Memoirs of the Kakioka Magnetic Observatory Vol. 16 No. 1 1974

地磁気変化計基線値の変動について
—採用基線値決定法—

山 口 又 新

概 要

変化計の基線値は，週1〜2回の絶対観測によって求められ，毎日の基線値は，それらからいろいろの方法によって算出される。よく知られているように，観測基線値は変化計の温度により変動するばかりでなく，ドリフトもする。観測所所在地の気候風土，観測室の構造などによっては，観測基線値の変動は，極めて複雑であり，これをもとにして毎日の基線値を求めるには，工夫が必要である。変化計の温度依存，ドリフトの物理的機構を明らかにする必要がある。

本稿では，重回帰分析法により，回帰式を求め，これによって毎日の基線値を算出することを検討した。かなり有効であるが，実用化するには，なお問題もあろう。又当然変化計が異なれば，回帰式も変ってくるが，説明変量はそれ程大きくはかわらないようである。変化計基線値変動に寄与する温度についても，今後調査の必要があろう。

§1. はしがき

近来の技術諸分野の画期的発展にともない，地磁気観測の精度も向上し，関連分野よりの精度に対する要望にも応えつつあるが，地磁気観測のなかでも変化計については，まだ改良の余地があろう。殊に安定度，具体的には基線値変動については従来余り考えられていない。

本稿では，基線値変動調査の第1歩として，主に観測基線値処理法の問題を考察する。この種の問題は，観測所の気候風土，観測室の諸問題にも関係してくることであり，かならずしも一般的に論ずることはできないかもしれないが，解析的表現（回帰式）によってどの程度まで表現できるかの具体例をのべてある。資料は，地磁気観測所女満別出張所の水平分力用第1変化計の1971年1月〜12月，その1部の1971年6月〜11月及び1974年1月〜3月のものである。これは変化計温度の冬期停滞期，夏期停滞期及び通年の資料に対する結果の比較のためと，これらの期間には所謂基線値ギャップがなかったことによるものである。又この変化計は，KM型変化計で，1962年10月設置後，1972年5月に設置換えを行なっている。

従来から，基線値が変化計温度により変動することや，ドリフトをすることは，よく知られており，回帰式を求める時も最初に考えられることは，説明変量として変化計温度と時間をとることであろう。温度と時間の如何なる関係がよいかが問題である。

§2. 方 法

役に立つ実験式を得るに当っては，出きるだけ多くの要因をとりあげ，信頼し得る当ては

め値を得たいという要求と，労力や費用の点からみて最も効果的な項だけにしたいという要求がある。それらを満足させて，はじめて最良回帰式ということができよう。最良回帰式を得るためのいくつかの手法が開発されているが，一般論は成書にゆずるとして，ここでは筆者のつかった方法について概説する。

筆者がもちいたのは，重回帰分析の階段的回帰法 (stepwise regression procedure) とか要因変更法とかよばれる方法である。

さてある現象を予測したい場合とか，実験式とかをつくる場合には，役立ちそうな因子をできるだけとりあげ，いままでに得たデーターによって，現象の構造を推測するのが普通である。この場合次のような線型回帰模型が適用されることが多い。

$$y_i=\beta_1 x_{i1}+\beta_2 x_{i2}+\beta_3 x_{i3}+\cdots\cdots+\beta_p x_{ip}+\varepsilon_i$$
$$i=1\cdot 2\cdots\cdots n$$

ここに $x_1, x_2\cdots\cdots x_p$ は，因子としてとりあげた p 個の要因で，これらと y について夫々 n 組の観測データが得られており，$\beta_1, \beta_2\cdots\cdots\beta_p$ は，y の構造を規定する 未知母数であり，ε_i は残差不規則変動で次の条件を満足するものと仮定する。

（1） ε_i は確率変数で，平均 0，分散 σ^2（未知）である
　　即ち $E(\varepsilon_i)=0,\ V(\varepsilon_i)=\sigma^2$

（2） ε_i と ε_j は無相関である。$(i\neq j)$
　　即ち $\mathrm{cov}(\varepsilon_i, \varepsilon_j)=0$

（3） ε_i は正規分布をする。
　　即ち $\varepsilon_i\sim N(0,\ \sigma^2)$

この条件は，検定の時必要になるもので，実際の場合には，中心極限定理によって殆ど満足されている。

説明変量（要因）として，T, t, T^2, t^2 etc のうち何をとるかに当っては，次のような考慮をする必要がある。ただし T は，変化計温度を，t は 1 月 1 日を基準にした通年日数を表わすことにする。

