

GPSとSONARを用いた複合計測方式による 大水深構造物の沈設誘導に関する研究

INSTALLATION SYSTEM OF LARGE-SCALE UNDERWATER STRUCTURES BY COMPOUND MEASUREMENT METHOD USED GPS AND SONAR

古川 敦¹
Atsushi FURUKAWA

¹正会員 株式会社熊谷組 土木本部 土木技術部 (〒300-2651 茨城県つくば市鬼ヶ窪1043)

Numerical simulation was enforced for the purpose of precision inspection of large-scale underwater structures installation system. Observation values by compound measurement system that used GPS and SONAR are adjusted by observation equations with constraints. Numerical simulation used observation values formed by BoxMuler method, and enforced comparison with adjustment results by the above-mentioned method.

SONAR system cannot ignore sound speed changes that originate in water temperature changes in the real sea. Using the theory value of sound speed distribution that was supposed to typical water temperature day change, the precision of revision method was inspected. As a result, satisfactory performance for vertical distribution and day change of sound speed was confirmed.

Key Words : SONAR, GPS, underwater structure, observation equations with constraints ,
sound speed

1. 緒言

沈埋トンネルなどの沈設時の位置計測は、函体内部の傾斜計と函体上に設置された測量塔の位置計測により沈埋函の姿勢を特定していた。この方式を大水深・潮流下で適用した場合、測量塔は沈設完了時まで水面上に突出させる必要性があり、水深と同程度以上の長尺なものとなる。沈設前の測量塔取付時には、長尺測量塔に対応したクレーン船の大型化・取付時の函体の安定性などに問題が生じ、また沈設時にも長尺測量塔に潮流力が作用し、函体が不安定となる。沈設後の測量塔撤去には潜水作業が必要であり、沈設水深が深くなるに従い潜水水深も増大し、混合ガス潜水・飽和潜水などの設備や安全面でも問題が生じる。

本研究では測量塔および潜水作業を不要とするため、水面上でのGPS(Global Positioning System)と水中部のSONAR(Sound Navigation and Range)の複合計測方式を考案し、その観測値の調整法および精度について検討を行った。

2. 計測システム

複合計測方式は図-1 に示すとおり、作業船（ブレーシングバージ等）上に配置した3基以上のGPSと、

水中部に配置した無指向性の水中超音波パルスを送受信するSONARで構成される。3基以上のGPSにより、動揺する作業船の3次元位置（姿勢）を常時計測することができ、GPSアンテナとの相対位置が既知である作業船底面のトランスデューサ（SONAR発振部）の絶対位置を求めることが出来る。新設沈埋函上部にもトランスデューサが取り付けられ、作業船底面のトランスデューサ（既知座標）からの複数組の距離を音波到達時間により計測し、沈設中の沈埋函の絶対位置を算出することができる。

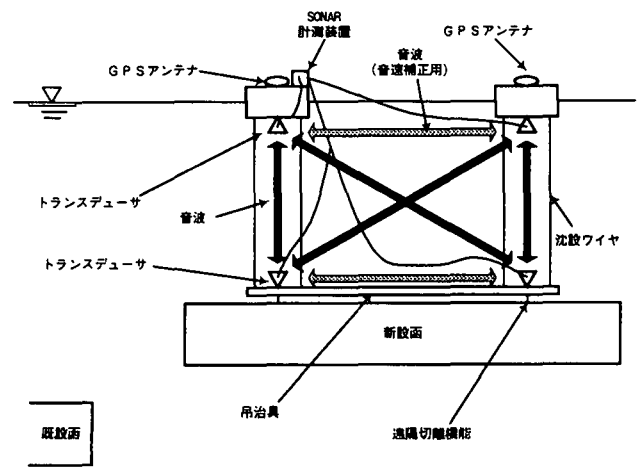


図-1 計測システム概要

3. 位置算出方法

GPSおよびSONARは作業船および沈埋函に固定され、図-2に示すとおりGPSからは3次元座標値、SONARからは距離が複数観測される。これらの観測量は誤差を含むため、沈埋函位置を算出するためには観測量の調整を行う必要がある。

