

重力探査における解析法の比較

松田 武雄* 須田 芳朗*

On the Comparison of Analysis Methods in Gravitational Prospecting

by

Takeo Matsuda & Yoshirō Suda.

Abstract

In the analysis of isogal maps, many methods have been used. To study the effective correlation among them from the standpoint of practical use, the writers obtained the characteristics as sampling filters, and coefficients of errors among them. Then, they studied whether the results of analysis agree with each other or not, in case of using three actual data. But they could not find a distinct difference between them. It seems that the running mean method (derived by K. Seya) and the second derivative method (derived by R. Henderson and I. Zietz) are better than all other analytical methods.

要 旨

重力探査における解析法の得失を、主として実用上の見地から比較検討した。まず各公式の Sampling filter としての特性、および誤差の係数を比較したが、各種の方法の間に大きな差が認められなかつた。また数個の計算公式について、解析結果の一致の度合を3つの調査実例によつて比較したが、どの方法でもよく一致しているといふことができる。これらのことから、計算を行なうのに必要な時間、および端の問題（解析計算を行なう際に、調査地の周辺の計算値を求めることのできない地域が生ずる）等から考えて、瀬谷清の導入した移動平均法、Henderson and Zietz の導入した二次微係数法等が有利であると考えられる。

1. 緒 言

重力探査の結果の表現として、重力図が用いられていることはよく知られているところであるが、地方的な重力分布のため、局地的異常が被覆されて、その検出が困難な地域では、余剰重力図や一次微係数図、あるいは二次微係数図が用いられている。後に第1表に示すように、これに関しては発表された諸家の方法も20以上に及び、それぞれ得失が論じられている¹⁾²⁾。とくに最近、瀬谷清は精度の点から各種の方法について検討しているが^{註1)}、こゝでは主として実用上の見地から諸方法を比

較しよう。

2. 計算公式

すでに発表された計算公式のおもなものを第1表に表示した。この際、大別して余剰重力・一次微係数および二次微係数の3種に分類することができる。この3種の分類は、物理的にはそれぞれ1種の Sampling filter をなしている。すなわち、第1表にみられるように一次微係数では $1/S$ 、二次微係数では $1/S^2$ (S は計算に用いた単位半径) の項が掛けられているが、それは図面上の表示には関係のないものである。

3. Sampling filter としての比較

第1表に示される操作を、重みをつけた Sampling として図示すると第1図のようになる。この際第1表では平面的(二次元的)に取扱つているが、Filter としての取扱いについては、直線的(一次的)にしても本質的には変わらない。第1図をみると、3種類に大別できるので、その代表的なものとして $F2 (\alpha=0, \beta=1) \cdot F9 \cdot F19$ および後に述べる計算に用いた $F2 (\alpha=1, \beta=3) \cdot F7 \cdot F19$ の Sampling filter としての特性を示すと、第2~7図のようになり、 $F2 (\alpha=1, \beta=3)$ を除いてはいずれも同じような特性を示している。

4. 実用的見地からの比較

4.1 誤差の問題

重力探査の結果得られる重力分布には、観測誤差のほか補正による誤差、波長の短かい小さな重力異常 (noise)

* 物理探査部

註1) 重力探査における新解析法(移動平均法)、昭和32年11月物理探査技術協会講演会で発表。

第 1 表

番号	導入者	計 算 公 式
----	-----	---------

(余剰重力を求めるもの)

F 1	Griffine	$\Delta g(0) - \overline{\Delta g(S)}$
F 2	瀬谷 清	$\frac{1}{2\alpha+1} \sum_{n=-\alpha}^{\alpha} \Delta g(nS) - \frac{1}{2\beta+1} \sum_{n=-\beta}^{\beta} \Delta g(nS)$ (α, β は 0 または正整数)

