

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—

¹吉崎 互, ²御子柴正, ³岡村 敦, ⁴関口高志, ⁵菊地 宏, ⁶永井英樹, ⁷茂木篤志

^{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文部科学省防災科学技術研究所 (〒305-0006 茨城県つくば市天王台 3-1)

The full-scale earthquake experiment facility testing the quake-proof structure is under construction. In that experiment, large displacements of multiple reference points, with which the entire structure wall is covered, should be simultaneously measured with high accuracy. formerly, it is proposed that measurement system consists of simple transmitters at reference points and several receiving antennas set up in different places. We experiment the measuring phase-difference with tools set up on a same-plane in Anechoic-Chamber. In this report, we show experimental result of which transmitter locations are calculated by phase-differences measuring algorithm on the same-plane.

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

1. まえがき

ビルなどの構造物等の耐震性向上を目的とした実大三次元震動破壊実験装置の建設が進められている。この震動破壊実験装置では構造物等到大振幅の振動を与え応答を計測することから、構造物壁面全体を覆う複数の計測点の動的変位を同時かつ高精度に遠隔測定することが求められる。そこで、それに対する計測システムとして、各計測点に電波発信機を設置し、複数のセンサで受信された信号から、帯域フィルタで各発信機からの受信信号を弁別して受信アンテナ間の位相差計測することにより、各計測点の絶対変位をそれぞれ独立かつ同時に計測する測位方式^{1), 3), 4)}が提案された。この測位方式を計算機シミュレーションにて評価した結果、4センサを距離15m程度の間隔で配置し、周波数2.5GHzの電波を用い、位相観測誤差が15degmsの場合、変位計測誤差は約5~13mmであると報告されている¹⁾。

本報告では、計測点(発信点)に対して受信点は3センサの受信信号間位相差を計測する二次元に配置された実験システムを用いた。電波暗室にて電波伝搬実験を行い取得した観測データから2次元の位相差測位アルゴリズムにより計測点の位置を推定した結果を示す。さらに、受信機配列によるGDOP(幾何学的誤差増倍率)と測位精度についての関係についても示す。

2. 位相差を用いた測位の原理

位相差を用いた測位原理は、文献1)~4)により報告されている。図-1に電波の位相差を利用した震動変位計測系の基本構成を示す。

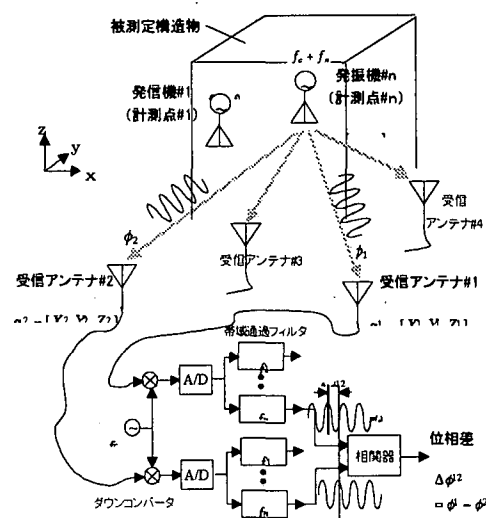


図-1 震動変位計測系の基本構成

第 n 計測点の電波発信機から放射された電波 $s(t) = \exp[j2\pi(f_c + f_n)t]$ は、各受信アンテナで受信される。受信アンテナ1, 2の受信信号は、

$$r_{n,1}(t) = s(t) \exp[j\phi_1] \quad (1)$$

$$r_{n,2}(t) = s(t) \exp[j\phi_2] \quad (2)$$

で与えられ、 ϕ_1 、 ϕ_2 は各受信アンテナにおける受信信号の位相である。

アンテナ 1 受信信号とアンテナ 2 受信信号の位相差は $\Delta\phi_3 = \phi_1 - \phi_3$ で表される。

計測点の電波を 4 台の受信アンテナで受信した各々の受信信号位相を計測し、各アンテナ間の位相差を求めることで距離差を算出する。

計測点の位置 $p = [x, y, z]$ 受信アンテナの位置を

$$q_i = [X_i, Y_i, Z_i]$$

(i は受信アンテナ番号を示す。 $i=1, 2, 3, \dots$)

