

# ボックスカルバート上におけるマイクロ重力探査

野崎京三・加藤元彦

## Experiments of Microgravity Survey for the Detection of Box-Culverts

Kyozo NOZAKI and Motohiko KATO

### abstract

Microgravity survey has been performed crossing over underground box-culverts. The original gravity anomaly distribution in microgravity survey is generally very noisy than that of ordinary gravity survey. Our main purposes are then focused on (1) to extract gravity anomalies due to the objective underground structures as a box-culvert from the original gravity anomaly distribution and (2) to evaluate the reliability of the extracted gravity anomalies.

By using a newly proposed method of filtering, "A Method of Noise Analysis" which is based on Fourier analyses and statistical theory, the selection of filter characteristics to be adopted to the original gravity anomaly distribution becomes fairly easier than in a case of using a traditional one. The filtered gravity anomaly distributions are statistically tested and the anomalies in them are confirmed with a reliability of more than 97.5%. Besides, the filtered gravity anomalies are compared to the calculated ones which are derived from the models of standard section of box-culverts. According to the comparison, the observed and the calculated anomalies agree well in width and the minimum gravity lows coincide with each other at the central portion of the box-culvert.

### 1 はじめに

これまで普通に行われている重力探査では、1mgalあるいは0.1mgalのオーダーの測定を目的として、全ての調査計画、測定作業、データ処理などが行われている。これに対して最近では、重力計の測定精度が向上し、それに応じてニーズも多様化してきたことから、 $\mu$ galオーダーの重力探査（マイクロ重力探査）が実施されるようになってきた。重要構造物下の浅所基盤調査（たとえば、Arzi, 1975）あるいは、廃坑、路面下の空洞などのような社会的に問題となる地下の空洞調査といった工学分野への適用がそれである（たとえば、飯田, 1983; 千葉, 1986）。

マイクロ重力探査においては、一般に、対象とする重力異常の大きさが0.1mgal以下であり、場合によっては

0.01mgal程度のこともある。このように、重力の測定限界に近い測定を行うマイクロ重力探査の有意な方法を確立するためには、比較的単純な構造物の上で実施した探査結果から検出された重力異常の有意性を評価確認しておくことが不可欠である。

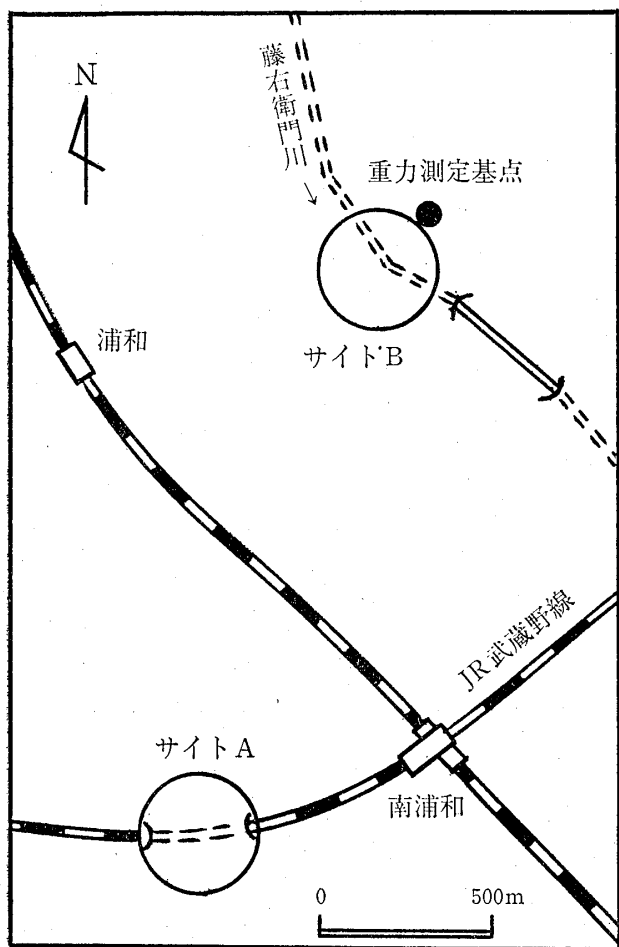
そこで、地形補正を考慮しなくてもよい平坦な場所において、構造が既知で単純なボックスカルバートの上でマイクロ重力探査を実施した。

### 2 重力測定

測定を実施した地点は、

- (a) サイトA (JR武蔵野線ボックスカルバート)
- (b) サイトB (藤右衛門川ボックスカルバート)

の2サイトで、その位置は図-1に示す通りである。



図一1 測定地点  
Fig.1 Sites of microgravity survey

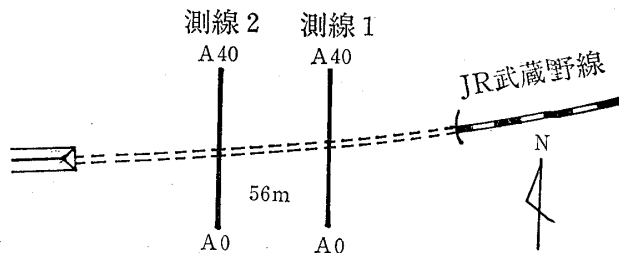
サイトAの地質は、洪積世後期の低位段丘堆積層で、よく締った砂質土から成っている。ボックスカルバート(10.38mW×7.24mH)はこの層の地表下1.0mのところらに施工されており、地表はパラスト混じりアスファルト(層厚0.2m)で舗装されている。

サイトBの地質は、層厚が約10mの沖積層で、腐植土およびシルト質粘土から成っている。ボックスカルバート(8.2mW×5.8mH)はこの層の地表下0.4mのところらに施工されており、その基礎は下位の成田層群上部(洪積世後期)の中に置かれている。なお、地表はパラスト混じりアスファルト(層厚0.2m)で舗装されている。

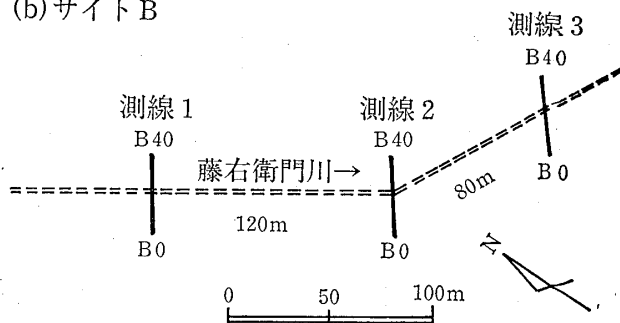
2・1 測線の配置

測線は、図一2に示すように、サイトAおよびサイトBともにボックスカルバートを横切るように配置した。サイトAにおける2本の測線の長さはいずれも80mで、それぞれについて2m間隔に南側から北側へ向かって、A0~A40の41個の測定点を設けた。また、サイトBにおける3本の測線の長さはいずれも40mで、それぞれに

