

空中磁気探査のシステム化について (II) —データ処理ソフトウェアシステム—

中 塚 正*

NAKATSUKA, T. (1988) Systematization of Aeromagnetic Survey (II)—Data Processing Software—. *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol. 40(2), p. 99-111.

Abstract: Systematic data processing software for aeromagnetic mapping has been developed since 1964. This software system is an assembly of numbers of individual programs, and the processing is executed step by step confirming the results of each step. Following technical aspects included in the system are described in this paper: a) digitization procedure of photogrammetric position fix, b) correction for the offset of radio-positioning data, c) position fixing by radio-positioning data based upon the distance calculation along the ellipsoidal earth surface, d) cross-point control for the purpose of the correction for measurement errors, e) approximated calculation of IGRF residuals, and f) two-dimensional interpolation of magnetic anomaly field into square-mesh data.

1. はじめに

前編(中塚, 1984 a)では, 空中磁気探査のデータ取得から磁気テープデータの再生検査に至る各種のハードウェアとそれに付随するソフトウェアについて, 昭和57年度までの開発実施の状況について述べた。また, 昭和58年度以後に更新されたハードウェアについては, 探査システム全般の紹介とともにすでに解説した(中塚, 1984 b)。

一連の本報告の主題である「空中磁気探査のシステム化」の研究の経緯については, 前編の序章に述べたので, ここでは省略する。本編では, 測定データから磁気図作成に至るデータ処理のソフトウェアについて述べる。

空中磁気探査の機上測定からは膨大な量のデータが得られ, そのデータを磁気テープに記録していることは前編に述べた。この測定データから磁気図の作成に至るデータ処理は複雑な過程が必要である。旧来のデータ処理の方法では, この全過程を人手に頼っており, 多大の労力が注がれてきた。しかし, この過程の作業量の大部分は単純作業の繰返しであり, コンピュータを利用した自動処理化が望まれていた。

筆者は, 昭和49年にこのデータ処理の自動処理化に着手し, まず陸域探査におけるデータ処理システムの開発を行った。この処理システムは, 昭和49年以降の陸域探査のデータ処理に活用されつつ改良が加えられてきた。さらに, 昭和52年からは, 海域探査におけるデータ処理

の自動化をめざして処理システムの拡張等を行った。そのシステムは, その後, 地質調査所が行ったすべての空中磁気探査のデータ処理に適用されつつ, さらにシステムの改良等が加えられ今日に至っている。

本報告では, このデータ処理システムの全体の処理の流れの概要を示すとともに, その中で特殊な技法または思考法を取り入れているものとして, ①対地映像標定位置のディジタル化, ②電波航法データの補正法, ③電波航法データによる位置標定手順, ④交点コントロール, ⑤IGRFの近似計算, ⑥磁気異常値の格子点データ補間, の問題を取り上げ, 各論的に述べる。

2. データ処理システムの概要

近年の地質調査所で行っている空中磁気探査においては, 標準的には, 航空機に空中磁力計を搭載し, 1秒間隔で0.1 nT分解能の全磁力測定を行いつつ, 速度150ノット(秒速75 m)程度で飛行する。同時に電波航法装置からは航法データが10分の1秒程度の間隔で, ドップラーレーダからは速度信号を積分した相対位置座標値が連続的に得られるが, これらを, 空中磁力計と同期した1秒間隔でサンプリングしたものが, 全磁力測定値とともに磁気テープに収録される。また, 陸域上空(海域のみの探査では, 探査の前後に, 陸域に設けられた電波航法データ較正用の測線上を飛行する)においては, 対地VTRシステムを動作し, 連続的な対地映像を取得する。一方, 探査区域内または隣接する陸域には, 磁場の経時変化をモニタするための定点磁力計がおかれ, 探査飛行中の磁力値が記録される。これらのデータを用いて, 磁

* 地殻物理部

気異常図作成に至るまでの処理を行うのが本データ処理ソフトウェアシステムである。

このデータ処理ソフトウェアシステムは、多数の個別のソフトウェアの集合体である。これは、一方ではデータ処理の各段階で処理結果の確認を行いながら処理を進めるためであり、他方では開発の初期における当所のコンピュータ TOSBAC-3400/51 の機能と容量に合わせて作成されたためである。その結果、処理の中間段階ではデータは各種の形式で磁気ディスクまたは磁気テープ上に保存される。

処理システムの開発にあたっては、当初、陸域探査の写真標定による位置決定法を用いる場合について行い、その後、各種の位置決定法を使用できるようにプログラムの追加を行い、さらに処理の自動化を助けるための各種の改良を加えている。現在の処理システムのデータおよび処理の流れを第1図に示す。ここで1つの矩形が1つのプログラムに対応し、二重線が処理の流れを、一重線がデータの流れを示す。なお、図中には示さないが多くのプログラムの中では一時記憶として磁気ディスクが多用されている。

機上測定データ (AMG) は、アナログモニタ記録と現地でのデータチェック結果を参考にしつつ、修正・補正を含む編集 (EDT) を行い、磁気ディスク上の編集ファイル (AM) となる。一方、この一連の処理の中で使用する各種の座標系の設定と後に述べる IGRF の近似計算のための係数の算出を行い (TOP)、これ以後に作成される各種ファイルにヘッダー情報として記録する。ここでの出力ファイル (FR) は、そのヘッダー情報のみからなるファイルである。

次に編集ファイル (AM) は、磁力値に対しては地上定点測定データによる日変化補正が行われ、測線の起点・終点の時刻情報を用いて測線単位にデータの切り出しを行い、測線毎の計測データファイル (MC) に変換される (GFL)。さらに、そのデータについてノイズ除去の処理 (US) が行われる。このとき、ノイズ除去の方法を指定する必要があるが、その指定を的確に行えるように、データ値をアナログ形式のグラフに表現 (DAC) して、目視点検を容易にし、また必要があれば、測線単位でデータの数値表を出力 (LO) できるようにしている。

ノイズ除去処理後の計測データ (MCF) は、再度アナログ化出力 (DAC) による内容の点検を経た上で、位置標定の処理 (POS) が施される。この処理は、入力ファイル (MCF) 上の位置標定データが、電波航法装置等の測定値として与えられているのに対して、第3-4章に述べる方法により、磁気図を作成する直角座標系の値に変

換するものである。この出力ファイル (PMO) を第1次 PM ファイルと呼ぶ。ここで第1次の航跡図作成 (TRK) が行われるが、位置標定 (POS) のコントロールデータの入力エラーをチェックする意味がある。

続いて、測線の交点での磁力値の不一致を解消するための一連の補正処理 (CXV・CLC・LVC および XPC) が行われる。探査測線は通常、平行直線群からなる主測線と、それに概ね直交する交差測線からなる。この両測線の交点では双方の磁力値は理想的には一致する筈であるが、現実には、位置測定誤差・機体磁気ノイズ残留分および地上定点と探査区域の間の経時変化磁場の相違などのため、差を生ずる。これらの誤差原因を多数の交点での磁力値分布の状況から推定して補正しようとするのが、この一連の処理であり、第5章で詳述する。その結果の出力ファイル (PM) は、第2次航跡図 (=最終航跡図) の作成 (TRK) による確認を経て、最終 PM ファイルとなる。

