



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	えりも計画 : 絶対重力・精密重力・GPS連続観測
Author(s)	平, 貴昭; TAIRA, Taka'aki; 小山, 順二 他
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 65, 311-323
Issue Date	2002-03-25
DOI	https://doi.org/10.14943/gbhu.65.311
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/14319
Type	departmental bulletin paper
File Information	65_p311-323.pdf



えりも計画：絶対重力・精密重力・GPS 連続観測

平 貴昭・小山 順二・本多 亮

北海道大学理学研究科地球惑星科学専攻

前川 徳光・大島 弘光・高田 真秀

北海道大学大学院理学研究科附属地震火山研究観測センター

(2002年1月20日受理)

Erimo Project: Absolute/Precise Gravity Survey and Continuous GPS Measurement

Taka'aki TAIRA, Junji KOYAMA, Ryou HONDA

Division of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Hokkaido University

Tokumitsu MAEKAWA, Hiromitsu OSHIMA and Masamitsu TAKADA

Institute of Seismology and Volcanology, Graduate School of Science, Hokkaido University

(Received January 20, 2002)

We have conducted absolute/precise gravity and continuous GPS surveys in the vicinity of Erimo Peninsula, Hokkaido. High-speed sampling GPS observations have been made since 1998 at the Kazenoyakata located at the point of Erimo Peninsula and at the Tide-gauge station, Port of Erimo. The precise gravity measurements were made since 2000 at twelve sites, where two of our continuous GPS stations, two GEONET stations and eight temporal sites on triangulation points, Geographical Survey Institute of Japan. The absolute gravity measurement has been done on September 2001, at Erimo Geophysical Observatory, Hokkaido University. Our continuous and parallel measurement of gravity and crustal deformation by GPS would provide the insight into the dynamic tectonic activity in this area.

I. はじめに

北海道えりも地域は、千島弧が東北日本弧に衝突している島弧—島弧衝突帯として位置づけられ、以前よりこの地域では地球物理学的手法により構造の推定が行われてきた（爆破地震動研究グループ，1986；山本・森谷，1989，高橋・他，1996）。この地域はさらに太平洋プレートの沈み込みの上に位置しているので、島弧地殻の変形や大陸地殻の成長を考える上で極めて重要である。衝突帯周辺の構造は複雑であり、複雑な地震活動が多岐にわたり発生している（森谷・他，1997）。

その構造の詳細を明らかにするためには多面的な観測が必要不可欠である。重力変化からは地球内部の物質の移動をとらえることが可能であるが、比高変化の影響を大きく受けるのでそれらの影響を除去する必要がある。同一点でGPS観測を行うことにより、地殻変動の上下動成分を独立に計測し、重力値を補正する。このような重力、GPS並列観測からはダイナミックな地殻変動の検出が期待される。そこで我々はえりも計画として、北海道えりも周辺に重力、GPS観測網を構築した。繰り返し観測を行うことにより、重力・GPS観測の実際の観測精度を見積もり、より詳細な地殻変動の検出を目指している。観測データの処理・解析は現在も進められているが、本論では観測計画の基幹となす新しく構築した絶対重力・精密重力・GPS連続観測の概要について報告する。

II. 観 測

1. 絶対重力測定

従来の重力測定では相対重力計のみが用いられ、絶対重力値不動と仮定されたある基準点での値からのずれの量だけが測定されていた。これには相対重力計のドリフトや温度、気圧等による変化分の補正を詳しく考えることが必要で、細心の計測が要求される。特異なテクニクスで形成されているえりも周辺では基準点をどこにとるか、またその絶対重力値が一定である保証はなく、基準点の絶対重力も精密に測定する必要がある。そこで我々は、えりも周辺のプレート運動に伴って生じている重力場の時空変動を高精度かつ絶対値で追跡し、重力変化を定量的に評価するためにMicro-g solutions社の「絶対重力計」FG 5-L (Niebauer et al., 1995)を用いた絶対重力測定を行った。測定は人工的ノイズの影響を考慮し、北海道大学えりも地殻変動観測所壕内(ERM 1)に設置した。この絶対重力計は新しく開発された測器で(Micro-g Solutions, 2000)、可搬型である。計測原理は重りを真空槽内で7 cm自由落下させ、レーザー干渉計で重りの運動の軌跡を追いかけるものである。時計にはルビジウム原子時計を用いている。内在する加速度地震計で地面、測器の振動を補正している。この絶対重力計の測定精度は $\sim 10 \mu\text{gal}$ であると言われている。この上位機種であるFG 5型絶対重力計では $1 \sim 2 \mu\text{gal}$ (Okubo et al., 1997)であるから充分高精度である。

本来は2000年10月の観測から精密重力、GPS観測と同時期に絶対重力観測を行う予定であったが、有珠山噴火や三宅島噴火の影響で実施することができなかった。精密重力測定と並行して測定を行えたのは2001年9月の1回だけである。この期間の測定では、ERM 1と接続測定を行い全ての測定点において絶対重力値を求めた。

測定は1セッションで100回重力値を計測しその平均値を各セッションの重力値とし、この作業を20回繰り返した。Fig. 1にセッションの測定例を示す。えりも観測所壕内は人工的なノイズが小さく、多くの測定値が $\pm 100 \mu\text{gal}$ の範囲である。したがって1セッション100回の測定からERM 1の測定精度は $10 \mu\text{gal}$ 程度であることが見てとれる。20回全セッションの平均値をERM 1の絶対重力値とした(Fig. 2)。各セッションの値は $\pm 20 \mu\text{gal}$ の範囲にばらついているの