とした場合、計測点の位置 $p = [x, y, z]^T$ に関する方程式は、次のように与えられる。

$$\begin{aligned} & \sqrt{(x - X_i)^2 + (y - Y_i)^2 + (z - Z_i)^2} \\ & - \sqrt{(x - X_j)^2 + (y - Y_j)^2 + (z - Z_j)^2} = \Delta r_{ij} \end{aligned} \quad (i=1; j=2,3,4) \quad (3)$$

ここに、 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し、次式により与えられる観測値である。

$$\Delta r_{ij} = \frac{\lambda}{2\pi} (\Delta\phi_{ij} + 2\pi N_{ij}) \quad (4)$$

なお、 N_{ij} は電波の経路差の整数値バイアスであり、既知または推定できる値である。

なお、 $i=1, j=2$ についての式(3)を満足する $[x, y, z]$ は、図-2 に示すような放物面で表される位相差 $\Delta\phi_2$ の等位相差面上にあることになる。計測点の位置は、別の受信アンテナの組み合わせから得られる等位相差面との交点から推定されるものと考えることができる。

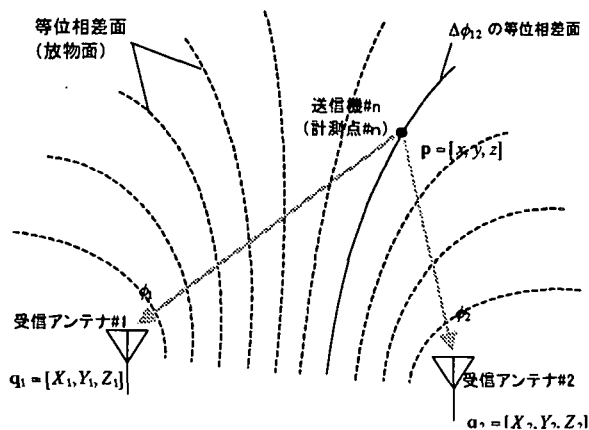


図-2 等位相差面の一例

3. 電波伝搬実験の概要

本電波実験では、送信点から発信した電波（発信点周波数 $f = 2450\text{MHz}$ （波長 $\lambda = 0.1224\text{m}$ ））を受信点センサで受信し、観測周波数 10.7MHz にダウンコンバートした受信信号をオシロスコープに入力し、信号波形の目視比較で各々のセンサ受信信号の位相差を測定した。

図-3 に実験に用いた計測点（送信機）とセンサ（受信アンテナ）の幾何学的配置及び座標系を示し、図-4 に実験における系統図を示す。また、図-5 にオシロスコープでの計測画面を図-6, 7 に、実験装置、実験風景を示す。

