

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—

○御子柴正¹・吉崎 互²，岡村 敦³，関口高志⁴，菊地 宏⁵

¹ 防災科学技術研究所防災総合研究部 (〒305-0006 茨城県つくば市天王台 3-1)

²⁻⁵ 三菱電機株式会社 (〒661-8661 兵庫県尼崎市塚口本町 8-1-1)

The 3-D full-scale earthquake testing facility is under construction, and it will be completed in 2005. The fracture experiments of the structure are carried out using 3-D large shaking table. In the collapse test, it is necessary to measure the large dynamic displacement or deformation. Therefore, it is necessary to develop the dynamic large displacement measurement system. We are making technology survey on the displacement measurement, which applies the GPS technology. As the principle, displacement magnitude is measured by the position measurement with radio wave technology applied.

Key Words: Large Dynamic Displacement, Phase Difference, 3-D Full Scale Earthquake Testing Facility, GPS System

1. 緒言

実大構造物の動的破壊過程を解明するための実験施設である、実大三次元震動破壊実験施設の建設が進められている。この三次元震動台は、実大構造物の破壊過程を解明するための破壊実験を行う。そのため、破壊時における実大構造物の動的変形量を的確に捉えるために、動的変位計測の整備が必要不可欠である。しかし、建設される実験施設や試験構造物が巨大になり、既存のセンサーのみを用いて三次元震動時の動的変位を計測することは困難と考えられる。従って、既存センサーの高度化または新方式センサーの開発が必要である。

本研究では、画像処理手法を利用した動的変位計測システムの高度化及びGPS (Global Positioning System) 技術を応用した電波利用による動的変位計測システムの提案を行っている。これらはどれも非接触型三次元大変位計である。画像処理手法を利用した動的変位計測システムの高度化では、一般に動的画像解析^{1) - 6)}に使われているNTSC方式のビデオ信号(1フレーム 1/30 秒のサンプリング)よりも高速サンプリングのカメラ等を用いることにより最大200Hz、更に、画像処理技術の高度化により3次元ともに同精度となる動的変位計測を目指している。また、電波利用による動的変位計測システムの提案では、100~200Hzの高速サンプリング、3次元多地点計測においても全

計測点が同精度となる動的変位計測を目指している。

本稿は、電波利用による動的変位計測開発における中間報告であり、主な内容は次の3章から成っている。すなわち、第2章では電波利用による手法の特徴等を画像処理手法と対比して示し、第3章では原理について述べ、更に第4章では開発の現状について述べる。

2. 電波利用による動的変位計測法の特徴

実大三次元震動破壊実験施設では、鉄筋コンクリート建物、橋梁、地盤モデル等の実大規模の試験体による破壊過程解明や耐震技術の検証等を行う。そのため、試験体の挙動を詳細に把握するために動的変位計測を行う必要がある。本研究では、三次元施設での震動実験を対象とした画像処理手法及び電波利用の動的変位計測システムの高度化・提案を行っている。表1に電波利用及び画像処理手法について主な特徴を示す。

画像処理手法を利用した動的変位計測システムの高度化では、ビデオ画像の解析処理から変位を求める方法である。計測対象とする画像を一旦録画してから画像処理を行う方法が一般的であり、本画像処理手法も同手法である。計測対象とする動画を録画するため、実験時には気づかなかった事象等データ

処理を行っている時に発見する可能性があり、また、繰り返し画像処理を行えることから、再確認することにより良質なデータが得られる。測定範囲として試験体全体（精度は良くない）からズームアップした計測点（精度良好）まで計測可能な汎用性を持っている。今後、A/D装置を介さず直接デジタル収録が行えれば、更に高精度、高速サンプル及び長時間録画の可能性を秘めている。もう一方の電波利用による動的変位計測システムの提案は、イメージ図-1に示すような、例えば、構造物の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可能である。高速な処理装置を用いることによりリアルタイムでの大変位収録が可能であり、試験体の塑性化の進行状態が判断できれば、倒壊する前に加振を停止するなど、震動実験をコントロールすることが可能ではないかと考えられる。実大構造物の破壊実験では、試験体崩壊による震動台へのダメージが心配される。そのため、安全設備として震動台を防護する防護設備または、試験体を支える支保設備等が考えられているが、本計測手法はこれら安全設備を補佐することにも利用できると考えられる。

