	1	2	2	7	12	11	1	1	5	5	-1	-1
5	1.9.94	2	4	6	9	13	8	2	2	2	4	-5	-5
6	1.9.94	2	3	-3	4	6	0	2	-6	7	1	-5	-5
7	1.9.94	-1	-2	-5	1	1	-2	-1	-3	6	0	-4	-4
8	1.9.94	1	2	-1	3	2	0	1	-4	4	-1	-3	-3
9	1.9.94	5	4	-1	4	3	0	-1	-5	5	-1	-3	-3
10	1.9.94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2010	1.10.97	1	1	2	7	11	8	1	1	5	4	-3	-3
11	1.9.94	0	-1	-1	-1	13	1	0	0	0	14	-12	-12
12	1.9.94	4	7	11	14	18	9	4	4	4	4	-9	-9
13	1.9.94	3	5	8	10	13	10	3	3	3	3	-3	-3
14	1.9.94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2014	15.4.98	-	-	-	-	-	-	25	5	-16	2	-14	-14
15	1.9.94	-1	20	23	14	15	1	21	3	-9	1	-14	-14
16	1.9.94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2016	1.10.97	0	0	0	0	9	-5	0	0	0	9	-14	-14
17	1.9.94	-1	-1	17	7	18	11	-1	18	-9	10	-7	-7
18	1.9.94	-3	-7	9	-3	4	-3	-3	16	-12	7	-7	-7
19	1.9.94	-7	-12	7	-9	-1	-8	-4	19	-16	8	-7	-7
20	1.9.94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2020	15.4.98	-	-	-	-	-	-	0	21	-20	7	-7	-7
21	1.9.94	-3	19	27	21	10	4	22	8	-6	-11	-6	-6
22	1.9.94	0	0	0	0	16	0	0	0	0	16	-16	-16
23	1.9.94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2023	20.9.95	-13	-8	-12	-10	-7	-17	5	-4	2	3	-10	-10
24	1.9.94	-4	-9	-16	-11	-8	-19	-4	-7	4	3	-10	-10
25	1.9.94	-5	-11	-16	-13	-11	-21	-5	-5	3	2	-10	-10
26	1.9.94	2	-10	-13	-9	-7	-15	-11	-3	4	2	-8	-8
27	1.9.94	-4	-7	-11	-6	-6	-12	-4	-4	5	0	-6	-6
28	1.9.94	-3	-5	-8	-2	0	-7	-3	-3	5	2	-7	-7
29	1.9.94	-2	-4	-5	0	2	-5	-2	-2	6	1	-7	-7
30	1.9.94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2030	20.9.95	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3030	15.4.98	-	-	-	-	-	-	-2	-2	6	0	-9	-9
31	1.9.94	3	0	-7	2	-4	1	-3	-7	9	-6	5	5
32	1.9.94	6	0	-7	3	-5	-2	-6	-7	10	-8	3	3
33	1.9.94	5	2	-4	4	1	0	-3	-6	8	-3	-1	-1
34	1.9.94	15	1	-7	-4	-2	3	-14	-8	2	2	5	5
35	1.9.94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2035	1.10.97	15	4	-2	1	4	7	-11	-6	3	3	3	3
36	1.9.94	9	17	12	4	18	12	9	-5	-8	14	-6	-6
37	1.9.94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2037	31.10.96	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3037	1.10.97	5	6	0	1	2	6	1	-6	1	1	4	4
38	1.9.94	-5	-20	-22	-22	-22	-6	-15	-2	0	0	16	16
39	1.9.94	-9	-41	-44	-38	-33	-11	-32	-3	5	5	22	22
40	1.9.94	-13	-49	-52	-47	-42	-17	-36	-3	5	5	25	25
41	1.9.94	-4	-9	-13	-20	-27	-10	-4	-4	-7	-7	17	17
42	1.9.94	-5	-8	-6	-14	-23	-12	-3	2	-8	-8	11	11
43	1.9.94	-3	-7	-8	-16	-24	-14	-3	-1	-8	-8	10	10
44	1.9.94	1	2	0	-10	-20	-17	1	-2	-10	-10	3	3
45	1.9.94	4	7	11	-	-	-	4	4	-	-	-	-
2045	1.7.99	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-2	-2
46	1.9.94	-3	9	17	-19	-12	-	12	8	-36	7	-	-
2046	19.1.98	-3	8	18	-18	-21	-23	12	10	-36	-2	-2	-2
47	1.9.94	-2	-4	-5	-7	-9	-12	-2	-2	-2	-2	-3	-3
48	1.9.94	3	1	1	4	6	15	-2	0	2	2	9	9
49	1.9.94	16	17	11	5	7	4	1	-6	-5	2	-3	-3
50	1.9.94	18	20	14	5	9	2	2	-6	-9	4	-7	-7
51	1.9.94	2	0	-5	-3	-1	0	-2	-5	2	2	1	1
52	1.9.94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2052	31.10.96	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3052	1.10.97	-15	-37	-43	-39	-35	-20	-22	-6	4	4	15	15
53	1.9.94	-9	-18	-25	-18	-12	-3	-9	-7	6	6	9	9
54	1.9.94	-5	-2	-10	-4	1	-6	3	-8	5	5	-7	-7
55	1.9.94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2055	1.10.97	-2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3055	15.8.98	-	-	-	-	-	-	-	-8	7	7	1	1
56	1.9.94	-3	-7	-10	-13	-3	-17	-3	-3	-3	10	-14	-14
57	1.9.94	-3	-5	-8	-10	-4	-11	-3	-3	-3	6	-7	-7
58	1.9.94	-9	-18	-27	-24	-21	-16	-9	-9	3	3	5	5
59	1.9.94	-11	-11	-26	-20	-15	-16	0	-15	5	5	-1	-1
60	1.9.94	1	7	10	-2	4	-7	6	3	-12	6	-11	-11
61	1.9.94	-4	5	7	-1	1	-10	9	2	-8	2	-11	-11
62	1.9.94	-21	-15	-16	-22	-28	-33	6	-1	-6	-6	-5	-5
63	1.9.94	-25	-22	-25	-31	-37	-36	3	-3	-6	-6	1	1
64	1.9.94	-51	-43	-48	-54	-60	-58	8	-5	-6	-6	2	2
65	1.9.94	-69	-57	-67	-73	-79	-75	12	-10	-6	-6	4	4
66	1.9.94	-8	-27	-11	-8	-6	-18	-19	16	3	3	-12	-12
67	1.9.94	-18	-51	-36	-32	-29	-27	-33	15	4	4	2	2
68	1.9.94	-31	-83	-75	-70	-65	-59	-52	8	5	5	6	6
69	1.9.94	-1	-5	-13	-9	-7	-16	-4	-8	4	2	-9	-9
70	1.9.94	-1	-7	-16	-10	-8	-17	-6	-9	6	2	-9	-9

第 II-3-1-9表 標高變動一覽表 (2/2)
Table II-3-1-9 List of elevation changes.

測定点 番号	設置年月日	標高變動値(mm)											
		'97秋~'98春	'97秋~'98夏	'97秋~'98秋	'97秋~'99春	'97秋~'99夏	'97秋~'99秋	'98春~'98夏	'97夏~'98秋	'98秋~'99春	'99春~'99夏	'99夏~'99秋	
71	1.9.94	-3	-12	-21	-12	-11	-21	-9	-9	9	1	-10	
72	1.9.94	-10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
2072	15.8.98	-	-	-	-	-	-	-	-10	5	5	-7	
73	1.9.94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
2073	1.10.97	-8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
3073	15.8.98	-	-	-	-	-	-	-	-8	8	3	-10	
74	1.9.94	-8	-8	-20	-17	-14	-20	0	-12	3	3	-6	
75	1.9.94	-14	-15	-28	-24	-20	-24	-1	-13	4	4	-4	
76	1.10.97	4	-2	-7	-4	-2	-1	-6	-5	2	2	1	
77	1.10.97	-25	-40	-53	-47	-40	-41	-14	-13	7	7	-1	
78	1.10.97	0	-15	-25	-16	-7	4	-14	-10	9	9	11	
79	1.10.97	1	2	3	4	5	-3	1	1	1	1	-8	
80	1.10.97	4	7	11	14	18	15	4	4	4	4	-3	
81	1.10.97	1	1	2	3	18	-1	1	1	1	15	-19	
82	1.10.97	4	9	13	17	14	8	4	4	4	-3	-6	
83	1.10.97	6	12	18	24	14	7	6	6	6	-10	-7	
84	1.10.97	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
2084	15.4.98	-	-	-	-	-	-	5	9	8	-6	5	
85	1.10.97	3	7	10	13	16	22	3	3	3	3	6	
86	1.10.97	1	2	3	4	5	31	1	1	1	1	26	
87	1.10.97	-1	-2	-2	-3	-4	44	-1	-1	-1	-1	48	
88	1.10.97	0	1	1	2	2	44	0	0	0	0	42	
89	1.10.97	-1	-2	-4	-5	-6	27	-1	-1	-1	-1	33	
90	1.10.97	0	0	-1	-1	-1	19	0	0	0	0	20	
91	1.10.97	0	0	0	-1	-5	0	0	0	0	-4	5	
92	1.10.97	0	-3	-5	-8	7	0	-3	-3	-3	15	-7	
93	1.10.97	0	1	1	1	2	10	0	0	0	0	8	
94	1.10.97	1	2	3	3	4	15	1	1	1	1	11	
95	1.10.97	-7	-1	-5	-1	3	11	6	-4	4	4	8	
96	1.10.97	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
2096	15.8.98	-	-	-	-	-	-	-	10	-4	-4	14	
97	1.10.97	-1	-2	-3	-4	-5	-8	-1	-1	-1	-1	-3	
98	1.10.97	-1	-2	-2	-3	-4	-7	-1	-1	-1	-1	-3	
99	1.10.97	-4	-5	-5	-8	-10	-16	-1	0	-2	-2	-6	
100	1.10.97	-1	-2	-2	-3	-4	-12	-1	-1	-1	-1	-8	
101	1.10.97	-1	-11	-15	-	-	-	-10	-4	-	-	-	
2101	4.15.99	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	-10	
102	1.10.97	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	
103	1.10.97	0	0	0	0	0	-7	0	0	0	0	-7	
104	1.10.97	-1	-2	-2	-3	-4	-8	-1	-1	-1	-1	-4	
105	1.10.97	-2	-4	-5	-7	-9	-15	-2	-2	-2	-2	-6	
106	1.10.97	-2	-5	-7	-9	-12	20	-2	-2	-2	-2	32	
107	1.10.97	-6	-13	-19	-26	-32	16	-6	-6	-6	-6	48	
108	1.10.97	-6	-12	-19	-25	-31	-12	-6	-6	-6	-6	19	
109	1.10.97	-1	-2	-2	-3	-4	-2	-1	-1	-1	-1	2	
110	1.10.97	1	-1	20	-1	-3	-3	-1	21	-21	-2	0	
111	1.10.97	-1	-3	-4	-5	3	-3	-1	-1	-1	8	-5	
112	1.10.97	-1	-5	14	10	5	4	-4	19	-5	-5	-1	
113	1.10.97	-2	-11	13	3	-7	3	-8	24	-10	-10	10	
114	1.10.97	4	8	13	17	21	22	4	4	4	4	1	
115	1.10.97	5	10	16	21	26	39	5	5	5	5	13	
116	1.10.97	4	7	11	14	18	27	4	4	4	4	9	
117	1.10.97	4	9	13	17	22	24	4	4	4	4	2	
118	1.10.97	-2	24	28	24	19	8	26	4	-4	-4	-11	
119	1.10.97	12	24	28	18	7	14	12	4	-11	-11	7	
120	1.10.97	1	1	2	3	3	20	1	1	1	1	17	
121	1.10.97	1	2	3	3	4	15	1	1	1	1	11	
122	1.10.97	-12	-3	6	11	15	14	9	9	4	4	-1	
123	1.10.97	5	9	14	19	28	10	5	5	5	9	-18	
124	1.10.97	4	7	21	18	35	11	4	14	-3	17	-24	
125	1.10.97	4	7	11	-	-	-	4	4	-	-	-	
2125	14.5.98	-	-	-	-	-	-	-	3	-	-	-1	
126	1.10.97	1	3	4	6	-3	0	1	1	1	-9	3	
127	1.10.97	0	0	-1	-1	-1	18	0	0	0	0	19	
128	1.10.97	10	17	21	19	18	34	8	4	-1	-1	16	
129	15.4.98	-	-	-	-	-	-	0	0	0	1	-3	
130	15.4.98	-	-	-	-	-	-	-3	18	-11	7	-7	
1995	20.9.95	-	-	-	-	-	-	1	1	9	3	-3	
1001	1.9.94	1	1	2	11	14	11	1	1	9	3	-3	
1002	1.9.94	3	6	9	3	2	-1	3	3	-6	-1	-2	
1003	1.9.94	0	11	5	8	8	4	11	-6	3	0	-4	
1004	1.9.94	9	10	14	-10	-12	-15	2	4	-24	-2	-3	
1005	1.9.94	4	8	13	-8	-5	-15	4	4	-20	3	-10	
1006	1.9.94	-9	-7	19	-14	-11	-19	1	26	-32	3	-8	
1007	1.9.94	4	8	13	-6	1	-11	4	4	-18	7	-12	
1008	1.9.94	1	-4	12	1	13	4	-5	16	-10	12	-10	
全領域平均		-2	-3	-3	-4	-3	-2	-1	1	-1	2	0	

4. 重力測定

(1) 使用機器

測定には前述のScintrex社製重力計CG-3M 3台を次のように使用した：

定期重力測定，巡回測定及び西山－会津若松往復測定：	CG-3M-3
重力連続観測所No.2125における連続測定：	CG-3M-2
鉛直重力勾配測定：	CG-3M-1

(2) 測定方法

1) 定期測定

年3回の定期測定を実施した。各定期測定では，1日の測定経路として，湯八木沢の仮基準点No.1995から出発して各重力測定点での測定後再び仮基準点に戻り閉塞する簡易法による測定を行った。原則として1日3回の閉塞を行い，そのうち第1回目と第3回目の経路を同じにするように努めた。これは1日の測定の中で同一点における測定を実施する回数を増やし，ドリフトの推定精度を上げることを目的としている。また，定期測定期間中に同一点での測定を3回以上実施した。

各重力測定点においてCG-3Mは1秒間隔で重力値のサンプリングを行い，所定のサンプリングで得られた重力値の平均値（以後「サンプル平均値」と呼ぶ）を出力する。各重力点では，設置後10分間以上の測定を行い，その結果得られたサンプル平均値のうち，最後に測定されたサンプル平均値を含んで原則として $5\mu\text{gal}$ 以内に入るサンプル平均値の平均値を「測定値」とした。測定値の精度保持のため，下記の仕様で測定を実施した：

① 測定モード：Field Grav モード

② サンプリング長：60秒（サンプリング間隔1秒）

③ 測定したサンプル平均値を監視しておき，サンプル平均値が収束した時点で測定を終了する。原則として，サンプル平均値の差が $5\mu\text{gal}$ 以内の範囲に3回入った時点で収束したとみなす。ただし，この場合でもサンプル平均値が単調減少の傾向を示す場合には測定を継続する。ただし，ノイズが大きくサンプル平均値に $5\mu\text{gal}$ 以内の再現性がどうしても得られないときには，収束判定のしきい値を $6\sim 10\mu\text{gal}$ に上げて測定を実施する。

2) 巡回測定及び西山－会津若松重力測定

定期測定期間中を除き隔週に実施した。巡回測定は1回につき3日，西山－会津若松往復測定は1日とし，原則として火・水・金曜日に巡回測定，木曜日に西山－会津若松往復測定を実施した。

巡回測定では，水位観測井の併設されている10箇所の重力測定点について次の経路で測定を実施した：

① No.1995→No.2孔（測定点No.92）→No.1孔（測定点No.87）→No.9孔（測定点No.129）→No.3孔（測定点No.48）→No.1995

- ② No.1995→No.4孔（測定点No.2046）→No.5孔（測定点No.2125）→
No.6孔（測定点No.41）→No.7孔（測定点No.58）→No.1995
③ No.1995→No.10孔（測定点No.130）→No.8孔（測定点No.12）→No.1995

ただし、重力計の異常、天候、道路状況等の事情により測定経路の変更、再測定、測定中止があった。特にNo.8孔に関しては、冬季道路閉鎖のため、1998年12月を最後に重力測定を中断している。

また、西山－会津若松往復測定は、No.2125を起点とし、No.1995を経由して一等重力点「会津若松」（No.9999）に至る経路を1日2回往復した。なお復路のNo.1995の測定は省略している場合がある。

各重力測定点における測定仕様は以下のとおりである：

- ① 測定モード： Cycling モード （巡回測定）
Field Gravモード （西山－会津若松往復測定）
② サンプルング長：48秒（サンプルング間隔1秒）（巡回測定）
60秒（サンプルング間隔1秒）（西山－会津若松往復測定）
③ 各測定点における最低測定時間及び測定終了の条件は前述の定期測定に準ずる。

3) 連続測定

測定は連続観測所No.2125（室内）における無人測定であったが、重力計点検・データ回収あるいはその他の目的で観測所への入退室を行った。また、その際に重力計の傾斜が顕著に認められる場合には、手動による傾斜の修正を行った。また、データ回収時には重力計の時計のズレを補正し、時計の刻時は日本標準時から±10秒以内に入るようにした。

測定は下記の仕様で実施した：

- ① 測定モード：Cyclingモード
② 補正用ドリフトレート：0.29 mgal/day
③ サンプルング長：120秒（サンプルング間隔1秒）
④ 測定間隔：1,800秒

(3) データ処理方法

CG-3Mではサンプルングごとのサンプル平均値、サンプル標準偏差、測定開始時刻、重力計傾斜、補正温度差、内部プログラムで計算した潮汐補正値をメモリーに記録しており、1日の測定が終了し現場宿舎においてそのメモリーの内容をプログラムに出力してデータ処理を行う。以下にデータ処理の内容について述べる。

1) 定期測定、巡回測定及び西山－会津若松往復測定

定期測定、巡回測定及び西山－会津若松往復測定のデータ処理は、①データの選択的スタッキング、②精密潮汐補正、③器械高補正、④気圧変動補正、⑤最小二乗法による重力差・ドリフト及びテアの決定、⑥重力計感度特性の補正、及び⑦標高変動補正の工程を経て実施した。⑦は①～⑥の処理と異なり、重力変動に対する補正処理である。これらの各工程の詳細について以下に述べる：

① データの選択的スタッキング

測定開始後数分間のデータに短期的なドリフトの傾向が認められることから、これらのドリフトが認められている部分を測定データのなかから除外して平均した。また、ドリフトが認められなくても、明らかに振動等のノイズが大きいサンプルも除外した。現状では特に決定的なスタッキングの方法がないため、プログラムで除外するデータの目安を自動的につけさせた上で、データを実際に見て除外するデータを決定した。

なお、測定時間は10分～20分程度であるため、この間の潮汐成分の変化が時間に対して1次関数的に変化するものとみなして、後述の各種補正はスタッキング後のデータを使用して実施した。このため、測定時刻及び潮汐補正值に関しても同じ平均計算を施し、これをスタッキング後の重力計読み値に対する測定時刻及び潮汐補正值とした。

② 精密潮汐補正

重力計内部で施した潮汐補正をやり直すために、まず①で計算した重力計読み値から潮汐補正值を差し引いた。具体的には、本調査地域の潮汐モデルから潮汐補正值を再計算し、これを測定データに加えた。

③ 器械高補正

水準測量位置から重力計までの器械高を補正。測定時に器械高を計測し、重力鉛直勾配に器械高を乗じて補正值とした。器械高は重力点から重力計コンソール上面までの高さとした。鉛直重力勾配は重力調査でよく使用される -0.3086 mgal/m の値を使用した。

④ 気圧変動補正

気圧変動による微小な重力変化の影響を取り除くための補正を実施した。気圧変動は調査地域のほぼ中央にある連続観測所No.2125の測定値で代表させ、同地点での平均的な気圧値 962.3 hPa からの変動に、本地域の気圧応答係数 $-0.3517 \mu\text{gal/hPa}$ を乗じた量を重力の気圧応答成分として差し引いた。

⑤ 最小二乗法による重力差、ドリフト及びテアの決定

各測定点における基準点との重力差、重力計のドリフトを最小二乗法により推定した。なお、各測定点における重力差は解析区間の中では変化しないものとして推定した。重力計ドリフトは測定時刻に対して2次関数的に変化するものと仮定したが、夜間のレベリング不良による短期ドリフト等に対応するため、測定日ごとに異なるドリフト係数を求めるようにした。

また、本調査はそのモニタリング調査としての性格上、各測定点での重力値がある程度分かっているため、テアがどの測定の前後で生じたかを判別することは比較的容易である。テアが明らかに生じたと分かっている場合、あるいは一回重力値の推定を実施したあと残差が異常に大きい場合には、テアの発生時刻を与えてテアの量を推定した。最小二乗法で決定するパラメータの数は、

$$(\text{測定点数}) + (\text{ドリフト係数 2 個} + \text{定数項}) \times (\text{解析区間長(日数)}) + (\text{テアの数})$$

である。解析区間長は、定期測定の場合は定期測定期間（24日程度）、巡回測定及び西山－会津若松往復測定では4日（巡回測定3日＋西山－会津若松往復測定1日）とした。

⑥ 重力計感度特性の補正

筑波検定の項で述べた通り、重力計の感度特性は時間的に変化しており、測定重力差が大きい場合、重力計の感度補正に関しても厳密に行う必要がある。例えば、本調査で仮基準点No.1995との重力差の最も大きい測定点はNo.107で、その重力差は約100mgalである。一方、測定に使用している重力計CG-3M-3の較正係数は、筑波検定によると1999年7月から1999年10月の3ヶ月間で約0.9994から0.9996まで増加しており、この変化を較正しないとこの間で30 μ galもの変動が生じてしまう。

ここでは、解析期間の中央の日における較正係数をその前後の重力計検定結果の線形補間により計算し、これを⑤で決定した重力値に乗じて重力計感度特性の補正を実施した。

⑦ 標高変動補正

本調査は、地下の密度変動に起因する重力変動を捉えるのが目的であるため、それ以外の要因による重力変動を除外する必要がある。本補正は、測定点の標高が何らかの理由で変動した場合の重力の変化を見積もり、これを取り除く補正である。測量によって得られた標高変動量に鉛直重力勾配を乗じたものを同じ期間の重力変動から差し引いて補正を実施する。鉛直重力勾配には器械高補正と同様に-0.3086 mgal/mを使用した。

2) 連続測定

連続測定データの処理は前述1)項であげた処理工程のうち、②③④及び⑤を実施した。但し、⑤に関してはドリフト係数及びテアの推定のみとし、ドリフトの推定は解析区間に対して1つの式で近似し、ドリフトの次数は解析区間の長さに応じて変えた。解析区間長は原則としてデータ回収1回分（約2週間分程度）とした。

(4) データ処理結果

1) 西山－会津若松重力測定結果

第II-3-1-22図に西山－会津若松重力測定の結果得られた調査地域内の仮基準点No.1995に対する一等重力点「会津若松」の重力差の時間変化を示す。平均値は25.637mgalで、昨年度の平均値より0.007mgal大きい。また、変動幅は平均値からほぼ ± 0.005 mgal以内で変動が少ない。現時点では両者の重力差の時間変化が小さく、系統的な変動が認められないため、No.1995の重力値を昨年同様と979, 998.284mgalとして固定した。このため、No.1995の微小な変動が重力変動に含まれている可能性もある。但し、その変動は1年間で数 μ galの僅かな重力値の低下に過ぎないと考ええる。

2) 定期観測結果

第II-3-1-10表に定期観測の結果得られた各測定点における重力値を示す。これらの重力値は仮基準点No.1995からの重力差と上述のNo.1995の基準重力値から計算した。

3) 巡回測定結果

第II-3-1-11表に巡回測定の結果得られた10箇所の水位観測井近傍の重力測定点にお

第Ⅱ-3-1-10表 重力値一覧表 (1/3)
Table Ⅱ-3-1-10 List of the gravity in Yanaizu-Nishiyama geothermal field since 1997.

測定点 番号	設置年月日	絶対重力値 (mgal)						
		1997年度	1998年度			1999年度		
		秋季	春季	夏季	秋季	春季	夏季	秋季
1	1.9.94	-	-	-	-	-	-	-
2001	1.10.97	979879.726	979879.721	979879.730	979879.722	979879.728	979879.729	979879.719
2	1.9.94	979877.441	979877.439	979877.446	979877.449	979877.442	979877.443	979877.439
3	1.9.94	979876.424	979876.428	979876.438	979876.442	979876.433	979876.437	979876.426
4	1.9.94	979874.598	979874.597	979874.601	979874.616	979874.605	979874.607	979874.601
5	1.9.94	979874.277	979874.280	979874.284	979874.283	979874.281	979874.282	979874.272
6	1.9.94	979867.349	979867.353	979867.359	979867.366	979867.364	979867.359	979867.362
7	1.9.94	979861.209	979861.215	979861.223	979861.226	979861.217	979861.220	979861.221
8	1.9.94	979860.602	979860.607	979860.607	979860.611	979860.605	979860.615	979860.614
9	1.9.94	979868.061	979868.075	979868.067	979868.079	979868.070	979868.075	979868.078
10	1.9.94	979879.836	-	-	-	-	-	-
2010	1.10.97	979879.754	979879.753	979879.754	979879.750	979879.750	979879.751	979879.754
11	1.9.94	979884.202	979884.197	979884.191	979884.190	979884.186	979884.178	979884.192
12	1.9.94	979877.680	979877.673	979877.670	979877.675	979877.673	979877.669	979877.668
13	1.9.94	979871.709	979871.706	979871.706	979871.710	979871.706	979871.705	979871.704
14	1.9.94	979870.353	-	-	-	-	-	-
2014	15.4.98	-	979870.305	979870.304	979870.301	979870.304	979870.304	979870.311
15	1.9.94	979872.784	979872.779	979872.787	979872.802	979872.783	979872.771	979872.773
16	1.9.94	-	-	-	-	-	-	-
2016	1.10.97	979871.456	979871.450	979871.455	979871.452	979871.449	979871.435	979871.432
17	1.9.94	979873.344	979873.337	979873.349	979873.337	979873.338	979873.328	979873.325
18	1.9.94	979871.185	979871.177	979871.186	979871.187	979871.184	979871.186	979871.170
19	1.9.94	979870.118	979870.123	979870.117	979870.131	979870.124	979870.125	979870.110
20	1.9.94	979866.100	-	-	-	-	-	-
2020	15.4.98	-	979865.689	979865.675	979865.688	979865.688	979865.685	979865.661
21	1.9.94	979868.930	979868.918	979868.915	979868.927	979868.922	979868.904	979868.911
22	1.9.94	979883.279	979883.286	979883.290	979883.283	979883.285	979883.269	979883.277
23	1.9.94	-	-	-	-	-	-	-
2023	20.9.95	979869.692	979869.692	979869.709	979869.705	979869.695	979869.682	979869.668
24	1.9.94	979872.786	979872.791	979872.795	979872.797	979872.788	979872.780	979872.775
25	1.9.94	979874.910	979874.917	979874.918	979874.924	979874.904	979874.898	979874.892
26	1.9.94	979869.224	979869.224	979869.216	979869.232	979869.219	979869.205	979869.199
27	1.9.94	979870.625	979870.633	979870.642	979870.637	979870.626	979870.633	979870.612
28	1.9.94	979875.864	979875.877	979875.874	979875.875	979875.868	979875.854	979875.865
29	1.9.94	979874.606	979874.619	979874.615	979874.622	979874.612	979874.598	979874.602
30	1.9.94	-	-	-	-	-	-	-
2030	20.9.95	979880.574	-	-	-	-	-	-
3030	15.4.98	-	979880.258	979880.262	979880.256	979880.257	979880.245	979880.252
31	1.9.94	979862.093	979862.084	979862.097	979862.062	979862.071	979862.069	979862.073
32	1.9.94	979863.001	979862.997	979863.004	979862.978	979862.988	979862.983	979862.989
33	1.9.94	979864.291	979864.298	979864.297	979864.277	979864.289	979864.281	979864.286
34	1.9.94	979850.886	979850.890	979850.892	979850.903	979850.883	979850.886	979850.884
35	1.9.94	-	-	-	-	-	-	-
2035	1.10.97	979853.308	979853.313	979853.315	979853.317	979853.311	979853.312	979853.312
36	1.9.94	979875.029	979875.016	979875.014	979875.009	979875.009	979875.016	979875.023
37	1.9.94	-	-	-	-	-	-	-
2037	31.10.96	-	-	-	-	-	-	-
3037	1.10.97	979867.461	979867.454	979867.463	979867.449	979867.452	979867.455	979867.453
38	1.9.94	979852.091	979852.102	979852.096	979852.098	979852.099	979852.099	979852.094
39	1.9.94	979834.917	979834.920	979834.917	979834.921	979834.905	979834.912	979834.911
40	1.9.94	979829.958	979829.963	979829.966	979829.967	979829.953	979829.961	979829.957
41	1.9.94	979845.365	979845.366	979845.367	979845.367	979845.363	979845.354	979845.346
42	1.9.94	979848.024	979848.021	979848.022	979848.027	979848.026	979848.015	979848.007
43	1.9.94	979847.012	979847.017	979847.018	979847.027	979847.015	979847.006	979847.001
44	1.9.94	979852.685	979852.689	979852.700	979852.704	979852.687	-	979852.671
45	1.9.94	979857.918	979857.929	979857.946	979857.939	-	-	-

第 II-3-1-10表 重力値一覧表 (2/3)
Table II-3-1-10 List of the gravity in Yanaizu-Nishiyama geothermal field since 1997.

測定点 番号	設置年月日	絶対重力値 (mgal)						
		1997年度	1998年度			1999年度		
		秋季	春季	夏季	秋季	春季	夏季	秋季
2045	7.15.99	-	-	-	-	-	979857.919	979857.908
46	1.9.94	979863.590	979863.590	979863.612	-	-	-	-
2046	19.1.98	-	-	979863.590	979863.587	979863.578	979863.571	979863.561
47	1.9.94	979863.662	979863.668	979863.684	979863.678	979863.670	979863.665	979863.653
48	1.9.94	979861.471	979861.476	979861.476	979861.475	979861.470	979861.455	979861.462
49	1.9.94	979871.838	979871.845	979871.841	979871.834	979871.833	979871.823	979871.830
50	1.9.94	979874.494	979874.497	979874.497	979874.483	979874.489	979874.481	979874.482
51	1.9.94	979864.658	979864.661	979864.672	979864.652	979864.653	979864.655	979864.659
52	1.9.94	-	-	-	-	-	-	-
2052	31.10.96	-	-	-	-	-	-	-
3052	1.10.97	979838.686	979838.685	979838.690	979838.685	979838.681	979838.688	979838.686
53	1.9.94	979848.714	979848.716	979848.731	979848.718	979848.712	979848.722	979848.721
54	1.9.94	979855.443	979855.456	979855.435	979855.447	979855.437	979855.446	979855.448
55	1.9.94	-	-	-	-	-	-	-
2055	1.10.97	979849.569	979849.577	979849.573	-	-	-	-
3055	15.8.98	-	-	-	979849.573	979849.572	979849.582	979849.582
56	1.9.94	979880.706	979880.713	979880.726	979880.738	979880.704	979880.698	979880.707
57	1.9.94	979866.206	979866.209	979866.212	979866.220	979866.203	979866.197	979866.191
58	1.9.94	979859.512	979859.516	979859.519	979859.530	979859.512	979859.508	979859.500
59	1.9.94	979860.139	979859.990	979859.990	979859.998	979859.986	979859.981	979859.973
60	1.9.94	979876.924	979876.929	979876.934	979876.937	979876.921	979876.918	979876.915
61	1.9.94	979875.495	979875.506	979875.518	979875.506	979875.495	979875.495	979875.489
62	1.9.94	979871.337	979871.345	979871.365	979871.349	979871.338	979871.338	979871.334
63	1.9.94	979868.260	979868.263	979868.272	979868.256	979868.252	979868.238	979868.245
64	1.9.94	979862.332	979862.348	979862.359	979862.338	979862.333	979862.335	979862.328
65	1.9.94	979857.481	979857.506	979857.519	979857.496	979857.501	979857.496	979857.493
66	1.9.94	979862.258	979862.281	979862.285	979862.282	979862.274	979862.265	979862.278
67	1.9.94	979852.626	979852.626	979852.635	979852.644	979852.617	979852.611	979852.620
68	1.9.94	979837.789	979837.826	979837.844	979837.837	979837.826	979837.819	979837.829
69	1.9.94	979875.180	979875.185	979875.195	979875.187	979875.175	979875.171	979875.163
70	1.9.94	979873.587	979873.595	979873.601	979873.592	979873.583	979873.575	979873.571
71	1.9.94	979870.644	979870.663	979870.673	979870.663	979870.649	979870.645	979870.641
72	1.9.94	979865.649	979865.662	979865.667	-	-	-	-
2072	15.8.98	-	-	-	979865.667	979865.657	979865.654	979865.649
73	1.9.94	-	-	-	-	-	-	-
2073	1.10.97	979874.808	979874.835	979874.826	-	-	-	-
3073	15.8.98	-	-	-	979874.809	979874.798	979874.793	979874.809
74	1.9.94	979872.453	979872.479	979872.470	979872.476	979872.458	979872.455	979872.470
75	1.9.94	979870.874	979870.892	979870.887	979870.889	979870.865	979870.861	979870.876
76	1.10.97	979863.787	979863.789	979863.796	979863.802	979863.784	979863.790	979863.796
77	1.10.97	979860.697	979860.695	979860.700	979860.688	979860.684	979860.681	979860.678
78	1.10.97	979839.901	979839.896	979839.911	979839.909	979839.894	979839.905	979839.899
79	1.10.97	979868.773	979868.770	979868.753	979868.763	979868.764	979868.745	979868.739
80	1.10.97	979865.703	979865.709	979865.706	979865.700	979865.696	979865.696	979865.689
81	1.10.97	979899.400	979899.383	979899.377	979899.388	979899.393	979899.377	979899.375
82	1.10.97	979887.261	979887.254	979887.246	979887.264	979887.255	979887.247	979887.243
83	1.10.97	979884.519	979884.516	979884.507	979884.524	979884.515	979884.511	979884.494
84	1.10.97	979882.654	-	-	-	-	-	-
2084	15.4.98	-	979883.773	979883.766	979883.782	979883.769	979883.758	979883.772
85	1.10.97	979872.329	979872.336	979872.324	979872.340	979872.324	979872.315	979872.327
86	1.10.97	979861.651	979861.663	979861.658	979861.676	979861.649	979861.681	979861.689
87	1.10.97	979822.754	979822.771	979822.763	979822.769	979822.753	979822.767	979822.761
88	1.10.97	979825.755	979825.783	979825.769	979825.780	979825.776	979825.777	979825.769
89	1.10.97	979840.740	979840.759	979840.746	979840.737	979840.751	979840.758	979840.754
90	1.10.97	979850.519	979850.526	979850.514	979850.514	979850.518	979850.528	979850.525
91	1.10.97	979861.514	979861.524	979861.514	979861.508	979861.515	979861.523	979861.522

第Ⅱ-3-1-10表 重力値一覧表 (3/3)
Table Ⅱ-3-1-10 List of the gravity in Yanaizu-Nishiyama geothermal field since 1997.

