

電波位相差測位法による動的変位計測の実用化 に向けての実験検証

¹吉崎 互, ²御子柴 正, ³岡村 敦, ⁴鈴木 信弘, ⁵永井 英樹, ⁶茂木 篤志, ⁷渡部 浩正

^{1,3,4,5,6,7}三菱電機株式会社 (〒661-8661 兵庫県尼崎市塚口本町 8-1-1)

²防災科学技術研究所 (〒305-0006 茨城県つくば市天王台 3-1)

E-defense is the full-scale earthquake experiment facility testing the quake-proof structure, and needs method which can simultaneously measure large displacements of multiple reference points on the specimen. We have proposed remote 3-dimensional displacement measurement method using phase difference of radio wave for earthquake experiment, and confirmed the principle of the proposed method by some radio experiment using 4 receiving antennas. In this paper, we extend proposed displacement measurement method so that many (more than 4) receiving antennas can be used. The aim of this extension is to mitigate the effect of phase observation errors caused by multipath and other interference. It is also clarified that the extended measurement method can improve the accuracy by some simulations and radio experiment on the shaking table.

Key words: Positioning, Phase Differential, Radio, Earthquake Testing, Displacement Measurement

1. まえがき

阪神・淡路大震災を契機に実大構造物の試験体を用いた実証的な振動破壊実験が可能な施設としてE-ディフェンスの建設が進んでいる。このE-ディフェンスは、最大水平±100cm, 鉛直±50cm の三次元大変位を再現し、実大規模の構造物の破壊実験を可能にする²⁾。そのため、動的破壊実験における計測において最も重要な、試験体の動的変位、大変形を三次元的に計測するための有効な手段として電波を用いた位相差測位法の開発を行ってきた。^{1)~4)}

そして、第I期は要素技術開発として、建物の多点振動応答を計測するために、建物の各変位計測点に電波送信機を設置し、異なる位置に設置した複数のセンサで受信し、受信信号間の位相差から計測点位置を推定する変位測定方式を提案し、電波実験にて原理検証に成功している。^{5)~7)}

計測点位置座標である3個の未知数 (x, y, z) を決定するためには、4個のセンサ (受信アンテナ) による観測が必要である。上記原理検証では、センサ数Mが最低数4個の場合で実施された。しかしながら、振動台など金属床を有する場合や建家の内部などの電波環境では、直接波にマルチパス波が干渉し、1個のセンサでも受信信号の位相値が乱れると、その結果変位計測結果に大きな誤差を生ず

る恐れがある。

この課題に対して、今回実用化に向けた第II期開発として、マルチパス干渉の影響を低減することを狙う。ここでは、4個より多数のセンサを設けて冗長性を有して測位する方式を検討した。本稿ではまず、多センサを用いた位相差測位法について述べ、次に、計算機シミュレーションによる提案測位法の原理検証結果、並びに実電波を用いた振動台上での検証試験の評価結果について示す。

2. 多センサ間の位相差を用いた測位の原理

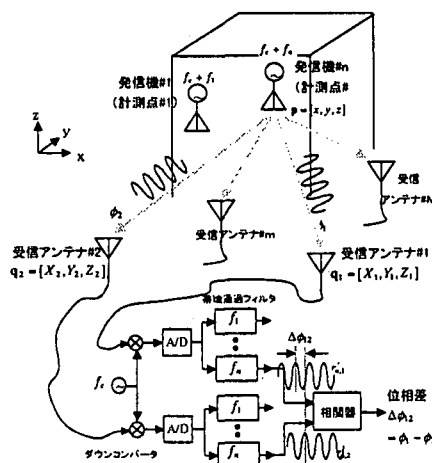


図1 振動変位計測系の基本構成

図1に電波の位相差を利用した変位計測系の基本構成を示す。第I期の基本測位方式^{1)~3)}では、受信アンテナすなわちセンサの個数Mは4個であり、各センサ間の受信信号位相差 $\Delta\phi_{ij}$ を測定すれば計測点(電波送信機)の位置は一意に決定できる。今回は、センサ数Mが $M>4$ の場合、すなわち冗長な観測系を考えた場合である。この場合も第n計測点の位置 $\mathbf{p}=[x, y, z]^T$ に関する方程式は、次のように与えられる。^{1)~3)}

