

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（その2）

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

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

² 独立行政法人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. In this facility, a measurement system, which can measure large scale displacements of multiple reference points on the test structure simultaneously, is required. We have proposed a remote 3-dimensional displacement measurement method, in which transmitters are attached on reference points and radio waves are received by sensors on fixed points. Measuring phase differences of radio waves between sensors, displacements of reference points can be determined. We have confirmed the principle of proposed method by some radio experiment, however, there were some cases in which measurement precision was degraded by multi-path fading. In this paper, we propose an improved measurement method that chooses sensors based on received signal power while using the redundant number of sensors to obtain multi-path tolerant capability. We will also report some new experimental results which show the proposed method has sub-centimeter measurement precision.

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

1. まえがき

耐震設計の向上を目的とした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められている。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¹⁾。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、試験体の複数計測点の動的変位、大変形を cm 以下の精度で三次元的に計測することが要求される。そ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)~3)}この計測方式は電波発信機を試験体の計測点に設置し、これら電波発信機からの電波を振動台周辺の固定ポイントに配置した三次元変位計測に必要な4個以上の受信センサで受信し、受信センサ間のキャリア位相差を計測することにより計測点の変位を算出するものである。

本研究第I期では要素技術開発、第II期では実用化に向けた開発を行い、電波実験により cm オーダーの精度にて変位計測が可能であること実証した。^{1)~6)}

しかしながらいくつかの電波実験の結果ではこの計測方式において、電波のマルチパスフェージング等により受信電力が低下した際に位相飛びが発生することがあり、課題となっている。

この課題に対して、今回実用化に向けた第II期開発のその2として、冗長性のあるセンサ数を用

いるとともに、受信電力に基づきセンサを選択する方式について検討を行った。本稿では、まず受信電力に基づきセンサを選択する多センサを用いた位相差測位方式について述べ、次に、中型三次元振動台を利用した電波を使用した振動実験の結果について報告する。

2. 変位計測方式の原理

2. 1 多センサ間位相差を用いた測位原理

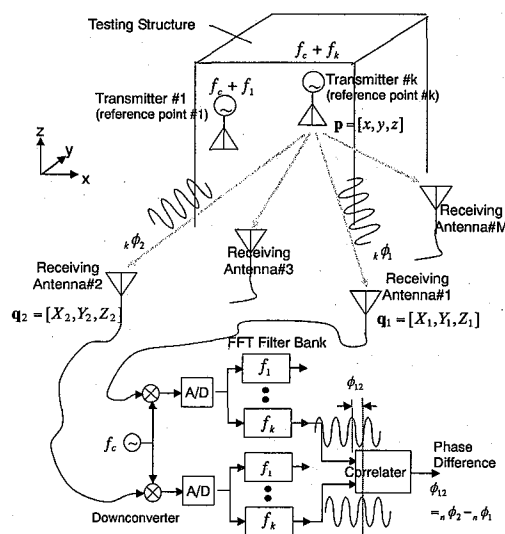


図-1 変位計測システムの基本構成

図-1 に振動変位計測系の基本構成を示す。各計測点に設置された電波発信機はそれぞれ異なる周波数を割り当て電波を送信する。それらの電波は振動台の外側の固定された場所に配置された少なくとも4個の受信センサで受信する。この時受信センサの初期位置は光学測量器のような測量機器を利用してあらかじめ計測を行う必要がある。

受信センサで受信された受信信号は、ダウンコンバータで局発信号と乗じられそれぞれ IF 信号に変換される。これらの受信信号は A/D 変換器でデジタル信号に変換された後、FFT (Fast Fourier Transform) 解析することにより、発信機毎の信号に弁別される。また FFT では発信機毎の受信位相も算出される。この計測方式の原理は双曲線法が基本となっており、発信機の三次元位置を決定するためには最低4個の受信センサが必要である。しかし4個より多くの受信センサを利用して最小二乗原理を利用して位置を算出することにより高い位置精度を得ることが可能であり、ここでは、センサ数 M が $M > 4$ の場合、すなわち冗長な観測系を考える。本方式の詳細は文献 [4] の通りであるが、ここではその概要について示す。