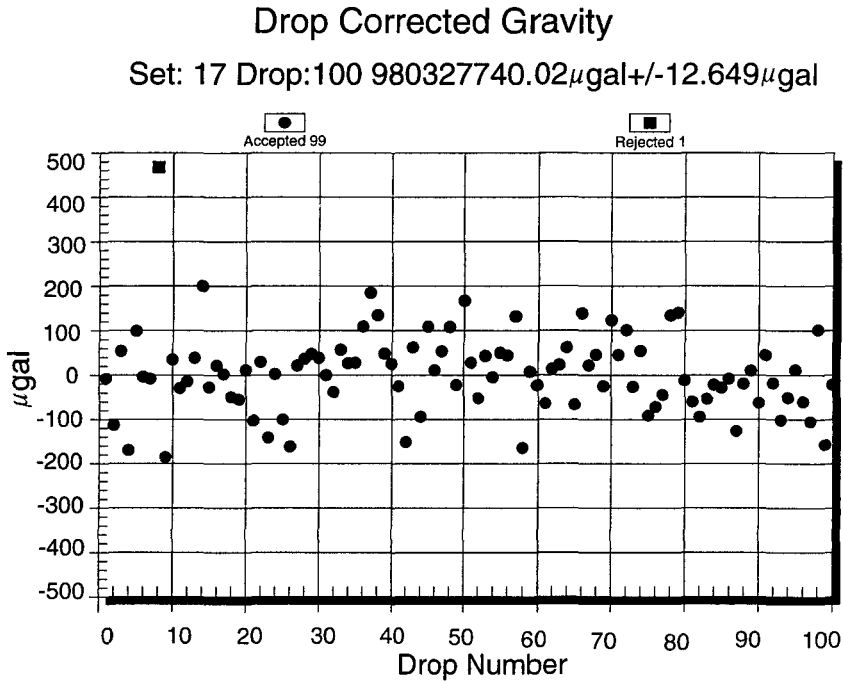


Fig. 1. Absolute gravity measurement of session (# 17) at ERM1 on September 19, 2001. Difference in absolute gravity values is plotted with accept to the average on the top.

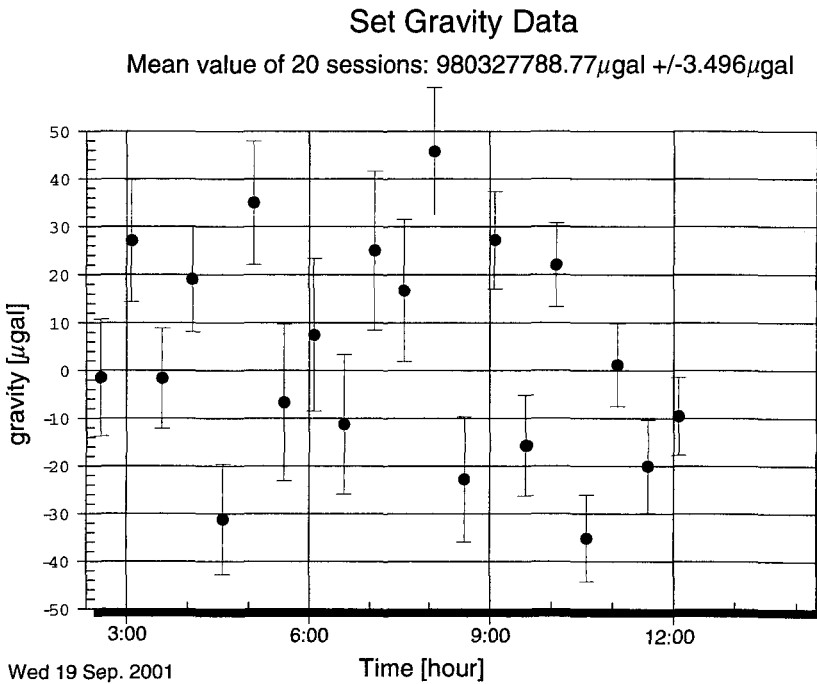


Fig. 2. Absolute gravity of ERM1 by FG5-L.

で、20回のセッション値を用いれば、精度は個々のセッションよりさらに向上し、数 μgal である。ERM1は海に近いので精密な海洋潮汐補正の必要性が指摘されるが(Matsumoto et al., 2001)、今回は Micro-g solutions の地球潮汐、海洋荷重補正を用いて測定の平均値 $980327788.77\mu\text{gal} \pm 3.50$ を絶対重力値とした。今後海洋荷重補正のプログラムを局所的にチューニングすればより精度の高い値になるだろう。数 μgal の重力変動は高さ変化にして1 cm程度である。絶対重力の連続観測を1日程度続けることで、1 cm程度の変動を原理的に検出できることが確かめられた。

2. 精密重力測定

測定には LaCoste Romberg G 31 および G 375 重力計を使用し、2000年10月、2001年5月と9月の3回行った。Fig. 3に測定点を示す。測定点は、国土地理院の水準点、三角点およびGPS電子基準点から空間的な配置を考慮してえりも周辺に13点選んだ(2001年12月現在)。測定はすべて往復測定である。補正計算は地球潮汐補正、器高補正、ドリフト補正を行った。重力測定には、可能な限り気象条件の良い日を選び、重力計の傾斜ならびに感度の検定・調整を実施し重力計の扱いには細心の注意を払った。測定点の重力値は北海道大学えりも地殻変動観測所の観測壕