(a) サイトA



(b) サイトB



図一2 測線配置  
Fig.2 Profiling lines

ついて1m間隔に南西側から北東側へ向かって、B0~B40の41個の測定点を設けた。

なお、各測定点の標高は、オートレベルB1(測機舎製)によって水準測量を実施して求めた。各測線についての閉合差は、それぞれ最大2mmであった。

2・2 測定方法

使用した重力計はラコスト重力計D-80である。重力計は、使用前にレベル整準を十分に行い、測定誤差を極力小さくするように配慮した。測定は閉環測定法によって行い、基点は当社地盤工学研究所構内に新たに設置した重力点とした(図一1参照)。

測定は、(1)サイトAの測線1および測線2の測定期間、(2)サイトBの測線1の測定期間、および(3)サイトBの測線2および測線3の測定期間の3期間に分けて実施し、測定中は2~3時間ごとに基点に戻り閉合した。各期間の基点における繰返し測定値の標準偏差は、9.8 μgal(試料数:5)、7.1 μgal(試料数:4)および8.7 μgal(試料数:23)であり、十分良好な精度をもって測定することができた。

2・3 重力値およびブーゲー異常値

(1) 重力値の計算

各測定点における重力値は、基点の値を基準として求めた。基点は当社地盤工学研究所構内の重力点で、その重力値は979,824.624mgalである。

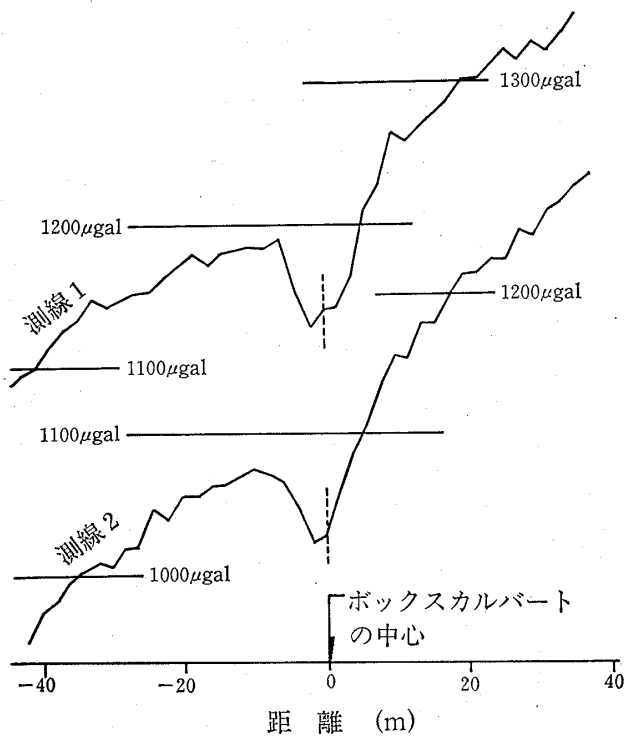


図-3.1 ブーゲー異常分布 (サイトA)  
Fig.3.1 Bouguer anomaly distribution (Site A)

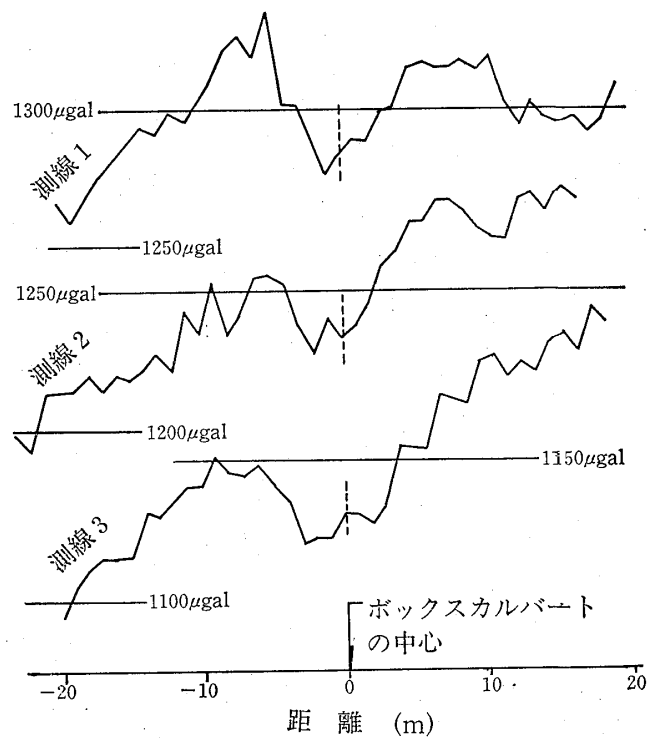


図-3.2 ブーゲー異常分布 (サイトB)  
Fig.3.2 Bouguer anomaly distribution (Site B)

測定した重力データに対しては、重力潮汐補正 ( $\delta$ ファクター: 1.2, 位相差: 0秒) および計器高補正 (鉛直勾配: 0.3086mgal/m) を行った。また、ドリフト補正は、最短時間 (2~3時間) の閉合差を直線的に変化するものとして行った。

(2) ブーゲー異常値の計算

ブーゲー異常値の計算にあたっては、基準水平面の標高を、サイトAについては17.0m、サイトBについては6.0mとした。そして、ブーゲー補正 (ブーゲー密度: 2.0gr/cc), 高度補正 (鉛直勾配: 0.3086mgal/m), 緯度補正 (国際重力式1980による) を実施した。なお、測線位置における地形は平坦であるので、地形補正は無視できるものとして行っていない。求められたブーゲー異常の分布をグラフで示すと、図-3.1 (サイトA) および図-3.2 (サイトB) のようになる。

3 データ処理

3.1 前処理

得られるブーゲー異常分布には、対象物による重力異常のほか、対象物よりも深いところにある地下構造によるものが、波長の長い異常として含まれていることが

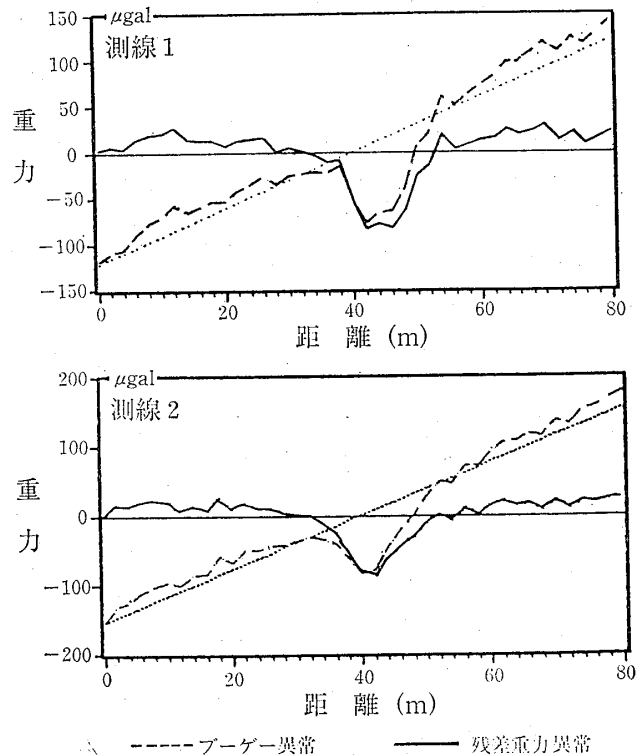


図-4.1 重力分布 (サイトA)  
Fig.4.1 Gravity distribution (Site A)

