

人工衛星測位装置 (NNSS) による位置測定

石原文実 (海洋地質部)

まえがき

地質調査船「白嶺丸」には 現在 ロランA・C デッカ オメガ等の位置測定装置があり それぞれの特長を生かして活用されているが 人工衛星測位装置もその一つとして 1974年の白嶺丸就航以来 比較的順調に働いている。人工衛星測位装置は 通常 NNSS (Navy Navigation Satellite System の略) と呼ばれ 1960年代初めに米国海軍により開発されたものである。その特長を二つあげるとすると

① 全世界的に位置測定が可能

ロランA・C デッカ等の地上局が近くにない海域でも位置測定ができる。現在ハワイ南西方で実施されている特別研究「深海底鉱物資源探査に関する基礎的研究」の調査においては NNSS が位置決定の中心として使用されている。オメガも全地球的な位置測定ができるが 精度が悪く 航海用としては使えても 地質調査等海洋調査用の測位装置としては不十分である。

② 電算機処理による位置決定

人工衛星の軌道 船と人工衛星の相対距離等の複雑

な計算を行ない 実時間で位置を表示する必要があるため 電算機を用いたデジタルデータ処理を行っている。電算機を用いることはまた 他の測定機器からのデジタルデータの入力を組み合わせることにより システム全体としての位置測定の精度を高めたり いろいろの機能をシステムにもたせる可能性につながる。白嶺丸の人工衛星測位装置では ジャイロコンパス ドップラー・ソナー EM ログからの入力により人工衛星測位と 次の人工衛星測位の間の位置の推測計算をしているし 海上プロトン磁力計 ラコスト船上重力計 精密音響測深器またはサブボトムプロファイラーから入力させて データ集録装置としての機能ももたせている。他の装置では ロランC等の電波測量と組み合わせ推測位置の精度を向上させているものもある。また単純な型のもは操作も簡単であり 漁船等にも装備されつつあるとのことである。

となる。

白嶺丸の第5研究室に搭載されている人工衛星測位装置を写真1に示す。以下では NNSS を白嶺丸で実際に使用しての位置精度等の問題を中心に 述べてみたい

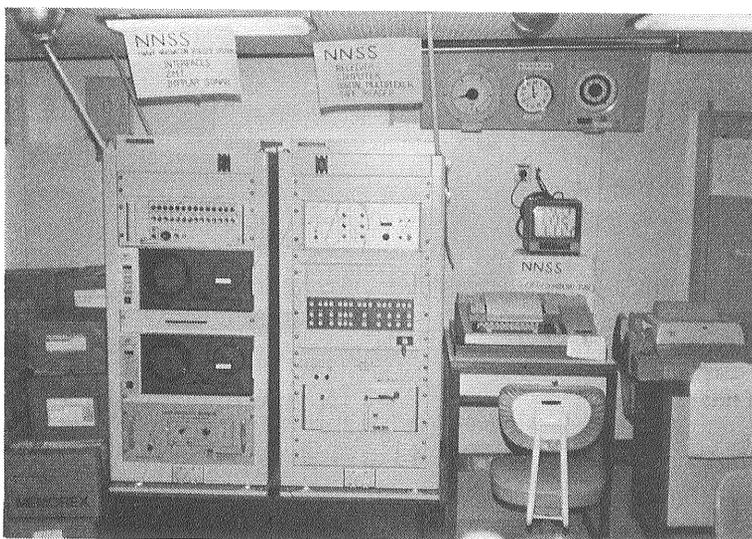


写真1
白嶺丸の人工衛星測位装置。2つのラックのうち右側には 上からNNSS受信機 電算機が 左側には 上からインターフェース・ユニット データ集録用の磁気テープ2台 ドップラー・ソナーがある。ラックの右側には必要な会話を電算機と行ない 船位関係のデータを打ち出すための高速プリンター さらにその右には 重力データ打ち出し用のタイプライターがある。高速プリンターの上には 船位関係のデータを表示するCRTモニターが見える