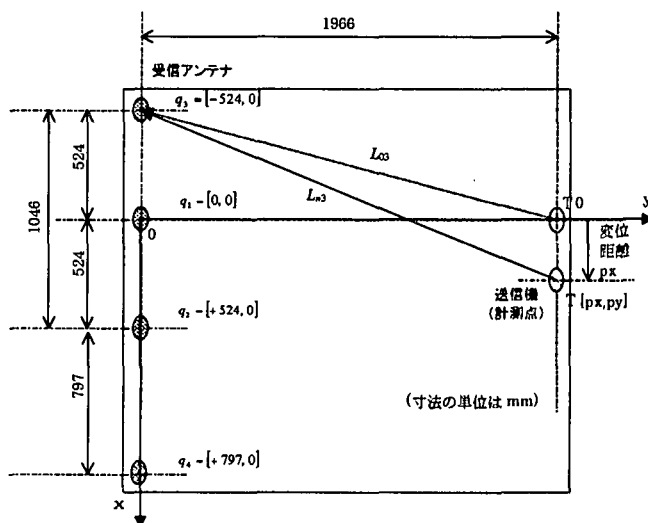


図-3 電波実験における送信機と受信アンテナの配置

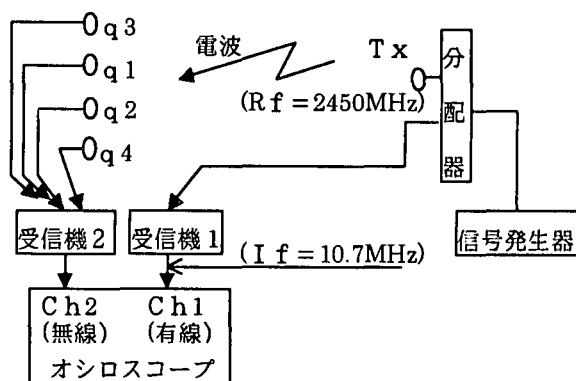


図-4 電波実験における系統

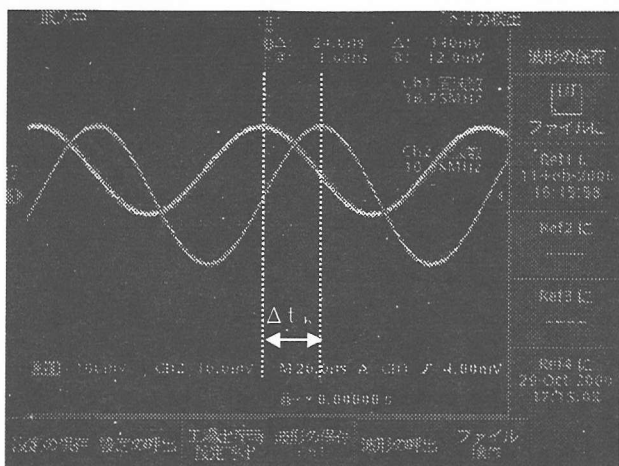


図-5 オシロスコープでの測定画面

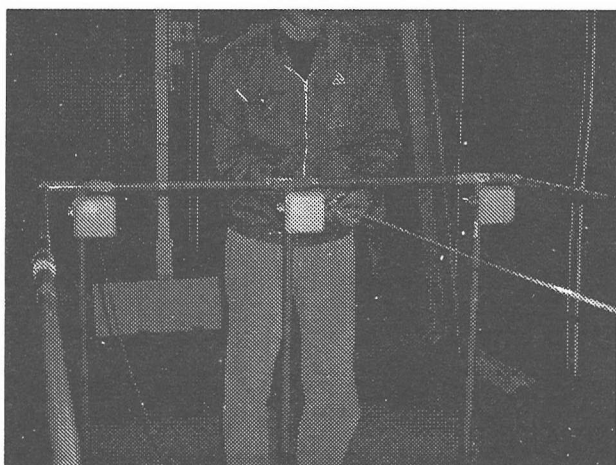


図-6 実験装置，実験風景（1）

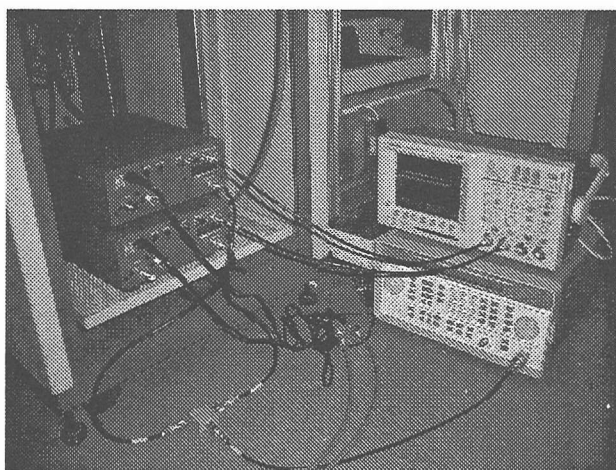


図-7 実験装置, 実験風景 (2)

送信機位置（計測点位置）の z 軸（高さ）方向の値は既知とし、送信機からの電波は4カ所（測位データには3箇所のデータを使用）の受信アンテナで受信されそれぞれの位相値を取得した。送信アンテナと各受信アンテナは同位置

のXY平面上に存在する.