（1） 目的変量 y（基線値）の変動をよく説明できるものをとる。y との相関係数が大きいことは勿論であるが，非常に変動の少ないものは，あまり役に立たない。

（2） 測定や操作のしやすいもの。

（3） 説明変量相互間の相関係数の大きくないものをえらぶこと。お互に相関の高い（1 に近い）変量は，説明変量として，どれか 1 つをとればよいことは直感的に明らかである。

前にのべたとおり線型回帰模型の適用を考えておるのに，T とか T^2 とか，あるいは後ででてくる指数関数をつかってよいかということがあるが，これらは T と t から別個に計算し，それを観測値とする変量と考える。即ち変数変換によって，この方法がつかえることになる。この場合，T や t に誤差があれば，変数変換によって，ε_i に対する仮定が破れないかどうか吟味する必要はある。

さて最良の回帰式とは，できるだけ説明変量が少なく，残差平方和（観測値と計算値の差の平方和）が実用に耐え得る程小さいものという基準をおいて，最良回帰式を求めるいくつ

かの手法が考案されでている。

（1） P個の説明変量で，あらゆる回帰式をつくり検討する。つまり，x_1 だけの場合，x_2 だけの場合，x_1 と x_2 の場合，x_1，$x_2 \cdots\cdots x_p$ をつかった場合などを全部検討する。

（2） P個の変量全部で回帰式を求め，偏回帰係数の検定により，変量をへらしていく方法。

（3）（2）とは逆に，1個の変量から出発して，変量をふやしてゆき満足な回帰式を得る方法。

（4） 階段的手法（stepwise regression procedure）と呼ばれるもので，一定の検定基準により，変量を追加したり除去したりして，最良回帰式を得ようとする方法である。原理的には最小2乗法であり，ガウスの代置法などの結果と当然一致する。ガウスの代置法は変量を決めてしまってあるときの計算法である。

（4） の方法（本稿で用いた方法）の手順をのべる前に検定基準についてのべる。

（1） 追加基準

ある変量を追加したことによる残差不偏分散の減少分を，追加後の残差不偏分散に対し，F 検定を行い有意ならば追加する。

（2） 変量除去基準

ある変量を除去した場合の残差不偏分散の増加分が，除去前の残差不偏分散に比し，無意味ならば除去する（F 検定）。

ということになる。この方法の手順を順を追ってのべる。

手順1．y との単相関係数の最も大きい変量を最初に説明変量としてとる。ただし，その寄与率が基準より大きいことが必要である。

手順2．残りの変量中，寄与率の最も大きいものをえらび，それが変量追加基準より大きければ，それを説明変量に加え，2変量による重回帰式をつくる。

手順3．手順2で決定した重回帰式について，両者の寄与率を求め，変量除去基準より小さいものは，除去する。

手順4．残りの変量について，手順2，手順3をくり返していく。

手順5．（打ち切り基準）ある段階で，追加変量も除去変量もなくなったらこの計算を打ち切り，得られた重回帰式を最良回帰式とする。

§3. 解析結果

例1，1974年1月～3月

この期間は，冬期の変化計温度停滞期である。求めた実験式は，$e^{-T/(t-150)}$ の1次式である。T と t の線型とするより，$e^{-T/(t-150)}$ の形にまとめた方が，寄与率及び分散の点からみてよい。ここで変化計の温度としては，絶対観測日前日の世界時12時の温度を用いた。これについては後でのべる。又 $T/(t-150)$ の分母は，時間の基準を変更したことになるが数個の基準日について，同種変量をつくり，基線値との相関係数をとったところ，$t-150$ の場合が一番大きかったということである。この項は，資料期間の長い例（以下に示す）でも

第1表　実験式の寄与率と不偏分散　　　(常数項：+26450)

期間	資料数	実験式	寄与率	不偏分散
1974 1月～3月	17	$-111.90+119.4961\,e^{-T/(t-150)}$	80.82%	0.1868