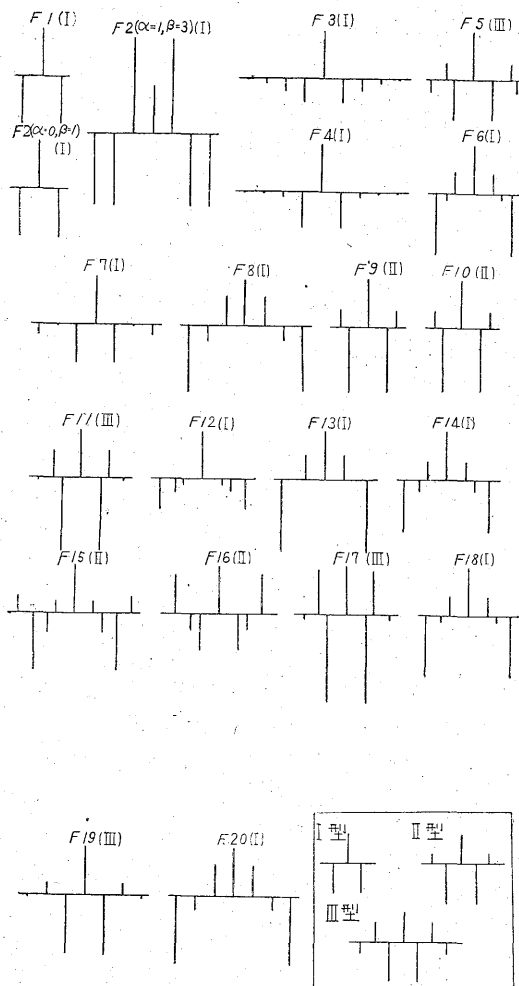
(一次微係数を求めるもの)

F 3	Evjen	$-\frac{\Delta g(0)}{S} + \int_S^{\infty} \frac{\Delta g(r)}{r^2} dr$
F 4	坪井 忠二	$-\left\{ \frac{\Delta g(0) - \overline{\Delta g(S)}}{S} + \int_S^{\infty} \frac{\Delta g(0) - \overline{\Delta g(r)}}{r^2} dr \right\}$
F 5	加藤 元彦	$-\frac{1}{S} \left\{ 2.723 \Delta g(0) - 2.885 \overline{\Delta g(S)} + 0.922 \overline{\Delta g(\sqrt{2} S)} - 0.760 \overline{\Delta g(\sqrt{5} S)} \right\}$
F 6	"	$-\frac{1}{S} \left\{ 0.8806 \Delta g(0) + 0.3451 \overline{\Delta g(S)} - 0.1149 \overline{\Delta g(\sqrt{2} S)} - 1.1108 \overline{\Delta g(\sqrt{5} S)} \right\}$
F 7	"	$-\frac{1}{S} \left\{ 2.457 \Delta g(0) - 1.956 \overline{\Delta g(S)} - 0.004 \overline{\Delta g(2S)} - 0.497 \overline{\Delta g(3S)} \right\}$
F 8	"	$-\frac{1}{S} \left\{ 0.5688 \Delta g(0) + 0.3623 \overline{\Delta g(S)} - 0.1622 \overline{\Delta g(2S)} - 0.7689 \overline{\Delta g(3S)} \right\}$

(二次微係数を求めるもの)

