

東京湾・南関東周辺の重力異常と深部構造

植田 義夫*・中川 久穂*・平岩 恒広**・朝尾 紀幸*・久保田隆二***

GRAVITY ANOMALIES AND DERIVED SUBTERRANEAN STRUCTURE ON/AROUND TOKYO BAY AND SOUTHERN KANTO DISTRICT

Yoshio Ueda,* Hisaho Nakagawa,* Tsunehiro Hiraiwa** Toshiyuki Asao,* and Ryuuji Kubota ***

Abstract

Hydrographic Department, M.S.A., Japan, carried out sea gravity survey in Tokyo Bay from Feb to March, 1985 and in Dec, 1985. Gravity field at sea surface was measured by KSS-30 type sea gravity meter, installed on S/V shoyo. The position of S/V shoyo was fixed with Decca-Transponder positioning system within the estimated error of 5m. Through this survey, Free-air and Bouguer anomaly maps of Tokyo Bay were compiled and gravity basement depth was calculated by fourier intergral inversion method. The gravity basement depth is fairly consistent with relief of Pre-Neogene basement structure. Free-air gravity anomaly map on/around southern Kanto district was also compiled using sea gravity survey data measured by JHD, for study of tectonic situation of the region concerned. Three gravity anomaly profiles on/around Tokyo Bay were analysed with two-dimensional Talwani's method. Through the above study, followings become apparent.

1. Negative Bouguer anomaly in the northern part of Tokyo Bay, is subdivided into two regions, one is extension from Anegasaki, north-eastern coast of Tokyo Bay, whose negative peak reaches -24mGal and the other is from Yokohama, south-western coast of Tokyo Bay where negative peak reaches -21mGal .

2. Gravity analyses on two profiles in Tokyo Bay reveal that the negative Bouguer anomaly should be ascribed to two sources, one is Pre-Neogene basement structure, and the other is slope of Moho boundary. This result also imply that the thickness of crust beneath Tokyo Bay become deeper than surroundings.

3. The relative Bouguer gravity low amounting more than 20mGal is recognized over Tokyo subbottom channel, where gravity basement is depressed more than 4000m . This feature suggests that Tokyo subbottom channel is one of the results of tectonic dynamic of southern Kanto district.

4. Gravity analysis on E-W profile along $35^{\circ}30'$, from $E139^{\circ}00'$ near Tanzawa mountains to $141^{\circ}30'$, offing of Taito cape, reveal that subducting plate should be taken into considered, as well as Pre-Neogene basement structure. Density contrast of each part is as follows, 0.12 g/cc for Philippine plate, 0.25 g/cc for Pacific plate and 0.58 g/cc for Pre-Neogene basement. The density of Pacific plate could be reduced by taking account of the slope of Moho boundary.

Received 15 January 1987

* 航法測地課 Geodesy and Geophysics Div.

** 第3管区海上保安本部八丈水路観測所 Hatizyo Hydrographic Observatory. 3rd R.M.S. Hqs.

*** 川崎地質(株) Kawasaki Geologic Surveys Co., Ltd.

1. はじめに

東京湾とその周辺は安政の江戸地震（1855年 11月, M6.9）をはじめ、歴史上M6～M7クラスの直下型地震がたびたび発生しているところである。このような直下型地震の発生機構の解明にとっては、東京湾とその周辺の地下構造を解明することが重要な課題である。このため、1981年度からはじまった「首都圏における直下型地震の予知及び総合防災システムに関する研究(科学技術振興調整費)」でも、東京湾の海底下構造の解明が、その一つの重要な課題とされ、水路部でも、本研究の一環として、多重反射法（マルチチャンネル）やスパーカー等による音波探査を1981年度から1983年度にかけて実施した。これらの調査により、主に先新第三系以浅の堆積層の構造が明らかになるとともに、浦安沖には「東京湾北部断層」が新たに発見された。しかし、このような調査により、明らかになったのは海底下3 km前後の比較的浅い部分の構造であり、表層付近の構造形成を規制する深部構造の解明のためには、重力異常の調査が必要不可欠の課題となった。このため、本研究の第2期にあたる1984年度、1985年度において水路部による海上重力測量が実施された。今回の調査は、従来より空白域として取り残されていた東京湾の重力異常分布の様子を明らかにするとともに、既存の資料も総合し、東京湾とその周辺の地下構造を求めようとするものである。

2. 測量の概要

2ヶ年にわたる海上重力測量の測線図を第1図に示す。昭和59年度（1984年度）は富津岬以北の東京湾北

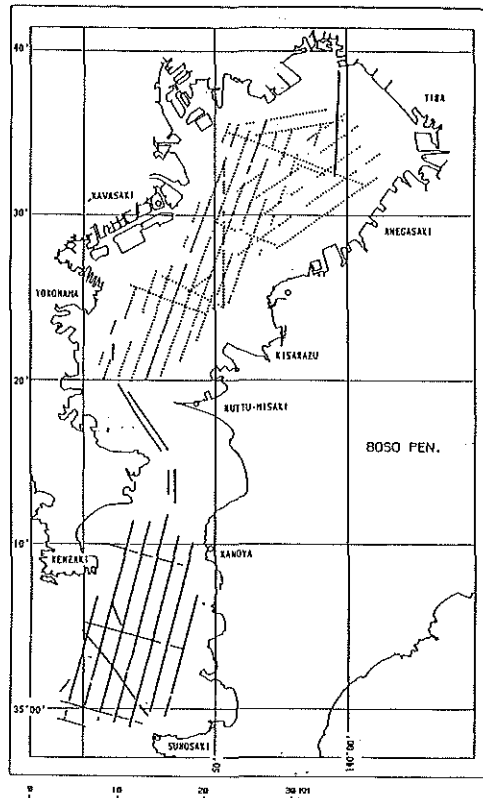


Figure 1. Track lines of sea gravity survey in Tokyo Bay.
Survey in February and March, 1985 are shown by dot lines and those in December, 1985 solid lines.

部、昭和60年度は富津崎から洲崎沖にかけての東京湾南部と、前年度の補測である。各年度における調査内容は、海上位置決定のために使用する電波測位機・従局点の基準点測量、海上での重力測定、資料整理の各項目からなる。海上重力測量では重力そのものの測定とともに船位の決定精度がエトベス補正と関連して重力測量の精度を決定する要因となる。このため、今回の海上重力測量では測位精度の高い電波距離測定機(デッカトリスポンダ)を使用し、主局を測量船「昭洋」に、従局を陸上の基準点に設置し、2距離方式により船位を決定した。ちなみに、この方法による測位誤差は5 m以下である。各年度における測量の概要は第1表に示すとおりである。

Table 1 Brief informations of Sea Gravity Survey in Tokyo Bay.

	1984年度	1985年度
測量期間	1985年 2月26日 3月8日	1985年12月6日 12月13日
測量船 測位	昭洋 Decca transponder positioning system	昭洋
陸上局	富津岬, 金田中学校 川崎, 習志野市役所	浜金谷, 洲崎, 富津岬 剣崎
重力の交点 誤差平均	1.0mGal	3.5mGal
Drift	<0.07mGal/H	<0.1mGal/H
重力計	KSS-30	KSS-30

海上重力測定は測量船「昭洋」に搭載したBodenserwerk社製KSS-30型海上重力計を使用した、仕様によれば、本重力計の性能は静穏な海況下で1 mGal以上の精度を有するとされている。しかし、測量期間中の海況は、波浪もありこのような条件を必ずしも満足するものではなく、今回の測量における測線の交点における重力差の平均値は、59年度0.97 mGal、60年度3.5 mGalであった。

3. 東京湾のフリーエア重力異常

(1) フリーエア重力異常値の計算

重力測定値は「日本重力基準網1975」に準拠し、水路部構内の重力基準点JHD-Gφの値を979778.27 mGalとして決定した(Ganeko et al. 1982)。重力測定値 g_0 に大気補正(δg_a)ドリフト補正及びエトベス補正(δg_e)を加え、その値から測地基準系1967に基づく正規重力値(γ)を差し引き、フリーエア重力異常値($\delta g'$)を求めた。各補正值のうち、大気補正值は+0.87 mGal、測量前後における重力計のドリフト量は59、60年度とも+0.1 mGal/日以下であった。

エトベス補正(δg_e)は海上重力測定における最も大きい誤差要因で、船の東西方向の対地速度 v_e 、緯度 φ 、地球の恒星角回転速度 ω により $\delta g_e = 2 \cdot \omega \cdot v_e \cdot \cos \varphi$ となる。この式により、仮に20秒毎に決定した2点間の船位の相対誤差が経度方向に沿って10 mであるとすれば、緯度35°の場所におけるエトベス補正量は約6 mGalとなる。今回の測量ではエトベス補正量を正確に求めるため、測点前後の5分間における10秒毎

の測位データをもとに30秒毎の船位と船速を時間の2次式で近似し、最小二乗法で決定した。このようにして計算したエトベス補正値の確率誤差は±1.0mGal以下である。

(2) グリッドデータの作成

測線に沿ったフリーエア重力異常値をもとに、作図範囲内の東西・南北それぞれ1km間隔の各格子点における重力値を求めた。この計算では陸部の重力異常値を「関東地域重力図」(地質調査所, 1985)から読み取り、それらのデータも使用した。いま4つのグリッドの内部にk番目のデータがある場合、(m, n)点におけるグリッドの初期値を $G(m, n) = \sum_{K=1}^N V_K / \sum_{K=1}^N \omega_k$ として計算した。

ここで、 $V_K = v_k \cdot \omega_k$ で v_k はK番目の測定値、 ω_k は格子点とK番目の測点との距離 r_k により $\omega_k = (1 + r_k^2)$ で与えられる重み関数である。以上の方法で計算したグリッドの初期値をもとに、金属板の変形理論を応用した Briggs の方法 (1974) を用いて各グリッドの値を逐次近似法で求めた。収束の判定は各グリッドの曲率の2乗和がほぼ一定値になる場合とした。

(3) 東京湾のフリーエア重力異常の特徴

第2図はグリッド値をもとに等値線をプロッターで描画した東京湾のフリーエア重力異常図である。又第3図には、参考としてプロッターで描画した東京湾の海底地形図を示した。第2図によると富津岬以北の東京湾北部では、ほぼ全域が負異常域となっていることがわかる。この負異常域は千葉県姉崎沖にみられる-23mGalの負異常域、及び横浜・川崎沖にみられる-21mGalの負異常域からなり、それらが北東-南西方向にずれて分布している様子がわかる(藤井, 1974)。この2つの負異常域の間付近は周囲と比べ+4mGalの凸状の分布となっている。中ノ瀬付近はほぼ東西方向の等値線が密なところで、重力異常の急勾配を示す。マルチチャンネル音波探査によれば、この付近は中之瀬褶曲帯が東西に延びており、これに伴う異常と考えられる。

富津岬から洲崎沖にかけてのフリーエア重力異常は、北部にみられる平坦な分布とは異なり、等値線も密で重力異常の振幅も大きい。海底地形では、観音崎沖付近から洲崎沖にかけてほぼ直線状に東京海底谷が南北に延びており、洲崎沖では西へ向きを変えて相模湾に開口する。海底谷の谷底水深も剣崎沖の420m強から次第に深くなり、測量海域の南西端付近では900m以上に達する。フリーエア重力異常にもこのような地形の特徴と良い対応が認められるが、(1) 海底谷の深さが400mから900mへと深くなるのに対し、フリーエア重力異常値は7~12mGalのほぼ一定値を示すこと、(2) 重力の極小値の位置は地形的な凹部の位置と比べずれていること、などにみられるように、単に地形的影響だけでは説明できない事実もある。

4. 東京湾とその周辺のブーゲー重力異常

(1) ブーゲー異常値の計算

水路部では、海の基本図及び地震予知計画の一環としても、海上重力測量を実施しており、ブーゲー重力異常図の作成にあたってはこれらの測量資料も使用し、第4図に示す範囲におけるブーゲー重力異常図を作成した。

なお、陸部については、関東地方重力図(地質調査所, 1985)を参考にした。

海域におけるブーゲー重力異常とは、フリーエア重力異常値に海水面より上の陸部の地形に伴う引力を加え、さらに海水を地殻の仮定密度で置き換えた場合の引力の増加分を加えたものである。それ故、理想的にはブーゲー重力異常図には海底地形に影響されない海底下以深の物質の密度分布に伴う重力異常が表現されているものと考えられる。ブーゲー異常値の計算には、測定点直下の水深による単純ブーゲー補正、及び直