電波利用による動的変位計測システムの提案は、GPSの技術を応用している。近年、GPSを利用して位置を測定する技術が飛躍的に進歩した。GP

Sは4個以上の衛星から発信された固有の電波を同時に受信して位置を知る装置である。この技術を応用した、全国GPS連続観測システムは、2地点で同時にGPS衛星4個以上が出す固有の電波を受信して、地点間の距離、高度差の相対位置を高精度で測定している。2地点間の相対位置は水平距離で1cm、高度差で数cmの精度で測定できるため地殻変動観測の有力な手段として利用されている。そこ

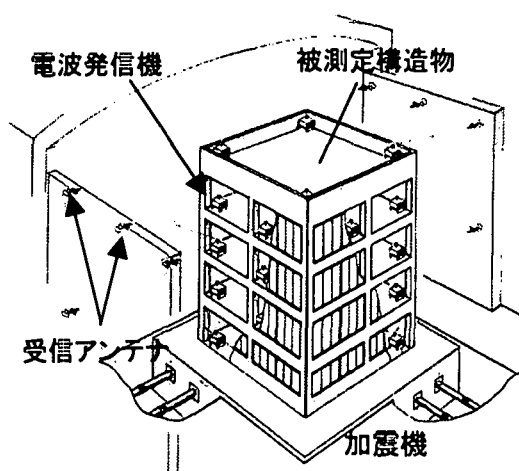


図-1 電波の位相差による測位法の計測イメージ

表-1 動的大变位計測における電波利用及び画像処理手法の特徴の比較

	電波利用による手法	画像処理手法
測定範囲と精度	広範囲、多点計測において同一精度で測定が可能。	広範囲から狭い範囲まで多点計測が可能。ただし、広範囲では精度良くないが狭い範囲では精度が良い。
サンプリングと収録時間	サンプリングが速くなっても収録時間は変わらない。100Hz～200Hzのサンプリングで収録は長時間可能。	サンプリングが速くなれば収録時間が減少する。200Hzのサンプリングで120秒程度の収録が可能。
計測環境	屋内での計測のため、マルチパス対策が重要。	計測対象点が録画されているため、実験後においても計測処理が可能。また、輝度により計測点を判別しているため、照明環境に左右される。
技術開発	精度向上、高速サンプリングのための技術開発が必要。	手法はほぼ確立しているが、3次元同精度計測等、まだ技術開発が必要。
将来性	リアルタイムで3次元大变位計測が可能のため、リアルタイム処理を生かした実験（崩壊前に加振停止等）が可能。	A/D装置を介さず直接デジタル収録が行えれば、更なる高精度、高サンプル、長時間録画が可能。

で、GPSの測位法を震動実験における試験体の位置測定に単純に当てはめてみると、実験施設の天井や壁が電波発信地点（固定点）になり複数の発信機を設置する。そして、試験体の計測点箇所が電波受信地点（位置測定地点）となる。しかし、この場合、試験体側に位置算出を行う機器類を設置しなければならない。そこで、試験体の位置測定地点から固有の電波を発信して、実験施設の天井や壁に複数設置した受信アンテナで同時に受信を行い、位置を算出する方法が考えられる。この方法は、複数の受信アンテナで受信した受信信号の位相差から電波発信位置を演算推定する。この位相差による測位の根本原理は、GPSを利用した相対測位法^{7),8)}、ロランC、オメガ及びデッカ航法システム⁹⁾等と共通である。また、他の測位方式として、測角センサーを異なる場所に複数個用意し三角方位測定の原理に従い方位線の交点から波源位置を推定する方法^{10),11)}も考えられる。しかし、本方式はセンサーアンテナが小型で単純な構成で済むため比較的低コストであり、電波発信機とセンサーの間隔が十分離れていない場合においても高い精度を確保できるという利点がある。また、一般のGPS測位法のように時間差を用いる