2つの受信センサの受信信号位相差は2つの受信センサ間の距離差に反映され、このとき受信センサ # m と # n の受信信号位相差は次の式で与えられる。

$$\phi_{mn} + 2\pi N_{mn} = \frac{2\pi}{\lambda} \left\{ \sqrt{(x - X_m)^2 + (y - Y_m)^2 + (z - Z_m)^2} - \sqrt{(x - X_n)^2 + (y - Y_n)^2 + (z - Z_n)^2} \right\} \quad (1)$$

ここで λ は電波の波長 (x, y, z) は求める発信機の位置を示す。(X_m, Y_m, Z_m) と (X_n, Y_n, Z_n) はそれぞれセンサ # m とセンサ # n の受信センサの位置座標、 ϕ_{mn} はセンサ # m とセンサ # n の位相差、 N_{mn} は位相アンビギュイティによる整数値バイアスを示す。

(X_m, Y_m, Z_m) と (X_n, Y_n, Z_n) は既知の値であり、 ϕ_{mn} は観測値である。整数値バイアス N_{mn} 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ため (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を求めて逐次近似法によって位置を推定する。従って式(1)は次式のように表される。

$$\Delta f = \frac{2\pi}{\lambda} \mathbf{A}(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}) \cdot \Delta \mathbf{p} \quad (2)$$

ここで、もし $M=4$ であれば行列 $\mathbf{A}(x, y, z)$ は3行3列の行列となり、次式のように解くことができる。

$$\Delta \mathbf{p} = \frac{\lambda}{2\pi} \mathbf{A}^{-1}(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}) \cdot \Delta f \quad \text{for } M=4 \quad (3)$$

$M > 4$ の場合では行列 $\mathbf{A}(x, y, z)$ は $[(M-1) \times 3]$ 次元長方形行列となり、最小二乗原理に則り、次式のように解くことができる。

$$\Delta \mathbf{p} = \frac{\lambda}{2\pi} \mathbf{A}^*(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}) \cdot \Delta f \quad \text{for } M > 4 \quad (4)$$

$\mathbf{A}^*$ は $\mathbf{A}$ の擬似逆行列であり、次式のようになる。

$$\mathbf{A}^* = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \quad (5)$$

以上のように算出した補正量 ($\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}$) を $\Delta \mathbf{p}$ に代入し、式 (8) , 式 (9) にて逐次計算を繰り返すことにより計測点の正確な位置を推定する。

また、測位誤差の大きさは次式のように見積られる。

$$\sigma_p = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2} = \frac{\lambda}{2\pi} \sqrt{\text{trace}[(\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1}]} \sigma_f \quad (6)$$

故に、受信センサが多数ある場合の GDOP (Geometrical Dilution of Precision : 幾何学的誤差増倍率) は次式で与えられる。

$$GDOP = \sqrt{\text{trace}[(\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1}]} \quad (7)$$

2. 2 受信電力による受信センサ選択方法

前節に記載したように受信センサ間位相差の整数値バイアスは位相アンビギュイティを追跡し続けなければならない。もし、計測中に整数値バイアスを失うとサイクルスリップと呼ばれる測位飛びが発生することとなる。

サイクルスリップはしばしばマルチパス波によるフェージングによって発生していると推測される。図-2に受信センサで受信した受信電力とサイクルスリップの関係について示す。図-2が示すようにサイクルスリップは受信電力が急激に減少した時に同期して発生しており、測位精度の激しい悪化は、そのような実環境下におけるサイクルスリップによって引き起こされていることがわかる。

このサイクルスリップを抑制するためには、受信電力の変化が非常に大きな受信センサは測位演算から除外することが非常に有効である。この際、受信電力図を確認して操作員が手動で受信センサを選択し、良好な測位結果を得る方法もあるが、通常受信センサの選択は計測時間を通しての平均受信電力の偏差から自動的に実行されるのが望ましい。例えば、荷重行列 $\mathbf{W}$ を式(2)の両辺にかけることによって実現できる。

$$\mathbf{W} \cdot \Delta f = \frac{2\pi}{\lambda} \mathbf{W} \cdot \mathbf{A}(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}) \cdot \Delta \mathbf{p} \quad (8)$$