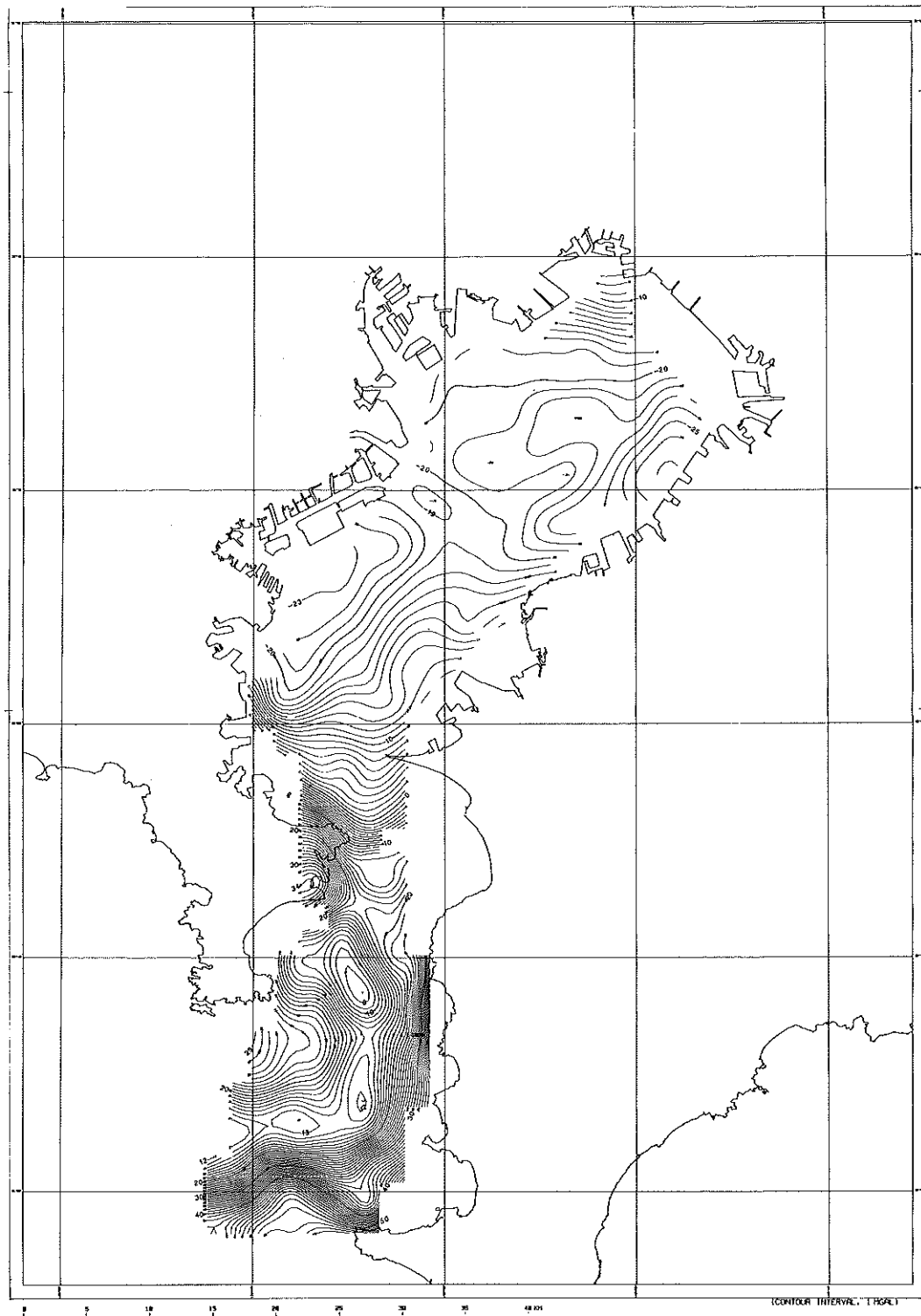


Figure 2. Free-air gravity anomaly contour map of Tokyo Bay. Contour interval is 1mGal.

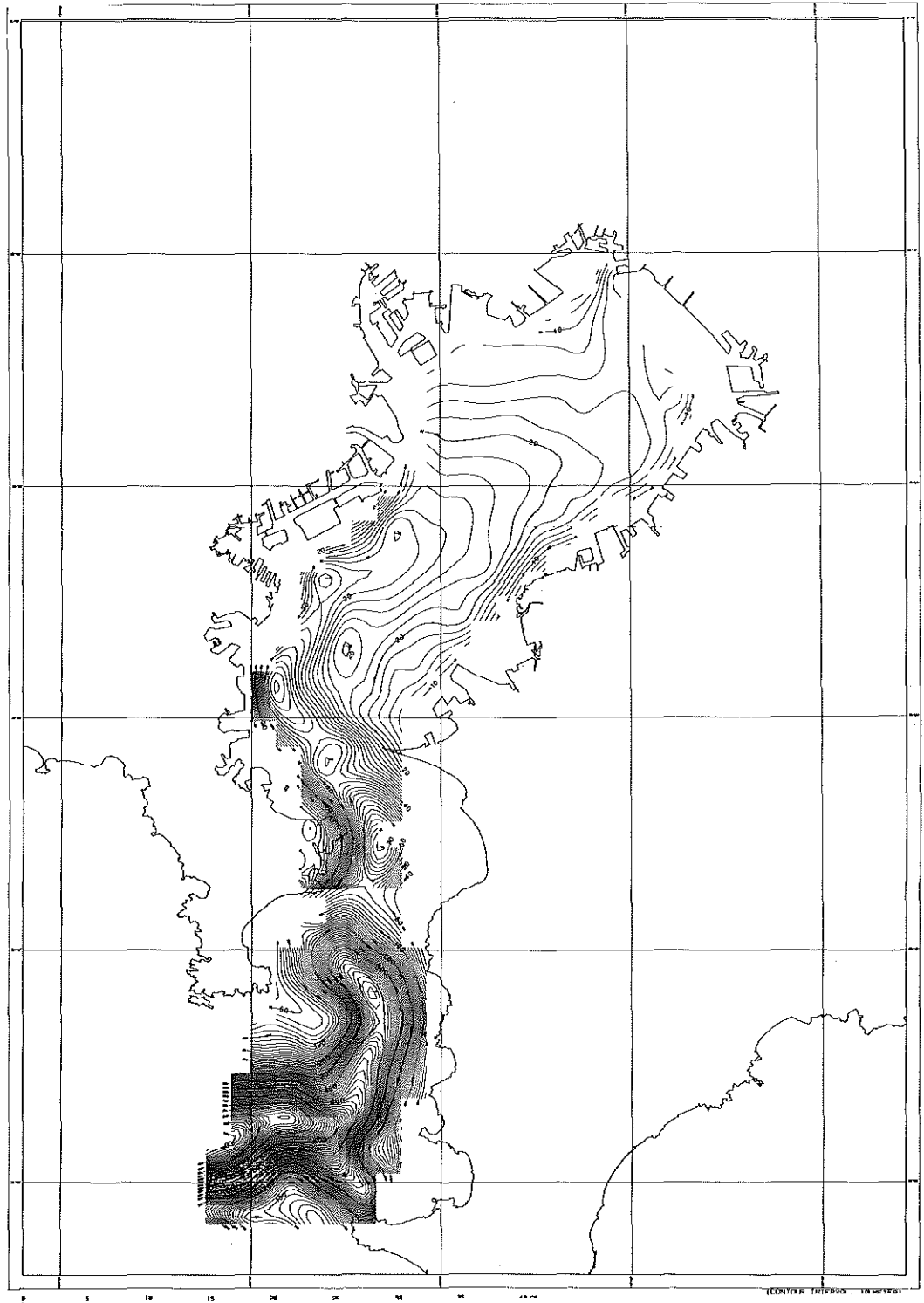


Figure 3. Auto-contoured bathymetric map of Tokyo Bay. Contour interval is 10m.

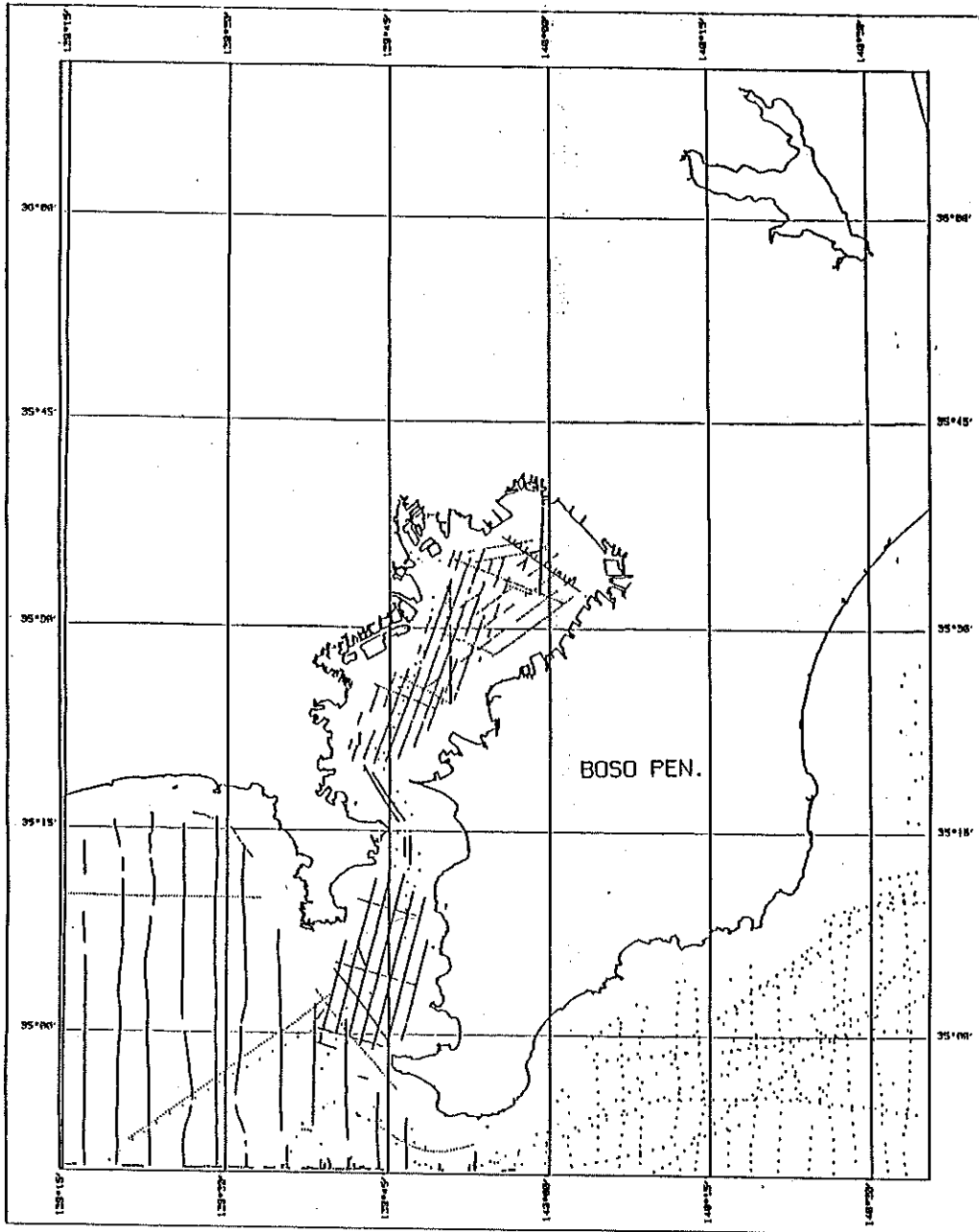


Figure 4. Gravity survey data used to compile Bouguer gravity anomaly map.

下水深を基準にした場合の地形の起伏による引力の補正（地形補正）の2つの補正を行うのが普通であるが、ここでは計算処理を単純にするため、直接、海底地形及び周辺部の陸地形を三次元角柱と正5面体の重ね合せて近似し、測点ごとのブーゲー補正量を計算した。実際の計算では地球の球面効果も考慮しているため、陸地形による補正量が負になる場合も生じる。なお、今回用いたブーゲー補正法は以下の方法により実施した。

① 地形データの作成

ブーゲー補正量の計算に用いた地形データは、水路部による「海底地形図」と水深データファイル、及び国土地理院による「国土数値情報4分の1地形標高メッシュデータ」をもとに、直交座標上で格子間隔250mの格子データに変換して使用した。また、埋立地は海図から読み取り、すべて標高2mとして地形データを作成した。第5図には地形補正に使用した地形データを示す。

② ブーゲー補正の方法

地形を4角柱の集合で近似し、測定点からの距離に応じて、周辺の地形を極近傍、近傍、中間、遠方の4つの範囲に区分し、それぞれの範囲ごとに下記の方法でブーゲー補正量を計算した。

極近傍……極近傍は測定点を含む4つの500mメッシュの範囲で、単位メッシュの半分の間隔である一片250mの16個のメッシュに分割し、地形を4角柱で近似した。測定点直下については、直下水深を高さとする一片250mの4角柱で置き換え、その底面を周囲の水深と連続するように第6図に示す8個の5面体で近似した。