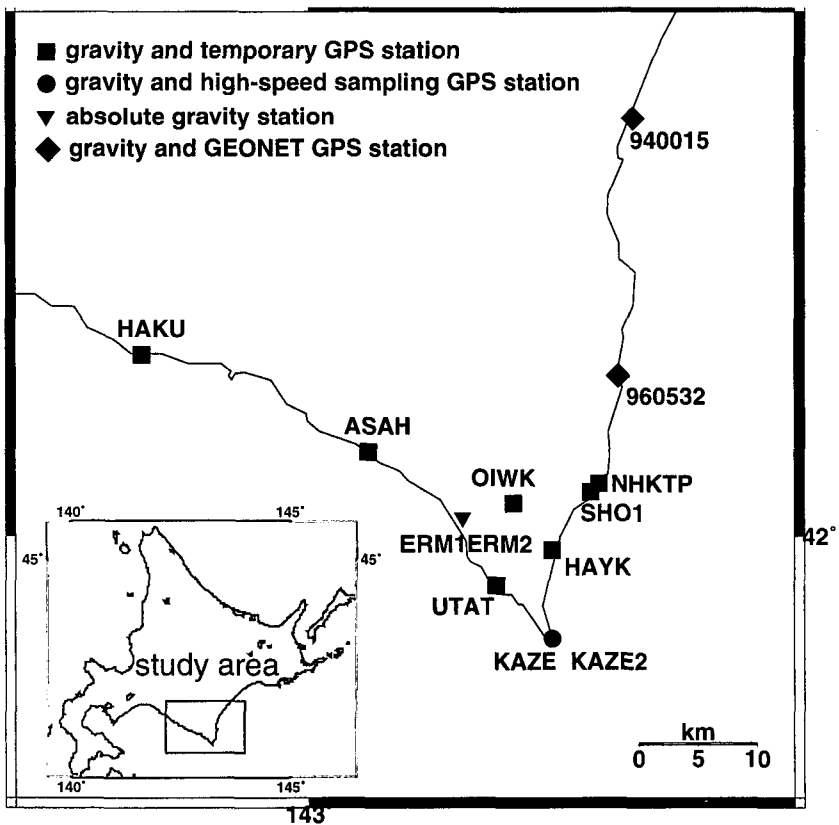


Fig. 3. Location map of gravity and GPS stations in the vicinity of Erimo.

(ERM 1) を仮不動点として算出した。計算では、重力計ごとに求められる路線基点に対する測定点の重力差を路線の交点で調整し、ERM 1 に対する重力値に引きなおし、これらを平均して各観測点の重力値とした。Table 1 にその結果を示す。Fig. 4 には、各測定点における重力計ごとに得られた重力差の平均値からの偏差を示した。Fig. 4(a) の 2000 年 10 月の測定では偏差は UTAT, 940015 の $40\mu\text{gal}$ を最大に、多くは $20\mu\text{gal}$ に収まった。特に偏差の大きい計測を除くと、閉合差や偏差からみて全体の測定精度は $\pm 10\mu\text{gal}$ 程度と見積もられる。Fig. 4(b) の 2001 年 5 月の測定においても UTAT 観測点で偏差が $100\mu\text{gal}$ と大きい。全体の偏差は、ほとんどは $30\mu\text{gal}$ に収まった。また Fig. 4(c) の 2001 年 9 月の観測では、ほとんどの観測点で偏差が $20\mu\text{gal}$ より大きく 3 回の繰り返し測定で一番精度が悪い。UTAT での大きい偏差は強風や潮汐による影響と思われる。

Table 1. Gravity difference in mgal referred to ERM1.

Site	Latitude N	Longitude E	Height(m)	Oct. 2000			May 2001			Sep. 2001		
				G 375	G 31	Mean	G 375	G 31	Mean	G 375	G 31	Mean
ERM 1	42 00 05	143 09 27	35.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ERM 2	42 00 05	143 09 27	40.0	1.172	1.152	1.162	1.133	1.126	1.130	1.497	1.500	1.499
ASAH	42 08 20	142 49 45	4.7	17.507	17.484	17.496	17.457	17.451	17.454	18.011	18.054	18.033
HAKU	42 03 53	143 03 40	24.7	6.406	6.379	6.393	6.382	6.367	6.375	5.395	5.464	5.430
UTAT	41 57 44	143 11 34	10.0	2.025	1.954	1.990	2.148	2.326	2.237	2.812	2.831	2.822
KAZE	41 55 18	143 15 05	20.0	-8.241	-8.251	-8.246	-	-9.448	-9.448	-8.899	-8.937	-8.918
HAYK	41 59 22	143 15 03	8.0	8.253	8.227	8.240	9.193	9.243	9.218	8.511	8.474	8.493
SHO 1	42 02 01	143 17 27	27.4	17.428	17.417	17.423	17.435	17.432	17.434	17.765	17.764	17.765
NO 960532	42 07 22	143 19 10	5.0	44.950	44.881	44.916	44.938	44.978	44.958	45.450	45.390	45.420
NO 940015	42 19 08	143 20 05	20.0	56.652	56.625	56.639	56.642	56.684	56.663	55.677	55.620	55.649
OIWK	42 01 30	143 13 50	160.0	-	-	-	-14.125	-14.079	-14.102	-13.871	-13.844	-13.858
KAZE 2	41 55 18	143 15 05	15.0	-	-	-	-6.176	-6.158	-6.167	-7.159	-7.187	-7.173
NHKTP	42 02 30	143 17 45	35.0	-	-	-	-	-	-	19.643	19.643	19.643

3. 重力変化

Fig. 5 に (a) 2000 年 10 月-2001 年 5 月, (b) 2001 年 5 月-2001 年 9 月, (c) 2000 年 10 月-2001 年 9 月の各測定点の重力変化を示した。Fig. 5(a) では全体的に重力変化量は小さく、 $45\mu\text{gal}$ を超えたのは UTAT, KAZE, SHO 1 である。この 3 点を除いた重力変化の分布を Fig. 6 に示す。重力変化パターンは測定精度を考慮すると有意な変化とは言い難いが、重力変化の全体的な傾向は日高西部に重力の増加域が広く分布し、えりも岬を境にして東側では減少域となる様相を示している。現段階では重力が強く支配される比高変化の補正を行っていないため量的な議論は今後の課題としたい。Fig. 5(b), (c) の重力変化量はほとんどの観測点で $100\mu\text{gal}$ を超えている。これは、地球内部の変動によるものではなく、上で示した 2001 年 9 月の測定精度の悪さによるものと考えられる。