一般的傾向としてある。したがって、この影響を除くために、図-3に示したブーゲー異常分布から一次回帰線を求め、これを除去して残差重力異常分布を求めた（以下この報文においては、残差重力異常分布を単に重力分布と呼び、また、重力分布中に見られる相対的に重力が高い箇所あるいは低い箇所を重力異常と呼ぶ）。これらの結果を図-4・1（サイトA）および図4・2（サイトB）に示す。

3・2 フィルターの選定

一般に、重力分布の振幅スペクトル  $\tilde{G}(m)$  の絶対値の対数を波数  $m$  に対して図示すると、図-5のように、リージョナル群、ローカル群およびノイズ群に分けて考えられる場合が多い。この図に示すように、それぞれの群

に分けることができるのは、それぞれのホワイトデプスが異なることによっている。このように分離が明瞭な場合には、それぞれの群のホワイトデプスを比較的容易に推定することができる。したがって、対象としている重力異常を抽出するためのフィルターを容易に選定することができる。

しかし、石油資源などを対象とした通常の重力探査に比べて極端に浅い地下構造を対象としているマイクロ重力探査の場合には、対象としている構造と重力ノイズ源とがしばしば同程度の深度に混在していることが考えられる。したがって、上記のような方法によってフィルターの選定を行うことが困難であることが予想される。実際に、図-4に示した重力分布を用いて振幅スペクトルと波数の関係を求めると、図-6・1（サイトA）および図-6・2（サイトB）のようになり、予想した通り各群の境界は不明瞭で、フィルターの選定が困難である。

そこで、重力分布をフーリエ展開して、ノイズアナリシスによる方法を適用することによってフィルターの選定を行った。さきにも述べた方法が振幅スペクトルの対数に着目しているのに対して、この方法は重力分布のフーリエ係数のうちのある波数以上がノイズであるとしたときに、そのノイズによる誤差の標準偏差の不偏推定値に着目したものである。この方法によって、誤差の標準偏差の不偏推定値  $S(m)$  と波数  $m$  の関係を求めると、図-7・1（サイトA）および図-7・2（サイトB）に示すようになる。これらの結果によれば、サイトAにおいては、両測線ともに波数が2~14付近において  $S(m)$  の急激な減少が見られる。また、サイトBにおいては、各測線ともに波数が3~10付近において同様な減少が見られる。

このような誤差の標準偏差の不偏推定値の明瞭な減少パターンとノイズアナリシスから推定されるノイズレベルとを考慮して、図-8に示す種々の特性をもつウイン

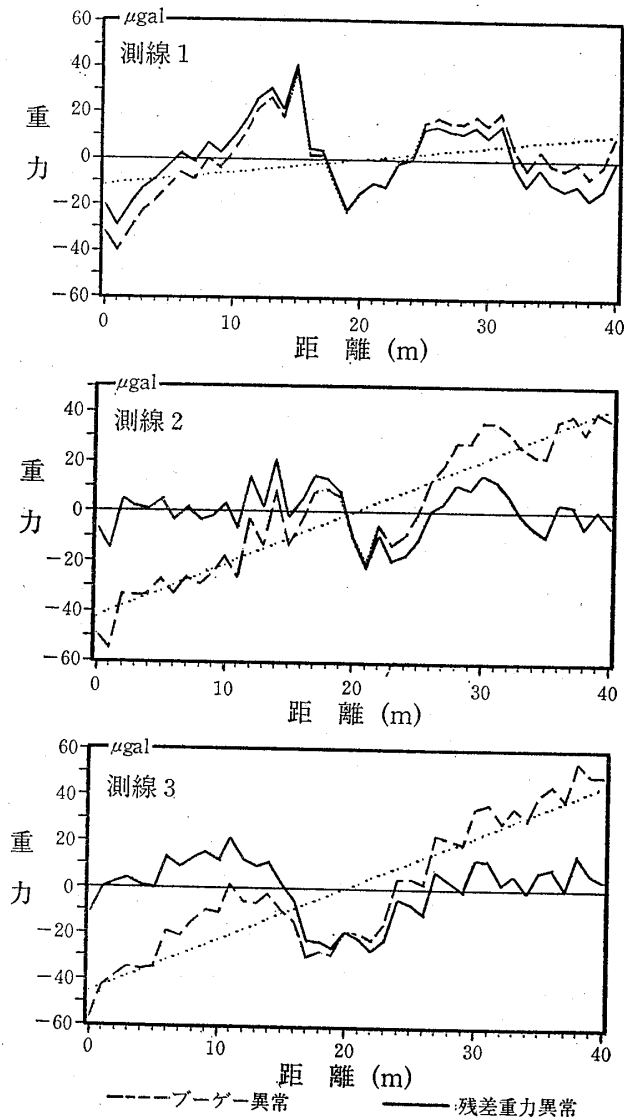


図-4.2 重力分布 (サイトB)  
Fig.4.2 Gravity distribution (Site B)