ここで $\mathbf{W}$ は $[M-1 \times M-1]$ の対象行列でそれらの要素は

次式で示される。

$$w(n,m) = \begin{cases} 1 & \text{when } n = m \text{ and } \frac{\min[P_n]}{\text{ave}[P_n]} > \text{Thres.} \\ & \text{and } \frac{\min[P_{n+1}]}{\text{ave}[P_{n+1}]} > \text{Thres.} \\ 0 & \text{others.} \end{cases} \quad (9)$$

P_n は受信センサ# n の受信電力， Thres. はセンサを選択するための最小電力と平均電力の比のしきい値， $\min[\]$ は計測期間中での最小受信電力値，そして $\text{ave}[\]$ は計測期間における平均受信電力を示す。

サイクルスリップは受信電力の急激な低下に同期していることから，受信電力の最小値は統計的偏差や受信電力の最大値よりも重要視しなければならない。

発信機の位置は式(3)，(4)のかわりに次式の方程式を当てはめることにより求められる。

$$\Delta p = \frac{\lambda}{2\pi} (A^T \cdot W \cdot A)^{-1} A^T W \cdot \Delta f \quad (10)$$

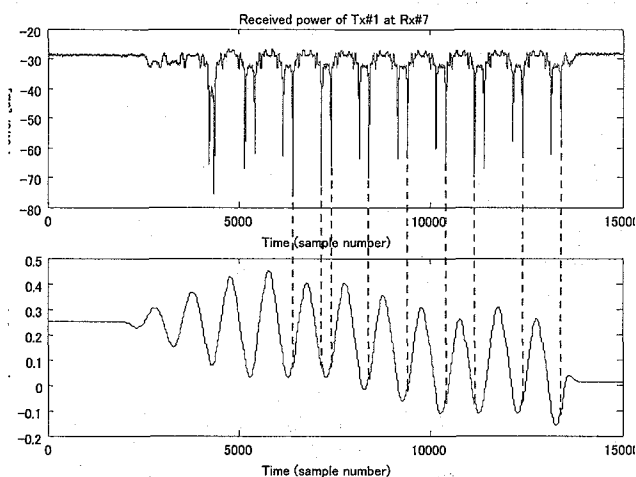


図-2 受信電力低下に同期したサイクルスリップ
上：受信電力，下：位置結果

3. 中型三次元振動台における電波実験

検証実験はこの計測システムの性能評価のため中型三次元振動台を利用して実施した。この実験では振動台上に設置された試験体に7台の発信機を設置した。試験体は鉄骨であり，非常に強固な構造であることから振動台の変位から発信機の真値を見積もることとした。受信センサは16台用意し，そのうち11台は実験施設の壁面に設置し，5台を振動台の外側に配置した三脚に取り付けた。発信機と受信センサの初期位置を表-1に示し，発信機と受信センサ配置を図-3に示す。図-4はその