測定点 番号	設置年月日	絶対重力値 (mgal)						
		1997年度	1998年度			1999年度		
		秋季	春季	夏季	秋季	春季	夏季	秋季
92	1.10.97	979867.936	979867.945	979867.943	979867.933	979867.941	979867.952	979867.949
93	1.10.97	979857.836	979857.825	979857.831	979857.808	979857.814	979857.823	979857.818
94	1.10.97	979847.874	979847.868	979847.873	979847.864	979847.865	979847.874	979847.869
95	1.10.97	979849.641	979849.641	979849.654	979849.643	979849.641	979849.646	979849.644
96	1.10.97	979857.490	979857.478	979857.493	-	-	-	-
2096	15.8.98	-	-	-	979856.487	979856.482	979856.492	979856.488
97	1.10.97	979867.216	979867.208	979867.198	979867.221	979867.209	979867.207	979867.212
98	1.10.97	979861.534	979861.533	979861.529	979861.544	979861.534	979861.535	979861.542
99	1.10.97	979860.764	979860.758	979860.754	979860.768	979860.765	979860.764	979860.769
100	1.10.97	979860.623	979860.620	979860.618	979860.624	979860.619	979860.622	979860.629
101	1.10.97	979854.506	979854.508	979854.499	979854.517	-	-	-
2101	15.4.99	-	-	-	-	979853.521	979853.523	979853.533
102	1.10.97	979834.000	979833.998	979833.996	979834.014	979833.990	979834.005	979833.997
103	1.10.97	979837.926	979837.928	979837.926	979837.929	979837.914	979837.932	979837.928
104	1.10.97	979846.292	979846.306	979846.288	979846.304	979846.292	979846.312	979846.301
105	1.10.97	979844.371	979844.382	979844.365	979844.380	979844.368	979844.384	979844.376
106	1.10.97	979821.136	979821.135	979821.136	979821.142	979821.125	979821.143	979821.135
107	1.10.97	979785.506	979785.493	979785.505	979785.501	979785.489	979785.502	979785.478
108	1.10.97	979830.988	979830.982	979830.987	979830.990	979830.983	979830.996	979830.963
109	1.10.97	979846.876	979846.869	979846.860	979846.876	979846.874	979846.883	979846.853
110	1.10.97	979861.130	979861.125	979861.121	979861.128	979861.133	979861.142	979861.112
111	1.10.97	979862.927	979862.922	979862.915	979862.922	979862.925	979862.934	979862.902
112	1.10.97	979867.484	979867.480	979867.480	979867.480	979867.480	979867.491	979867.466
113	1.10.97	979859.782	979859.782	979859.789	979859.782	979859.783	979859.792	979859.769
114	1.10.97	979861.293	979861.290	979861.280	979861.306	979861.281	979861.276	979861.286
115	1.10.97	979846.452	979846.455	979846.454	979846.444	979846.446	979846.447	979846.451
116	1.10.97	979854.125	979854.131	979854.130	979854.128	979854.117	979854.122	979854.124
117	1.10.97	979861.864	979861.855	979861.849	979861.857	979861.842	-	979861.853
118	1.10.97	979874.122	979874.119	979874.121	979874.117	979874.112	979874.134	979874.124
119	1.10.97	979862.172	979862.178	979862.168	979862.174	979862.169	979862.184	979862.174
120	1.10.97	979860.142	979860.147	979860.149	979860.145	979860.148	979860.165	979860.158
121	1.10.97	979866.033	979866.033	979866.035	979866.032	979866.032	979866.046	979866.043
122	1.10.97	979878.007	979878.004	979878.010	979877.996	979878.004	979878.019	979878.013
123	1.10.97	979890.634	979890.619	979890.619	979890.614	979890.618	979890.632	979890.626
124	1.10.97	979894.058	979894.058	979894.051	979894.046	979894.058	979894.069	979894.066
125	1.10.97	979856.233	979856.223	979856.236	-	-	-	-
2125	14.5.98	-	-	979856.234	979856.237	979856.225	979856.210	979856.221
126	1.10.97	979860.983	979860.980	979860.993	979860.984	979860.982	979860.986	979860.987
127	1.10.97	979861.363	979861.363	979861.371	979861.365	979861.367	979861.379	979861.373
128	1.10.97	979861.930	979861.925	979861.924	979861.930	979861.917	979861.925	979861.930
129	15.4.98	-	979869.514	979869.517	979869.518	979869.509	979869.511	979869.516
130	15.4.98	-	979871.525	979871.512	979871.510	979871.516	979871.519	979871.502
1995	20.9.95	979887.284	979887.284	979887.284	979887.284	979887.284	979887.284	979887.284
1001	1.9.94	979887.269	979887.272	979887.283	979887.270	979887.283	979887.286	979887.271
1002	1.9.94	979860.806	979860.809	979860.807	979860.811	979860.803	979860.805	979860.812
1003	1.9.94	979877.346	979877.356	979877.347	979877.352	979877.348	979877.352	979877.360
1004	1.9.94	979859.082	979859.084	979859.100	979859.094	979859.085	979859.075	979859.066
1005	1.9.94	979873.722	979873.729	979873.726	979873.712	979873.723	979873.708	979873.699
1006	1.9.94	979864.691	979864.692	979864.695	979864.694	979864.688	979864.677	979864.673
1007	1.9.94	979879.761	979879.767	979879.764	979879.775	979879.758	979879.755	979879.746
1008	1.9.94	979873.407	979873.401	979873.408	979873.401	979873.403	979873.391	979873.388
領域平均								

第 II-3-1-11表 重力巡回測定結果一覽表
Table II-3-1-11 List of patrol gravity measurement results at the monitoring well sites.

Date	04/07/99	05/18/99	06/01/99	06/15/99	06/29/99	07/13/99	08/24/99	09/07/99	09/21/99	10/05/99	11/15/99	11/30/99	12/14/99	12/25/99	01/11/00	01/25/00	02/08/00	02/22/00	03/07/00	03/21/00
Gravimeter	CG-3M-2	CG-3M-3	CG-3M-3	CG-3M-3	CG-3M-3	CG-3M-3	CG-3M-3	CG-3M-3	CG-3M-3	CG-3M-3	CG-3M-3	CG-3M-3	CG-3M-3	CG-3M-3	CG-3M-3	CG-3M-3	CG-3M-3	CG-3M-3	CG-3M-3	CG-3M-3
Factor Station	0.999813	0.999353	0.999363	0.999374	0.999384	0.999406	0.999535	0.999578	0.999620	0.999663	0.999746	0.999773	0.999798	0.999818	0.999849	0.999874	0.999899	0.999924	0.999950	0.999975
1995	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
92	-19.343	-19.346	-19.344	-19.343	-19.342	-19.340	-19.338	-19.340	-19.341	-19.338	-19.342	-19.335	-19.342	-19.336	-19.335	-19.344	-19.346	-19.347	-19.345	-19.347
87	-64.535	-64.531	-64.528	-64.528	-64.528	-64.523	-64.522	-64.523	-64.526	-64.526	-64.525	-64.523	-64.515	-64.519	-64.526	-64.528	-64.528	-64.529	-64.531	-64.536
129	-17.773	-17.777	-17.773	-17.773	-17.773	-17.769	-17.771	-17.772	-17.774	-17.772	-17.767	-17.763	-17.763	-17.766	-17.766	-17.771	-17.774	-17.768	-17.771	-17.769
48	-25.828	-25.820	-25.818	-25.821	-25.821	-25.817	-25.819	-25.822	-25.823	-25.820	-25.814	-25.815	-25.813	-25.815	-25.806	-25.815	-25.816	-25.817	-25.824	-25.819
2046	-23.708	-23.714	-23.712	-23.712	-23.709	-23.708	-23.712	-23.713	-23.711	-23.710	-23.704	-23.708	-23.708	-23.707	-23.709	-23.710	-23.711	-23.710	-23.712	-23.705
2125	-31.066	-31.073	-31.072	-31.071	-31.071	-31.067	-31.069	-31.068	-31.068	-31.070	-31.070	-31.066	-31.062	-31.062	-31.064	-31.065	-31.064	-31.067	-31.061	-31.064
41	-41.929	-41.930	-41.923	-41.925	-41.924	-41.923	-41.928	-41.925	-41.924	-41.923	-41.921	-41.921	-41.928	-41.929	-41.922	-41.929	-41.923			
58	-27.772	-27.772	-27.780	-27.777	-27.776	-27.772	-27.778	-27.778	-27.779	-27.780	-27.777	-27.776	-27.777	-27.777	-27.771	-27.782	-27.781	-27.777	-27.784	-27.784
130	-15.767	-15.776	-15.772	-15.770	-15.774	-15.768	-15.773	-15.773	-15.775	-15.775	-15.776	-15.775	-15.774	-15.773	-15.778	-15.772	-15.776	-15.775	-15.775	-15.777
121		-21.252	-21.247	-21.250	-21.245	-21.246	-21.249	-21.250	-21.256	-21.250	-21.251	-21.251	-21.245							
9999	25.641	25.637	25.636	25.638	25.636	25.644	25.631	25.634	25.637	25.634	25.636	25.635	25.642		25.644	25.640	25.644	25.647	25.643	25.644

CG-3M-1		CG-3M-2		CG-3M-3	
Date	CF	Date	CF	Date	CF
01/22/98	0.999823	01/22/98	0.999408		
04/03/98	0.999319	04/03/98	0.999486		
		03/02/99	0.999797		
04/15/99	0.999136	04/15/99	0.999817	04/15/99	0.999328
				07/08/99	0.999391
				10/12/99	0.999685
				03/29/00	0.999989

けるNo.1995からの重力差の時間変化を示す。また第II-3-1-23図～第II-3-1-32図に各重力測定点における巡回測定結果と近傍の観測井における地下水位変動を示す。

昨年の巡回測定結果に比べて変動のばらつきが改善され、地下水位との相関性が検討できるレベルに達してきた。昨年度とは使用重力計、データ処理方法が異なっており、そのうちのどの技術要素が解析結果の質の向上につながったのかはまだ完全には把握できていない。今後データの再解析を通じて測定解析技術の向上につなげてゆく必要がある。

第II-3-1-23図～第II-3-1-32図では巡回測定結果とともに同じ測定点における定期測定結果もプロットしてあるが、定期測定前後の巡回測定結果との連続性が若干損なわれている場合がある。その場合のギャップの大きさは数 μgal 程度である。これらはおそらく解析区間の違いと測定方式の違いにより地下水位等のノイズの現れ方が異なるためではないかと考えている。巡回測定の場合には4日間の間に3～4回の測定が同一測定点で実施され、これが一括して解析されている。同一点での測定間隔は1日～10日程度である。一方、定期測定の場合には巡回測定の13倍の測定点をできるだけ同じような気象・水理条件のもとで測定を行うために短期間により広範囲の測定点をカバーしており、このため同一点における測定間隔が2週間近くになる場合がある。これを一括して解析を行い平均的な重力値を解析しているために巡回測定結果との間にギャップが生じる可能性がある。

4) 連続観測結果

第II-3-1-33図に連続観測結果を示す。同図(a)は重力計読み値、(b)は重力計ドリフト除去後の残差、(c)は重力計センサー容器内部の温度変化、(d)は重力計の傾きを表している。以下に各測定量ごとの特徴について述べる：

① 重力計読み値の変化

本年度の連続測定では重力計によるドリフト自動補正レートを 0.29mgal/day と指定しており、この自動補正量が実際のドリフトの1次成分より若干大きかったため、読み値は時間とともに減少している。全体的な傾向として重力計読み値にはドリフトの1次成分のほかに1年に近い周期をもつ長期的な変動が認められる。その大きさは数 mgal と大きく、地下水等の変動によるものとは考えにくい。このような長期のドリフトは西島ほか(1998)で報告されており、西島らが観測した変動の振幅も約 25mgal 程度と大きなもので、外気温の年変化との関連性が指摘されている。このような振幅が大きく原因とパターンが不明な変動が連続測定記録には含まれているため、この記録単独から地下密度分布の長期的な変動を分離することは難しい。連続観測記録を数週間単位の記録に分割し、個々の記録の中で重力計ドリフトを時間に関する多項式近似を行い、その解析区間より短い1週間以内程度の変動に関して議論を行うのには差し支えがないと考える。

また、読み値には重力計調整に起因するテアや地震等による急激な重力変化が記録されている。本年度は連続観測用重力計の温度センサーの調整を実施しており、同図(a)と(d)を見比べると温度記録の飛びに対応したテアが認められる。これらのテアの量はテアの発生時刻が明確にわかっているため精度よく知ることができる。また、重力計読み値には9月に非常に大きなパルス状の変化が認められるが、これ

は昨年9月21日に発生した台湾大地震による影響である。

② 重力計ドリフト除去後の残差の変動

上述の通り、重力計の長周期のドリフトの推定が困難なため、およそ2週間の間隔で回収された連続観測記録に対してドリフトを時刻に関する2次関数として仮定し、これを推定した。同図(b)はそのドリフトを重力計読み値から取り除いた残差を示したものである。ドリフトの推定時にはテアの量も推定しこれも除去した。解析区間(約2週間)と同程度かそれより長い周期をもつ変動はドリフトとともに除去されている。また、解析の際に気圧変動補正と精密潮汐補正が施してあるため、これらの補正漏れの振幅は0.005mgalよりはるかに小さい。

この残差に現れているのは、地盤の振動やゆらぎによる短周期のノイズや重力変動、数日単位の急激な変動の影響である。7月末と10月下旬の比較的長周期の変動は、ドリフト推定が重力計出力の急激な変動について行けずに歪んだものと考えられる。7月末の変動は連続観測室のクーラー故障による観測室内の異常高温によるもので、このときのセンサー容器内部の温度変化にもその影響が現れている。10月下旬の変動に関しては現時点では原因が不明である。この時期に巡回測定でも本測定点の重力が急激に増えたことを示しているほか、地下水位の上昇、地表近くの不飽和帯の水分率の急激な上昇が認められるため、地下浅部の密度変動に起因している可能性もある。

③ 重力計センサー容器内部の温度変化

CG-3M-2の温度センサーのドリフトは昨年度使用したCG-3M-1に比べると比較的小さく、5ヶ月から6ヶ月程度は調整の必要がなかった。温度センサーの出力が±1.0mKを超えたときに、ドリフト調整用のつまみを動かして調整するが、この調整の際にテアが発生する。

観測室内はクーラーにより極力温度変化を小さくするようにしているが、冷暖房の自動切り換えがないため春先の温度変化が激しい時期にクーラーを止めていた。4月から5月にかけて短周期の温度変化が記録にあらわれているのはこのためである。

④ 重力計の傾き

重力計の傾きはデータ回収の際にこまめに調整したこともあって、ほぼ±10arcsecの範囲に入っている。但し、昨年度の報告書でも指摘したように、CG-3M-2の傾斜のY成分(tilt-Y)に後述するセンサー容器内部の温度変化の影響が混入していることが明らかになった。前述の通り、7月末にクーラーの故障により観測所の室温が異常に上昇したが、これに起因するイベントが傾斜のY成分にのみ顕著に現れている。このことから、重力計内部でのセンサー信号の混信が起きているものと考ええる。但し、その混信の度合いは現時点では小さく、誤差を生じるほどではないと考える。

(5) 重力変動計算

1) 計算方法

1997年度から本年度までの7回の定期測定で決定された重力値から重力変動を計算した。測定された重力値の変動には、地下の密度変動による変動成分の他に、測定点

の標高変動による直接的な効果が含まれている。地下の密度変動に直接起因する重力変動を捉えるためには、この重力変動効果を取り除く必要がある。前節で述べた標高変動に起因する重力変動効果を以下の方法で計算し、これを重力変動から差し引いた。以後、標高変動の直接的な効果の除去を「標高補正」と呼び、その補正量を「標高補正值」と呼ぶことにする。標高補正值を次式で定義する：

$$\begin{aligned}dG &= dG_v + \Delta \\ \Delta &= dH \cdot (0.3086 - 0.0419\rho)\end{aligned}$$

ここで、 dG ： 標高補正前の重力変動 (μgal)

dG_v ： 標高補正済み重力変動 (μgal)

Δ ： 標高補正值 (μgal)

dH ： 標高変動 (mm)

ρ ： 仮定密度 (g/cm^3)

上記の補正は高度補正(フリーエア補正・単純ブーゲー補正)に相当し、大気の効果、測定点の周囲の地形や測定点の緯度の経時変化が無視できれば、標高補正済み重力変動はブーゲー重力異常の変動にほぼ等しい。なお、仮定密度には $\rho=2.15\text{g}/\text{cm}^3$ を用いた。

第II-3-1-12表に重力変動一覧表を示す。前節の標高変動と同じ期間での標高補正前の重力変動、及び標高補正済み重力変動の分布をコンターマップとして図化し、第II-3-1-34図～第II-3-1-44図、第II-3-1-45図～第II-3-1-55図にそれぞれ示した。また、第II-3-1-56図～第II-3-1-70図に標高補正済みの重力変動を地域別に分類して図化したものを示す。

2) 計算結果

重力変動分布には細かい地域性があり、調査地域全体のコンターマップではその特徴を捉えるのが難しい。そこで、ここでは第II-3-1-56図～第II-3-1-70図の地域別の標高補正済み重力変動の特徴について述べる。これらの図では138測定点中111点(全体の80%)の重力変動が網羅されている。

① 生産領域及び還元領域

生産井及び還元井が掘削され、地熱流体の生産活動の影響が大きいと考えられる地域では、1998年4月～5月の定期修理に伴う蒸気生産停止と時間的な関連性があり、そのような重力変動が認められている。これらの変動は3ヶ月から1年間程度に亘って $30\mu\text{gal}$ 以上の系統的な変化を示すのが特徴である。

生産領域では、1998年4月～5月の定期修理に伴う蒸気生産停止後、1998年度夏季あるいは1998年度秋季定期測定までは重力が増加し、それ以降重力が減少する傾向を示す。その重力増加がピークを迎える時期に地域性があり、血の池沢上流部(第II-3-1-56図)、大安沢(第II-3-1-57図)などでは1998年度夏季に、6Tサイト周辺(第II-3-1-58図)では1998年度秋季にピークを迎える測定点が多い。こうした生産領域に見られる特徴的なパターンは、これらに隣接する胃中東方のNo.67及びNo.68、黒沢部落のNo.15などでも認められる。生産領域の辺縁部である猿倉沢周辺(第II-

3-1-59図)では、重力の減少が系統的に起こっているように見えるが、他の地域にみられるような明瞭な重力増加のピークが認められない。

また、還元の対象となる老沢断層に沿う測定点(第II-3-1-61図)ではこれらとは全く異なるパターンの変動を示す。これらの測定点では1998年度夏季と1998年秋季の間に $20\mu\text{gal}$ 以上の急激な重力の減少があり、その後徐々に回復してゆくのの特徴である。

② 周辺領域

生産・還元領域と異なるのは、まず重力変動の幅が小さく、 $10\sim 20\mu\text{gal}$ の変動にとどまっていること、また変動の傾向が生産・還元領域に比べて短周期で変化することが挙げられる。

特に、生産・還元領域の北側に隣接する砂子原部落(第II-3-1-62図)・五畳敷部落(第II-3-1-63図)・牧沢部落(第II-3-1-64図)・久保田部落周辺(第II-3-1-65図)、南側の冑中部落(第II-3-1-66図)の重力点における変動は非常に小さく、安定している。また、これらの地区では標高の変動も比較的小さい。これらの測定点は集落のある尾根の上、段丘面上にあるものが多い。

一方、そのほかの地区は山間部にあり、重力変動の幅は $20\mu\text{gal}$ 程度で、調査地域北部の湯八木沢(第II-3-1-67図)や調査地域南東部の四ツ谷(第II-3-1-68図)では変動に周期性が認められる。また調査地域北西部の大谷部落付近(第II-3-1-69図)及び調査地域南部の大成沢部落付近(第II-3-1-70図)は通常は重力変動が小さいが突然3ヶ月に $20\mu\text{gal}$ 程度の変動が広域的に認められた。こうした重力変動の原因については現時点では全くわかっていない。

5. 地下水位測定

調査地域内に掘削された水位観測井10箇所では平成10年度から自動水位計による連続測定を継続している。また、重力巡回測定の際には、自動水位計を設置していない観測井の水位を確認するためにロープ式水位計による巡回測定を実施した。

(1) 使用機器

地下水位連続測定に使用した自動水位計は、以下に示す水位計感部と記録部からなる。

水位計

感部： 横川ウェザック(株)製 水圧式水位計感部 W431-Z

測定範囲： $0\sim 20\text{m}$

測定精度：フルスケールの $\pm 0.1\%$ (本調査の場合 $\pm 1\text{cm}$)

データ記録部：横川ウェザック(株)製 フィールド μ M5561-70-01

地下水位巡回測定には、ロープ式水位・温度計(ロープ長 50m)を使用した。

(2) 測定方法

1) 連続測定

第 II-3-1-12表 重力変動一覽表 (1/6)
Table II-3-1-12 List of gravity changes.

測定点 番号	設置年月日	標高補正前重力変動 (μ gal)					
		'97秋~'98春	'97秋~'98夏	'97秋~'98秋	'97秋~'99春	'97秋~'99夏	'97秋~'99秋
1	1.9.94	-	-	-	-	-	-
2001	1.10.97	-5	3	-4	2	3	-7
2	1.9.94	-2	6	8	2	3	-2
3	1.9.94	4	14	18	9	13	3
4	1.9.94	-1	3	18	7	9	3
5	1.9.94	3	6	6	3	5	-5
6	1.9.94	4	10	17	16	10	14
7	1.9.94	6	15	18	9	12	13
8	1.9.94	6	5	9	3	14	13
9	1.9.94	14	6	18	8	14	17
10	1.9.94	-	-	-	-	-	-
2010	1.10.97	-1	-1	-4	-4	-3	0
11	1.9.94	-4	-10	-11	-15	-24	-10
12	1.9.94	-7	-10	-5	-6	-10	-12
13	1.9.94	-3	-3	1	-2	-3	-5
14	1.9.94	-	-	-	-	-	-
2014	15.4.98	-	-	-	-	-	-
15	1.9.94	-5	3	19	-1	-13	-11
16	1.9.94	-	-	-	-	-	-
2016	1.10.97	-6	-1	-3	-6	-21	-24
17	1.9.94	-8	5	-8	-6	-17	-19
18	1.9.94	-8	1	2	-1	1	-15
19	1.9.94	5	-1	13	6	7	-8
20	1.9.94	-	-	-	-	-	-
2020	15.4.98	-	-	-	-	-	-
21	1.9.94	-13	-16	-3	-8	-26	-19
22	1.9.94	7	11	4	6	-10	-1
23	1.9.94	-	-	-	-	-	-
2023	20.9.95	0	17	13	3	-11	-25
24	1.9.94	5	9	12	2	-6	-11
25	1.9.94	6	8	14	-6	-12	-18
26	1.9.94	-1	-8	8	-5	-19	-25
27	1.9.94	8	17	12	1	8	-13
28	1.9.94	13	10	11	4	-10	1
29	1.9.94	13	9	16	6	-8	-4
30	1.9.94	-	-	-	-	-	-
2030	20.9.95	-	-	-	-	-	-
3030	15.4.98	-	-	-	-	-	-
31	1.9.94	-9	3	-32	-23	-25	-21
32	1.9.94	-4	3	-23	-13	-18	-13
33	1.9.94	7	6	-14	-2	-10	-5
34	1.9.94	4	5	16	-3	-1	-2
35	1.9.94	-	-	-	-	-	-
2035	1.10.97	5	7	9	3	4	4
36	1.9.94	-14	-15	-21	-20	-14	-6
37	1.9.94	-	-	-	-	-	-
2037	31.10.96	-	-	-	-	-	-
3037	1.10.97	-7	2	-12	-8	-6	-7
38	1.9.94	11	5	6	8	8	3
39	1.9.94	3	-1	4	-13	-5	-7
40	1.9.94	5	8	9	-5	3	-1
41	1.9.94	1	2	1	-3	-12	-19
42	1.9.94	-3	-2	3	2	-9	-17
43	1.9.94	5	6	14	2	-6	-11
44	1.9.94	4	14	19	2	-	-14
45	1.9.94	11	27	21	-	-	-

第 II-3-1-12表 重力變動一覽表 (2/6)
Table II-3-1-12 List of gravity changes.

測定点 番号	設置年月日	標高補正前重力變動 (μ gal)					
		'97秋~'98春	'97秋~'98夏	'97秋~'98秋	'97秋~'99春	'97秋~'99夏	'97秋~'99秋
2045	7.15.99	-	-	-	-	-	-
46	1.9.94	0	21	-	-	-	-
2046	19.1.98	-	-	-	-	-	-
47	1.9.94	6	22	15	7	3	-9
48	1.9.94	5	6	5	-1	-16	-8
49	1.9.94	7	4	-4	-5	-14	-8
50	1.9.94	3	3	-11	-5	-13	-12
51	1.9.94	3	14	-6	-5	-3	1
52	1.9.94	-	-	-	-	-	-
2052	31.10.96	-	-	-	-	-	-
3052	1.10.97	-1	4	0	-4	3	1
53	1.9.94	2	17	4	-1	8	7
54	1.9.94	13	-8	4	-6	4	5
55	1.9.94	-	-	-	-	-	-
2055	1.10.97	8	-	-	-	-	-
3055	15.8.98	-	-	-	-	-	-
56	1.9.94	6	20	32	-2	-9	1
57	1.9.94	3	6	14	-3	-8	-15
58	1.9.94	4	7	18	0	-4	-12
59	1.9.94	-	-	-	-	-	-
60	1.9.94	5	10	13	-3	-6	-9
61	1.9.94	11	23	11	0	0	-6
62	1.9.94	8	28	12	1	1	-3
63	1.9.94	3	12	-4	-9	-22	-15
64	1.9.94	16	27	5	1	2	-5
65	1.9.94	24	38	15	19	15	12
66	1.9.94	23	27	23	15	6	19
67	1.9.94	0	8	18	-9	-15	-6
68	1.9.94	38	55	48	37	30	40
69	1.9.94	5	15	7	-5	-10	-17
70	1.9.94	8	14	4	-4	-12	-16
71	1.9.94	19	29	19	5	1	-3
72	1.9.94	13	-	-	-	-	-
2072	15.8.98	-	-	-	-	-	-
73	1.9.94	-	-	-	-	-	-
2073	1.10.97	26	-	-	-	-	-
3073	15.8.98	-	-	-	-	-	-
74	1.9.94	27	17	23	5	2	17
75	1.9.94	18	13	15	-9	-13	2
76	1.10.97	2	9	15	-4	3	9
77	1.10.97	-1	3	-9	-13	-15	-18
78	1.10.97	-6	10	8	-7	3	-2
79	1.10.97	-3	-21	-11	-9	-28	-34
80	1.10.97	6	3	-3	-7	-7	-14
81	1.10.97	-17	-23	-11	-7	-22	-25
82	1.10.97	-7	-15	3	-6	-14	-18
83	1.10.97	-4	-12	5	-5	-9	-26
84	1.10.97	-	-	-	-	-	-
2084	15.4.98	-	-	-	-	-	-
85	1.10.97	8	-5	11	-5	-14	-2
86	1.10.97	12	7	26	-2	30	39
87	1.10.97	16	8	14	-2	13	7
88	1.10.97	28	15	25	21	22	15
89	1.10.97	19	6	-4	10	18	13
90	1.10.97	8	-4	-5	0	9	6
91	1.10.97	10	0	-5	1	9	9

第Ⅱ-3-1-12表 重力変動一覽表 (3/6)
Table Ⅱ-3-1-12 List of gravity changes.

測定点 番号	設置年月日	標高補正前重力変動 (μgal)					
		'97秋~'98春	'97秋~'98夏	'97秋~'98秋	'97秋~'99春	'97秋~'99夏	'97秋~'99秋
92	1.10.97	9	7	-3	4	16	13
93	1.10.97	-11	-5	-28	-22	-13	-18
94	1.10.97	-6	-1	-10	-9	0	-5
95	1.10.97	0	13	2	0	6	3
96	1.10.97	-13	-	-	-	-	-
2096	15.8.98	-	-	-	-	-	-
97	1.10.97	-8	-18	5	-6	-9	-3
98	1.10.97	-1	-5	11	0	1	9
99	1.10.97	-5	-10	4	1	1	6
100	1.10.97	-2	-5	1	-4	0	7
101	1.10.97	2	-7	11	-	-	-
2101	15.4.99	-	-	-	-	-	-
102	1.10.97	-2	-4	13	-10	4	-4
103	1.10.97	2	1	3	-12	6	2
104	1.10.97	14	-4	12	0	20	9
105	1.10.97	11	-6	9	-2	14	5
106	1.10.97	-1	0	6	-11	7	-1
107	1.10.97	-13	-1	-5	-17	-4	-28
108	1.10.97	-6	-1	2	-5	8	-25
109	1.10.97	-7	-16	0	-2	7	-23
110	1.10.97	-4	-8	-2	4	13	-17
111	1.10.97	-5	-12	-5	-2	7	-26
112	1.10.97	-4	-4	-4	-3	7	-17
113	1.10.97	0	7	0	1	10	-13
114	1.10.97	-3	-12	14	-11	-17	-6
115	1.10.97	3	2	-8	-6	-5	-1
116	1.10.97	6	5	3	-8	-3	0
117	1.10.97	-10	-16	-8	-23	-	-11
118	1.10.97	-3	-2	-5	-11	12	2
119	1.10.97	6	-5	1	-4	11	1
120	1.10.97	5	7	4	6	23	16
121	1.10.97	0	2	-1	-1	13	10
122	1.10.97	-2	3	-10	-3	12	6
123	1.10.97	-16	-16	-20	-17	-2	-8
124	1.10.97	1	-7	-12	0	12	8
125	1.10.97	-11	2	-	-	-	-
2125	14.5.98	-	-	-	-	-	-
126	1.10.97	-2	11	1	0	4	5
127	1.10.97	0	9	3	5	16	11
128	1.10.97	-6	-7	-1	-14	-6	0
129	15.4.98	-	-	-	-	-	-
130	15.4.98	-	-	-	-	-	-
1995	20.9.95	-	-	-	-	-	-
1001	1.9.94	3	14	1	14	17	2
1002	1.9.94	4	1	5	-2	0	7
1003	1.9.94	10	2	6	2	7	14
1004	1.9.94	2	18	12	3	-7	-16
1005	1.9.94	7	4	-11	1	-14	-23
1006	1.9.94	1	4	3	-3	-14	-18
1007	1.9.94	6	2	14	-3	-6	-15
1008	1.9.94	-7	1	-7	-4	-17	-19
領域平均		3	4	4	-2	-1	-4

第Ⅱ-3-1-12表 重力変動一覽表 (4/6)
Table Ⅱ-3-1-12 List of gravity changes.