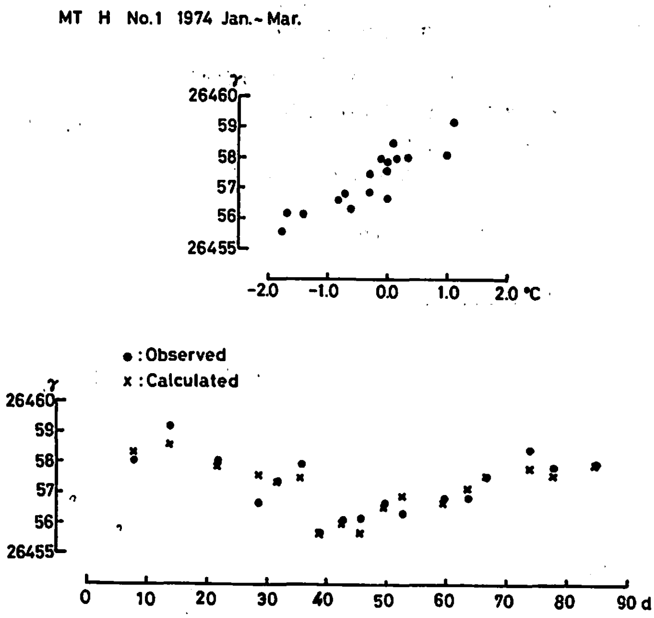

Fig. 1　Relationship between the observed base line values and the variometer temperature at 12h on the day before absolute measurement day (upper). The time change of the observed base line values and calculated values (lower).

重要な役割を果しているが，基準日のとり方には，かなり任意性があり，この意味でも物理的意味は稀薄にならざるを得ないようである。ただ注意すべきは，温度を割る形になっているから，$t-150$ が0になる日を含むことは好ましくない。

例2，1971年6月～11月

この期間は，夏の変化計温度停滞期である。階段的回帰法による場合，時間としては，$t-100$ をとった方がよさそうである。第2表に示したように，あらかじめ説明変量を固定して，ガウスの代置法により算出した回帰式と比較すると，寄与率は低いが，分散の小さい結果になっている。1項増やす毎に寄与率は高くなるが，分散の自由度は，1だけ小さくなる。残差平方和の減少分はもとの残差不偏分散より少ないであろうし，残差自由度は1だけ減少するから，結果として残差不偏分散は大きくなることがある。つまり寄与率は増大す

第2表　実験式の寄与率と不偏分散　　(常数項：+26400)

期間	資料数	算出方法	実験式	寄与率 %)	不偏分散
1971 6月~11月	25	階段的回帰法	$158.91+0.5464\,T-0.027510\,T^2$ $-75.6955\,e^{-T/(t-100)}$	97.10	0.3402
		ガウスの代置法	$90.02+2.1649\,T-0.0519\,T^2$ $-0.15725\,(t-100)$ $+0.00050\,(t-100)^2$ $-0.00278\,T(t-100)$	97.29	0.3512
		ガウスの代置法	$82.41+2.6967\,T-0.09054\,T^2$ $+0.02178\,(t-100)$ $-0.01137\,T(t-100)$ $+0.00036880\,T^2(t-100)$	96.74	0.4218

MT H No.1 1971 June~Nov.

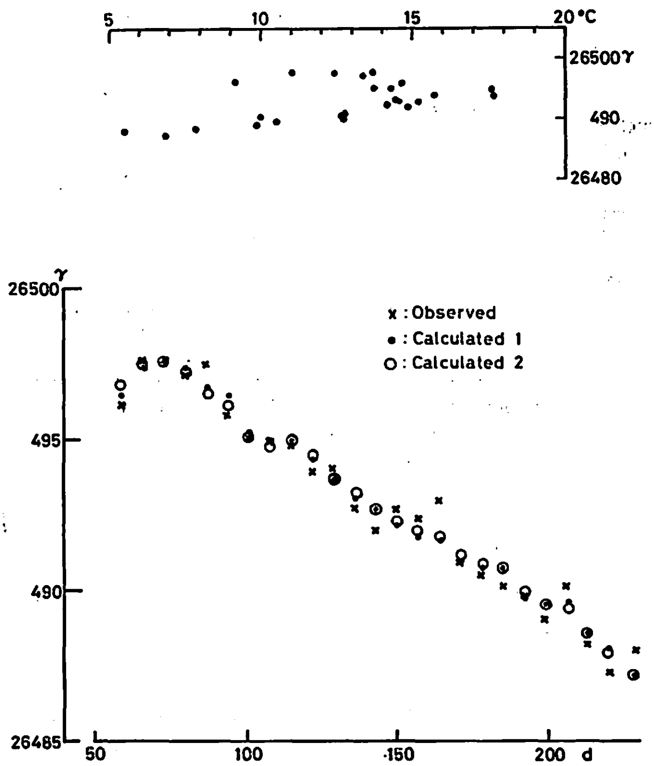

Fig. 2 Relationship between the observed base line values and the variometer temperature at the time of absolute measurement (upper). The time change of the observed base line values and calculated values; ×: observed values, ○: calculated values by the stepwise regression procedure, ●: calculated values by Gauss's method (lower).