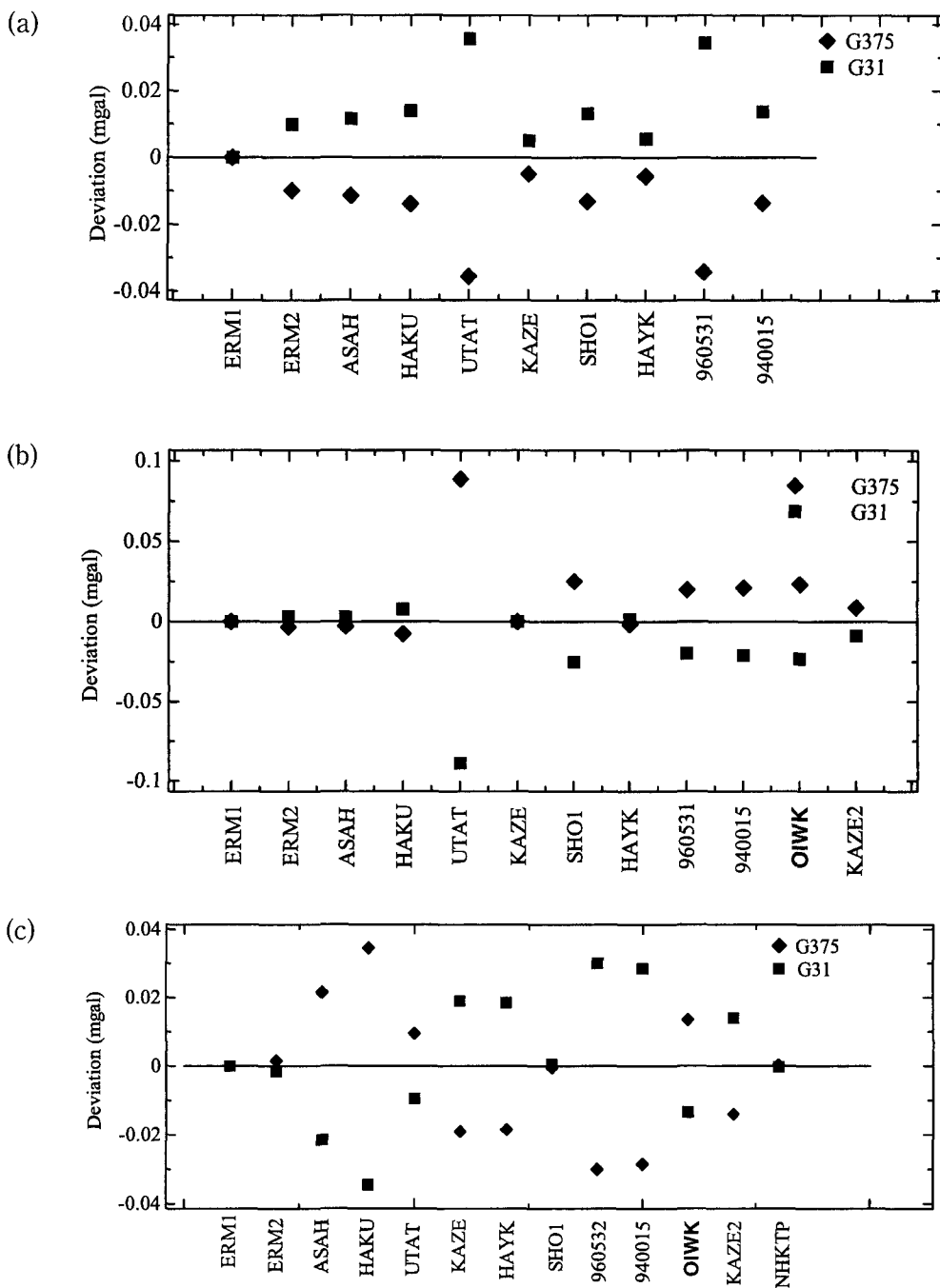


Fig. 4. Deviation of gravity values obtained by each gravimeter (G31, G375) from the mean value in (a) Oct. 2000, (b) May 2001 and (c) Sep. 2001. Observation sites are in Fig. 3.