場合と比べ、広い帯域幅の電波を用いなくとも高い精度を追求することができる。これは多数用いる電波発信機の低コスト化および小型化に有利である。

本提案の計測法^{12,13)}では、計測点に設置された電波発信機の位置は4センサーにおける受信信号間の位相差により求められる4方程式の解から推定される。以下、上記電波を用いた計測システムの構成、位相差観測の原理、測位計算の原理を示す。

3. 位相差を用いた測位の原理

図-2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。各計測点に設置された電波発信機は周波数 f_c を基準にそれぞれ $(f_1 + f_c), \dots, (f_n + f_c), \dots, (f_N + f_c)$ の周波数の電波を送信する。ここで $f_1, \dots, f_n, \dots, f_N$ は f_c に比べ十分に小さな値とする。これらの電波を、異なる位置に設置された少なくとも4個のセンサー（受信アンテナ）で受信する。ここで、第 j 受信アンテナの位置を $\mathbf{q}_j = [X_j, Y_j, Z_j]^T$ (T は転置)と表すことにする。

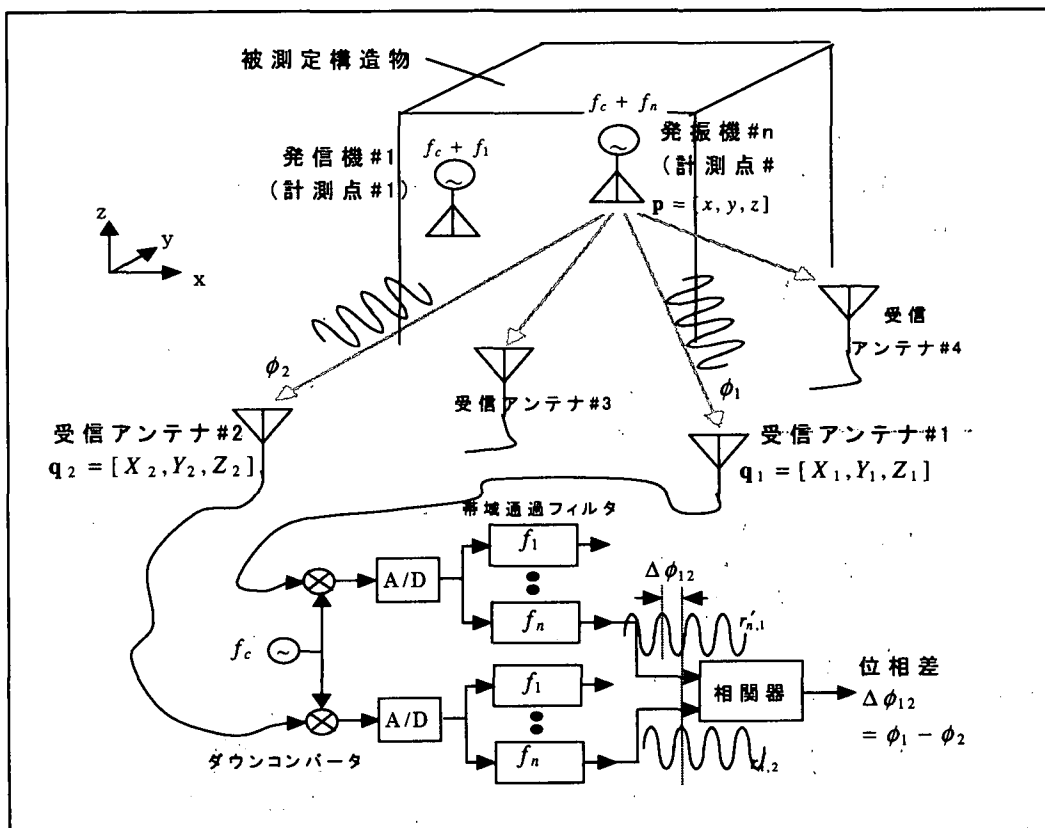


図-2 電波による震動変位計測系の基本構成

それぞれのセンサーで受信された信号は、ダウンコンバータで f_c の局発信号と乗じられそれぞれ $f_1, \dots, f_n$ の周波数の信号に変換される。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、帯域通過フィルタを通過することにより、発信機毎の信号に弁別される。すなわち、帯域通過フィルタから出力される信号は、第 n 計測点の電波発信機からの受信信号 $r_{n,j}$ のみになる。このように、複数の発信機からの電波を独立して処理することができるので、以降、第 n 計測点の位置 $\mathbf{p} = [x, y, z]^T$ を推定する測位処理の動作について代表して説明する。