と思う。

1. 測位の原理

NNSSの開発のきっかけは 1957年のソ連のスパートニク1号打ち上げ当時までさかのぼる。この最初の人工衛星からの電波を受信していたアメリカの科学者が衛星が高速で上空を通過するため 周波数のドップラーシフトを起こしていることを発見した。このドップラーシフトの変化を精密に測定すれば衛星の軌道が求まる筈だ 逆に軌道のわかっている衛星のドップラーシフトを測定すれば 受信点の位置がわかる筈だ というので開発が始まったものである。1964年から米国海軍によりポラリス潜水艦の航行用として実用に供されたが その後1967年からは 利用技術が一般に公開されている。

現在5コ NNSS 用の人工衛星が打上げられておりそれぞれ 高度約1100km 周期約107分で北極と南極を結ぶ極軌道を飛行している。衛星からは2分ごとに繰り返す自己の軌道のパラメーターを送信しており このパラメーターは 地上での軌道追跡にもとづき 12時間ごとに絶えず新しいデータを地上局から注入している。またこの2分ごとのデータの切れ目のタイムマークは 200μ秒以内の精度で合っており 正確な時計として使うことができる。

衛星電波のドップラーシフトによる位置決定を単純化して概念的に示したのが図1である。図のAとBでは緯度が異なるが 極軌道の衛星の場合は緯度の違いが最接近時の時刻の違いとなって現われる。最接近時はドップラーシフトが0になる時刻である。その時刻の衛星の位置から緯度がわかる。また図のAとCでは経度が異なるが これはドップラーシフトの変化曲線の勾配

の違いとなって現われる。より衛星の軌道に近いCでは短時間に急激に周波数に変化することになる。定性的には これで人工衛星による位置決定のしくみは おわかりいただけと思うが 実際には このドップラーシフトを一定時間(23秒か28秒間) カウントしたデータと 推定位置と衛星の軌道パラメーターから得られるドップラーシフトのカウントの理論値とを比較し 推定位置の修正を行なうという方法で位置計算がなされている。なお 衛星からは約400MHzと約150MHzの二つの周波数で送信しているので 電離層による屈折の効果(この効果は周波数に逆比例する)を補正することができる。

5コの衛星が飛んでいるので 1時間乃至2時間に1回程度衛星の電波を受信できるが 場合によっては4~5時間 位置精度に良好な条件の衛星の電波を受信できないこともある。この衛星測位と次の衛星測位の間は推測航法で位置を決定しなければならない。これにはジャイロコンパスによる船首の方向のデータと ドップラー・ソナーあるいはEMログによる船速のデータを用い 船の緯度方向(南北方向) 経度方向(東西方向)の運動を時々刻々計算して新しい緯度・経度を求める方法がとられる。ドップラー・ソナーの原理図を図2に示したが 船底に取り付けられたトランスデューサーにより 前後左右の4方向に超音波を出し 反射し返ってきたそれぞれの超音波の周波数のドップラーシフトを測定して 船速を計算するもので 200m以浅の大陸棚では 海底からの反射波を受けられ対地速度が計算できる。送信周波数は150kHzになっている。

200m以深では対地速度が測定できないので EMログにより対水速度を測定し それから対地速度を推定し

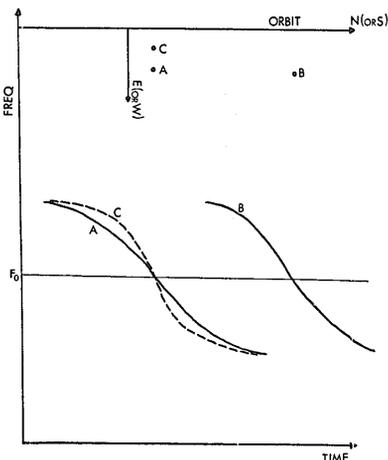
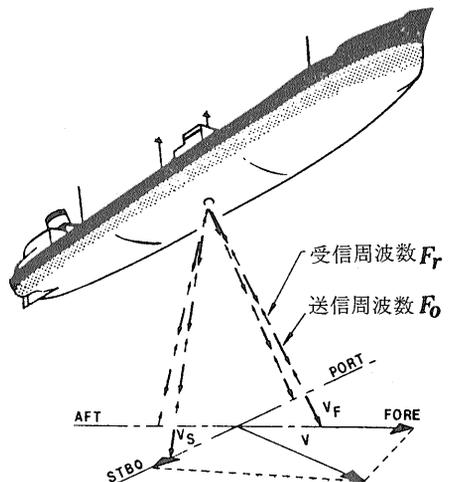