$$\sqrt{(x-x_i)^2+(y-y_i)^2+(z-z_i)^2}-\sqrt{(x-x_j)^2+(y-y_j)^2+(z-z_j)^2}=\Delta r_{ij},$$

$$(i, j=1, 2, \dots, M; i \neq j) \quad (1)$$

$$\Delta r_{ij}=\frac{\lambda}{2\pi}(\Delta\phi_{ij}+2\pi N_{ij}) \quad (2)$$

ここに、 $[X_i, Y_i, Z_i]$ は第i受信アンテナ(センサ)の位置座標、 Δr_{ij} は計測点から受信アンテナiまでの経路長と計測点から受信アンテナjまでの経路長との距離差を意味する観測値である。なお、 N_{ij} は電波の経路差の整数値バイアスであり、初期位置などから既知または推定できる値である。

式(1)の方程式は未知数 $[x, y, z]$ について非線形であるから、 $M=4$ の場合の測位方式と同様に関数；

$$f_i(x, y, z)=\sqrt{(x-x_i)^2+(y-y_i)^2+(z-z_i)^2}-\sqrt{(x-x_j)^2+(y-y_j)^2+(z-z_j)^2} \quad (3)$$

を $[x, y, z]$ を近似値 $[\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}]$ 周りに展開し、近似値から真値への補正量 $[\delta x, \delta y, \delta z]$ を求めて発信機の位置 $[x, y, z]$ を推定する逐次近似法により位置 $\mathbf{p}=[x, y, z]^T$ を推定する。この場合、 $[x, y, z]=[\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}]+[\delta x, \delta y, \delta z]$ で、補正量 $\delta\mathbf{p}=[\delta x, \delta y, \delta z]^T$ は微小であるとして式(1)を展開すると、次式が得られる。

$$\hat{\mathbf{A}}\delta\mathbf{p}=\delta\mathbf{r} \quad (4)$$

$$\hat{\mathbf{A}}=\begin{bmatrix} \frac{\partial f_{12}(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})}{\partial x} & \frac{\partial f_{12}(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})}{\partial y} & \frac{\partial f_{12}(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})}{\partial z} \\ \frac{\partial f_{23}(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})}{\partial x} & \frac{\partial f_{23}(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})}{\partial y} & \frac{\partial f_{23}(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})}{\partial z} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial f_{M-1,M}(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})}{\partial x} & \frac{\partial f_{M-1,M}(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})}{\partial y} & \frac{\partial f_{M-1,M}(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\delta\mathbf{r}=\begin{bmatrix} \Delta r_{12}-f_{12}(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}) \\ \Delta r_{23}-f_{23}(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}) \\ \vdots \\ \Delta r_{(M-1),M}-f_{(M-1),M}(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}) \end{bmatrix} \quad (6)$$

ここに、 $\hat{\mathbf{A}}$ は $[(M-1)\times 3]$ 次元長方形行列で、 $\delta\mathbf{r}$ は

$(M-1)$ 次元ベクトルであることに注意する。距離差観測値 Δr_{ij} に観測誤差が存在すると、式(4)の等号は成立しない。そこで、式(4)を最小二乗原理に則り、 $\|\hat{\mathbf{A}}\delta\mathbf{p}-\delta\mathbf{r}\|$ が最小となる $\delta\mathbf{p}$ を求める。ここでは、各センサの観測位相誤差はほぼ均一と仮定する。