送信機は、図-3 に示すように、 $y = +1966\text{mm}$ の直線上に X 軸方向に沿って移動させ、センサで受信した電波の位相と送信機から有線で分岐した信号の位相とをオシロスコープ上で目視により比較することで測定した。ただし、観測位相値は 4 台の受信アンテナで同時に計測されていないため位相基準が同一ではない。そこで、送信機が既知の基準位置（図-4 の $T_0 = [0, +1966]$ ）における位相値からの相対位相値 $\delta\phi_j$ を用いて、観測位相値 ϕ_j を得た。基準位置 T_0 から第 j 受信アンテナまでの距離を L_{0j} とするとき、観測位相値 ϕ_j は次式で算出した。

$$\phi_j = 2\pi L_{0j} / \lambda + \delta\phi_j \quad (5)$$

ここで、 λ は電波の波長、 L_{0j} はT0から第j受信アンテナまでの距離で既知の値である。例えば L_{03} は $\sqrt{524^2 + 1966^2}$ と求められる。各受信系に存在する透過位相誤差(ケーブルや受信機を含めた各受信系固有の位相遅延による誤差)は相対位相値 $\delta\phi_j$ を用いることによりキャンセルされている。

測定は、各受信点（センサ）について5回測定を行いその平均値を位相差として測位計算を行った。オシロスコープ上で測定した位相差は時間量であるため 2450MHz の相対位相差 $\delta \phi_j$ (deg) は次により求めた。なお、表-1 に測定した観測位相値を示す。

$$\delta\phi_i(\text{deg}) = \Delta t_b \times \text{If} \times 360^\circ \quad (6)$$

$$\delta\phi_i(\text{deg}) = \delta\phi_{i^*}(\text{deg})$$

$\delta\phi_i$: 10.7MHz 変化量 (deg)

$\delta\phi_i$: 2450MHz変化量 (deg)

If $\omega = 10.7 \text{ MHz}$

Δt_b : オシロスコープ上で測定した位相差 (nsec)

表-1 測定した位相値

TX変位 (m)		観測位相値 (deg)			
p x	p y	q 1	q 2	q 3	q 4
-0.300	1.9660	75.5	156.8	86.9	317.2
-0.250	1.9660	60.1	97.9	88.4	222.1
-0.200	1.9660	41.6	44.3	108.5	106.9
-0.150	1.9660	28.5	338.1	143.9	19.5
-0.100	1.9660	16.2	296.8	171.6	293.9
-0.050	1.9660	6.9	250.6	190.1	210.7
0.000	1.9660	20.0	221.7	221.7	123.7
0.050	1.9660	17.0	177.8	277.2	38.6
0.100	1.9660	13.1	143.5	331.5	334.2
0.150	1.9660	27.0	126.2	18.1	256.0
0.200	1.9660	35.4	94.2	55.9	185.9
0.250	1.9660	57.0	75.7	115.6	115.8
0.300	1.9660	78.6	60.7	167.6	42.6

4. 今回用いた測位計算の方法

2項の位相差を用いた測位の原理で提案されている測位原理は3次元での測位法であるが、この電波実験では、送信アンテナ位置のz軸値は既知であり、送信アンテナと各受信アンテナは同一のXY平面上に存在する。そのため、この位相差測位法では、送信機位置は3センサにおける受信信号の観測位相値 ϕ_j により求められる次の2方程式の解 $[x, y]$ から決定する。

$$\sqrt{(x-X_i)^2+(y-Y_i)^2} - \sqrt{(x-X_j)^2+(y-Y_j)^2} = \Delta r_{ij} \quad (i=1; j=2,3) \quad (7)$$

$$\Delta r_{ij} = \frac{\lambda}{2\pi} (\Delta \phi_{ij} + 2\pi N_{ij}) \quad (8)$$

なお、 $[X_j, Y_j]$ は第j受信アンテナの座標である。ここでは整数値バイアス N_{ij} は正確に推定できたものとした。

これらの方程式は非線形であるため、上記方程式では線形近似法を用いて逐次的に解く方法₁₎を用いる。但し、修正量の大きさから逐次計算の収束判定を行うかわりに、単純に逐次計算の繰り返し回数が15回となった時点で計算をうち切るようにした。

