

## 福島および金沢における重力潮汐

地震研究所 { 大久保 修平  
田 島 広 一\*  
村 田 一 郎

(昭和 62 年 6 月 3 日受理)

### 要 旨

福島および金沢で重力潮汐の観測を実施した。主要 4 分潮の  $\delta$  ファクターと位相  $\kappa$  をヴェディコフ法で解析した。この 2 点では  $\delta$  はいずれも、東京の値と 1% 以内で一致しており、顕著な異常は認められなかった。 $\delta$  が 2 ないし 3% も小さくなる異常域は中部山岳地方に局限されているという ENDO (1985) の主張を補強する結果となった。

### 1. はじめに

重力潮汐定数  $\delta$  と位相遅れ  $\kappa$  は地球の準静的変形を論ずる際に重要なパラメータである。 $(\delta, \kappa)$  によって地表で観測される重力変化  $g_{\text{obs}}$  と、外部天体の及ぼす起潮力  $g_{\text{tg}}$  とは、次のように結び付けられる。

$$g_{\text{obs}}(\omega) = \delta(\omega) \cdot \exp(i\kappa(\omega)) \cdot g_{\text{tg}}(\omega)$$

ただし、 $\omega$  は潮汐波の角周波数である。

地球が剛体であれば、

$$\delta = 1, \quad \kappa = 0$$

となる。

また、完全弾性体の場合には、2 次の Love 数  $h_2, k_2$  を用いて

$$\delta = 1 + h_2 - (3/2)k_2 \\ \kappa = 0$$

と表せる。

したがって、 $\delta$  は地球の弾性を表し、 $\kappa$  は非弾性を表すといってもよい。

ENDO (1985) は中部日本の 9 地点で重力潮汐の観測を精力的に行い、 $M_2, S_2, O_1, K_1$  の主要 4 分潮について  $(\delta, \kappa)$  を与えた。SHIMADA (1979) による油壺での観測結果とをあわせてみると、中部山岳地帯では周辺よりも  $\delta$  が 2% 程度小さいことに気がつく (Fig. 1)。  $\delta$  の異常域が生じる原因については、ENDO (1985) の詳細な研究にもかかわらず、現在のところ謎である。このような  $\delta$  の異常域はヨーロッパ大陸についても報告されており、原因はともかくとして、その存在自体は確かであろう。(MELCHIOR & BECKER 1983)

\* 現在: 日本測量協会

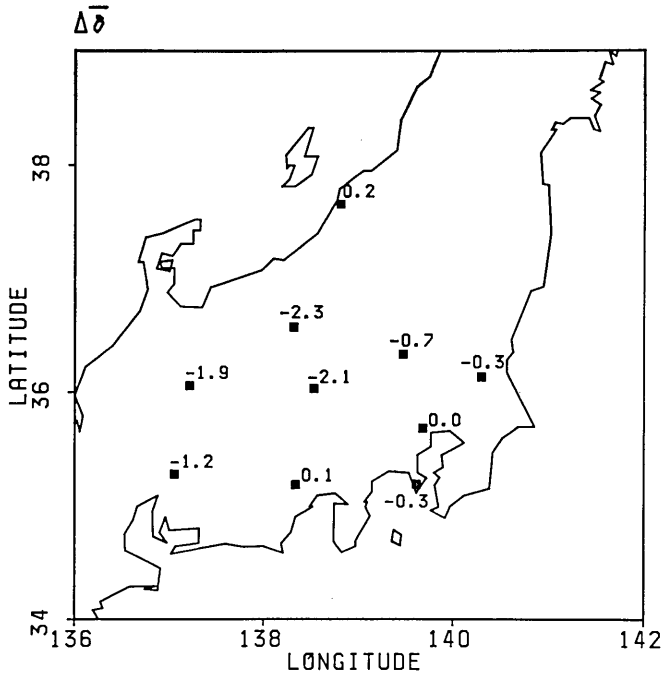


Fig. 1. Relative differences of tidal gravity factors  $\bar{\delta}$  averaged over the major 4 constituents ( $M_2$ ,  $S_2$ ,  $K_1$ ,  $O_1$ ) after ENDO (1985). Unit is in percentage. Reference point is Tokyo.