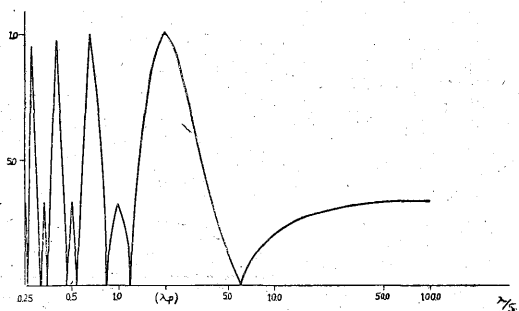
F 9	Henderson & Zietz	$\frac{1}{S^2} \left\{ 6.185 \Delta g(0) - 8.374 \overline{\Delta g(S)} + 2.189 \overline{\Delta g(\sqrt{2} S)} \right\}$
F 10	"	$\frac{1}{S^2} \left\{ 6 \Delta g(0) - 8 \overline{\Delta g(S)} + 2 \overline{\Delta g(\sqrt{2} S)} \right\}$
F 11	"	$\frac{1}{S^2} \left\{ 21 \Delta g(0) - 32 \overline{\Delta g(S)} + 12 \overline{\Delta g(\sqrt{2} S)} - \overline{\Delta g(2S)} \right\}$
F 12	Elkins	$\frac{1}{60S^2} \left\{ 64 \Delta g(0) - 8 \overline{\Delta g(S)} - 16 \overline{\Delta g(\sqrt{2} S)} - 40 \overline{\Delta g(\sqrt{5} S)} \right\}$
F 13	"	$\frac{1}{28S^2} \left\{ 16 \Delta g(0) + 8 \overline{\Delta g(S)} - 24 \overline{\Delta g(\sqrt{5} S)} \right\}$
F 14	"	$\frac{1}{62S^2} \left\{ 44 \Delta g(0) + 16 \overline{\Delta g(S)} - 12 \overline{\Delta g(\sqrt{2} S)} - 48 \overline{\Delta g(\sqrt{5} S)} \right\}$
F 15	Peters	$\frac{1}{S^2} \left\{ 1.156 \Delta g(0) + 0.256 \overline{\Delta g(S)} - 0.455 \overline{\Delta g(\sqrt{2} S)} - 1.359 \overline{\Delta g(\sqrt{5} S)} + 0.392 \overline{\Delta g(\sqrt{9.23} S)} \right\}$
F 16	Rosenbach	$\frac{1}{24S^2} \left\{ 96 \Delta g(0) - 72 \overline{\Delta g(S)} - 32 \overline{\Delta g(\sqrt{2} S)} + 8 \overline{\Delta g(\sqrt{5} S)} \right\}$
F 17	加藤 元彦	$-\frac{1}{S^2} \left\{ 8.693 \Delta g(0) - 15.942 \overline{\Delta g(S)} + 8.235 \overline{\Delta g(\sqrt{2} S)} - 0.986 \overline{\Delta g(\sqrt{5} S)} \right\}$
F 18	"	$-\frac{1}{S^2} \left\{ 0.9471 \Delta g(0) + 0.3711 \overline{\Delta g(S)} - 0.1235 \overline{\Delta g(\sqrt{2} S)} - 1.1947 \overline{\Delta g(\sqrt{5} S)} \right\}$
F 19	"	$-\frac{1}{S^2} \left\{ 6.489 \Delta g(0) - 7.777 \overline{\Delta g(S)} + 1.610 \overline{\Delta g(2S)} - 0.322 \overline{\Delta g(3S)} \right\}$
F 20	"	$-\frac{1}{S^2} \left\{ 0.4459 \Delta g(0) + 0.2905 \overline{\Delta g(S)} - 0.1300 \overline{\Delta g(2S)} - 0.6164 \overline{\Delta g(3S)} \right\}$