図1 衛星電波のドップラーシフトと受信点の関係 衛星が受信点の近くを北向きの極軌道で通過した場合、受信点と衛星軌道の関係を上側に示した

図2 ドップラー・ソナーの原理 船底のトランスデューサーから4方向に超音波を出し 反射波の受信周波数 $F_r = (C + V_r)F_0 / (C - V_i)$ を測定し船速を出す (Cは音速 V_i は船速の超音波発射方向への射影) 船首(FORE)方向と船尾(AFT)方向の周波数の差から 船首方向の速さ V_F を 右舷(STBD)方向と左舷(PORT)方向の周波数の差から右舷方向の速さ V_S を計算する



ている。200m 以深の場合 ドップラー・ソナーによっても対水速度が測定できるという話であるが 白嶺丸では現在のところ満足な結果が得られていない。対地速度と対水速度の差は 海水の流れ=海流・潮流等であるが これをいかに正確に知るかが この場合の推測航法の位置の精度を決めることになる。一般に推測航法の位置精度に比べ 衛星測位の精度の方がよいので 衛星測位を利用して図3のような方法で 海水の流れを求めている。衛星測位の計算が終わると 今までの推測航法の位置を衛星測位によりどれだけ移動させたかがデータとして与えられるので この緯度方向 経度方向の成分を求める。このずれはその前の衛星測位以来の海水の流れによって生じていると考えられるので この緯度・経度両方向の成分を前回と今回の衛星測位の時間差で割ることにより 海水の流れの南北・東西両成分が計算できる。実際にはこの計算前にも海水の流れの値が推測され それに基づいて推測航法の位置計算がなされているので この計算により海水の流れの変化が計算されることになる。この方法では衛星測位ごとにしか海水の流れの情報が得られず しかも実際の海水の流れとの間に時間的ずれがあるが 流れが急激に変化するような場合を除けば この方法を採用しても良い結果が得られるであろう。

2. 測位の精度

メーカーの話では NNSSの推測航法の位置の精度は次の様な式で表現されるということである。

$$\sigma_{DR} = \sigma_D + 0.005D_{BL} + 0.1D_{WT} \quad (1)$$

即ち 推測航法の位置の誤差半径は 3項の和で表わさ

れ 最初の項は一番最新の衛星電波受信によりそれまでの推測航法の位置も考慮に入れて決定した位置の誤差でこれはほぼ衛星測位の誤差である。第2項はドップラー・ソナーにより海底から反射した超音波をとらえて対地速度が計算できる場合(この場合を Bottom Lockの状態という)の推測航法の誤差で 衛星測位以降走った距離 D_{BL} の0.5%は誤差と考えられるということであり 第3項はEMログあるいはドップラー・ソナーで 対水速度がわかっている場合(この場合を Water Trackの状態という)の誤差で 走った距離 D_{WT} の10%誤差が考えられるということである。一般には 衛星測位の誤差 σ_D は他に比べ小さく Bottom Lockの状態かあるいは Water Trackの状態か いずれかの状態で推測航法を行っている場合が多いので (1)式は第2項または第3項のみで近似されるということになる。以下それぞれの測位精度について 白嶺丸での実測データについて述べてみたい。

2-1. 衛星測位の精度

図4は1975年2月 船橋港岸壁に白嶺丸が停泊中 8日間にわたり衛星の電波を受信し その計算結果を平均値のまわりにプロットしたものである。衛星の最大仰角が15°から70°等 良好な条件にある衛星測位結果をプロットしたものであるが 標準偏差は直距離にして36.1mであり 南北方向にやや伸びたばらつきになっている。なお 日本の緯度・経度の測地系と NNSSの測地系にはずれがあり この測定の場合の衛星測位の平均値は日本の測地系に比べ 361m北へ321m西へずれている。