われわれは、今回、福島と金沢とで、重力潮汐の観測を行った。この2地点は、いわゆる  $\delta$ -異常域の縁辺部にあたっている。もし、この2地点のどちらかで異常が見いだされるならば、中部山岳の  $\delta$ -異常は測定誤差による偶然の産物という疑いが生じる。逆にこの2地点の両方で  $\delta$  が正常値を示すならば ENDO (1985) の結論を補強することになる。

## 2. 観測点、期間、装置

重力潮汐の観測にラ・コステ重力計を用いる点は、ENDO (1985) と基本的に同じである。若干の改良点を挙げるとつぎのようになる。

- (i) 静電フィードバック改造型の重力計を全面的に採用した (HARRISON & SATO 1984)。その結果、重力計の傾斜にともなう感度変化を2桁程度、減少させた。また、静電気力によって零位法を実現しているので、潮汐のように、振幅がただか 200  $\mu$  gal の重力変化に対しては、重力計の固有器差が、無視できるようになる。
- (ii) 打点記録紙を用いたアナログ記録方式をやめ、A/D コンバータ内蔵のカセットレコーダによるデジタル方式を採用した。その結果、記録紙の伸縮による、重力値の読み取りエラーをさげられるようになった。また人手によるデジタイズの手間がはぶけた。

Table 1. General description of tidal gravity stations.

Station	Abbreviation	Location	Height (m)	Gravimeter	Remarks
Tokyo	T K Y	35.716°N 139.763°E	20	G 447 D 63	Earthquake Research Institute, underground room.
Fukushima	F K S	37.678°N 140.457°E	160	D 63	Fukushima University, Faculty of Education, basement.
Knazawa	K Z W	36.565°N 136.663°E	50	G 447	Kanazawa University, Faculty of Science, basement.

Table 2. Observation periods.

No.	Station	Period	Gravimeter
1	Fukushima	Oct. 2, 1984~Feb. 14, 1985	D 63
2	Kanazawa	Aug. 30, 1985~Nov. 23, 1985	G 447
3	Tokyo	May 11, 1986~Aug. 22, 1986	D 63

観測点, 期間, 使用した重力計については, Tables 1, 2 に示す.

### 3. 解析法

ENDO (1985) と整合性を保つために, VENEDIKOV の方法を潮汐解析に採用した (VENEDIKOV 1966). 解析結果を Table 3 に示す.

Table 3a.  $\delta$ -factors and phase differences ( $\kappa$ ) obtained by the gravimeter G447.

Station	$M_2$		$S_2$		$K_1$		$O_1$	
	$\delta$	$\kappa$ (degree)	$\delta$	$\kappa$ (degree)	$\delta$	$\kappa$ (degree)	$\delta$	$\kappa$ (degree)
Tokyo	1.202 $\pm 0.005$	0.58 $\pm 0.08$	1.213 $\pm 0.006$	-0.38 $\pm 0.15$	1.208 $\pm 0.006$	-0.52 $\pm 0.12$	1.217 $\pm 0.006$	0.88 $\pm 0.17$
Kanazawa	1.202 $\pm 0.001$	0.44 $\pm 0.04$	1.207 $\pm 0.001$	0.19 $\pm 0.06$	1.188 $\pm 0.001$	-0.27 $\pm 0.07$	1.207 $\pm 0.002$	0.45 $\pm 0.08$

Table 3b.  $\delta$ -factors and phase differences ( $\kappa$ ) obtained by the gravimeter D63.