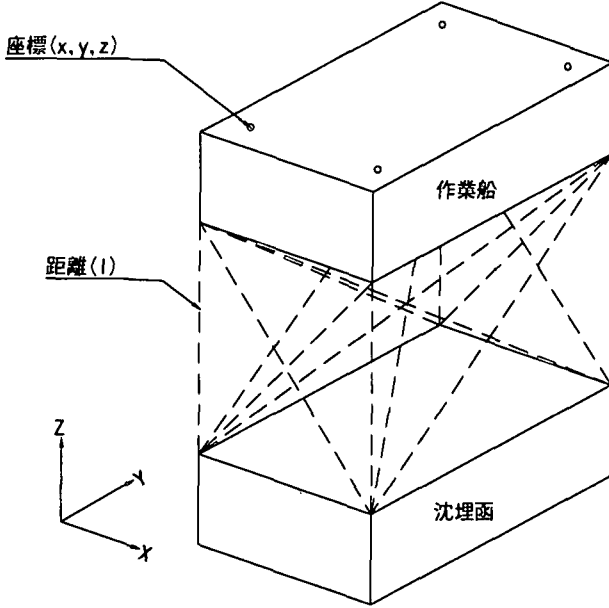


図-2 観測量

(1) 観測量の調整

はじめに作業船側トランスデューサの位置算出法を以下に示す。

n_G 個のGPSから得られる観測座標値は各々 x, y, z の3成分であるため、観測数は $3n_G$ となる。作業船は剛体であり、この上に設置されたGPSおよびトランスデューサ間の距離は既知量である。これらの距離を拘束条件として条件方程式を付加すれば、未知数を導くことができるが、条件数には次に示す点を考慮する必要がある。

n_G 個のGPS間の距離（既知量）の総数は $n_G(n_G - 1)/2$ 個であるが、1点の座標は3点からの距離で固定されてしまうため、条件数に全ての距離を使用すると条件が過多となる。このため、 $3 + 3(n_G - 3) = 3(n_G - 2)$ 個の距離を使用する。また作業船側のトランスデューサ数を n_{TU} とすると、上記と同様に3個のGPSと各トランスデューサ間の距離 $3n_{TU}$ 個を条件に加える。

未知数 n 、観測数 m および条件数 r の関係を以下に示す。

$$n = 3(n_G + n_{TU}) \quad (1a)$$

$$m = 3n_G \quad (1b)$$

$$\begin{aligned} r &= 3(n_G - 2) + 3n_{TU} \\ &= 3(n_G + n_{TU} - 2) \end{aligned} \quad (1c)$$

次にGPSによる座標値の観測方程式は、観測座標値を l_i^b 、その近似値を l_i^0 、近似値補正量を x_i とすると、観測に加えるべき補正量 v_i は以下のように線形となる。（ $i = 1 \sim 3n_G$ ）

$$x_i + (l_i^0 - l_i^b) = v_i \quad (2)$$

式(2)を行列表示し、係数行列を加えると以下のとおりとなる。なお添字は行列数を示す。

$${}_m A_n \cdot {}_n X + {}_m L_1 = {}_m V_1 \quad (3)$$

一方条件である距離は、GPSとGPS、GPSと作業船側トランスデューサの座標を p_{1x}, p_{1y}, p_{1z} および p_{2x}, p_{2y}, p_{2z} とすると、距離 S は以下のように非線形となる。

$$S = \left\{ (p_{1x} - p_{2x})^2 + (p_{1y} - p_{2y})^2 + (p_{1z} - p_{2z})^2 \right\}^{1/2} \quad (4)$$

(4)式をテイラー展開し、微小部分を無視すると、

$$\begin{aligned} S &= S^0 - \frac{p_{1x}^0 - p_{2x}^0}{S^0} \delta p_{1x} - \frac{p_{1y}^0 - p_{2y}^0}{S^0} \delta p_{1y} \\ &\quad - \frac{p_{1z}^0 - p_{2z}^0}{S^0} \delta p_{1z} + \frac{p_{1x}^0 - p_{1x}^0}{S^0} \delta p_{2x} \\ &\quad + \frac{p_{1y}^0 - p_{2y}^0}{S^0} \delta p_{2y} + \frac{p_{1z}^0 - p_{2z}^0}{S^0} \delta p_{2z} \end{aligned} \quad (5)$$

ここで S, S^0 はそれぞれ距離の既知量（条件）、近似値を示す。また $\delta p_{1x} \sim \delta p_{2z}$ は、 $p_{1x} \sim p_{2z}$ の近似値 $p_{1x}^0 \sim p_{2z}^0$ の補正量である。