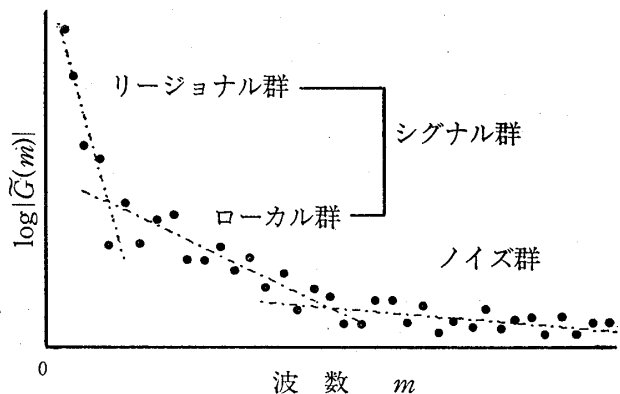


図-5 典型的な振幅 (対数) スペクトル  
Fig.5 Typical logarithmic amplitude spectra

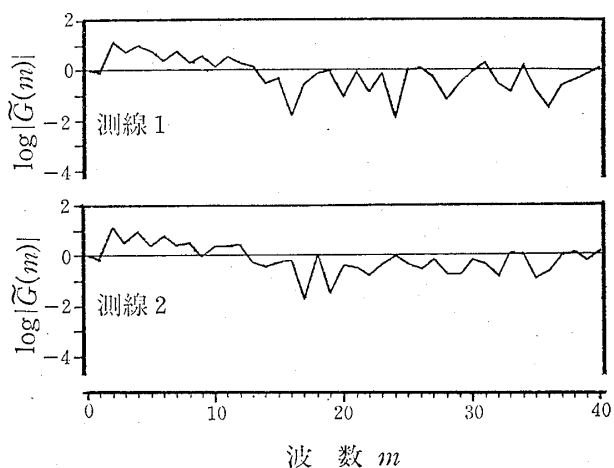


図-6.1 振幅(対数)スペクトル(サイトA)  
Fig. 6.1 Logarithmic amplitude spectra (Site A)

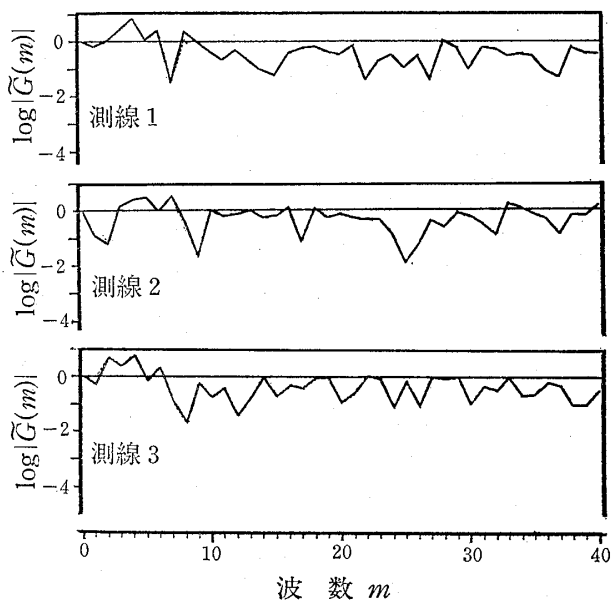


図-6.2 振幅(対数)スペクトル(サイトB)  
Fig. 6.2 Logarithmic amplitude spectra (Site B)

ドウ関数によるフィルターを使用して、重力分布に対するフィルターテストを行った。それらのうちの一例を図-9.1および図-9.2に示す。フィルター特性の違いによって重力分布が微妙に変化することがわかる。

これらのフィルターテストの結果から、つぎに示す判断基準によってフィルターの選定を行った。

- ① 同じサイトの測線に対しては同一のフィルターを使用する(同じサイトにおいて測線ごとにフィルターを変える積極的な理由がない)。
- ② フィルター特性が少々変わっても、フィルター処

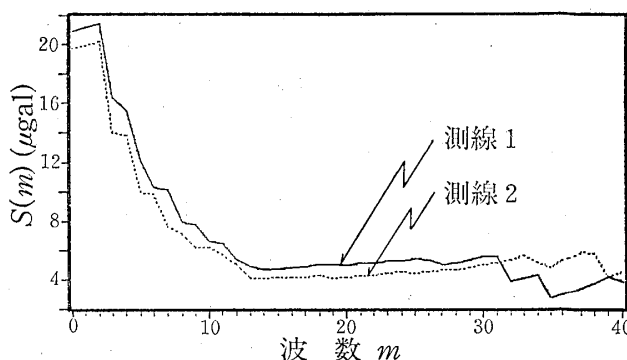


図-7.1 誤差の標準偏差の不偏推定値  $S(m)$  (サイトA)

Fig. 7.1 Unbiasedly estimated standard deviation of error due to noises (Site A)  
Values of  $S(m)$  are derived from the Fourier coefficients of gravity anomaly distribution, in that the coefficients having wave numbers greater than or equal to  $m$  are assumed to be noises.

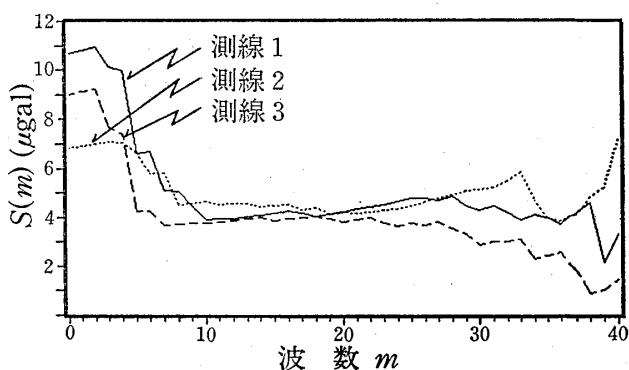


図-7.2 誤差の標準偏差の不偏推定値  $S(m)$  (サイトB)

Fig. 7.2 Unbiasedly estimated standard deviation of error due to noises (Site B)  
 $S(m)$  is same as in Fig. 7.1

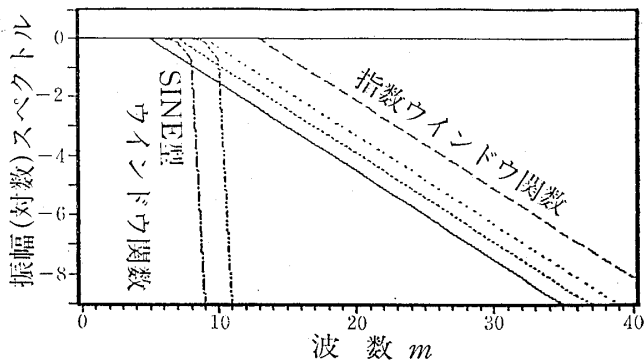


図-8 フィルター特性の例  
Fig. 8 Examples of filter characteristics

理後の重力分布が大きく変化しないようなフィルターを使用する。

その結果、サイトAにおいては振幅の減少が波数8.0で0%、波数9.0で50%である指数ウィンドウ関数によるハイカットフィルター[E 8(0) - 9(50)]を、サイトBにおいては波数7.0で0%、波数8.0で50%の指数ウィンドウ関数によるハイカットフィルター[E 7(0) - 8(50)]を使用することにした。

3.3 フィルター処理

上記のフィルターによって、図-6.1および図-6.2に示した振幅スペクトルにフィルター処理を行った結果は図-10.1および図-10.2に示す通りである。また、フィルター処理後の各測線における重力分布を図-

11.1および図-11.2に示す。フィルター処理によってノイズが除去され、図中に示す区域の幅2S'と重力異常の大きさ|4g|をもつ負の重力異常がボックスカルバートのところに明瞭に認められる。