式(4)の最小二乗解 $\delta\mathbf{p}$ は次式で与えられる。

$$\delta\mathbf{p}=\hat{\mathbf{A}}^+\delta\mathbf{r} \quad (7)$$

$$\hat{\mathbf{A}}^+=(\hat{\mathbf{A}}^T\hat{\mathbf{A}})^{-1}\hat{\mathbf{A}}^T \quad (8)$$

$\hat{\mathbf{A}}^+$ は $\hat{\mathbf{A}}$ の擬似逆行列で、 $[3\times(M-1)]$ 次元長方形行列である。

以上のように補正量 $\delta\mathbf{p}=[\delta x, \delta y, \delta z]^T$ を算出し、 $[\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}]\leftarrow[\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}]+[\delta x, \delta y, \delta z]$ と更新する処理を収束するまで繰り返せば、センサの個数Mが多数ある場合にも計測点の位置 $\mathbf{p}=[x, y, z]^T$ が推定される。勿論、式(5)~(8)の測位式は $M>4$ のみならず、 $M=4$ でも成立する。

また、測位誤差の大きさ σ_p は、次のように見積もられる。

$$\sigma_p\cong\varepsilon_\phi\left(\lambda/2\pi\right)\sqrt{\text{trace}\left\{\left(\mathbf{A}^T\mathbf{A}\right)^{-1}\mathbf{A}^T\left\{\mathbf{A}\left(\mathbf{A}^T\mathbf{A}\right)^{-1}\right\}\right\}}$$

$$=\varepsilon_\phi\left(\lambda/2\pi\right)\sqrt{\text{trace}\left[\left(\mathbf{A}^T\mathbf{A}\right)^{-1}\right]} \quad (9)$$

故に、センサが多数ある場合の本測位法におけるGDOP(Geometrical Dilution Of Precision；幾何学的誤差増倍率)は次式で与えられる。

$$GDOP=\sqrt{\text{trace}\left(\mathbf{A}^T\mathbf{A}\right)^{-1}} \quad (10)$$

3. シミュレーションによる評価

上記提案の多センサ測位方式の原理検証を、まず、計算機シミュレーションで行った。

3.1 シミュレーションモデル

条件として、2個の計測点を想定し、キャリア周波数は $f_c=2.450\text{GHz}$ (波長 $\lambda=0.122\text{m}$)、測位対象に指定した電波発信機#1の発振周波数は $f_c+10.0\text{MHz}$ 、別の電波発信機#2の発振周波数は $f_c+10.1\text{MHz}$ と与えた(周波数差 $\Delta f=100\text{kHz}$)。IF周波数 $f_{IF}=10\text{MHz}$ 、A/Dサンプリング周波数 $f_s=40\text{MHz}$ 、両波の受信信号SNRは共に $+31.6\text{dB}$ 、帯域通過フィルタのFFTポイント数は2048とした。

計測対象の計測点#1の送信アンテナ真位置座標は以下の通りである。

$$x=+1.007; y=+7.699; z=+1.588(\text{m});$$

受信信号位相誤差はセンサ毎、試行毎に独立なガウス性ラ

ンダム系列で共通に 15deg(rms) で与えた。

センサ個数と配置モデルとして下記 3 ケースを想定した。

[Case 1] センサ数 M=4

表 1. 各センサ (受信アンテナ) 位置座標 [Case 1]

Racieving Antenna	Location		
	[X	Y	Z] (m)
Rx1	[+0.000	+0.000	+0.263]
Rx2	[-3.522	-0.055	+1.341]
Rx3	[+5.223	+0.050	+1.312]
Rx4	[+1.495	+0.100	+3.205]

GDOP=8.1085

[Case 2] (GDOP は Case 1 とほぼ同等の異なるセンサ配列)

センサ数 M=4

表 2. 各センサ (受信アンテナ) 位置座標 : [Case 2]

Racieving Antenna	Location		
	[X	Y	Z] (m)
Rx1	[+0.000	+0.000	+0.270]
Rx2	[-3.450	-0.055	+1.407]
Rx3	[+5.105	+0.053	+1.200]
Rx4	[+1.501	+0.100	+3.103]