測定点 番号	設置年月日	標高補正済み重力変動 (μ gal)					
		'97秋~'98春	'97秋~'98夏	'97秋~'98秋	'97秋~'99春	'97秋~'99夏	'97秋~'99秋
1	1.9.94	-	-	-	-	-	-
2001	1.10.97	-4	5	-2	5	6	-3
2	1.9.94	-1	7	10	4	5	2
3	1.9.94	4	15	18	11	16	6
4	1.9.94	-1	3	18	9	11	5
5	1.9.94	3	7	7	5	8	-4
6	1.9.94	5	11	16	17	11	14
7	1.9.94	6	14	17	9	12	12
8	1.9.94	6	5	9	4	14	13
9	1.9.94	15	7	18	9	15	17
10	1.9.94	-	-	-	-	-	-
2010	1.10.97	-1	0	-4	-3	-1	2
11	1.9.94	-4	-10	-11	-16	-21	-9
12	1.9.94	-6	-8	-3	-3	-7	-10
13	1.9.94	-2	-2	3	0	-1	-3
14	1.9.94	-	-	-	-	-	-
2014	15.4.98	-	-	-	-	-	-
15	1.9.94	-5	8	24	2	-9	-11
16	1.9.94	-	-	-	-	-	-
2016	1.10.97	-6	-1	-3	-6	-19	-25
17	1.9.94	-8	5	-4	-5	-13	-17
18	1.9.94	-8	0	4	-2	2	-15
19	1.9.94	3	-4	15	4	7	-9
20	1.9.94	-	-	-	-	-	-
2020	15.4.98	-	-	-	-	-	-
21	1.9.94	-13	-12	3	-4	-24	-19
22	1.9.94	7	11	4	6	-6	-1
23	1.9.94	-	-	-	-	-	-
2023	20.9.95	-3	15	10	0	-12	-28
24	1.9.94	5	7	8	0	-7	-15
25	1.9.94	5	6	10	-9	-15	-23
26	1.9.94	0	-10	5	-7	-21	-29
27	1.9.94	7	16	10	0	7	-15
28	1.9.94	12	9	9	3	-10	-1
29	1.9.94	12	8	15	6	-8	-5
30	1.9.94	-	-	-	-	-	-
2030	20.9.95	-	-	-	-	-	-
3030	15.4.98	-	-	-	-	-	-
31	1.9.94	-8	3	-33	-22	-26	-20
32	1.9.94	-3	3	-25	-13	-19	-13
33	1.9.94	8	6	-15	-1	-9	-5
34	1.9.94	7	6	15	-4	-1	-1
35	1.9.94	-	-	-	-	-	-
2035	1.10.97	8	8	8	4	5	5
36	1.9.94	-12	-11	-18	-19	-10	-4
37	1.9.94	-	-	-	-	-	-
2037	31.10.96	-	-	-	-	-	-
3037	1.10.97	-6	3	-12	-8	-5	-6
38	1.9.94	10	0	2	3	3	2
39	1.9.94	1	-9	-6	-21	-12	-9
40	1.9.94	2	-3	-3	-16	-6	-5
41	1.9.94	0	0	-1	-7	-18	-21
42	1.9.94	-4	-4	1	-1	-14	-19
43	1.9.94	4	4	13	-1	-12	-15
44	1.9.94	4	15	19	0	-	-18
45	1.9.94	12	29	23	-	-	-

第 II-3-1-12表 重力変動一覽表 (5/6)
Table II-3-1-12 List of gravity changes.

測定点 番号	設置年月日	標高補正済み重力変動 (μgal)					
		'97秋~'98春	'97秋~'98夏	'97秋~'98秋	'97秋~'99春	'97秋~'99夏	'97秋~'99秋
2045	7.15.99	-	-	-	-	-	-
46	1.9.94	0	23	-	-	-	-
2046	19.1.98	-	-	-	-	-	-
47	1.9.94	6	21	14	6	1	-11
48	1.9.94	6	6	5	0	-14	-5
49	1.9.94	10	7	-1	-3	-13	-7
50	1.9.94	7	8	-8	-4	-11	-12
51	1.9.94	3	14	-7	-6	-3	1
52	1.9.94	-	-	-	-	-	-
2052	31.10.96	-	-	-	-	-	-
3052	1.10.97	-4	-4	-10	-13	-5	-4
53	1.9.94	0	13	-1	-5	5	7
54	1.9.94	12	-8	2	-7	4	4
55	1.9.94	-	-	-	-	-	-
2055	1.10.97	8	-	-	-	-	-
3055	15.8.98	-	-	-	-	-	-
56	1.9.94	6	18	30	-5	-9	-3
57	1.9.94	2	5	12	-5	-9	-18
58	1.9.94	2	3	12	-5	-8	-16
59	1.9.94	-	-	-	-	-	-
60	1.9.94	6	11	16	-3	-5	-10
61	1.9.94	10	24	13	-1	0	-9
62	1.9.94	4	25	8	-4	-5	-10
63	1.9.94	-3	7	-10	-16	-30	-23
64	1.9.94	5	18	-5	-11	-11	-17
65	1.9.94	9	25	1	3	-2	-4
66	1.9.94	21	21	21	13	5	16
67	1.9.94	-4	-3	10	-16	-22	-12
68	1.9.94	31	37	32	22	16	27
69	1.9.94	5	14	5	-7	-11	-21
70	1.9.94	8	12	1	-7	-14	-20
71	1.9.94	18	27	15	2	-1	-7
72	1.9.94	11	-	-	-	-	-
2072	15.8.98	-	-	-	-	-	-
73	1.9.94	-	-	-	-	-	-
2073	1.10.97	25	-	-	-	-	-
3073	15.8.98	-	-	-	-	-	-
74	1.9.94	25	16	19	1	-1	13
75	1.9.94	15	10	9	-14	-17	-3
76	1.10.97	3	9	14	-5	2	9
77	1.10.97	-7	-6	-20	-23	-24	-27
78	1.10.97	-6	6	2	-11	2	-2
79	1.10.97	-3	-20	-10	-8	-27	-35
80	1.10.97	7	5	-1	-3	-3	-11
81	1.10.97	-17	-22	-11	-6	-19	-25
82	1.10.97	-6	-13	6	-2	-11	-16
83	1.10.97	-2	-10	9	1	-6	-24
84	1.10.97	-	-	-	-	-	-
2084	15.4.98	-	-	-	-	-	-
85	1.10.97	8	-3	13	-2	-10	3
86	1.10.97	12	8	26	-1	32	45
87	1.10.97	16	8	14	-3	12	17
88	1.10.97	28	15	26	21	23	24
89	1.10.97	19	6	-4	9	17	19
90	1.10.97	8	-4	-5	0	9	10
91	1.10.97	10	0	-5	1	8	9

第 II-3-1-12表 重力変動一覽表 (6/6)
Table II-3-1-12 List of gravity changes.

測定点 番号	設置年月日	標高補正済み重力変動 (μgal)					
		'97秋~'98春	'97秋~'98夏	'97秋~'98秋	'97秋~'99春	'97秋~'99夏	'97秋~'99秋
92	1.10.97	9	6	-4	3	18	13
93	1.10.97	-11	-5	-28	-21	-13	-16
94	1.10.97	-5	0	-9	-8	1	-1
95	1.10.97	-1	13	1	0	6	6
96	1.10.97	-12	-	-	-	-	-
2096	15.8.98	-	-	-	-	-	-
97	1.10.97	-8	-18	5	-7	-10	-5
98	1.10.97	-1	-5	10	0	0	7
99	1.10.97	-6	-11	3	-1	-2	2
100	1.10.97	-2	-5	1	-5	-1	4
101	1.10.97	2	-9	8	-	-	-
2101	15.4.99	-	-	-	-	-	-
102	1.10.97	-2	-4	14	-10	5	-3
103	1.10.97	2	1	3	-12	6	0
104	1.10.97	14	-4	11	-1	19	7
105	1.10.97	11	-7	8	-4	12	2
106	1.10.97	-1	-1	5	-13	5	4
107	1.10.97	-15	-4	-9	-22	-11	-24
108	1.10.97	-7	-4	-2	-10	1	-28
109	1.10.97	-7	-17	-1	-3	6	-24
110	1.10.97	-4	-8	2	3	12	-18
111	1.10.97	-6	-13	-6	-3	7	-26
112	1.10.97	-4	-5	-1	-1	8	-16
113	1.10.97	0	5	3	2	8	-13
114	1.10.97	-2	-11	17	-8	-12	-2
115	1.10.97	4	4	-5	-2	1	7
116	1.10.97	7	6	6	-5	1	5
117	1.10.97	-9	-14	-5	-19	-	-6
118	1.10.97	-4	4	1	-5	16	4
119	1.10.97	9	0	7	0	13	5
120	1.10.97	5	8	4	7	24	20
121	1.10.97	0	2	0	0	14	13
122	1.10.97	-5	3	-9	0	16	9
123	1.10.97	-15	-14	-17	-12	4	-6
124	1.10.97	1	-5	-7	4	19	10
125	1.10.97	-10	4	-	-	-	-
2125	14.5.98	-	-	-	-	-	-
126	1.10.97	-2	11	2	1	3	5
127	1.10.97	0	8	3	4	16	14
128	1.10.97	-4	-3	4	-10	-2	7
129	15.4.98	-	-	-	-	-	-
130	15.4.98	-	-	-	-	-	-
1995	20.9.95	-	-	-	-	-	-
1001	1.9.94	3	14	1	16	20	4
1002	1.9.94	4	2	7	-2	0	7
1003	1.9.94	10	4	7	4	8	15
1004	1.9.94	3	20	15	0	-9	-19
1005	1.9.94	8	5	-8	-1	-15	-26
1006	1.9.94	-1	2	7	-6	-16	-22
1007	1.9.94	7	4	16	-5	-6	-17
1008	1.9.94	-7	0	-4	-4	-14	-18
領域平均		2	4	4	-3	-2	-5

浅層水位観測井10掘削地点のうちNo.1とNo.7を除く8地点には本孔と別孔の2つの井戸がそれぞれ掘削された。No.1孔, No.2別孔, No.3別孔, No.4別孔, No.5別孔, No.6別孔, No.7孔, No.8別孔, No.9別孔及びNo.10別孔の計10孔に水圧式水位計を設置し、浅層地下水位の連続観測を実施した。データ記録部は孔口のすぐ横に設置した保護用ケースの中に取り付けてある。水位計感部で検知された水頭圧は電圧としてデータ記録部に送られ、データ収録部で水位データとして変換されメモリーに記録される。水位データのサンプリング間隔は30分で毎時00分と30分に記録した。

測定データはデータ記録部のメモリーからPCカードを用いて回収した。また、1998年7月以降、データ回収の際に時々ロープ式水位計で自動水位計の較正用のデータを取得し、また、データ記録部の内蔵時計のずれのチェックを行っている。

回収したデータはPCカードからコンピュータに転送して、専用のデータ処理用ソフトウェアによってテキストファイルに変換した後、図化・保存を行った。

なお、記録する水位の基準は地表面（GL）とし、坑口に埋設されたコンクリート柵の上面で代表させた。

2) 巡回測定

No.2本孔, No.3本孔, No.4本孔, No.5本孔, No.6本孔, No.8本孔, No.9本孔及びNo.10本孔において重力巡回測定中に水位を測定した。

水位の基準は地表面（GL）とし、坑口に埋設されたコンクリート柵の上面で代表させた。測定は1箇所まで3回実施し、その平均値を測定値として記録した。

(3) 測定結果

1) 連続測定

地下水位の連続観測記録を第II-3-1-71図に示す。地下水位変動にはNo.2本孔, No.4本孔, No.5本孔のように比較的季節変動が明瞭にわかるものとそうでないものがある。各水位変動の特徴について第II-3-1-13表にまとめた。

2) 巡回測定

水位巡回測定結果を第II-3-1-72図に示す。管頭からの水の流入がないように対策を施した結果、急激な水位の変化は殆ど認められなくなった。また、季節的な変動は明瞭ではない。

No.3 別孔及び No.4 別孔の水位は僅かだが減少する傾向が認められる。また、1998年7月頃から急激に上昇し始めた No.5 別孔の水位は現在約 16m上昇している。1999年春頃から次第にその傾向が弱まっているものの、現在もまだ増加の傾向が認められる。もっとも増加の傾向の激しかった 1998 年 11 月～1999 年 4 月を挟んで、同孔近傍の No.2125 の標高が 25mm も低くなっており、このような傾向は老沢周辺のほかの地点でも起こっている（中には測量経路の異なる測定点も含まれる）。また、1999 年 2 月初旬から 3 月上旬にかけて重力計の傾斜計の出力が x, y 両方向とも異常に大きな変動を記録し、正常な重力連続測定ができなかった。このことから、No.5 別孔の水位が同測定地周辺の局所的な地盤変動に伴う間隙水圧の変化を捉えている可能性も考えられる。

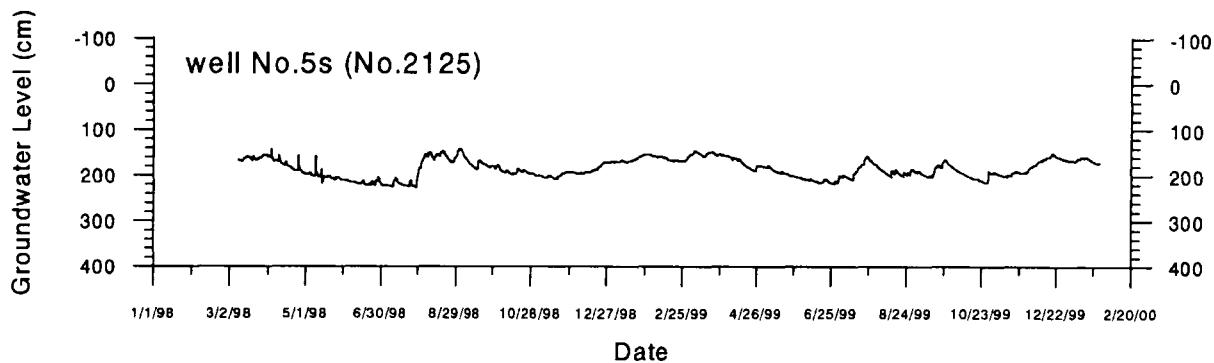
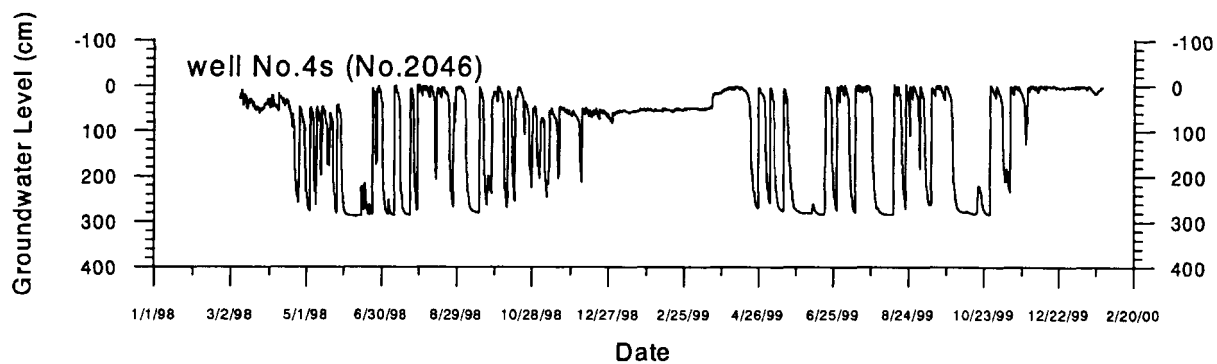
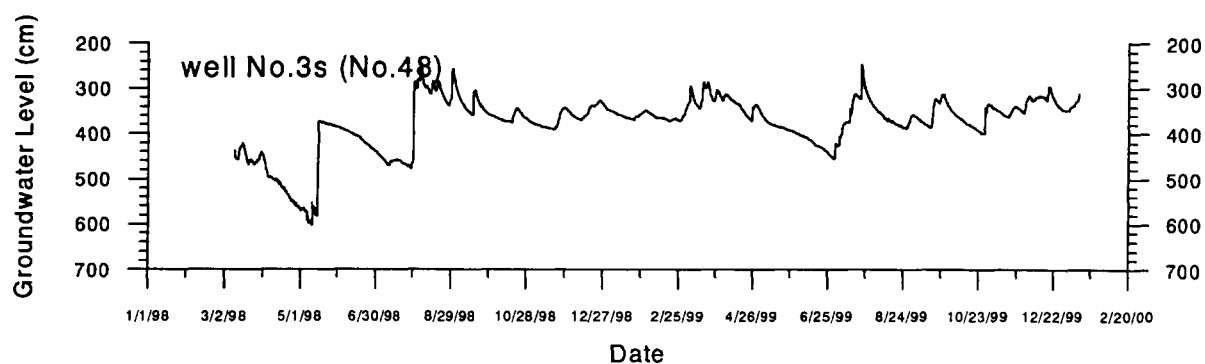
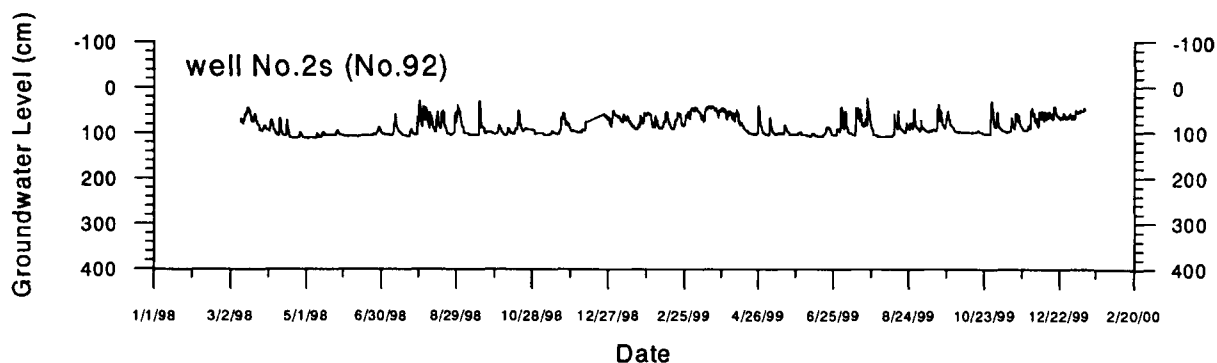
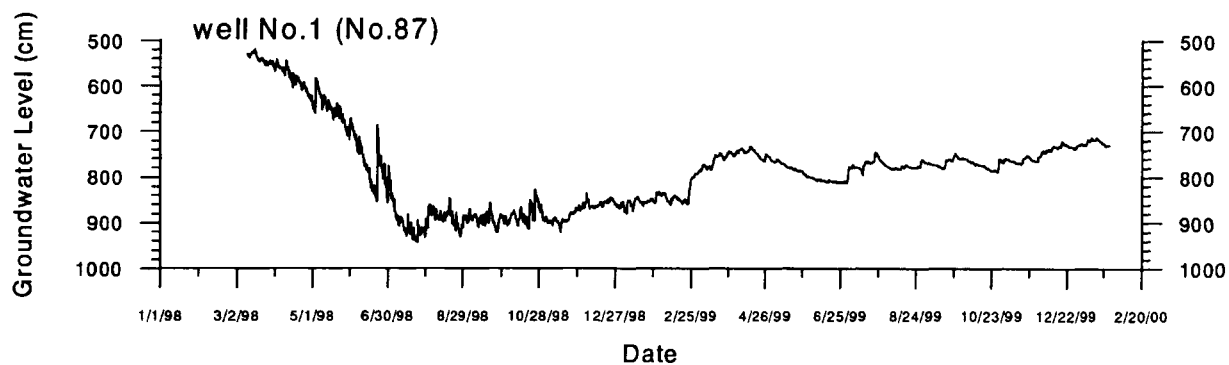
6. その他の連続測定

第Ⅱ-3-1-13表 水位連続測定結果総括 (1/2)
Table II-3-1-1 Summary of continuous groundwater level measurement results.

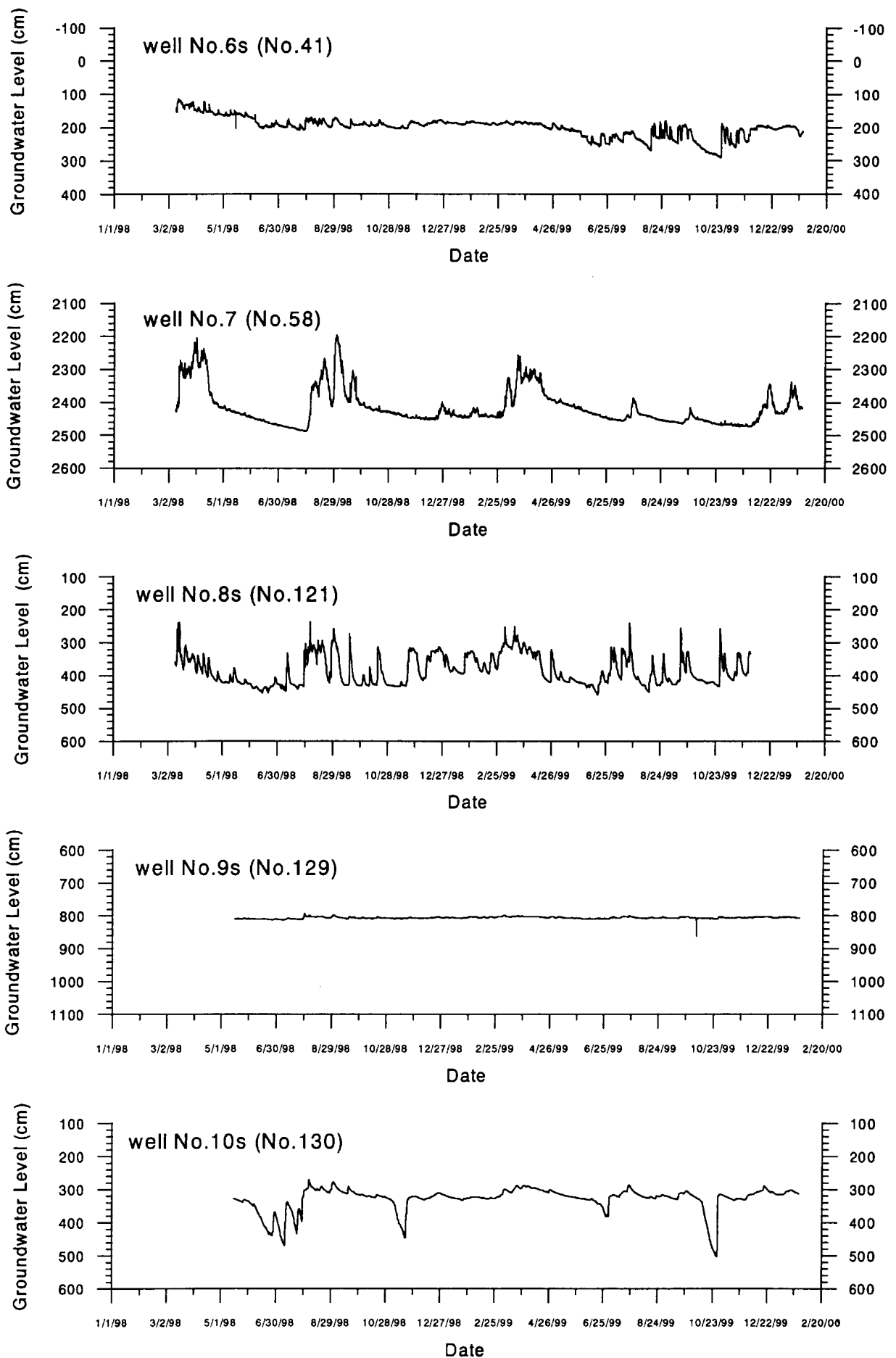
坑井	水位変動の特徴	水位変動に関する考察
No.1	1998 年7月中旬まで連続的に水位が低下し、その後は、降雨とともに上昇・下降を繰り返しながら全体的に水位が上昇する傾向がある。	7月中旬までの連続的な水位の低下は、本坑井が貫く帯水層の透水性が低く、坑井掘削時の水位が実際の水位に安定するまでに時間がかかったために生じたものと考ええる。また、本井で認められる急激で大幅な水位変動は、No.5 孔サイトの降水量の記録に直接対応する降水が記録されていないものについても、この水位上昇の 12 時間以内にまとまった降水が記録されていることから、調査地域の北端の峠に位置するこの坑井付近で局所的な降雨があった可能性を示すものと考ええる。
No.2	冬季に水位が約50cm程度上昇する季節的な変動が認められる。夏季は急激な水位の上昇・下降を繰り返す。1998年9月から巡回測定の際にコンクリート枡内の水のたまり具合が監視されているが、No.2本孔では管頭からの直接の水の流入の形跡は認められていない。	測定記録中に見られる急激な水位の上昇は No.5 孔サイトにおける降水量の記録と相関があり、降雨による一時的な水位の上昇と考えられる。降雨による水位変化が早く、本坑井が貫く帯水層の透水性が良いものと考えられる。
No.3	1998 年7月 30 日～31 日(第 210～211 日目)に大幅な水位の上昇が認められる。その他の期間においても降雨と相関のある急激な水位の上昇が認められるが、水位の回復が非常に遅く、その影響のため季節的な変動が読み取りにくい。	1998 年7月 30 日～31 日(第 210～211 日目)にかけて認められる大幅な水位の上昇は、7月 28 日にこの地域で降り始めた集中豪雨の影響で、ほかの坑井でも大きな水位の上昇が認められている。No.5 における降水量は 7 月 28～30 日の3日間で 157mm と非常に多い。また、No.3 別孔の水温が7月 30 日に急激に低下(1℃の減少)していることから、この雨によって管頭から直接水の流入があった可能性があると考ええる。
No.4	4月～10 月にかけての期間は降雨と相関のある水位の変動を示す。地表付近と深度 300cm 付近に水位変動の停滞する範囲があり、冬季には地表付近で水位がほとんど変化しない。	この水位変動の記録が深度 60cm 以浅の宙水層と中間に不透水層で隔てられたより深い帯水層の合成水位を表しているものと考えている。降雨により宙水層が満たされている場合、水位は非常に浅く記録されるが、降雨がなくなり、宙水層に水がなくなると、深いほうの帯水層まで一気に水位が低下するのではないかと考える。
No.5	降雨と相関のある短周期の水位変動と、50cm 程度の季節的な水位変動が認められる。冬季は水位が上昇する。	1998 年5月中旬までに顕著に認められたスパイク状の水位変動は全て降雨との相関がある。本井では、5月 14 日(第 133 日目)に坑口のコンクリート枡内の水の排出をよくする工事を実施したあとはスパイク状の急激な水位変動は減っており、これらの水位変動は、管頭からの水の直接流入によるものであったと考えられる。
No.6	計測開始後 1999 年4月頃までは全体的に水位が低下していたがそれ以降は一定レベルの中で水位が変動しているように見える。冬季に水位が上昇する季節的な変動が認められる。	1998 年5月 14 日に管頭とコンクリート枡のかさ上げ工事をしたため、それ以降の管頭からの水の直接の流入はない。計測開始後 1999 年4月頃までの水位の低下に関しては原因が良くわかっていない。
No.7	水位の低下の仕方が 2400 cm より浅いところとそれより深いところで明らかに異なっている。このような現象は No.4 別孔でも認められる。	高透水性の層が深度 2400cm 付近にあり、降雨等の影響でそれより水位が上昇したときにそのレベルまでは急速に水位が回復すると考える。
No.8	No.2 と同様に降雨と対応して数 10 cm の急激な水位の上昇とこれに続く緩やかな水位の低下を繰り返している。水位の変動幅は No.2 に比べて若干大きい。冬季に水位が約 50cm 程度上昇する季節的な変動が認められる。	この坑井では5月 14 日にコンクリート枡内の水排出孔の工事を実施したが、豪雨の際に水の排出が追いつかず管頭が水没している可能性がある。降雨による水位変化が早く、本坑井が貫く帯水層の透水性が良いものと考えられる。

第Ⅱ-3-1-13表 水位連続測定結果総括 (2/2)
Table Ⅱ-3-1-1 Summary of continuous groundwater level measurement results.

No.9	水位の変動が非常に小さい。非常に僅かであるが、降雨と対応した水位の上昇とこれに続く緩やかな水位の低下を繰り返している。	試験的に水を坑内に強制的に投入し手動水位計で水位の変動を調べたところ、非常に早く水位が回復した。帯水層の透水性が非常に良好なため水位の変動が小さいものと考えられる。
No.10	降雨の少ない時期に急激な水位の低下を生じることがある。深度 300cm付近での水位変動は比較的緩やかである。	降雨の少ない時期の急激な水位の低下は、水位 340cm 以深で認められることから、本井における水位は複数の帯水層の合成水位であることが推察される。深度 340cm 付近に不圧帯水層の下限があり、降水が比較的多い場合にはこの帯水層の水位を記録しているが、降雨が減って、この帯水層からの水の供給が止まると、これより深い帯水層の圧力水頭の位置まで水位が急激に減少する。この水位の低下が安定しないうちに降水により再び上部の帯水層から水が供給されるようになると、水位は急激に増加する。



第Ⅱ-3-1-71図 地下水位連続測定結果 (1/2)
Fig. Ⅱ-3-1-71 Results of continuous groundwater level measurement in the monitoring wells.



第 II-3-1-71 図 地下水位連続測定結果 (2/2)
Fig. II-3-1-71 Results of continuous groundwater level measurement in the monitoring wells.