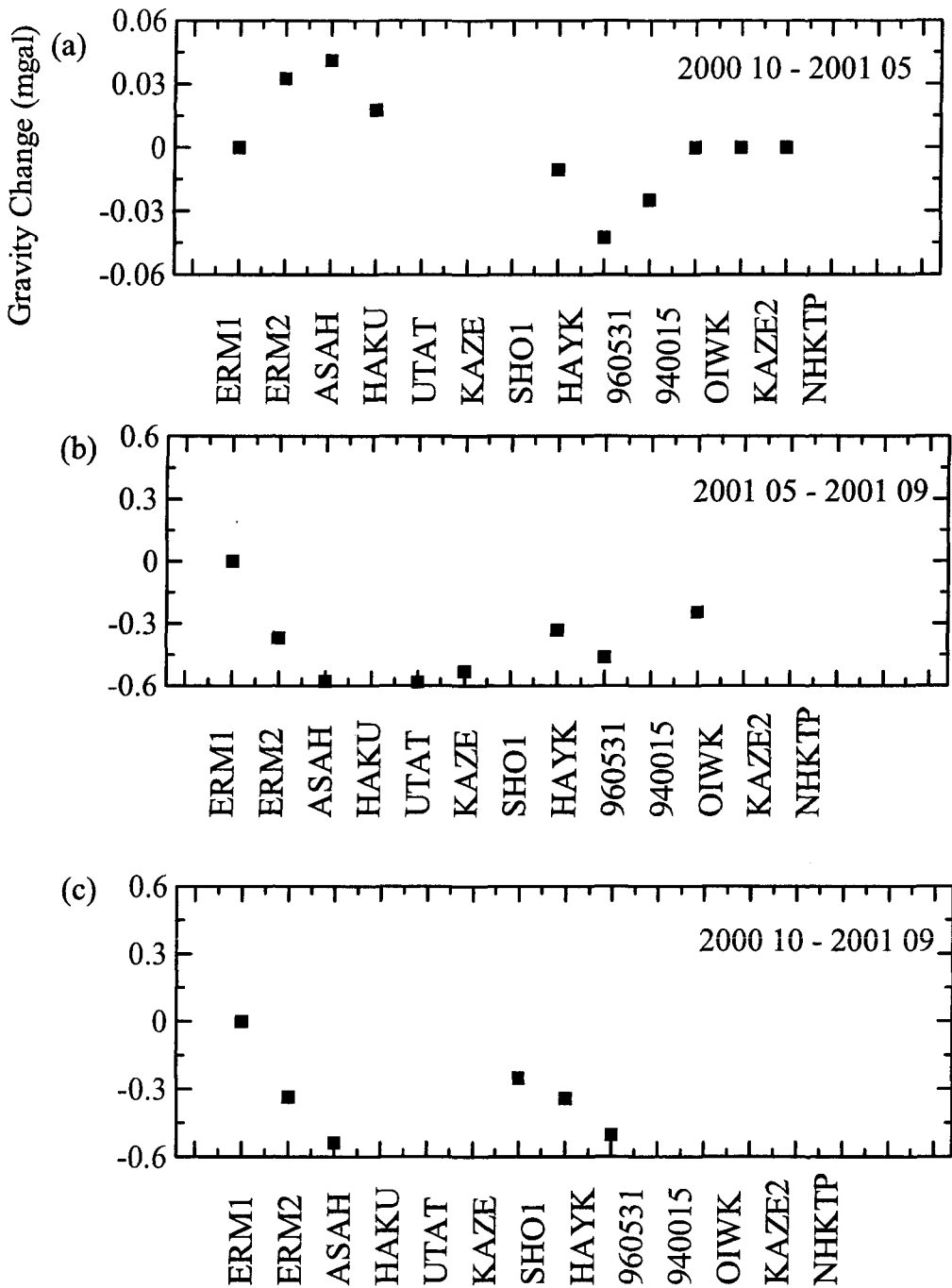


Fig. 5. Gravity changes during the period of (a) Oct. 2000 to May 2001, (b) May 2001 to Sep. 2001 and (c) Oct. 2000 to Sep. 2001.

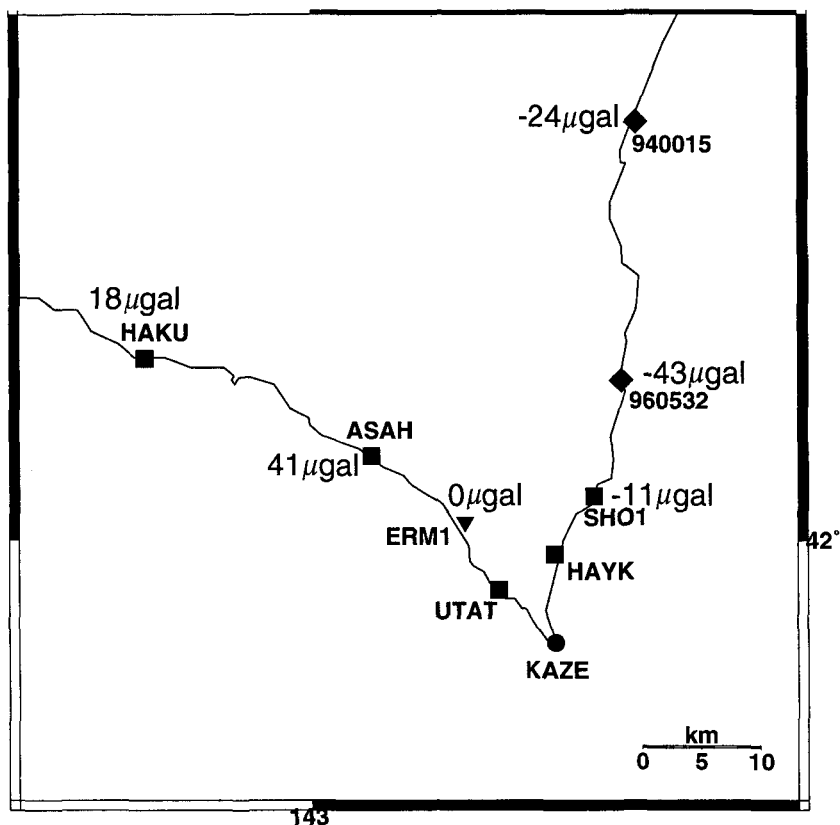


Fig. 6. Spatial distribution of the gravity changes during the period of Oct. 2000 to May 2001.

4. GPS 連続観測

えりも周辺において、我々は独自に1998年から高速GPS連続観測を行っている(金曾・他, 2001)。本計画ではそれら定常観測に加えて重力の各測定点でGPS臨時観測を行った。その際使用した受信機は2周波対応のAstech Z-XIIである。サンプリング間隔は30秒間とした。また観測時間は各点で12ないし24時間とした。解析には、Bernese GPS Software Version 4.0 (Rothacher and Mervert, 1996) と IGS (International GPS Service for Geodynamics) 精密暦を使用した。観測点座標は以下の手順で求めた。最初に、観測網の座標を求める際の固定点として、我々が1998年に設置した苫小牧に設置してある高速GPS連続観測点(以下TOMA)を選択した。この観測点は、えりも周辺の局所的な地殻変動の影響を受けないと考えた。キャンペーンを中心とした3日間においてそれぞれ1日ごとのTOMAの座標を、IGSのTsukuba観測点からGPSが準拠している座標系であるITRF 96 (International Terrestrial Reference Frame) で結合し、3日間の平均値をTOMAの座標値とする。TOMAの座標をキャンペーンごとに固定して各観測

Table 2. Differences in cm of site coordinates by GPS during three campaigns.