Station	$M_2$		$S_2$		$K_1$		$O_1$	
	$\delta$	$\kappa$ (degree)	$\delta$	$\kappa$ (degree)	$\delta$	$\kappa$ (degree)	$\delta$	$\kappa$ (degree)
Tokyo	1.200 $\pm 0.001$	0.59 $\pm 0.02$	1.216 $\pm 0.001$	0.04 $\pm 0.06$	1.198 $\pm 0.001$	0.01 $\pm 0.05$	1.219 $\pm 0.002$	0.88 $\pm 0.07$
Fukushima	1.185 $\pm 0.001$	1.11 $\pm 0.03$	1.209 $\pm 0.001$	0.63 $\pm 0.06$	1.182 $\pm 0.001$	-0.51 $\pm 0.05$	1.204 $\pm 0.002$	1.09 $\pm 0.07$

Table 4a. Ocean tide effects on gravity for the  $M_2$  constituent.

Station	Global Ocean		Around Japan		Adjacent to the station		Total	
	Amp. ( $\mu$ gal)	Phase (degree)	Amp. ( $\mu$ gal)	Phase (degree)	Amp. ( $\mu$ gal)	Phase (degree)	Amp. ( $\mu$ gal)	Phase (degree)
Tokyo	0.32	335.3	2.16	27.81	0.04	12.38	2.41	21.5
Fukushima	0.21	344.1	1.85	42.47	0.18	59.09	2.14	38.9
Kanazawa	0.39	328.9	1.72	29.86	0.04	86.67	1.96	20.8

Table 4b. Ocean tide effects on gravity for the  $S_2$  constituent.

Station	Global Ocean		Around Japan		Adjacent to the station		Total	
	Amp. ( $\mu$ gal)	Phase (degree)	Amp. ( $\mu$ gal)	Phase (degree)	Amp. ( $\mu$ gal)	Phase (degree)	Amp. ( $\mu$ gal)	Phase (degree)
Tokyo	0.20	356.9	0.92	359.61	0.02	346.47	1.14	358.91
Fukushima	0.20	5.1	0.82	11.17	0.09	29.09	1.10	11.53
Kanazawa	0.19	350.5	0.69	1.78	0.01	79.10	0.88	0.03

Table 4c. Ocean tide effects on gravity for the  $K_1$  constituent.

Station	Global Ocean		Around Japan		Adjacent to the station		Total	
	Amp. ( $\mu$ gal)	Phase (degree)	Amp. ( $\mu$ gal)	Phase (degree)	Amp. ( $\mu$ gal)	Phase (degree)	Amp. ( $\mu$ gal)	Phase (degree)
Tokyo	0.65	8.5	1.52	354.41	0.02	353.88	2.18	358.59
Fukushima	0.67	16.2	1.41	358.51	0.14	9.54	2.19	4.52
Kanazawa	0.56	7.4	1.06	351.26	0.03	193.84	1.58	356.55

Table 4d. Ocean tide effects on gravity for the  $O_1$  constituent.

Station	Global Ocean		Around Japan		Adjacent to the station		Total	
	Amp. ( $\mu$ gal)	Phase (degree)	Amp. ( $\mu$ gal)	Phase (degree)	Amp. ( $\mu$ gal)	Phase (degree)	Amp. ( $\mu$ gal)	Phase (degree)
Tokyo	0.50	28.23	1.19	15.65	0.02	15.21	1.70	19.3
Fukushima	0.53	35.72	1.10	19.30	0.10	29.54	1.71	24.9
Kanazawa	0.43	25.76	0.84	12.00	0.03	213.84	1.24	16.2

Table 5a.  $\delta$ -factors and phase differences ( $\kappa$ ) obtained by the gravimeter G447 after ocean tide corrections.