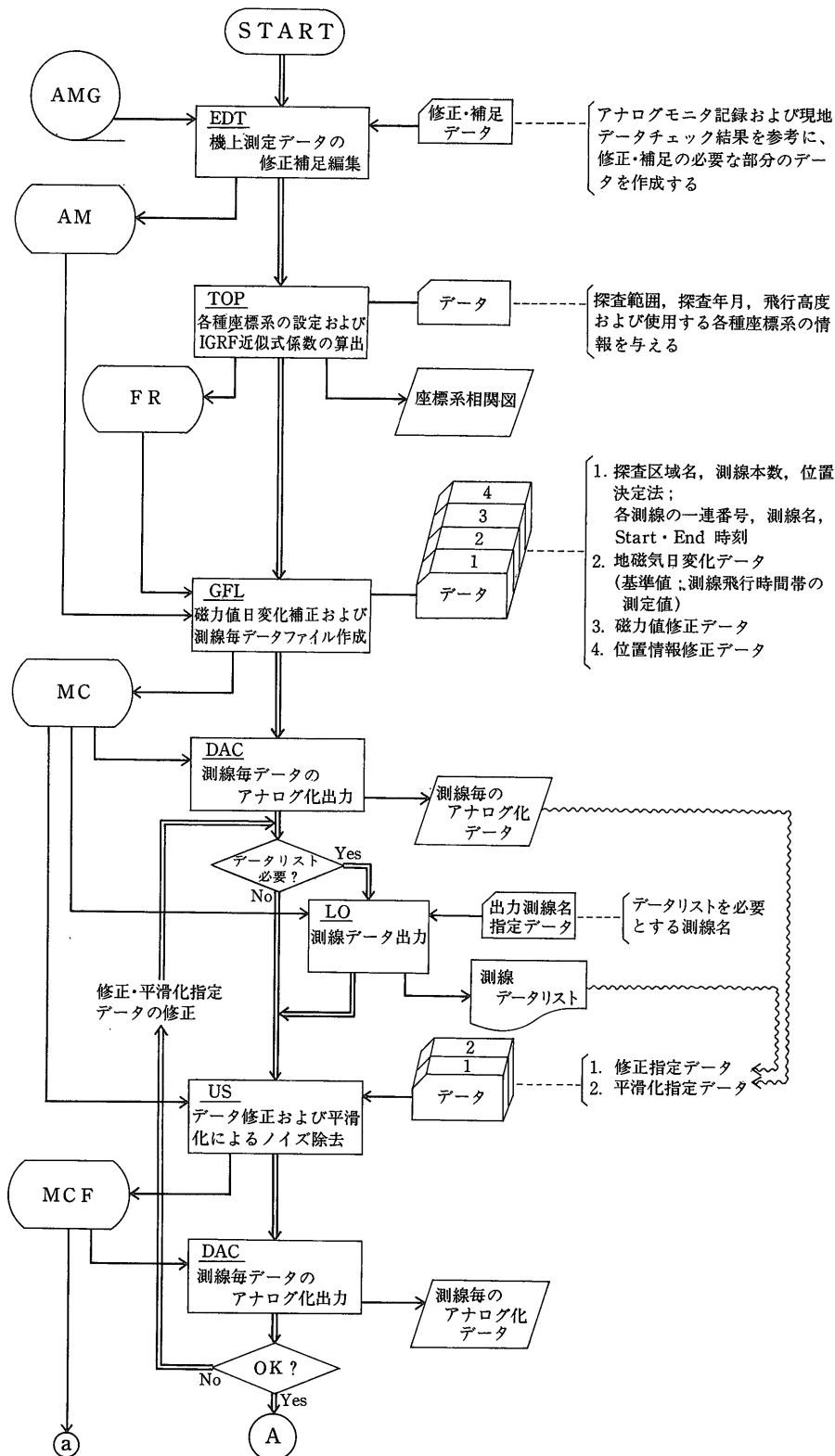
最後に、残差計算とグリッドデータへの変換 (GRD/GRMD) の処理により、残差格子点データファイル (RS) が作成され、航跡図を含む磁気図関化の処理 (FLT, MCV, SMP および ZMP) を経て、残差磁気異常図が自動関化される。また、磁気図に記入すべき極値のデータも自動的に拾い出される (MHL)。

処理の各段階には、特に高度な数学的手法等が用いられているわけではなく、全体にわたって解説することは不必要と思われるので、説明を要すると思われる部分についてのみ、以下に各論的に述べる。なお、自動関化のプログラムに関しては、その原理について以前に解説してある (中塚, 1979) ので、ここでは説明しないが、現在、そのソースプログラムは FORTRAN 言語で記述されており (中塚ほか, 1986)、それをさらに一部修正した形で使用している。

3. 位置標定コントロールデータの入力

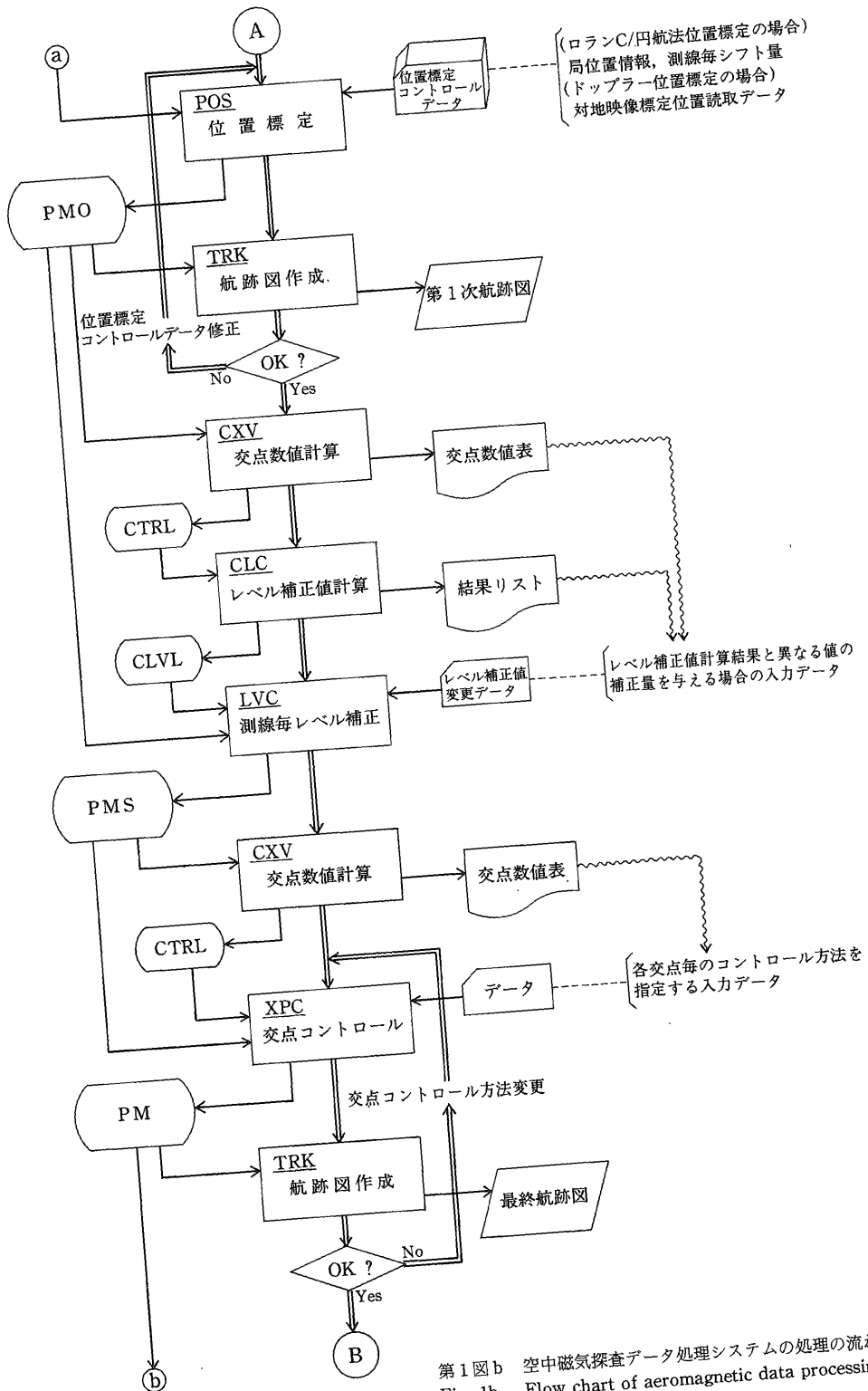
空中磁気探査では、航空機の精度よい位置決定が重要である。位置決定のための方法は種々のものが考えられるが、地質調査所で行っている広域的な探査 (測線間隔 2-5 km) では、特別な施設を必要とせず利用の容易なものとして、