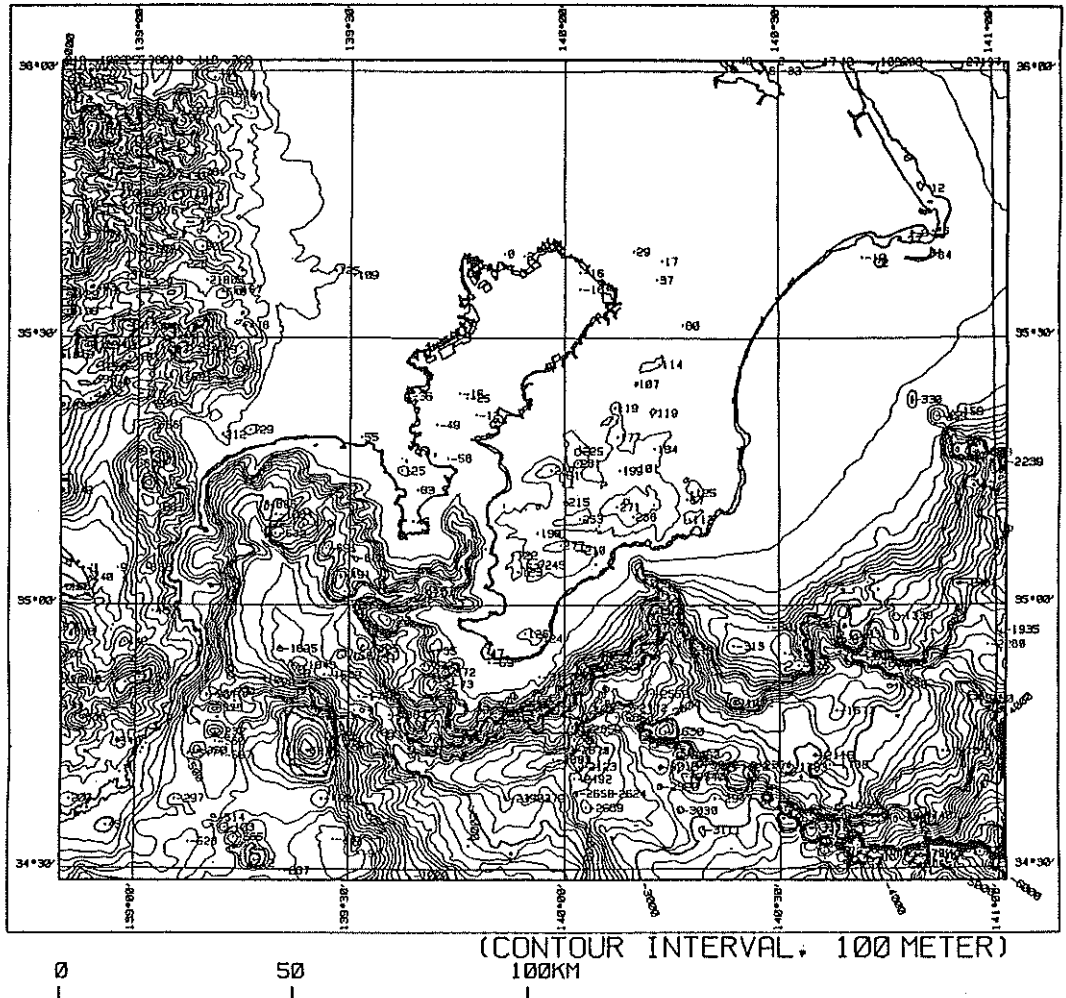


Figure 5. Bathymetry used for terrain correction.

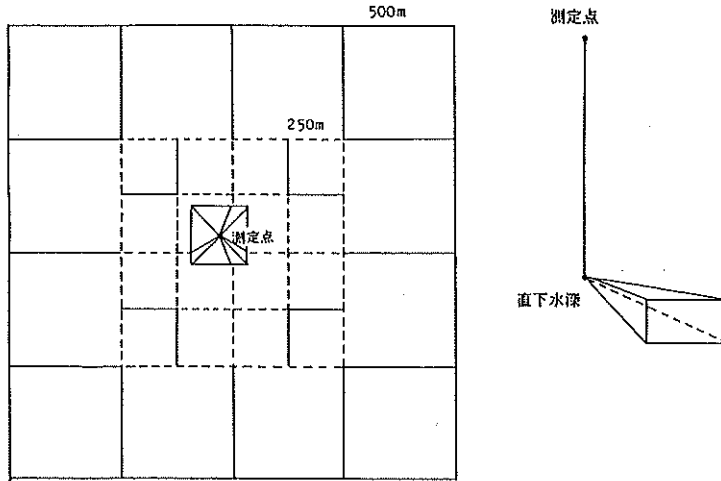


Figure 6. Illustration of terrain correction method for the most close region to correction point.

近傍………測定点を中心とする半径7kmの範囲から極近傍を除く範囲で、一つの標高、水深を500mメッシュの4角柱で近似し補正量を計算した。

中間………測定点を中心とする半径20kmの範囲から、極近傍、近傍を除いた範囲で、500mメッシュごとの4角柱を線質量で近似した(萩原, 1974)。

遠方………遠方は測定点を中心とする半径40kmの範囲から「中間」までを除いた範囲で、500mメッシュの地形データから1km×1kmごとの平均水深又は標高を求め、線質量近似で補正量を計算した。

③ 海底下の平均密度の決定

ブーゲー異常の計算に際しては、海底下の物質の密度を仮定する必要がある。ここでは簡単な方法として、水深とフリーエア重力異常値の相関を求め、相関直線の平均的勾配から海底を構成する物質の平均的密度を推定した。今、ブーゲー異常を $\delta g''$ 、フリーエア異常を $\delta g'$ 、又そこにおける水深を h とすると、これらの間には水平板近似では、

$$\delta g'' = \delta g' + 2\pi Gh(\rho - \rho_w)$$

の関係が成り立つ、ここで ρ_w は海水の密度、 ρ は地殻の仮定密度である。

第7図は、ブーゲー重力異常の作図範囲におけるフリーエア重力異常と水深の相関図である。本図に示した直線の勾配は $\rho - \rho_w$ でほぼ 1.3 g/cm^3 である。この結果から、東京湾とその周辺では、ブーゲー異常値の計算における仮定密度は 2.3 g/cm^3 となる。一方、東京湾周辺の陸部では $\rho = 2.0 \text{ g/cm}^3$ とした場合のブーゲー重力異常図が地質調査所(1985)から刊行されており、東京湾周辺のブーゲー重力異常図としては仮定密度 2.0 g/cm^3 と 2.3 g/cm^3 の二つの場合について作成した。

(2) 東京湾とその周辺のブーゲー重力異常の特徴

ブーゲー重力異常図の作成に際しても、フリーエア異常図の場合と同様に測線に沿うブーゲー異常値をもとに格子間隔1kmのグリッドデータを作成し、それをもとに等値線図をプロッターにより描画した。

第8図(a), (b)は仮定密度 2.0 g/cm^3 と 2.3 g/cm^3 の場合のブーゲー重力異常図である。両図の間では、重

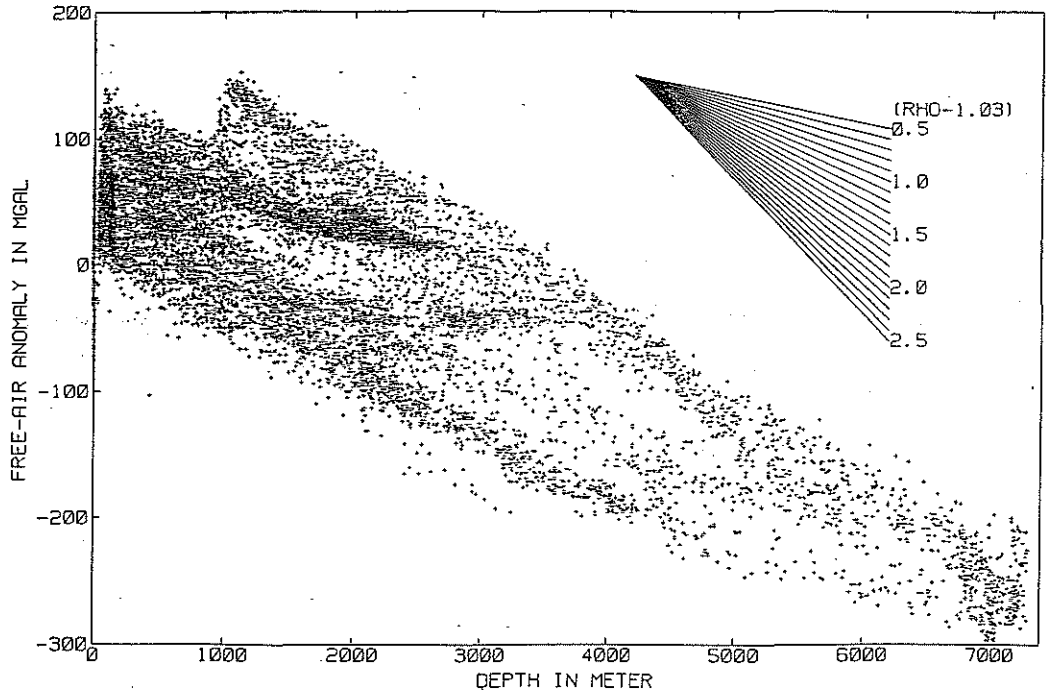


Figure 7. Correlation between free-air anomaly and depth.

力値の極値については若干異なるが重力異常分布の様子はほぼ同じような特徴を示す。東京湾北部のブーゲー異常は基本的にはフリーエア異常と同じパターンを示す。これは、北部では水深が浅く、ブーゲー補正量が0.4~1.7 mGalの範囲に収まるためである。地形との対応について言えば、横浜~川崎沖の負異常域の一部を除き、地形との相関は認められず、ブーゲー異常を支配する原因が海底下の深部構造によるものであると推察される。昭和58年度(1983)のマルチチャンネル音波探査によると東京湾北部の千葉~船橋の沖合、10 km付近で、北東落ち420 mの断層構造が認められており、「東京湾北部断層」と呼ばれた(加藤, 1984)。ブーゲー重力異常図にはこれに伴う顕著な異常は認められないが、断層沿の等値線に若干の垂みが認められており、基盤の落ち込みを反映したのとも考えられる。

東京湾南部でのブーゲー異常では、フリーエア異常にみられた洲崎沖から西へ延びる重力異常の凹状の分布は地形補正により消失し、ほぼ北下りの重力トレンドになっている様子がわかる。一方、これとは対照的に、東京海底谷に沿って、フリーエア異常に認められた重力の凹状の落ち込みは、依然としてブーゲー異常図にも表われており、この海底谷が構造的起源のものであることを示唆する。又東京湾以外にみられる特徴としては、相模湾のブーゲー異常の極小値の位置が、海底地形の最深所よりも若干陸側へずれていること、房総半島の館山付近から重力的な凹部が帯状に東へ延びており、これが鴨川海底谷に沿って分布する負異常域に連続すること、等の特徴が認められる。

5. 東京湾周辺の重力基盤の構造

(1) フーリエ積分法による重力基盤深度の計算

重力異常から基盤構造を求める方法としては、2次元や3次元モデルをもとに、観測される重力異常を説明するようにモデルの形状や密度差等のパラメーターを決定する解析的方法と、重力異常データをもとに、

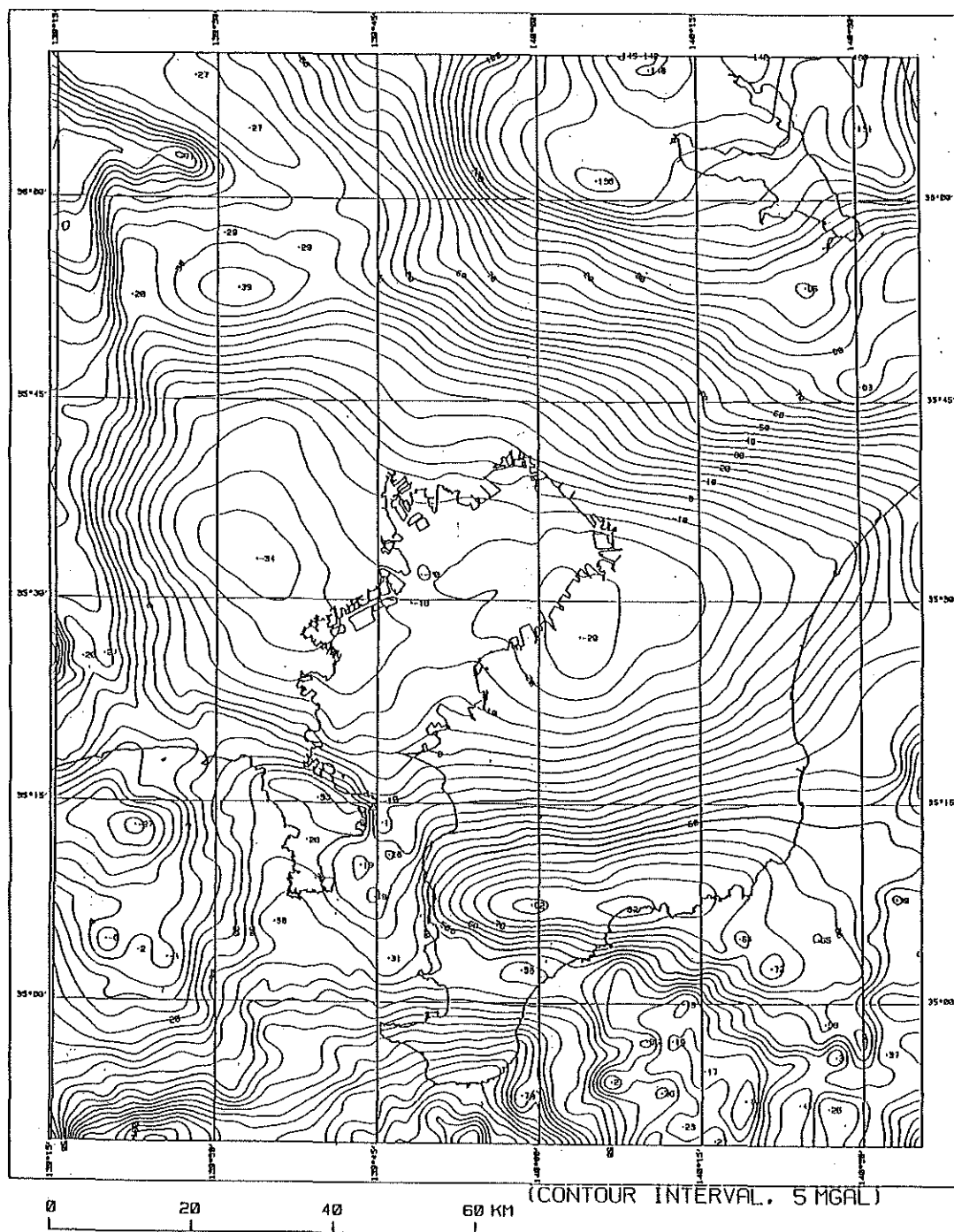


Figure 8 (a)

Figure 8. Bouguer anomaly on/around Tokyo Bay. Contour interval is 5 mGal. Assumed density is 2.0 g/cc for figure 8(a) and 2.3 g/cc for figure 8(b).