Site	component	Campaign				
		Oct. 2000	Difference	May 2001	Difference Sep. 2001	
HAKU	N-S(cm)	0	0.88	0.88	0.52	1.4
	E-W(cm)	0	-0.46	-0.46	-0.4	-0.86
	U-D(cm)	0	-2.11	-2.11	5.41	3.3
ASAH	N-S(cm)	0	0.68	0.68	0.85	1.53
	E-W(cm)	0	-0.44	-0.44	-0.26	-0.7
	U-D(cm)	0	-2.44	-2.44	6.94	4.5
UTAT	N-S(cm)	0	1.5	1.5	0.97	2.47
	E-W(cm)	0	-0.24	-0.24	-1.65	-1.89
	U-D(cm)	0	-4.28	-4.28	-6.6	-10.88
KAZE	N-S(cm)	0	2.44	2.44	1.04	3.48
	E-W(cm)	0	-1.24	-1.24	-1.67	-2.91
	U-D(cm)	0	0.21	0.21	-3.43	-3.22
HAYK	N-S(cm)	0	1.29	1.29	2.47	3.76
	E-W(cm)	0	-1.98	-1.98	-0.46	-2.44
	U-D(cm)	0	4.22	4.22	-2.85	1.37
SHO 1	N-S(cm)	0	1.11	1.11	1.34	2.45
	E-W(cm)	0	-0.59	-0.59	-1.04	-1.63
	U-D(cm)	0	3.22	3.22	-1.93	1.29
960532	N-S(cm)	0	1.94	1.94	1.28	3.22
	E-W(cm)	0	-0.51	-0.51	-0.82	-1.33
	U-D(cm)	0	1.23	1.23	1.1	2.33
940015	N-S(cm)	0	1.61	1.61	1.5	3.11
	E-W(cm)	0	-0.71	-0.71	-0.68	-1.39
	U-D(cm)	0	1.01	1.01	1.1	2.11
OIWK	N-S(cm)	-	-	0	1.11	1.11
	E-W(cm)	-	-	0	0.22	0.22
	U-D(cm)	-	-	0	3.37	3.37

点の座標を推定した。以上のようにキャンペーンごとに各観測点の座標を求め、その座標値変化を地殻変動量とした。各キャンペーンで求められた座標値は、水平成分では rms が 8 mm 以内に収まっており変動量の議論は可能であるが、上下成分については rms が 2 cm となっており注意が必要である。Table 2 に各キャンペーン間の変化量の差を示す。すべての観測点において 1.5–2.0 cm/yr の北西向きの変動を捉えることができた。キャンペーン間の地殻変動量は水平成分では 3 cm 以下、垂直成分でも 5 cm 程度である。

5. 高速サンプリング GPS 観測

GPS 観測データは、従来の地震計のように振り子による地動計測ではないので変位量の制限がなく、長周期での特性は無限に伸びている。このような 1 秒サンプリングの高速 GPS 観測では他の変動観測器機にはない超広帯域の地殻変動・地震動観測が原理的には可能である。我々はこのような高速サンプリング GPS 観測をえりも周辺の 2 点の他、帯広畜産大学内 (OBHR) と北海道

大学苫小牧研究林 (TOMA) で実施している。えりも周辺に展開した高速 GPS 観測網では、浦河沖でマグニチュードが 5.9 以上の地震がおきれば地震動を検出することが期待される (金曾・他, 2001)。我々が 1998 年からの高速サンプリング GPS 観測期間中に最大震度の地震 (Mw 6.4) が 2001 年 8 月 14 日に青森県沖で発生した (Fig. 7)。そこで、この地震動を高速 GPS 観測で検出できたかを確認した。観測データは放送暦を使用した解析では安定した解がえられなかったため速報としての機能ははたさなかったが、精密暦を用いて Bernese GPS Software Version 4.2 のキネマティックオプションを使用した解析結果を示す。固定点を TOMA とした解析では TOMA 固有の表面波が大振幅のノイズとなり採用しなかった。Fig. 8 に OBHR を固定点とした KAZE の 1 秒毎の変位を示す。また KAZE での合成波形を、静的変位を含めた変位波形を計算することができる離散波数法を用いて計算した (Honda and Yomogida, 2001)。仮定した震源メカニズム、パラメータは気象庁による震源情報であり、震源の深さは 35 km。モーメントマグニチュードから断層の大きさは 8 km × 4 km とし、滑り量は 2.8 m で一定と仮定した。rake, 傾斜角, 走

2001 Aomori Toho-oki earthquake

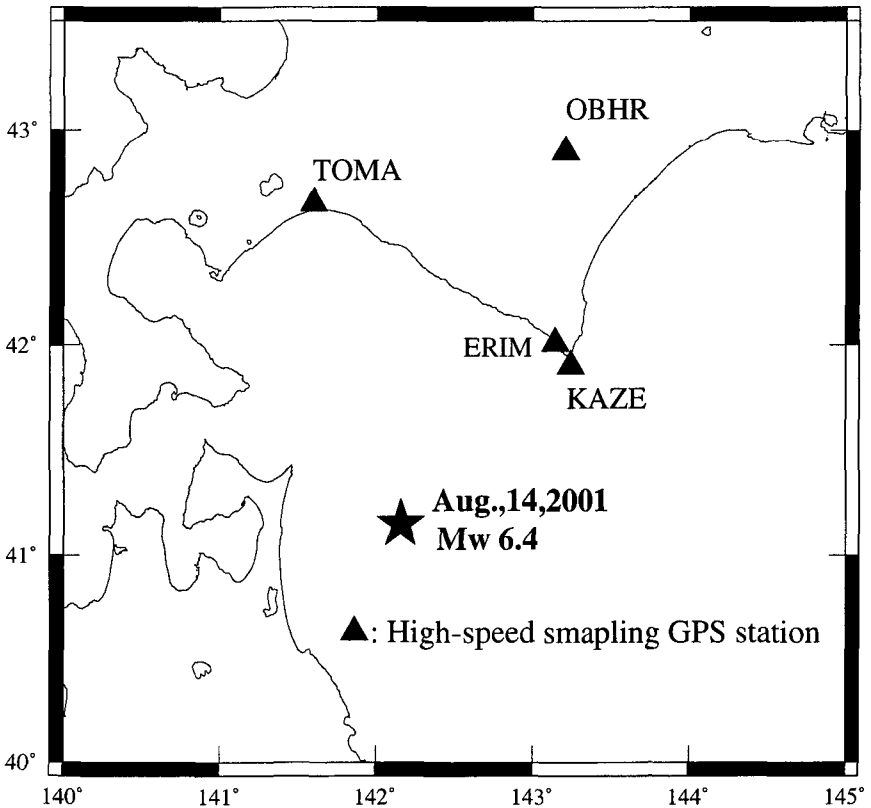


Fig. 7. Map showing epicenter (star) and high-speed sampling GPS stations (triangles).