- ① 対地写真 (ビデオ) カメラによる対地映像位置標定、
- ② ドップラーレーダからの速度信号を積分して得られる相対位置標定、
- ③ 電波航法装置 (デッカ・ロランCまたはロランC円航法) による電波測量位置標定

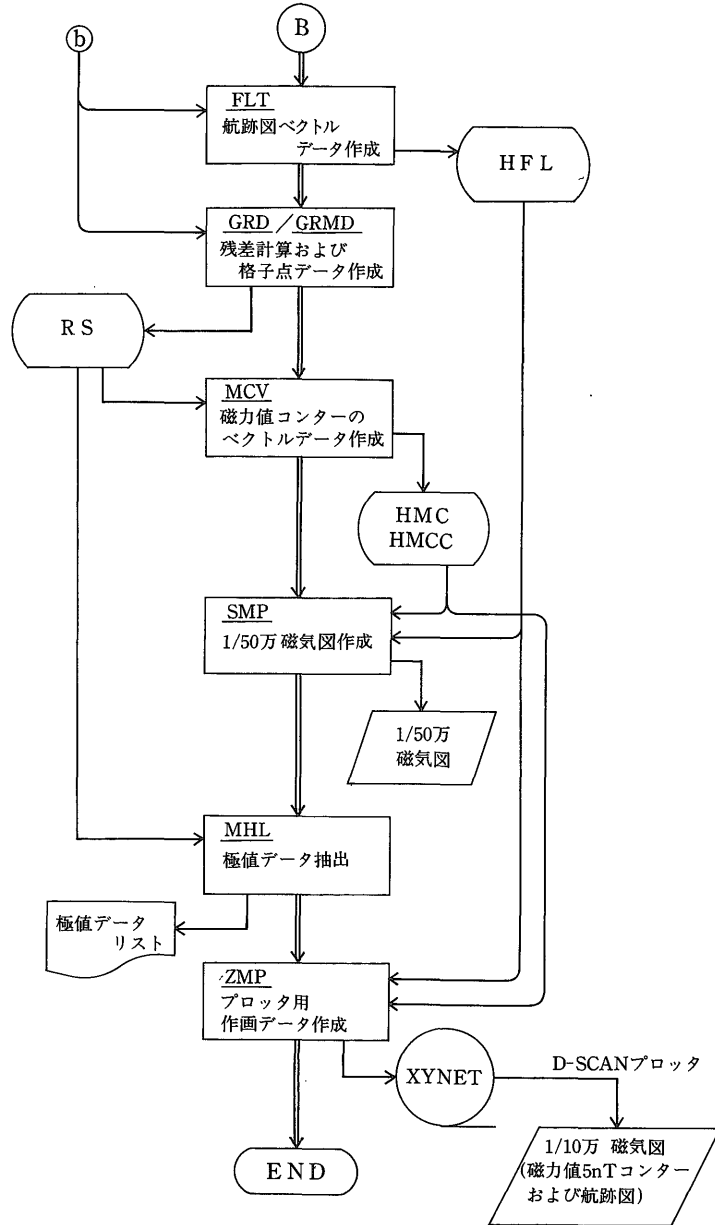


第1図 a 空中磁気探査データ処理システムの処理の流れ (1/3). 二重線は処理の流れ, 一重線はデータの流れを示す.

Fig. 1a Flow chart of aeromagnetic data processing system (1/3). Double lines indicate the process flow, whereas simple lines correspond to the data flow.



第1図b 空中磁気探査データ処理システムの処理の流れ (2/3).
Fig. 1b Flow chart of aeromagnetic data processing system (2/3).



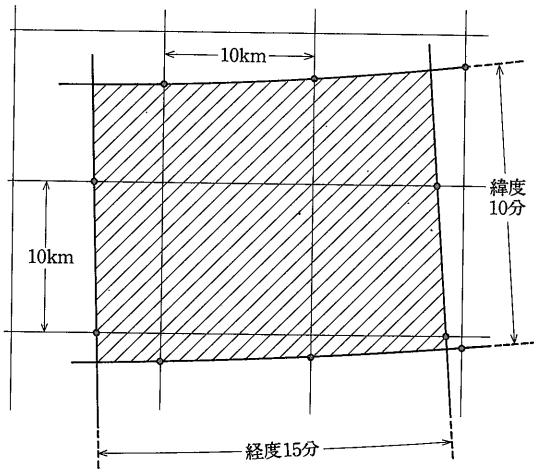
第1図c 空中磁気探査データ処理システムの処理の流れ (3/3).
Fig. 1c Flow chart of aeromagnetic data processing system(3/3).

の3者の組合せを用いている。測位の絶対精度は対地映像位置標定（以下、対地標定と略記）が優れているが、対地映像は特に良好な天候の下の陸域でかつ特徴的な地形・地物の上空でのみ有効である。このため実際には、陸域探査においては離散的に対地標定を行ってその間をドップラーレーダのデータで補間し、海域探査では電波

測量データを主体としつつそれに含まれる系統的な誤差を陸域での対地標定との比較によって補正している。

3.1 対地映像標定位置のデジタル化

機上観測で得られるデータのうち最も特殊なものが対地映像記録である。その他のものは主として原理的にデジタルに計測されたものであり、デジタル磁気



第2図 5万分の1地形図上基準座標線設定の模式例。黒点が計算位置を示し、それらを直線で結ぶことにより座標線が設定される。
 Fig. 2 A schematic example of base-line setting on a quadrangle topographic map of 1:50,000 scale. Dots are calculated points, and are connected straight into base-lines.