平成10年度から重力連続観測所の近傍に気圧計・気温計・雨量計を、浅層地下水位観測井No.3別孔内に水温計を設置し、大気圧・気温・降水量・孔内水温の連続測定を継続している。

また、平成11年7月から重力連続観測所から約5mの地下にTDR土壤水分計を埋設し、不飽和帯の水分率の連続測定を開始した。

(1) 使用機器

上記の連続測定には、以下の観測機器を使用した。観測機器は感部とデータ記録部に分かれている：

気圧計 感部：横川ウエザック(株)製 F4711-12
データ記録部：横川ウエザック(株)製 フィールドμ M5561-80-00
測定範囲：930～1050hPa

温度計 感部：横川ウエザック(株)製 E-736
データ記録部：横川ウエザック(株)製 フィールドμ M5561-30-00
測定範囲：-50～+100℃ 測定精度（感部を含む）：±0.5℃

雨量計 感部：横川ウエザック(株)製 B-011-20
転倒ます式、受水口径200mm、1転倒雨量0.5mm
測定精度：20mm以下の雨量の時、±0.5mm以内
100mm/h以上の連続した雨量の時、±3%以内
データ記録部：横川ウエザック(株)製 フィールドμ M5561-20-00

水温計 感部：横川ウエザック(株)製 E-736
データ記録部：横川ウエザック(株)製 フィールドμ M5561-30-00
測定範囲：-50～+100℃ 測定精度（感部を含む）：±0.5℃

TDR土壤水分計

感部：Campbell Scientific, Inc.製 CS615 Water Content Reflectometer
データ記録部：Campbell Scientific, Inc.製 CR10X Datalogger

(2) 測定方法

重力連続観測所に隣接して高さ約2mの観測用鉄塔に雨量計感部及び気温計感部が設置されている。また、連続観測所の側方に水位計データ収録装置と雨量計・気温計及び気圧計のデータ収録装置を取り付けた保護用ケースが設置されている。気圧計の感部はデータ収録装置とともに保護用ケース内に取り付けてあり、その保護用ケースの上部には気圧測定用の空気取り込み口がある。

水温計は、No.3別孔の水位計とともに同孔内に設置されており、水位データの収録装置と同じ保護ケース内に水温データの収録装置も設置されている。

連続観測所から約5m、水位観測井No.5別孔から約5mの所に深度約2.5mまでトレンチを掘削し、地表からの深度0.35mから2.35mの範囲に0.4m間隔で6個のTDR土壤水分計の感部を設置し、埋設した。設置作業の詳細は巻末資料に示す。土壤水分計のデータ収録部は連続観測所内に設置した。

大気圧、気温、降水量、孔内水温及び土壌水分率データのサンプリング間隔も水位計と同じく30分で、毎時00分と30分に記録した。

大気圧、気温、降水量及び孔内水温データは水位データと同様にデータ収録装置のメモリからPCカードを用いて回収した。また、1998年7月以降、データ回収の際に時々データ記録部内蔵時計のずれのチェックを行った。回収したデータはPCカードからコンピュータに転送して、専用のデータ処理用ソフトウェアによってテキストファイルに変換した後、図化・保存を行った。なお、降水量に関しては日降水量を積算し図化した。

土壌水分率データはデータ収録装置からRS232Cインターフェースを通じてコンピュータに転送し回収を行った。

(3) 測定結果

1) 大気圧連続測定

第II-3-1-73 図(a)に測定結果を示す。1998年度と同様に変動はほぼ20~30hPaの変動幅をもち、数日の周期が卓越する。2年間の記録を通してみると、夏季(6月~9月)は気圧の変動幅がちいさく変化が緩やかである。秋季から冬季にかけては時折スパイク状の急激な変化が見られ、気圧の変動も大きくなる。但し、本年度は大きな台風の通過がなく、気圧も940hPaを下回ることにはなかった。

2) 気温連続測定

第II-3-1-73 図(b)に測定結果を示す。1998年度と同様に-10℃~35℃範囲で変動しており、年周期と日周期の変動が顕著に現れている。

3) 降水量連続測定

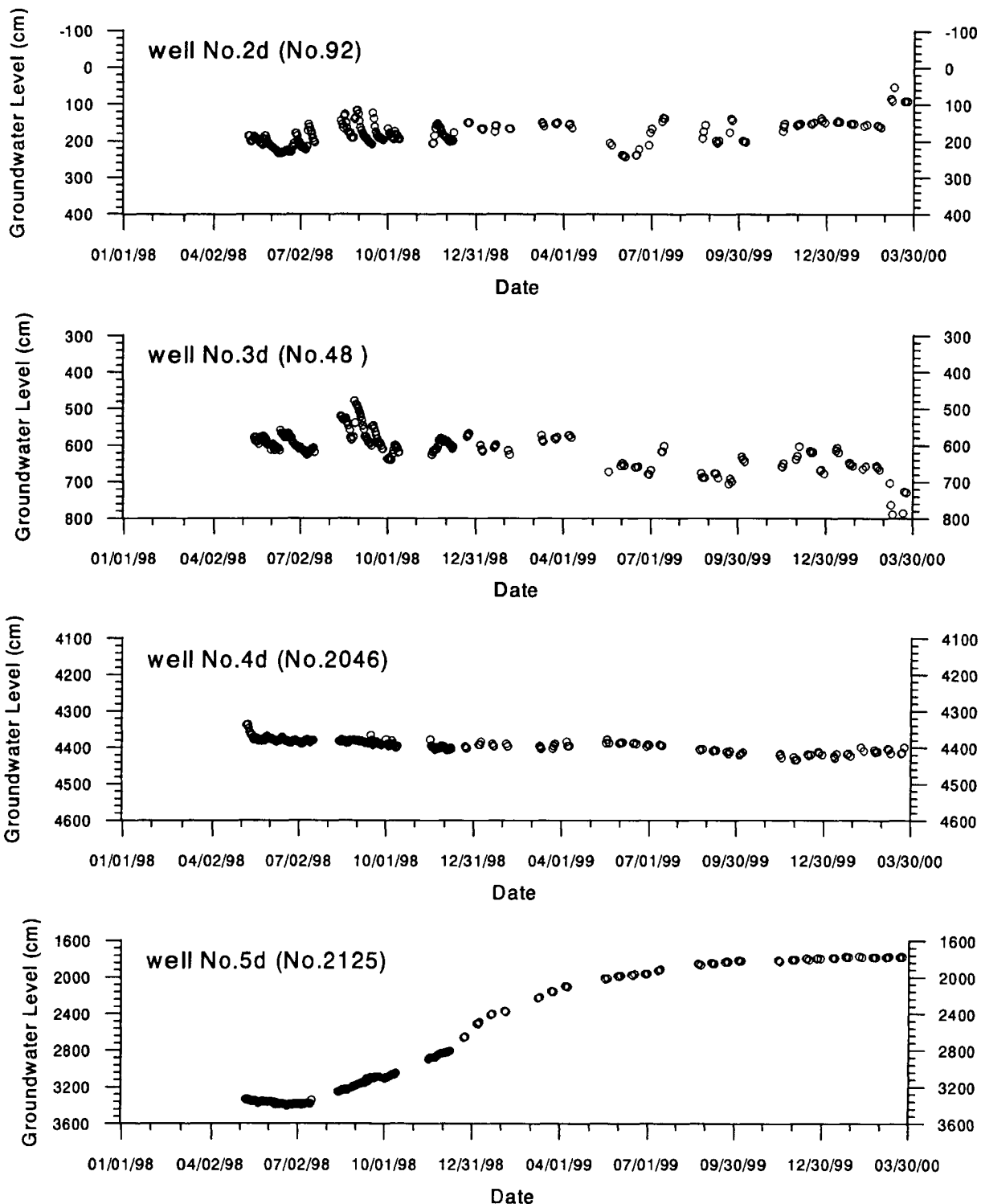
第II-3-1-73 図(c)に測定結果を示す。また、第II-3-1-14 表に降水量の総括を示す。同図は日降水量を示しており、これは30分ごとの降水量を0:00~23:30の間で区切って積算してある。測定開始後1年間(1998年1月21日~1999年1月20日)の降水量は1,628mm、2年目(1999年1月21日~2000年1月20日)の年降水量は1,452mmであった。月平均の降水量(1998年1月21日~2000年1月20日)は128.3mmで、これを超える降水量を記録しているのは、1998年7月、8月、9月及び1999年1月、7月、8月、9月及び12月である。連続する30日間で最も降水量の多かったのは、1998年では1998年7月28日~8月26日の474.5mm、1999年では1999年6月22日~7月21日の287.5mm、最も少なかったのは1998年では5月14日~6月12日(第145~174日目)の37mm、1999年では5月17日~6月15日の26mmである。日降水量で最も多かったのは1998年は9月16日の92mmで、1999年は7月21日の57mmであった。

4) 孔内水温連続測定

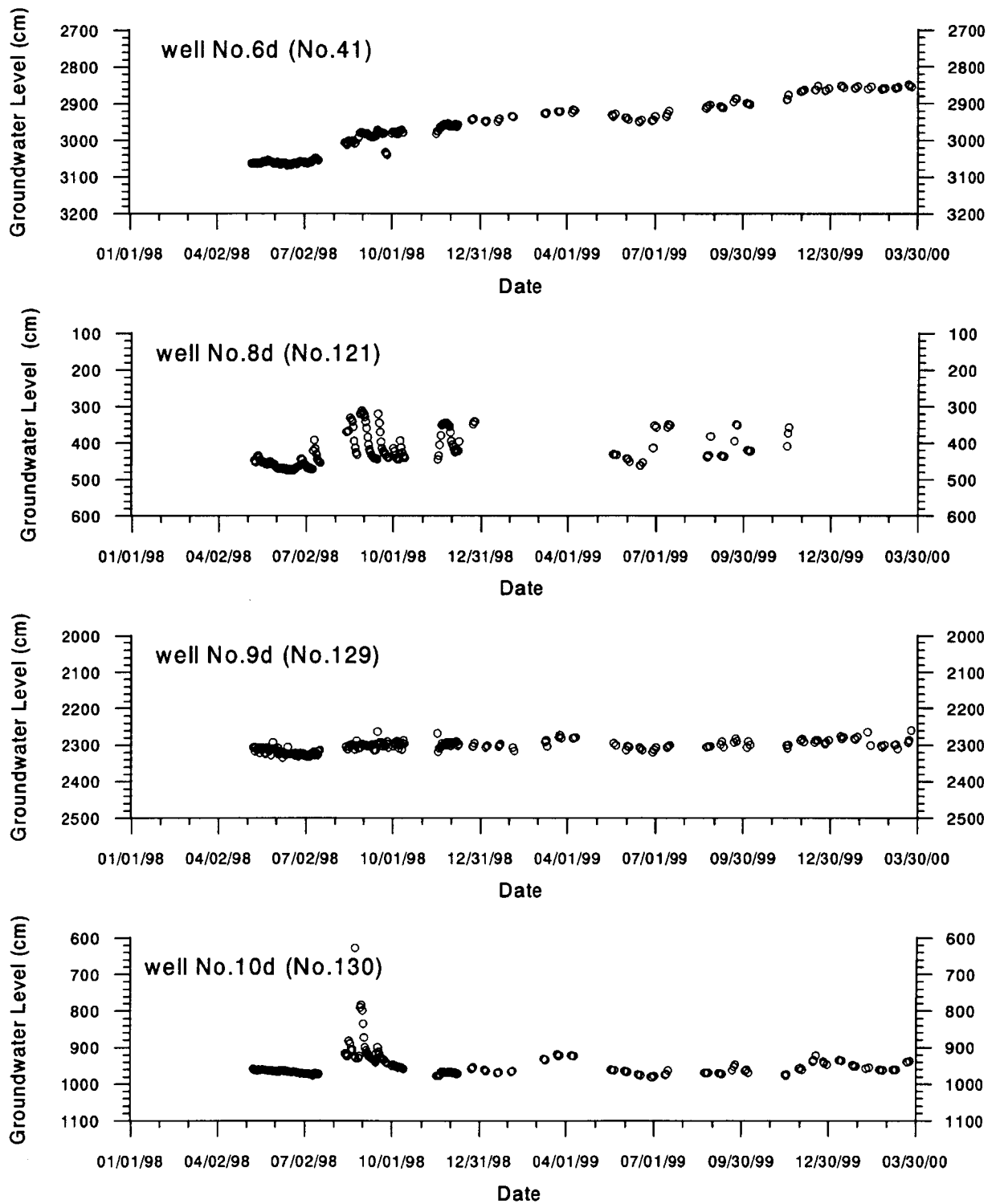
第II-3-1-73 図(d)に測定結果を示す。No.3 本坑の孔内水温と水位の長周期成分には負の相関が認められる。このことは、温度の低い水(おそらく天水起源)が地温で暖まる前に帯水層に流入していることを示していると考ええる。但し、水位の変動量の割には昨年度見られたような急激な温度変化が見られないため、水は管頭から急激に流入したものではないと考える。

5) TDR土壌水分率連続測定

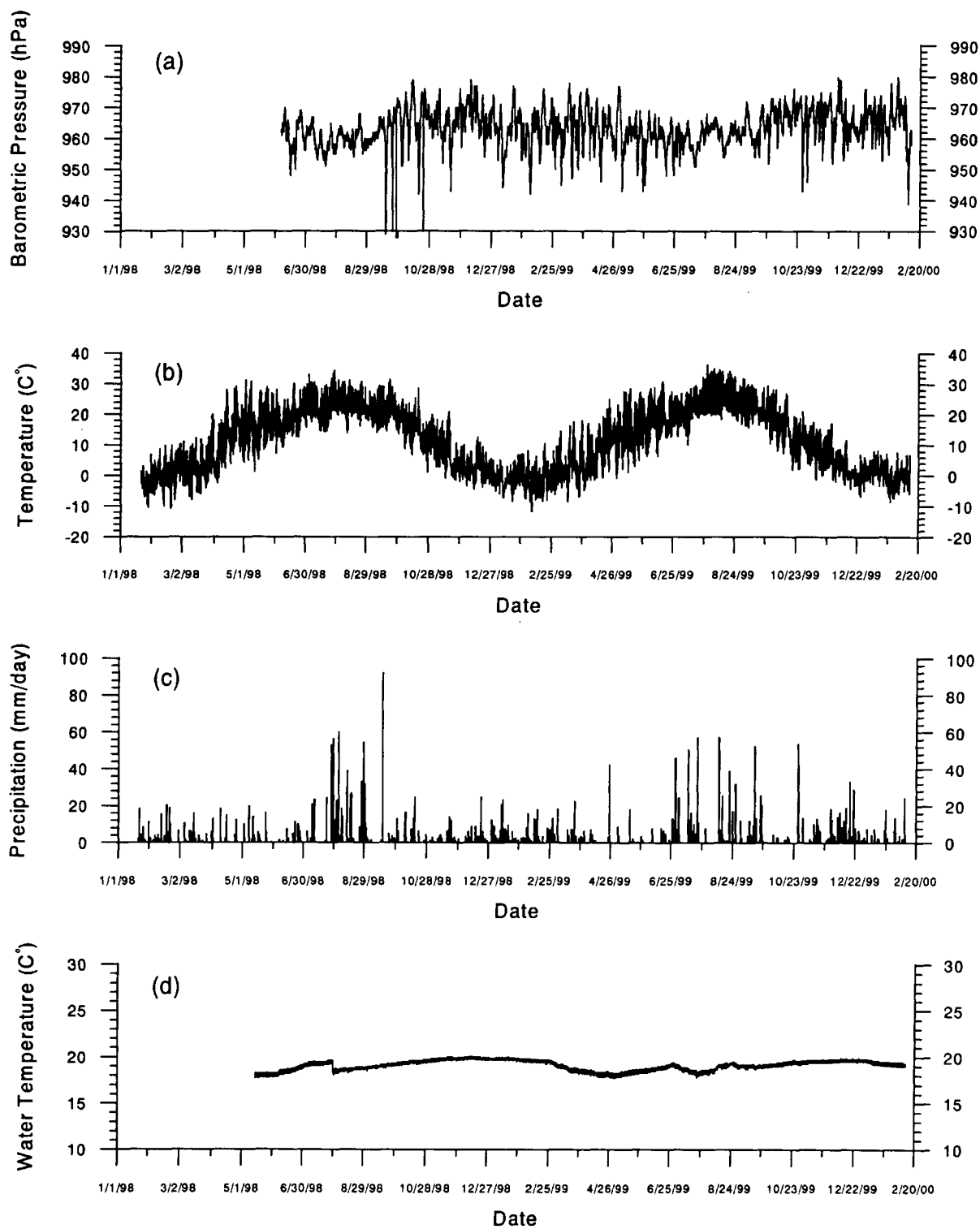
第II-3-1-74 図にTDR土壌水分率連続測定結果を、第II-3-1-75 図にTDR土壌水分



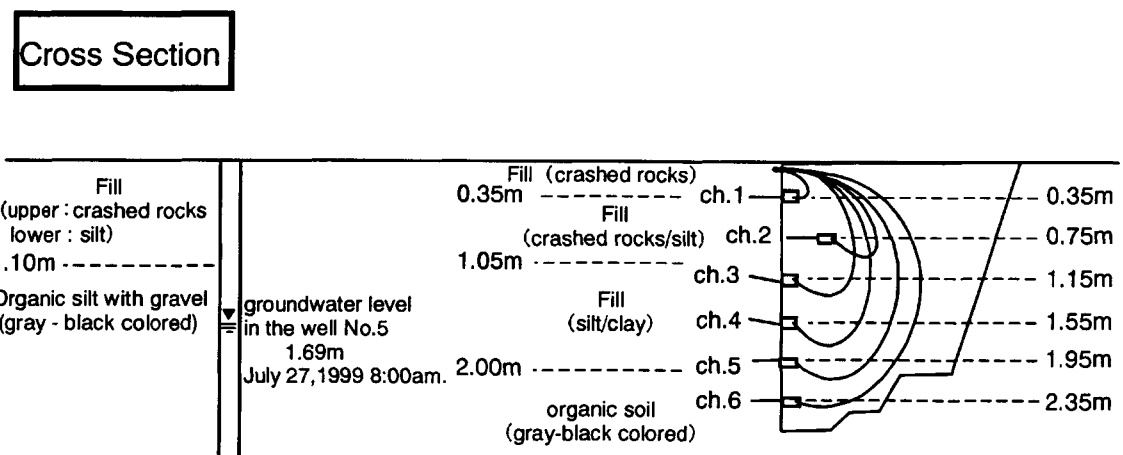
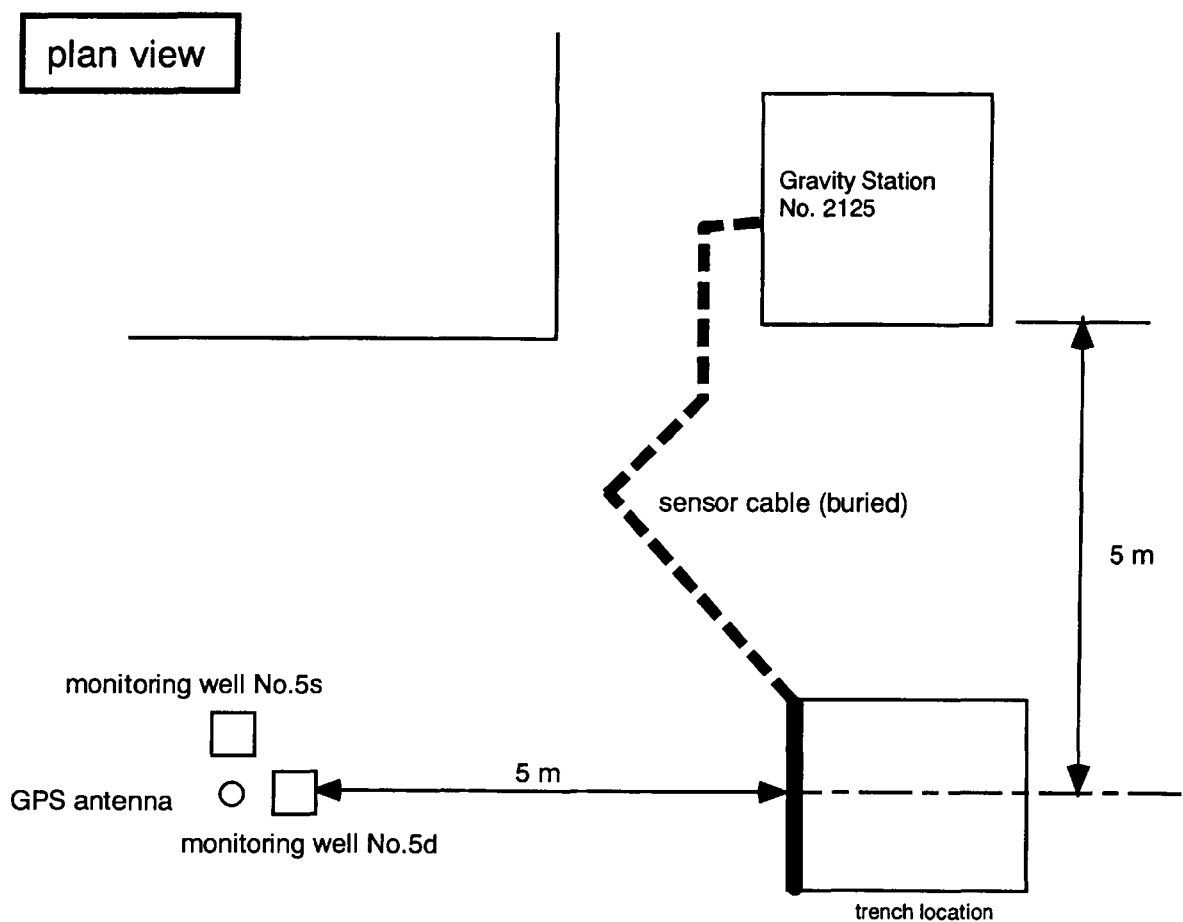
第 II-3-1-72 図 水位巡回測定結果 (1/2)
 Fig. II-3-1-72 Results of patrol groundwater level measurement in the monitoring wells.



第 II-3-1-72 図 水位巡回測定結果 (2/2)
 Fig. II-3-1-72 Results of patrol groundwater level measurement in the monitoring wells.



第 II-3-1-73 図 連続測定結果 (大気圧・気温・降水量・孔内水温)
 Fig. II-3-1-73 Results of meteorological measurements at the gravity station No.2125 and No.48.



Layout of TDR equipments

第 II-3-1-75図 TDR 土壤水分率測定装置のレイアウト
Fig. II-3-1-75 Layout of TDR equipments.

率測定装置のレイアウトを示す。センサーの設置深度は、Ch.1 から Ch.6 の順で 0.35m, 0.75m, 1.15m, 1.55m, 1.95m 及び 2.35m で、同図にはセンサー毎（すなわち深度毎）の水分率の変化が示されている。TDR 水分率の変動幅は Ch.1, Ch.2, Ch.6 の順に大きく、Ch.3, Ch.4 及び Ch.6 の水分率の変動は前者に比べて非常に小さい。水分率の変動が大きいということはそれだけ有効間隙率が大きいことを意味する。一方、Ch.3, Ch.4 及び Ch.5 の水分率の変動が小さいにもかかわらず、水分率が非常に高いのは、粘土のように実際には自由に流動できない水分がかなり存在しており、密度変動には殆ど寄与しないことを示唆している。

第 II-3-1-76 図に 1999 年 8 月 11 日 20:00 から 8 月 12 日 6:00 までの 10 時間の各深度の水分率の変化を、第 II-3-1-80 図に同時刻に同じ地点で記録された 30 分降水量と地下水位を示したものである。第 II-3-1-79 図に示すように 8 月 11 日夜には 20:30 から 3 時間の間に 50mm 以上の雨が降り、雨の降り始めから 6 時間の間に水位が 15cm 上昇した。最も浅い Ch.1 ではまず最初に水分率が増加し始め、ついで Ch.2 以深でも水分率の上昇が始まった。Ch.6 の水分率も Ch.2 と殆ど同じ時刻（30 分の差は分からないが）に上昇しており、上方からの水の浸透以外に水みちを通した流動が考えられる。

設置箇所の土質は、Ch.1 は碎石主体、Ch.2 は碎石及びシルト、Ch.3～Ch.5 は粘土及びシルト、Ch.6 は有機物交じりの黒色土で、Ch.6 センサー設置箇所付近（深度約 2.0m）に切り株があった。Ch.1～Ch.5 までは盛土中にあり、Ch.6 は旧表土層内にある。隣接する No.5 孔（設置位置から約 5 m）では盛土と旧表土の境界が深度 1.10m にあり、旧地表は傾斜している。また、地下水面もこれに沿って傾斜しており、帯水層に沿った水の流動もあると考える。TDR センサー設置時の No.5 孔水位は 1.69m で、同孔の地下水位はこの旧表土層内で変動している。Ch.6 のセンサーを設置するためにトレンチを掘削した際にはそれより深く掘ったにもかかわらず、トレンチに湧水はなかった。

第 II-3-1-77 図には第 II-3-1-76 図に示した降雨による過渡的な水分率の変動が数多く記録されているほか、11 月頃から Ch.1, Ch.2 及び Ch.6 の水分率が上昇し始め 12 月中旬頃にはかなり高い水分率が記録されている。これと同時期に No.5 孔における水位も上昇し始めた。降雪期になると地表に常に水の供給源が確保され地表付近の不飽和帯の水分率と浅層地下水位を上昇させるものと考えられる。

II-3-2 坑内重力計

1. モデル計算

本年度は、昨年度に引き続き、坑内重力計による貯留層変動計測の可能性検討を目的として、地熱流体の生産に伴う密度分布の時間及び空間的な変化が坑内重力計にどのように計測されるかの試算を実施した。

(1) 貯留層挙動シミュレーション

昨年度は 1996 年（平成 8 年度）に作成された貯留層モデルと生産・還元シナリオから貯留層挙動シミュレーションを実施し、その結果から重力変動を計算したが、本年度には 1998 年のモデルからより精密な貯留層挙動シミュレーションが東北電力（株）により実施されたため、その結果から地下の密度変化を計算し、この変化に起因する重力変動を再計

算し、これに検討を加えた。

第II-3-2-1図に今回のシミュレーションに用いられたモデルのレイヤー分割を示す。モデルは深度方向には海拔-2400mから+300mが9つのレイヤーに分割されている。第II-3-2-2図には水平方向のモデルの分割の様子を示す。このように分割されたモデルの個々のブロックに対して岩石密度(DR)，空隙率(ϕ)が与えられており，シミュレーションにより開発前，開発1年後，2年後，3年後，4年後および4.1年後の各ブロックの気相体積分率(SG)，液相体積分率($SW=1-SG$)，気相密度(DG)，及び液相密度(DW)が計算された。

(2) 坑内重力計

坑内重力計は坑井内における異なる深度での重力差を計測し，その重力差から坑井近傍の地層密度を評価するために開発された。

第II-3-2-3図はシャトルタイプ坑内重力計であり，ゾンデ内で移動可能な2個の重力センサーが装備されており，これら2個の重力センサーにより上下の重力差を計測する。2個のセンサーの隔離距離は固定され既知であるため，重力差の計測精度は良いと考えられる。但し，ゾンデ内スペースの制限から耐熱対策等がとり難い。

第II-3-2-4図は，重力計を搭載したゾンデを坑井内で移動させて計測し重力鉛直勾配から坑井近傍の密度変化を評価するシステムの概念図を示す。このタイプの重力計では，重力差を計測するためにゾンデの巻き上げ，降下，固定作業が伴い，測定精度は上記のシャトルタイプより劣ると考える。

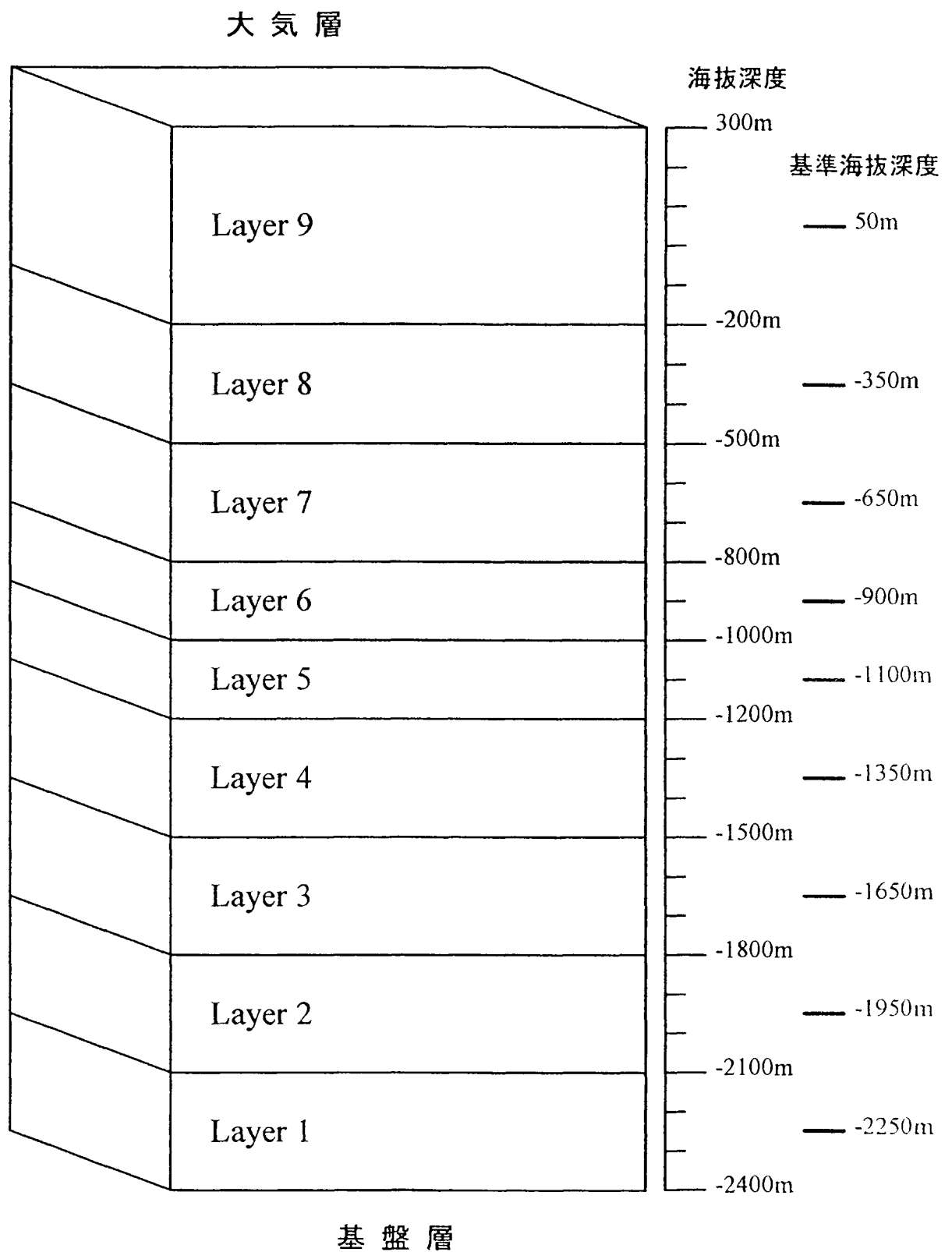
本研究で動向調査を実施した当時は，唯一実用可能であったEDCON社の坑内重力計のセンサー(LaCoste & Romberg社製)の傾斜角の限界が鉛直から 14° で，傾斜している坑井に挿入可能な深度にかなりの制約があった。しかし近年LaCoste & Romberg社から新しいタイプのジンバルをゾンデの中に備えた坑内重力計(DPD I)が発表され，これは鉛直から 110° までの傾斜に耐えられるとされていることから，実際上の問題はゾンデの耐熱・耐圧性能や，ゾンデの坑内での位置をいかに精度良く知るかに絞られてきていると考える(DPD Iの詳細については巻末資料"Press Release"参照)。

また，測定精度に関してはEdcon社の坑内重力計で $3\mu\text{gal}$ ，LaCoste & Romberg社のDPD Iで $1\mu\text{gal}$ (同社の発表した測定値再現性の値による)とされている。従って，この精度を下回る測定値の経年変化は検出が困難であると考ええる。

(3) 重力計算の方法

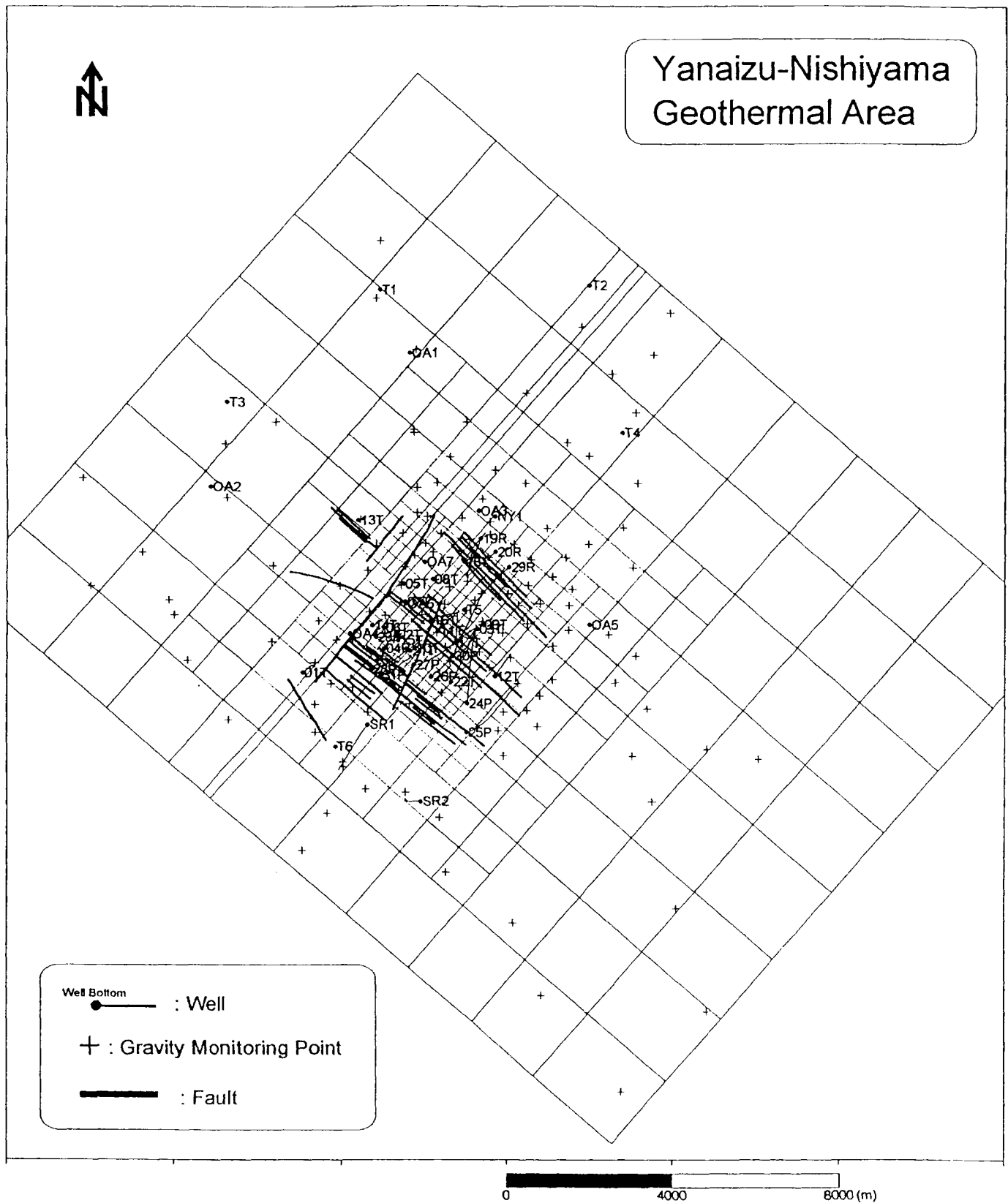
貯留層シミュレーターGEOSIM6(Tough2改良版)による計算結果から地下の密度変化を計算し，その密度変化による重力変動を計算した。

貯留層シミュレーター出力には，モデル化された貯留層の構造パラメータとシミュレーションによる一定の時刻の地熱流体の状態を表すパラメータが含まれている。具体的には，大地がブロック状に分割され，地下の密度変動に関連する量として岩石密度(DR)，空隙率(ϕ)，気相体積分率(SG)，液相体積分率($SW=1-SG$)，気相密度(DG)，及び液相密度(DW)が各ブロック毎に出力されている。各ブロックの密度は下記の式で計算できる：



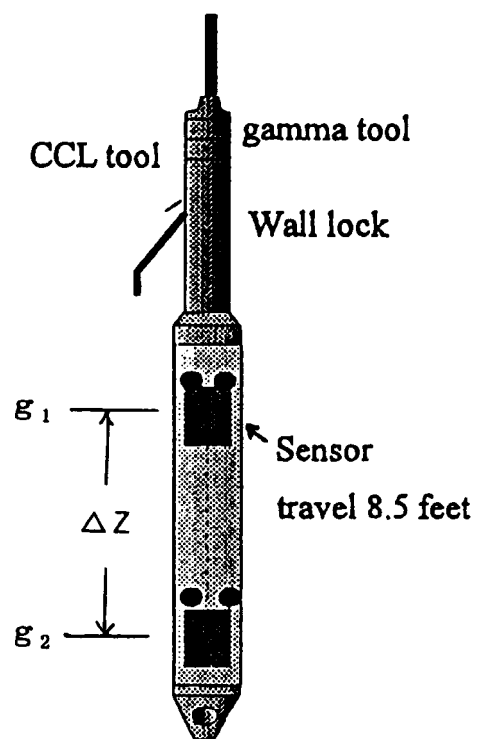
第II-3-2-1図 シミュレーショングリッドの鉛直方向の構造

Fig. II-3-2-1 Vertical structure of reservoir simulation grid.



第II-3-2-2図
Fig.II-3-2-2

シミュレーショングリッドの水平方向の構造
Horizontal structure of reservoir simulation grid.