行はそれぞれ 55°, 22°, 174° とし, 破壊の伝播速度は 3 km/s とした. 今回は媒質を 1 層半無限とし, 地殻は 30 km と仮定した (Table 3). Fig. 8 の時間原点は日本時間 8 月 14 日午前 4 時 12 分 00 秒としている. 上記の速度構造と震央距離が約 128 km であることから 3587 秒付近に直達 P 波が, 3600 秒付近に直達 S 波が到達すると考えられる. 観測波形を見ると P 波到達時付近に数 mm の変動がみられるがノイズレベルを考えると必ずしも P 波が検出されたとは言いがたい. 金曾・他 (2001) にあるようにキネマティック変位振幅にして 0.5~1 cm が現在の GPS 観測の精度から要求される. 今回は, 我々の観測期間で最大震度ではあったが, 地震動振幅は十分に大き

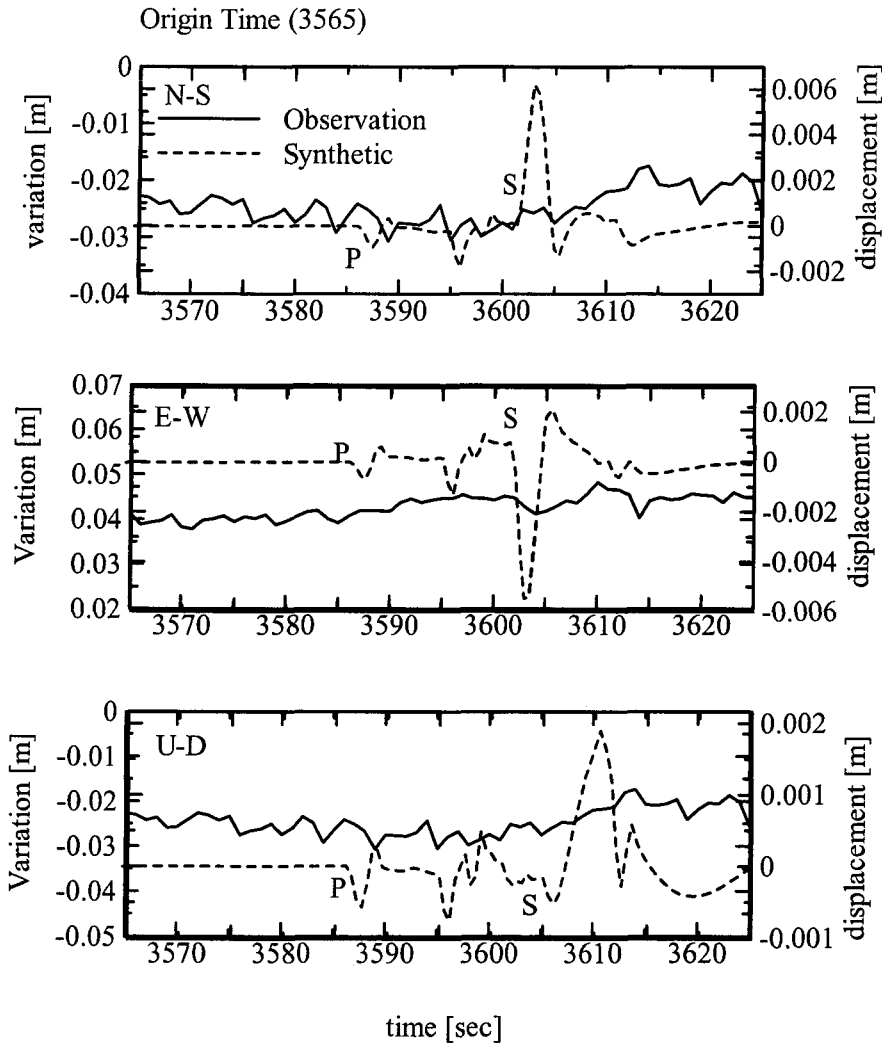
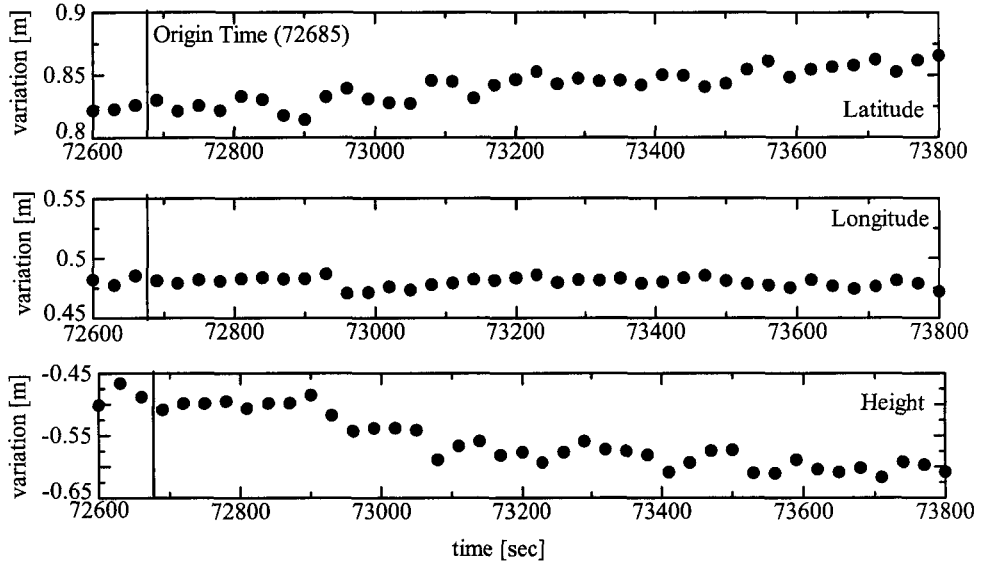


