KGPS測位位置とレーダ観測位置との比較

山田多津人*・長澤 明*
高瀬 悟**・平田 法隆**

Precision of Radar Positions Compared with
the KGPS Positions

Tatsuto YAMADA, Akira NAGASAWA,
Satoru TAKASE and Noritaka HIRATA

Abstract

Errors of a vessel's position by radar observations has not been determined sufficiently, because we do not have a high accuracy method to fix their positions at sea. But recently, a vessel's position can be obtained with high accuracy by using kinematic GPS (KGPS) in addition to a land survey in various fields.

We carried out the experiments to compare radar positions with KGPS positions in the KURUSHIMA strait using the training vessel "KOJIMA" with the KGPS receiver on board. The positions of KOJIMA obtained by a radar were accepted from the radar sight which belongs to HONSHU-SHIKOKU Bridge Authority. After KGPS positions were exchanged to the plane coordinates, the difference between the two positions were examined and the results were as follows.

1. The radar positioning accuracy were 26.4m in length and 7.7m in width as 1σ .
2. The errors in width showed the normal distribution.
3. The vessel's course and speed estimated by radar observations often indicated sharp fluctuations.
4. The bearing errors of radar became greater at shorter distance.

1. はじめに

GPSによる測位精度を向上させる有効な方法としてDGPSがあり、特に、搬送波位相の測定により数cmの精度で移動体の位置を求める手法としてキネマティックGPS（以下、「KGPS」という）がある。KGPSは、良好な測位精度及び実時間性等の特性から測量以外の様々な分野での応用利用が検討されている。一方、海上交通実態調査等で実施されるレーダ観測により取得された船舶の位置データは、様々な利用目的を持った基礎資料となっているが、比較対象となる船舶の高精度な位置情報が得られなかったこと等から、レーダ観測位置の定量的な精度評価は厳密にはなされていないと思われる。そこで、海上保安大学校練習船「こじま」（総トン数3,090トン、全長115m、最大幅14m、2軸2舵）にKGPS受信機を搭載し、来島海峡通峡時の測位を行い、この測位位置と陸上のレーダ観測から得られた「こじま」の位置とを比較することで、レーダ観測位置の精度について検討したところ、幾つかの知見を得たので報告する。

* 正会員 海上保安大学校（〒737 広島県呉市若葉町5-1）

**正会員 広島大学工学部（〒739 広島県東広島市鏡山1-4-1）

2. 解析方法

2.1 レーダ観測位置とKGPS測位位置

KGPSは、測量目的に利用されることが多い測位システムであり、観測エリア近傍の固定点に基準局を置き、GPS衛星からの搬送波位相を計測して求めた衛星までの距離情報に、基準局の距離情報から得た誤差成分を補正することにより、数cmの精度でWGS-84座標系上の位置を出力することが可能である。今回の測定では、基準局を馬島の来島第2大橋6P橋脚上に設置した。使用した機器は、トリムブル社製の4000SSi受信機及び特定小電力による補正情報の送信モデルである。「こじま」側にも基準局と同じ型式の受信機を、船首、船尾及び上部船橋左右舷に計4台設置した。この内、解析に利用したデータは、基準局の位置情報から補正した船首及び船尾の位置データ（1秒ごとに記録されている）である。

レーダ観測位置は本州四国連絡橋公団今治情報管理室（以下、「情報管理室」という）から提供を受けた。情報管理室は、本州四国連絡橋「尾道－今治ルート」内の来島海峡において、船舶の航行安全と工事の円滑な推進を図るため、様々な情報収集、伝達及び調整を行っており、当該業務の一環として、来島海峡付近の船舶の動向を、レーダ装置により24時間連続した観測を行っている。

レーダ送受信機は、津島及び湊町の2カ所に設置されており、ここで得られた映像情報は、専用回線により情報管理室内のマルチレーダ処理装置（㈱日本無線製）と呼ばれる、レーダ映像の合成装置により処理され、管制卓のCRT上に表示される。あらかじめ定められたエリア内に船舶が入ると、ARPAと同様の処理形態により自動捕捉・追尾され、当該船舶の座標値、速力及び針路が一定な時間間隔でフロッピーディスクに記録される。この座標値は、情報管理室を原点、北を+Y、東+Xとする平面座標でメートル単位の表記となっている。図1に実験海域の概要を、また、表に座標原点位置等の概要を示す。