Shuttle System diagram

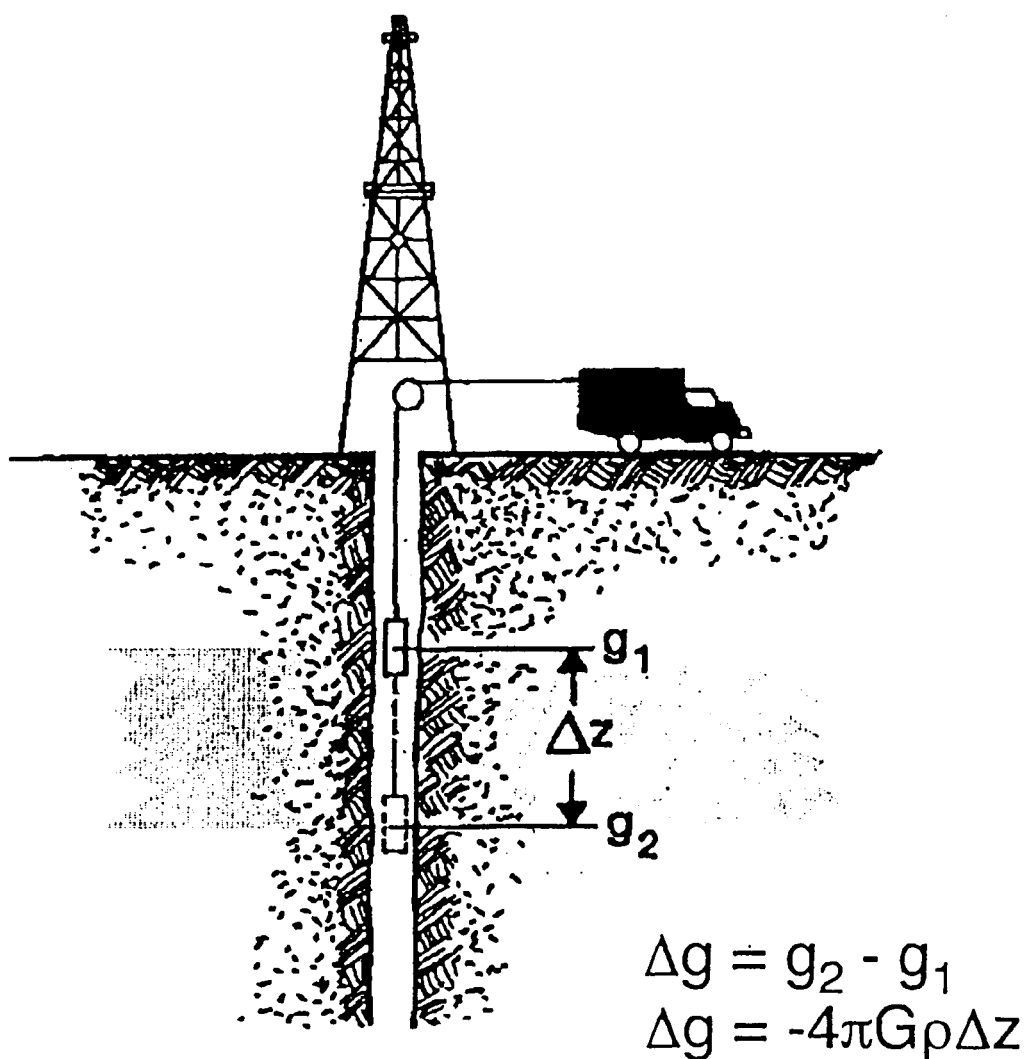
The shuttle system provides more accurate BHGM densities over short vertical intervals by eliminating errors in depth difference measurements.

第II-3-2-3図

シャトルタイプ坑内重力計概念図

Fig. II-3-2-3

Shuttle-type borehole gravimeter.



$$\rho = \frac{-1}{4\pi G} \frac{\Delta g}{\Delta z}$$

第II-3-2-4図

坑内重力計とその計測の概念図

Fig. II-3-2-4

Concept of borehole gravity measurement.

$$\text{ブロックの密度} = (DG \cdot \phi \cdot SG + DW \cdot \phi \cdot SW) + (1 - \phi) \cdot DR$$

この各ブロックの密度を貯留層シミュレーションのタイムステップ毎に計算し、ある時刻を基準に同一ブロックの密度差を計算し、その密度差による重力応答を計算すれば、その結果が地下の密度変化に起因した重力変動となる。

重力計算には、昨年と同じOkabe(1979)の方法に基づく3次元重力計算プログラムを使用した。このプログラムではモデルの任意の位置での重力の計算が可能である。

モデル計算で想定した坑井は、生産領域の15T井、21T井及び23P井と、還元領域の19R井である。これらの坑井の位置を第II-3-2-5図に示す。第II-3-2-5図に示す断層の位置から第II-3-2-2図のモデルブロックとの位置関係を対比することができる。

4つの坑井はいずれも傾斜井であり、垂直方向に水平方向にも複数のブロックを貫いている。ここでは、これら4つの坑井に沿った2種類の重力変動を計算した。そのうちの1つは、単一のセンサーを移動しながら計測するシステムを念頭に置いた、各深度での重力値の時間的変動（どこかの重力基準点からの重力差の変動）であり、もう1つはシャトルタイプの坑内重力計を意識した2つのセンサー間の重力差（センサー間隔=2.5m）の時間的変動である。計算される時刻は、貯留層シミュレーションと同じ、生産開始前と生産開始後1年・2年・3年・4年及び4.1年である。変動は生産開始前を基準とした変動として計算を行った。

(4) 計算結果

1) 重力値の変動

第II-3-1-6図～第II-3-1-9図に15T井、21T井、23P井及び19R井に沿った重力変動を示す。15T井、21T井および23P井は生産領域の最も重力変動の大きいところにあり、計算される重力変動も生産開始後4.1年で $-500 \mu\text{gal}$ から $+350 \mu\text{gal}$ と非常に大きい。これらの坑井は非常に近いこともあって、変動量の深度方向の分布は良く似ている。変動量は生産開始後2年後までが大きく、その後は変動量が小さくなっている。海拔 -500 m ～ -1000 m にかけて密度の減少があるため、その上側で負の重力変動が、下側では正の重力変動が大きくなる。

一方、19R井における重力変動の大きさは生産領域の3坑井の変動の約10分の1程度と小さい。生産開始後4.1年で約 $-50 \mu\text{gal}$ ～ $+5 \mu\text{gal}$ の変動でとなっている。海拔 -500 m ～ -800 m の領域で密度の若干の増加があるため、その上側で正の重力変動が、下側では負の重力変動が認められる。

このシミュレーションで得られる程度の変動が継続すれば、4坑井とも重力変動そのものの計測は可能であると考ええる。しかし、単一の重力計での重力鉛直差の計測にはセンサー深度の決定精度の観点から、シャトルタイプの坑内重力計の方が精度がよいと考える。

2) 鉛直重力差の変動

第II-3-1-10図～第II-3-1-13図に15T井、21T井、23P井及び19R井に沿った鉛直重力差の変動を示す。この鉛直重力差はゾンデ中のセンサー間隔を2.5mとして2つセン

サーによる重力差（下側のセンサー測定値から上側の測定値を引いたものである。従って坑井が垂直の場合にはセンサーの高度差は2.5mであるが、傾斜井の場合には厳密には高度差はそれより若干小さくなる。

第II-3-2-4図の概念図に示したように、センサー近傍の密度はこでいう鉛直重力差と一定の負の係数を乗じることにより推定できる。従って第II-3-2-10図～第II-3-2-13図で曲線が時間の経過とともに図の右側に寄っていく部分では密度が減少し、反対に時間の経過とともに図の左側によってゆく部分は密度が増加していることを示す。モデルの岩石密度等がフロック毎に離散的に与えられていることから、図中の直線も折れ線状になっている。(1)項で述べたように15T井、21T井及び23P井では海拔-500m～-1000mにかけて密度の減少が認められる。一方、19R井における鉛直重力差の時間的な変動は小さく、すなわち密度変動も相対的に小さいことを示している。

各坑井における鉛直重力差そのものは-270～-330 μgal 程度あり、その鉛直分布の検出は可能であると考ええる。しかし、その鉛直分布の時間的変化の検出には測定機器の精度により限界があると思われる。第II-3-2-14図～第II-3-2-17図には15T井、21T井、23P井及び19R井に沿った生産開始前を基準にした鉛直重力差の時間変動を示している。前にも述べた通り、坑内重力計の精度は現状では1～3 μgal 程度であり、これを下回るような変動は検出が困難である。15T井、21T井及び23P井では生産開始後4.1年で5 μgal 以上の変動が出る部分もあり、変動の大きい箇所では辛うじて検出が可能という程度であることがわかる。また、19R井では鉛直重力差の時間変動は全ての深度で1 μgal を下回っており、現時点ではこの変動を坑内重力計で検出することは難しいと考え

II-3-3 解析・評価

1. 重力変動解析

(1) 重力変動と浅層地下水位変動の相関性の検討

地下水位の変化による重力変動に関してはさまざまな文献で指摘がある。本調査地域においても、浅部の不圧帯水層の水位変化と重力変動の関係を調べるために、平成10年度から調査地域内10箇所における地下水位変動の観測と、それらの観測井近傍の重力測定点における巡回測定を実施してきた。各観測井における重力変動と水位変動については第II-3-1-13図～第II-3-1-32図に示した。ここでは重力変動と水位変動の相関性の検討を定行的に行った。その結果を第II-3-3-1表にまとめた。水位変動の様子から、計測されている水位そのものが単一の不圧帯水層の水位変動を捉えていないと考えられる孔井では重力変動と水位変動の相関性は低い。また、No.5孔を含むいくつかの坑井で重力と水位の季節的変動に良い相関が認められるが、降雨に伴う短周期の水位変動と重力変動の相関性については今のところ認められず、今後さらにNo.5孔における水位観測記録と重力連続測定記録の相関性の検討を進める必要がある。

(2) 不飽和帯密度変動

また、地表付近の不飽和帯の水分量の変化と重力変動の関係を調べるために重力連続観測点の近傍で昨年7月下旬からTDR土壤水分計による不飽和帯の水分率の（深度0.35mから0.4m毎6レベル）モニタリングを始めている。

No.5孔における重力巡回測定結果と水位変化及びTDR水分率の比較を第II-3-3-1図に示す。同孔では、地表付近の水分率が上昇した昨年10月下旬から巡回測定による正の重力変動が認められており、その関連性が示唆されている。同地点では地下水位の季節的な変化と重力変動の間にも相関が認められるが、50cm程度の水位変動に対して約 $10\mu\text{gal}$ の変動がみられ、水位変動のみの影響としては、通常の間隙率から予想される重力変動量からみて大きすぎることに、同地点の地表から数10cmの範囲は碎石が多く間隙率が高いことから、不飽和帯の水分率の変動の影響も考慮すべきではないかと考える。

2. 精密重力測定法の検討

(1) 精密潮汐補正法に関する検討

地球上の1点で見ていると、重力測定値は月および太陽による起潮力と地球の自転の影響で常に変動している。地球の自転によって測定点と月や太陽との距離が微妙に変化するため、その測定点に働く起潮力が時間的に変動する。また、固体地球が起潮力により変形する効果（地球潮汐）や海洋潮汐による荷重変化によっても重力が変動する。

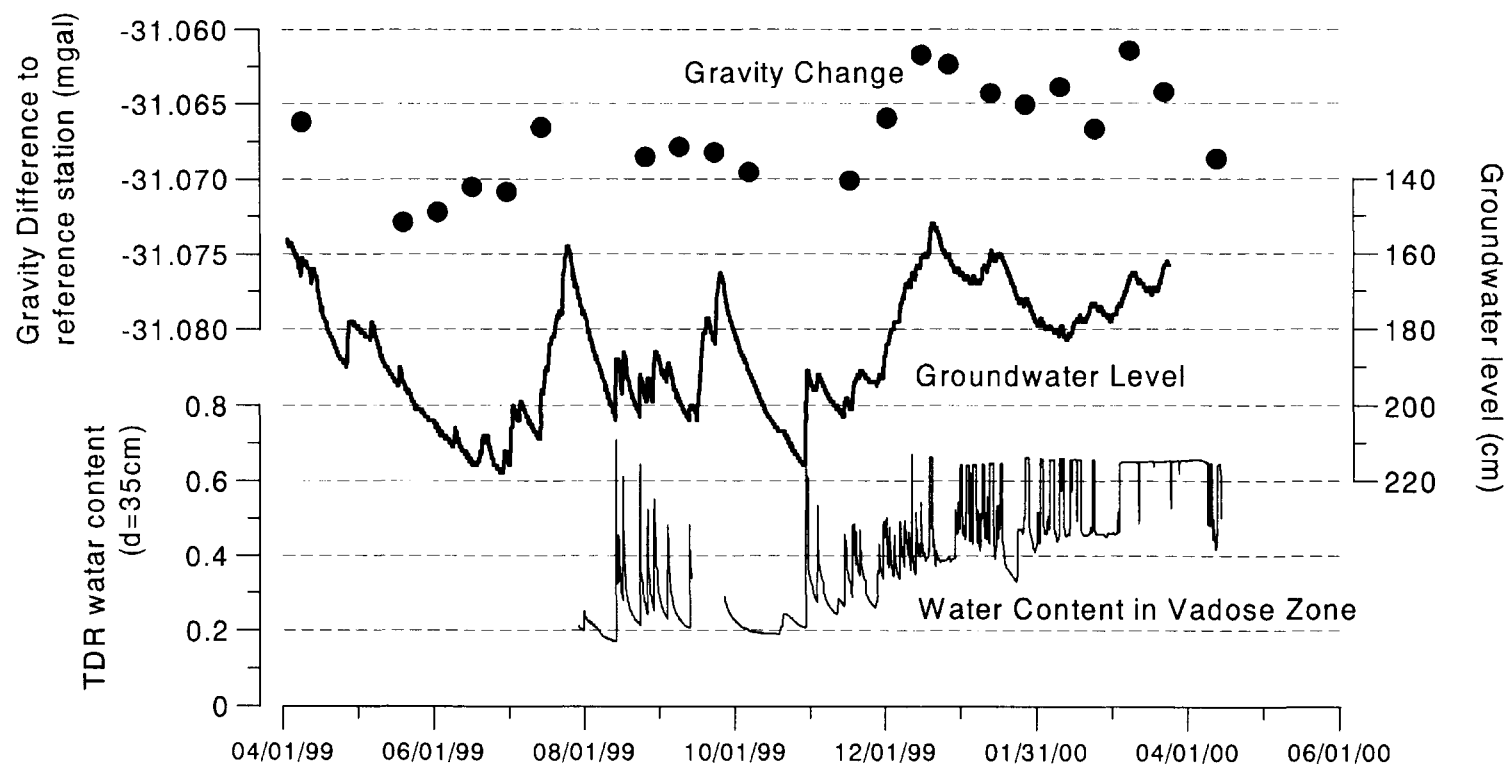
潮汐の補正は古くから行われていたが、これらの多くは測定点の位置、測定時刻、月と太陽の軌道の情報から一意に計算できるものであった。本調査で使用しているScintrex CG-3M重力計にはLongman (1959) のアルゴリズムによる潮汐補正プログラムが内蔵されており、測定時には潮汐補正済みの重力計読み値と潮汐補正量がディスプレイに表示され、記録される。

数 $10\mu\text{gal}$ 以下の測定誤差が無視できる調査や、精密重力測定中の重力計のドリフトやテアの有無のチェックには、このような古典的な潮汐補正も十分に役立つが、数～10数 μ

第Ⅱ-3-3-1表 重力変動と水位変動の相関性

Table Ⅱ-3-3-1 Correlation between gravity change and groundwater change

坑井	水位変動の特徴	水位変動に関する考察	重力変動との相関及び考察
No.1	1998年6月中旬まで連続的に水位が低下し、その後は、降雨とともに上昇・下降を繰り返しながら全体的に水位が上昇する傾向がある。	6月中旬までの連続的な水位の低下は、本坑井が貫く帯水層の透水性が低く、坑井掘削時の水位が実際の水位に安定するまでに時間がかかったために生じたものと考えられる。また、本井で認められる急激で大幅な水位変動は、No.5孔サイトの降水量の記録に直接対応する降水が記録されていないものについても、この水位上昇の12時間以内にまとまった降水が記録されていることから、調査地域の北端の時に位置するこの坑井付近で局所的な降雨があった可能性を示すものと考えられる。	1998年6月以前を除き水位と重力の長周期変動の傾向は良く似ている。1998年6月以前は坑井掘削時の水位が実際の水位に回復するまでの過程を示しており、直接帯水層の水位変動を表していないものと考えられる。
No.2	冬季に水位が約50cm程度上昇する季節的な変動が認められる。夏季は急激な水位の上昇・下降を繰り返す。1998年9月から巡回測定の際にコンクリート枠内の水のたまり具合が監視されているが、No.2本孔では管頭からの直接の水の流入の形跡は認められていない。	測定記録中に見られる急激な水位の上昇はNo.5孔サイトにおける降水量の記録と相関があり、降雨による一時的な水位の上昇と考えられる。降雨による水位変化が早く、本坑井が貫く帯水層の透水性が良いものと考えられる。水位下限値は、不透水層上面の深度とほぼ等しい。	水位と重力の長周期変動には相関が認められるが、降雨に伴う短周期の水位変動には重力変動が対応していない。
No.3	1998年7月30日～31日(第210～211日目)に大幅な水位の上昇が認められる。その他の期間においても降雨と相関のある急激な水位の上昇が認められるが、水位の回復が非常に遅く、その影響のため季節的な変動が読み取りにくい。	1998年7月30日～31日(第210～211日目)にかけて認められる大幅な水位の上昇は、7月28日にこの地域で降り始めた集中豪雨の影響で、ほかの坑井でも大きな水位の上昇が認められている。No.5における降水量は7月28～30日の3日間で157mmと非常に多い。また、No.3別孔の水温が7月30日に急激に低下(1℃の減少)していることから、この雨によって管頭から直接水の流入があった可能性があると考える。水位変動域は不透水層中にある。水位変動幅が降水量に比べて大きい。ため、周辺の雨水を集めた水みちと井戸が交差していると考えられる。	水位変動と重力変動の間に相関が認められない。管頭以外の比較的浅い位置から降水時に急激に水が流入し、これが孔内の水位を上昇させるが、帯水層の透水性が悪く、水位の回復が著しく遅れて、記録されている水位が実際の帯水層の水位を直接反映していない可能性がある。
No.4	4月～10月にかけての期間は降雨と相関のある水位の変動を示す。地表付近と深度300cm付近に水位変動の停滞する範囲があり、冬季には地表付近で水位がほとんど変化しない。	この水位変動の記録が深度60cm以浅の宙水層と中間に不透水層で隔てられたより深い帯水層の合成水位を表しているものと考えている。降雨により宙水層が満たされている場合、水位は非常に浅く記録されるが、降雨がなくなり、宙水層に水がなくなると、深いほうの帯水層まで一気に水位が低下するのではないかと考える。	水位変動と重力変動の間に相関は認められないが、水位が激しく変動する夏季の間に重力が6μgal程度小さくなっている。記録されている水位は合成水位であり、宙水層の厚さは数10cm程度と考えられる。このためこの宙水層に水がなくなる夏季は若干重力が減少するが、記録されている水位変動の影響を直接受けてはいないと考える。
No.5	降雨と相関のある短周期の水位変動と、50cm程度の季節的な水位変動が認められる。冬季は水位が上昇する。	1998年6月中旬までに顕著に認められたスパイク状の水位変動は全て降雨との相関がある。本井では、5月14日(第133日目)に坑口のコンクリート枠内の水の排出をよくする工事を実施したあとはスパイク状の急激な水位変動は減っており、これらの水位変動は、管頭からの水の直接流入によるものであったと考えられる。	水位変動と重力の変動に良い相関が認められる。
No.6	計測開始後1999年4月頃までは全体的に水位が低下していたがそれ以降は一定レベルの中で水位が変動しているように見える。冬季に水位が上昇する季節的な変動が認められる。	1998年5月14日に管頭とコンクリート枠のかさ上げ工事をしたため、それ以降の管頭からの水の直接の流入はない。計測開始後1999年4月頃までの水位の低下に関しては原因が良くわかっていない。	水位変動と重力変動の間に相関が認められる。
No.7	水位の低下の仕方が2400cmより浅いところとそれより深いところで明らかに異なっている。このような現象はNo.4別孔でも認められる。	水位変動域が比較的深部にあり、上下に不透水層が存在するため、降雨による直接の影響を受けにくくなっている。高透水性の層が深度2400cm付近にあり、降雨等の影響でそれより水位が上昇したときにそのレベルまでは急激に水位が回復すると考える。	水位と重力の季節的な変動に相関が認められる。水位が急激に上昇したときに重力変動が認められないのは、その期間の坑内水位が実際の帯水層の水位を反映していないためと考える。
No.8	No.2と同様に降雨に対応して数10cmの急激な水位の上昇とこれに続く緩やかな水位の低下を繰り返している。水位の変動幅はNo.2に比べて若干大きい。冬季に水位が約50cm程度上昇する季節的な変動が認められる。	この坑井では5月14日にコンクリート枠内の水排出孔の工事を実施したが、豪雨の際に水の排出が追いつかず管頭が水没している可能性がある。降雨による水位変化が早く、本坑井が貫く帯水層の透水性が良いものと考えられる。水位変動域は比較的透水性の高い地層中にある。水位変動幅が降水量に比べて大きい。ため、周辺の雨水を集めた水みちと井戸が交差していると考えられる。	水位変動は不透水層の位置に規制されてはおらず、長周期の変動には相関性が認められる。但し、雪のため冬季間に重力巡回測定ができず、現時点では季節的な変動に関する関連性が把握できていない。
No.9	水位の変動が非常に小さい。非常に僅かであるが、降雨と対応した水位の上昇とこれに続く緩やかな水位の低下を繰り返している。	降雨にほとんど関係なく水位は安定している。試験的に水を坑内に強制的に投入し手動水位計で水位の変動を調べたところ、非常に早く水位が回復した。帯水層の透水性が非常に良好なため水位の変動が小さいものと考えられる。	夏季は重力値もほとんど変動がなく、水位記録との相関は良いが、1999年11月から2000年2月にかけて重力が異常な変動をしており、水位との相関がなくなっている。この重力変動の原因についてはわかっていない。
No.10	降雨の少ない時期に急激な水位の低下を生じることがある。深度300cm付近での水位変動は比較的緩やかである。	降雨の少ない時期の急激な水位の低下は、水位340cm以深で認められることから、本井における水位は複数の帯水層の合成水位であることが推察される。深度340cm付近に不圧帯水層の下限があり、降水が比較的多い場合にはこの帯水層の水位を記録しているが、降雨が減って、この帯水層からの水の供給が止まると、これより深い帯水層の圧力水頭の位置まで水位が急激に減少する。この水位の低下が安定しないうちに降水により再び上部の帯水層から水が供給されるようになると、水位は急激に増加する。	水位と重力の変動は比較的良い相関を示している。本孔井の水位は合成水位と考えるが降水の非常に少ない時期を除いてほとんどが単一の帯水層の水位を反映しているため、相関がよくなっているものと考えられる。



第Ⅱ-3-3-1図

Fig. II-3-3-1

No. 5孔における重力変動と水位変化及びTDR水分率の比較

Comparison among gravity change, groundwater level change and change in TDR water content at monitoring well site No.5.

第II-3-3-2表 Baytap-Gによる潮汐解析結果

Table II-3-3-2 Results of tidal analysis by BAYTAP-G.

Group	Symbol	Factor												Ave	SD	Amplitude
		1	2	3	4	4'	5	6	7	7'	8	9	10			
1	Q1	1.2118	1.1991	1.2129	1.2207	1.2262	1.2123	1.1972	1.1540	1.1492	1.2246	1.2535	1.2041	1.2055	0.0292	6.9182
2	O1	1.2019	1.2116	1.2037	1.2133	1.2139	1.2079	1.2143	1.1982	1.1980	1.2048	1.2039	1.2113	1.2069	0.0060	36.1764
3	M1	1.2387	1.2147	1.1919	1.3168	1.3098	0.9852	1.2229	1.2629	1.2497	1.2522	1.0604	1.1386	1.2036	0.0983	2.8376
4	P1S1K1	1.1914	1.1931	1.1904	1.1917	1.1913	1.2022	1.1850	1.1734	1.1727	1.1834	1.1984	1.1933	1.1888	0.0089	50.1169
5	J1	1.3380	1.2590	1.1854	1.1768	1.1754	0.9938	1.2453	1.3337	1.3338	1.2585	1.3486	1.2544	1.2419	0.1007	2.9275
6	OO1	1.2682	1.1728	1.0323	1.0582	1.0603	1.3294	1.1613	1.1397	1.1306	1.1700	1.8936	1.0716	1.2073	0.2331	1.5573
7	2N2	1.2183	1.1264	1.1730	1.1478	1.1426	1.1405	1.6430	1.4437	1.4286	1.1956	0.9528	1.1889	1.2334	0.1838	1.4796
8	N2	1.1716	1.1856	1.1796	1.1917	1.1905	1.2121	1.1833	1.1747	1.1742	1.2023	1.2207	1.1962	1.1902	0.0154	10.7887
9	M2	1.1935	1.1892	1.1881	1.1897	1.1895	1.1851	1.1906	1.1909	1.1908	1.1923	1.1912	1.1891	1.1900	0.0021	56.3406
10	L2	1.1341	1.2323	1.2548	1.1443	1.1504	1.0365	1.4995	1.1464	1.1307	1.1656	1.5082	1.1896	1.2160	0.1450	1.6273
11	S2K2	1.2020	1.2037	1.1960	1.2108	1.2116	1.2139	1.2058	1.2038	1.2041	1.2035	1.2247	1.2092	1.2074	0.0073	26.5965
12	M3	0.9854	0.9530	1.0867	1.1084	1.1035	1.2298	1.1303	1.2423	1.2385	0.8165	1.6263	0.9055	1.1188	0.2096	0.8265

Group	Symbol	Phase												Ave	SD	Amplitude
		1	2	3	4	4'	5	6	7	7'	8	9	10			
1	Q1	1.23	1.90	0.74	1.85	1.66	0.52	2.15	3.88	3.78	2.24	4.53	1.31	2.1468	1.2760	6.9182
2	O1	1.83	1.38	1.18	1.33	1.36	1.05	0.88	0.51	0.53	1.19	0.41	1.40	1.0874	0.4312	36.1764
3	M1	1.88	0.01	1.81	4.28	5.25	1.75	-1.60	9.18	8.91	-1.56	0.39	3.60	2.8243	3.5886	2.8376
4	P1S1K1	0.65	0.58	0.44	0.17	0.24	0.28	-0.28	0.42	0.38	0.45	0.77	0.48	0.3806	0.2692	50.1169
5	J1	-0.64	0.68	-0.48	0.33	0.57	-4.17	-0.24	-2.65	-2.49	-2.06	-10.44	1.07	-1.7098	3.1843	2.9275
6	OO1	7.21	3.29	5.58	-15.80	-15.70	-16.24	-0.46	-10.56	-10.35	-0.92	15.31	3.96	-2.8918	10.5452	1.5573
7	2N2	-1.91	0.60	2.41	5.16	5.33	13.79	18.96	3.56	3.38	0.65	-13.64	2.96	3.4365	7.9311	1.4796
8	N2	0.32	0.97	0.82	0.36	0.56	0.43	2.08	0.84	0.76	0.96	5.09	0.55	1.1463	1.3269	10.7887
9	M2	1.27	1.51	1.70	1.55	1.59	1.66	1.42	1.46	1.45	1.50	1.06	1.66	1.4858	0.1791	56.3406
10	L2	3.39	2.60	-3.31	8.24	7.84	-14.66	-6.08	-2.00	-2.96	-3.11	-9.24	4.90	-1.1989	6.9073	1.6273
11	S2K2	0.52	0.53	0.74	0.15	0.26	1.31	1.00	0.65	0.65	0.74	0.26	0.61	0.6173	0.3246	26.5965
12	M3	5.15	-1.57	3.26	0.85	1.10	-5.33	-3.64	-12.59	-12.27	6.42	-45.07	5.17	-4.8764	14.1609	0.8265

Response Coefficient												Ave	SD
1	2	3	4	4'	5	6	7	7'	8	9	10		
-0.4039	-0.3547	-0.3871	-0.3908	-0.3428	-0.2336	-0.1828	-0.4264	-0.4280	-0.3855	-0.3508	-0.3342	-0.3517	0.0744

使用測定データ: No.2125における重力連続観測記録(重力計:CG-3M-2)

解析区間:

1: 1999.4.16 0:00 - 1999.5.11 23:30

6: 1999.8.19 0:00 - 1999.9.13 23:30

2: 1999.5.11 0:00 - 1999.6.5 23:30

7: 1999.9.13 0:00 - 1999.10.8 23:30

3: 1999.6.5 0:00 - 1999.6.30 23:30

8: 1999.10.8 0:00 - 1999.11.2 23:30

4: 1999.6.30 0:00 - 1999.7.25 23:30

9: 1999.11.2 0:00 - 1999.11.27 23:30

5: 1999.7.25 0:00 - 1999.8.19 23:30

10: 1999.11.27 0:00 - 1999.12.22 23:30

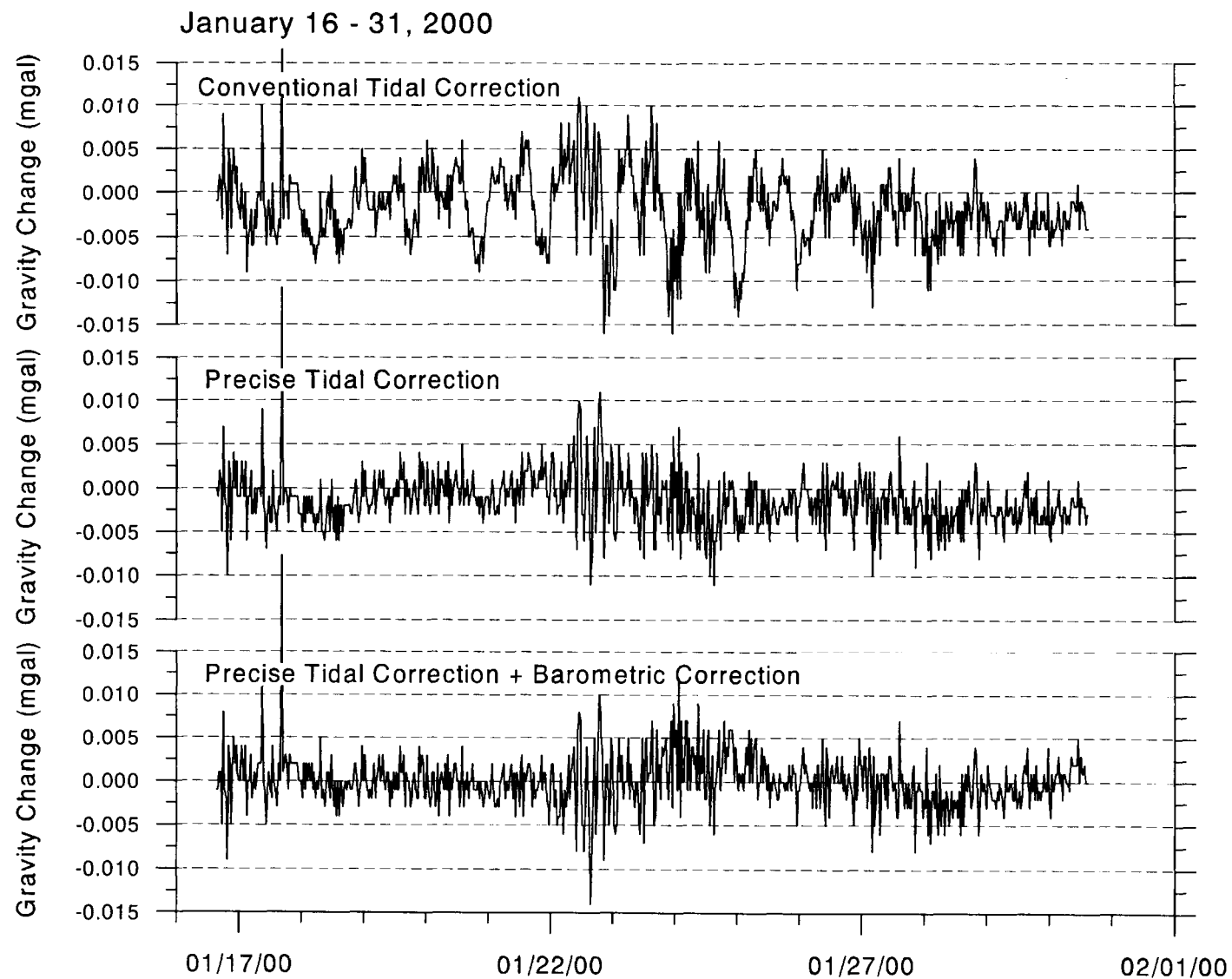
第Ⅱ-3-3表 柳津西山地熱地域における潮汐モデル

Table Ⅱ-3-3-3 Tidal model in Yanaizu-Nishiyama geothermal field.