GDOP=8.3412

[Case 3] (Case1+Case2 の全ての 8 センサを使用)

センサ数 M=8

表 3. 各センサ (受信アンテナ) 位置座標 : [Case 3]

Racieving Antenna	Location		
	[X	Y	Z] (m)
Rx1	[+0.000	+0.000	+0.263]
Rx2	[-3.522	-0.055	+1.341]
Rx3	[+5.223	+0.050	+1.312]
Rx4	[+1.495	+0.100	+3.205]
Rx5	[+0.000	+0.000	+0.270]
Rx6	[-3.450	-0.055	+1.407]
Rx7	[+5.105	+0.053	+1.200]
Rx8	[+1.501	+0.100	+3.103]

GDOP=5.1849

3. 2 評価結果

ここでは、逐次近似計算の繰り返し数を 10 回とし、逐次近似計算の計測点初期近似位置を真値から各軸大きさが 0.5m 離れた位置に設定した。計測点初期近似位置は軸毎、試行毎にランダムである。また、整数値バイアス誤差が生じないように、各受信信号の位相値は位相値真値とアンラップしている。図 2 の評価結果は独立試行 100 回の統計結果を示し、横軸にケースの番号、測位誤差の rms 値を左

軸のスケール、GDOP を右軸のスケールで表示している。 σ_p は 3 軸二乗平均測位誤差、 σ_{p_theory} は式 (9) で算出した 3 軸二乗平均測位誤差の理論値である。

Case 1, 2, 3 の結果を比較して図 2 に示す。

Case3 の結果から、2. に提案の多センサ位相差測位方の原理が確認できる。さらに、Case 1, 2 と Case3 との比較により、使用するセンサ数が多いほど測位精度は向上することが確認できる。

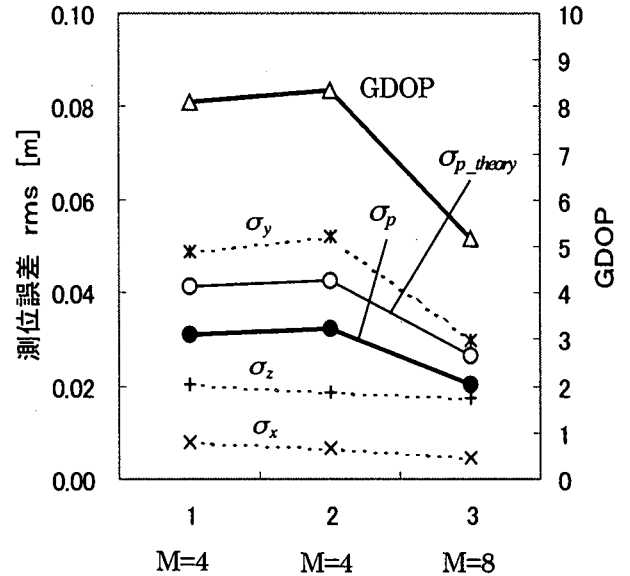


図 2 評価結果

4. 振動台における電波実験

4. 1 実験系の構成

図 3, 図 4, 表 4 にそれぞれ、電波による複数点同時変位計測実験系の配置、供試体の外観およびアンテナの位置座標を示す。防災科研の大型振動台上に設置した供試体に 2ヶ所 (Tx1, Tx2) 及びポール (単振り子構造) 6ヶ所 (Tx3 ~Tx8) に設置した送信アンテナ Tx1~Tx8 の変位を、受信アンテナ Rx1~Rx8 の受信信号位相差より、前述の多センサ測位方式によりそれぞれ独立に同時測位する。Tx1~Tx8 の送信波として、2.440GHz を中心にそれぞれ +0kHz, -100kHz, +100kHz... -350kHz, +350, -400kHz と偏差させた出力+10dBm の正弦波を使用した。送信アンテナはゲイン 2.15dB, 受信アンテナはゲイン 6dB のパッチ素子アンテナを用いた。送信波の分離にはフィルタ長 0.1msec, 2048 ポイントの FFT を用い、この (1/100Hz) の間隔毎に得られた FFT 出力信号についてそれぞれ独立