時の実験全景である。計測に使用する電波はISM帯(2.44GHz，波長12.3cm)を選択した。発信機毎の周波数の割り付けを表-2に示す。

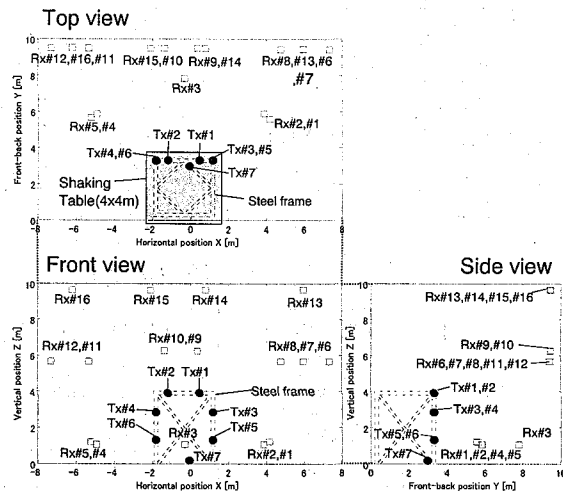


図-3 発信機，受信センサ配置図

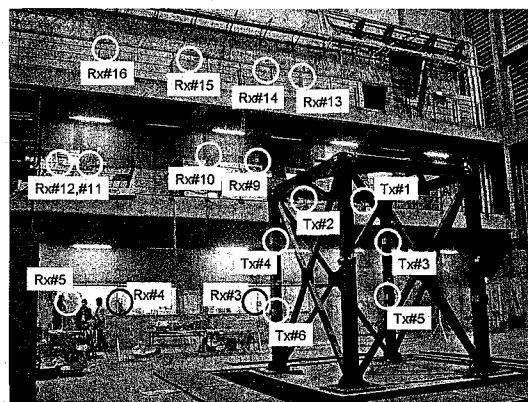


図-4 実験全景

表-1 発信機，受信センサの初期位置座標

Transmitter and Sensor	X-position [m]	Y-position [m]	Z-position [m]
Tx#1	0.4863	3.3084	3.9007
Tx#2	-1.1766	3.3089	3.9003
Tx#3	1.1768	3.3005	2.8625
Tx#4	-1.8086	3.2983	2.8348
Tx#5	1.1770	3.3078	1.3285
Tx#6	-1.8076	3.3053	1.3160
Tx#7	-0.0659	2.9774	0.1870
Rx#1	4.1759	5.5791	1.2020
Rx#2	3.8955	5.8970	1.0380
Rx#3	-0.2875	7.8191	1.0490
Rx#4	-4.9252	5.8510	1.0600
Rx#5	-5.2123	5.6419	1.1680

Rx#6	7.3343	9.4253	5.6570
Rx#7	5.9859	9.4247	5.6480
Rx#8	4.7967	9.4323	5.6480
Rx#9	0.3890	9.4973	6.2310
Rx#10	-1.3622	9.4674	6.2500
Rx#11	-5.3288	9.4918	5.6500
Rx#12	-7.2713	9.4935	5.6620
Rx#13	5.9777	9.4569	9.6440
Rx#14	0.8165	9.4710	9.6180
Rx#15	-2.0730	9.4845	9.6220
Rx#16	-6.1795	9.5132	9.6160

表-2 発信機の周波数割り当て

Transmitter #	Frequency [MHz]
Tx#1	2440.000
Tx#2	2439.863
Tx#3	2440.137
Tx#4	2439.375
Tx#5	2440.625
Tx#6	2439.004
Tx#7	2440.996

振動台の加振条件は振動周期 0.5Hz, 角度振幅 ± 2.8 度の X 軸回転と振動周波数 0.55Hz, 角度振幅 ± 2.8 度の Z 軸回転の組み合わせで設定した。すべての発信機は3次元に変位をすることとなる。サンプリング周期は 5msec で計測時間は 50sec である。

受信センサ選択のしきい値は、各受信センサが受信した最小電力と計測時間中の平均受信電力との差を-20dB に設定し、この条件に当てはまる受信センサは測位計算から除外した。ほとんどのケースではすべてのセンサを使用して測位計算が実施されたが、発信機5と7のケースでいくつかの受信センサが受信センサ選択アルゴリズムによって除外された。

図-5, 6, 7 にすべての受信センサを使用した時の発信機5の X 軸, Y 軸, Z 軸の計測結果を、また、図-8, 9, 10 に受信センサ4と5を測位計算から除外した計測結果を示す。

この図において実線は電波法によって測位した計測結果を、また、点線は発信機が振動台に強固に固定されていると仮定した場合の振動台の変位から補正して導き出した計算結果である。

図が示すように、受信センサ選択無しの場合ではサイクルスリップが発生しているが、提案の受信センサ選択方式を適用した結果ではサイクルスリップの発生を防止できている。

電波法の計測結果と振動台の変位から計算した発信機の位置の偏差の二乗平均値を表-3に示す。全ての結果において二乗平均偏差はおおよそX軸で5mm, Y軸で15mm, Z軸で13mmであった。これら全ての誤差が計測誤差によるものであるかは更なる検