2.2 座標変換

レーダ観測位置は情報管理室を原点とする平面座標で表されているため、KGPS測位位置を当該平面座標に変換する必要がある。

まず、WGS-84測地座標系の緯度(ϕ)、経度(λ)、高さ(h)として得られたKGPS測位位置を直交座標位置(x, y, z)に、次式にて変換する。

$$\begin{aligned} x &= (N+h) \times \cos(\phi) \times \cos(\lambda) \\ y &= (N+h) \times \cos(\phi) \times \sin(\lambda) \cdots \cdots \cdots (1) \\ z &= \{N \times (1-e^2) + h\} \times \sin(\phi) \end{aligned}$$

但し、 x, y, z ：観測点のWGS-84座標系での直交座標位置

ϕ, λ, h ：観測点のWGS-84座標系での緯度、経度、高さ

e ：WGS-84座標系の離心率

図1 実験海域の概要

表 座標原点位置等の概要

情報管理室原点位置 (日本測地系)	34° -06'26" N 132° -58'56" E
津島レーダサイト位置 (日本測地系)	34° -06'47" N 133° -00'05" E
湊町レーダサイト位置 (日本測地系)	34° -05'31" N 132° -59'28" E
馬島基準局位置 (WGS-84 測地系)	34° -14'02".71277N 132° -23'59".60081E
(レーダの主要目)	
周波数	9740MHz
パルス幅	0.1 μ s
水平ビーム幅	0.8°
送信出力	15kW
GPS 受信機	Trimble 400SSi

$$N = a / \{1 - e^2 \times \sin^2(\phi)\}^{1/2} \quad a : \text{WGS-84座標系の長半径}$$

次に、WGS-84直交座標位置 (x, y, z) を、日本測地系の直交座標位置 (X, Y, Z) に変換する。 ΔX 、 ΔY 、 ΔZ は平行移動量、 θ 、 ξ 、 ω は回転量、 S をケールファクターとすると、

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = (1 + S) \times \begin{bmatrix} 1 & -\theta & \omega \\ \theta & 1 & -\xi \\ -\omega & \xi & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (2)$$

となる⁽¹⁾。

更に、この日本測地系における直交座標位置 (X, Y, Z) を緯度 (ϕ_1) 、経度 (λ_1) 、高さ (h_1) に次式にて変換する。

$$\begin{aligned} \phi_1 &= \tan^{-1} \left\{ \frac{Z + e_2^2 \times \sin^3(\alpha)}{p - e_1^2 \times \cos^3(\alpha)} \right\} \\ \lambda_1 &= \tan^{-1} \left(\frac{Y}{X} \right) \quad \dots\dots\dots (3) \\ h_1 &= \{P / \cos(\phi_1)\} - N_1 \\ p &= (X^2 + Y^2)^{1/2} \quad \alpha = \tan^{-1} \left(\frac{Z \times a_t}{p \times b_t} \right) \end{aligned}$$

但し、

$$e_1^2 = \frac{(a_t^2 - b_t^2)}{a_t^2} \quad e_2^2 = \frac{(a_t^2 - b_t^2)}{b_t^2}$$

$$N_1 = a_t / \{1 - e_1^2 \times \sin^2(\phi_1)\}^{1/2}$$

a_t : ベッセル回転楕円体の長半径 b_t : ベッセル回転楕円体の短半径

最後に、(3)式により求めた緯度 (ϕ_1) ・経度 (λ_1) を、情報管理室の位置 (ϕ_0, λ_0) を原点とする、YX平面座標 (X_1, Y_1) に次式にて変換する。

$$\begin{aligned} X_1 &= \frac{a_1 \times \cos(\phi_1)}{\{1 - e_1^2 \times \sin^2(\phi_1)\}^{1/2}} \times (\lambda_1 - \lambda_0) \quad \dots\dots\dots (4) \\ Y_1 &= \frac{a_1 \times (1 - e_1^2)}{\{1 - e_1^2 \times \sin^2(\phi_1)\}^{3/2}} \times (\phi_1 - \phi_0) \end{aligned}$$