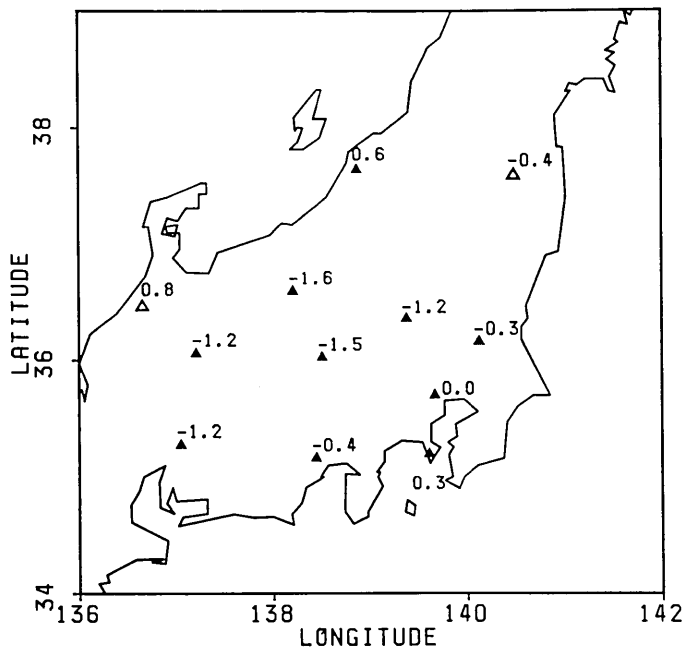
Station	$M_2$		$S_2$		$K_1$		$O_1$	
	$\delta$	$\kappa$ (degree)	$\delta$	$\kappa$ (degree)	$\delta$	$\kappa$ (degree)	$\delta$	$\kappa$ (degree)
Tokyo*	1.156	-0.24	1.164	-0.32	1.156	-0.46	1.163	0.02
Kanazawa	1.166	-0.24	1.169	0.20	1.150	-0.17	1.167	-0.10

\* After ENDO (1985).

Table 5b.  $\delta$ -factors and phase differences ( $\kappa$ ) obtained by the gravimeter D63 after ocean tide corrections.

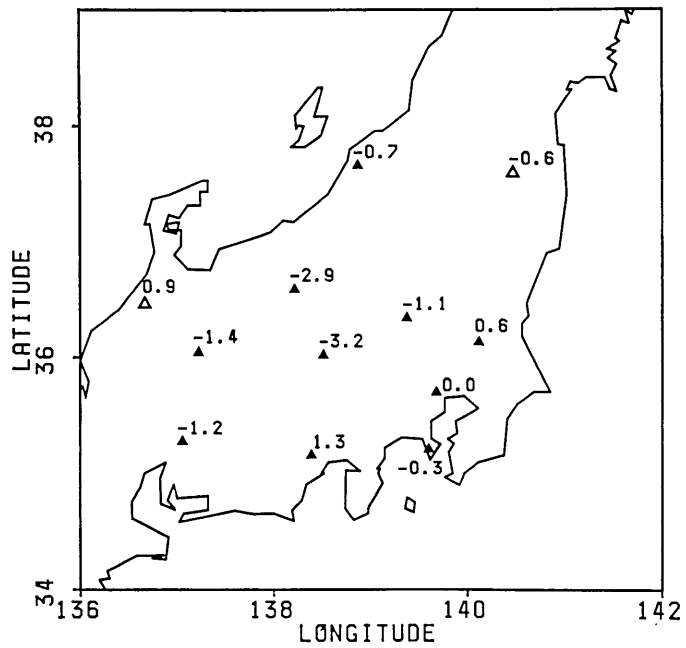
Station	$M_2$		$S_2$		$K_1$		$O_1$	
	$\delta$	$\kappa$ (degree)	$\delta$	$\kappa$ (degree)	$\delta$	$\kappa$ (degree)	$\delta$	$\kappa$ (degree)
Tokyo	1.154	-0.24	1.167	0.12	1.146	0.10	1.165	0.02
Fukushima	1.150	-0.28	1.159	0.16	1.130	-0.74	1.152	-0.05

$\Delta\theta$  (M2): RELATIVE CHANGE IN %.