テープに収録されているので直接コンピュータに入力される。しかし、対地映像記録はフィルム上もしくはビデオテープ上の映像であり、標定作業によって地形図上の点として表現されてもなお、何らかの方法でデジタル化する必要がある。

デジタル化の方法としてはいくつか考えられるが、大別すれば、緯経度座標に変換する方法と平面直角座標に変換する方法とがある。地形図は緯経度線によって区切られており、外見的には緯経度値への変換が容易そうに見えるが、地形図の図面の大きさ・形は緯度・経度によって異なるため、標準的な“ものさし”をつくることができず、現実的にはデジタルイザを用いて補間計算をする必要がある。平面直角座標に変換する方法では座標値の計算が必要であり、地形図は UTM 展開されているので、UTM 座標以外の直角座標を用いる場合、座標線は一般には曲線となる。しかし現実には、個々の5万分の1地形図内でその座標系を直線座標とみなしても、誤差はきわめて小さく無視できる。従って、各地形図上に適当な間隔の基準座標線を設定すれば、基準線からの変位は簡単に読みとることができる。探査の現場でのデータ処理に際しては、後者の方法が適しており、さらに磁気異常図作成のための格子点データの作成にも都合がよい。本処理システムでは、後者の方法を採用し、直角座標として国土調査法に基づく新平面直角座標系また

は UTM 座標系を用いることとしている。

本処理システムによる対地映像標定位置のデジタルイザは、基準座標線の設定と標定点の座標値読取りの2段階によって行われる。その手順は、第1図には示していないが、直角座標系の北向座標値(X)が10 km 毎の東西方向の直線と経度15分毎の子午線との交点、および東向座標値(Y)が10 km 毎の南北方向の直線と緯度10分毎の緯線との交点の位置を計算する。この計算出力により基準座標線を簡単に引くことができ、第2図に模式的に示すように、5万分の1地形図上に一辺10 km(図上で200 mm)の格子が設定される。次に、この各基準線に対して南および東に向かって増加する200 毎の値を当てはめ、その線の座標値とする。標定点の座標は、この基準線からの変位分を透明な方眼紙を用いるなどして mm 単位で読み取ることにより、5万分の1地形図上で mm 単位すなわち50 m 単位でデジタルイザされ、通常3-4桁の整数で表現される。この値を時刻データとともに80欄カードの形式のデータ(第1図b中のPOSの処理に対する入力データ)としてコンピュータへ入力する。

この方法において位置座標の分解能は50 m であるが、これによりデータを5万分の1地形図上で mm 単位で扱えて便利であるとともに、対地映像標定の精度と比較して概ね適正な分解能であると思われる。なお、緯経度値から平面直角座標値を求める計算方法については付録1に示す。

3.2 電波航法データの補正

電波航法データとしては、航法電波送信局からの電波の到達時間に関する量として10分の1マイクロ秒単位の値が得られる。このデータから磁気異常を図化する座標系での位置を求める位置標定については次章で述べるが、このデータは一般に測定時の気象条件等による系統的な誤差を含んでいる。この誤差が2-3マイクロ秒となることは珍しくなく、その補正を怠ると数100 m ないし2 km の位置標定誤差を生ずることとなる。また、ロランC円航法装置を使用する場合は、本質的に相対値のみが有意であり、内蔵の周波数標準の周波数オフセットによる計測データの線形ドリフトも考慮に入れる必要がある。従って、探査の前には陸域に設定された較正用の測線を飛行し、電波航法データと対地標定結果とを比較することにより系統的な誤差(ドリフトを含む)を決定し、補正する。なお、沿岸域の探査では、測線の一端が陸域にかかることが多いので、探査測線の一部を較正用測線として用いることができる。

電波航法データの補正の方法としては、

- ① 補正前のデータを用いて位置標定を行い、これと

対地標定結果とのずれを求めて直角座標系の上で測線の平行移動を行う方法と、

- ② 対地標定結果と航法チャート(電波送信局の位置情報等から計算で作成される)から標定点での理論的な航法データ値を与え、それと実測データとの比較から電波到達時間のずれを求めて航法データの値を補正する方法

とが考えられる。両者の方法は、航法チャートの位置線が平行直線群で近似できる範囲では同じ結果を与えることになるが、送信局に比較的近い調査区域等では後者の方法が妥当である。本処理システムではどちらの方法でも補正可能なようにプログラミングされているが、後者の方法を用いる場合が多い。いずれの場合にも、対地標定点の記入された地形図と航法チャートとを重ね合わせるにより誤差ベクトルを得る。前者では、航法データをチャートにプロットして対地標定点までの各座標軸方向の距離を求めるのに対して、後者では、対地標定点の理論的航法データ値をチャートから読み取り実測データと比較することとなる。

4. 電波航法データによる位置標定

電波航法データを用いた位置標定に関しては、大久保・中塚(1981)がロランC(双曲線)航法について簡便な方法を示している。その方法は、航法チャートの位置線が通る位置の緯経度値を数表の形にまとめたロランCテーブルを用いるもので、このテーブルのデータから局所的な変換近似式を導き、標定計算を行っている。しかし、そのようなテーブルは、デッカやロランC円航法用のものは発行されておらず、昭和57年度からのロランC円航法装置の導入にあたって位置標定プログラムの新たな開発が必要となった。

電波航法データによる位置標定では、本質的には、地表面に沿った電波の伝播時間を計算し、複数の送信局からの伝播時間が測定データに合致するように位置座標を決定する。このためには、送信局の位置情報とともに地球楕円体の表面に沿った距離の計算、電波の位相遅れを考慮した伝播速度の設定が必要となる。また、送信局位置の緯経度は海上保安庁水路部等から発表されている値を使用するが、その際、準拠している楕円体の差異と座標原点(Datum)の不一致に注意を払う必要がある。本処理システムでは、これらの諸点について次の方法を採用している。ここではロランC電波の使用を想定しており、円航法・双曲線航法のいずれにも適用できるようにプログラムされている。

- ① 地球楕円体としては、日本で採用されているベッ

セル原子(測量法および水路業務法で定義されている)を用いる。

- ② 送信局の緯経度値を日本の測地系(Tokyo Datum)での値に変換するにあたっては、SEPPELIN(1974)の結果を用いる。
- ③ 地球楕円体の表面に沿った距離(測地線長)の計算はSODANO(1963)の方法による。
- ④ 電波伝播速度は、1957年に国際測地学地球物理学連合(IUGG)で採択された自由空間での光速と標準大気屈折率から得られる値を用いる。
- ⑤ 大地の影響による位相遅れは、伝播経路のほとんどが海上伝播であると考え、アメリカの国立標準局による方式(近距離側と遠距離側の2つの計算式を使い分ける)(佐藤・内野, 1973)をさらに距離の単一の関数で近似した計算式を用いる。