註) S は計算に用いた単位半径

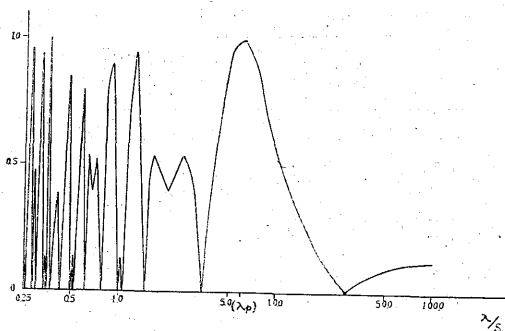


第1図 Sampling filter として表わした各計数公式

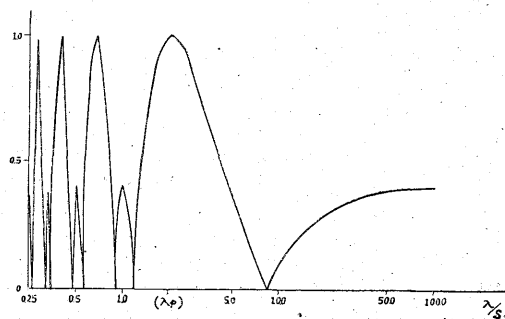
- | | |
|---|---|
| F 1: (余剰動力) | F 11: Henderson & Zietz($\partial^2g/\partial z^2$) |
| F 2: (") | F 13: Elkins (") |
| F 3: Evjen($\partial g/\partial z$) | F 14: Elkins (") |
| F 4: 坪井 (") | F 15: Peters (") |
| F 5: 加藤 (") | F 16: Rosenbach (") |
| F 6: 加藤 (") | F 17: 加藤 (") |
| F 7: 加藤 (") | F 18: 加藤 (") |
| F 8: 加藤 (") | F 19: 加藤 (") |
| F 9: Henderson & Zietz ($\partial^2g/\partial z^2$) | F 20: 加藤 (") |
| F 10: Henderson & Zietz (") | |