Fig. 8. Synthetic waveforms (broken) for the Aug. 14, 2001 (JST) earthquake in the Aomori Toho-oki and kinematic displacement (solid) by GPS at KAZE with respect to OBHR. Sampling interval is 1sec. Orisin time of the earthquake is indicated at the top.

Table 3. Model parameters for synthetic waveform

	P wave velocity	S wave velocity	density
first layer	5.8 km/s	3.34 km/s	2.6 g/cm ³
half space	6.8 km/s	3.92 km/s	2.8 g/cm ³

**Fig. 9.** Kinematic displacement by GPS at ERMO (GSI) with respect to TSUKUBA (GSI). Sampling interval is 30sec. Origin time of the earthquake is indicated.

くなかったようだ。

Fig. 9には国土地理院がえりも町スポーツ公園に設置してあるGPS観測点(ERMO)での30秒毎のキネマティック変位波形を同様に計算し示す。固定点は国土地理院のTsukuba観測点である。時刻は世界標準時8月13日00時00分00秒を原点とした。この地震のメカニズムから考えて、またFig. 8からもわかるように、経度方向に最も大きな変動が観測されるはずである。地震発震時を含む20分を示したが、経度方向には何の変化も見出せない。緯度方向には5 cm程の変化があるが、後には回復しているので気象変化によるゆっくりとしたノイズかもしれない。

III. ま と め

えりも周辺でプレート運動によるダイナミックな地殻変動を検出するために、新たに精密重力、GPS観測網を構築し繰り返し観測を2000年10月から2001年9月にかけて行った。これに合わせて絶対重力の観測をえりも地殻変動観測所で実施した。絶対重力に関しては、繰り返し計測をすることにより短期間で1 cm程度の変動に対応する重力変化を見出せることが確かめられた。今後は繰り返し観測をすること、局所的な海洋荷重補正の影響を見積もることなどで測定精度を

あげてを考えている。重力変化については、変化量が小さく測定精度を考慮すると有意なものとは言えないが日高西部に重力増加の傾向がみられる重力変化パターンが見られた。これは逆に我々が行った精密重力測定精度を $\pm 10 \mu\text{gal}$ 程度であると見積もることになった。GPS 観測の結果としては北西向きに $1.5-2.0 \text{ cm/yr}$ の変位量が得られた。この千島外弧の西進は、国土地理院の三角測量（多田・木村，1987）の結果と一致している。この結果は、今後準リアルタイムの変動場をGPS 観測からこの精度で測定できるだろう。

2002年には、ERM 1において絶対重力の連続観測を行うことと、より稠密な観測網を構築し重力分布の空間分解能を向上させ、重力の面的な変化を検出することを計画している。

謝辞 北海道大学笠原稔教授には、GPS 観測機材を提供していただいた。東京大学地震研究所中尾茂助手、北海道大学大学院附属地震火山研究観測センターHunja Waithaka氏には解析ソフトウェアに関してご指導いただきました。えりも町えりも風の館、北海道大学苫小牧研究林の皆様、帯広畜産大学小柳敏朗教授にはGPS 観測にご協力を頂いています。ここに記して感謝の意を表します。本研究の一部は東京大学地震研究所一般共同研究（2001-G-01）による。

文 献

- 爆破地震動研究グループ，1986. 日高山脈西部の上部構造，日本地震学会秋季大会講演予稿集1，291.
- Honda, R. and K. Yomogida, 2001. Static and Dynamic Displacement Near a Fault with the Discrete Wavenumber Method, *Phys. Earth Planet. Inter.*, submitted.
- 金曾貴之・小山順二・森谷武男・高橋浩晃，2001. 高速サンプリングGPS 観測のノイズ評価，地震2，53，221-229.
- Micro-g solutions, 2000. *FG5-L Operator's Manual*, 32pp.
- Matsumoto, K., T. Saito, T. Takanezawa and M. Ooe, 2001. GOTIC2: A software for computation of ocean tidal loading effect, *J. Geod. Soc. Japan*, in press.
- 森谷武男・宮町宏樹・オウズオゼル・ヌルジャンオゼル・岩崎貴哉・笠原稔，1997. 日高山脈の地下構造と地震テクトニクス，構造地質，42，15-30.
- Niebauer, T. M., G. Sasagawa, J. E. Faller, R. Hilt and F. J. Klopping, 1995. A new generation of absolute gravimeters, *Metrologia*, 32, 159-180.
- Okubo S., S. Yoshida, T. Sato, Y. Tamura and Y. Imanishi, 1997. Verifying the precision of a new generation absolute gravimeter FG5-Comparison with superconducting gravimeters and detection of ocean loading tide, *Geophys. Res. Lett.*, 24, 489-492.
- 多田莞・木村学，1987. 千島弧南西端における衝突現象と地殻変動，地震2，40，197-204.
- 高橋浩晃・一柳昌義・森谷武男・笠原稔・講神知子，1996. 日高山脈周辺でのGPS 観測，地震学会1996年秋季大会講演予稿集2，P 69.
- Rothacher, M. and L. Mervert (編著)，1996. *Bernese GPS software Version 4.0*, Astronomical Institute, University of Bern, Bern, 418 pp.
- 山本明彦・森谷武男，1989. 北海道の重力異常と地下構造，月刊地球，6，377-385.