なお、具体的な計算式および数値等については付録2に掲げる。

原理的には、以上の方法で位置座標から電波伝播時間(双曲線航法の場合は時間差、以下同様)が計算できるので、何らかの方法でその逆変換を行えば位置標定ができることとなる。しかし、探査の各測点毎にこのような計算を行うと膨大な計算時間となることが予想されるので、本システムでは、位置座標から電波伝播時間を求める順変換を探査区域での多項式近似で与え、測定航法データから位置座標を求める逆変換には、その近似多項式を用いてニュートン法による収束解法を適用している。この近似多項式を求めるには、探査区域を包含する範囲の緯経度格子点(数100点)について直角座標値と上記による電波伝播時間を計算し、これをもとに最小自乗法によって多項式の係数を求める。近似多項式としては、300 km 四方程度の範囲に対しても近似誤差が0.1マイクロ秒を超えないように配慮して、4次までの15項を用いている。

逆変換の収束解法においては、初期値と収束判定条件を与える必要がある。位置標定は測線単位に行うこととなるので、各測線の始点では探査区域の中心点を初期値とするが、隣合う測点は近接しているため、始点以外では直前の標定点を初期値とすることにより、とくに良好な初期値が得られる。さらに、この場合の収束解法は非常に条件がよく、一般に反復による歩みの距離は、1回の反復毎に100分の1程度になる。また、収束判定条件としては、コンピュータの計算精度(実行結果の判定から10 cm オーダーと見積られる)をも考慮して、反復による歩みの距離が5 m 以下となったとき反復を打ち切ることとしている。従って、実際の測点間隔は100 m 未

満であるので、始点以外では2回の反復計算で収束していると考えられる。

5. 交点コントロール

位置標定によって航法装置の測定データは、磁気異常図作成の位置座標に変換され、この位置データと経時変化分の補正(いわゆる日変化補正)を行った磁力値データから成る測線毎の第1次PMファイル(PMO)が作成されるが、さらに各種の補正を加える必要性の検討のために交点磁力値のチェックを行う。このプログラム(CXV)は、主測線と交差測線との交点を求め、その位置の両測線上での磁力値とその差およびマグネティックコントロールのデータを出力する。この処理の上で主要な問題は、交点を見つけることとマグネティックコントロールである。

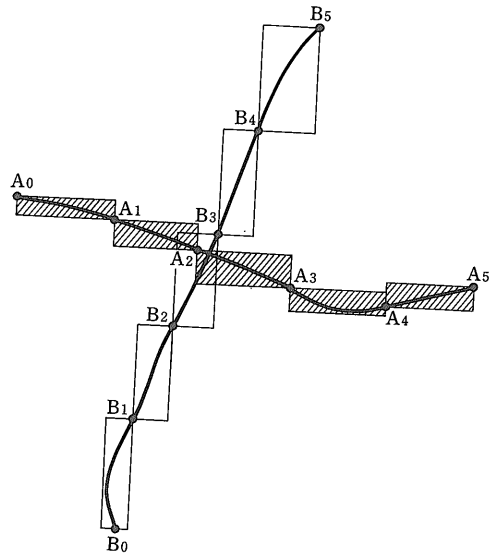
5.1 交点探索のアルゴリズムとマグネティックコントロール

交点を見つけるための単純なプログラミングとしては、測線を各測点で区切り、個々の線分どうしが交わるか否かの判定を繰り返すことによって実現できる。しかし、測点数は標準的な測線でも1,000を越え、1つの交点を見つけるために平均50万回以上、1つの探索地域のデータに対しては数億-数10億回の判定が必要となり、計算時間が膨大となる。この難点を解決するために、本システムでは以下に例示するような手法を用いている。

- ① 交点を求めようとするA・B両測線をそれぞれいくつかのブロックに分割する(第3図参照)。
- ② 各ブロックに対してその中の全測点をちょうど包含する座標系に沿った長方形を考える。
- ③ 長方形が互いに離れているブロックどうしでは交点がないことが明らかであるので、長方形が重なりあっているブロックどうしについてのみ、測点で区切られた線分に分割して交わるか否かの判定を行う。

すなわち、第3図の場合には、 A_1-A_3 の範囲と B_2-B_3 の範囲について細かな判定を行えばよい。判定回数を少なくするには、測線内の測点数が N のとき、この測線を \sqrt{N} 程度に分割するのが最適であるが、本プログラムでは単純に30毎の測点でブロックを区切っている。

一方、マグネティックコントロールとは、元来、海域の探査において磁場測定精度が位置測定精度に比して優れていたため交点磁力値が一致するように航跡を移動して探査精度の向上をはかるために考えられた手法であり(陶山・小川, 1970)、両測線上で磁力値が等しく距離が最小となる点の対を求めることである。今日では、位置



第3図 交点探索処理の効率化。矩形どうしが重なり合う場合のみ詳細に探索する。

Fig. 3 Efficient method of searching for cross-point. Detailed search is executed only in the range of combinations of superposed rectangles.

測定精度も向上しており、特に遠隔海域では両磁力値の相違が経時変化磁場の補正の不適切によるとみられる例も多く、単純なマグネティックコントロールは行わない。その場合、差を生じた原因を推定し、磁力値・位置のいずれかを修正することとなるが、マグネティックコントロール用のデータは交点付近の磁場傾度を示す指標として、日変化補正誤差および位置標定誤差を検討するための資料ともなる。この処理のためのプログラミングは、やや複雑であるが、人手による場合の思考過程をそのまま論理化すればよい。すなわち、測線AおよびBがX点で交わっているときX点の両測線上での磁力値を a および b とし、 $[0 \leq k \leq 1]$ なる k に対して両測線上で磁力値が $[a + k(b - a)]$ となる点をPおよびQとすると、 k を0から1まで変化させたときPQ間の距離が最小となるものを求めればよい。なお、プログラム上では、P点およびQ点を求めるにあたってX点からあまりにもかげ離れた位置まで検索しても無意味であるので、適当な距離で打ち切っている。また、 k については0.05刻みで変化させている。

5.2 交点コントロールの方法

測線の交点における両磁力値は理想的には一致する筈であるが、現実には種々の誤差要因のために差を生ずる。

そこで、作成された交点数値表をもとに、交点での磁力値差が生じた原因を解明し、磁力値または位置座標を補正する。このとき、単一の交点磁力値差からその原因を決定することはできないが、多数の交点数値の傾向と経時変化磁場を含む各データの精度の見積りから、差を生じた原因を推定することができる。