に測位処理することにより各送信アンテナの変位を独立に推定した。なお、加振方向はX軸方向のみであることから、X軸方向の変位が高精度となる受信アンテナ配置で測定した。供試体の中段フレームに設けたTx2に対するGDOPは3.857である。

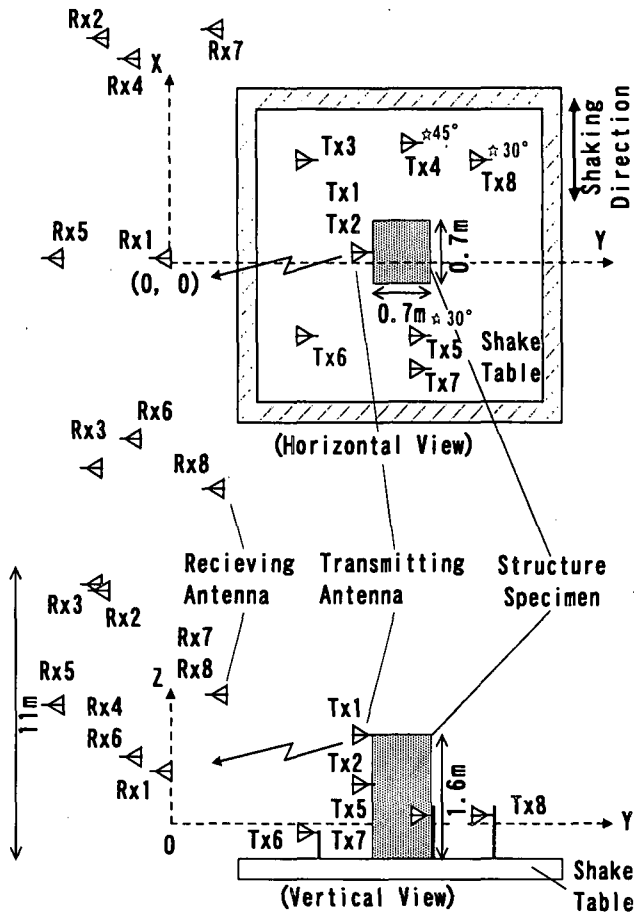


図3 実験配置

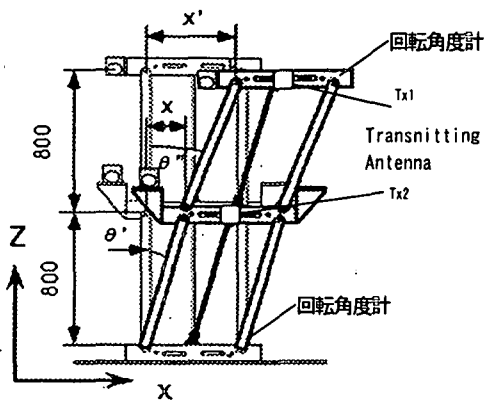


図4 供試体外観

表4. アンテナ位置座標

Receiving Antenna	Position		
	X	Y	Z (m)
Rx1	[+0.000	, +0.000	, +1.485]
Rx2	[+10.052	, +1.171	, +10.692]
Rx3	[-10.233	, +3.288	, +10.723]
Rx4	[+8.226	, +0.978	, +1.869]
Rx5	[+0.166	, +4.789	, +5.546]
Rx6	[-6.938	, +0.947	, +1.946]
Rx7	[+10.216	, -3.800	, +6.099]
Rx8	[-9.760	, -3.426	, +6.178]