以上により、KGPS測位位置を情報管理室位置を原点とする平面座標に変換し、レーダ観測位置との比較解析が可能となる。

2.3 誤差要因

KGPS測位位置を真位置とした時、レーダ観測位置との差がレーダ観測による測定誤差となり、その誤差要因には以下の事項が考えられる。

① レーダ観測データに記録される時刻とKGPS測位時刻との差による誤差（時刻差に起因する誤差）

各測定値は、レーダ観測においては約30秒間隔で、KGPS測位では1秒間隔で記録される。比較する両方の時刻が整合しておらず、差がある場合には、「こじま」の速度ベクトルに応じた測定誤差となって現れる。当該誤差の影響を最小にするためには、レーダ観測記録時刻に最も近いKGPS測位時刻を決定する必要がある。

② 情報管理室位置及び座標変換に係わる誤差（固定誤差）

情報管理室の位置は、緯度・経度とも秒の単位まで求められているが、当該緯度・経度における1秒の距離は、緯度方向で30.8m、経度方向で25.7mとなっている。このため、座標原点位置の緯度・経度の秒の単位の丸めの誤差が固定誤差となって残る。

また、(2)式において実際の計算では、スケールファクター及び回転量を0とし、平行移動量の値を、

$\Delta X = 146.43$ (m) $\Delta Y = -507.89$ (m) $\Delta Z = -681.46$ (m) (筑波のVLBI座標値との差⁽²⁾) とし

た。本来のGPS測量によれば、観測地域の周辺や内部に国家基準点を3点以上拘束して、局所的に網平均をかけ、スケールファクター等を考慮した局所的な座標変換を行うことで、数cm程度の精度で両座標値を整合することが可能となるが⁽¹⁾、今回は、測定上の制約からこの手法は採用できなかった。しかし、比較するレーダ観測位置は高さの情報を持たない2次元座標であること、また、対象とする海域は数km四方の範

囲であることから、同海域内においては一定の座標変換誤差（固定誤差）として取扱える。

③ レーダ測定誤差

情報管理室のレーダシステムにおける船舶の位置検出アルゴリズムの概要は以下の通りであった。

- (a) 船舶映像の方位は、一定の信号強度（しきい値）以上を示す映像信号のビーム方向の広がり（平均値）とする。
- (b) 船舶映像までの距離は、一定の信号強度（しきい値）以上を示す映像信号のスweep方向の広がり（平均値）から、ある重み付けにより観測位置に近づくよう補正した距離*とする。
- (c) 船舶映像の方位と距離からX、Y座標値を計算する。

以上の誤差要因をまとめ、以下の通り表す。

$$\begin{aligned} e_x &= f_x(v, Co, t) + dX + g_x(R, \beta) \\ e_y &= f_y(v, Co, t) + dY + g_y(R, \beta) \end{aligned} \quad (5)$$

e_x, e_y : X、Y方向誤差成分 f_x, f_y : 時刻差に起因する誤差

但し、 dX, dY : 固定誤差 g_x, g_y : レーダ測定誤差

v : 速力 Co : 針路 t : 時刻差 R : 測定距離 β : 測定方位

X、Y方向誤差成分（KGPS測位位置とレーダ観測位置の差）から時刻差に起因する誤差及び固定誤差を除去後、レーダ測定誤差について解析を行った。

3. 解析結果

3.1 時刻差に起因する誤差及び固定誤差

図2に、レーダ観測位置とKGPS測位位置による航跡を示す。KGPS測位位置は、船首及び船尾の測位位置を2.2に示した方法により変換し、その平均値（船体中央位置）をプロットした。同図中、●印がレーダ観測位置、□印がKGPS測定位置である。比較する両方の位置に時間差があるため、「こじま」の速度ベクトルに対応した誤差及び固定誤差の発生が見て取れる。