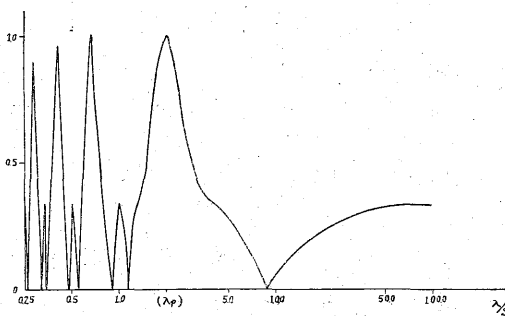
第2図 $F2(\alpha=0, \beta=1)$ の特性曲線



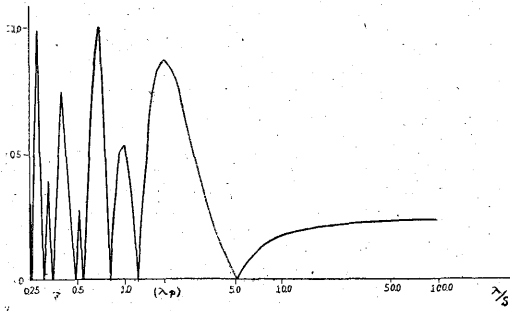
第3図 $F2(\alpha=1, \beta=3)$ の特性曲線



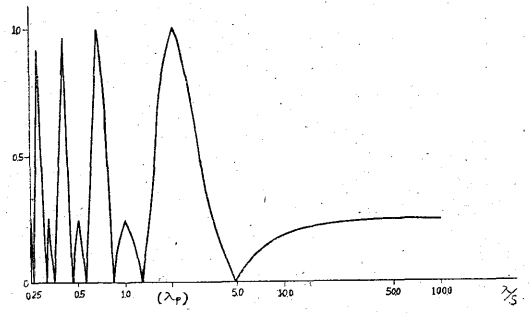
第4図 $F4$ の特性曲線



第5図 $F7$ の特性曲線



第6図 F9の特性曲線



第7図 F19の特性曲線

第 2 表

No	$\sqrt{\Sigma\left(\frac{C_n}{C_0}\right)^2/p}$	計算に要する時間	S_{max}/λ_p	No	$\sqrt{\Sigma\left(\frac{C_n}{C_0}\right)^2/p}$	計算に要する時間	S_{max}/λ_p
F 1	1.12	A	$1/2$	F11	1.29	A	1
F2($\alpha=0$ $\beta=1$)	1.06	A	$1/2$	F12	1.05	A	$\sqrt{5/2}(1)$
F2($\alpha=1$ $\beta=3$)	1.44	A	$1/2$	F13	1.16	A	$\sqrt{5/2}(1)$
F 3	1.04	C	3~4	F14	1.10	A	$\sqrt{5/2}(1)$
F 4	1.07	C	3~4	F15	1.11	B	$\sqrt{9.23/2}$
F 5	1.15	A	$\sqrt{3/2}(1)$	F16	1.08	A	$\sqrt{5/2}(1)$
F 6	1.11	A	$\sqrt{5/2}(1)$	F17	1.44	A	$\sqrt{5/2}(1)$
F 7	1.08	A	$3/2$	F18	1.11	A	$\sqrt{5/2}(1)$
F 8	1.26	A	$3/2$	F19	1.17	A	$3/2$
F 9	1.22	A	$\sqrt{2/2}(1/2)$	F20	1.27	A	$3/2$
F10	1.21	A	$\sqrt{2/2}(1/2)$				

C_0, C_1, C_2 : 計算公式の係数

S_{max} : 重力の平均値を求める円の最大半径

λ_p : ある単位半径に対して計算公式が最も強く表現する重力異常の波長

第 3 表

調査地	調査面積 (km ²)	測点総数	平均測点間隔 (km)	計算に用いた単位半径 (S) (km)
高田平野	120	1,170	0.320	0.25 0.50 1.00
本荘平野	60	579	0.325	0.20 0.40 0.60
子吉地区	2.5	167	0.130	0.05 0.10

の影響等が含まれているので、求めた余剰重力、一次および二次微係数等に対するこれらの誤差の影響が、なるべく小さいことが望ましい。

第1表に示した計算公式について、その計算誤差の大きさを評価するため、各計算公式を、

$$\frac{C_0}{k} \Delta g(0) + \frac{C_1}{C_0} \Delta g(S_1) + \frac{C_2}{C_0} \Delta g(S_2) + \dots$$

の形で表わし、各円周上で P 個の読みの平均値をとるとすると、各読取値の精度が同一ならば、各式の誤差の係数 $\sqrt{\frac{\Sigma(C_i)^2}{P}}$ の値は第2表に示したようにな

る。

第2表によれば、この誤差の係数の値は、どの方法についてもほぼ同じ値を示している。

次に上に述べた各公式のうち、いままで筆者らが一般に用いていた $F4 \cdot F9$ 、最近瀬谷清が提唱した註1) $F2$ の $\alpha=0, \beta=1$ および $\alpha=1, \beta=3$ の場合、加藤元彦が推奨している²⁾ $F5 \cdot F7 \cdot F17 \cdot F19$ のうち、 $F7$ および $F19$ の6個の式について実例を用いて比較を行なった。

比較を行なうための資料としては、いままでにわれわれが担当した重力探査のうち、測点の配置が調査地全般にほぼ均等になっているものを用いた。すなわち新潟県高田平野南部(昭和24年10月~12月調査)、秋田県本荘平野(昭和26年5~6月調査)、および本荘平野の一部である子吉地区での精査の結果を用いた。各調査地の面積、測点総数、平均測点間隔および計算に用いた単位半径 S を第3表に示した。

第 4 表

本荘平野 S=200 m						高田平野 S=500 m					
	$F2(\alpha=0, \beta=1)$	F 4	F 7	F 9	F 19		$F2(\alpha=0, \beta=1)$	$F2(\alpha=1, \beta=3)$	F 7	F 9	F 19
$F2(\alpha=0, \beta=1)$		0.17	0.28	0.05	0.10	$F2(\alpha=0, \beta=1)$		0.05	0.07	0.04	0.08
F 4	0.17		0.04	0.30	0.12	$F2(\alpha=1, \beta=3)$	0.05		0.03	0.04	0.11
F 7	0.28	0.04		0.31	0.23	F 7	0.07	0.03		0.07	0.08
F 9	0.05	0.30	0.31		0.18	F 9	0.04	0.04	0.07		0.08
F 19	0.10	0.12	0.23	0.18		F 19	0.08	0.11	0.08	0.08	
平均	0.15	0.16	0.21	0.21	0.16	平均	0.06	0.06	0.06	0.06	0.09