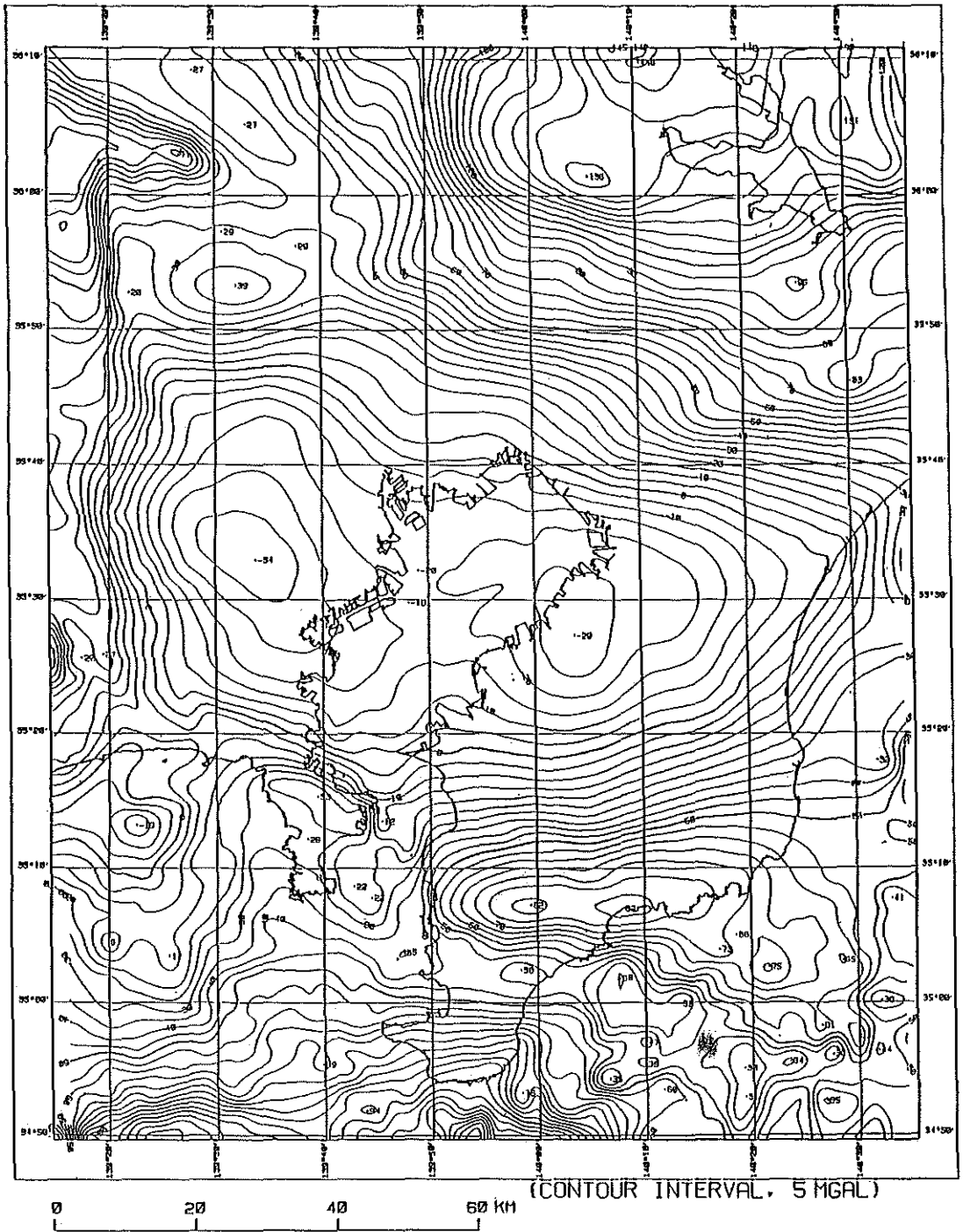


Figure 8 (b)

GRAVITY ANOMALIES AND DERIVED SUBTERRANEAN STRUCTURE
ON/AROUND TOKYO BAY AND SOUTHERN KANTO DISTRICT

フーリエ積分法によるインバージョン処理によって求める方法などがある、後者は広範囲の重力異常データをもとに基盤構造の概略を把握するのに適した方法である。ブーゲー異常分布からフーリエ積分法によって地下構造を推定する場合には、より深部の構造が低周波成分として反映されることから、適当なフィルター

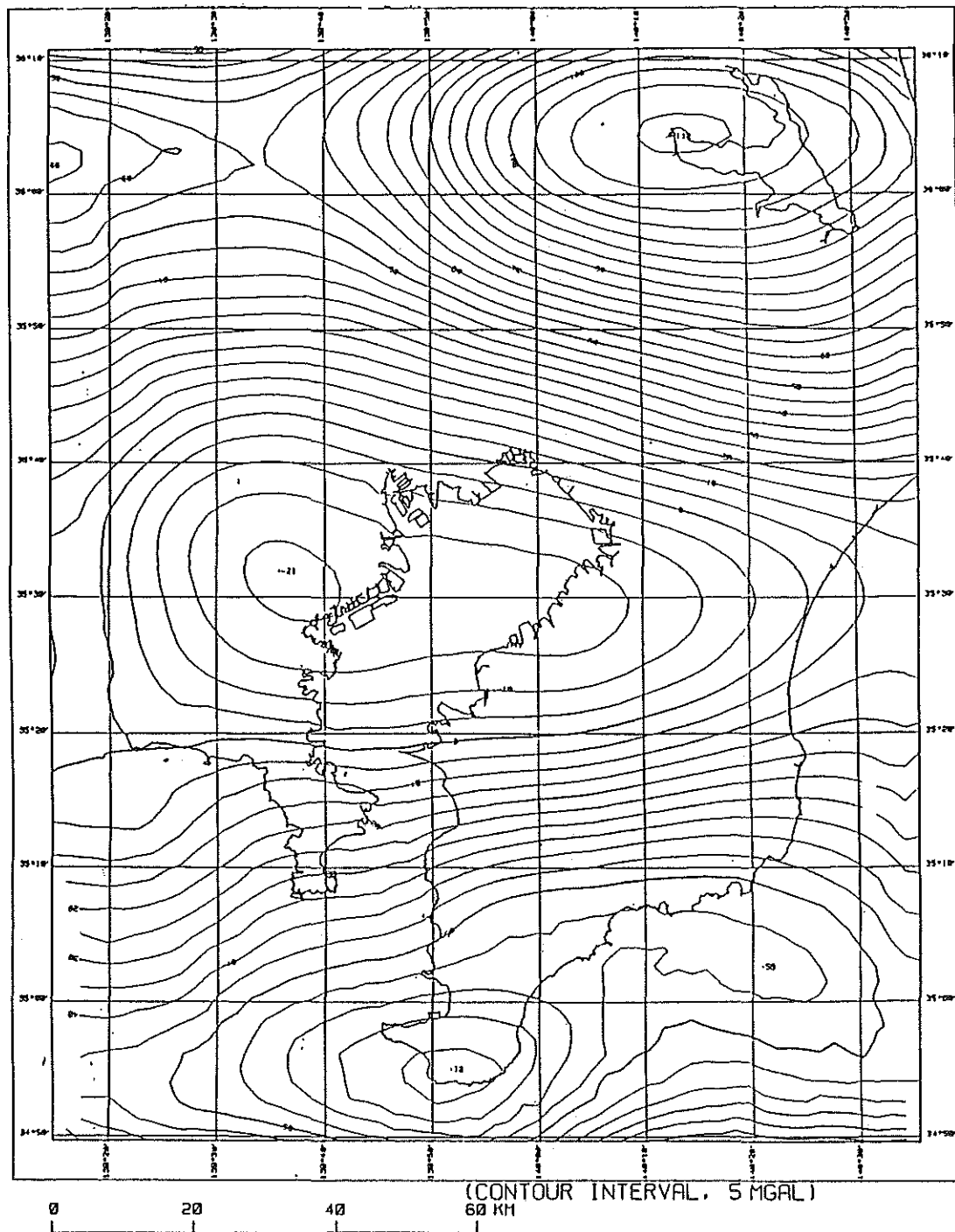


Figure 9. Residual gravity anomaly near Tokyo Bay. Contour interval is 5 mGal.

処理により、このような低周波成分を解析の前処理としてブーゲー異常分布から除去する必要がある。今回は、ブーゲー異常図に南北方向に著しいうねりが見られることから、4次までの Legendre 直交多項式で近似される長波長成分をブーゲー異常分布から除去し、さらに、上方接続10kmのブーゲー異常分布を作成しそれを接続前のものから差し引いた。第9図は、低周波成分として除去した残差重力異常で、地殻深部構造を反映した重力異常と考えられる。

ブーゲー重力異常 $\Delta g(x, y)$ からフーリエ積分法により重力基盤深度を計算する方法は、Tomoda & Aki (1955), 萩原 (1974) により与えられている。それによると、重力基盤の平均的な深さを D 、重力基盤と表層堆積層の密度差を $\Delta \rho$ 、そこからの基盤の起伏を $h(x, y)$ とすると δg と h との間には、 $h \ll D$ の条件下で次式が成り立つ、

$$\Delta g(x, y) \approx G \cdot D \cdot \Delta \rho \iint_{-\infty}^{+\infty} h(x', y') / \{(x'-x)^2 + (y'-y)^2 + D^2\}^{3/2} dx' dy' \quad \dots\dots (2)$$

Δg のフーリエ変換を $\Delta G(\omega_1, \omega_2)$ 、 h のフーリエ変換を $H(\omega_1, \omega_2)$ とすると、(2)式の両辺のフーリエ変換を求めることにより

$$H(\omega_1, \omega_2) = \frac{\exp(D \cdot \sqrt{\omega_1^2 + \omega_2^2})}{2\pi G \cdot \Delta \rho} \cdot \Delta G(\omega_1, \omega_2)$$

が成り立つ。これより $H(\omega_1, \omega_2)$ のフーリエ逆変換から

$$h(x, y) = \frac{1}{2\pi G \cdot \Delta \rho} \iint_{-\infty}^{+\infty} \phi'(x', y') \cdot \Delta g(x-x', y-y') dx' dy' \quad \text{となる。}$$

ここで、 $\phi(x, y) = \frac{1}{\pi^2} \int_0^{s\omega_1} \int_0^{s\omega_2} \exp(D \cdot \sqrt{\omega_1^2 + \omega_2^2}) \cdot \cos \omega_1 x \cdot \cos \omega_2 y d\omega_1 \cdot d\omega_2$ であり、角周波数に関する積分領域は $|\omega| < \pi/s$ (s : サンプルング間隔) を満足する範囲である。フーリエ積分法では、重力基盤の平均的な深さ D の2倍より短い波長の重力異常を予め除去する必要がある、このため実際の計算では $L > 2D/S$ を満たす L 点ごとのデータを用いた。

(2) 東京湾周辺の重力基盤深度の特徴

今回の解析に用いた平均深度は、東京湾の音響基盤深度を参考にし、 $D = 2500$ m とした。又、重力基盤と表層堆積層の密度差 $\Delta \rho$ は 0.6 g/cc を仮定した。第10図(a), (b)は、それぞれ第8図の仮定密度 2.0 g/cc と 2.3 g/cc によるブーゲー異常図をもとに、フーリエ積分法で求めた重力基盤深度図である。全体的に仮定密度 2.3 g/cc の方が基盤深度はやや深くなる傾向が見られるが、重力基盤の起伏は両者ともほぼ同じ傾向を示す。又、第11図には、重力基盤深度図に代表的な断層と首都圏付近の M6 クラス以上の震源分布を示したものである。