潮汐モデル(12分潮群)				
分潮群	(記号)	ファクター	位相	振幅
1	Q1	1.2055	2.15	6.918
2	O1	1.2069	1.09	36.176
3	M1	1.2036	2.82	2.838
4	P1S1K1	1.1888	0.38	50.117
5	J1	1.2419	-1.71	2.928
6	OO1	1.2073	-2.89	1.557
7	2N2	1.2334	3.44	1.480
8	N2	1.1902	1.15	10.789
9	M2	1.1900	1.49	56.341
10	L2	1.2160	-1.20	1.627
11	S2K2	1.2074	0.62	26.597
12	M3	1.1188	-4.88	0.827

気圧応答係数 (μ gal/hPa)	-0.3517
-------------------------	---------

連続観測所No.2125における観測記録(重力及び大気圧、1999年4月11日～1999年12月22日)を10分割して、BAYTAP-Gにより解析を実施した。



第Ⅱ-3-3-2図 連続重力測定結果に対する精密潮汐補正及び気圧変動補正の効果
Fig. II-3-3-2 Effect of precise tidal correction and barometric correction
on continuous gravity record.

galの補正漏れがあり、これが精密重力測定上のノイズとなり得る。厳密には地球の弾性的性質や海の干満の影響が地域によって異なり、重力変動の精密な測定ではこうした地域性を考慮した精密な潮汐補正が必要である。

昨年度は、連続観測所において測定された45日分の重力連続観測記録の解析から本調査地域の潮汐補正のパラメータを求め、これを使用して精密潮汐補正を行う方法の検証を実施し、その有効性について確認した。本年度は精密潮汐補正の実用化を目指して、より長期間の重力連続測定記録から本調査地域における最適な解析用パラメータの決定を行い、平成9年度以降測定された測定結果に対してこれらの補正を実施した。

重力連続観測記録の解析には、潮汐解析プログラムBAYTAP-G (Ishiguro et al., 1981; Tamura et al., 1991) を使用した。

使用した重力連続測定記録は、1999年4月11日から1999年12月22日までの期間に連続観測所No.2125においてScintrex重力計CG-3M-2によって測定されたもので、これらの記録を10分割して約26日のデータセットにしてから個別に潮汐モデルを求めて、それらの平均値を最終的な潮汐モデルとした。分割を行った理由は、決定される潮汐モデルのばらつきを確認し、今後新規地域で潮汐モデルの決定を行うための連続測定期間の長さがどのくらい必要かを吟味するためである。

データの測定間隔は30分で、毎時00分と30分に測定している。このデータの解析では12分潮群を仮定し、各分潮群の振幅係数と位相遅れを決定した(以後この分潮数の仮定と決定された振幅係数・位相遅れを本調査地域の「潮汐モデル」と呼ぶ)。なお、本プログラムでは任意で並行観測データを与えて、この並行観測量に対する重力の応答係数を同時に決定することができる。ここでは、大気圧連続測定データを並行観測データとして与えて大気圧変動に関する重力変動の応答係数を同時に決定した。大気圧変動に関する応答については後で述べる。

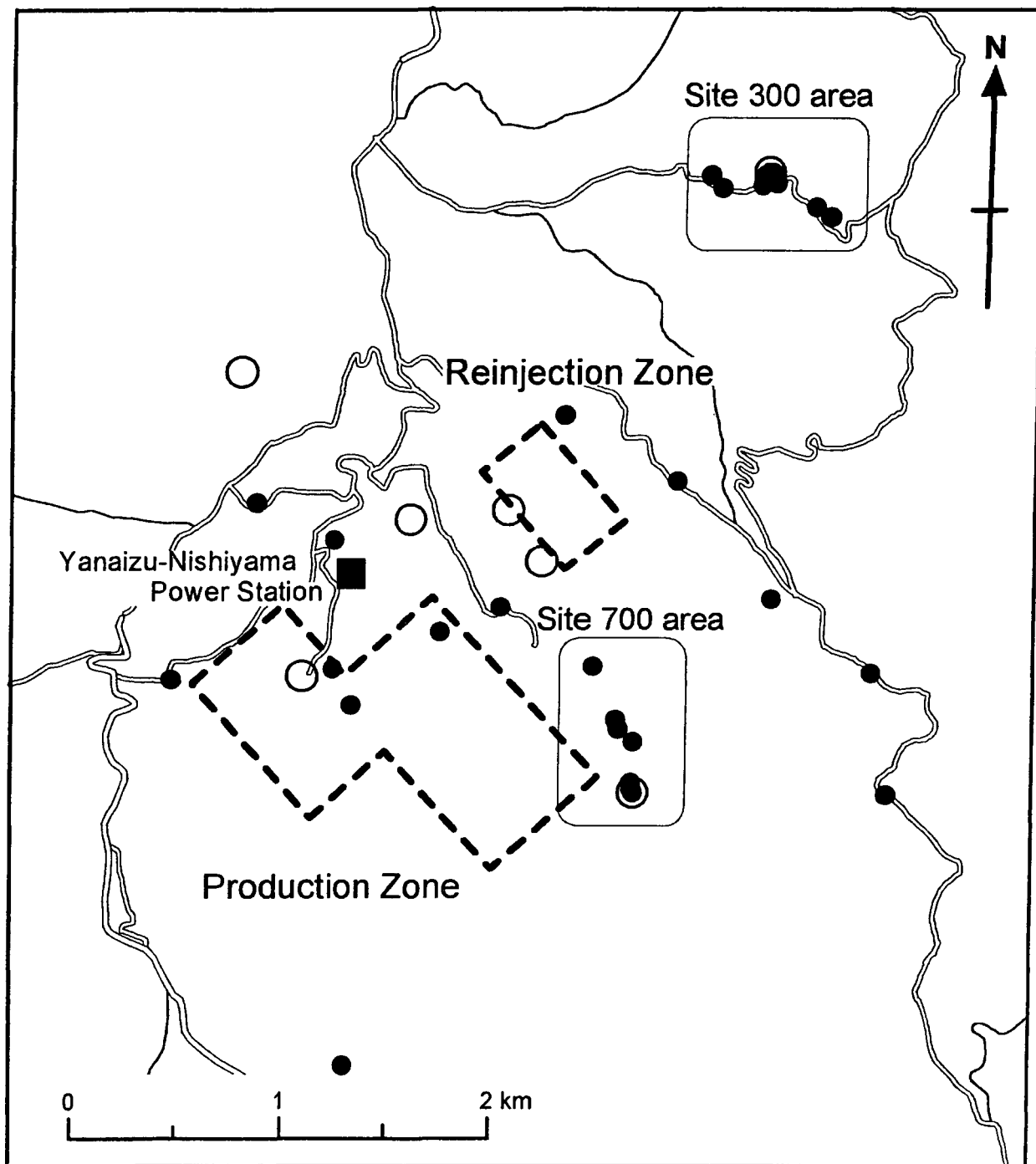
第II-3-3-2表に各データセットで決定された潮汐モデルとそのパラメータの平均値及び標準偏差を示す。表の右端に各分潮群の振幅の平均値を示してある。相対的に振幅の大きい分潮群に関しては振幅係数・位相遅れともにばらつきが少なく、26日程度のデータセットでも妥当なモデルが推定できるものとする。本表の平均値から、本地域における潮汐モデルを第II-3-3-3表のように決定し、本地域の重力測定結果の解析に使用することとした。II-3-1で述べた重力測定結果は全てこのモデルを使用した精密潮汐補正を施したものである。

第II-3-3-2図は精密潮汐補正を前述の潮汐モデルの解析期間以外のデータに適用し、その効果を確認した例である。図の上段は従来の潮汐補正による結果、中段は精密潮汐補正のみを施した場合、下段は精密潮汐補正と気圧変動補正を施したものである。従来の潮汐補正には10 μ gal程度の振幅で認められる補正漏れが精密潮汐補正では振動等による短期のノイズレベル(おおよそ5 μ gal以下)まで小さくなっていることがわかる。

(2) 鉛直重力勾配に関する検討

1) 調査内容

平成11年8月2日～8月8日にかけて、柳津西山地域の生産・還元の既存の重力変動観測点および昨年度測定した重力観測点を中心に第II-3-3-3図に示す28点で調査を実施した。



- VGG measurement point in 1998
- VGG measurement point in 1999

第II-3-3-3図 鉛直重力勾配測定位置図

Fig.II-3-3-3 Location map of VGG measurement point

今回測定した垂直重力勾配測点は28点で、各測点での測定手順を以下に示す。

- ・ 高さ100cmの重力測定台を使用
- ・ 使用重力計はシントレックス社製CG-3M
- ・ 測定は、各測点において地表>重力台(地上高約1m)>地表>重力台の順に行う。
- ・ サンプル数N=200で、それぞれ3回測定(安定しない場合は更に数回測定)
- ・ 測定期間中の重力基点は、奥会津地熱(株)西山事業所駐車場に設置

第II-3-3-4図に示すとおり、柳津西山地域におけるVGG値は地表からの高さ(地表より1.6m程度)に依存せず、一様と考える事が出来るという結果を得ている。また、地表からの高さについては、VGG測定のための重力計位置の高低差が1m程度であれば十分な精度で測定出来る事が分かっている。

垂直重力観測点は、主に以下の観点から選定した。

- ・ 昨年度、最も垂直重力勾配の異常値を示したVGG300測点(水位観測井No.2)付近で、1)昨年と同じ値が再現できるか、2)測定位置の違いにより値が変化するか(昨年度最も大きな垂直重力勾配の異常値を示したVGG300では $-243.7\mu\text{gal/m}$ を示し、理論値 $-308.7\mu\text{gal/m}$ と大きく異なる)。
- ・ VGG300の様な異常値を示す測点があるか(標高や付近の地形が異なる既存重力点を選択し、その近傍で測定)。

また、今年度の測定では、昨年度測定した垂直重力勾配観測点の内数点で重力勾配測定を行い、ほぼ同じ値が再現される事を確認した。

VGG測点300付近におけるVGG測定

VGG測点300は昨年度測定されており、最も低いVGGを示している。また、水位観測井No.2の極近傍(5m以内)にあり、柳津西山の生産・還元ゾーンからは離れた場所に位置する。

最初に、この低いVGGを示す本測点の付近で測定を行った。調査したVGG測点数は8点で、VGG測点300を中心に東西約600mの範囲に分布している、地形および植生の問題により測点は全て道路上に設定した事から測点密度は一様では無い。また、新たに設定した測点のVGG値(測点3000~3081)を第II-3-3-4表に示す。その測定結果は測点300近傍では、約75mの区間でVGG値が $-247\mu\text{gal/m}$ から $-300\mu\text{gal/m}$ まで大きく変化している。この変化は測定誤差よりも十分に大きい。

VGG測点700付近におけるVGG測定

VGG測点700は昨年度にも測定されており、坑井25Pの近傍に位置し本地域のVGG測点の中で最も標高が高い。昨年度測定されたVGG値は、平均的値($-293.5\pm 3\mu\text{gal/m}$)であったが、本年度の測定でもほぼ同じ値($-295.7\pm 2.3\mu\text{gal/m}$)が得られた。今回は25P基地に続く道路沿いに新たに6点でのVGG測定を行った(重力測点のNo. 43から25P基

地に至るまでの約600mの区間)。この結果、 $-314\mu\text{gal/m}$ から $-352\mu\text{gal/m}$ のVGG値が得られた。この中で $-352\mu\text{gal/m}$ という値は昨年度測定されたVGG最大値よりも大きく、通常の値よりも14%も大きい。地形図と見比べると、急峻な地形の近傍に設定された測点では高いVGG値を示す傾向がある。

他のVGG測点について

他のVGG測定は、既存の重力観測点直上、またはごく近傍で行った。ここで、隣り合うVGG測点の間隔は、おおよそ500m以下である。VGG測定値の頻度分布を第II-3-3-5図に示したがその範囲は $-244\mu\text{gal/m}$ ～ $-352\mu\text{gal/m}$ で、その内最も頻度が高い値は $-300\mu\text{gal/m}$ で全体の約20%を占める。第II-3-3-5表に世界で行われたVGG測定について示したが、その最大値と最小値の差をみると、柳津西山地域における測定で得られたものが最も大きい。また、VGG測点300で得られた最小値は、第II-3-3-5表の既存の測定の中で最も小さい値を示している。

VGG測定値の差について

VGG値が場所により異なる理由として、以下のようなものがある。

- 1) 測点近傍の地形影響
- 2) 測点下の地中で極浅い領域の密度異常による影響

例えば、Kumagai et al(1960), Fajkewicz(1976), Janle et al(1971)は山岳地域では地形の影響は浅部の影響よりも重要であると述べている。Kumagai et al (1960)は地形の影響により $41\mu\text{gal/m}$ 以上の差が生じるとしている。Thyssen-Bornemisza et al (1972)は、理論的な計算から、極浅部の洞窟や空洞により局所的に $60\mu\text{gal/m}$ 以上のVGG異常を示す事があり得る事を示したが、これは柳津西山地域では考えにくい。

2) 考察

地形がVGG値影響を及ぼす可能性が示唆されたものの、今回の調査で明瞭な相関性を見いだすことは出来なかった。しかし、通常用いるVGG値（理論値）と大きく異なる値が観測されている事から、重力モニタリングを行う上で、標高が大きく変動する測点ではVGG値を押さえておくことは重要である。このVGG値を決定する方法としては2つ考えられる。

① 地形データを用いたVGG算出

これは測点の付近の地形の標高データ（デジタル）を用いてVGGを計算する方法である。これはフィールドワークを省くことが出来るので、コスト的にも有利と考えられる。しかし、局所的な極浅部の密度異常等をVGG計算値に反映させることが出来ず、また、地形の密度推定値にも依存する等の問題があり、また、かなり詳細な地形の標高データの利用が必要である。

第II-3-3-4表

鉛直重力勾配測定結果一覽表（平成11年度）

Table II-3-3-4

List of VGG measurement results (1999)

Station	ht diff (cm)	g (Mgal)	Error (microgal)	g diff (microgal)	Error g diff (microgal)	VGG (microgal/m)	Error in VGG (microgal/m)	Location
3000	104.30	4055.3537	3.4	-257.7	4.5	-247.1	4.5	Site 300 (same as 1998 survey)
3001		4055.0960	2.9					
3010	104.00	4055.4907	1.0	-271.8	1.5	-261.4	1.7	30m from site 300
3011		4055.2189	1.1					
3020	104.65	4049.0103	0.4	-310.5	3.2	-295.1	3.3	near BM91
3021		4048.6999	3.2					
3030	105.20	4054.5938	1.9	-278.3	3.5	-264.5	3.6	at T-junctn
3031		4054.3155	3.0					
3040	105.20	4055.4191	2.0	-294.0	2.5	-279.4	2.7	near shed
3041		4055.1251	1.6					
3050	105.18	4055.0694	1.7	-310.0	3.2	-294.7	3.4	
3051		4054.7595	2.7					
3060	104.95	4055.0082	3.0	-313.8	4.8	-299.0	4.8	
3061		4054.6945	3.7					
3070	105.00	4055.1553	1.9	-268.8	2.0	-256.0	2.2	50m from site 300
3071		4054.8866	0.8					
3080	105.20	4055.7329	1.9	-294.8	3.4	-280.2	3.5	
3081		4055.4382	2.9					
4000	105.50	4052.5822	1.7	-304.4	2.6	-288.5	2.8	Well 21-T (87N-15T)
4001		4052.2778	2.0					
4010	105.50	4046.5073	1.4	-302.0	4.0	-286.3	4.1	BM 4
4011		4046.2053	3.8					
4020	105.80	4035.4387	3.0	-353.4	3.9	-334.0	4.0	BM 42
4021		4035.0854	2.6					
4030	106.00	4035.4889	0.0	-356.3	0.0	-336.1		
4031		4035.1326	0.0					
4040	106.00	4034.4113	1.3	-353.7	2.0	-333.7	2.2	20m from BM 43
4041		4034.0576	1.5					
5000	105.80	4034.2947	0.8	-371.9	4.7	-351.5	4.8	
5001		4033.9228	4.6					
5010	105.30	4032.6848	2.3	-347.4	3.2	-329.9	3.4	at edge of well pad area
5011		4032.3375	2.2					
5020	105.25	4032.8570	1.3	-310.8	3.0	-295.3	3.1	Site 700 (same as 1998 survey)
5021		4032.5462	2.7					
5030	105.25	4032.7813	0.0	-331.3		-314.8		under small roof
5031		4032.4500	0.0					
5040	105.10	4047.5638	3.1	-291.8	6.9	-277.6	6.8	BM 59 near well 97N-31P
5041		4047.2720	6.2					
5050	105.20	4062.3842	4.5	-295.7	4.7	-281.1	4.8	BM 25 at bridge
5051		4062.0885	1.4					
6000	105.63	4070.7155	2.7	-313.0	4.9	-296.3	4.9	BM 22 at bridge
6001		4070.4025	4.1					
6010	105.90	4056.3582	3.4	-332.1	4.6	-313.6	4.7	BM 20
6011		4056.0261	3.1					
6020	105.60	4048.2249	2.6	-312.0	3.6	-295.4	3.7	BM 2
6021		4047.9129	2.4					
7000	104.83	4054.7708	0.9	-299.5	2.2	-285.7	2.3	BM 6
7001		4054.4713	2.0					

Station	ht diff (cm)	g (Mgal)	Error (microgal)	g diff (microgal)	Error g diff (microgal)	VGG (microgal/m)	Error in VGG (microgal/m)	Location
7010	105.00	4062.4413	1.7	-282.3	3.4	-268.8	3.5	BM 36 at bridge
7011		4062.1590	2.9					
7020	104.88	4048.1913	2.8	-309.3	4.9	-294.9	5.0	BM 99
7021		4047.8820	4.0					
7030	105.08	4054.6144	1.6	-294.9	5.1	-280.6	5.1	BM 97
7031		4054.3195	4.8					
8000	104.35	4067.1682	0.6	-276.4	1.2	-264.9	1.4	BM 7
8001		4066.8919	1.1					
8010	104.55	4061.1267	3.2	-311.9	3.4	-298.3	3.5	
8011		4060.8148	1.0					

Errors in VGG calculated assuming an error in ht diff of ± 0.1 cm.

第II-3-3-5表

世界他地域における鉛直重力勾配測定値の範囲

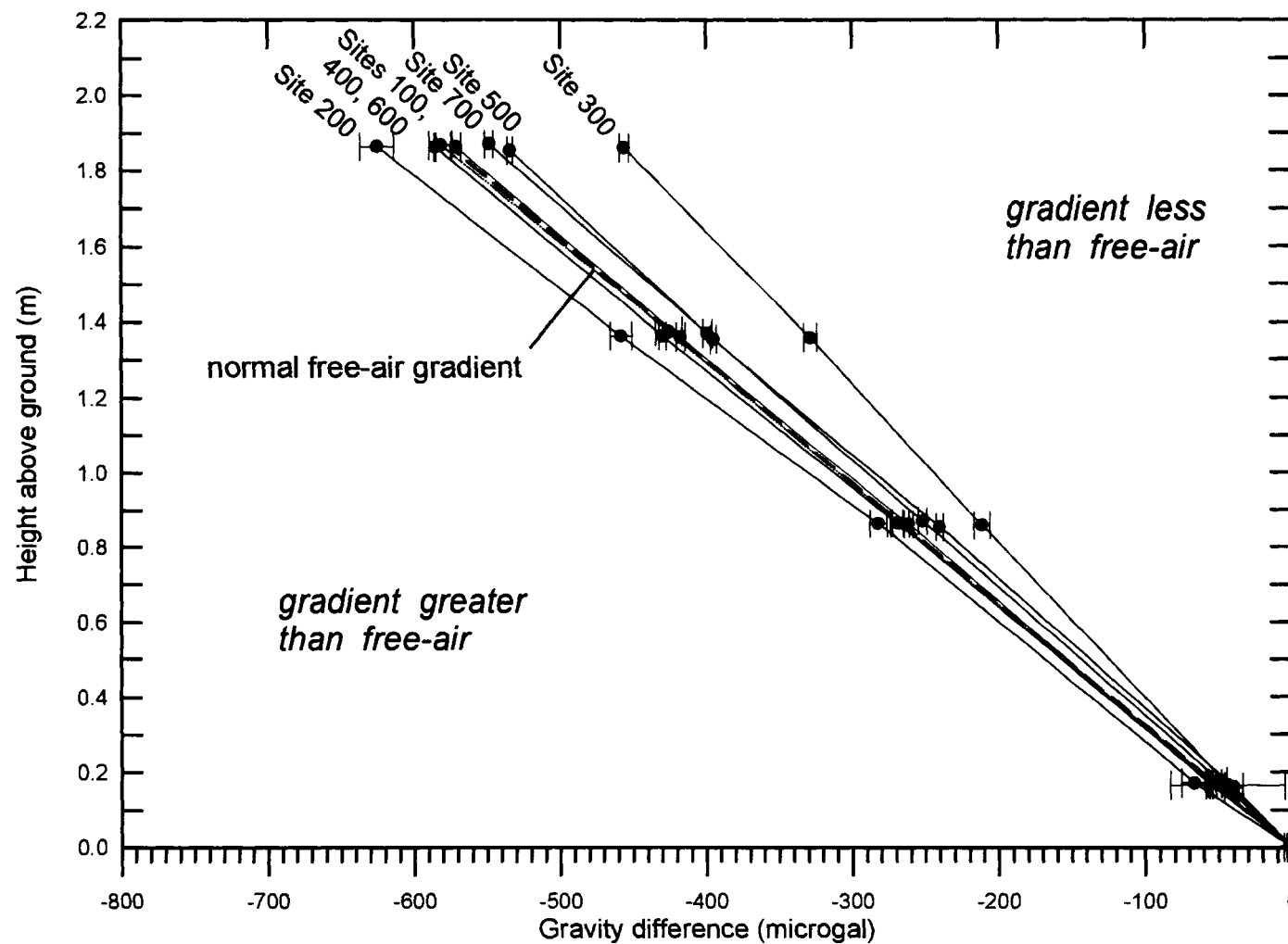
Table II-3-3-5

Range of values for VGG measured in different parts of the world.

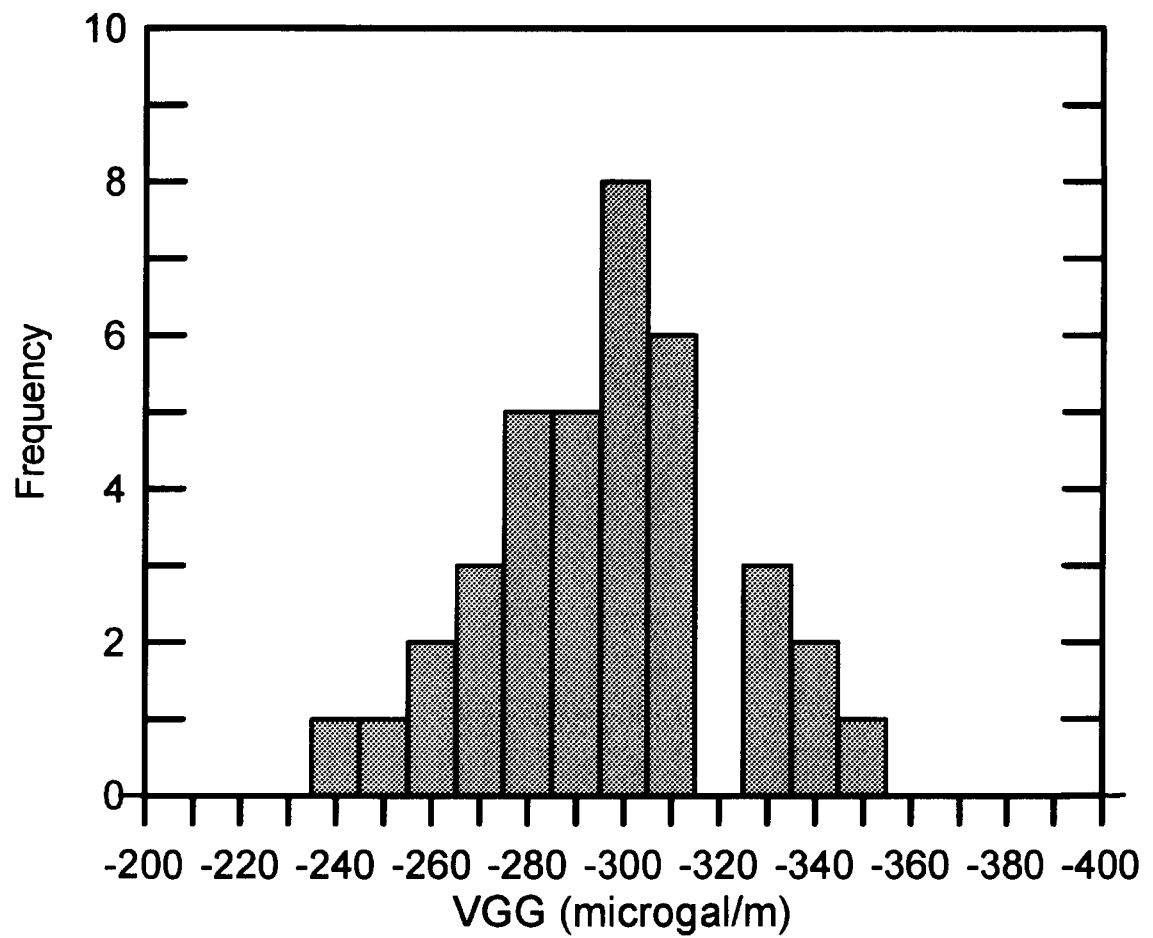
Location	n	VGG min (microgal/m)	VGG max (microgal/m)	Reference
Poland	29	-307.2 (± 0.1)	-313.0 (± 0)	Fajklewicz (1976)
Germany	14	-303.0	-319.6	Janle <i>et al</i> (1970)
Japan	55	-269 (± 2)	-369 (± 2)	Kumagai <i>et al</i> (1960)
Canada	11	-280.7 (± 0.4)	-321.8(± 0.6)	Thyssen-Bornemisza & Stackler (1956)
Canada	38	-210?	-320	Ager & Liard (1982)
France	6	-251.8 (± 1.2)	-311.8 (± 0.6)	Roder & Wenzel (1986)
Italy	6	-307 (± 4)	-363 (± 4)	Berrino <i>et al</i> (1998)
Italy	9	-266 (± 3)	-354 (± 3)	Berrino (1995)

* その他異常値例 (杉原光彦, 2000)

- Costa Rica の Poas 火山 : $420 \mu\text{gal/m}$
- Sicily の Etna 火山 : $365 \mu\text{gal/m}$
- Iceland の Breiddalur : $201 \mu\text{gal/m}$



第II-3-3-4図 各測定ポイントにおける鉛直重力勾配の高度相関図
 Fig.II-3-3-4 Plots of gravity difference against height above ground showing the variation in VGG from site to site.



第II-3-3-5図 柳津西山地域における鉛直重力勾配測定値のヒストグラム
 Fig. II-3-3-5 Histogram showing frequency distribution of measured VGG values at Yanaizu.

② VGG測定

これは本年度の測定方法と同じで、測定台を用いてVGGを測定する。これは最も簡単かつ正確にVGGを測定出来る方法であるが、測定に時間を要する。また、測定点の場所や地面の状態（地面が柔らかい等）によっては測定出来ない場合もある。

我々が調査を行うタイムスケールでは、測点近傍の地形が大きく変わらない限り、VGGが大きく変わる事はないので、これらの検討は各測点で1度行えば良いと思われる。また、測点下の地下水位面の変動がVGGへ与える影響は、まだ十分に検討（計測）されていなが、殆ど影響がないと考えられる。これは、薄い無限平板（地下水位の上昇や下降）が重力に与える影響は、平板からの距離に依らないためである。

また、当地域においては、今回測定された鉛直重力勾配値の最小値（ $-244\mu\text{gal/m}$ ）と最大値（ $-352\mu\text{gal/m}$ ）の差で考えたときに、標高変動が10cmあったときに重力値は $5\mu\text{gal}$ 程度しか変化せず、標高変動が小さければ無視できるレベルであることが確認された。

(3) その他の要因による測定誤差の除去方法に関する検討

以下に述べる「誤差」とは「調査の対象とは直接関係のない重力測定値の変動」を指す。

本研究で認められた誤差のうち、重力計の特性に起因するものとしては、(1)重力計の短期的なドリフトによる計測誤差 (2)重力計感度の経時変化による誤差が挙げられる。これらはこのScintrex CG-3M重力計特有の問題であると考えている。

また、測定環境に由来する誤差要因としては (3)地盤の振動等によるランダムノイズのほかに、(4)潮汐補正漏れによる影響、(5)気圧変動による重力変動、(6)地下水位あるいは地表付近の不飽和帯の水分量変化による重力変動 が挙げられる。(4)(6)については既に前に述べたとおりである。

以下に(1)(2)(3)(5)の誤差要因に関する特徴と現時点における対策について述べる。

1) 重力計の短期的なドリフトによる計測誤差

重力計の短期的なドリフトには、測定点間の移動に伴うごく小さなドリフトと、夜間の重力計のレベリング不良に起因する比較的大きなドリフトがある。前者に関してはいくつかの論文で既に指摘がある（中井ほか(1998)、西島ほか(1998)等）。これは、移動測定の際測定の開始とともに重力計の読み値が一定方向に数 μgal ～数10 μgal 程度ドリフトし、時間の経過とともに収束してゆく現象である。ドリフトの傾向は、個々の重力計によって異なり、測定時間や測定の打ち切り判断基準を統一しておかないと、測定の打ち切りと事後のデータ処理で判断を誤ると大きな測定誤差を与え得る。また、測定値の平均を行う際に、こうしたドリフトがあることを意識して、測定開始直後の異常な測定値を平均から除外することによりデータの質が向上することがある。第II-3-3-6図に短期ドリフトの例を示す。この図は仮基準点No.1995における重力計読み値の変化を測定開始から測定終了までの経過時間でプロットしたものである。No.1995での測定は3つの測定点（No.48, No.58, No.121）からの移動後実施されており、この図はこれらの移動前の測定点別に15日間の重力巡回測定記録を平均して

示している。使用した重力計はCG-3M-3で、測定開始から15分後のドリフトは-10~-15 μgal 程度で、測定開始後約5分程度でほぼドリフトがなくなり、またドリフトの大きさは移動前の測定点（移動経路）によって異なる事がわかる。

また、夜間の重力計のレベルング不良などにより翌朝にテア状の読み値の「跳び」を生じてしまうことがある。この場合、テアとは異なり、半日~2日程度で重力計のドリフトは「跳び」の生じる前と同じ状態に戻ってしまう。こうした短期のドリフトが混入していると、ドリフトを単一の多項式等で近似し推定することが困難になり、解析結果の精度が低下する。この種のドリフトは夜間充電時の保管状態に留意することにより避けることができる。

2) 重力計感度の経時変化による誤差

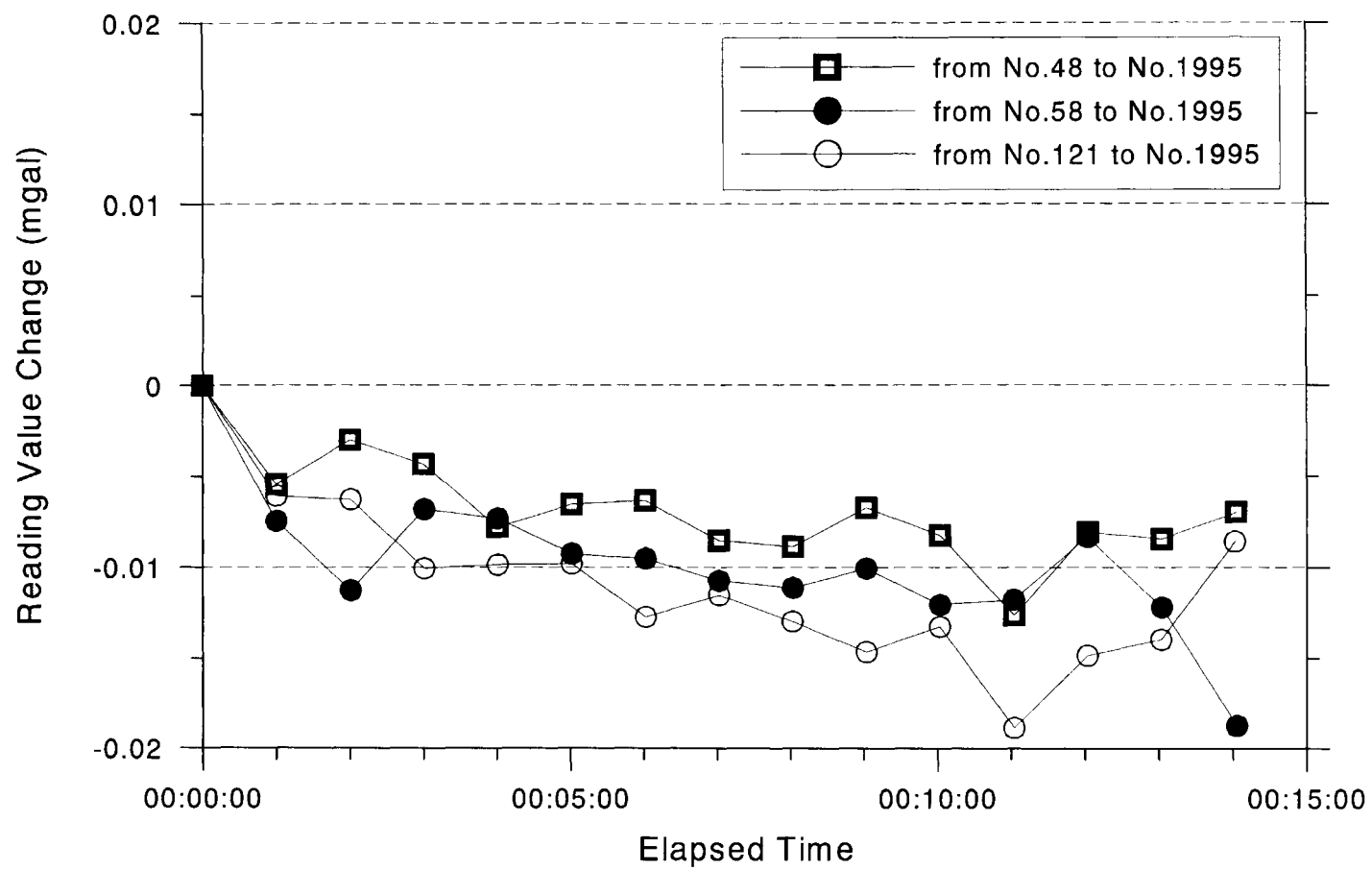
Scintrex CG-3M重力計の感度が初めてHeatingを開始してから2年間程度の間に比較的大きく変化する現象がCarbone and Rymer (1999)により報告されている。I-3-1で述べたとおり、本研究でも2年間にわたる筑波点検線における重力計検定で同様の傾向が確認された。