本荘平野 S=400 m						高田平野 S=1,000 m					
	$F2(\alpha=0, \beta=1)$	$F2(\alpha=1, \beta=3)$	F 7	F 9	F 19		$F2(\alpha=0, \beta=1)$	$F2(\alpha=1, \beta=3)$	F 7	F 9	F 19
$F2(\alpha=0, \beta=1)$		0.07	0.06	0.03	0.07	$F2(\alpha=0, \beta=1)$		0.05	0.07	0.07	0.11
$F2(\alpha=1, \beta=3)$	0.07		0.04	0.08	0.14	$F2(\alpha=1, \beta=3)$	0.05		0.07	0.02	0.01
F 7	0.06	0.04		0.10	0.15	F 7	0.07	0.07		0.09	0.15
F 9	0.03	0.08	0.10		0.04	F 9	0.07	0.02	0.09		0.03
F 19	0.07	0.14	0.15	0.04		F 19	0.11	0.01	0.15	0.03	
平均	0.06	0.08	0.09	0.06	0.10	平均	0.08	0.04	0.10	0.05	0.08

本荘平野 S=600 m						子吉地区 S=50 m					
	$F2(\alpha=0, \beta=1)$	$F2(\alpha=1, \beta=3)$	F 7	F 9	F 19		$F2(\alpha=0, \beta=1)$	F 4	F 7	F 9	F 19
$F2(\alpha=0, \beta=1)$		0.08	0.16	0.00	0.08	$F2(\alpha=0, \beta=1)$		0.13	0.15	0.04	0.19
$F2(\alpha=1, \beta=3)$	0.08		0.26	0.07	0.15	F 4	0.13		0.02	0.01	0.01
F 7	0.16	0.26		0.17	0.12	F 7	0.15	0.02		0.03	0.03
F 9	0.00	0.07	0.17		0.02	F 9	0.04	0.01	0.03		0.03
F 19	0.08	0.15	0.12	0.02		F 19	0.19	0.01	0.03	0.03	
平均	0.08	0.19	0.18	0.07	0.09	平均	0.13	0.04	0.06	0.03	0.07

高田平野 S=250 m						子吉地区 S=100 m					
	$F2(\alpha=0, \beta=1)$	F 4	F 7	F 9	F 19		$F2(\alpha=0, \beta=1)$	$F2(\alpha=1, \beta=3)$	F 7	F 9	F 19
$F2(\alpha=0, \beta=1)$		0.09	0.09	0.48	0.26	$F2(\alpha=0, \beta=1)$		0.00	0.01	0.03	0.10
F 4	0.09		0.21	0.48	0.35	$F2(\alpha=1, \beta=3)$	0.00		0.04	0.00	0.11
F 7	0.09	0.21		0.44	0.21	F 7	0.01	0.04		0.04	0.02
F 9	0.48	0.48	0.44		0.53	F 9	0.03	0.00	0.04		0.09
F 19	0.26	0.35	0.21	0.53		F 19	0.10	0.11	0.02	0.09	
平均	0.23	0.28	0.24	0.48	0.34	平均	0.04	0.04	0.04	0.04	0.08

全体の平均

$F2(\alpha=0, \beta=1)$	$F2(\alpha=1, \beta=3)$	F 4	F 7	F 9	F 19
0.10	0.07	0.16	0.12	0.12	0.12