2.3の(5)式に示す時刻差に起因する誤差（ f_x, f_y ）を確定するために、レーダ観測時刻と同時刻を示すKGPS測位位置とのX及びY方向誤差と、その時刻におけるX及びY方向速度成分との相関関係を調べた。図3にその散布図を示す。

グラフ中の直線は最小二乗法によ

り求めた回帰直線（相関係数0.8229）で、縦軸に誤差量、横軸に速力を取っているため、当該直線の傾きが時刻差であると考えられる。情報管理室におけるレーダ観測時刻の、観測日当日のJSTからの時刻差は明確な記録がなく不明であったが、観測者からの聞き取り調査によると、「JSTとの時刻差を1日1～2回程

図2 レーダ観測位置とKGPS測位位置による航跡

* (b)における「ある重み付けにより観測位置に近づくよう補正した距離」とは、メーカーのノウハウの部分にも関わり、ブラックボックス的な扱いをせざるをえないが、一般的なレーダの方位・距離の測定方法に良くあったアルゴリズムで構成されていると考えられる。しかし、当該船舶までのレーダ方位及び距離は、レーダ映像信号の状態等により変化するため、レーダ観測位置には誤差を生ずることになる。

度確認し、JSTからのずれが最大で数秒を越えないよう時刻整合を行う。」という、情報管理室の運用主旨からして十分な精度での管理形態であった。一方、KGPS測位時刻は、GPS時により記録される。GPS時は観測日においてはUTCより11秒進んでいることから、秒の単位ではJSTからも11秒進んでいる。同図中の回帰直線の傾き「10.1」は、以上の事項から判断して妥当な数値と考えられる。このことにより、KGPSの時刻を秒の単位で10秒ずらした測位位置とレーダ観測位置を比較することにより、時刻差に起因する誤差は除去できるものとして以後の解析を行った。

固定誤差 (dX , dY) は、KGPS測位位置とレーダ観測位置の差の平均値と考えられる。図4にXY方向誤差のばらつきを示す。平均値は、X方向(経度方向) +9.1m、Y方向(緯度方向) +14.1mとなり、座標原点位置の丸めの誤差の大きさから判断しても妥当な値であることが推察できた。

3.2 レーダ測定誤差

3.2.1 XY平面座標値として

船首及び船尾のKGPS位置より「こじま」の船首方位を求め、「こじま」の船首方向を+Y軸に、右舷正横方向を+X軸とした場合の各誤差量の分布状況を図5に示す。同図においてはアスペクト角(A)を $0^{\circ} \sim 90^{\circ}$ の範囲で 15° ごとに規格化し各記号で表している。船首尾方向誤差の標準偏差は26.4m、正横方向誤差の標準偏差は7.7mとなった。船首尾方向誤差及び正横方向誤差それぞれにつきリフォースの正規性検定を行った結果、正横方向誤差についてはD統計値=0.05858でリフォースの有意確率0.2以上となり、正規分布に従わないとする仮説が棄却できないことより、ほぼ正規分布を示すことが確認できた。一方、船首尾方向誤差は同様の検定により、D統計値=0.09676でリフォースの有意確率0.05以下となり正規分布に従わないという結果になった。

3.2.2 極座標値として

式(5)に示すように、レーダ測定誤差は方位誤差と距離誤差に分けられる。KGPS測位位置とレーダ観測位置における座標原点からの方位・距離をそれぞれ計算し、それらの差を方位誤差及び距離誤差として解析を行った。これは、レーダ観測位置を極座標値として扱う場合に相当する。

座標原点からの距離と距離誤差及び方位誤差の関係を図6に示す。同図中、横軸に座標原点からの距離を、右縦軸に方位誤差を $-4^{\circ} \sim +4^{\circ}$ の範囲で、左縦軸に距離誤差を $-80\text{m} \sim +80\text{m}$ の範囲