図4は固定した点で測定した場合であるが 実際に船が実海域で作業をしている場合にもこの程度の精度が保障されるだろうか。この参考例として 表1に2船の

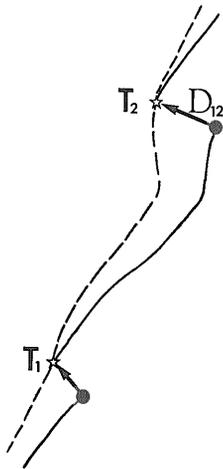


図3 海水の流れの計算。時刻 T_2 の衛星測位(星印)の推測航法による位置(黒丸)からのずれのベクトル D_{12} を 一つ前の衛星測位(時刻 T_1)からの時間 $T_2 - T_1$ で割って 海水の流れのベクトルとする。実線は推測航法による船の航跡 点線は求めた海水の流れのベクトルを使って 計算し直したときの船の航跡

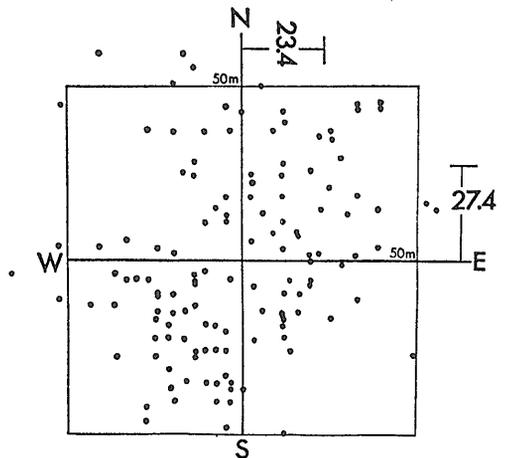


図4 船橋港岸壁における受信結果。測位位置の標準偏差は 南北27.4m 東西23.4m

表1

二船の衛星測位とレーダーの位置測定の比較

時刻	白鳳丸 NNSS	白嶺丸 NNSS	衛星仰角	レーダー	NNSS とレーダーの差
0950	26°58.139' N 137°51.560' E	26°57.742' N 137°51.672' E	8.3°	.35nm 180°	.11nm
1008	26°57.799' N 137°48.054' E	26°57.364' N 137°48.345' E	4.4°	.34nm 175°	.25nm
1308	26°59.752' N 137°35.771' E	26°59.635' N 137°36.071' E	56°	.3nm 85°	.15nm
1458	26°59.007' N 137°34.321' E	26°59.085' N 137°34.220' E (時刻1502)	15°	.42nm 350°	.32nm
1628	26°58.463' N 137°29.871' E	26°58.866' N 137°20.731' E	52°	8.3nm 273°	.14nm
1710	26°56.691' N 137°28.401' E	26°58.806' N 137°14.157' E	12°	13.0nm 280°	.11nm

レーダーの欄は 白鳳丸のレーダーによる 白嶺丸までの距離と方向

衛星測位の結果をレーダーによる結果と比較したものを示した。1974年12月2日白嶺丸と東京大学海洋研究所の白鳳丸がほぼ平行して航走している際のデータである。6例示したが衛星仰角が15°から70°のものは3例でありその内14時58分の位置は白嶺丸では15時2分の衛星測位の位置から推測により出しているので誤差が大きくなっていることが考えられる。また16時28分と17時10分の例では2船の距離が離れており白鳳丸のレーダーによる白嶺丸の位置の誤差も考えられるのでこのずれを衛星測位の誤差によると考えるのは問題があるであろう。という訳で信頼に足るデータは少ないがこの実例からおおよそ0.1海里(約200m)程度の誤差が考えられることがわかる。ただこの場合推測航法の速度センサーとしてEMログを使用しておりこれが誤差を増加させる原因になっていると思われる。衛星測位を正確に行なうには電波受信中の船の時間的な相対的位置関係を知る必要があるが海水の流れの値が正確でないとEMログではこの位置関係が不正確になり衛星測位の精度を下げているということである。Bottom Lockの状態では衛星測位の精度も向上するだろう。