Transmitting Antenna	Initial position		
	X	Y	Z (m)
Tx1	[+0.240	, -12.092	, +1.983]
Tx2	[+0.238	, -11.987	, +1.011]
Tx3	[+3.951	, -8.100	, +0.497]
Tx4	[+5.309	, -12.828	, +0.785]
Tx5	[-3.520	, -12.839	, +0.795]
Tx6	[-3.794	, -8.128	, +0.470]
Tx7	[-4.777	, -12.818	, +0.806]
Tx8	[+5.136	, -17.087	, +0.784]
Tx9	[+0.235	, -10.091	, +0.171]

4. 2 振動実験の結果

振動台で供試体を加振し、計測点Tx1~Tx8の3次元位置の振動波形を測定によって求めた。加振方向は図3のX軸方向のみであり下記の各種加振条件で試験を行った。今回は、①加振周波数:0.1Hz, 振幅±100mm, 定常波加振 ②0.2Hz~2Hz, 200gal, sweep 波加振 ③Hachinohe EW 400gal 地震波加振である。この3条件における各Tx2の計測結果を代表で示す。なお、供試体の変位量計測として回転角度計を用いて本計測法との比較検討を行っている。図5に条件①Tx2のx軸方向の加振から加振停止までの全計測結果、図6~8に回転角度計と同時に計測した60sec間の本計測結果、回転角度計結果、偏差量を示し、図9にy軸、図10にz軸の計測結果を示す。また、同様に図11, 12に条件②のTx2のx軸、図13, 14に条件③のTx2のx軸について回転角度計と同時に計測した60sec間の計測結果を示す。図8からX軸方向の計測結果と回転角度計結果の偏差は、1cm以下となっていることが分かる。

図11, 12より供試体の2Hzの加振・変位に対して加振方向(x軸)の計測が概ね追従できている、図13, 14より実地震波等を想定した供試体の片方向変位(倒れ)に対しても加振方向(x軸)の計測が概ねできている

結果が得られた。

また、表5に条件①8センサ測位での誤差の理論値、シミュレーション値、回転角度計との偏差量を、表6に条件①で8センサから4センサ (Rx1, 2, 3, 4) を選択して第1期の原理検証で用いた4センサ測位での誤差の理論値、シミュレーション値、回転角度計との偏差量を示す。結果よりこれまでの4センサ測位より多センサ測位方式にすることにより、測位精度が向上することが確認できる。

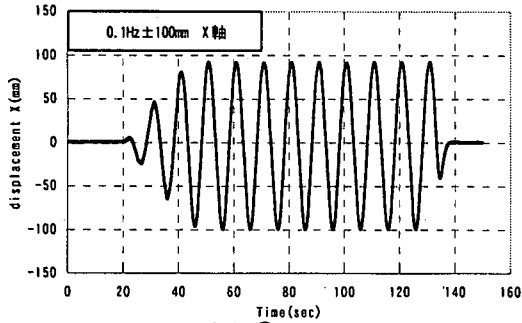


図5 条件①計測結果 Tx2

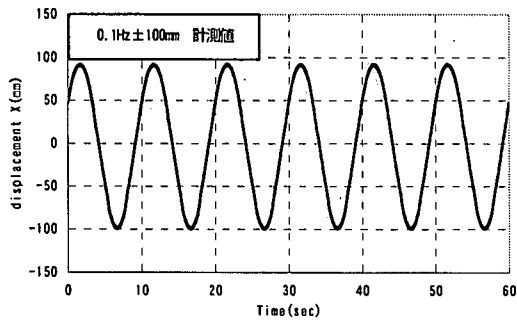


図6 条件①計測結果 (60sec) Tx2 x 軸

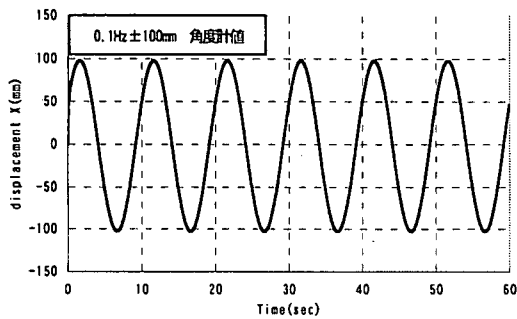


図7 条件①回転角度計結果 (60sec)