(a)

$\Delta\theta$  (S2)



(b)

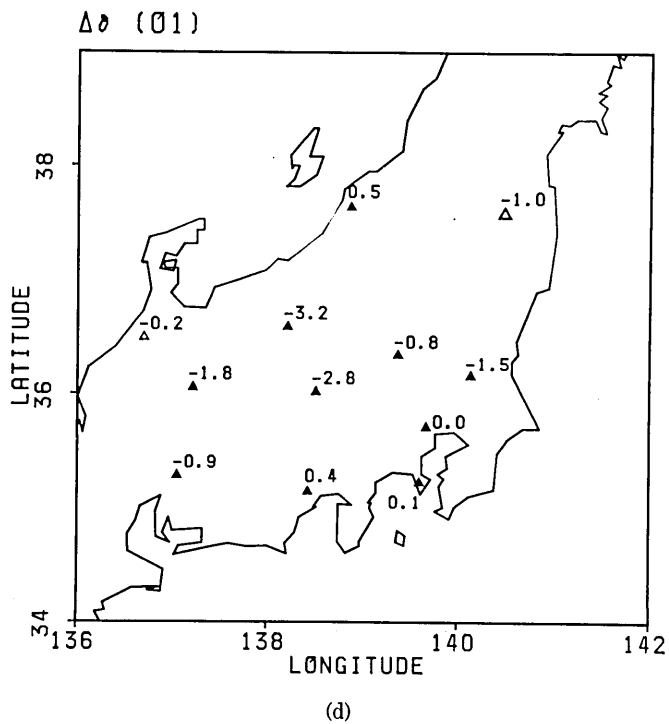
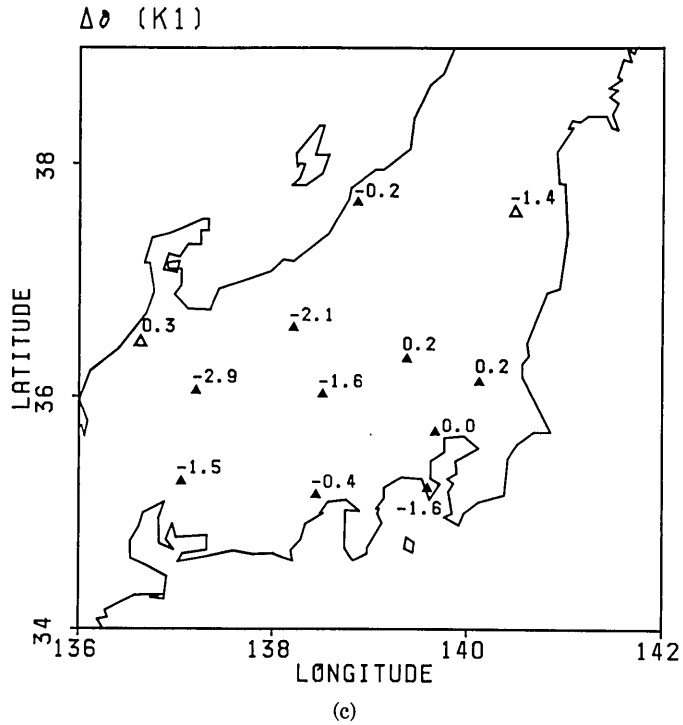
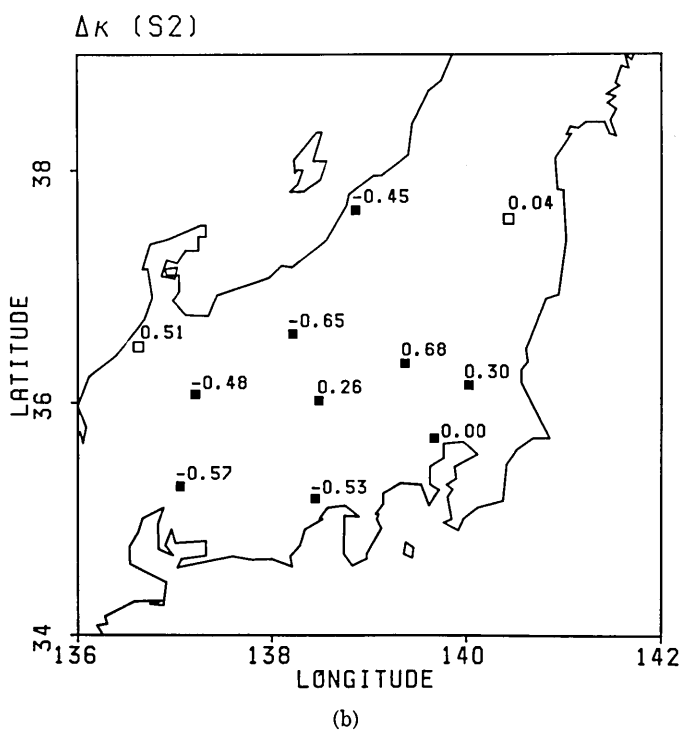