実際の交点コントロールの前には、標準的に測線毎の磁力値レベルの補正 (第1図bの CLC および LVC の処理) を行っている。これは、主として、調査区域が経時変化磁場観測を行っている地上定点から遠く離れているときに、磁場の経時変化補正に誤差を生ずるのを軽減するためのものであるが、同時に、機体磁気補償が完全でないために生ずる飛行方向に対応した磁力値レベルの差をも補正できる。この補正值計算 (CLC) では、測線毎の直流的なバイアスのみを考え、交点磁力値差が小さくなるように重みつき最小自乗法によってそのバイアス値を決定する。このとき、磁場傾度の高いところでは微小な位置誤差が大きな磁力値差をもたらすこととなり、バイアス値決定に有害となるので、交点数値表から得られる磁場傾度の2乗の逆数によって重みづけしている。

測線毎のレベル補正 (LVC) によって第2次 PM ファイル (PMS) が作成されるが、これについて再度、交点数値計算 (CXV) を行い、これに基づいて本格的な交点コントロールの処理 (XPC) を行う。最適な交点コントロールの方法を選択するには、測定データの全般的な精度の認識をもとにした十分な考察と熟練が必要である。そのため、この処理の完全自動化は難しい。本プログラムでは、簡易な入力データ (1交点あたり1桁の文字型データ) によって、各々の交点のコントロール方法を次の8種類のうちから選択指定するようになっている。

- ① マグネティックコントロールのデータにより、主測線の位置のみを移動する。
- ② マグネティックコントロールのデータにより、交差測線の位置のみを移動する。
- ③ マグネティックコントロールのデータにより、両測線の位置をその中点へ移動する。
- ④ 交点磁力値差データにより、主測線の磁力値のみを加減する。
- ⑤ 交点磁力値差データにより、交差測線の磁力値のみを加減する。
- ⑥ なんら補正を行わず、もとの値を保持する。
- ⑦ 交点とみなさない。両測線とも、その両側の交点でのコントロール方法による“なりゆき”に任せる。
- ⑧ コントロール方法を詳細に別途指定する。この場

合、両測線名および磁力値と位置座標の補正量を記述したデータが追加される。

ここに、①-⑤の処理の場合には、交点磁力値は計算誤差の範囲内で一致することになるが、⑥-⑧の処理ではその保証がないので、必要があれば、この交点コントロールの結果 (PM) を、さらに交点コントロール前のデータ (PMS) とみなして、交点数値計算 (CXV) と交点コントロール (XPC) を再度行う。

コントロール方法の良否の判定については、第1図では交点コントロール直後の航跡図作成 (TRK) の結果によってのみ判断しているように書いてあるが、現実には、最終的に作成される磁気図 (SMP の出力) の検討によって、不自然な磁気異常分布が見つかり、コントロール方法の不適切が発見される場合もある。その場合には、交点コントロールの処理 (XPC) にさかのぼって処理をやり直すこととなる。

6. IGRF 残差計算

本処理システムでは、IGRF 残差計算にあたって IGRF を直角座標値の2次式で近似し、その近似式によって計算を行っている。これは、IGRF の計算式がかなり複雑でかなりの計算時間を必要とする一方、通常の探査地域の範囲では IGRF はゆるやかな曲面で表わされ、近似計算によって十分な精度を確保できるからである。実際の残差計算は第1図cの GRD/GRMD のプログラムの先頭で処理されるが、近似式の係数を求める計算は、第1図aの TOP のプログラムで行われ、その後の各データファイルにヘッダーレコードとして係数の値が記録されている。近似式係数の計算方法は次の通りである。

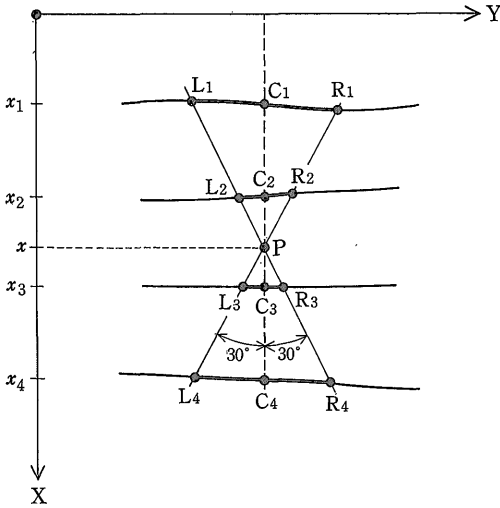
探査区域を含む範囲を、緯経度各方向に5分毎の格子に分割し、各格子点 $i(i=1, \dots, n)$ に対する直角座標値 x_i, y_i および IGRF 全磁力値 f_i を求める。そして、 f_i を x_i, y_i の2次式

$$g_i = a_0 + a_1 x_i + a_2 y_i + a_3 x_i^2 + a_4 x_i y_i + a_5 y_i^2$$

で近似し、最小自乗法により

$$E = \sum_{i=1}^n (g_i - f_i)^2$$

を最小にする $a_j(j=0,1, \dots, 5)$ を求める。このような近似式によって得られる IGRF の近似誤差は、かなり広い地域を対象としても十分小さい。例えば、日本周辺の200 km×200 km 程度の範囲を対象として計算すると、自乗平均誤差は0.1 nT 未満となり、誤差の最大値でも0.3 nT 程度となる。なお、正規の IGRF の計算方法については、すでに報告したもの (中塚, 1986) を使用してい



第4図 1次元ラグランジュ補間法による格子点データ補間

Fig. 4 Mesh data generation by the method of one-dimensional Lagrange's interpolation.

る。

7. 格子点データ補間

各種の補正を終えたデータは、2次元的な補間を行うことにより、測線に沿って配列したランダムデータから格子点データに変換される。格子の大きさはもとのデータをより忠実に表現するためには小さいほどよいが、格子を細かくすると格子点データへの変換の計算時間が大幅に長くなる。しかし、本処理システムでは、原データを忠実に保存することに重点をおき、格子の大きさを一辺 200 m としている。

補間の方法には各種のものがあるが、補間を行う前のデータは測線方向に密でそれに直交する方向には粗な分布をしており、この特徴に適した補間方法を考えねばならない。本処理システムでは、現在、(1) 2次元性を加味した1次元ラグランジュ補間を用いる方法 (GRD) と、(2) 重みづけした2次元曲面あてはめによる方法 (GRMD)、の2つの補間法を用意しており、状況に応じて使い分けている。

(1) 1次元ラグランジュ補間

データ点は測線方向に密であるので、第一段階で線形補間により主測線方向に格子サイズ (200 m) に対応した等間隔のデータに変換し、第二段階でこれを直交方向にラグランジュ補間を行う。しかし、単純なラグランジュ補間では、測線と測線の間付近のデータが測線方向に

関して不安定になりやすい。この不安定性を避けるため、本プログラムでは第4図に示すように、角度で前後30度の範囲のデータの平均値をその中央の点の代表値とみなし、その値によって補間計算を行っている。すなわち、第4図で L_1-R_1 、 L_2-R_2 、 L_3-R_3 、 L_4-R_4 の範囲内にあるデータ点の平均磁力値 (m_1, m_2, m_3, m_4) を各々 C_1, C_2, C_3, C_4 点の代表値とみなし、 C_1-C_4 点およびP点のX座標を x_1-x_4 および x としてP点での磁力値 m を、

$$m = m_1 \frac{(x-x_2)(x-x_3)(x-x_4)}{(x_1-x_2)(x_1-x_3)(x_1-x_4)} + m_2 \frac{(x-x_1)(x-x_3)(x-x_4)}{(x_2-x_1)(x_2-x_3)(x_2-x_4)} + m_3 \frac{(x-x_1)(x-x_2)(x-x_4)}{(x_3-x_1)(x_3-x_2)(x_3-x_4)} + m_4 \frac{(x-x_1)(x-x_2)(x-x_3)}{(x_4-x_1)(x_4-x_2)(x_4-x_3)}$$