第 n 計測点に設置された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、各センサーで受信される。第 1 のセンサー、第 2 のセンサーの受信信号はそれぞれ次式で与えられる。

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

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

ここに、 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り、次式のように表すことができる。

$$\phi_1 = \frac{2\pi}{\lambda} (\|\mathbf{p} - \mathbf{q}_1\| - k_1 \lambda) \quad (3)$$

$$\phi_2 = \frac{2\pi}{\lambda} (\|\mathbf{p} - \mathbf{q}_2\| - k_2 \lambda) \quad (4)$$

ここで、 $\|\mathbf{p} - \mathbf{q}_j\|$ は計測点（発信機）から第 j 受信アンテナまでの距離を意味し、 $\lambda \equiv c/(f_c + f_n)$ は電波の波長（ c は電波伝搬速度）、 k_j は整数である。帯域通過フィルタから出力される受信信号 $r_{n,1}, r_{n,2}$ はそれぞれ次式ようになる。

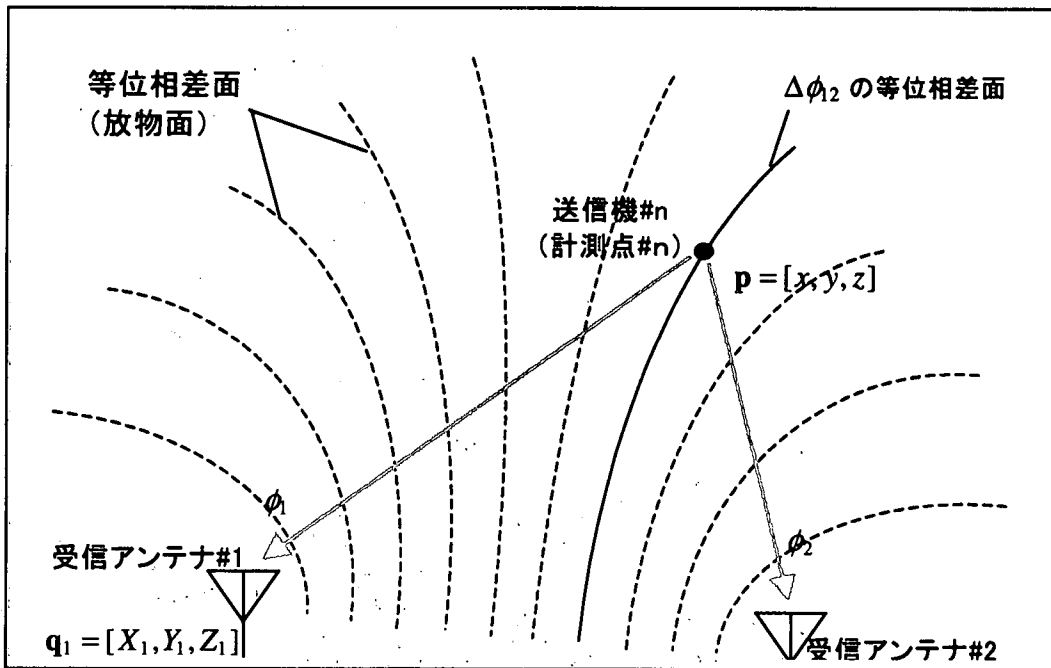
$$r'_{n,1}(t) = \exp[j2\pi f_n t] \exp[j\phi_1] \quad (1')$$