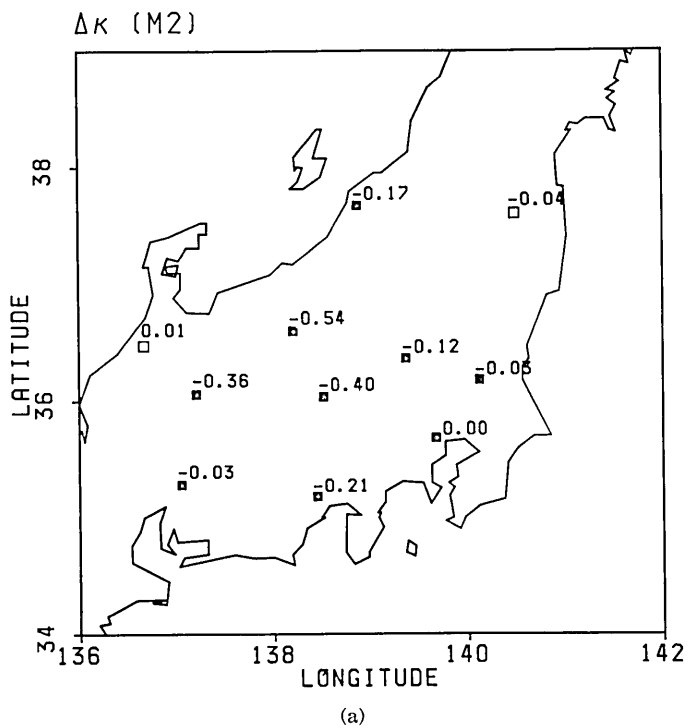
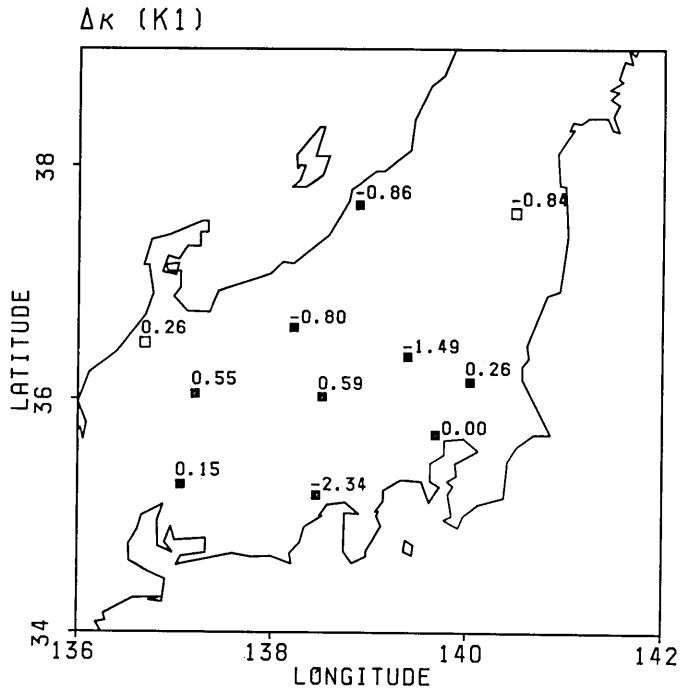
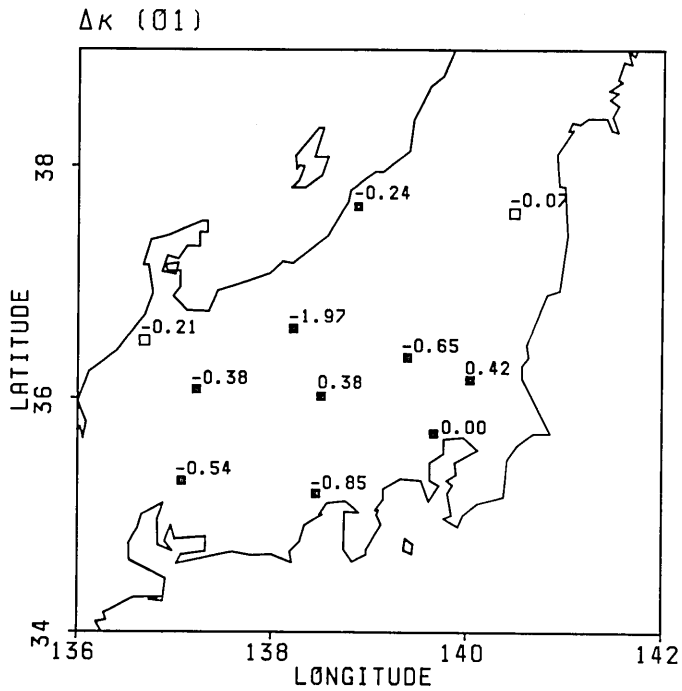