今回求めた重力基盤の構造と、地震波速度構造や音響基盤構造との比較を第12図に示す。上段は、多田 (1982) により求められた夢の島-江の島測線に沿う地下の地震波速度構造と比較した結果で、下段は、東京湾のマルチチャンネル音波探査音から求められた音響基盤 (加藤, 1984) との比較である。両者とも、重力基盤の起伏は、地震波速度の構造 (2.1 km/s と 5.3 km/s の境界) や先新第3系の基盤と推定される音響基盤の構造と比較的良好一致しており、今回求めた重力基盤深度図は、具体的には上記に述べた構造に対比できるものと推定される。

首都圏における基盤深度図としては、垣見ほか (1973), 衣笠 (1980), 多田 (1982), 駒沢 (1985) 等の資料もある。今回まとめた図にも、従来から知られていた陸部における特徴的な基盤構造が認められるが、東京湾を含む海域部と陸域部との構造の関連性、及び、房総半島付近の基盤深度については、従来のもものでは、資料

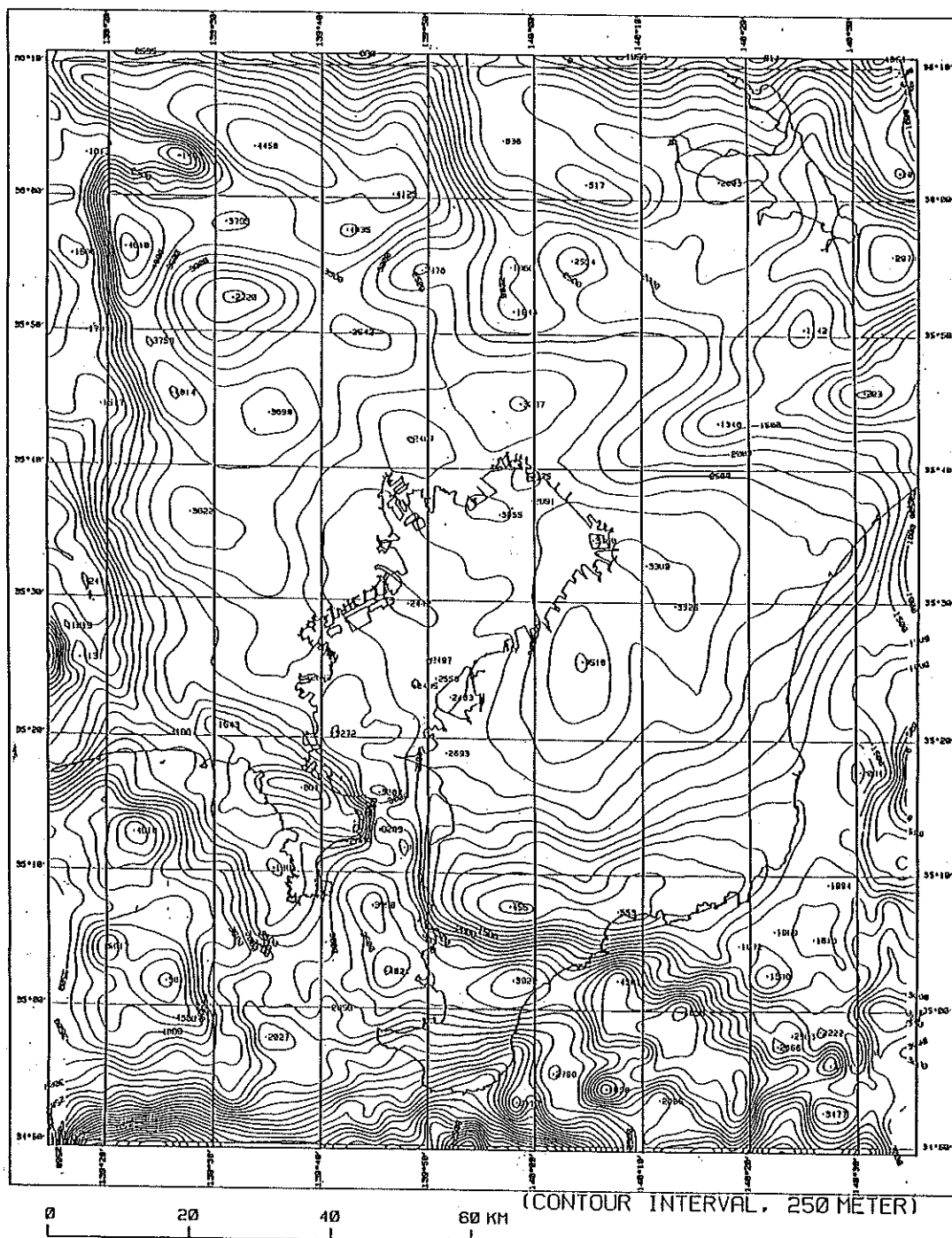


Figure 10 (a)

Figure 10. Gravity basement depth map calculated by fourier integral inversion method. Assumed mean depth is 2.5 km and density contrast is 0.6 g/cc. 10(a) is calculated from Bouguer anomaly of Fig. 8(a) and 10(b) from Fig. 8(b).

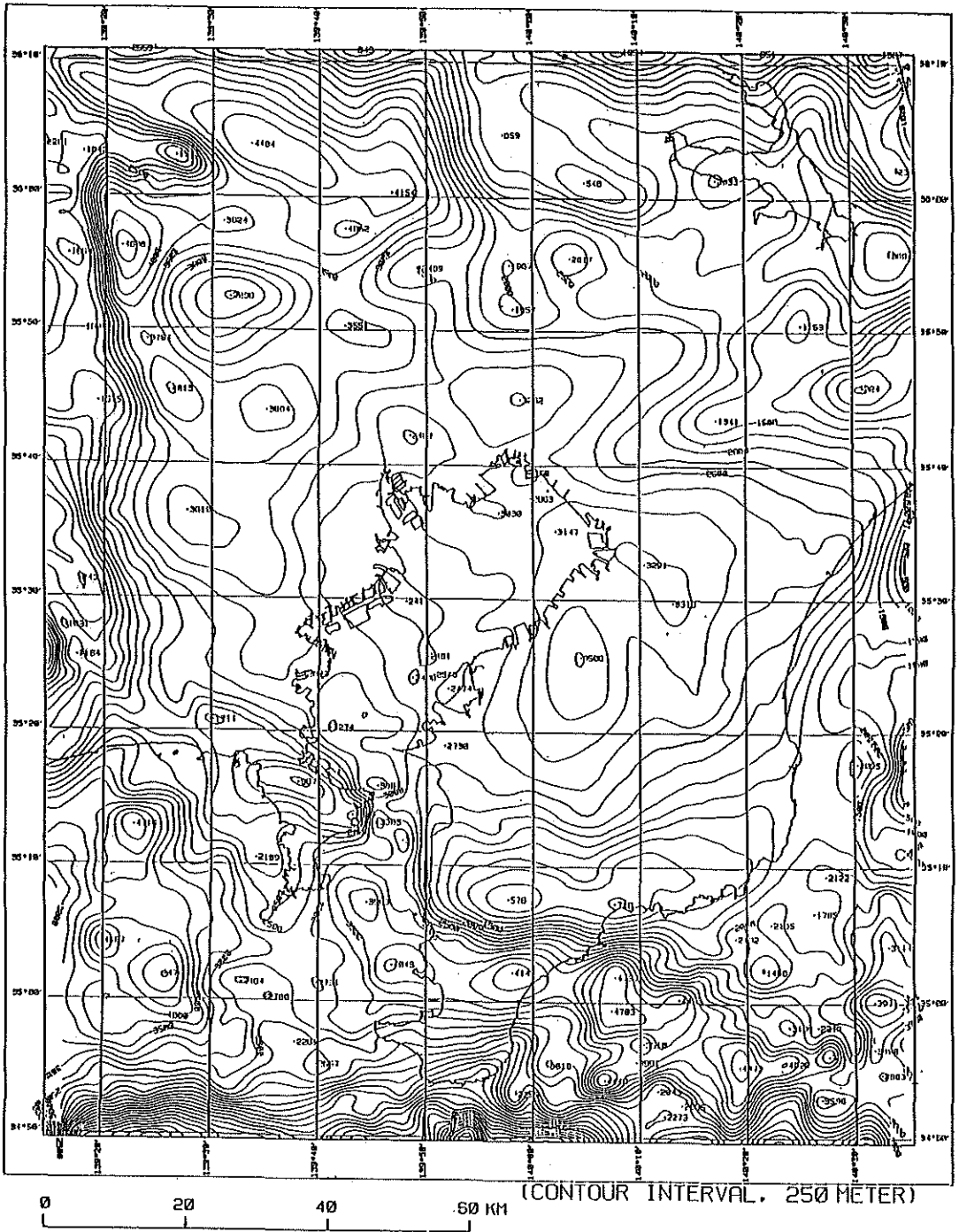


Fig. 10 (b)

SCALE = 1:1000000

BASEMENT MAP

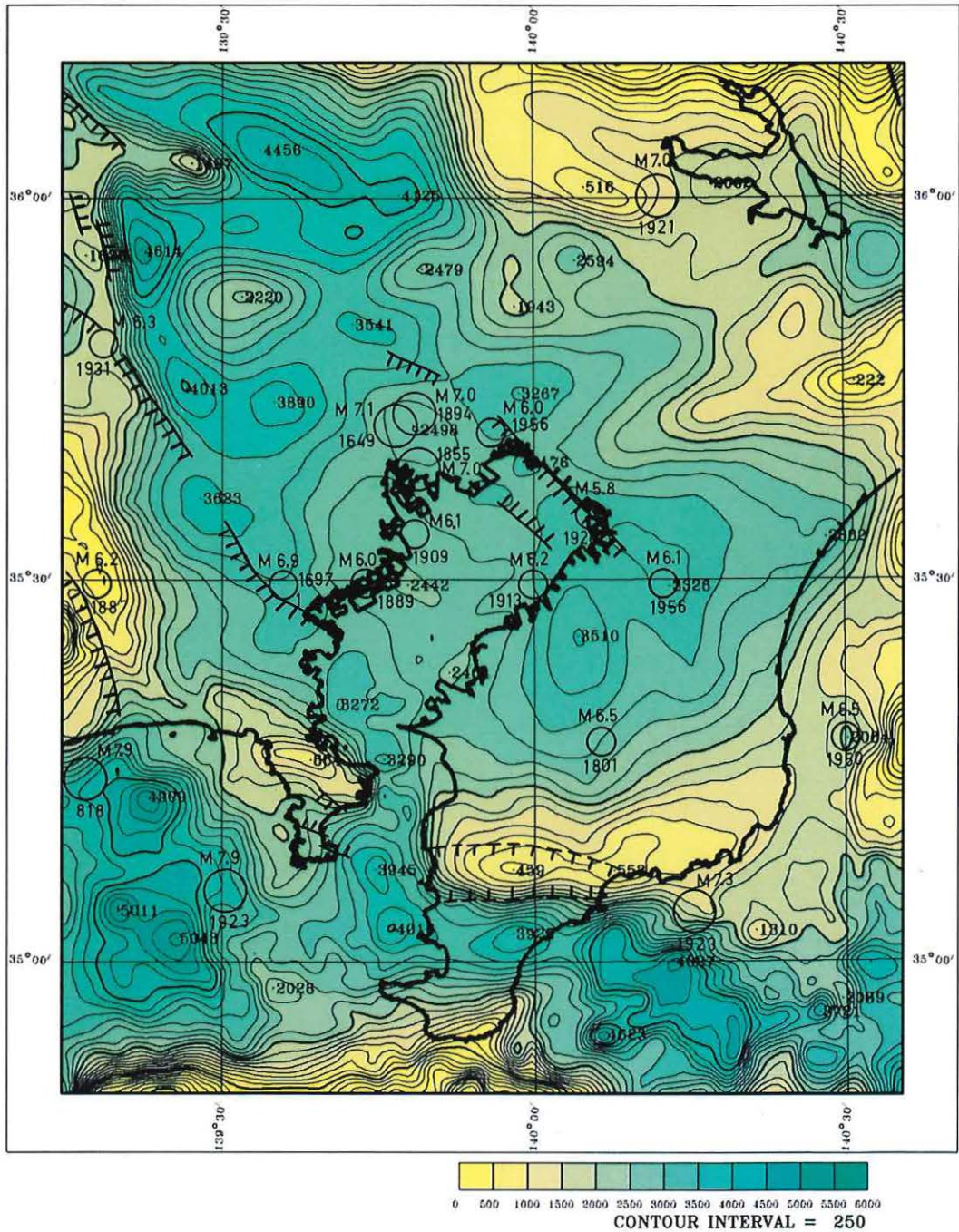


Figure 11. Tectonic map on/around Tokyo Bay.

Active fault (—) and estimated active fault (---) are shown. Epicenter of some earthquakes are also shown by open circle with magnitude and year of occurrence.