3.4 信頼性評価

加藤(1987)によれば、フィルター処理後の重力分布に見られる重力異常の信頼性評価が統計論的に試みられている。図-12は、フィルター処理後の重力異常が“確かに重力異常である(大きさがゼロではない)”と判定するために必要な測定点数(測定間隔)を推定するため

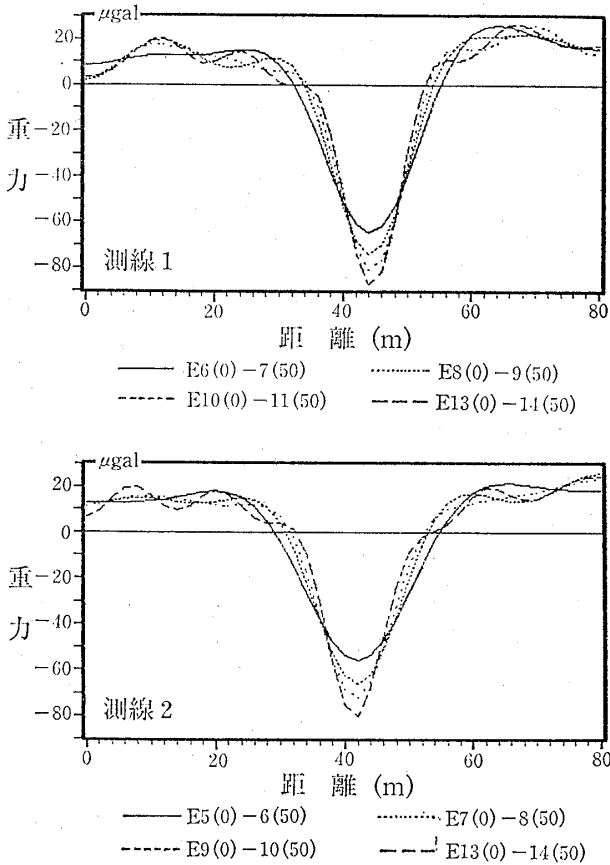


図-9.1 フィルターテストの例(サイトA)  
E6(0)-7(50)などにおいて、Eは指数ウィンドウ関数を表し、6(0)-7(50)は、0%および50%カットオフの波数がそれぞれ6および7であることを示す。

Fig.9.1 Examples of filtering test (Site A)  
In the symbol E6(0)-7(50) or other shown, E denotes an exponential window function and 6(0)-7(50) represents cut-off wave numbers 6 and 7 with reduction rates of 0% and 50% respectively

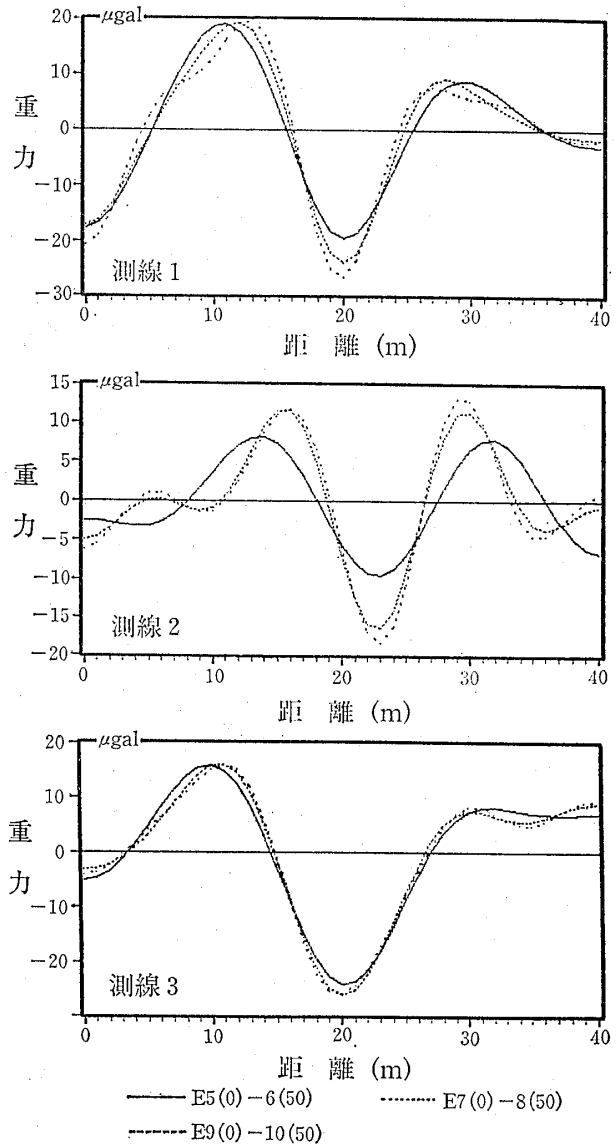


図-9.2 フィルターテストの例(サイトB)  
記号の意味は図-9.1に同じ。

Fig.9.2 Examples of filtering test (Site B)  
Symbols are same as in Fig.9.1

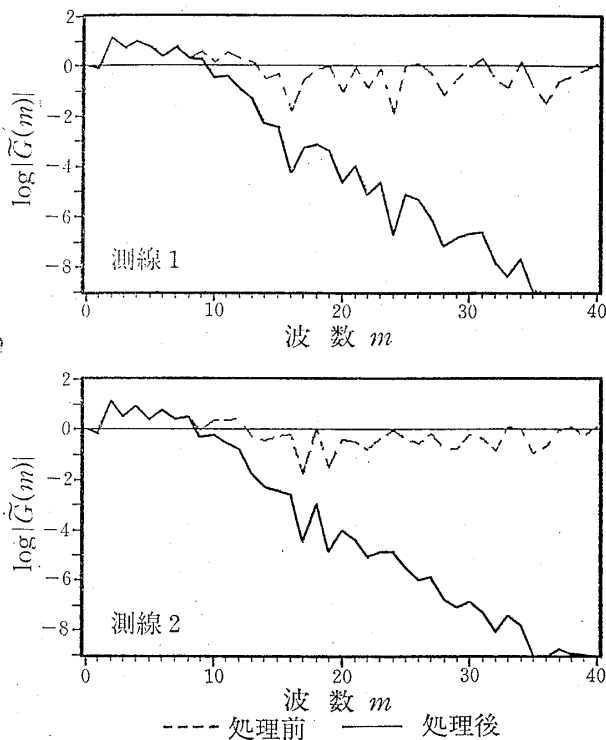


図-10-1 フィルター処理前後の振幅(対数)スペクトル(サイトA)  
Fig.10-1 Logarithmic amplitude spectra before and after filtering (Site A)