証が必要であるが、それを考慮した上でもこのシステムの計測精度は向上し有効な手段と考えられる。更に、本計測法により計測した兵庫県南部地震での神戸海洋気象台観測波とJR鷹取駅観測波の発信機1のX軸, Y軸, Z軸の加振結果を図11~16に示し、各計測点の二乗平均値偏差を表-4, 5に示す。これらの計測結果でも各軸において、cmからmmオーダーの計測精度を実現していることが検証された。

表-3 電波による計測値と振動台の変位から補正した変位値との偏差の二乗平均値

Transmitter	Unused sensors	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	Total [mm]
Tx#1	--	5.46	7.72	8.21	12.52
Tx#2	--	6.39	10.16	11.85	16.87
Tx#3	--	5.60	22.15	9.66	24.80
Tx#4	--	5.37	14.28	11.40	19.05
Tx#5	--	19.50	99.53	22.78	103.95
Tx#5	#4, #5	4.42	17.98	13.98	23.20
Tx#6		4.93	17.52	18.26	25.78
Tx#7		3.57	10.47	19.18	22.14
Tx#7	#16	3.59	10.25	13.71	17.50

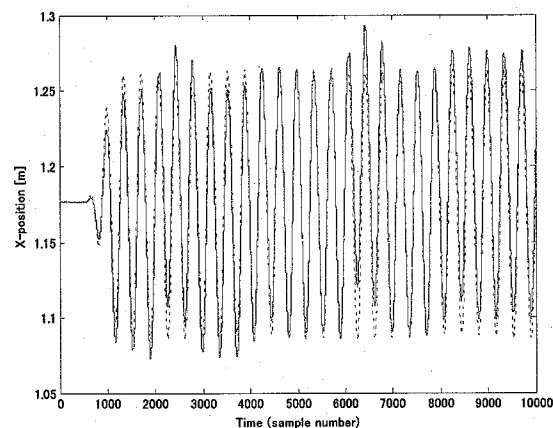


図-5 従来法でのTx#5のX軸の計測結果
実線：電波法、点線：振動台変位

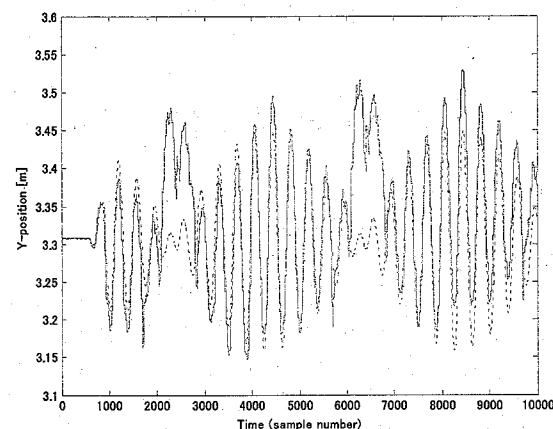


図-6 従来法でのTx#5のY軸の計測結果
実線：電波法、点線：振動台変位

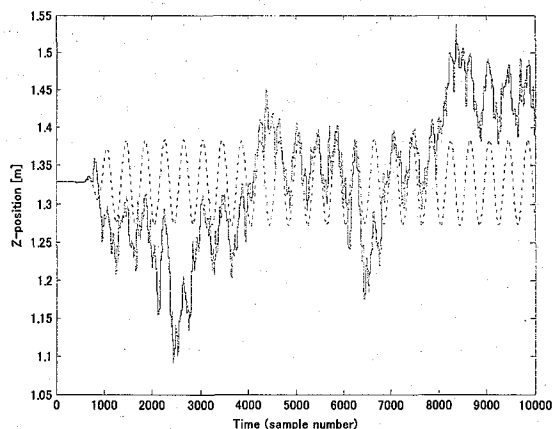


図-7 従来法でのTx#5のZ軸の計測結果
実線：電波法，点線：振動台変位