図3 誤差成分と速力成分の関係

図4 誤差の分布状況

図5 船首尾・正横方向誤差の分布状況

で取り、○印を方位誤差、■印を距離誤差として表している。

今回の測定海域程度の広さ及びレーダ信号の処理方法では、座標原点からの距離の変化による距離誤差の発生状況には特徴的な傾向は特に見られず、また、リリフォースの正規性検定により距離誤差はほぼ正規分布していることが分かった。一方、同図から方位誤差は、距離が近い程、特に1,000 mよりも近距離になると大きな誤差が発生する傾向がうかがえ、同様の正規性の検定から、正規分布に従わないことが分かった。

4. 考 察

3. で得られた解析結果から、海上交通の評価

に利用される諸要素に、レーダ測定誤差が及ぼす影響等について以下に考察する。

4.1 ゲート通過隻数

ゲート通過隻数の集計は、航路帯などの船舶交通流の状況把握に用いられるものであるが、ゲート幅の設定は、海域の状況や解析目的によって、解析者が任意に選ぶことが多い。3.2で解析した誤差の内、正横方向誤差の分布はゲート通過隻数の集計に影響を及ぼす要素となるので、その統計的性質を利用し、ゲート幅による通過隻数の積算カウンターの誤り発生の確率を試算した。図7にその考え方を示す。ゲート幅を D とし、ゲート中のレーダ観測による船舶通過位置を μ とすると、正横方向誤差の正規性から当該船舶の真のゲート通過位置の確率 $P_1(x)$ は、以下の式で表せる。

$$P_1(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad \text{..... (6) 但し、} \sigma : \text{標準偏差とする。}$$

この場合、ゲート外を通過する確率は、同図中の黒色で塗りつぶした領域に相当し、ここではこの確率を「ゲート誤り確率」と呼ぶこととする。今、ゲート内を通過する N 隻の船舶は当該ゲート内は一様分布すると仮定した場合、平均的なゲート誤り確率は次式で計算される。

$$p(x) = \frac{1}{N} \times \sum_{i=1}^N \left\{ \int_{-\infty}^0 \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx + \int_D^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx \right\} \quad \text{..... (7)}$$

$$\text{但し、} \mu = \frac{D}{N} \times i \quad (i = 1, 2, \dots, N)$$

図7 ゲート誤り確率の考え方

図6 距離誤差と方位誤差の状況

図8 ゲート誤り確率の試算結果

図8に、 $N=100$ 隻、 $\sigma=10\text{m}\sim 30\text{m}$ とした場合について、ゲート幅 (D) を $10\text{m}\sim 500\text{m}$ の間で変化させた時のゲート誤り確率 ($p(x)$) の試算結果を示す。この図から、例えば、今回の正横方向誤差の大きさから、 σ を 10m と見積もる時、ゲート誤り確率を 0.1 以下にするためには、ゲート幅を 80m 以上にすることが分かる。この様に、ある誤り確率を仮定することでゲート幅の大きさを求めることができ、解析を行う上での一つの基準策定に応用できると考える。

4.2 推定針路及び推定速力

評価指標として利用される針路や速力は、レーダ観測位置の変化から計算される。KGPS位置の変化から計算される針路・速力と、レーダ観測位置の変化から計算した針路・速力の差を、それぞれ、針路誤差及び速力誤差として、それらの時間変化を図9に示す。同図は横軸に時間 (0時0分からの積算した「分」の数値)、右縦軸に針路誤差を、左縦軸に速力誤差を取っている。この図から、レーダによる針路及び速力の推定は、突発的に大きな誤差が生じる場合があることが分かり、針路・速力を評価指標とする場合には、十分な平均化処理等を行う必要があることが分かる。