ここで $\delta p_{1x} \sim \delta p_{2z}$ を x_i 、 x_i の係数を b_{ji} 、 $S^0 - S$ を w とおき、式(6)と同様に行列表示すると以下のとおりとなる。

$${}_r B_n \cdot {}_n X + {}_r W_1 = 0 \quad (6)$$

式(3)と(6)により、条件付観測方程式¹⁾にまとめられ、式(7)により補正ベクトル X を求めることができる。なお観測方程式の重み行列 P は、GPSの標準偏差 m を用い $1/m^2$ とした。

$$X = N^{-1} \left\{ B^T (BN^{-1}B^T)^{-1} (BN^{-1}U - W) - U \right\} \quad (7)$$

ここに

$$N = A^T P A$$

$$U = A^T P L$$

これにより作業船側のトランスデューサの位置を求めることができる。

次にSONARの観測量から沈埋函側のトランスデューサ n_{TL} 個の位置を求める。沈埋函側のトランス

スデューサ1基に対して観測される距離数は n_{TU} 個あり、(5)式と同様に作業船側トランスデューサの座標を p_{jx}, p_{jy}, p_{jz} とし求める座標を p_x, p_y, p_z とすると以下のとおりとなる。(j=1~ n_{TU})

$$\begin{aligned} & -\frac{p_{jx} - p_x^0}{S^0} \delta p_x - \frac{p_{jy} - p_y^0}{S^0} \delta p_y \\ & -\frac{p_{jz} - p_z^0}{S^0} \delta p_z + (S^0 - S^b) = v \end{aligned} \quad (8)$$

ここで S^0 , S^b はそれぞれ距離の近似値および観測値を示し、 v は観測の補正量である。また $\delta p_x \sim \delta p_z$ は、 $p_x \sim p_z$ の近似値 $p_x^0 \sim p_z^0$ の補正量である。 $\delta p_x \sim \delta p_z$ を x_i , x_i の係数を a_{ji} , $S^0 - S^b$ を l_j とおくと、式(3)と同様の観測方程式が得られる。

これにより式(9)を用い補正ベクトル X を求めることができ、沈埋函側のトランスデューサの位置を算出できる。なお観測方程式の重みベクトル P は、SONARの標準偏差 m を用い $1/m^2$ とした。

$$NX + U = 0 \quad (9)$$

沈埋函側のトランスデューサの位置から沈埋函端面の座標を得る方法は、上述した作業船上のGPSとトランスデューサの関係と同じであり、式(1)から式(7)を用い同様に算出できる。

(2) 精度検証

上述の位置算出法を用い、センサー取付位置による位置検出精度の影響を検討するため、数値シミュレーションを実施した。GPSの標準偏差は水平方向1cm、鉛直方向2cmとし、SONARの標準偏差を距離50mで5cmと仮定したうえで、式(10)に示すBoxMuller法の標準正規分布乱数 u , w を用い擬似観測値を生成した。

$$u = \sqrt{-2 \log_e x} \cos(2\pi y) \quad (10)$$

$$w = \sqrt{-2 \log_e y} \sin(2\pi x)$$

ここで x, y は(0, 1)の一様乱数を示す。

数値シミュレーションではこの観測値を使用し、算出された検出位置と真値との誤差を $n=1000$ 回の標準偏差で評価した。

なお使用するセンサーの個数は、GPS4基、作業船側および沈埋函側のトランスデューサは各々4基とした。また対象とする沈埋函は長さ100m、幅16m、高さ10mの規模とし、設置水深60mを想定した上で可能であるセンサー取付位置について検討を行った。

沈埋函接合端部における誤差の分布状況を図-3, 4に示すが、数値シミュレーションではセンサー設置距離を函体長さ方向90m、幅方向30m (GPSおよび作業船側トランスデューサは常に+16m広くした) を基準としており、図-3, 4はこの基準配置の分布を示し

ている。この結果、函体長さ方向、幅方向、高さ方向の標準偏差は各々0.028m, 0.053m, 0.037mとなり、10cm程度の誤差で函体位置を特定することができる。