るが，精度は増すとは限らない。参考のために，説明変量を変更して，ガウスの方法をもちいた結果を，最下段に併記した。$T^2(t-100)$ より，$(t-100)^2$ の方がよい結果を与える。

例3，1971年1月～12月

この例では，階段的回帰法による結果は，ガウス法による結果に劣る。変化計温度の1次項がおちているのが目立つが，説明変数としてどのような変量の組をとるかによって，その変量の寄与する度合も変ってくるから，このこと自体は異とするに当らないが，温度自身でなく，その何らかの関数でないと，寄与率，不偏分散の有意な向上はないようである。ガウスの方法による2つの結果を比較すると，6月～11月の結果と同様 $T^2(t-100)$ より $(t-100)^2$ の方が有効である。

いずれの例でも，時間に関する2次及び $e^{-T/t}$ なる項の基線値との相関係数は，基準点のとり方によりかなり左右できる。当然のことながら，資料期間を長くすれば，項数もふえ，“基線値変動”に関係している変量を検出できることになるから，1度は数年程度の資料を解析することも必要であろう。

ここまで，求めた実験式が，これだけで充分かの問題にはふれなかったが，いずれの場合も模型適合検定をすると，項数不足という結果になった。その反面追加すべき有効な項を見つけることは極めて困難であった。このことは，平均値の偏り（ここで観測値と称したのは，1日8回あるいは4回の観測値の平均）があるとか，後でのべるように変化計温度としている量が適当でないのかもしれない。柳原の指摘しているように，絶対観測台と変化計台の間に距離があるというようなことも考えられよう。それにしても，半年間程度の資料ならば，不偏分散0.40γ以下になし得る。

第3表　実験式の寄与率と不偏分散　　　（常数項：+26400）

期　間	資料数	算出方法	実　験　式	寄与率%	不偏分散
1971 1月～12月	52	階段的回帰法	$214.51-0.011980T^2$ $-0.00013049(t-100)^2$ $-121.9559e^{-T/(t+50)}$	95.57	0.6774
		階段的回帰法	$232.65-0.012474T^2$ $-0.01882(t-150)$ $-0.00008339(t-150)^2$ $-141.1988e^{-T/(t+50)}$	95.72	0.6686
		ガウスの代置法	$91.78+0.9737T-0.025484T^2$ $-0.00381(t-100)$ $-0.00010456(t-100)^2$ $-0.002255T(t-100)$	97.12	0.4589
		ガウスの代置法	$90.57+1.2291T-0.024238T^2$ $-0.02626(t-100)$ $-0.002018T(t-100)$ $-0.00008038T^2(t-100)$	95.98	0.6409

§ 4. 変化計の温度について

現在変化計の温度は，毎日，世界時 0 時と 12 時の 2 回測定としているが，両者の間にはかなりの差があり，現在の変化計室は気温の日変化も遮断できていない。このため気温の季節変化・日変化と不規則変動が重なっているような場合には，変化計温度も 12 時間の間に 1°C を越す変化をする。このような状態は，当然改善されねばならず，近々新変化計室新築が計画されている。現在は絶対観測時（基線値計算時）にも，変化計温度を測定し，基線値変動の温度依存検討につかっている。ただこの変化計温度というのは，温度計感温部を変化計脚部にとりつけて測定したものであり，基線値変動を起す変化計部分の温度を示すかどうかには疑問もある。殊に所謂変化計温度が 12 時間の間に 1°C も変化する場合には，変化計構成材料の熱伝導度に関係した時間的おくれがあるのではないかと思われる。このようなことがあり得るならば，気温の変化の仕方にも関係してくるであろうし，変化計温度は現在のように 1 日 2 回の離散的測定でなく連続記録も必要になるかもしれない。又変化計温度の変化の早さによって，基線値変動えの関係の仕方も異なるかもしれない。いずれにしても，

第4表　採用温度と寄与率，不偏分散　　　(常数項：+26450)

期　間	資料数	温　度	実　験　式	寄与率%	不偏分散
1974 1月～3月	17	絶対観測時	5.63+1.0262(T+2)	73.40	0.2592
		前日12時	5.44+1.0499(T+2)	79.31	0.2016