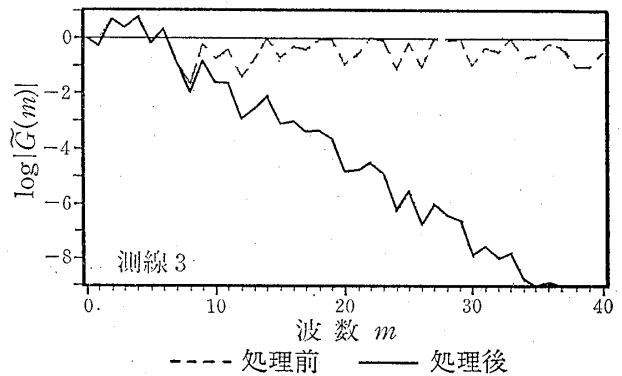
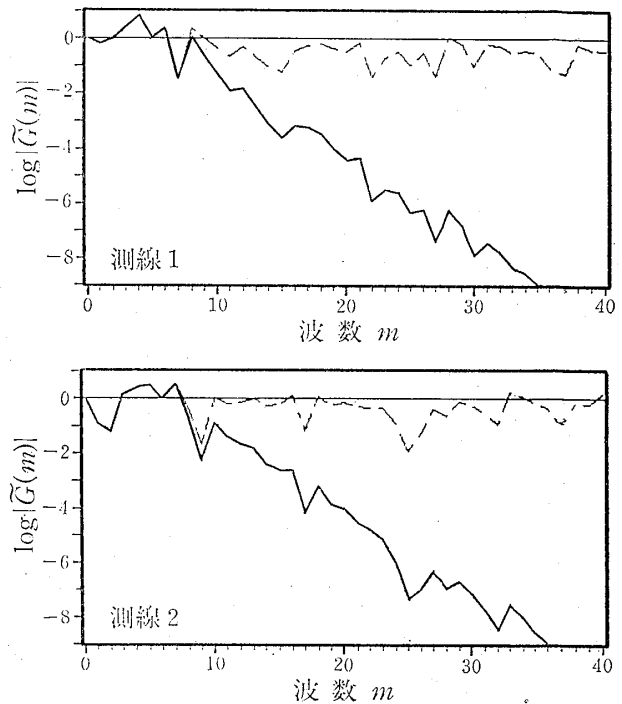


図-10-2 フィルター処理前後の振幅(対数)スペクトル(サイトB)  
Fig.10-2 Logarithmic amplitude spectra before and after filtering (Site B)

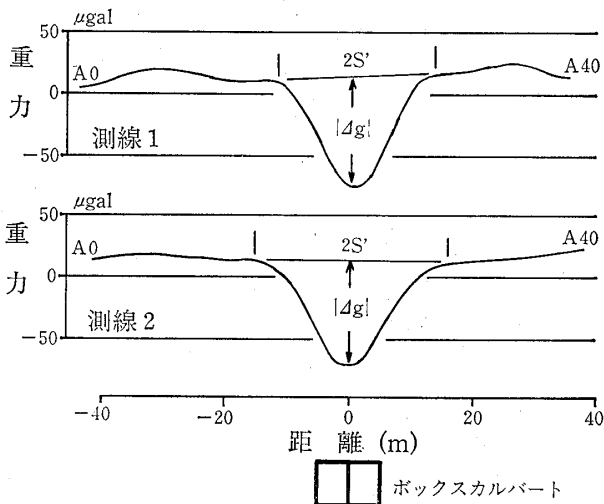


図-11-1 フィルター処理後の重力分布(サイトA)  
Fig.11-1 Gravity distribution after filtering (Site A)

の臨界曲線(加藤, 1987)である。

すなわち, 図-11に示した重力異常の大きさ ( $|\Delta g|$ ) およびノイズによる誤差の標準偏差の不偏推定値  $s$  とを用いて, 図-12から“重力異常である”ために必要な最小限度の測定点数を推定することができ, 重力異常の区

域の幅 ( $2S'$ ) (図-11参照) と推定した測定点数との比が, 許容される最大測定点間隔ということになる。

そこで, 図-11に基づいて各測線に関する測定点数および測定点間隔を計算すると表-1のようになる。ここに, 危険率  $\alpha = 1.0\%, 2.5\%, 5.0\%, 10\%$  とした。この結果によれば, たとえば, 求められた重力異常の確かさを危険率  $\alpha = 2.5\%$  (精度に相当する) で推定するためには, 各測線の測定点間隔は, サイトAにおいてはそれぞれ  $7.0\text{m}$  および  $8.0\text{m}$  以下, サイトBにおいてはそれぞれ  $2.9\text{m}$ ,  $2.7\text{m}$  および  $3.9\text{m}$  以下であればよいことがわかる。これに対して, 実際の測定における測定点間隔は, サイトAにおいては  $2\text{m}$ , サイトBにおいて

は1mとしているのであるから、前節に示した重力異常は、97.5%の信頼度をもって“確かに重力異常である”と判定することができる。

ここに述べたことは、実際に測定された重力異常のデータを用いて、その重力異常の信頼性を検定する方法ではあるが、この例から推量するに、土木の分野においてマイクロ重力探査を実施する場合には、探査の初期段階

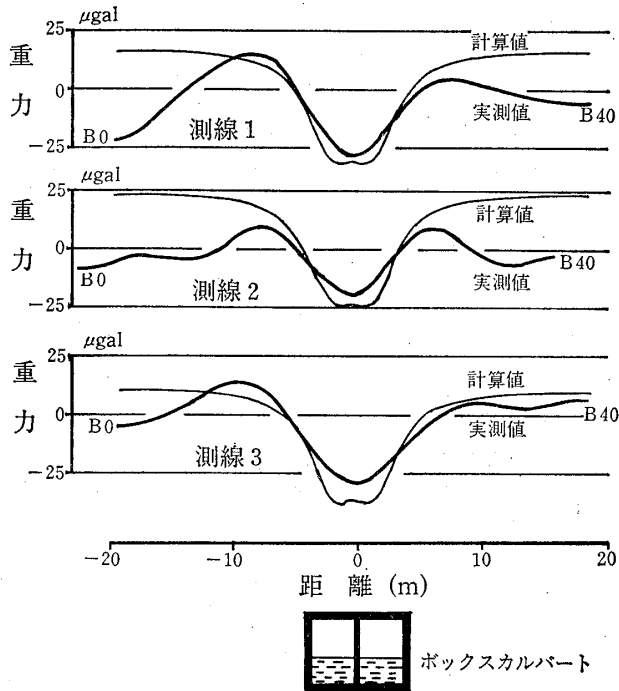


図-11.2 フィルター処理後の重力分布 (サイトB)  
Fig.11.2 Gravity distribution after filtering (Site B)