$[x, y]$ を近似値 $[\hat{x}, \hat{y}]$ 周りに展開し観測値の距離差 Δr_{ij} と近似距離差 $\Delta \hat{r}_{ij}$ との差 δr を求め $\partial f_{ij}(\hat{x}, \hat{y}) / \partial x$, 等より補正值 $[\delta x, \delta y]$ を求め δp が十分に小さくなるまで繰り返し $[\hat{x}, \hat{y}]$ を推定する。

$$x = \hat{x} + \delta x, y = \hat{y} + \delta y \quad (9)$$

$$\begin{aligned} f_{ij}(x, y) &= f_{ij}(\hat{x} + \delta x, \hat{y} + \delta y) \\ &= f_{ij}(\hat{x}, \hat{y}) + \frac{\partial f_{ij}(\hat{x}, \hat{y})}{\partial x} \delta x + \frac{\partial f_{ij}(\hat{x}, \hat{y})}{\partial y} \delta y \end{aligned} \quad (10)$$

$$\hat{A} \delta p = \delta r, \quad (11)$$

$$\hat{A} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_{12}(\hat{x}, \hat{y})}{\partial x} & \frac{\partial f_{12}(\hat{x}, \hat{y})}{\partial y} \\ \frac{\partial f_{13}(\hat{x}, \hat{y})}{\partial x} & \frac{\partial f_{13}(\hat{x}, \hat{y})}{\partial y} \end{bmatrix}, \quad (12)$$

$$\delta p = [\delta x, \delta y]^T, \quad (13)$$

$$\delta r = \begin{bmatrix} f_{12}(x, y) - f_{12}(\hat{x}, \hat{y}) \\ f_{13}(x, y) - f_{13}(\hat{x}, \hat{y}) \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} f_{ij}(\hat{x}, \hat{y}) &= \sqrt{(\hat{x}-X_i)^2+(y-Y_i)^2} - \sqrt{(x-X_j)^2+(y-Y_j)^2} \\ &\equiv \Delta \hat{r}_{ij} \end{aligned} \quad (15)$$

$$\frac{\partial f_{ij}(\hat{x}, \hat{y})}{\partial x} = \frac{2(\hat{x}-X_i)}{\sqrt{(\hat{x}-X_i)^2+(y-Y_i)^2}} - \frac{2(\hat{x}-X_j)}{\sqrt{(\hat{x}-X_j)^2+(y-Y_j)^2}} \quad (16)$$

逐次計算における送信機の初期位置は真値よりx軸方向に-415mm, y軸方向に+570mmずれた位置に設定したが、収束後の推定結果は初期位置にほとんど依存しなかった。また、逐次計算の繰り返し回数は数回程度で解は十分収束した。

5. 測位結果

図-8にq1, q2, q3受信点配置, q1, q3, q4受信点配置及びq2, q3, q4受信点配置の組合せによる位相差から求めた各々の送信機位置推定結果を示す。各図の距離の単位はmである。図中、比較のために送信機真位置を○で示してある。q2, q3, q4受信点配置での測位結果の位置誤差二乗平均値は約61mmであった。また図-8から確認できるように受信機の幾何学的配置条件に大きく影響を受けているので配置条件により精度は向上する。x軸方向及びy軸方向の推定値誤差をそれぞれ図-9, 図-10に示す。x軸方向, y軸方向の推定値二乗平均誤差はそれぞれ,

$$q1, q2, q3 : 20.8\text{mm}, 174.5\text{mm}$$

$$q1, q3, q4 : 23.7\text{mm}, 104.0\text{mm}$$

q2, q3, q4 : 14.6mm, 59.4mm

であった。

この実験では受信機配列によるGDOP (Geometrical Dilution Of Precision=幾何学的誤差増倍率)¹⁾は, q1, q2, q3 の組み合わせで10~11程度, q2, q3, q4 の組み合わせで4~5程度でありGDOP値が半分になれば測位精度は概ね2倍向上した。このことから, 文献¹⁾のシミュレーション結果のように測位精度はGDOP値に比例することが検証された。