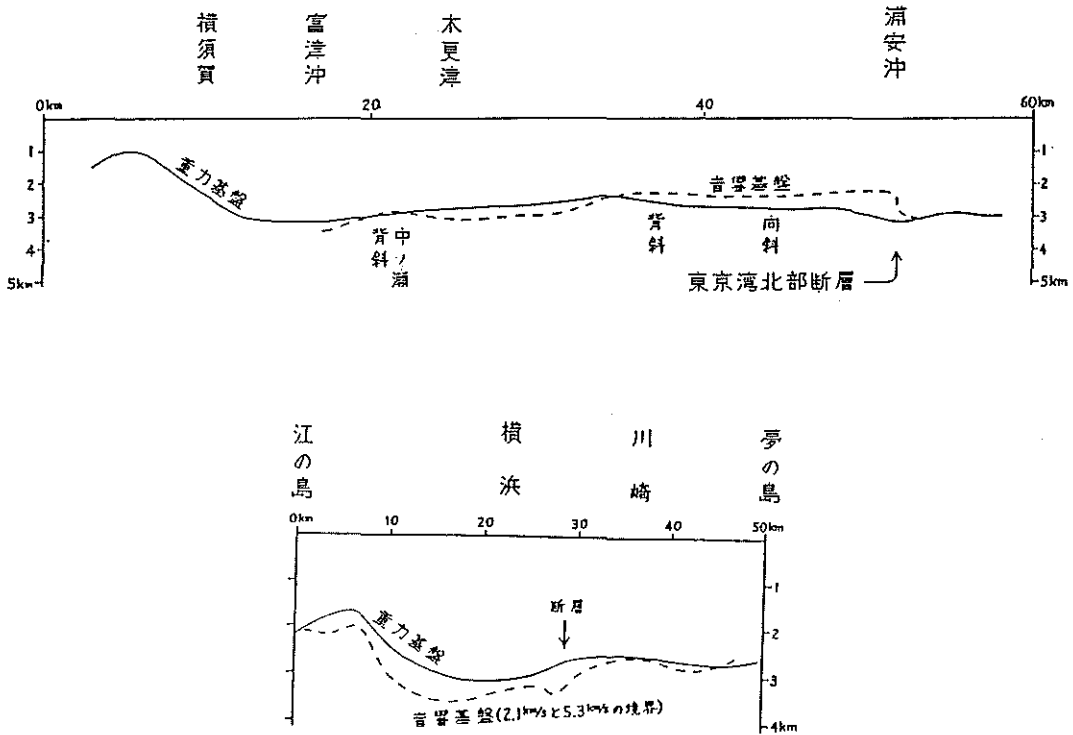


Figure 12. Gravity basement are compared with acoustic basement beneath Tokyo Bay (Kato, 1984) and with elastic velocity structure of Enosima-Yumenosima line, determined by land exposition exploration (Tada, 1982).

の制約もあって空白域として残されていた部分である。

東京湾北部では、湾央付近が基盤の隆起部となっており、その南北両側では基盤深度は3000m以上の深さとなっている。このような傾向はマルチチャンネル音波探査から推定された先新第3系の基盤深度と調和的である。東京湾の北東部では、千葉から船橋付近にかけてNW方向に延びる断層（楡井、ほか、1972）と東京湾北部断層」とが対となって地溝帯を形成していると考えられている。この地溝帯の陸部への延長部が千葉付近に認められる（萩原ほか、1986）、東京湾北部付近では、歴史的にもM6以上の直下型地震がたびたび発生しているところで、これらの震源域が基盤の隆起部に発生しているようにみえる。特に、船橋の断層線上に沿ってはその傾向が顕著である。

富津岬以南の東京湾南部では、東京海底谷に沿ってほぼ南北方向に4000m以上に達する基盤の落ち込みが認められ、東京海底谷が構造的な谷地形であることを示唆する。三浦半島、房総半島では、葉山一嶺岡隆起帯に沿う重力基盤の高まりが認められるが、この隆起帯も東京海底谷によって分断されている。隆起帯の南縁部には活断層である鴨川地溝帯南断層（活断層研究会、1980）が知られており、その海域部への延長上に千葉県勝浦沖地震（1923年、M7.3）の震源域が一致するようにみえる。又、房総半島の嶺岡隆起帯の南側にも基盤の落ち込みが認められる。陸上地質でも那古船形と和田浦を結ぶ線上に保田層群を切る断層が認められており、一部では那古構造線とも呼ばれている。この構造線に沿う基盤の凹部は、鴨川海底谷に連なるようにみえる。

相模湾の重力基盤深度は5000m近くに達しており、三浦半島側が基盤の急変部となっている様子がわかる。この付近の水深は1500m前後であることから、堆積層の厚さは3000m以上に達するものと考えられる。又、重力基盤の最深部は地形の凹部よりやや陸側にずれている。1923年の関東地震の震源域も重力基盤の急変部に位置するように見える。

以上述べたように、東京湾周辺の重力基盤深度と既存の断層や震源域とは比較的よい対応がみられることがわかる。このようなことから、活断層が発見されていない地域でも、重力基盤の急変部では断層が存在している可能性もあろう。また、地震に伴う被害は、地盤の堆積層の厚さにも関連しており、今回の重力基盤深度図がこのような防災面でも広く有効利用されることを期待したい。

(3) 東京湾の重力異常とモホ面の傾斜

前節では、フーリエ積分法から求められた重力基盤深度とその特徴について報告した。しかし、ここで述べた重力基盤とは、地質的には先新第3系の基盤に相当するものであり、それ以深の深部構造については、今までの議論には盛り込まれていない。しかし、東京湾の重力異常は、以下の解析結果に述べるように先新第3系の基盤構造だけでは説明できず、それ以深のモホ面の傾斜等を考慮する必要がある。ここでは、東京湾の第13図に示すT1、T2断面の解析結果を紹介し、東京湾の重力異常と深部構造との関連について論ずる。

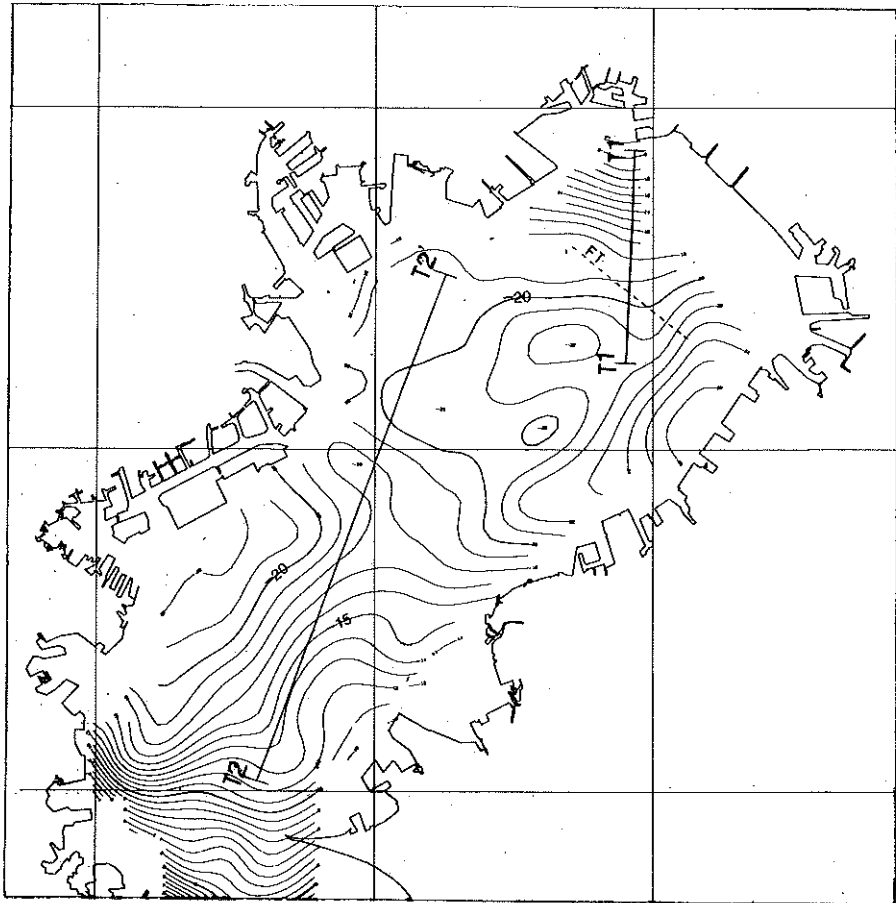


Figure 13. Gravity anomaly profile along T1 and T4, which are analyzed by two-dimensional method.

イ) T1-T1' 断面の解析結果

T1断面の解析結果を第14図(a), (b)に示す。(a)はマルチチャンネル音波探査から求められた音響基盤を重力基盤とし、堆積層と基盤との密度差を0.6g/ccと仮定した場合の重力異常を計算した結果である。図中矢印で示す位置が「東京湾北部断層」に対応しており、ここでは基盤が2500mから2900mへと落ち込んでい

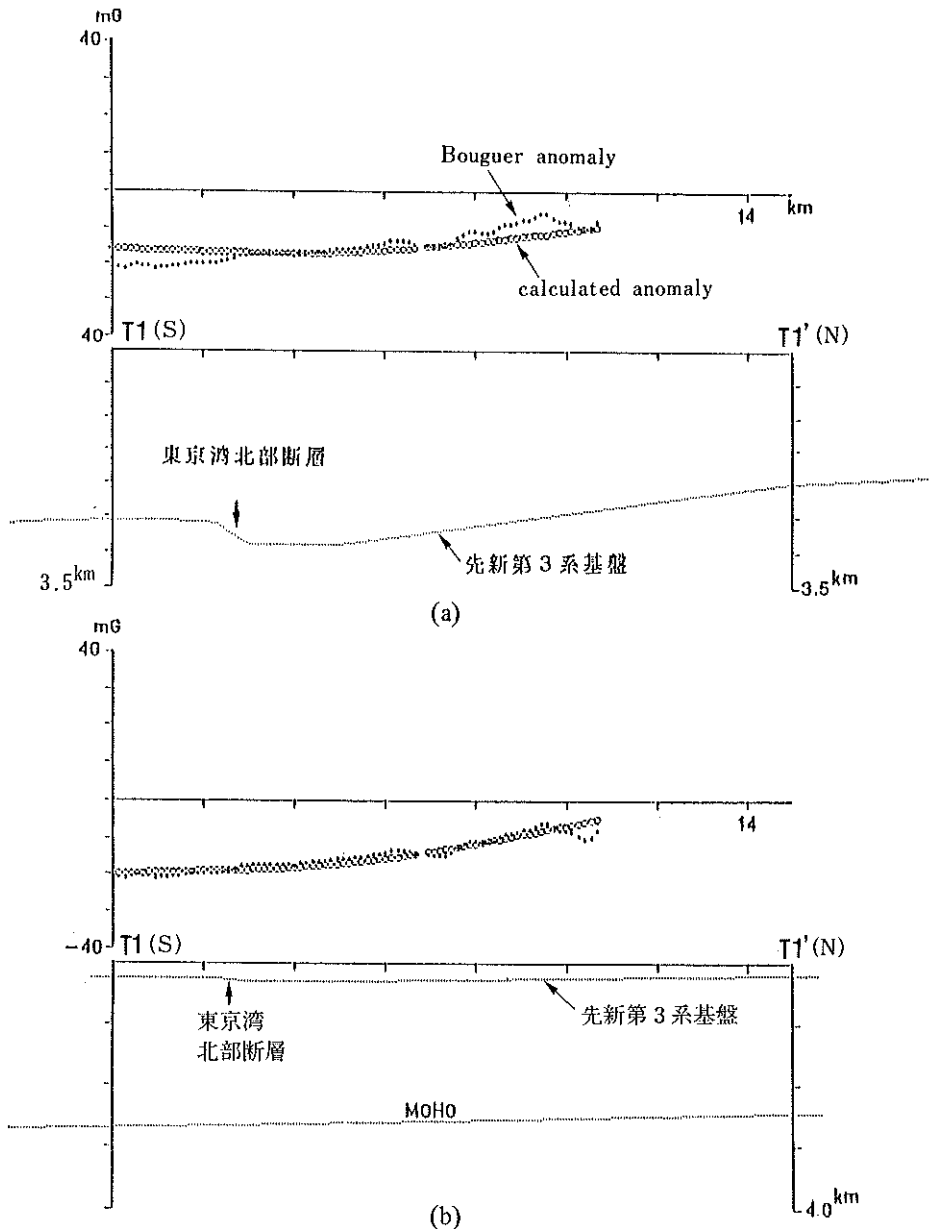


Figure 14. Results of gravity analyses on profile T1-T1'. Observed bouguer anomaly is shown by solid point, and calculated one by open circle. In this calculations, density contrast of Pre-Neogene basement is assumed to be 0.6 g/cc and that of mantle layer 0.4 g/cc. In model (a), only Pre-Neogene basement was used for model analysis, in model (b) slope of Moho boundary as well as Pre-Neogene basement are included in calculation.