によって計算する。

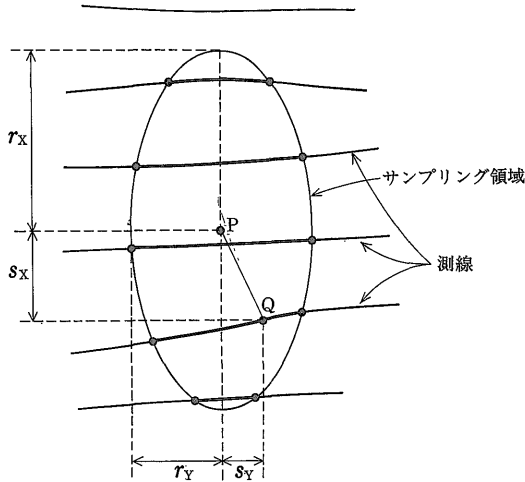
この方法の利点は計算速度が速いことである。しかし、このプログラムでは、補間に際して主測線のデータのみを使用しており、交差測線のデータが無視される。また、整然と配列された測線を想定しているので、1本であるべき測線が分割されていたり測線長の大きな不揃いがある場合には、補間されない領域が生ずる。

(2) 2次元曲面のあてはめ

前者の方法の欠点を補うため、交差測線のデータをも有効に生かし、1本となるべき測線が分割されていても補間計算が正常に行われるように、局所的2次元曲面のあてはめによる補間法のプログラムを開発した。この方法では、曲面のあてはめを考慮するサンプリング領域を設定し、その範囲内にあるランダムデータに対して位置座標に対する2元2次式による回帰分析を行い、その回帰曲面の中心点での値を補間値とする。この際、ランダムデータが測線方向に密に分布する点を考慮して、サンプリング領域を第5図に示すように測線方向に扁平した楕円形としている。また、回帰分析においては、中心点から各ランダムデータ点までの距離に応じた重みづけをしているが、サンプリング領域の形と同様に楕円状の重み関数となっている。より具体的には、第5図において点Qでの重み w を、

$$w = 1 / [(s_x/r_x)^2 + (s_y/r_y)^2] - 1$$

で与えている。なお、主として計算時間の短縮のため、各測線のデータについて、測線の伸長方向に格子サイズと同じ 200 m の間隔でリサンプリングしたものをランダムデータとみなして処理している。



第5図 2次曲面あてはめ法による格子点データ補間。
Fig. 5 Mesh data generation by the method of weighted fitting of second order curved surface.

8. おわりに

本データ処理ソフトウェアシステムは、永年にわたる空中磁気探査に関する研究の中で、個々の時点では必要に迫られて開発してきた多数のプログラムを体系化したものである。従って、非常に一般的な処理システム（どのように特殊な探査においても適用可能であるという意味）には、必ずしもなっておらず、今後も必要に応じて、修正・改良が進められるべき性質のものである。中でも、特に海域の探査における位置決定法に関しては、遠くない将来に、ロランCが汎地球測位システム (GPS) に取ってかわられることになろう。また、位置決定精度の向上と精密探査技術の発展により、磁気異常の経年変化を検出して、地震活動・火山活動に関連した地殻活構造の解明に寄与することも展望される。そうした探査技術の新たな発展段階では、それを支えるより高度な処理システムが構築されることになろう。

文 献

- 中塚 正(1979) コンピュータによる図形表示(I)
—鳥瞰図—。地調月報, vol. 30, p. 469-477.
——(1984 a) 空中磁気探査のシステム化について (I) —ハードウェアシステム—。
地調月報, vol. 35, p. 341-364.
——(1984 b) 地質調査所の空中磁気探査シ

ステムの現況について。物理探鉱, vol. 37, p. 268-278.

——(1986) 国際標準地球磁場 IGRF とその計算ソフトウェア。地質調査所研究資料集, no. 27, 25 p.

——・宮崎光旗・安藤直行・衣笠善博・佐藤 功 (1986) RIPS 共用ソフトウェア GSJLIB とその原始プログラム。地質調査所研究資料集, no. 25, 156 p.

西村隆二・金沢 敬(1961) 地形測量・地図編集, 第16章 地図投影。森北出版, 測量実務叢書 5, p. 187-254.

大久保泰邦・中塚 正(1981) 海域における空中磁気探査の場合のロランC電波航法の利用。物理探鉱, vol. 34, p. 376-389.

佐藤一彦・内野孝雄(1973) 海洋測量ハンドブック, 第VIII編 海上位置測量。東海大学出版会, p. 313-447.

SEPPELIN, T.O. (1974) The Department of Defense World Geodetic System 1972. *Can. Surveyor*, vol. 28, p. 496-506.

SODANO, E.M. (1963) General non-iterative solution of the inverse and direct geodetic problems. *GIMRADA Res. Note*, no. 11, 24 p.

陶山淳治・小川克郎(1970) 空中磁気探査におけるデータ処理と電子計算機の役割。石油技術協会誌, vol. 35, p. 323-333.

坪川家恒(1974) 測地学の概観, 第1章 測地学の基礎。日本測地学会, p. 1-33.

(受付: 1988年7月19日; 受理: 1988年12月12日)

付録1. ガウスクリーゲル図法による 平面直角座標の計算

国土調査法に基づく新平面直角座標系および UTM 座標系は、ともにガウスクリーゲル図法と呼ばれる正角投影に基づいて、その基準経線に合わせて設定される直角座標系である。緯度・経度からこの座標値を求める理論式は、西村・金沢 (1961) や坪川 (1974) が示している。理論式は無限級数の形で与えられるが、次の近似式で十分な精度 (基準経線からの経度差 3.5° の範囲内で誤差約 1 cm 以下) が得られる。

緯度 ϕ (ラジアン), 基準経線からの相対経度 λ (ラジ

付表A-1 北西太平洋(SS3)チェーンのロランC送信局の WGS-72 測地系および東京測地系での緯経度値。

Table A-1 Latitudes and longitudes of LORAN-C transmitting stations of Northwest Pacific (SS3) chain in WGS-72 and Tokyo geodetic coordinates.