2-2. 推測航法の精度 (Bottom Lock の場合)

日本の太平洋側では水深200m以浅の大陸棚が狭くドップラー・ソナーをBottom Lock状態で使用する機会にほとんどめぐり合わなかったが幸い1977年4月から5月にかけて行なわれた山陰沖の日本海側の調査(GH77-2航海)ではやや広い大陸棚に恵まれたのでドップラー・ソナーを使用してみた。測定結果を図5 図6に示したが今までにドップラー・ソナーの機器のキャリブレーションを行なっておらずこの結果はキャリブレーションのパラメーターの決定とし

ても用いている。測定の方法は衛星測位の誤差は推測航法の誤差に比べ小さいと考え衛星測位の結果が出ると同時に衛星測位の推測航法からのずれを各測線の最初の衛星測位の位置からの距離に対してプロットし三回目以降の衛星測位の際にはそれまでのずれを合わせてプロットをするというものである。図5には測線方向のずれをプロットし図6には測線に直交する方向のずれをプロットした。図5の真中の直線はプロットした点から最小二乗法により原点を通る直線を求めたもので測定したドップラーシフトの値から速度に変換するファクターを0.0087倍だけ小さくすべきであることを示している。その上下の直線はメーカーのいう誤差0.5%を両方向に均等に分けて $1/\sqrt{2}$ 倍とした0.35%の範囲で多くの点がこの中にあることがわかる。このデータから誤差を評価すると航走距離の0.30%となる。

図6でも真中の実線が最小二乗法により求めたものでこれは船のジャイロコンパスの方向とドップラー・ソナーのトランスデューサーの方向の間に1.43°のずれがあることを示している。この場合にも0.35%の範囲を上下の実線で示したがこの範囲からはずれて下側にプロットされるものも多く誤差は標準偏差で走った距離の0.90%と大きくなる。この原因としてはこの人工衛星測位装置では度以上の単位についてはジャイロコンパスのアナログ表示装置を見て電算機に入力して合わせることになっているため実際の表示とNNSSの値の間に度単位でずれていた可能性がある。実際に1°ずらして書いた直線とその上下に誤差0.35%の範囲を示したのが点線である。この様にグループを二つに分けそれぞれの標準偏差の誤差を計算するとそれぞれ走った距離の0.38% 0.25%となる。

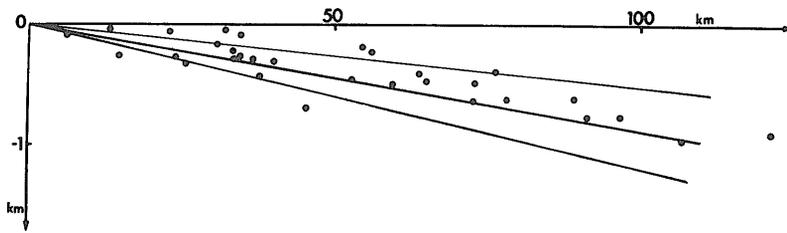


図5 推測航法による測線方向の位置のずれ (Bottom Lock の場合). 横軸は各測線での最初の衛星測位からその後の衛星測位時まで航行した距離 たて軸は衛星測位の推測航法からのずれ

2-3. 推測航法の精度 (Water Track の場合)

1974年8月のマンガノジュール調査航海 (GH 74-5 航海) の例では1日の18回の衛星電波の受信により

$$\sigma_{DR} = 0.067 D_{WT}$$

という結果を得ており 10%よりもよい精度できまっている。この場合は約12ノットで航走中であるが ほとんど静止しているような場合でも このような精度で位置がきまるのであろうか。白嶺丸では マンガノジュールや底質の採取など ほとんど船を静止させた状態で作業をすることが多く その採取地点の位置を精度よくきめる必要がある。かりにこの採取作業中に船は1海里移動したとし 位置の精度は衛星測位から移動した距離の10%としても 採取作業中に衛星からの電波を受信したとすれば 0.1海里以下の誤差ということになるが 実際にははるかに大きく 1海里を越えることもしばしばである。図7は1976年1月から3月にかけて行なわれた マンガノジュールの調査(GH 76-1 航海)での採取作業地点の NNSS での実時間での位置と 再計算して求めた位置の距離を その直前の衛星測位からの時間に対してプロットしたものである。再計算については後でふれるが 実時間の位置にくらべ 精度はかなり良くなっていると思われるので この距離が実時間位置の誤差の目安と考えてよいだろう。海水の流れをいかに適切に予測できたかによって誤差は 異なるので点