Fig. 2. Relative differences of tidal gravity factors  $\delta$ . Empty triangles are after this study while the solid ones are after ENDO (1985). Unit is in percentage. Reference point is Tokyo. (a)  $M_2$  (b)  $S_2$  (c)  $K_1$  (d)  $O_1$ .





(c)



(d)

Fig. 3. Relative phase differences  $\kappa$ . Unit is in degrees. Empty squares are after this study while the rest are after ENDO (1985). Unit is in degrees. Reference point is Tokyo. (a)  $M_2$  (b)  $S_2$  (c)  $K_1$  (d)  $O_1$ .



海洋潮汐の補正には、FARRELL (1972) が導いた、Green 関数をつかった。海洋潮汐の分潮図には、SCHWIDERSKI (1980, 1983) の計算結果を採用した。ただし日本近海については、TSUKAMOTO & NAKAGAWA (1978, 1980) のチャートを用いた。このような補正法は、ENDO (1985) と整合している。海洋潮汐の及ぼす重力変化の見積りを分潮ごとに Table 4 に示す。ここで東京での補正值が ENDO (1985) とわずかに異なっている。これは、ENDO の入力データにエラーがあったためである。しかし、その程度は 0.1% 以下であって、彼の結論には全く影響をおよぼさない。

海洋潮汐の補正を施したあとの、 $(\delta, \kappa)$  を Table 5 に示す。また東京の  $(\delta, \kappa)$  を基準としたときの、それからのずれ  $(\Delta\delta, \Delta\kappa)$  の地理的分布を Fig. 2, Fig. 3 に示す。

#### 4. 結 び

重力計を静電フィードバック型に改造した結果、重力計の器差が無視できるようになった。実際、重力計が異なっても、東京における  $(\delta, \kappa)$  は、すべての分潮について、きわめて良く一致した値が得られている (Table 5a, b)。これはまた、重力潮汐の解析の再現性の良さを保証することにもなる。