(1)で述べたGPSの観測値調整法では3点からの距離を条件としているため、4点目が3点と同一平面内にある場合は方程式が正則でなくなる。このため、GPS4点のうち2点を0.1m高く配置することを基準配置とした。このGPS高低差は水平距離と同程度、すなわち4点の配置が正三角錐に近づくに従い検出位置精度は向上するが、その影響を調べるため高低差を変化させシミュレーションを実施した。この結果を図-5に示す。高低差による影響は10m程度まで変化はないことから、完全に同一平面でなければ、問題はないといえる。また、10m以上の高低差を持たせることは現実的ではないため、0.1m程度の高低差をつけ設置することで精度には影響せず位置算出が可能であるといえる。

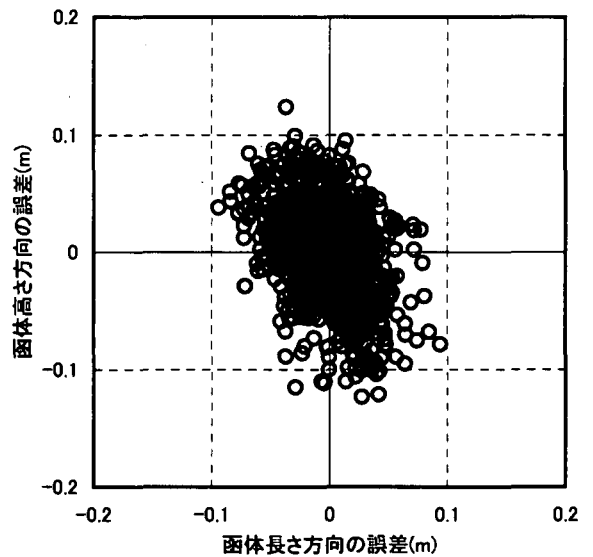


図-3 誤差断面分布

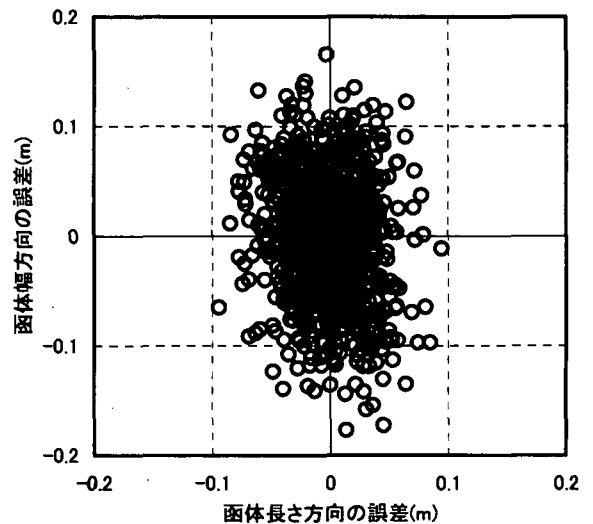


図-4 誤差平面分布

図-6では函体長さ方向のセンサー距離による影響を示すが、距離すなわちベースラインに反比例する傾向が得られており、また3成分の誤差配分には変化がないため可能な限りベースラインを広げることにより位置検出精度が向上するといえる。

沈埋函幅方向のセンサー距離は長さ方向に対し短く、これもできる限り距離をとることにより精度向上が期待できるが、沈埋函側の吊治具および作業船の大型化につながるため限界がある。図-7に解析結果を示すが、距離60m以上ではほぼ精度が収束している。また精度は幅方向のみに影響を与えており、高さおよび長さ方向に対する影響は少ないといえる。結果としては60m以上の距離が望ましいが、作業船等の規模を考慮すると、30m程度が実現可能なスケールといえる。

4. 音速変動による影響

海水中の音速は水温・塩分・水深により変化し、Mackenzie(1977)により音速 C (m/s) は以下の式が得られている。

$$\begin{aligned}
 C = & 1448.96 + 4.591T - 5.304 \times 10^{-2} T^2 \\
 & + 2.374 \times 10^{-4} T^3 + 1.340(S - 35) \\
 & + 1.630 \times 10^{-2} D + 1.657 \times 10^{-7} D^2 \quad (11) \\
 & - 1.025 \times 10^{-2} T(S - 35) \\
 & - 7.139 \times 10^{-13} TD^3 \\
 T : & \text{水温} (^{\circ}\text{C}) \\
 S : & \text{塩分濃度} (‰) \\
 D : & \text{水深} (\text{m})
 \end{aligned}$$