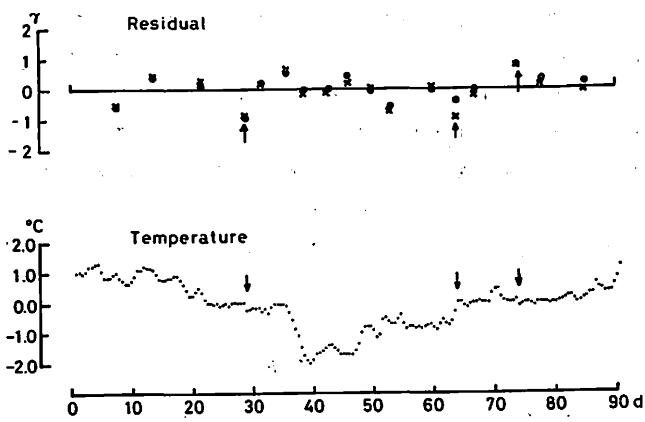

Fig. 3 The time series of the residuals (upper) and the variometer temperature observed at 0h and 12h (lower). ×: in case of the variometer temperature at the time of absolute measurement, •: in case of the variometer temperature at 12h the day before absolute measurement day, arrows: showing the extraordinary residuals in case of the abrupt change of the variometer temperature.

少なくとも気温の日変化位は，遮断できる変化計室でなければ，問題は複雑過ぎるが，この種の調査は，まだ充分とは云えない。

ここには，これに関連しそうな一例をあげておく。1974年1月～3月にかけて，通常1週間に1度行う絶対観測を，3～4日毎に行った資料について，基線値を変化計温度の一次関数として表現すると，（前節では，$e^{-T/t}$ の一次式としたが，温度だけの一次式でもかなり表現できる。）変化計温度として，絶対観測時の温度をとるより，十数時間前の温度，具体的には観測前日の12時の温度を使つた方が寄与率の高い実験式を得ることができる。換言すれば，絶対観測時の温度と基線値の相関より，前日12時の温度と基線値の方が高い（第4表)。又，第3図に示したように残差の大きい時が，温度の急変時に対応して起っており，1971年の資料でも残差の大きい時は，温度の変化が複雑であることが多いことなどからも，見逃し得ない問題と思われる。結論的に言えば女満別では変化計温度の複雑な変化を遮断することが先決かもしれない。

§5. 終 り に

今回解析したのは，地磁気観測所女満別出張所の水平分力第1変化計であるが，女満別の水平分力第2変化計，鉛直分力第1及び第2変化計について，短期間ではあるが，1974年1月～3月の資料をつかい求めた結果を，室松が報じている[1]。それによっても，又柿岡・鹿屋の水平分力，鉛直分力変化計の場合も，ほぼ同様な説明変量で回帰式を構成できるようである。柳原は，物理的考察から，温度の2次多項式と時間の1次式及び温度の2次多項式の時間積分との和によって基線値変動を分析した[2]。筆者は，時系列の統計的処理に稍々重点をおいたために時間を陽に用いて物理的意味のつけにくい表現になっている。しかし，もともと温度は，時間の関数であって時間によって表現することが可能であり，式上の両者の互換性は高い。柳原も指摘しているように，ドリフト自体が温度の関数と考えられるような場合，基線値の実験式表現を求めることだけから，変化計の温度依存とドリフトを分離することは不可能ではあるまいか。温度依存部分を定義ずけ残りの変動を，ドリフトとせざるを得ないような関係にある。一定温度のドリフトを，各種温度レベルで調べるとか，短時日の間に温度を変えるとかの実験は有用ではあるまいか。

終りに，この問題に関心を寄せられ，有意識な御検討をいただいた地磁気観測所長柳原博士に謝意を表します。

参考文献

(1) 室松富二男 (1974): 技術報告 第14巻，第2号，1頁
(2) 柳原 一夫 (1975): Geophys, Mag. Vol 37, No 3. published by the J.M.A, Tokyo

On Changes of Base Line Values of Geomagnetic Variometer — a Method of Base Line Value Determination —

Yushin YAMAGUCHI

Abstract

The base line value of the geomagnetic variometer is usually determined through absolute measurement once or twice a week. From them, the daily base line values are calculated by the various method. It is well known that the observed base line values not only depend on the variometer temperature, but also drift away. According to circumstances of the variation house or the climate, the behaviour of the base line values becomes very complicated. Thus the reasonable determination of the daily base line values is difficult.

In this paper, the availability of the multiple regression analysis of the observed values is examined. Based on this method of analysis, the qualified procedure for routine work needs to be devised.