はかなりばらついているが それでも大きくみれば 衛星測位からの時間が長くなるにつれて誤差が大きくなる傾向がある。直前の衛星測位からの時間 ΔT と誤差 ΔR の間に比例関係

$$\Delta R = \alpha \Delta T \tag{2}$$

を仮定し 係数 α を最小二乗法によって求めると

$$\alpha = 0.43 \text{ 海里/時}$$

となる。2時間で1海里近い誤差になるわけである。全地点の誤差の平均二乗根を求めてみると 1.03海里になる。こうしたわけで 仮に誤差を1海里以内におさえたいとしても 再計算をしてより精度の良い位置を求める必要性がわかってもらえると思う。

3. 船位の再計算 (Water Track の場合)

船位の再計算は海水の流れを求めることから始まる。以下簡単に再計算の手続きについて述べてみる。

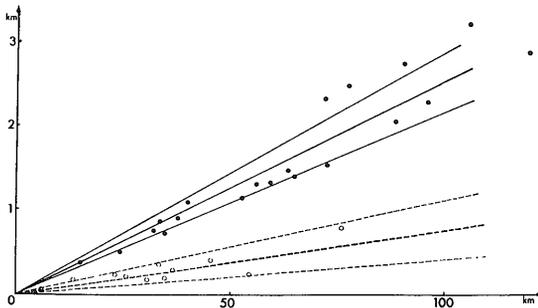


図6 推測航法による測線に直交する方向の位置のずれ (Bottom Lock の場合). 両軸は図5に同じ。黒丸と白丸の二つのグループに分かれるように見える

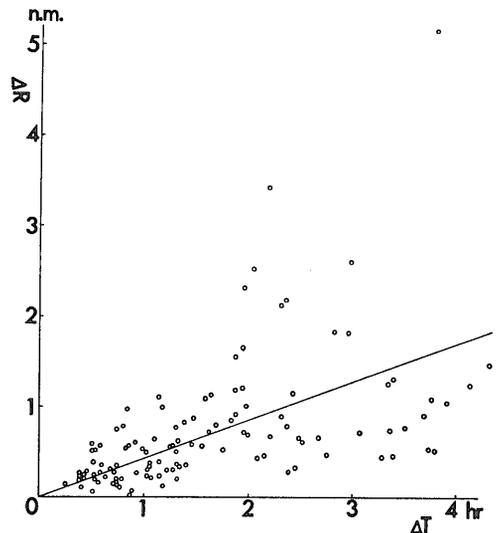


図7 推測航法の再計算の位置からのずれ (Water Track の場合). 横軸は直前の衛星測位からの時間

- ①海水の流れを0にしたと仮定した時の推測航法の衛星測位からのずれを 南北方向 東西方向に分けて各衛星測位ごとに求める。
- ②このずれを 一つ前の衛星測位からの経過時間で割ると その間の海水の流れの平均値がわかる。
- ③このままでは 海水の流れが衛星測位時ごとに階段状に変化することになるので 衛星測位時と次の衛星測位の間は時間の二次式で近似し 衛星測位時に連続となるようにする (図8参照)。
- ④求めた海水の流れを対水速度に加えて対地速度とし 各時刻の位置は その直前の衛星測位の位置をもとに それ以降の対地速度を積分して計算する。