このうち最も影響の大きいファクターは水温であり、表層から底層までの水深方向の水温分布により音速も変化する。SONARでは音波伝播時間から距離を算出するため、音波伝播中の音速変化により誤差を生じる。この水深方向の音速分布を常時監視することは困難であり、この問題を解決するため、既知距離である作業船側のトランスデューサ間および沈埋函側のトランスデューサ間で音波伝播時間を測定し、表層部の音速を作業船側のトランスデューサで観測し、鉛直方向の音速分布を沈設中に沈埋函側のトランスデューサで観測しながら音速を補正する方法を検討した。

(1) 音速補正法

沈設中のGPSおよびSONARによる観測は毎秒1回の頻度が可能であるが、この1セットの観測をステップ i とする。 i ステップにおける水深 D_i は観測により得られる音波到達時間 t_i とその水深位置までの平均音速 $\bar{C}_i$ の積で得られるが、 $\bar{C}_i$ は未知数であるため1ステップ前の $\bar{C}_{i-1}$ で推定することとする。ただし、

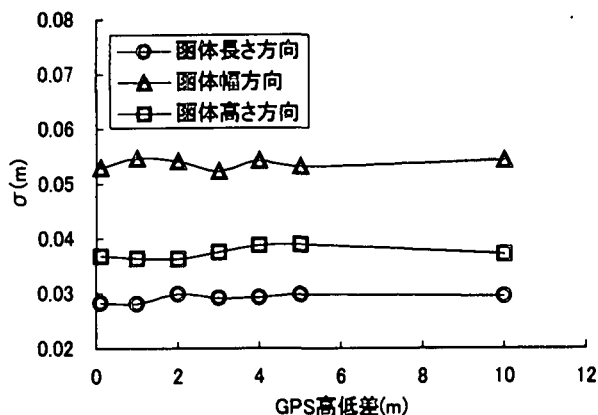


図-5 GPS高低差による影響

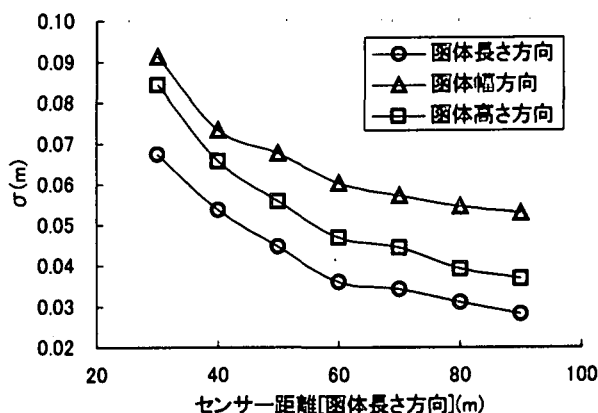


図-6 センサー平面距離による影響

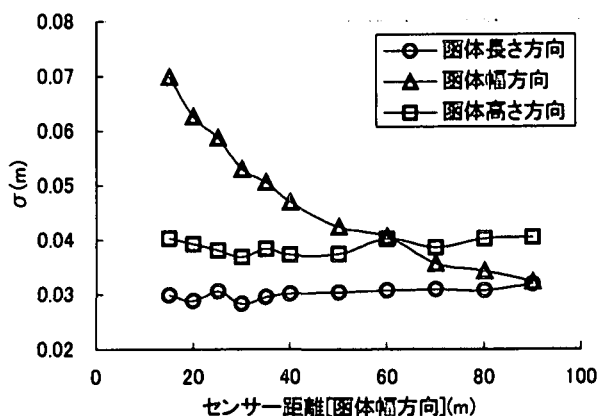


図-7 センサー平面距離による影響

第1ステップ ($i=1$) においては表層(作業船側)で得られる音速 C^s と沈埋函側で得られる音速 C_i の平均音速を用いることとした。

$$\begin{aligned}
 D_i &= \frac{C^s + C_i}{2} t_i \Big|_{i=1} \\
 D_i &= \bar{C}_{i-1} t_i \Big|_{i>1}
 \end{aligned} \quad (12)$$

次の D_{i+1} を求めるためには $\bar{C}_i$ を算出する必要があるが、各層ごとに積分した到達時間を t'_i とし、式(13)により算出する。

$$\bar{C}_i = \frac{D_i}{t'_i} \quad (13)$$

t'_i はステップ $i-1 \sim i$ 間の平均音速と層厚を積分し、次のとおりとした。

$$t'_i = \frac{2D_1}{C^S + C_1} + 2 \sum_{j=2}^i \frac{D_j - D_{j-1}}{C_j + C_{j-1}} \quad (14)$$