$$r'_{n,2}(t) = \exp[j2\pi f_n t] \exp[j\phi_2] \quad (2')$$

受信信号の位相差 $\Delta\phi_2 \equiv \phi_1 - \phi_2$ は、受信信号の相関を次式のように求めることにより測定できる。

$$\begin{aligned} \text{Arg} \left\langle r'_{n,1}(t) r'_{n,2}{}^*(t) \right\rangle &= j(\phi_1 - \phi_2) \\ &= j\Delta\phi_2 \end{aligned} \quad (5)$$

ここで $\langle \cdot \rangle$ は時間 t に関する平均操作、 $\square$ は複素共役を表す。同様にそれぞれ、アンテナ 1 受信信号とアンテナ 3 受信信号の位相差 $\Delta\phi_3 \equiv \phi_1 - \phi_3$ 、アンテナ 1 受信信号とアンテナ 4 受信信号の位相差 $\Delta\phi_4 \equiv \phi_1 - \phi_4$ が測定できる。



図－3 2台の受信アンテナによる等位相差面

計測点の位置 $\mathbf{p}=[x, y, z]^T$ に関する方程式は、式(3)、(4)などから次のように与えられる。

$$\begin{aligned} & \sqrt{(x-X_i)^2 + (y-Y_i)^2 + (z-Z_i)^2} \\ & - \sqrt{(x-X_j)^2 + (y-Y_j)^2 + (z-Z_j)^2} = \Delta r_{ij} \\ & (i=1; j=2,3,4) \end{aligned} \quad (6)$$

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。

$$\Delta r_{ij} = \frac{\lambda}{2\pi} (\Delta\phi_{ij} + 2\pi N_{ij}) \quad (7)$$

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。

計測点の位置 $\mathbf{p}=[x, y, z]^T$ は、各位相差 $\Delta\phi_{ij}$ を測定すれば、式(6)に示した3元連立方程式の解として推定することができる。なお、 $i=1, j=2$ についての式(6)を満足する $[x, y, z]$ は、図-3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。

なお、この測位方式では、電波発信機の周波数ゆらぎは相殺されるため、計測箇所を設置する発信機は周波数安定度が比較的低いもので済み、小型、安価なものが使用できる利点がある。

4. 開発の現状

第3章の位相差測位法の原理を検証するための測位精度の解析及びコンピュータシミュレーションによる評価¹⁴⁾を行った。その結果、計測点の位置推定誤差(測位誤差)を見積もったところ、4個の受信アンテナを距離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15deg(rms)の場合、シミュレーションによって求められた計測誤差は約5～13mmであった。これらの解析及びシミュレーションの結果を検証するための、要素検証試験¹⁵⁾を実施し、図-4の計測手法検証システムブロック図に示した試作機を製作している。

5. 結言

実大三次元震動破壊実験施設における震動実験を対象とした、動的大変位の計測手法の検討¹²⁾において非接触型変位計が有力であると述べた。本研究では、画像処理手法を利用した動的大変位計測システムの高度化を図っている。また、建物の複数震動計測点などの被測位対象位置を高精度に計測するために、