る。このT1測線の陸側では、試錐が行われており、2073mと2136mで先新第3系基盤に達することが知られている。今回の計算では、基盤の最大傾斜を見積り、断層直下を3000m、陸の岸線付近の基盤を2000mとして重力基盤モデルを作成した。図中の「○」印は計算値、「*」印は観測値である。断層に伴う重力異常の落ち込みは数mGal程度のゆるやかな凹状の分布を示し、又、基盤の傾斜を反映して北上りの緩やかなトレンドが認められる。しかし、実際の重力異常は計算値と比べより急であり、このような特徴を説明するためには、先新第3系以深の構造も考慮する必要があることがわかる。図(b)の結果はこのような特徴を説明す

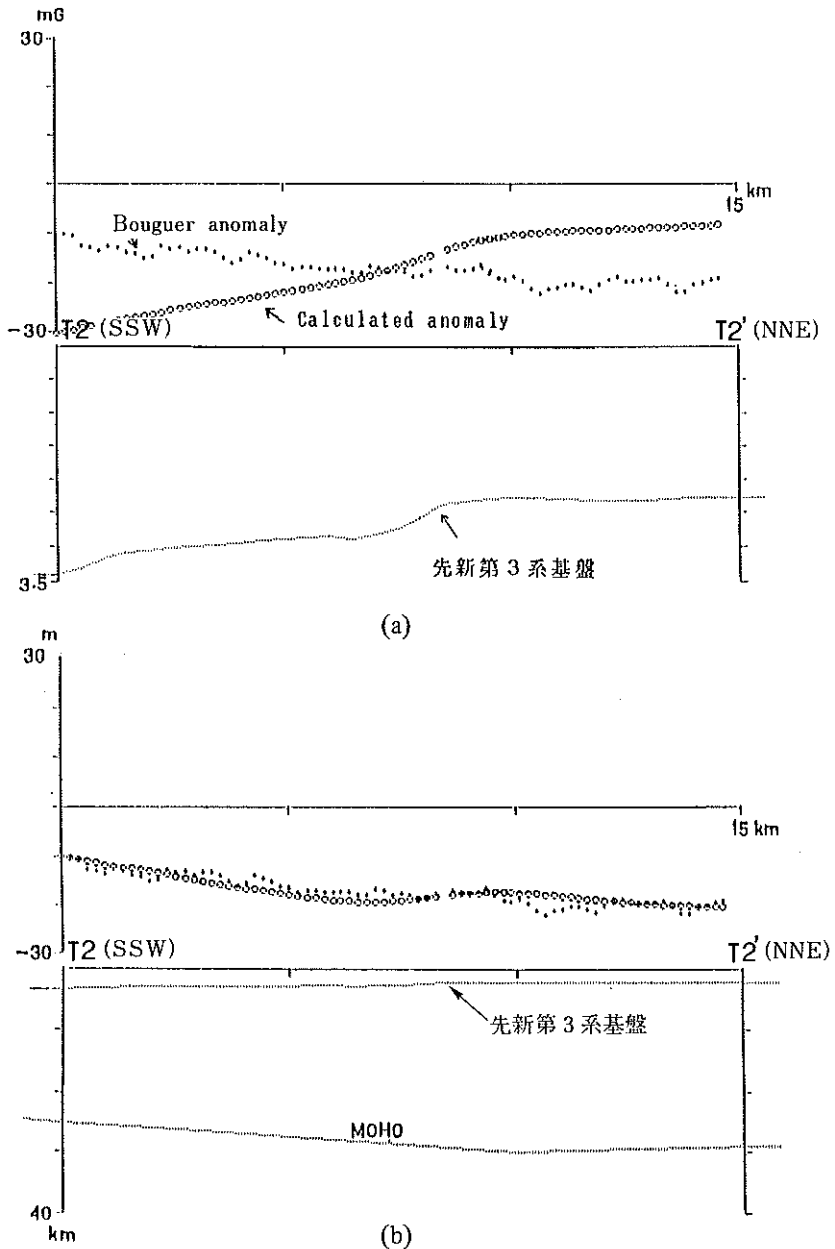


Figure 15. Results of gravity analysis on profile T2-T2'. See to Figure 14 for explanations of figures.

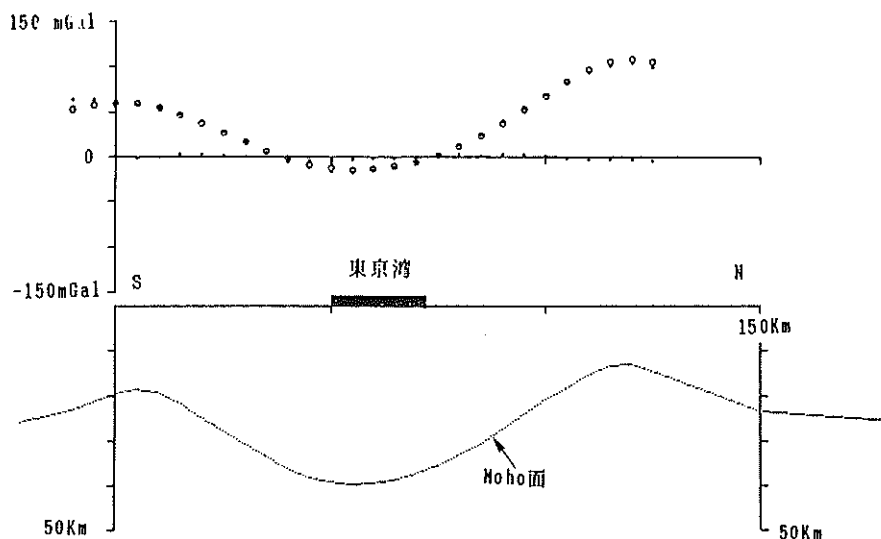


Figure 16. Undulation of Moho boundary derived from residual gravity anomaly (Fig. 9) along E140°00'. Southern site is N35°00' and northern site correspond to N36°20'. Observed gravity anomaly is shown by solid point, and calculated one by open circle. In this calculation density contrast of mantle layer is assumed to be 0.4g/cc.

る試みとして、モホ面の傾斜を仮定した場合の計算結果である。なお、本計算では、上部マントルと地殻との密度差を0.4g/ccと仮定している。このようなモデルで重力異常を計算すると、観測値と計算値とは非常に良く一致する。

ロ) T2-T2' 断面の解析結果

T2断面についてもT1断面と同様の解析を行った。その結果を第15図に示す。先新第3系の基盤は南側の富津沖で3.5kmで、川崎沖で基盤が500m程急激に盛り上がり、全体とみれば、南から北へ基盤が浅くなっている。計算した重力異常値も、これに対応して南から北へ増加する。しかし、実際のブーゲー重力異常は、これとは逆の傾向を示し、南から北へ向って減少する。このようにT2断面での重力異常は、先新第3系の基盤だけで説明することができないことは明らかであり、このような重力異常の特徴を説明するためにはモホ面などの深部構造を考慮する必要がある。同図(b)は、モホ面の起伏を考慮した場合の計算結果で、このようなモデルによれば、計算値と観測値は極めて良く一致することがわかる。

ハ) モホ面の起伏

T1, T2断面の解析結果から、東京湾の負の重力異常を説明するためには、単に先新第3系の基盤だけではなく、モホ面の傾斜等の深部構造も考慮しなければならないことが結論される。ここでは、第9図に示す残差重力異常図の経度140°の南北断面に沿う重力異常にもとづき、モホ面の起伏を求めた。その結果を第16図に示す。なお、この計算ではマントル上部と地殻との密度差を0.4g/ccと仮定した。この結果によると、モホ面は約100kmの波長で深さ12kmから32kmにわたる起伏を有することがわかる。このように東京湾の海底下の構造は、単に先新第3系の堆積層だけでなく、地殻そのものが周囲と比べ厚くなっており、この付近のテクトニクスを考えるうえで重要な特徴の一つと言えよう。

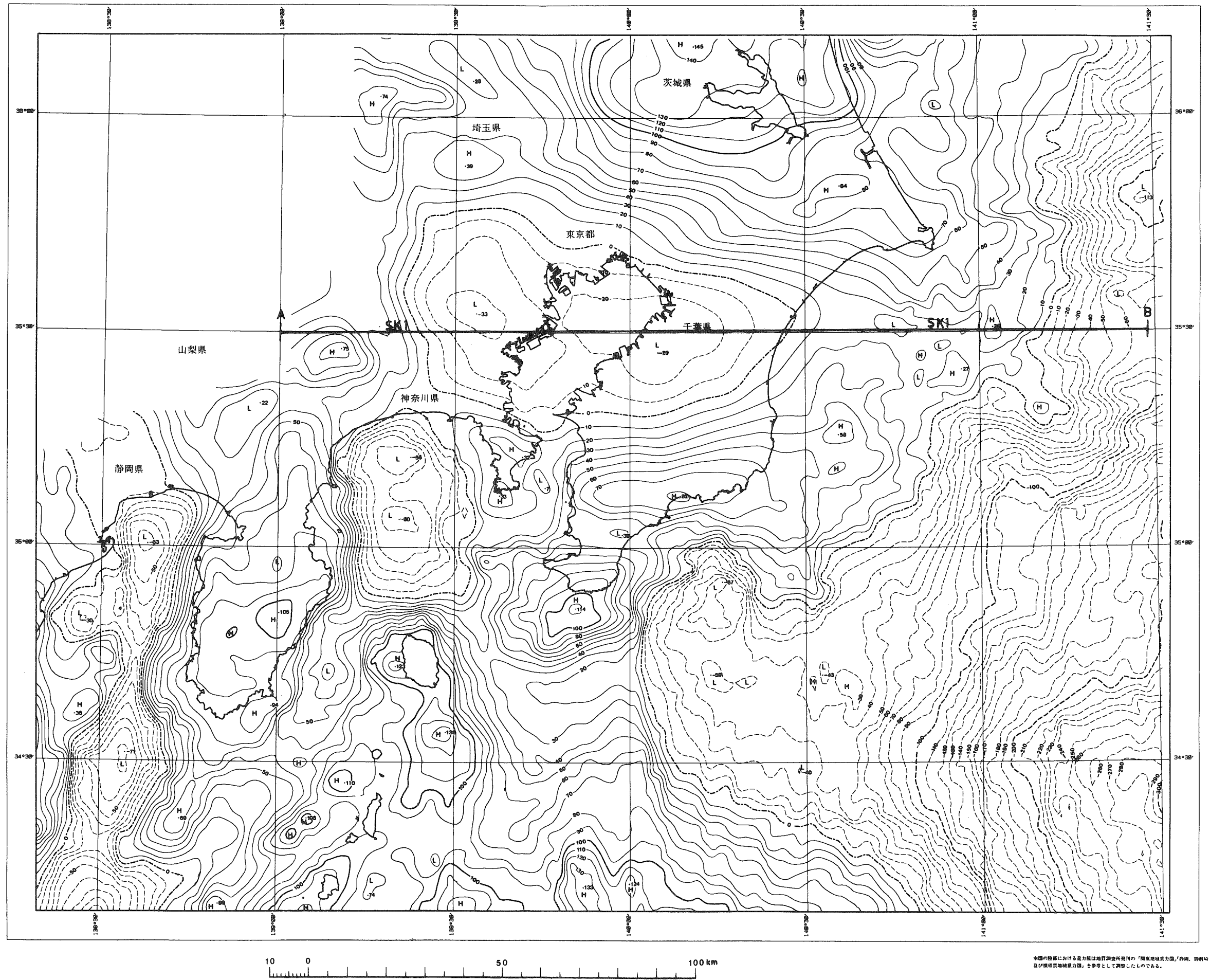


Figure 17. Free-air gravity anomaly on/around southern Kanto district.

Land gravity anomaly is referred to Gravity map of shizuoka, omaezaki and yokosuka (Bouguer anomalies map) and Gravity map of Kanto district (bouguer anomalies map) edited by Geological survey of Japan. (1982, 1985).

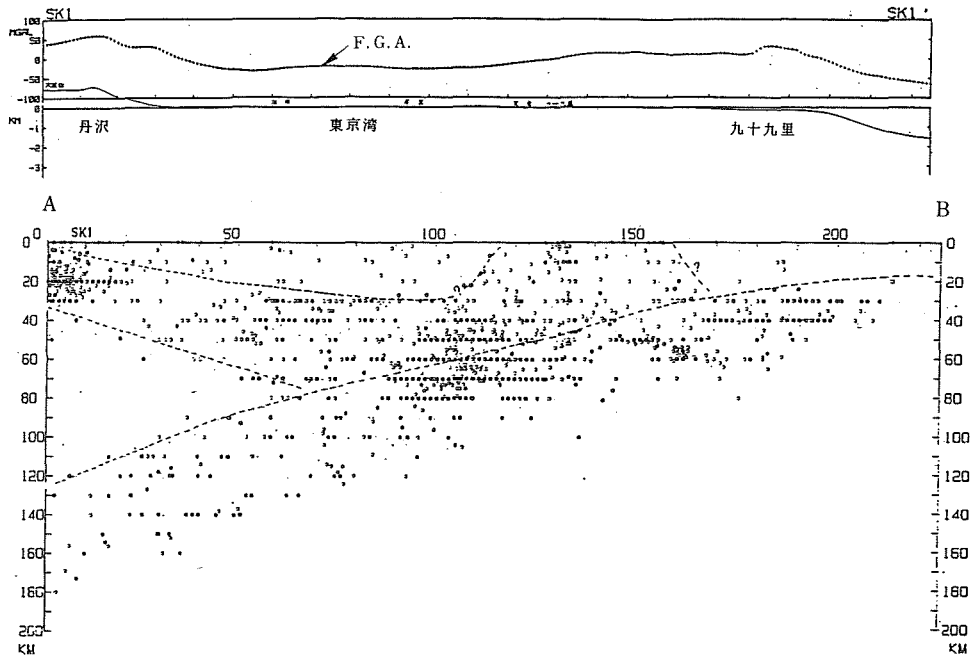


Figure 18. Bouguer gravity and seismic focal depth profile along SK1 in Fig. 17.