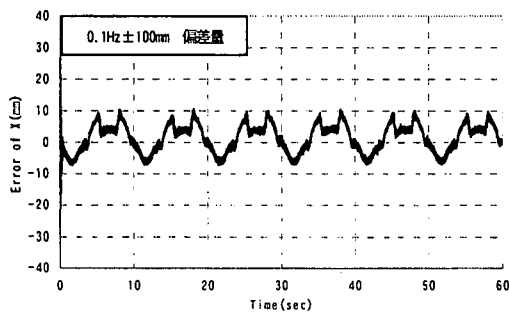


図8 条件①計測結果/角度計結果偏差量 (60sec)

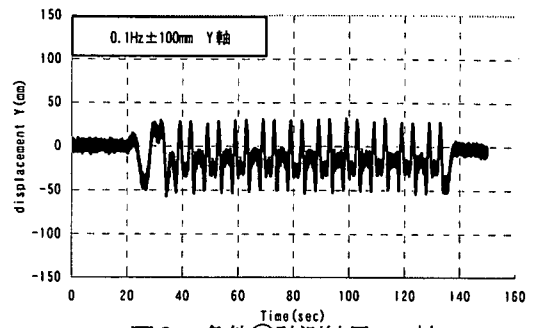


図9 条件①計測結果 y 軸

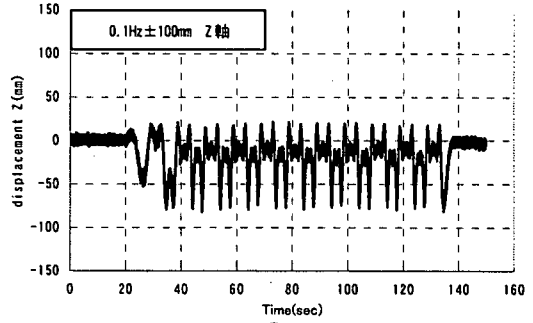


図10 条件①計測結果 z 軸

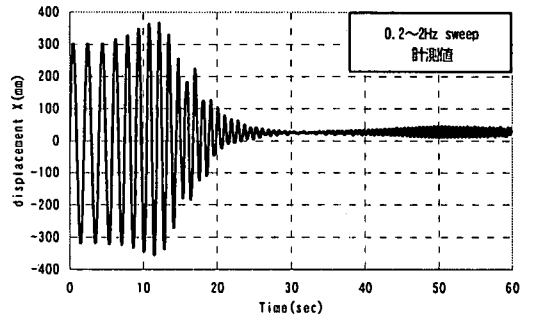


図11 条件②計測結果 (60sec) Tx2 x 軸

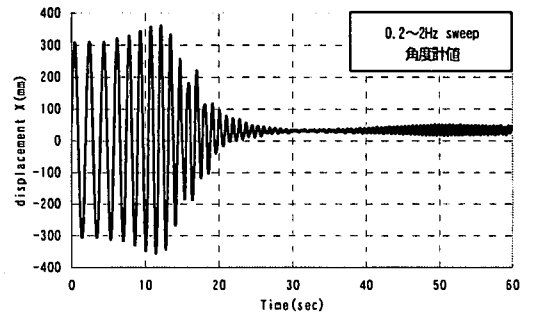


図12 条件②回転角度計結果 (60sec)