この3カ所の調査地について、前にも述べたように、 $F2$ ($\alpha=0, \beta=1$)・ $F2$ ($\alpha=1, \beta=3$)・ $F4$ ・ $F7$ ・ $F9$ および $F19$ を用いて計算を行なった。得られた結果を縦横各1cmの柵目で切り、各柵目のなかの符号を讀取り、任意の2つの解析方法の間で(1) 同一符号(+と+, -と-, 0と0)を示すか、(2) 異符号(+と-, -と+)を示すか、(3) その他の場合(+と0, 0と+, -と0, 0と-)の3者に分け、それぞれの総数 N_1, N_2, N_3 を集計した。なお柵目の符号を讀取る際、柵目のなかに0の線が少しでもはいつている場合には、その柵目の符号を0とみなした。

2つの方法の間で、どの程度一致しているかを表現するために、 $1/2 N_2/N_1$ (at random なときの N_1 および N_2 の確率は、それぞれ $1/2, 1/2$ である) の比を求め、第4表に示した。これをみればすぐわかるように、単位半径 S が小さい場合を除いては、どの方法でもよく一致しているといえる。

S が小さいときは、 $1/2 N_2/N_1$ の値が大きい。すなわち2つの方法の間で一致が悪いということは、波長の短い重力異常 (noise) の影響が大きく現われてくると考えられる。

4.2 所要時間の長短

一般に重力探査は、広範囲の地域について調査が行なわれるので、精度がいくらよい解析方法でも、計算に長時間を要するような方法は実際の解析には役に立たない場合もある。

表現の方法としてはやゝ抽象的になるが、計算に必要な時間を短いものから順に A, B, C の3種類に分けて第1表に示した。

この問題についても、数値計算で積分値を求めなくてはならないような場合を除いては、所要時間に大きな差はない。

4.3 端の問題

上記の計算公式が取入れている、重力の平均を求める円の最大半径(例えば $F5$ では $\sqrt{5}S$, $F7$ では $3S$) を S_{max} とすると、余剰重力・一次微係数または二次微係数を求める際に、調査地域の周辺に幅 S_{max} の計算値を

求めることができない地域が生じる。いまある単位半径 S に対して、各計算公式が最も強く表現する重力異常の波長を λ_p (卓越する波長) とすると、 S_{max}/λ_p がなるべく小さいこと、すなわち計算値を求めることができない地域の幅が、相対的になるべく狭いことが望ましい。

第2表に S_{max}/λ_p の値を示した。なおある円周上の重力の平均値を求める際に、方眼に切った格子点での重力値を用いることが多いので、その場合の実際上の S_{max}/λ_p の値を()をつけて示した。これをみればすぐわかるように、端の問題について考えれば $F1$ ・ $F2$ ・ $F9$ ・ $F10$ などが有利である。

5. 結 論

重力探査結果の解析法の得失の比較検討を、主として実用上の見地から行なった。その結果、

(1) Sampling filter としての特性、および精度の点では、各種の方法の間に大きな差はない。

(2) 所要時間の点では、 $F3$ ・ $F4$ ・ $F15$ 等を除いては大きな差はない。

(3) 端の問題から考えると、 $F1$ ・ $F2$ ・ $F9$ ・ $F10$ などが有利である。以上のことを総合すると、

$$F2 \left(\frac{1}{2\alpha+1} \sum_{n=-\alpha}^{\alpha} \Delta g(nS) - \frac{1}{2\beta+1} \sum_{n=-\beta}^{\beta} \Delta g(nS) \right)$$

$$F9 \left(\frac{1}{S^2} \left\{ 6.185 \Delta g(0) - 8.374 \overline{\Delta g(S)} + 2.189 \Delta g(\sqrt{2}S) \right\} \right)$$

$$F10 \left(\frac{1}{S^2} (6 \Delta g(0) - 8 \Delta g(S) + 2 \Delta g(\sqrt{2}S)) \right)$$

等が有利であると考える。

(昭和30年4月、昭和33年3月調査)

文 献

- 1) 加藤元彦: 重力の鉛直勾配の意義とその計算公式について, 物理探査, Vol. 7, No. 3, 1954
- 2) Nettleton, L. L.: Regionals, Residuals and Structures, Geophysics, Vol. 19, No. 1, 1954