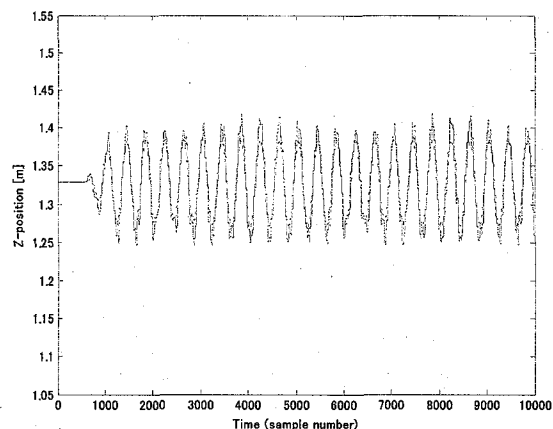


図-10 センサ選択法でのTx#5のZ軸の計測結果
実線：電波法，点線：振動台変位

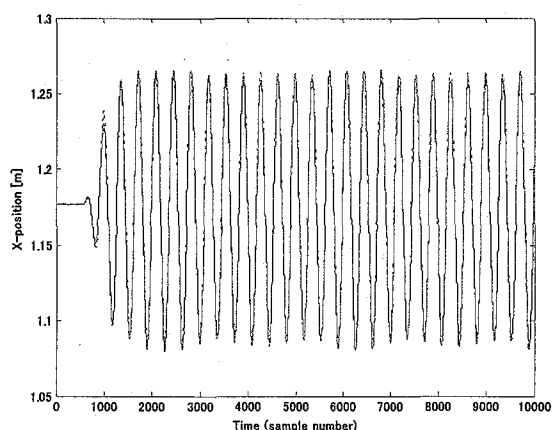


図-8 センサ選択法でのTx#5のX軸の計測結果
実線：電波法，点線：振動台変位

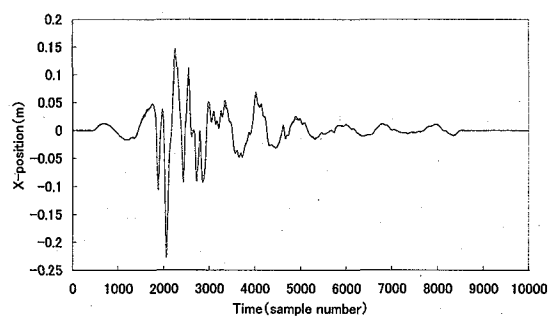


図-11 JMA神戸地震波のTx#1のX軸の計測結果
実線：電波法，点線：振動台変位

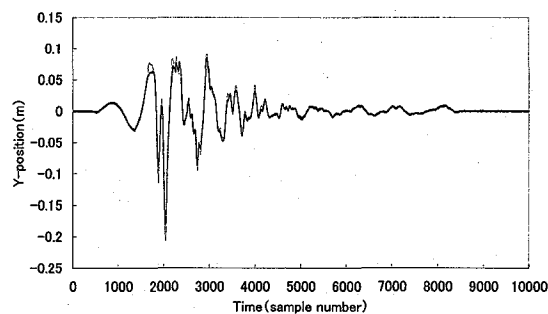


図-12 JMA神戸地震波のTx#1のY軸の計測結果
実線：電波法，点線：振動台変位

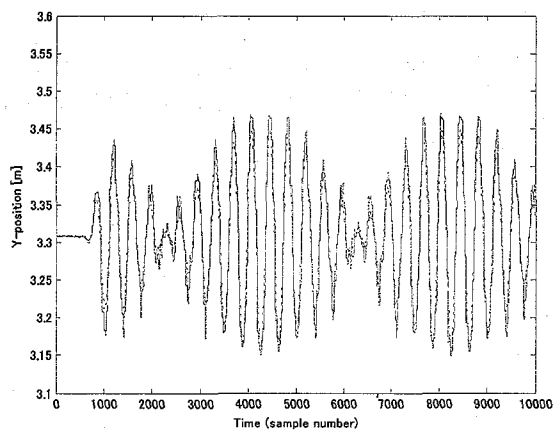


図-9 センサ選択法でのTx#5のX軸の計測結果
実線：電波法，点線：振動台変位

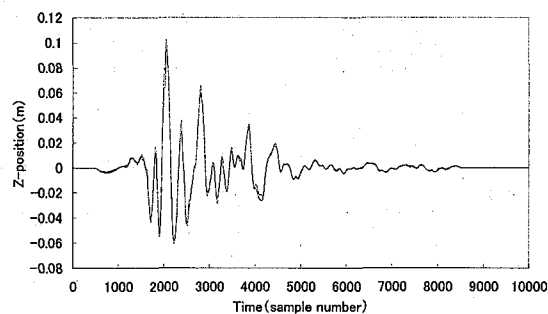


図-13 JMA神戸地震波のTx#1のZ軸の計測結果
実線：電波法，点線：振動台変位

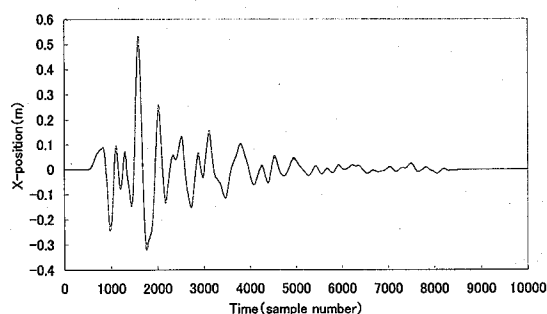


図-14 JR鷹取駅地震波のTx#1のX軸の計測結果
実線：電波法，点線：振動台変位

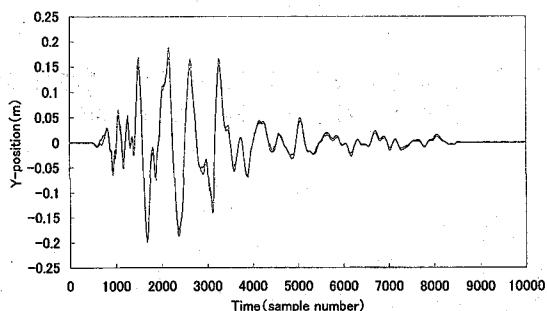


図-15 JR鷹取駅地震波のTx#1のY軸の計測結果
実線：電波法，点線：振動台変位

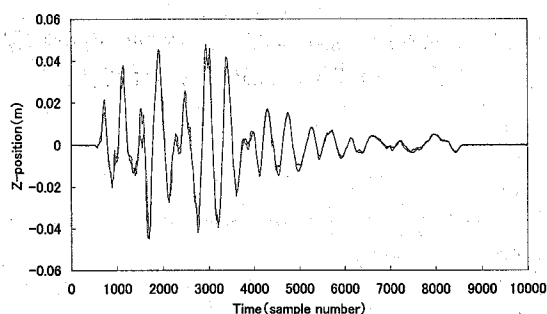


図-16 JR鷹取駅地震波のTx#1のZ軸の計測結果
実線：電波法，点線：振動台変位

表-4 JMA神戸観測波とJR鷹取駅観測波の電波による計測値と振動台の変位から補正した変位値との偏差の二乗平均値