検定では使用開始後1年以内に3ヶ月で200ppm程度の感度の変化が認められた。この変化を考慮しないと、移動測定により測定される重力差に比例した読み値の時間的変化が生じる。測定点間の標高差の大きい地域でモニタリングを行う場合などで特に重力計の使用開始後間もない場合には注意が必要である。福島県柳津西山地熱地域における現地調査では、基準点との重力差が最大100mgal程度であり、この現象に起因する誤差は3ヶ月で大きくても20~30 μgal 程度と推定され、殆どの測定点では他の要因による重力変動と区別がつかない。測定点標高との相関をとって検討しても傾向が明瞭には認められず、この種の誤差を取り除くためには測定期間の前後でこまめに精度の良い検定を実施するしかないと考えている。第II-3-3-7図は重力測定点No.2125における巡回測定によるNo.1995との重力差の変動を示している。図中の○は筑波検定結果に基づく較正前の重力差、●は較正後の重力差である。使用した重力計はCG-3M-3である。較正を行わないと、1年間に30 μgal の重力の増加を示すことになってしまう。

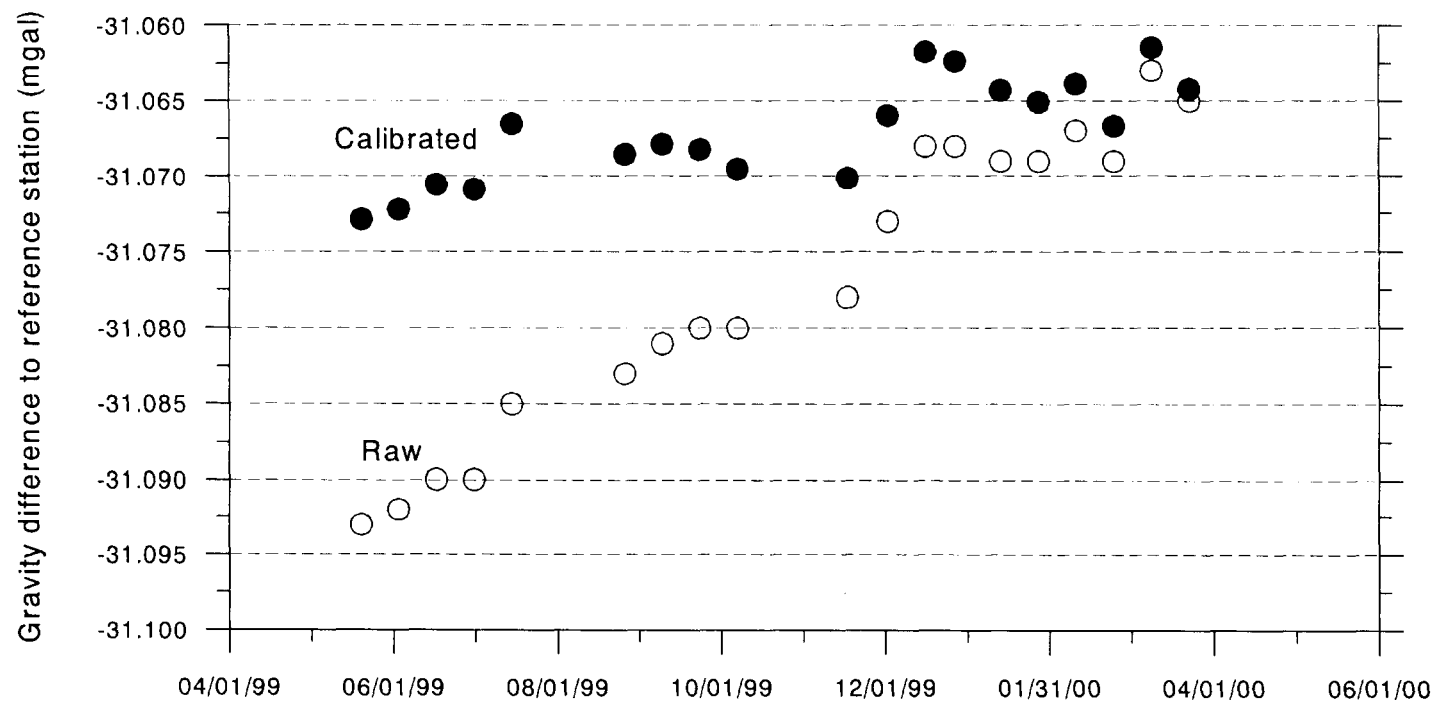
3) 地盤の振動等によるランダムノイズ

重力連続測定の1回の測定では、1秒間隔で120回のスタッキングを行っているが、120回のスタッキングを経ても数 μgal のランダムな変動が残っている。また、本調査地域（柳津西山地熱地域）は日本海沿岸から約80km程度の距離にあり、特に冬季にこの種のノイズレベルが上昇する。また、地震により数10分から数時間に亘って測定にノイズが入ることがあり、昨年の台湾の大地震の際にはかなりの大きさの異常値が混入していた。第II-3-3-8図に重力連続測定結果にみられる振動等によるノイズの影響を示す。測定点No.2125における連続測定結果に対して精密潮汐補正及び気圧変動補正を施した後ドリフト（2次多項式近似）を差し引いたものを示してある。上段は夏季の変動、中段は冬季の変動、下段は台湾大地震発生時の異常変動を示す。

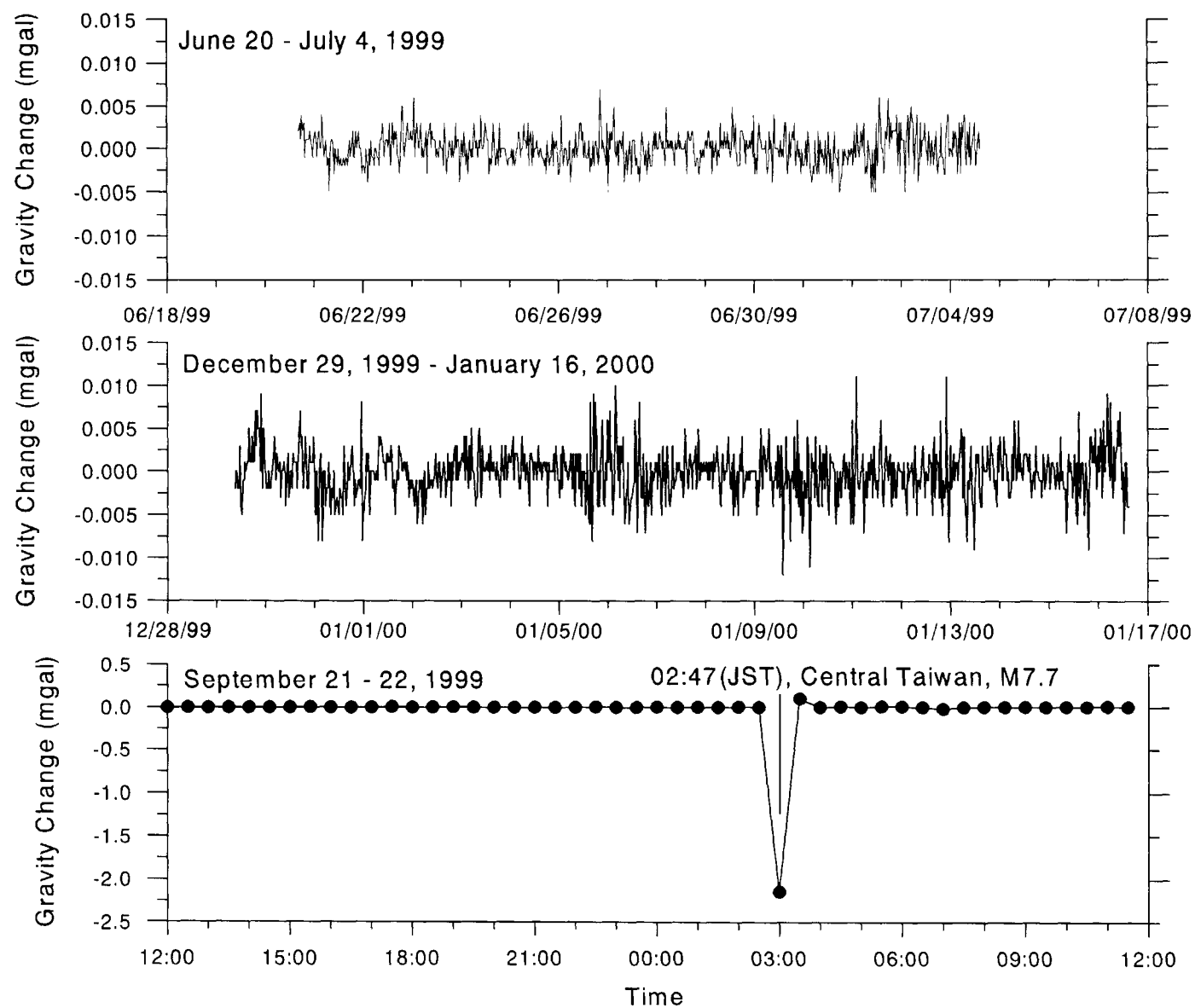
この種のノイズの除去方法はスタッキング前の異常値の除去とスタッキングを主とする。固定点における連続測定以外では、それぞれの測定点で60秒間のスタッキングによる測定を7~8回程度実施し、そのうち5~6個程度を平均して、その測定点における測定値としている。1測定点当りのスタッキングの回数は連続測定の2~3倍



第Ⅱ-3-3-6図 測定点No. 1995における重力計の短期ドリフト
Fig. Ⅱ-3-3-6 Short term drift in gravimeter readings observed at gravity station No.1995.



第 II -3-3-7図 重力計較正の効果
Fig. II -3-3-7 Effect of gravimeter calibration.



第Ⅱ-3-3-8図 重力連続測定結果にみられる振動等によるノイズ

Fig. Ⅱ-3-3-8 Random noise caused by vibration on continuous gravity record.

となり、SN比は連続測定より若干良い程度であると考える。

従って、測定値には常に数 μgal 程度の誤差が含まれているものと考えて、解析期間内に極力同一測定点における複数回の測定を増やすなど最小二乗法による重力値と重力計のドリフトの推定が可能となるような測定計画を立てることが必要であると考え

4) 気圧変動による重力変動

10 μgal 前後の測定誤差を議論する場合には空気の質量の影響も考慮する必要がある。モニタリングの場合には同一地点における重力の時間変動を議論するため、気圧の時間変化による影響のみを考慮すればよい。福島県柳津西山地熱地域における重力連続測定結果と大気圧連続測定結果からBAYTAP-Gにより求めた気圧応答係数は-0.35 $\mu\text{gal/hPa}$ であった。同地域における気圧変動の幅は30~40hPaであることから、気圧変化による重力変動の幅は10~15 μgal 程度となる。但し、気圧変動は台風の通過など特殊な例を除いてかなり緩やかであるため、重力解析区間の取り方によってはドリフトと一緒に除去でき、特に補正が必要のない場合があると考え

第II-3-3-9図は本年度の第1回定期観測結果(精密潮汐補正・気圧変動補正なし)の26日間のデータに対して最小二乗法で全測定点の重力値とドリフト(3次成分まで)を決定した際の残差(赤点)と、同期間のNo.2125における大気圧変動から計算した気圧変動補正值(緑線)を比較したものである。日周期の残差の大きな変動に関しては原因が不明であるが、定期測定開始後10日目から20日目にかけて大きな気圧変動があり、これに対応するように残差にも長周期の変動が認められる。このことは、定期観測結果のようなある程度広い範囲の移動測定結果にも気圧の変化の影響は現れており、少なくとも本調査地域程度の広さでそのほぼ中央で大気圧変動を測定している場合は、その記録で調査地域の大気圧変動を代表させても差し支えないことを示している。また、こうした長期間のデータを一括して解析する場合には、気圧変動補正を施したほうがよいと考える。

3. 貯留層ヒストリーマッチング・変動予測

昨年度構築した数値シミュレーションブロックモデルを用いて、 CO_2 を考慮した自然状態シミュレーションを実施した。自然状態シミュレーション結果は平衡地層温度及び貯留層圧力分布と概ね良いマッチングが得られた。また、この自然状態シミュレーションモデルを初期条件として、坑井ヒストリーマッチングを実施中である。坑井ヒストリーマッチングはまだ十分なマッチングができていないものの、モデルの妥当性を検討するために現段階でのベストモデルに基づき地上重力変動を試算し重力変動実測値と比較した結果、全般的傾向の特徴は概ね合っていることを確認した。

(1) 地熱概念モデル

柳津西山地域ではこれまで数値シミュレーションによる貯留層評価が数回実施されているが、新たなデータが付加されたことから、昨年度に地熱概念モデルの再構築を行った。自然状態概念モデルおよび数値シミュレーションブロックモデルの概要は以下のとおりである。

1) 自然状態概念モデル

- ① 高温流体は血の池沢断層深部（22T坑底近傍直下）から流入し、15T、23P方向へ流動し、その後上昇する。
- ② 地熱流体は-400m準に達すると、滝谷川断層の規制を受けて北東方向に向きを変える。
- ③ -400m準から地表までの間に老沢断層南東方向から冷水が混入し、上記bの地熱流体と混合しながら、北東方向へ流出および一部地表へ流出する。

2) 数値シミュレーションのためのブロックモデル（第II-3-3-10図）

- ① シミュレーション範囲は8, 250m（X軸：北東—南西方向）×10, 300m（Y軸：北西—南東方向）とし、全ての重力観測点を含むように設定した。なお、温度分布の傾向を踏まえ、X軸は東西方向から反時計回りに49度傾けている。
- ② 生産井・還元井のフィード・インジェクションゾーン深度と分割レイヤーの中間深度（シミュレーション計算深度）との距離が100m程度以内となること、また主要生产井のフィードゾーンが密集する深度区間はレイヤー密度を高くすることを考慮して、-2400masl～300masl間を9層のレイヤーに分割した。
- ③ ブロックは全て矩形とし、主に次のことを考慮して分割した。なお、各レイヤーのブロックは同一分割とし、合計のブロック数は3, 483個（=387個/層×9層）となった。
 - ・ 同一ブロックに複数の坑井のフィード・インジェクションゾーンが入ることのないよう留意した。これにより、最小ブロックサイズは100m×100mとなった。
 - ・ 生産井および還元井が密集する箇所はグリッド密度を高くした。
 - ・ 重力観測点密度が高い箇所はグリッド密度を高くした。

(2) 自然状態シミュレーション

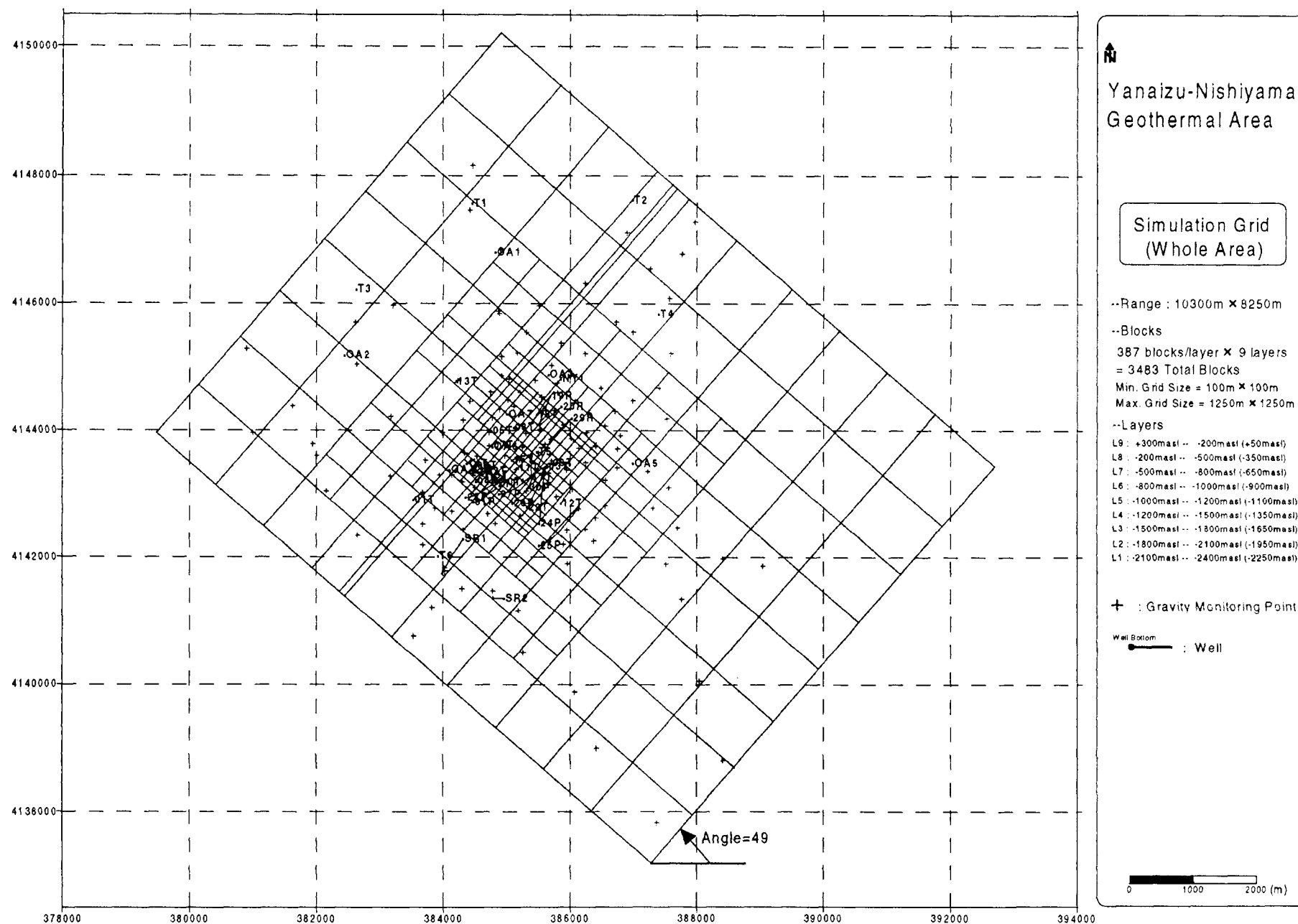
自然状態シミュレーションでは、現在より低温の状態を初期条件として準定常状態となった時の計算値を平衡地層温度および貯留層圧力分布と比較し、ほぼ良好なマッチングが得られるまで種々のパラメータを調整しながら繰り返し計算を行った。

柳津西山地域では、蒸気中の非凝縮性ガス（主にCO₂ガス）が約6wt%と多く含まれており、貯留層内でのCO₂の影響を無視することができないことから、CO₂の影響を取扱えるシミュレーションコードを選択した。使用した貯留層シミュレータはTOUGH2であり、水とCO₂成分を取扱うEOS2モジュールにより計算した。

岩石区分は実際の地層分布を基に設定し、また密度、孔隙率、熱伝導率、比熱は各地層の実測データに基づく値を設定した。また、浸透率は過去のシミュレーションで使用した値を参考にし、シミュレーション計算過程で調整した。

境界条件として、底面は生産井22T坑底付近の直下に温度・圧力一定の高温流体ソースを設定し、それ以外は不透水の熱流束源を設定した。上面は一部の流体流出ブロックを除き、大気層を模擬した温度一定境界とした。側面は北東境界の一部の流体流出ブロックを除き、不透水・断熱境界を設定した。また、南東方向からの老沢断層への冷水流入を模擬するために、仮想的な冷水ソースを要素内部に設定した。

CO₂の初期条件として、高温流体ソースに約2wt%相当のCO₂を設定した。これ以外のブロックにはCO₂換算で平均的な河川水中含有量相当の約0.002wt%を設定した。なお、



第II-3-3-10 図 貯留層モデルのグリッドレイアウト
Fig.II-3-3-10 Grid layout of reservoir model

TOUGH2ではCO₂に関する基礎変数はCO₂分圧として入力している。

第II-3-3-5表に自然状態シミュレーション条件を示す。

第II-3-3-11～13図に自然状態におけるシミュレーション温度と平衡地層温度の平面分布の比較を示す。また、第II-3-3-14～15図に坑井毎のシミュレーション温度と平衡地層温度の比較を示す。Layer9（標高50masl）ではシミュレーション温度の方が平衡地層温度より低い傾向にあるなど一部相違する箇所はあるが、全体的な温度分布の傾向は合っている。

第II-3-3-16図に標高に対するシミュレーション圧力と実測値に基づく貯留層圧力の比較を示す。シミュレーション圧力は若干低めであるが、ほぼ貯留層圧力を再現している。

純水の場合に比較して地熱流体中にCO₂が含まれると飽和温度が低下し二相領域が発生し易くなる。本地域では自然状態における二相領域の存在は探査データからは確認できていないが、本自然状態シミュレーション結果では、Layer7（標高-650masl）以浅でガス飽和度0.1～1.0%程度の二相領域が見られた（第II-3-3-13図）。

(3)坑井ヒストリーマッチング

坑井ヒストリーデータとして、発電所運開前の試運転時（平成6年12月）から平成11年1月の約4年間ににおける生産井16坑および還元井3坑の坑井毎の生産（還元）流量（蒸気量＋熱水量の合計）および生産（還元）流体のエンタルピーを用いた。本地域では各生産井毎にはセパレータは設置されていないため、生産井毎の生産蒸気量および熱水量は直接計測されていない。使用した生産井毎の生産流量・エンタルピーデータは、複数生産井を集合させたセパレータ出口で計測されている生産蒸気量および熱水量と、化学トレーサおよび各生産井毎の二相流差圧の組み合わせにより算出されたものである（以下、本手法で算出したエンタルピーを「算出エンタルピー」と記す）。また、生産井15Tおよび17Tは2箇所のフィードゾーンを設定しているが、過去の噴出中のPTS検層から推定された流入割合から2箇所の流量配分を決めた。なお、還元井の還元流量および還元流体のエンタルピー（温度）は実測値である。

坑井ヒストリーマッチング計算は、TOUGH2におけるMASSオプションにより行なった。すなわち、各生産井については生産流量（蒸気量＋熱水量の合計）をヒストリー入力条件として、生産流体の計算エンタルピーと上記の算出エンタルピーとを比較する、エンタルピーマッチング計算を行なった。また、還元井については還元流量と還元流体のエンタルピーをヒストリー入力条件として計算した。

坑井ヒストリーマッチングシミュレーションでは、主に生産井近傍のパラメータ（浸透率、孔隙率）を再調整する等の試行錯誤の計算を行っているが、現段階では生産井のエンタルピーマッチングはまだ充分ではない。第II-3-3-17図にエンタルピーマッチング計算結果の例を示す。本地域の生産井の殆どが600～650kcal/kg程度の高いエンタルピー生産（ほとんど蒸気）であり、坑井近傍周辺はエクセスエンタルピーが発生している状態となっていると考えられる。本ブロックモデルでは坑井近傍周辺の局所的な状況も比較的再現しやすくするために、各生産井のフィードゾーンに1つのブロックを割り当てるように細かなブロック分割としているが、本年度の坑井ヒストリーマッチング計

第II-3-3-6 表 自然状態シミュレーションの条件

Tab.II-3-3-6 Formation properties, boundary and initial conditions used in natural state simulation

シミュレーションコード	T O U G H 2 (EOS2 モジュール [成分: 水と CO ₂])				
シミュレーション期間	下記の初期条件から準定常状態になるまで (最終的には約 30~40 万年程度)				
シミュレーションエリア	10.3km (北西-南東方向) × 8.25km (南西-北東方向)				
ブロック/レイヤー	3,483 個 (各層で 387 個) / 9 層 第 9 層: +300m ~ -200m [+50m] 第 8 層: -200m ~ -500m [-350m] 第 7 層: -500m ~ -800m [-650m] 第 6 層: -800m ~ -1,000m [-900m] 第 5 層: -1,000m ~ -1,200m [-1,100m] 第 4 層: -1,200m ~ -1,500m [-1,350m] 第 3 層: -1,500m ~ -1,800m [-1,650m] 第 2 層: -1,800m ~ -2,100m [-1,950m] 第 1 層: -2,100m ~ -2,400m [-2,250m]				
境界条件	側面: 第 8,9 層の北東境界の流体流出ブロック (温度・圧力一定) を除き, 不透水・断熱境界を設定 上面: 一部の流体流出ブロック (温度・圧力一定) を除き, 大気層を模擬した温度一定境界を設定 下面: 生産井 22T 坑底直下に温度・圧力一定の高温流体ソースを設定し, それ以外は不透水の熱流束源を設定 その他: 老沢断層の南東方向からの冷水侵入を模擬するため, 仮想的な冷水ソースを要素内部に設定				
初期条件	初期温度は上面 15℃と下面 300℃の温度勾配より設定し, 初期圧力は初期温度の静水圧勾配より設定。また, CO ₂ の設定は高温流体ソースに約 2wt%相当, それ以外は約 0.002wt%相当を設定。				
岩石物性	(密度, 孔隙率, 熱伝導率, 比熱)				
	地層名	密度 [g/cm ³]	孔隙率 [-]	熱伝導率 [cal/(cm・s・℃)]	比熱 [Kcal/(kg・℃)]
	漆窪層	2.15	0.20	6.0 × 10 ⁻³	0.239
	荻野層	2.25	0.16	6.0 × 10 ⁻³	0.239
	滝沢川層	2.10	0.16	6.7 × 10 ⁻³	0.239
	(浸透率)				
	レイヤー	地層名		浸透率 (mD)	
	第 9 層	漆窪層・荻野層		0.1~30.0	
	第 8 層	荻野層・滝沢川層		0.1~8.0	
	第 7 層	滝沢川層		0.1~8.0	
	第 6 層	滝沢川層		0.1~8.0	
	第 5 層	滝沢川層		0.1~8.0	
	第 4 層	滝沢川層		0.1~8.0	
	第 3 層	滝沢川層		0.1~30.0	
	第 2 層	滝沢川層		0.1~30.0	
	第 1 層	滝沢川層		0.1~1.6	
(相対浸透率)					
Grant の式を採用し, 残留液相飽和度:0.05, 残留気相飽和度:0.00 を設定					

算は岩石の孔隙（流体）とマトリックス間の温度・圧力が常に平衡状態にあるポーラスモデルにより行っている。今後エクセスエンタルピーを充分再現するためには、フラクチャー部と岩石マトリックス部から構成され、フラクチャー部と岩石マトリックス部間の局所的な平衡状態を模擬できるMINCモデルの適用を図る必要があるものと考えられる（石戸1999）。

(4)地上における重力変動計算

発電所運開前の試運転時（平成6年12月19日）から約3年後の地上における重力変動を試算した。重力変動計算値は、上記の坑井ヒストリーマッチング計算の現段階でのベストモデルのデータを基に、3次元密度構造モデル（角柱モデル）を作成し理論計算により得られたものである（M.Okabe 1979）。

第II-3-3-18図に実測重力変動分布と計算重力変動分布の比較を示す。

実測重力変動分布(1997-1994の重力変動)は平成6年度～平成9年度に奥会津地熱（株）と東北電力（株）の共同研究として実施した際に得られたものである（奥会津地熱他1998）。なお、第II-3-3-18図中央には実測重力変動値をスペクトル解析により長波長重力変動図として表示したものも合わせて示してある。

計算重力分布では、負の重力変動は生産領域（15T付近で最大 $-68\mu\text{gal}$ ）で見られ、また正の重力変動は還元領域から北東方向（最大 $+14\mu\text{gal}$ ）に見られる。負の重力変動は流体生産に伴い貯留層内圧力が低下し二相領域の発生・拡大が起こり、密度減少が起こっているためと考えられる（例えば、第II-3-3-19図の-900、-650maslにおける3年後のガス飽和分布）。また、正の重力変動は還元の影響により、圧力上昇・温度低下が起こり自然状態で存在していた蒸気相の凝縮（標高50maslにおける自然状態の二相領域が還元開始後には単相（液体）状態に変化）、あるいは冷水還元による冷却域の拡大に伴う密度上昇が起こっているためと考えられる。

今回の計算重力変動値は坑井ヒストリーマッチングがまだ充分ではないこと、また実測重力変動値も現在本テーマで開発中の貯留層に起因する以外の重力変動要素のノイズ除去を行っていないことから、計算重力変動値と実測重力変動値の詳細な比較は現段階ではあまり有意義ではないが、生産領域の負の重力変動、還元領域から北東方向の正の重力変動を示す全般的な特徴は両者ともに見られる。

III 評價

Ⅲ 評 価

Ⅲ－１ 重力測定ネットワークシステム構築

１．TDR土壌水分計の設置

連続観測所近傍にTDR土壌水分計を設置（センサー深度0.35mから0.4m毎，6レベル）し，連続測定を開始した。

２．重力計検定

国土地理院により重力測定が実施されている筑波点検線においてScintrex CG-3M重力計の検定を実施し，重力測定と測定データ処理の仕様を設定するとともに，各重力計固有の較正係数を求めた。また，検定精度の向上を目的として日本縦断路線における重力計検定を実施した。その結果重力計の較正係数の経年変動があることが明らかになった。

３．地下水位連続観測・重力連続測定・重力巡回測定

連続観測所(No.5地点)にいて，重力，地下水位共に24時間連続観測を実施し，その他の9地点の観測点では，地下水位の24時間連続観測を実施した。また，各水位観測井近傍の測定点における重力巡回測定を1回/2週（3日/回）実施した。また，連続観測所において大気圧・気温・雨量の連続観測を実施した。

４．重力定期測定

生産・還元による重力変動の状況をより安定的に把握するため，Scintrex社CG-3M型重力計1台を追加増強し，4月に第1回目，7月に第2回目，10月に第3回目の重力測定を実施した。

５．GPS測定及びレベル測量

重力定期測定と同時期に3回のレベル測量を実施した。またこれと同時に重力連続観測点近傍（No.3125）でGPS測定を実施し，GPS測定結果と電子基準点データを用いた基線解析で，5日～1週間程度の解析結果の平均値をとれば，十分な精度で安定した楕円体高値が得られることがわかった。そこで平成10年度に実施したGPS測定結果のうち長時間の2周波数型受信機による測定を実施していた測定点No.9のデータの再解析を実施し，これら2点をレベル測量の基準点に変更し，標高値の再計算を実施した。

６．データベース登録

データベース登録を継続実施した。

Ⅲ－２ 坑内重力計

坑内重力計のモデル計算のため，最新の貯留層シミュレーションモデルを使用して柳津西山地域の坑井でのモデル計算を行った。計算の結果，蒸気生産領域中心部に位置する坑井では，還元領域に位置する坑井に比較して，1桁大きい重力変動値が得られた。

Ⅲ－３ 解析・評価

１．重力変動解析

（１）浅層地下水位変動

重力巡回測定と地下水位連続観測の結果を用いて浅層地下水位変動と重力変動との関係の解析を行った。これまでの解析によって，連続観測所の地下水位と重力の変動に相関

性が認められることを確認した。

(2) 不飽和帯密度変動

連続観測所近傍に設置したTDR土壌水分計での測定により、不飽和帯での土壌水分率の変化が十分な精度で把握できるとともに、降雨後の不飽和帯の土壌水分率変化と浅層地下水位の水位変動との関係を把握することができた。また、設置場所での不飽和帯の透水性が非常に高く、重力変動との相関性については浅層地下水位変動とあわせ検討する必要があることがわかった。

2. 精密重力測定法の検討

(1) 鉛直重力勾配補正の適用性評価

鉛直重力勾配値の地域的な変化の原因を特定するには至らなかったが、その変化は地域的に狭い範囲で比較的大きな測定値幅をもって分布することがわかった。しかし、現在使用している鉛直重力勾配値との違いに起因する誤差の大きさは、標高変動10cmに対し5 μgal を超える程度であり、標高変動が小さければ無視できる程度であることが確認された。

(2) 精密潮汐補正の適用性評価

これまでのデータを基に、柳津西山地域での精密潮汐補正モデルを構築した。このモデルにしたがって本調査で測定した全重力データの精密潮汐補正を行った。補正処理後の重力定期測定データに対する時系列変動解析の結果、1998年度の柳津西山地熱発電所の定期改修前後において、蒸気生産量の変化に対応した時間的・平面的な重力変動が捉えられていることを確認した。

(3) その他の要因による測定誤差の除去方法に関する検討

重力計の短期ドリフト、重力計感度の経時変化、振動等のランダムノイズ、気圧変動の4つの誤差要因について検討し、除去方法について考察した。

3. 貯留層ヒストリーマッチング・変動予測

昨年度構築した数値シミュレーションブロックモデルを用いて、 CO_2 を考慮した自然状態シミュレーションを実施した。自然状態シミュレーション結果は平衡地層温度及び貯留層圧力分布と概ね良いマッチングが得られた。また、この自然状態シミュレーションモデルを初期条件として、坑井ヒストリーマッチングを実施中である。坑井ヒストリーマッチングはまだ十分なマッチングができていないものの、モデルの妥当性を検討するために現段階でのベストモデルに基づき地上重力変動を試算し重力変動実測値と比較した結果、全般的傾向の特徴は概ね合っていることを確認した。