4.3 方位誤差

方位誤差は、2.3の③に示したレーダの位置検出のアルゴリズムの概要から、映像のビーム方向の広がり (観測位置からのアスペクト角と距離) との相関が予想できたため、方位誤差の絶対値と座標原点からの「こじま」のアスペクト角と距離についてまとめた。図10にその結果を示す。同図においてはアスペクト角を $0^\circ\sim 90^\circ$ の範囲で 15° ごとに規格化したため、例えば船首または船尾が観測位置を向いている時が 0° となっている。この図から、船首尾が観測位置方向を向いている時は近距離であっても方位誤差は小さく、また、アスペクト角が 90° 近くであっても、距離が遠ければ同様に方位誤差は小さいことが、更に、これとは逆に近距離でアスペクト角が 90° に近い程大きな方位誤差が発生する場合があることが分かる。すなわち、レーダの方位誤差の発生状況には、映像の幾何学的な大きさと相関があることが推察できた。

5. まとめ

KGPS測位位置とレーダ観測位置を比較解析した結果を以下にまとめる。

- (1) レーダ観測における船舶位置誤差は、観測海域における航行船舶の進行方向によって、同一海域においても誤差量の発生状況に違いがあり、今回の測定から類推すると、船首尾方向に約 $\pm 1/4L$ 、正横方向に約 $\pm 1/2B$ (L :全長、 B :幅) の範囲でばらつく。
- (2) レーダ観測における船舶位置誤差が海上交通の量的な評価指標に及ぼす影響等を考察した結果、
  - ① 海岸線等を平面座標に置き換えレーダ観測位置を同一座標で表現する場合など、座標を整合させる際に固定誤差が大きく影響してくる可能性があるため、座標原点の位置精度について十分な注意が必要である。
  - ② 正横方向誤差の正規性からゲート通過誤り確率を仮定することで、解析に用いるゲート幅を決定する

図9 針路誤差及び速力誤差の時間変化の状況

図10 方位誤差と距離及びアスペクト角の状況

ことが可能となった。

③レーダ観測位置の変化から推定する針路及び速力は大きな誤差が発生する場合があるため、十分な平均化処理が必要である。

(3) レーダ観測位置を極座標で表す場合

今回の観測海域程度の広さ及びレーダ信号処理方法によれば、距離誤差は、ほぼ正規分布することが、また、方位誤差は、船首尾が観測地点を向いている時は小さく、船舶からの映像が良好に受信できる近距離においては大きな誤差が現れることがあることが分かった。

また、今回の解析には以下のような問題点も残るので、今後の検討課題としたい。

(1) 解析対象の船舶は当大学の練習船「こじま」のみで、形状から見ても特殊な船舶であることから、通常の貨物船等、一般的な船型においても更に検討する必要がある。

(2) 情報管理室のレーダは、津島及び湊町の2個所に設置されており、レーダの設置位置から測定した方位・距離によって、船舶位置を求めているのではないことから、レーダ反射信号強度との関係から測定誤差を検討することができていない。

(3) レーダの方位誤差は映像の大きさ（アスペクト角と距離）との相関が見られたが、データ数が十分でない等の理由により、定量的評価が行えていない。等である。

最後に、今回の実験に際し、全般的な調整等ご尽力頂き、また、研究内容につき多大な示唆を賜った、広島大学小瀬邦治教授、及び実験にご協力頂いた本州四国連絡橋公団、トリンプルジャパン社、練習船「こじま」清水昭夫船長を始め乗組員等関係各位の方々に感謝致します。

参 考 文 献

(1) 土屋 淳・辻 宏道著：「やさしいGPS測量」，日本測量協会，pp.390～395，1991.

(2) 日本測地学会編著：「GPS－人工衛星による精密測位システム－」，日本測量協会，pp.178，1989.

質 疑 応 答

和気博嗣（神戸商船大学）：今回「こじま」による実船結果の比較とこれを一般船舶における誤差を推定する場合の特に変化する要因、見込みについてお教え下さい。

山田多津人：船舶からのレーダ反射信号強度は、その船型（船橋構造等）によって大きく変化すると思われますが、方位・距離を検出するアルゴリズムが今回のレーダ装置と同じ（一定なしきい値以上を示す映像の平均的な方位と距離から位置を求める）であれば、誤差の発生状況に大きな違いは起こらないのではないかと考えます。しかし、ご指摘の点等更に検討すべきと考えておりますので、今後の検討課題としたいと思います。