船位の再計算はこのように行なっている。余談までに計算の途中で出てくる「海水の流れ」はEMログの対水速度の誤差も含んでいるものではあるが その地点での海流(あるいは潮流)を反映しているはずである。大ざっぱな測定という意味ならば NNSSを用いて海流の測定ができるということになる。図9はGH76-1航海で このようにして求めた航走中の海流のベクトルをプロットしたものであり 北緯7°以北で西向きに北赤道海流が流れていることがわかる。

再計算により求めた位置は 実時間の位置に比べ二重の意味で精度が良いと考えられる。一つは海水の流れの値がより正確なこと もう一つは約半数の場合 その時刻の直後の衛星測位の方が直前の衛星測位より時間的に近く その場合には誤差の評価は直後の衛星測位までの時間によってきまると考えられるからである。以上のことを考えて 再計算による位置の誤差 $\Delta R'$ の単純な評価式を作ってみた。

$$\Delta R' = 0.1 \text{海里} + \frac{1}{2} \alpha \Delta T' \quad (3)$$

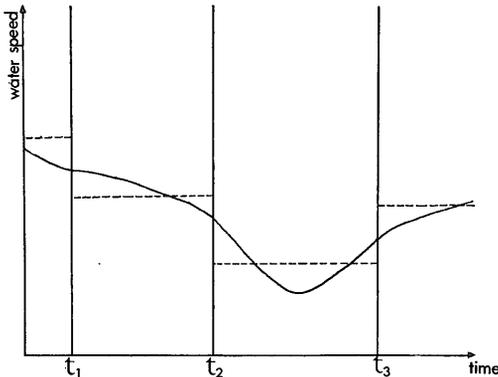


図8 再計算における海水の流れの計算。 t_1 t_2 ...は衛星測位の時刻。 たて軸は南北方向(または東西方向)の海水の流れ。点線は平均値

ここで $\Delta T'$ は時間的に近い衛星測位までの時間 α は(2)式と同じであり係数を半分にしたのは 海水の流れの値が正確になったことの評価であり 第一項の0.1海里は衛星測位の誤差を考えている。この式によれば衛星測位まで2時間としても誤差は0.53海里となる。4時間も衛星測位結果がないことはまれであるので(3)式の評価が妥当なものだとすれば1海里よりかなり良い精度で再計算の位置は求まることになる。実際この評価式による GH 76-1 の採取地点の誤差の平均二乗根を求めてみると0.26海里となる。この誤差の評価に関しては今のところ客観的な判断材料がなく 誤差を小さく評価し過ぎているおそれがある。

あとがき

白嶺丸での NNSS の使用結果をもとに書いてきたが他の位置測定機器との関係で言えば NNSSは陸から離れた大洋域でその真価を発揮すると言えるが この地域での推測航法の誤差は まだかなり大きく 再計算によってより正確な位置を計算しているのが実情である。実時間で正確な位置がわかれば それにこしたことはないが それには正確な対地速度を知る必要がある。現在ロラン等の他の測定機器を NNSS と接続して それらからのデータを組み合わせることにより 対地速度をより正確にすることによって 全体の位置精度を向上させるシステムが考えられているが 白嶺丸においても何らかの NNSS のシステムの改善をはかっていく必要があるだろう。

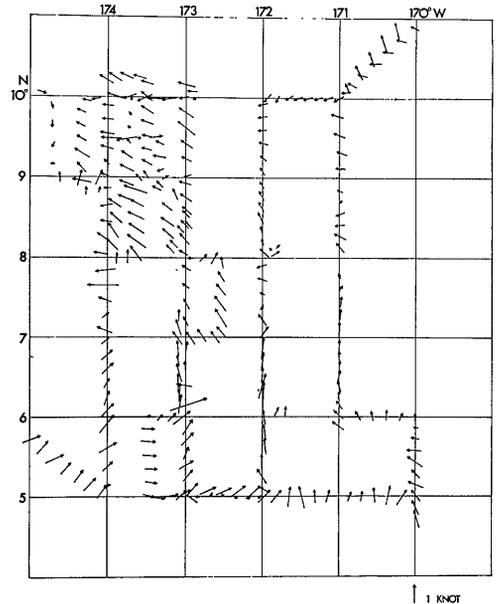


図9 GH76-1 航海における「海水の流れ」