において測定点間隔を1~2mとし、上記のノイズアナリシスによる方法によって最適測定点間隔を求め、測定された重力異常の信頼性の向上に役立てることは必要である。

4 モデルによる重力分布計算値と実測値の比較

作成したモデル構造は、図-13に示すように、ボックスカルバート (鉄筋コンクリート) の密度を2.3gr/ccと

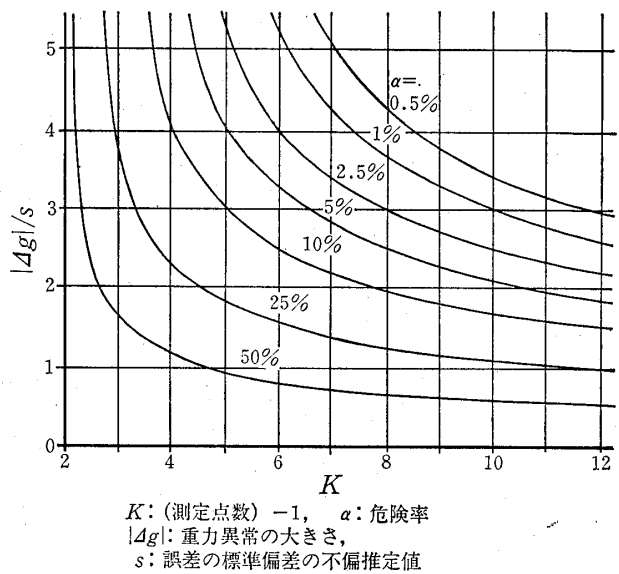


図-12 臨界曲線 (加藤, 1987による)  
Fig.12 Critical curves for estimating the necessary number of gravity stations (after Kato, 1987)

表一 臨界曲線より求めた測定点数および測定点間隔

Table 1 Results of estimated numbers and the corresponding intervals of gravity stations

測線名	Δg  (μgal)	s (μgal)	Δg  s	2S'	測定点数および測定点間隔								
					α=0.01		α=0.025		α=0.05		α=0.10		
					K	Δx (m)	K	Δx (m)	K	Δx (m)	K	Δx (m)	
サイトA	測線1	88.0	7.8	11.2	27.9	5	5.6	4	7.0	4	7.0	3	9.3
	測線2	81.9	7.3	11.2	32.0	5	6.4	4	8.0	4	8.0	3	10.7
サイトB	測線1	37.7	5.5	6.9	14.5	6	2.4	5	2.9	4	3.6	4	3.6
	測線2	33.5	5.7	5.9	13.6	6	2.3	5	2.7	5	2.7	4	3.4
B	測線3	37.8	4.6	8.2	19.3	5	3.9	5	3.9	4	4.8	4	4.8

|Δg|: 重力異常の大きさ, s: ノイズによる誤差の標準偏差の不偏推定値,  
2S': 重力異常の区域の幅, K: (測定点数) - 1, α: 危険率,  
Δx: 測定点間隔 (=2S'/K)



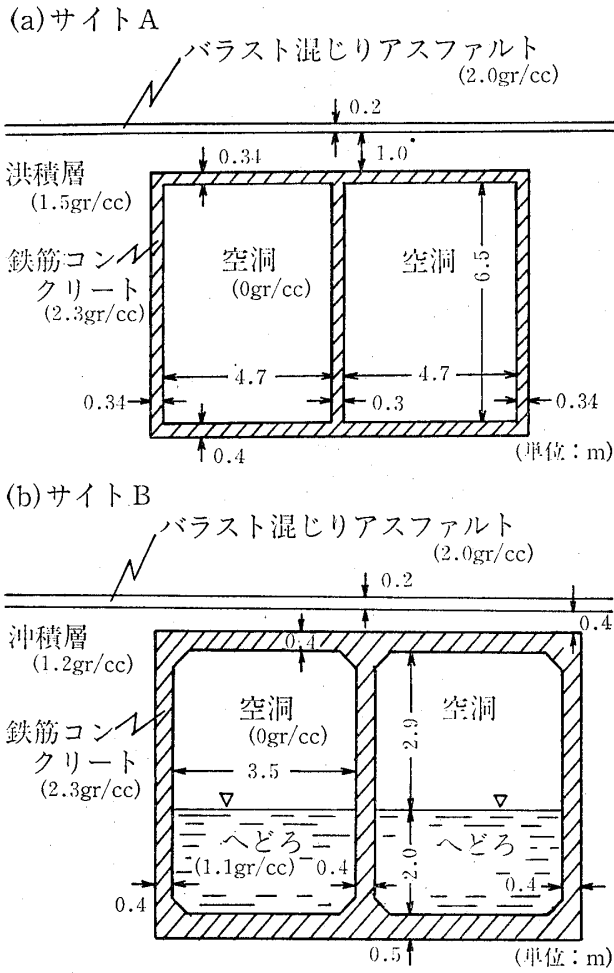


図-13 モデル構造  
Fig. 13 Structures of the model box-culverts

し、周辺の地盤の密度については、サイトA（洪積層）で1.5gr/cc、サイトB（沖積層）で1.2gr/ccとした。また、サイトBのボックスカルバート内には、約2mの深さでへどろが堆積しており、この密度を1.1gr/ccとした。なお、地表は厚さが20cmのバラスト混じりアスファルトで舗装されており、この密度を2.0gr/ccとして考慮することにした。各部の寸法は図に示す通りである。

上記のモデルを用いて計算された重力分布を計算値として図-14・1および図-14・2に示す。これらの図には、比較のためにフィルター処理後の重力分布（図-11・1および図-11・2）を実測値として記入してある。

両サイトの各測線ともに、重力が最小になる位置はボックスカルバートの中心とよく一致しており、また、重力異常を示す幅もボックスカルバートの幅に対応していることが見られる。

しかしながら、サイトAの場合は、重力異常の大きさが計算値に比べて実測値の方が小さいが、サイトBの場

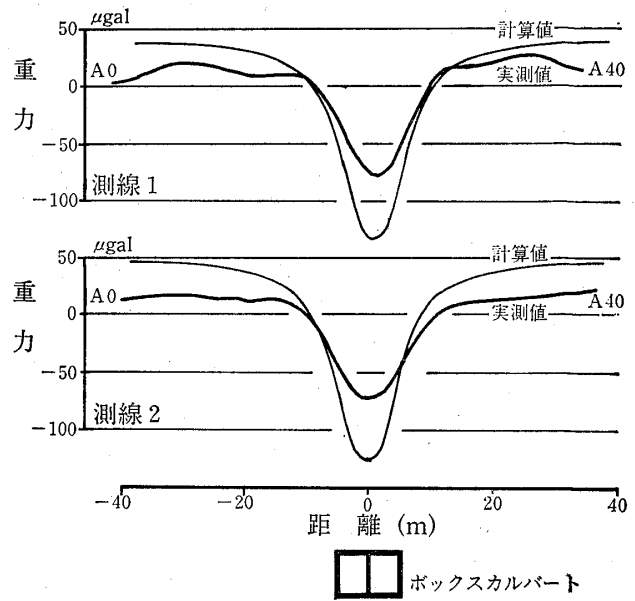


図-14.1 重力分布（サイトA）  
Fig. 14.1 Gravity distribution (Site A)