ここで式(12)～(14)の方法では、沈設開始時の表層音速 C^S のみしか使用しないため、平均音速 $\bar{C}_i$ には音速分布の時間変動が補正されていない。そこで各ステップ毎に常時作業船側で計測される C_i^S を用い、式(15)に示す i ステップにおける表層との音速比 C_i^* を用い補正することとした。

$$C_i^* = \frac{C_i}{C_i^S} \quad (15)$$

これにより式(14)に対応する t'_i は以下のとおりとなる。

$$t'_i = \frac{2D_1}{C_1^* C_i^S + C_i^S} + 2C_i^S \sum_{j=2}^i \frac{D_j - D_{j-1}}{C_j^* + C_{j-1}^*} \quad (16)$$

(2) 音速分布

前述の音速補正法による補正精度を検証するため、福渡ら²⁾の水温分布モデルを使用し、これを真値とし補正法の検証を行うこととした。

水温分布モデルは混合層の厚さ d_m 、躍層下端の水深 d_s 、躍層上端および下端の水温を T_s および T_B とし、水深 z における水温 T を以下の式により算出した。

$$T = T_B + (T_s - T_B) f(z^*) \quad (17)$$

$$z^* = \frac{z - d_m}{d_s - d_m} \quad (18)$$

なお、 $f(z^*)$ は以下のとおりとした。

$$f(z^*) = 1.35e^{-1.35z^*} - 0.35 \quad (19)$$

式(17)により得られた水温を式(11)により音速に変換し、これを音速分布とした。ただし、塩分濃度は $35 \text{ }^{\circ}/_{\infty}$ で一定とした。

精度検証では式(11)を積分し、各ステップにおける音波到達時間 t_i の真値を算出し、前述の音速補正法により水深を算出し、真値との比較を行った。

(3) 精度検証

検証では d_m 、 d_s 、 T_s 、 T_B の基準値を

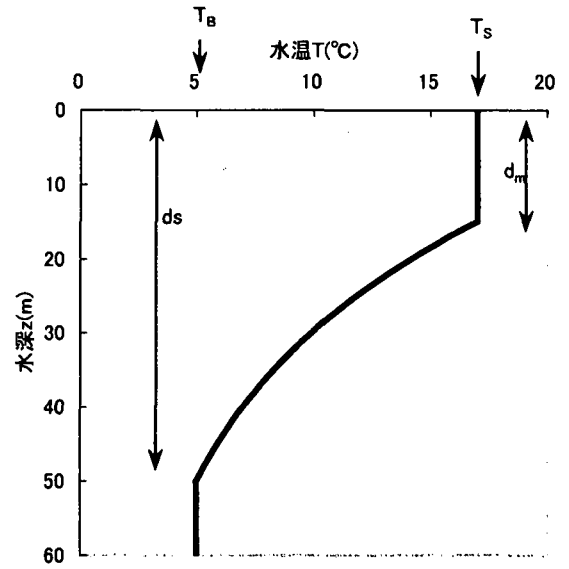


図-8 水温分布

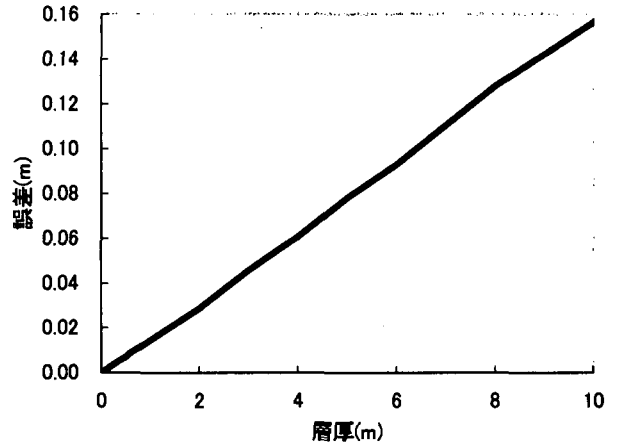


図-9 層厚による影響

15m, 50m, 17°C, 5°C とし、水深60mにおける算出水深を評価した。図-8には水温分布を示す。

図-9には計測ステップ間隔である層厚をパラメータとした水深60mにおける誤差を示す。誤差は層厚に比例するが、層厚50cm未満であれば誤差も1cm以下に収めることが可能であることが判る。実システムにおいても層厚50cm未満の観測は十分可能であるため、本補正法の妥当性が確認できた。以後の解析では層厚を10cmと固定した。