	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	Total [mm]
JMA	3.76	4.90	5.86	8.52
JR	6.18	6.11	6.84	11.06

4. まとめ

地震による構造物の破壊過程解明のために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、冗長な数のセンサを用いるとともに、

受信電力によりセンサを選択する測位方式を検討した。中型三次元振動台における多軸回転加振、実地震波加振の電波実験を実施した結果、計測点の三次元変位計測が可能であり、受信センサの受信電力値の急激な低下によって発生するものと推定される測位飛びを抑制し、変位推定誤差をcmからmmオーダーに低減出来ることを確認した。また強震動のような加速度の大きな振動に対しても計測可能であり、実用性能を有していることも実証した。今後は、更なる精度向上のために、受信センサを選択する際のしきい値の最適化や、実際の使用環境を再現したシミュレーションを実施することにより、最適な受信センサ数や配置を検討していくことが課題である。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 吉崎 互，他6名：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，土木学会第4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，2003-3.
- 5) 茂木 篤志，他4名：電波位相差測位法による動的変位計測の高度化に向けての実験検証，土木学会第58回年次学術講演会 IV-247，2003-9.
- 6) 御子柴 正，他5名：電波を利用した位相差測位法による動的変位計測システムの実用化検証，土木学会第27回地震工学研究発表会 IV-279，2003-12.