$\Delta\delta$  の値は、福島と金沢の双方について、概ね 1% 以内におさまっている (Fig. 2)。この結果は、中部山岳域から遠ざかると  $\delta$  の値にとくに異常が認められなくなるということの意味する。ENDO (1985) が検出した  $\delta$  の異常は中部山岳域を中心とする同心円状の地域に限定されているので、われわれの結果と調和する。

中部山岳域で  $\delta$  の異常が現れる原因については、現在のところ満足のいく説明はあたえられていない。少なくとも (1) 海洋潮汐の補正誤差、(2) 気象擾乱、(3) 地下水、(4) 地形などが  $\delta$  に及ぼす影響は 0.1% 程度かそれ以下であることがわかっている (ENDO 1985)。

その他に考えられる効果としては、(5) 高地における気圧低下が重力計に及ぼす効果、(6) 地下構造の水平方向不均質性などがあげられる。このうち (5) については、数 100 m 以上の高度差があって、かつ水平距離の短い 2 地点を選び、各点で潮汐観測を行いその結果を比較する予定である。また (6) については、水平方向不均質性を考慮した地球潮汐理論の研究を進める必要がある。

#### 謝 辞

本研究を行うにあたり、福島大学教育学部においては、渡辺善八教授ならびに会計係長渡辺博氏ほかの事務部の方々のご協力を得た。また金沢大学理学部においては、河野芳輝助教授により、重力計のメンテナンスがおこなわれた。併せて、厚く御礼申し上げる。

#### 参 考 文 献

- ENDO T., 1985, An experimental study of regional heterogeneities of gravity tides in central Japan, *Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo*, **60**, 39-86.  
 FARRELL, W. E., 1972, Deformation of the earth by surface loads, *Rev. Geophys. Space Phys.*, **10**, 761-797.  
 HARRISON, J. C. and T. SATO, 1984, Implementation of electrostatic feedback with a LaCoste-Romberg model G gravity meter, *J. Geophys. Res.*, **89**, 7957-7961.

- MELCHIOR, P. and M. DE. BECKER, 1983, A discussion of world-wide measurements of tidal gravity with respect to oceanic interactions, lithosphere heterogeneities, Earth's flattening and inertial forces, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **31**, 27-53.
- SCHWIDERSKI, E. W., 1980, On charting global ocean tides, *Rev. Geophys. Space Phys.*, **18**, 243-268.
- SCHWIDERSKI, E. W., 1983, Atlas of ocean tidal charts and maps, Part 1: the semidiurnal lunar tide  $M_2$ , *Mar. Geod.*, **6**, 219-265.
- SHIMADA, S., 1979, Earth tidal gravity observed at the Aburatsubo Crustal Movement Observatory, *J. Phys. Earth*, **27**, 383-394.
- TSUKAMOTO, H. and I. NAKAGAWA, 1978, On effects of oceanic tides upon gravimetric tides for diurnal constituents, *J. Geod. Soc. Japan*, **24**, 226-233.
- TSUKAMOTO, H. and I. NAKAGAWA, 1980, On effects of oceanic tides upon gravimetric tides for semidiurnal constituents, *J. Geod. Soc. Japan*, **26**, 26-34.
- VENEDIKOV, A. P., 1966, Une méthode pour l'analyse des marées terrestres à partir d'enregistrements de longueur arbitraire, *Comm. Obs. Roy. Belgique*, **250**, Sér. Géophys., **71**, 463-485.

---

*Gravity Tide Observation at Fukushima and  
Kanazawa, Central Japan*

Shuhei OKUBO, Hirokazu TAJIMA and ICHIRO MURATA

Earthquake Research Institute

We present tidal gravity factor  $\delta$  and the phase  $\kappa$  at Fukushima and Kanazawa. The departure of  $\delta$  from that at Tokyo is 1% or less for both sites. The result supplements the ENDO (1985)'s conclusion that the strong anomaly of  $\delta$  is confined to the mountainous area in central Japan.