また, q2, q3, q4 の組み合わせにおいて, 位置の非対称性から送信機が右側の方では若干GDOP値が良いためその分精度が良い結果であった。

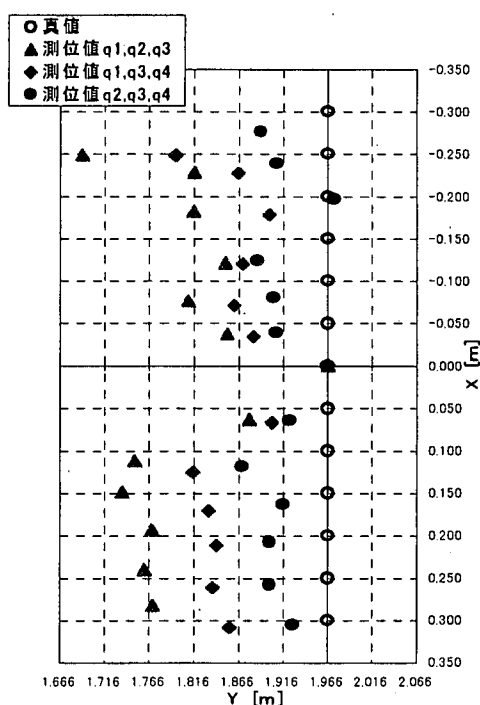


図-8 2次元測位結果

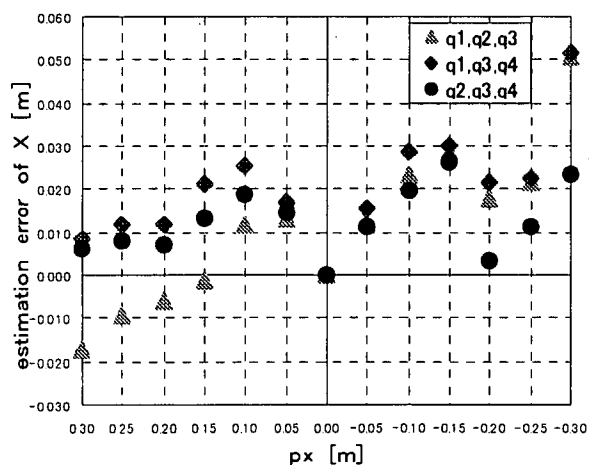


図-9 測定値 X軸方向の推定誤差

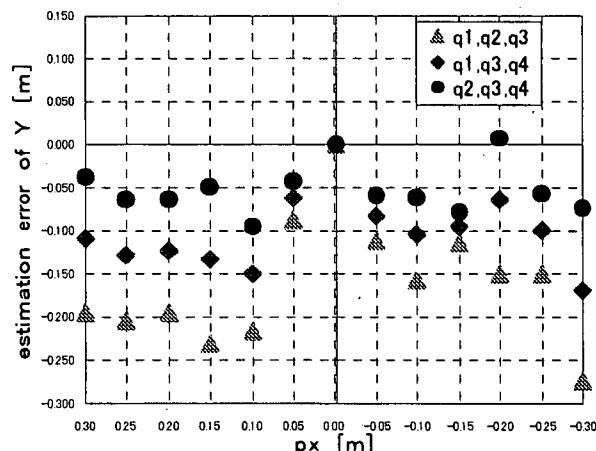


図-10 測定値 Y軸方向の推定誤差

6. まとめ

電波暗室内における実験で取得した受信信号位相観測データを用い, 2次元の位相差測位アルゴリズムにより送信機位置を推定した結果を示した。その結果, GDOP (幾何学的誤差増倍率) 値約5程度の受信アンテナ配置で測位誤差二乗平均値はx軸方向14.6mm, y軸59.4mmであった。しかも誤差数mmのサンプルも見られ, 電波による位相差測位法の原理が実験により検証された。

この実験は電波を用いた大変位計測の要素開発であり, 基礎データを確実に蓄積するため電波暗室内で行われた。実際の使用環境では反射波によるマルチパスが計測系に影響を与えることが考えられる。この影響の解析, 実験的検証が必要である。計測精度は, 受信アンテナ配置をシミュレーション及び実験により最適化し今回の実験におけるGDOP 5程度から1に近づけることにより精度改善が図れる見込みである。またアンテナ位相パターンの補正による計測位相精度の向上がさらに期待できる。この電波を用いた計測法は主眼とする三次元大変位計測の有力な手法であると結論できる。

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) 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. (投稿予定)
- 4) 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