IV 今後の課題

IV 今後の課題

平成12年度以降は、重力測定ネットワークシステム構築や解析・評価法について、具体的に提案をすべき時期となるが、モニタリング手法としての技術レベルとコストとの比較検討を行い、より汎用性の高いものとするためへの提言も含めた形でまとめて行きたいと考えている。

IV-1 重力測定ネットワークシステム構築

1. 地下水位連続観測・重力連続測定

水位変動、特に季節的な水位変動に対する重力変動を検討するため、測定間隔を本年度より長く(1回/3週間程度)するものの、さらにデータの取得を継続する必要がある。

地下水位変動と重力変動との相関性評価を定量的に行うとともに、不飽和帯の密度変動と関連付けて評価する必要がある。

2. 重力測定

生産領域近傍に連続観測所を新設し、本年度捕捉した柳津西山地域の蒸気生産量変化と重力変動との相関性をより明らかにする必要がある。また、今後も年周期の重力変動を把握するために、最低1回/年の重力定期測定の継続が必要である。さらに、平成12年度に予定されている柳津西山発電所の定期修繕工事のタイミングを活用し、工事前後の蒸気生産量の変化に伴う重力変動の把握が望まれる。そのためには、生産領域を中心とした重力の集中測定の実施が必要である。

3. GPS及びレベル測量

柳津西山地域の標高変動を把握するため、1回/年の重力定期測定時にレベル測量を実施することが必要である。また、前述した重力の集中測定期間中の短期的な標高変動を把握するため、生産領域周辺でGPS測量を実施することが必要である。

4. データベース登録

他の調査結果、特に生産蒸気量等と有機的に解析するための基礎データとするために、平成12年度も引き続きデータベースへのデータ登録の継続が必要である。

IV-2 坑内重力計

坑内重力計現地試験については、実施個所選定の問題もあり平成12年度は見送ることとし、重力ポストプロセッサを導入した坑内重力計の適用性の検討を行うことが望ましい。

IV-3 解析・評価

1. 重力変動解析

重力変動に対する地下水位変動及び不飽和帯密度変動の影響の程度を把握し、重力変動から除去する必要性の有無及び、必要ある場合には適切な補正方法を検討する必要がある。

そのために平成12年度もTDR土壌水分計での測定を継続実施し、不飽和帯水分率の変動データ量を充実させる必要がある。

2. 精密重力測定法の検討

貯留層変動に伴う重力変動捕捉ためにノイズとなる要因を再確認し、その除去について除去の必要性の有無及び、必要ある場合には適切な補正方法を検討する必要がある。

3. 貯留層ヒストリーマッチング・変動予測

本年度実施した自然状態シミュレーション計算、地上重力変動計算等の結果から現行のシミュレーションモデルが概ね妥当であることが確認できたが、今後詳細なシミュレーション解析を行うために以下の課題がある。

1. シミュレーションブロックモデルの修正

(1) Voronoi分割化

「地熱探査技術等検証調査 貯留層変動探査法開発 テーマ5-1貯留層変動予測技術」で各種ポストプロセッサとTOUGH2用のインターフェースを開発中であるが、本年度成果の中でTOUGH2の非Voronoi分割のブロックモデルの場合、そのブロック境界における流束の値が不自然なものとなり、結果して自然電位計算値も不合理となる現象が確認された。現行のシミュレーションブロックモデルは、計算時間の短縮などの観点から一部非Voronoi分割のブロックを採用している。重力計算の場合、基本的に流束値は関与しないので問題無い可能性があるが、計算の整合性を取る観点からVoronoi分割となるよう現行のブロックモデルを一部修正することとしたい。

(2) 浅部レイヤーの細分化

これまで過去に実施された自然状態シミュレーションでは二相領域の発生はほとんど認められていないが、本年度のCO₂を考慮した自然状態シミュレーション結果においては浅部で二相領域が認められた。発電所運開以降の坑井生産・還元の影響により、浅部において二相領域の生成・拡大および減少の可能性があるが、これらは重力変動の主要因となり得る。現行ブロックモデルは主に貯留層深部の温度・圧力分布等の自然状態を模擬する観点から、深部レイヤー厚さは200m~300mと小さくしたが、浅部レイヤー厚さは300m~500mと大きくしている。二相領域の変化を精度良く模擬するためにはレイヤー厚さが大きい可能性があるため、現行ブロックモデルの浅部におけるレイヤー細分化を検討することとしたい（石戸1998）。

2. 坑井ヒストリーマッチングにおけるMINCモデルの適用

本年度の坑井ヒストリーマッチングでは、生産井の高いエンタルピーとのマッチングがまだ十分に得られていない。本地域の生産井の殆どが600~650kcal/kg程度の高いエンタルピー生産（ほとんど蒸気）であり、坑井近傍周辺はエクセスエンタルピーが発生している状態となっていると考えられる。現行のブロックモデルでは坑井近傍周辺の局所的な状況も比較的再現しやすくするために、各生産井のフィードゾーンに1つのブロックを割り当てるように細かなブロック分割としたが、本年度の坑井ヒストリーマッチング計算は岩石の孔隙（流体）とマトリックス間の温度・圧力が常に平衡状態にあるポラースモデルにより行っている。したがって、今後エクセスエンタルピーを充分再現するためには、フラ

クチャー部と岩石マトリックス部から構成され、フラクチャー部と岩石マトリックス部間の局所的な平衡状態を模擬できるMINCモデルの適用を図っていきたい。

今後は上記課題を検討し、自然状態の再現および坑井ヒストリーマッチングの両者を満足できるモデルが構築できた後に重力モニタリングデータとのマッチングへと進み、重力変動と地熱流体挙動の因果関係の検討を行うこととなる。なお、重力モニタリングデータとのマッチングの際には、「地熱探査技術等検証調査 貯留層変動探査法開発 テーマ5-1貯留層変動予測技術」で開発中の重力ポストプロセッサを導入する予定である。

V まとめ

V. まとめ

本年度の事業内容は、下記のとおりである（第V-1表参照）。

1. 重力測定ネットワークシステム構築

地下水位連続観測は、10坑井に水位計を設置し、24時間連続観測を実施した。この内の1地点（No.5）で、地下水位と共に重力の24時間連続測定を実施し、また大気圧・気温・雨量の連続観測を実施した。他の1地点（No.3）では坑内温度の連続観測を実施した。No.5地点を除く9地点では、重力の巡回測定を実施した。

重力定期測定では、138点の測定点で3回／年の定期測定を実施した。また同時に測点の標高をGPS測量とレベル測量を組み合わせ測定した。

重力測定を安定的に継続するため、重力計を新たに1台導入した。

今後は焦点を絞ったデータ取得を継続し、データ処理・検討・解析に重点を置いて重力変動マップを作成する必要がある。また、実用化を念頭に置いた、簡便な測定法・解析法についても検討をする必要がある。

2. 坑内重力計

既存の重力計算プログラムを改良して、坑内重力値のモデル計算を実施した。

今後は、貯留層モデルの改良を行い、重力ポストプロセッサを使用した坑内重力の試算を行う必要がある。また、坑内重力計の試験フィールド選定を含めた試験計画の検討が必要である。したがって、坑内重力計のフィールド実験は平成12年度以降に延期する。

3. 解析・評価

重力変動解析は、地下水位変動と重力変動の相関を検討し、また重力に対する不飽和帯密度変動の影響の検討・土壌水分飽和度の測定手法の選定を実施した。

精密重力測定法の検討は、鉛直重力勾配の測定を行い補正法の検討を実施した。また潮汐補正の適応性評価を実施し、柳津西山地域に適応できる潮汐モデルの開発等を実施した。

本年度は昨年度構築したシミュレーションブロックモデルを用いて、CO₂を考慮した自然状態シミュレーションを行い、実測値と概ね良いマッチング結果が得られた。

今後は、数 μ galオーダーの精密重力を測定するノイズ除去技術の標準化を進める必要がある。また、貯留層ヒストリーマッチングを実施し、変動予測技術の検討をする必要がある。

第V—1表 平成11年度 重力探査法開発のまとめ
Table V-1 Summary of Development of Gravity Monitoring(FY 1999)

開発項目	目 的	開 発 課 題	開 発 内 容	11 年 度 事 業 内 容	11 年 度 の 成 果	12 年度計画及び今後の課題
(1)重力測定ネットワークシステム構築	蒸気生産活動によって生じる重力の変化を捉えることにより、貯留層の広がりや将来の変動を的確に予測する技術を開発し、開発初期の貯留層評価、運転開始後の発電所の出力安定維持、さらに既開発地区周辺に存在する貯留層の抽出にも有効な探査技術確立する。	1)重力・地下水位連続測定	・柳津西山地域を試験フィールドとして標高変動、重力変動及び地下水位変動等のモニタリングデータを取得するとともにモデル地域（奥会津地熱地域）における重力変動・標高変動・地下水位・気象・土壌水分の計測方法を立案し、測定システムの構築を行う。 ・自動重力計及び GPS 等の最新の機器を用いたデータ取得を通じて最適なモニタリング手法の検討を行う。	・10 地点の地下水位観測点において重力連続測定と地下水位連続観測を実施する。 ・連続観測所で 24 時間の地下水位観測および重力測定を行う。その他の 9 地点の観測点で、地下水位は 24 時間連続観測、重力は 1 回/2 週程度の頻度で巡回測定を行う(定期測定期間を除く)。	・連続観測所において、地下水位・重力共に 24 時間連続観測を実施した。 ・その他の 9 観測点では、地下水位:24 時間連続観測、重力の巡回測定を 1 回/2 週の頻度で実施した。 ・連続観測所において大気圧・気温・降水量の連続観測を実施した。 ・連続観測所の地下水位と重力の変動に相関性が見られた。	・観測井内への水浸入対策等、設備の良好な維持・管理を継続する。 ・水位変動と重力変動の相関性を検討するため、測定間隔を今年度より長く(1 回/3 週間程度)するものの、さらにデータの取得を継続する。 ・地下水位と重力変化の相関性評価を定量的に行い、不飽和帯密度変化と関連付けて評価を行う必要がある。
		2)重力定期測定	・使用機器、観測範囲及び測定頻度に関して、貯留層変動を対象とした重力モニタリング手法の標準化を行う。	・重力計を追加増強する必要がある。 ・生産・還元による重力変動の状況を把握するため、138 点の測定点で、平成 ・9 年 11 月に引き続き 4 月、7 月及び 10 月の計 3 回の重力測定を実施する。	・重力計を 1 台追加増強した。 ・生産・還元による重力変動の状況を把握するため、4 月に第 1 回目、7 月に第 2 回目、10 月に第 3 回目の重力測定を実施した。 ・重力の定期観測において、蒸気生産量の変化に対応した重力変動が捉えられ、時間的・平面的な変化が観測された。	・重力計を有効活用することと蒸気生産量変化と重力値変動の相関性を明らかにするために、生産域近傍に連続観測所を新設する。 ・従来重力値の季節変動を調べるために実施していた定期測定は 1 回/年とし、コスト軽減のために 10 点程度の測定点の削減を実施する。 ・蒸気生産量が変化する定期修繕工事前後をターゲットに重力の集中観測を実施し、より短期の重力変動を面的に把握する。
		3)GPS 及びレベル測量		・標高測定を重力定期測定と同時に実施する。標高測定は、基本的にレベル測量により行い、連続観測所において GPS の連続測量を実施する。	・重力定期測定と同時に 3 回の測量を実施した。 ・GPS 測定結果の電子基準点を用いた基線解析で 5 日～1 週間程度の解析結果の平均を行えば、十分な精度で安定した楕円体高値が得られることがわかった。	・レベル測量は年 1 回の重力測定と同時期に実施する。集中観測期間中の測定点の標高はその前後の定期測定結果の補間により得る。但し、蒸気生産量の急激な変化に伴う標高の短期変動の有無をチェックするために、生産域周辺 8 箇所集中観測期間中に GPS 測量を実施する。
		4)データベース登録		・取得した重力変動データを Geobase に登録する。	・データベース登録作業中	・データベース登録の継続
(2)坑内重力計			・三次元的な重力分布の取得を目的として坑内重力計の導入を検討する。 ・地熱フィールドに適合する坑内重力計の仕様を検討する。 ・既存の石油探査用坑内重力計の改良もしくは新規機器開発についてその必要性を検討・評価する。	・柳津西山地域でのフィールド試験実施の可能性を検討する。 ・最新のシミュレーションモデルを使用し、生産ゾーン中心部の坑井での坑内重力計算を行う。	・坑内重力値のモデル計算のため、最新のシミュレーションモデルを使用して生産ゾーン中心部の坑井でのモデル計算を実施した。 ・実際に坑内重力計を降ろすことは蒸気生産を阻害するため実施不可能な生産井では、還元ゾーンと比べて 1 桁大きい重力変動値が得られた。	・重力ポストプロセッサを導入し、適用可能性調査については継続実施する。 ・坑内重力計現地試験については平成 12 年度は見送る。
(3)解析・評価		1)重力変動解析	・重力測定データに対する浅層地下水位変動、潮汐等の影響を評価し、補正方法の検証・標準化を行う。 ・重力ポストプロセッサの導入により、貯留層評価における重力ヒストリーマッチング手法を確立する。	a)浅層地下水位変動 ・重力測定結果に対する地下水位変動の影響を評価する。 ・地下水位変動の影響を除去する適切な補正方法を検討する。 b)不飽和帯密度変動 ・TDR 土壌水分計を連続観測所近傍に設置した。	a)重力連続測定結果・地下水位連続観測結果を用いて地下水位変動と重力変動との相関関係を解析中である。 b)連続観測所近傍に設置した TDR 土壌水分計で十分な測定ができることが確認された。また、設置場所での不飽和帯の透水性は非常に高いことがわかった。	a)地下水位変動の影響を重力変動から除去する適切な補正計算方法を検討する。 b)不飽和帯水分率の測定を継続し、季節変動を把握するとともに、地下水位変動と関連付けて、重力変動との相関性を明らかにする。
		2)精密重力測定法の検討		a)鉛直重力勾配補正 ・高さ 1m 程度の測定台を用いて効率的に重力勾配を測定することとし、測点を追加して、地域的な重力勾配の分布を調査する。 b)潮汐補正 ・汎用性の高い精密潮汐補正モデルを構築する。	a) 鉛直重力勾配補正の適用性評価 ・地域的に狭い範囲で比較的大きな測定値幅をもつことが観測された。現行使用している重力鉛直勾配との違いに起因する誤差の大きさは最大でも標高変動 10cm に対して 5μgal を超える程度であり、標高変動が小さければ無視できるレベルであることが確認された。 b) 潮汐補正の適用性評価 ・精密潮汐補正モデルが完成し、本調査で得られた測定データ全てについて解析を行った。	・潮汐補正・気圧変動補正以外の重力測定に伴う誤差要因とその除去方法について検討を行う
		3)貯留層ヒストリーマッチング・変動予測		・坑井ヒストリーマッチングに必要な生産・還元データ等を入手する。 ・CO2 を考慮した自然状態シミュレーションを行い、ヒストリーマッチングを実施する。	・坑井ヒストリーマッチングに必要な生産・還元データ等を入手し、検討した。 ・CO2 を考慮した自然状態シミュレーションで比較的良好なマッチング結果が得られた。 ・現在ヒストリーマッチングを実施中である。	・重力ポストプロセッサの導入により、貯留層評価における重力ヒストリーマッチング手法を確立する。 ・重力ポストプロセッサの導入により、重力変動のシミュレーションを実施し、重力変動と貯留層内流体挙動の因果関係に関する検討を開始する。

第V-2表 重力探査法開発のこれまでの成果と今後の計画

Table V-2 Results and Plans of Development of Gravity Monitoring

開発項目	開発課題	9年度事業の成果	10年度事業の成果	11年度事業の成果	12年度事業の計画	13年度事業の計画
(1) 重力測定ネットワークシステム構築	1) 地下水位観測井整備	・地下水位観測のための坑井(10地点)を掘削した。	・平成10年5月にNo.9及びNo.10観測点の別孔に水位計を設置し、運用を開始した。 ・かさ上げ等による観測井坑口水没対策を実施。	・観測井内への水浸入対策を再度チェックし、設備の良好な維持・管理を継続した。	・設備の良好な維持・管理を継続する。	・設備の良好な維持・管理を継続する。
	2) 地下水位連続観測・重力連続測定	・CG-3M型重力計(2台)導入、重力計較正と運用方法の決定を行った。 ・地下水位変動データの取得を開始した。 ・地下水位変動の原因である降水量等のデータ取得を開始した。 ・重力の連続測定を開始した。	・平成10年5月に連続観測所をNo.4地点からNo.5地点に移設した。 ・連続観測所に重力計1台を常設し、地下水位・重力共に24時間連続観測を実施した。 ・その他の9観測点では、地下水位:24時間連続観測, 重力:定期測定中を除いて1回/日の頻度で巡回測定を実施した。 連続観測所において大気圧・気温・降水量の連続観測を実施した。また、地下水位観測井No.3地点において坑内温度の連続測定を実施した。	・連続観測所において、地下水位・重力共に24時間連続観測を実施した。 ・その他の9観測点では、地下水位:24時間連続観測, 重力の巡回測定を1回/2週の頻度で実施した。 ・連続観測所において大気圧・気温・降水量の連続観測を実施した。 ・連続観測所の地下水位と重力の変動に相関性が見られた。	・連続観測所での地下水位・重力24時間連続観測を継続する。 ・その他の9観測点では、地下水位:24時間連続観測, 重力:定期測定中を除いて1回/2週間程度の頻度で巡回測定を継続する。 ・連続観測所を一箇所新設する。 ・連続観測所において大気圧・気温・降水量の連続観測を実施する。また、地下水位観測井No.3地点において坑内温度の連続測定を実施する。	・連続観測所での地下水位・重力24時間連続観測を継続する。 ・その他の9観測点では、地下水位:24時間連続観測, 重力:定期測定中を除いて1回/2週間程度の頻度で巡回測定を継続する。 ・連続観測所において大気圧・気温・降水量の連続観測を実施する。また、地下水位観測井No.3地点において坑内温度の連続測定を実施する。
	3) 重力定期測定	・重力の定期測定(秋季)を実施した。	・生産・還元による重力変動の状況を把握するため、4月に第1回目(136点)、7月に第2回目(138点)の重力測定を実施し、10月に第3回目(138点)の重力測定を実施した。	・重力計を1台追加増強した。 ・生産・還元による重力変動の状況を把握するため、4月に第1回目、7月に第2回目、10月に第3回目の重力測定を実施した。 ・重力の定期観測において、蒸気生産量の変化に対応した重力変動が捉えられ、時間的・平面的な変化が観測された。	・生産・還元による重力変動の状況を把握するため、定期測定を1回実施する。 ・定期修繕工事前後に集中観測を実施し生産・還元による重力変動をより詳細に把握する。	・生産・還元による重力変動の状況を把握するため、定期測定を1回実施する。 ・集中観測を実施し生産・還元による重力変動をより詳細に把握する。
	4) GPS及びレベル測量	・水準測量効率化のためのGPS測量導入、および導入に伴う観測仕様決定を行った。	・重力定期測定と同時に第1回目、第2回目の測量を実施し、10月に第3回目の測量を実施した。 ・GPS測量結果に有意な誤差があることが判明した。 ・据置型GPS測量装置を導入した。	・重力定期測定と同時に3回の測量を実施した。 ・GPS測定結果の電子基準点を用いた基線解析で5日～1週間程度の解析結果の平均を行えば、十分な精度で安定した楕円体高値が得られることがわかった。	・重力計算に必要な標高測定を重力定期測定と同時に実施する。 ・標高測定は基本的にレベル測量を行い、GPS測量で補完する。	・重力計算に必要な標高測定を重力定期測定と同時に実施する。 ・標高測定は基本的にレベル測量を行い、GPS測量で補完する。
(2) 坑内重力計		・利用可能な坑内重力計はEDCON社の物のみ。 ・EDCON社坑内重力計仕様: センサー外径5.25', 最大許容温度250°C, 最大許容深度2,000m, 最大許容傾斜角14°, 測定精度3 μ gal	・坑内重力値のモデル計算のため、既存の重力計算プログラムを改良して、モデル計算を実施した。 ・還元井(88N-19R)及びその他の坑井(86N-9T)を対象とした坑内重力計の現地試験計画を検討したが、生産ゾーン中心から離れた場所では、明瞭な重力変化が得られないことが判明した。	・坑内重力値のモデル計算のため、最新のシミュレーションモデルを使用して生産ゾーン中心部の坑井でのモデル計算を実施した。 ・実際に坑内重力計を降ろすことは不可能な柳津西山フィールドの生産井では、還元ゾーンと比べて1桁大きい重力変動値が得られた。	・重力ポットロケットを導入し、適用可能性調査については継続実施する。	—
(3) 解析・評価	1) 重力変動解析	・既往調査で用いられた重力測定技術は満足すべきものであるが、精度向上のためには改善の余地がある。	・重力測定結果に対する地下水位変動の影響評価及び補正方法の検討には至らなかったが、重力データに含まれる他要因によるノイズ除去の方法及び地下水位の連続測定結果についての検討を行った。 ・不飽和帯密度変動が重力測定値に5～8 μ gal以上の影響を与える可能性があることが分かった。 不飽和帯の水分飽和度の測定方法として、TDR法水分測定装置が適当であるとの結論を得た。	・重力連続測定結果・地下水位連続観測結果を用いて地下水位変動と重力変動との相関関係を解析中である。 ・連続観測所近傍に設置したTDR土壌水分計で十分な測定ができることが確認された。また、設置場所での不飽和帯の透水性は非常に高いことがわかった。 ・TDR土壌水分計測法により、不飽和帯における水分変動量を測定した。 ・鉛直重力勾配は地域的に狭い範囲で比較的大きな測定値幅をもつことが観測されたが、それは最大でも標高変動10cmに対して5 μ gal程度であり、標高変動が小さければ無視できるレベルであることが確認された。 ・精密潮汐補正モデルが完成し、本調査で得られた測定データ全てについて解析を行った。	・重力連続測定結果・地下水位連続観測結果を用いて地下水位変動と重力変動との相関関係を定量的に解析する。 ・地下水位変動の影響を重力変動から除去する適切な補正計算方法を検討する。 ・不飽和帯水分率の測定を継続し、季節変動を把握するとともに、地下水位変動と関連付けて、重力変動との相関性を明らかにする。 ・潮汐・鉛直重力勾配・地下水位以外の測定誤差要因について検討を行い、その補正方法について検討を行う。	・地下水位変化、不飽和帯水分変動量、鉛直重力勾配による重力測定値への補正方法の標準化を検討する。 ・精密重力測定法の標準化を検討する。
	2) 精密重力測定法の検討	・近接重力測定点間での大きな重力変動の原因究明には更なる調査が必要である。	・鉛直重力勾配補正の摘要性評価について、発電所建屋内及び周辺地域内の数カ所で、重力勾配測定用やぐらを用い、測定高さを変えた重力測定を実施した。その結果、重力勾配の高さ方向の変化は認められないが、地域的(水平的)な重力勾配の違いが認められた。 ・潮汐補正適用性評価について、連続観測所で取得した24時間連続の重力変動データを基に解析した。	・坑井ヒストリーマッチングに必要な生産・還元データ等を入力し、検討した。 ・CO2を考慮した自然状態シミュレーションで比較的良好なマッチング結果が得られた。 ・ヒストリーマッチングも比較的良好なマッチング結果が得られた。	・重力ポットロケットを導入し、貯留層評価の重力ヒストリーマッチング手法を確立する。 ・重力ポットロケットの導入により、重力変動のシミュレーションを実施し、重力変動と貯留層内流体挙動の因果関係に関する検討を開始する。	・将来の生産・還元状況を想定して、貯留層変動予測の検討を行う。 ・重力モニタリングデータに基づく貯留層変動予測手法の標準化の検討を行う。
	3) 貯留層ヒストリーマッチング・変動予測	・柳津西山地区での既存データの収集整理と貯留層ヒストリーマッチング・変動予測のためのデータベース構築を行った。	・解析に必要な地質データ、生産・還元データ、坑井試験データ等を入力し、検討した。 ・既に入手しているデータの整理・検討結果を踏まえて、数値モデルを設定し、自然状態シミュレーションを実施中した。			

参考文献

<参考文献>

- Ager, C.A., Liard, J.O. 1982. Vertical gravity gradient surveys: field results and interpretations in British Columbia, Canada. *Geophysics* 47: 919-925
- Berrino, G. 1995. Absolute gravimetry and gradiometry on active volcanoes of southern Italy. *Bollettino di Geofisica ed Applicata* 37: 131-144.
- Berrino, G., Riccardi, K., d'Errico, V., La Rocca, A., Malaspina, S., 1998. Gravity measurements at Vulcano. *Acta Vulcanologica* 10: 130-133.
- Carbone, D. and Rymer, H.(1999) : Calibration shifts in a LaCoste-and-Ronberg gravimeter: comparison with a Scintrex CG-3M, *Geophysical Prospecting*, 47, 73-83.
- Fajklewicz, Z.J. 1976. Gravity vertical gradient measurements for the detection of small geological and anthropogenic forms. *Geophysics* 41: 1016-1030
- Ishiguro, M., Akaike, H. Ooe, M., and Nakai, S. , 1981 : A Bayesian approach to the analysis of earth tides, *Proc. 9th International Symposium on Earth Tides*, New York, 283-292.
- Janle, P., Makris, J., Menzel, H. 1971. Experimental investigations of the vertical gradient of gravity. *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata* 12: 51-52.
- 国土地理院 測地部 (1997) : 新しい日本重力基準網の構築, 国土地理院時報, 87, 13-20.
- Kumagai, N., Abe, E., Yoshimura, Y. 1960. Measurement of vertical gradient of gravity and its significance. *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata* 2: 607-630
- Longman, I., M., 1959 : Formulas for computing the tidal accelerations due to the Moon and the Sun, *J. Geophys. Res.*, 64, 2351-2356.
- 中井 新二・志知 龍一・中村 佳重郎, 1998 : シントレクス重力計の過渡特性, 日本測地学会第90回講演会要旨, 77-78.
- 西島 潤・藤光康宏・江原幸雄 (1998) : 地熱開発地域における重力変動観測による地熱貯留層モニタリング (その2) , 日本地熱学会平成10年度学術講演会予稿集.
- Okabe, M., 1979. : Analytical expressions for gravity anomalies due to homogeneous polyhedral bodies and translations into magnetic anomalies, *Geophysics*, vol.44, No.4; 730-741.
- Roder, R.H., Wenzel, H.G. 1986. Relative gravity observations at BIPM, Sèvres in 1985 and 1986. Bureau Gravimetric International. *Bulletin de Information* 59: 177-183.
- 杉原光彦 (2000) : 重力鉛直勾配について, 地質調査所速報, no.GT/00/1, 121-125
- 杉原光彦・野崎京三 (1998) : シントレクス重力計CG-3Mの検定, 物理探査学会第98回学術講演会講演論文集, 333-337.
- Tamura, Y., Sato, H., Ooe, M., and Ishiguro, M., (1991) : A procedure for tidal analysis with a Bayesian Information Criterion, *Geophys. J. Int.*, 104, 507-

- Thyssen-Bornemisza, S. 1958. Vertical gradient of gravity. *Geophysics* 23: 359-360.
- Thyssen-Bornemisza, S., Groten, E., Bazhaw, W.O. 1972. Correction of accurate gravity surveys by carefully observed vertical gradients of gravity. *Geophysical Prospecting* 20: 17-27.
- Thyssen-Bornemisza, S., Stackler, W.F. 1956. Observations of the vertical gradient of gravity in the field. *Geophysics* 21: 771-779.
- Tobita, M. (1994) : Development of coordinate transformation program TKY2WGS, Technical Memorandum of Geographical Survey Institute, B.1-No.23, 8-18.
- 飛田 幹男, 1994 : 地域毎に求めた東京測地系-WGS84系間の変換パラメータ, 国土地理院時報 No.79, 7-14.
- 飛田幹男 (1997) : 地球基準座標系間の座標変換, 地球惑星科学関連学会1997年合同大会講演予稿集, 296.
- 都筑三千夫・山本宏章 (1993) : SCINTREX社重力計CG3の特性について, 国土地理院時報, 77, 14-18.

卷末資料 A：用語説明

巻末資料A：用語説明

重力計

地球上の重力を測定する装置。本研究では、対象とする重力変化がマイクロガルオーダー(100万分の1ガル)の微細なものであり、使用する重力計も精密なものを使用する。

土壌水分計

地表近くの土壌中の水分率(体積含有率)を測定する装置。平成10年度の検討で、降雨による土壌水分の変化が、重力測定値に影響を与える可能性が指摘された。

重力測定ネットワークシステム

重力測定によって貯留層変動を精度よく捉えるためには、重力測定と共に、標高変動補正、精密潮汐補正等、各種の精緻なデータ処理が必要となる。これらの必要性を吟味し、効率的に組み合わせることによって、上述の目的に促した測定手法のネットワークを体系化するものである。

坑内重力計

通常の重力測定は、地表で2次元(平面的)に実施されることが多いが、坑井を利用して3次元(鉛直方向)に測定することで、地下深部の貯留層変動を効率的に捉える可能性がある。このような坑井内で重力を測定する装置である。

GPS

Global Positioning System：測地衛星を利用した測位システム。複数の衛星からの距離を測定することで、測点の位置(緯度、経度、標高)を効率良く測定することができる。

データベース

貯留層ヒストリーマッチング、変動予測にとって重要となる各種のデータ(坑井位置、坑跡、地質データ、検層データ、重力測定値、生産還元データ、地熱流体の化学分析データ等)を、容易に扱えるように体系化したデータセット。

地下水位

降雨等によって地下にしみ込んだ水は、地表近くの地下浅部を浸透している。その地下水の頂部の深度のこと。この水位の変化が地下水量の変化を表すと考えられ、この変化が重力測定値に影響を与えるものと考えられる。

不飽和帯

地下水位(上述)よりも浅い部分の土壌中で、部分的に水を含んだ状態のゾーンのこと。

不飽和帯密度変動調査

地下水位変動による重力への影響と共に、不飽和帯(上述)中の水分変化による重力への影

響の可能性も指摘されており、この可能性を検証して、必要であればその補正方法を検討する調査。

重力解析

重力測定値の各種補正のうち、地下水位変動による重力への影響の程度を検討するため、地下水位観測値から理論的に得られる重力影響値をシミュレーションする。

シミュレーション

本研究におけるシミュレーションは、貯留層の生産還元データ等から、貯留層モデルを用いて地表で観測される重力変化を理論的に計算し、実測の重力測定値と比較検討するものである。貯留層モデルを様々に変更してこの比較検討を繰返し、試行錯誤的に現実を最も良くあらわすモデルを求める。

坑内重力計調査

柳津西山地域の貯留層の実態に合わせて、既存の坑内重力計を使用した坑内重力調査をどの坑井で実施するのが最も効果的であるかを、モデル計算によって検討する。

TDR法土壌水分センサー

Time Domain Reflectometry:時間領域反射を利用した土壌水分計は、土壌の比誘電率と水分量との間に経験関数が成り立つことを利用して土壌の体積水分率を測定する装置である。

データロガー

センサーから時々刻々出力されるデータを、自動的に適当な時間間隔でサンプリングし、保存する装置。

レベル測量

重力測定値の補正のうち、標高変化による補正を行うため、重力点の標高値を測定する測量。

BAYTAP-G

統計数理研究所と緯度観測所（現国立天文台・水沢）が共同開発した潮汐解析プログラム。本プログラムでは、精密な潮汐定数の決定のほかに、ドリフトの決定、気圧データなどの並行観測データの応答計算、欠測値の補間や跳びの量の推定、異常値の検出などができる。本プログラムは地球潮汐データの解析をはじめ、地殻変動連続観測データの解析にも広く使われている。BAYTAP-GとはBaysian Tidal Analysis Program - Grouping Modelの略。

以 上

卷末資料 B：平成 11 年度 取得資産一覧表

巻末資料 B :

平成 11 年度 取得資産一覧表

名 称	型 式	数量	仕 様	備 考
重力計	Scintrex 社 CG-3M	1	・ 寸法：240mmW×310mmD×320mmH ・ 重量：11.4kg ・ 測定精度：5μgal	・ 付属品：専用台，充電器，キャリングケース他
土壌水分計	キャンベル社 CR10X CS615-L100 (7 本)	1	・ データロガー：CR10X (1 台) ・ 12V 電源：PS12LA (1 台) ・ 12V 電源：PS12LA (1 台) ・ RS232C インターフェース：SC32A (1 台) ・ RS232 通信ケーブル：7026 (1 式) ・ プローブ：CS615-L100 (7 本) ・ システムソフトウェア：PC208W (1 式)	連続観測所に設置

卷末資料 C：外注報告書一覽表

巻末資料 C :

外注報告書一覧表

名 称	外 注 先
① 土壤水分計設置工事 報告書	三井金属資源開発(株)
② 平成 11 年度 地下水位・重力測定 報告書	三井金属資源開発(株)
③ 鉛直重力勾配調査 報告書	地熱技術開発(株)
④ データベース登録 報告書	地熱技術開発(株)
⑤ 坑内重力計調査 報告書	三井金属資源開発(株)
⑥ 重力解析計算 報告書	三井金属資源開発(株)
⑦ Gravity changes associated with mass changes in the Vadose Zone: Results of measurements at Yanaizu-Nishiyama, 1999	Institute of Geological & Nuclear Sciences
⑧ 柳津西山地域におけるデータ編集・シミュレーション計算作業 報告書	東北緑化環境保全(株)