Station Name	Location	WGS-72 Coordinates	Tokyo Coordinates
M	硫黄島	24°48'03.6"N	24°47'48.0"N
	Iwo Jima	141°19'30.3"E	141°19'41.5"E
W	マーカス島	24°17'07.9"N	24°16'51.0"N
	Marcus	153°58'53.2"E	153°59'07.5"E
X	北海道(十勝太)	42°44'37.1"N	42°44'28.1"N
	Hokkaido	143°43'09.3"E	143°43'23.9"E
Y	慶佐次(沖縄)	26°36'25.0"N	26°36'10.9"N
	Gesashi	128°08'56.5"E	128°09'04.0"E
New Z	グアム島	13°27'49.9"N	13°27'30.8"N
	Guam	144°49'32.4"E	144°49'43.8"E
Old Z	ヤップ島	09°32'45.8"N	09°32'25.9"N
	Yap	138°09'55.0"E	138°10'04.5"E

アン) の点の座標値 (x, y) は,

$$x/C_0 = X_\phi - X_{\phi_0} + \frac{\lambda^2}{2} N \sin \phi \cos \phi [1 + \frac{\lambda^2}{12} \cos^2 \phi (5-t^2)] \quad (1)$$

$$y/C_0 = Y_0 + \lambda N \cos \phi [1 + \frac{\lambda^2}{6} \cos^2 \phi (1-t^2 + \eta^2) + \frac{\lambda^4}{120} \cos^4 \phi (5-18t^2 + t^4)] \quad (2)$$

$$X_\phi = \int_0^\phi \frac{a(1-e^2)}{(1-e^2 \sin^2 \phi)^{3/2}} d\phi \quad (3)$$

$$X_{\phi_0} = X_\phi(\phi = \phi_0), \quad N = a / \sqrt{1-e^2 \sin^2 \phi}$$

$$\eta = e \cos \phi / \sqrt{1-e^2}, \quad t = \tan \phi, \quad e = \sqrt{2f-f^2}$$

で与えられる。ここに、 a は地球楕円体の長半径、 f は扁平率である。日本で採用されているベッセル原子は、測量法 [昭和24年法律第188号]・水路業務法 [昭和25年法律第102号] で定義されており、

$$a = 6377.397155 \text{ (km)}, \quad f = 1/299.152813$$

である。また、 C_0, Y_0, ϕ_0 は、座標系によって定まる定数であり、UTM 座標系では、

$$C_0 = 0.9996, \quad Y_0 = 500 \text{ (km)}, \quad \phi_0 = 0$$

新平面直角座標系では、

$$C_0 = 0.9999, \quad Y_0 = 0,$$

ϕ_0 : 各座標系の基準緯度

である。

さらに、(3) の積分は、積分核を e^2 のべき乗で級数

展開したものを項別積分して、級数展開式が得られる。それを整理して微小項を無視すると、

$$X_\phi = A\phi - \sin \phi \cos \phi (B - C \cos^2 \phi + D \cos^4 \phi)$$

の形になる。ここで、ベッセル原子の場合、

$$A = 6366.742520 \text{ (km)}, \quad B = 32.044328 \text{ (km)},$$

$$C = 0.134539 \text{ (km)}, \quad D = 0.000703 \text{ (km)}$$

となり、この近似式での近似誤差は、最大でも 1.5 mm 未満となる。

付録2. 地球表面(海面)に沿った電波伝播時間の計算

ロランCなどの航法電波送信局から観測点までの電波の伝播時間は、2点間の地球楕円体面に沿った距離(測地線長)を電波の伝播速度で除したものと与えられるが、大地(海水)の影響による位相遅れを考慮する必要がある。

航法電波送信局の位置は、一般に汎世界的な測地基準系である WGS-72 系などでの緯経度値で与えられる場合が多く、日本の測地基準系(東京系, Tokyo Datum)との間には、地球楕円体の形状の差および中心位置のズレがある。楕円体の形状は定義されたものであるが、中心位置の相対的な位置関係は各種の実測データから決定する必要がある。SEPPELIN (1974) は、その相対座標シフト量を与えており、これを用いると、北西太平洋(SS3)チェーンのロランC送信局の位置(地理緯度・経度)は付表A-1のように与えられる。

測地線長を精密に求めることは測地上の基本問題の1つになっており、いくつかの近似計算式が知られているが、ここでは SODANO (1963) の式を用いる。2点の化成緯度を u_1, u_2 とし、経度差を λ とすると、測地線長 S は、

$$S/b = f_0 L + A(2f_1 \sin L - f_2 L^2 / \sin L) - A^2 f_2 \sin L \cos L$$

$$- M(f_1 L + f_1 \sin L \cos L - f_2 L^2 / \tan L)$$

$$+ AM(f_2 L^2 / \sin L + f_2 \sin L \cos^2 L)$$

$$+ M^2(f_2/8)(L + \sin L \cos L - 8L^2 / \tan L - \sin L \cos^2 L)$$

$$M = 1 - (\cos u_1 \cos u_2 \sin \lambda / \sin L)^2$$

$$A = \sin u_1 \sin u_2$$

$$\sin L = \{(\cos u_1 \sin u_2 - \sin u_1 \cos u_2 \cos \lambda)^2 + (\cos u_2 \sin \lambda)^2\}^{1/2}$$

$$\cos L = \cos u_1 \cos u_2 \cos \lambda + \sin u_1 \sin u_2$$

$$f_0 = 1 + f + f^2, \quad f_1 = (f + f^2)/2, \quad f_2 = f^2/2$$

$$b = a(1-f)$$

で与えられる。ここに、 a は地球楕円体の赤道半径、 f は扁平率であり、前章に示した値を用いる。化成緯度 u は、地理緯度 ϕ から

$$u = \tan^{-1}\{(1-f)\tan\phi\}$$

で導かれる。なお、この測地線長を計算するソフトウェアは、宮崎光旗氏のコーディングによるものが工業技術院情報計算センターのコンピュータシステム (RIPS) に登録された共用ソフトウェア GSJLIB (中塚ほか, 1976) の中に入っている。

電波伝播速度 c は、IUGG で 1957 年に採択された真空中の速度 2.997925×10^8 m/s と、標準大気の屈折率 1.000338 から得られる $c = 0.299691$ (km/ μ s) の値を用いている。

大地 (海水) の影響による電波伝播の位相遅れ $D(S)$ については、アメリカの国立標準局の方式 (佐藤・内野, 1973) では、距離 S が 100 マイル (約 160 km) の前後で異なる計算式を与えており、伝播時間で表した距離 $\tau = S/c$ (μ s 単位) を用いて、遠距離側で、

$$D = 129.04323/\tau - 0.40758 + 0.00064576813 \tau$$

近距離側で、

$$D = 2.741282/\tau - 0.011402 + 0.00032774815 \tau$$

としている。これをさらに距離 S (km) の単一の関数で近似すると、

$$D(S) = (2.15477 \times 10^{-3}) \sqrt{S^2 + 40000} - 0.4$$

が得られる (μ s 単位)。元の計算式とこの近似式による計算値は、計測分解能の 0.1 マイクロ秒に比して十分小さな誤差範囲内にあり、実用的には、この近似計算式で十分である。

以上により、航法電波送信局から観測点までの電波伝播時間 T は、2 点間の測地線長 S 、電波伝播速度 c および海上伝播の位相遅れ $D(S)$ を用いて、

$$T = S/c + D(S)$$

で与えられる。