図-10では表層水温 T_s が、沈設開始時から水深60mに至るまでに時間と比例して変化した場合の誤差を示す。なお、図中の点線は表層水温が上昇とともに混合層の厚さ d_m も増加した場合、破線は水温降下とともに d_m が減少した場合を示す。すなわち図中の実線と点線または破線の間に現実的な誤差が

当てはまると考えられる。図-10は式(15)による表層水温補正を行っていない結果であるが、水温変動 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 程度で誤差10cm以上発生してしまうとの結果がうかがえる。

図-11には式(15)による表層水温補正を行った結果を示す。図-10と比較すると、表層水温補正による大きな効果が確認できる。また、水温変動 $\pm 3^{\circ}\text{C}$ の状況においても誤差5cm以下とすることが可能との結果を得た。

5. まとめ

GPSとSONARを用いた複合計測方式の観測値補正法による誤差は、水深60mにおける沈埋函の沈設で標準偏差5cmの結果を得た。また考案した音速補正法では、水温分布モデルを用いた音速分布でシミュレーションを実施し、水温変動 $\pm 3^{\circ}\text{C}$ 程度であれば誤差5cmで補正可能との結果も得られた。実海域の音速分布は定かではないが、本方式による沈設では誤差10cm程度の位置計測が可能であるといえる。

今後さらに高精度な観測値調整法の研究および実音速分布との比較検討などの課題解決に向けた研究が必要である。

参考文献

- 1) 田島 稔, 小牧和雄: 最小二乗法の理論とその応用, 東洋書店, 1986.
- 2) 福渡 淳一, 田中 仁, 首藤 伸夫: 三陸沿岸海域における水温分布の推定, 海岸工学論文集, 第43巻, pp.1196-1200, 1996.

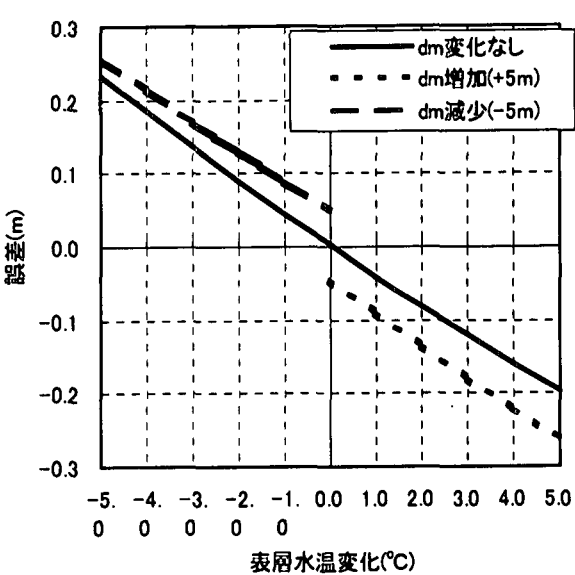


図-10 表層水温変動による影響（補正なし）

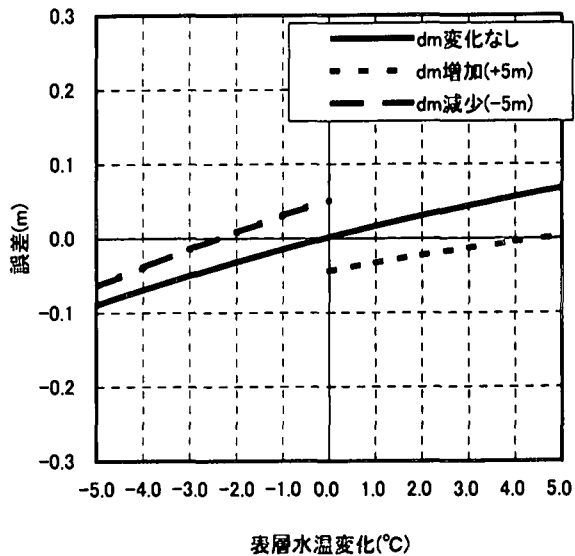


図-11 表層水温変動による影響（補正あり）