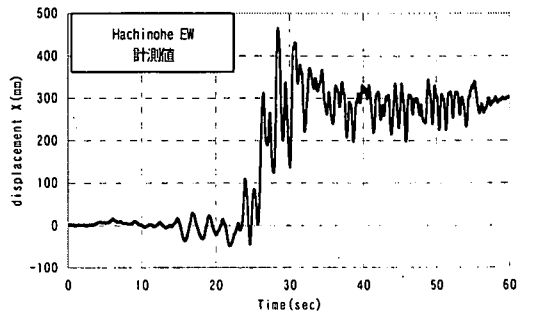


図13 条件③計測結果 (60sec) Tx2 x 軸

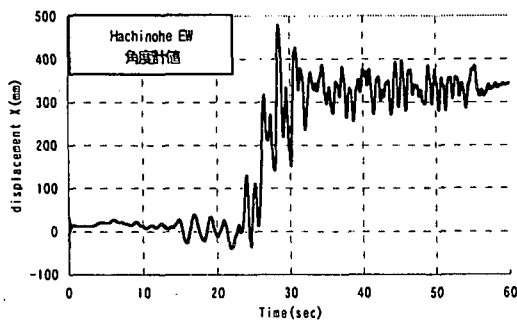


図 1.4 条件③回転角度計結果 (60sec)

表 5. 条件①: 0.1Hz±100mm of Tx2 (8 センサ)

	Axis-X [mm]	Axis-Y [mm]	Axis-Z [mm]
理論値	4.00	22.90	15.70
シミュレーション値	4.00	22.90	15.70
計測値偏差	4.62	23.19	27.81

GDOP=3.857 (Rx1~Rx8 の 8 センサ組合せ)

表 6. 条件①: 0.1Hz±100mm of Tx2 (4 センサ)

	Axis-X [mm]	Axis-Y [mm]	Axis-Z [mm]
理論値	6.50	56.90	41.80
シミュレーション値	6.50	57.00	41.70
計測値偏差	7.08	43.98	28.55

GDOP=10.090 (Rx1, 2, 3, 4 の 4 センサ組合せ)

5. まとめ

電波位相差を利用し複数点の変位を独立に計測する手法について、マルチパス波等の影響を低減することにより変位計測精度を向上させることを目的に、多数の冗長なセンサ数を用いる測位方式を検討した。計算機シミュレーション、および振動台における電波実験を実施した結果、多センサ測位方式による変位推定精度向上を確認した。

今後は、マルチパス波等の影響で一部のセンサに大きな位相誤差が加わった場合等の対策として、多センサ測位方式を更に、位相誤差の大きなセンサを排除して測位する方式等検討するとともに、実際の使用環境を想定したセンサ配置、計測周期等のシステム構成の検討・構築を行うことが課題である。

参考文献

- 1) 岡村 敦, 他 3 名: 多点震動変位の位相差による計測法, 電子情報通信学会技術報告 SANE2000-145, 2001-01.
- 2) 御子柴 正, 他 5 名: 変位計測手法の高度化に関する

既往の事例と今後の動向, 土木学会第 1 回構造物の破壊過程解明に基づく地震防災性向上に関するシンポジウム論文集, 2000-3.

- 3) 岡村 敦, 他 3 名: 電波位相差による多点震動変位計測法, 2000 年電子情報通信学会ソサエティ大会講演論文集, B-2-1, 2000-9
- 4) 御子柴 正, 他 3 名: 電波を用いた 3 次元大変位計測手法の開発 -特徴及び計測手法について-, 土木学会第 2 回構造物の破壊過程解明に基づく地震防災性向上に関するシンポジウム論文集, 2001-3.
- 5) 吉崎 互, 他 6 名: 電波を用いた 3 次元大変位計測手法の開発 -要素開発と振動実験への適応について-, 土木学会第 2 回構造物の破壊過程解明に基づく地震防災性向上に関するシンポジウム論文集, 2001-3.
- 6) A. Okamura, T. Mikoshiba, et al., Proc. A Multi-point Radio Displacement Measurement Method for Testing Quake-proof Structure of ASME PVPC, PVP-Vol. 445-1, pp.83-90, Aug.2002.
- 7) 吉崎 互, 他 5 名: 電波を利用した位相差大変位計測システムの実験検証, 土木学会第 57 回年次学術講演会 IV-279 (平成 14 年 9 月).