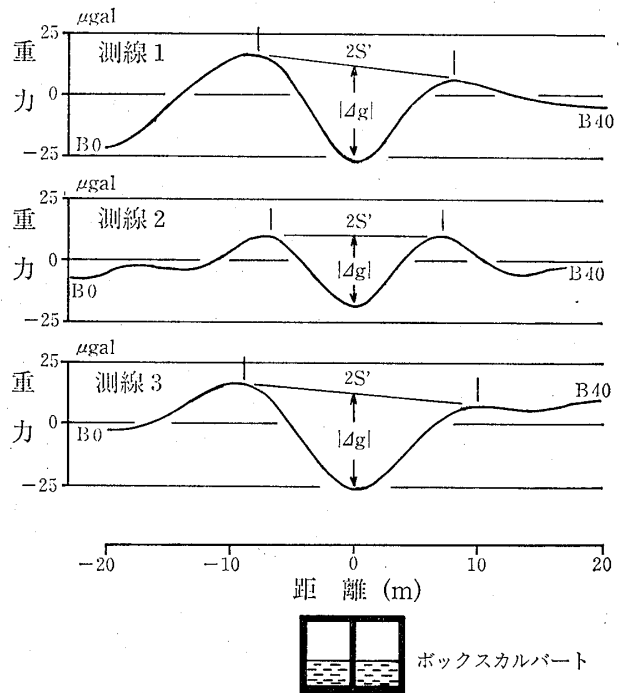


図-14.2 重力分布（サイトB）  
Fig. 14.2 Gravity distribution (Site B)

合は、実測値と計算値の重力異常の大きさはほぼ等しくなっている。さらに、両サイトの各測線のボックスカルバートの両端付近において、実測値による曲線と計算値による曲線の形に相異があることから、各測線の実測値を用いて重力鉛直勾配を計算すると、図-15・1および図-15・2に示すようになる。サイトAにおいては、重力異常の両肩付近、すなわち、ボックスカルバートの両

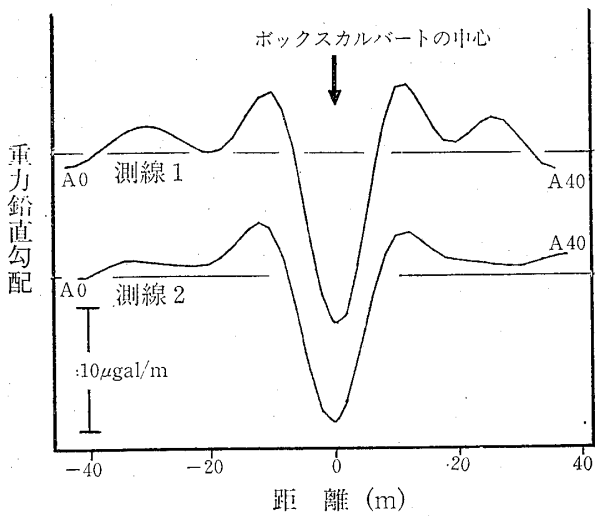


図-15-1 重力鉛直勾配分布 (サイトA)  
Fig. 15-1 Distribution of vertical gravity gradient derived from the observed gravity distribution (Site A)

側のところで重力鉛直勾配が大きくなっており、重力分布曲線においてはあまり明らかでなかった計算値との差の特徴が明瞭に示されている。一方、サイトBにおいては、各測線の重力分布曲線において見られたボックスカルバートの両端付近に見られたピーク値がより一層強調されている。これは、モデルでは考慮していないが、たとえば、ボックスカルバートの両側に密度の大きい栗石などが詰められていることを示唆しているものと思われる。

## 5 あとがき

今回実施したマイクロ重力探査の実験は、土木の分野における実用化を目的とした基礎的なもので、あえて地形補正を必要としない地点を選び、小さい測定点間隔をとって測定を行った。

これらの実測データからノイズを除去するために使用するフィルターの選定には、ノイズアナリシスの方法を適用した結果、従来から使用されている振幅(対数)スペクトルに着目した方法に比べてはるかに容易であることがわかった。

また、フィルター処理後の重力分布中に見られる重力

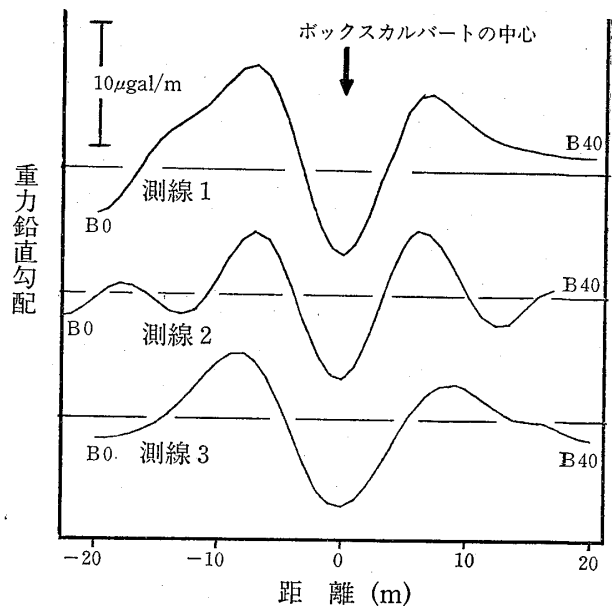


図-15-2 重力鉛直勾配分布 (サイトB)  
Fig. 15-2 Distribution of vertical gravity gradient derived from the observed gravity distribution (Site B)

異常が“確かに重力異常である”ことの信頼度評価に必要とする測定点間隔を求め、マイクロ重力探査における測定点間隔の設定に関する目安が得られた。

今回の実験においては、地形補正を必要としない場所を選んで実施したのであるが、実用化のためには地形補正に関する技術上の問題を解明することが必要であると考えている。

## 参考文献

- Arzi, A. A. (1975) : Microgravimetry for engineering applications, Geophys. Prosp. Vol. 23, No. 3, pp. 408~425.
- 千葉昭彦 (1986) : 地下空洞の重力探査実施について 充てん 第12号 pp. 19~29
- 飯田汲事 (1983) : 亜炭採掘古洞の重力探査 充てん 第5・6号 pp. 5~14
- 加藤元彦 (1987) : 2次元フィルターの理論と重力・磁力分布の解析 ラテイス社