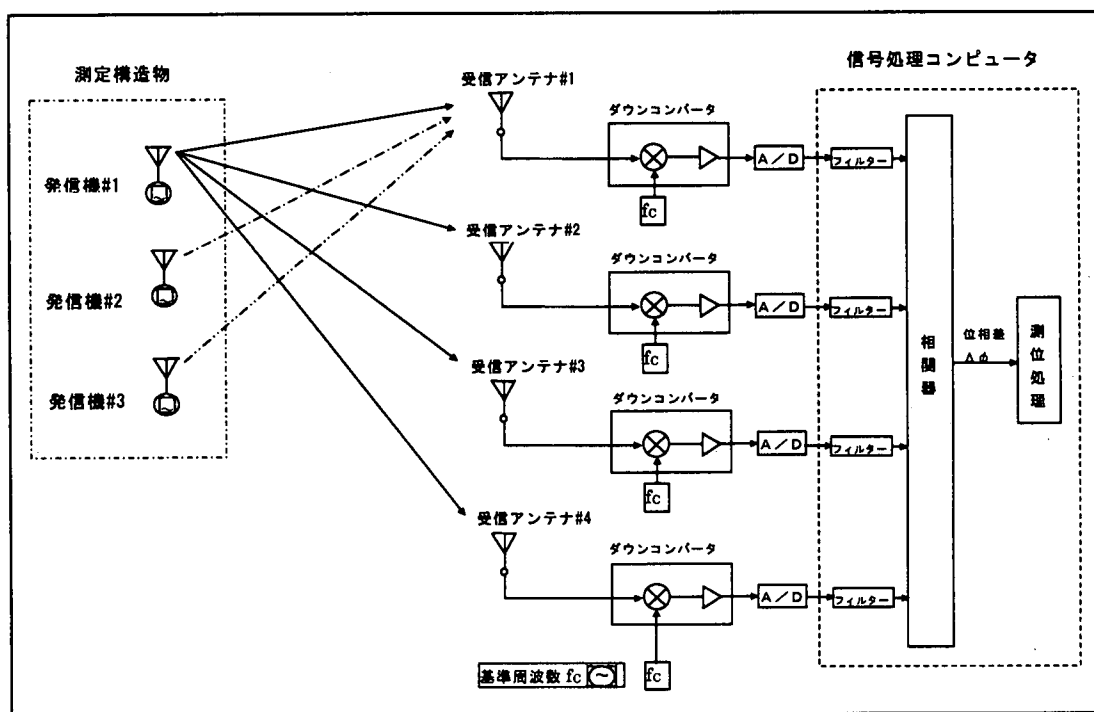


図-4 計測手法検証システムのブロック図

計測したい箇所に互いに周波数が異なる電波発信機を設置し、複数の受信アンテナで受信された信号の位相差から電波発信位置を推定する測位方式を提案した。これは有力な計測手法と考えられる。

しかし、本稿2章で述べた計測手法の特徴から単独で万全の計測手法は見あたらない。これら両手法を用い更に既存のセンサーも活用することにより、世界でも類のない大規模実験施設における震動実験での動的大変位の計測が可能になると思われる。

参考文献

- 1) 超精密生産技術大系 第3巻 計測・制御技術, フジ・テクノシステム, 1995.
- 2) 木下幹雄, 他: 画像解析ハンドブック, 東京大学出版会, 1992.
- 3) 矢崎忍, 他: テレビカメラによる3次元動的位位置計測, 第7回日本地震工学シンポジウム論文集 pp. 1429-1433, 1986.
- 4) 御子柴正, 他: ビデオカメラによる3次元動的変位計測, 土木学会第48回年次学術講演概要集, pp. 14-15, 1993.
- 5) D. F. ROGERS 他: コンピュータグラフィックス (山口富士夫訳), 日刊工業新聞社, 1976.
- 6) 岡本博: パソコンによる透視図の作り方, オーム社, 1984.
- 7) 土屋淳, 他: やさしいGPS測量, 日本測量協会, 1991.
- 8) GPS - 人工衛星による精密測位システム -, 日本測地学会編著, 日本測量協会, 1989.
- 9) 近藤倫正, 電波情報工学, 共立出版, 1999.
- 10) M. I. Skolnik, ed.: RADAR Handbook, McGraw-Hill, New York, 1990.
- 11) 岡村 敦, 他: パッシブ測位における相互相関を用いた虚像排除アルゴリズム, 電子情報通信学会論文誌(B-II), vol. J80-B-II, no. 6, pp. 505-515, June 1997.
- 12) 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.
- 13) 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.
- 14) 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.
- 15) 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 - 要素開発と震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. (投稿予定)