6. 南関東周辺の広域重力異常と深部構造

第17図は、今回の東京湾の重力測量の成果と、水路部が海の基本図計画及び地震予知計画の一環として実施した海上重力測量の結果をとりまとめたものである。なお、陸域部については、地質調査所より刊行された静岡・御前崎及び横須賀地域重力図(1982)、関東地域重力図(1985)を参考に等値線を描画した。

この図から、南関東周辺海域の重力異常の特徴として、以下のことが認められる。

- ① 駿河トラフに沿う負の重力異常は -70mGal にも達し、その凹状の異常が伊豆半島の北側を通り、相模湾の -60mGal の負異常に連続する。
- ② 駿河トラフ・相模トラフ沿の重力異常の極小部は、地形の凹部と比べやや陸側に位置すること。
- ③ 相模湾の負異常の一部は伊豆半島と伊豆大島の間の海域部に延び、そこで重力的な凹部を形成している。
- ④ 相模トラフに沿う負異常の一部は鴨川海底谷に連続し、那古一船形構造線に沿う重力的凹部に連続する。
- ⑤ 三浦半島や房総半島先端付近には、地震に伴う隆起地形が認められるところであり、重力異常も相対的に凸状の分布域となっている。

第18図は、北緯 $35^{\circ}30'$ に沿う重力異常の東西断面で、下段には震源の深度分布図を示した。重力異常の断面図からは、東京湾付近が重力的凹部で、その両側が相対的に重力の凸部になっていることがわかる。又、震源の断面図からは、太平洋プレートとフィリピンプレートの沈み込みに伴う地震の分布、両プレートが東京湾の直下付近で衝突し、フィリピンプレートの一部が、九十九里沖にのし上げている様子などが認められる。又、東京湾湾中央部にみられる先新第3系基盤の隆起部がフィリピンプレートと太平洋プレートの会合付近と一致しており、この付近に東京湾北部域のM 6以上の直下型地震の震源が集中していることは、今後の

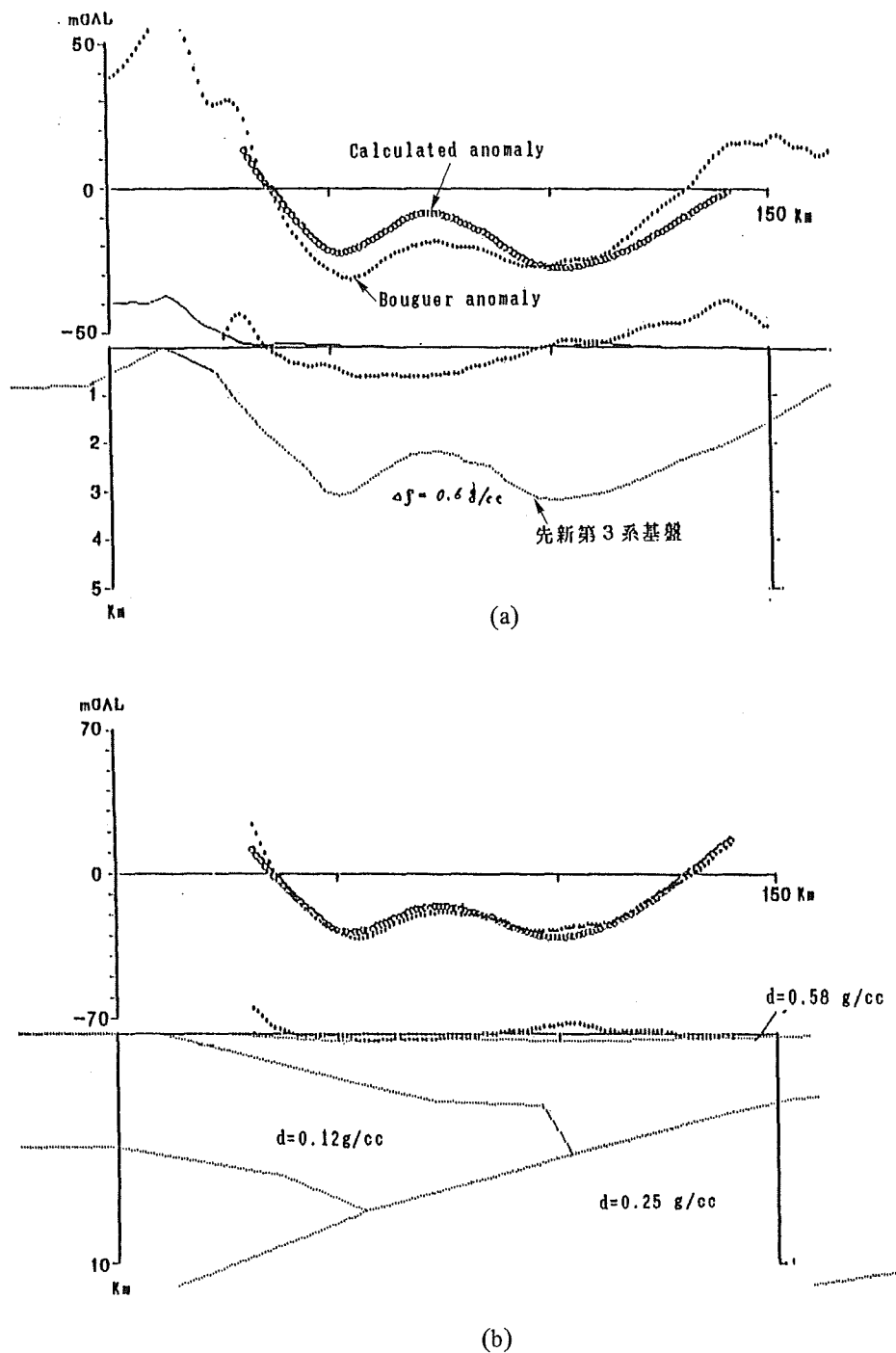


Figure 19. Results of gravity anomaly analysis on profile SK1 in Fig. 17.

In model (a), only Pre-Neogene basement is used for gravity calculations. The fitness between observed bouguer anomaly and calculated one become better, when subducting Philippine plate and Pacific plate are modeled in calculation (b). Derived density contrast of Pre-Neogene basement become 0.58 g/cc and that of Philippine plate 0.12 g/cc and 0.25 g/cc for Pacific plate respectively in model (b).

直下型地震の発生機構の解明にとって重要な意味をもつものと考えられる。

本断面に沿う重力異常の解析結果を第19図に示した。Fig19 (a) の結果は、衣笠(1980)、多田(1982)等により求められた先新第3系の基盤をもとに、重力異常を計算した結果である。なお、ここでは基盤と堆積層の密度差を0.6g/ccと仮定した。この結果によると、計算値と観測値との差には東上りの重力トレンドが残差として現われることがわかる。一方、Fig19 (b) の結果は、震源断面図をもとに、先新第3系の基盤に伴う密度差とともに、太平洋プレートとフィリピンプレートの沈み込みに伴う重力異常も考慮に入れた解析結果で、各部の密度差を2次元タルワニ法による最小二乗法により求めた。Fig19 (b) の結果には、Fig19 (a) にみられたような残差のトレンドは消失し、計算結果は観測値に非常に良く一致することがわかる。ちなみに、この解析から求めた各部の密度差は、先新第3系基盤で0.58g/cc、太平洋プレートは0.25g/cc、フィリピンプレートが0.12g/ccであった。今回求めた太平洋プレートの密度差は、Segawa & Tomoda (1976) や、吉井(1986)、萩原(1986)などのそれと比べ2倍近い値となっている。これは、今回の解析過程に、モホ面の傾斜を考慮しなかったため、恐らく、東西方向の重力トレンドの半分近くは、モホ面の傾斜に伴うものとして解析すれば、太平洋プレートの密度差も、他の結果から推定されている0.10~0.15g/ccの値になるものと考えられる。最近では爆破地震の結果から、南関東周辺のモホ面の起伏についても有益な情報が得られつつあり、これらの結果を用いることができれば、プレートの沈み込みに伴う重力異常についても、より確定的で、詳細な議論が可能になるであろう。

7. おわりに

本研究は「首都圏における直下型地震の予知及び総合防災システムに関する研究」(科学振興調整費による)の一環として、海上保安庁水路部が昭和59、60年度の2ヶ年度にわたり実施した東京湾の海上重力測量とその成果について述べたものである。今回の研究により、次のことが明らかとなった。

- 1) 富津岬以北の東京湾北部のブーゲー重力異常は全体的に負異常域となっており、それらが陸域からのびる姉崎沖と横浜沖の二つの負異常域に分れること。
- 2) 又、上記2つの負異常域の境界域は重力的凸部で、先新第3系基盤の隆起部に相当する。震源プロファイルによればこの部分はフィリピンプレートと太平洋プレートの衝突付近にあたり、この付近に東京湾北部域の直下型地震の震源が集中する傾向が認められる。
- 3) 東京湾北部の負の重力異常は先新第3系の基盤の起伏だけでは説明できず、モホ面の起伏等の深部構造を考慮する必要がある。又、東京湾付近は地殻そのものが厚くなっており、これが負異常の一つの原因である。
- 4) 東京海底谷は、単なる侵食地形ではなく、先新第3系基盤の落ち込みを伴う構造的な地形であること。又、基盤の落ち込みは4000mにも達すること。

又、東京湾の海上重力測量の結果とともに、水路部が海の基本図計画及び地震予知計画の一環として実施した海上重力測量の結果をとりまとめ、南関東周辺フリーエア重力異常図を作成した。本図の北緯35°30'に沿う重力異常の東西断面の解析結果からは、先新第3系の基盤だけでなく、太平洋プレートやフィリピンプレートの沈み込みを重力異常の構造モデルに組み入れることにより、実際の観測異常が非常に良く説明できることが明らかとなった。

本稿を終るにあたり、測量の実施について御協力をいただいた測量船「昭洋」船長以下乗組員の方々、測量班堀井良一氏、並びに、第三管区海上保安本部関係者の方々に厚くお礼申し上げる。また、陸上の各従属点

では、木更津市立金田中学校、習志野市役所を始め多くの方々の御協力を得た。ここに記して深く感謝の意を表したい。

なお、本研究の実施については、測位作業及び資料整理の一部を、水路部の指導監督のもと、川崎地質俣がこれを実施した。ここに記して謝意を表したい。

なお、本論文で使用した震源データは、気象庁地震月報デジタルデータである。記して関係各位に感謝の意を表する次第である。

参 考 文 献

- Briggs, I. C. 1974: Machine contouring using minimum curvature, *Geophysics*, 39, 39-48.
- 萩原幸男 1978: 地球重力論, 共立出版
- 萩原幸男・林田一郎・長沢 士・大久保修平 1986: 東京湾北部断層内陸延長部の重力調査, 日本測地学会第65回講演要旨集.
- 萩原幸男 1986: 太平洋プレートとフィリピン海プレートの中中部日本重力場への影響, 測地学会誌, 32巻, 12-22.
- 藤井陽一郎 1974: 関東地方の重力とテクトニクス, 関東地方の地震と地殻変動 (垣見俊弘・鈴木尉元編), 215-220.
- 加藤 茂 1984: 東京湾におけるマルチチャンネル反射法音波探査, 水路部研究報告, 19, 1-57.
- 垣見俊弘・衣笠善博・木村政昭 1973: 後期新生代地質構造図-東京-, 地質調査所
- Ganeko Y. Takemura T. and Harada Y. 1982: Gravity survey in Io Sima, Data Report of Hydrogr. Obs., Series of Astronomy and Geodesy, No. 16, 57-63.
- 衣笠善博 1980: 関東地方の平野部における先新第3系基盤の深度分布図, 地震予知連絡会地域部会報告2 「首都及びその周辺の地震予知」, 68.
- 駒沢正夫 1987: 都市地盤と深部地質構造講演要旨集, 8-11.
- 多田 堯 1982: 関東平野の基盤構造と重力異常(1)-基盤深度図-, 地震2, 35, 607-617.
- Tomoda, Y. and K. Aki 1955: Use of the Function $\sin x/x$ in Gravity Problems, *Proc. Japan Acad.*, 31, 443-448.
- 佐藤任弘・菊池真一 1984: 首都圏における直下型地震の予知及び総合防災システムに関する研究, -東京湾海底地殻構造調査-, スーパーカーによる音波探査, 昭和58年度研究成果報告書, 海上保安庁, 106-111.
- Segawa, J. and Tomoda Y. 1976: Gravity measurements Near Japan and Study of the upper mantle beneath the oceanic trench-marginal sea transition zones, *Geophysical monograph No. 19, The geophysics of the Pacific Ocean Basin and its margin*, 35-52.
- { 地質調査所 1982: 静岡・御前崎及び横須賀地域重力図 (ブーゲー異常図)
- { 地質調査所 1985: 関東地域重力図 (ブーゲー異常図)
- 楡井 久・樋口茂夫・原 雄・石井 皓・白非常之・古野邦雄・真鍋健一・立石雅昭 1972: 船橋市の地下地質と地盤沈下観測井, 千葉県公害研報, 1, 47-74ページ