

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 21 日現在

機関番号：32708

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011年度～2012年度

課題番号：23760535

研究課題名（和文）GPSによる都市建物群の変位計測網の

確立に向けた基準点ネットワークの構築

研究課題名（英文）Establishment of measurement network of displacement of buildings in urban area using GPS technique

研究代表者

岡田玲（OKADA REI）

東京工芸大学・工学（系）研究科・研究員

研究者番号：40514170

研究成果の概要（和文）：

VRS データの作成を行う際には複数の基準点のデータを使ってヴァーチャル(仮想的)な基準点のデータを作成するため、日本全国に設置してある国土地理院の電子基準点のデータを利用することは必要不可欠である。まずインフラを整備する必要があり、データ取得のための専用ソフトの作成を行った。

必要となる計測点での GPS アンテナと基準点 GPS アンテナの距離によって、変位計測の精度が変化するため、計測点 GPS アンテナに比較的近くに設置された複数の基準点 GPS アンテナのデータを用いてヴァーチャルな基準点のデータを作る方法を用い、最適な VRS データの作成方法を検討した。8 台の GPS アンテナを都心部の中でも計測環境の良い地点に設置し、都心部の全範囲を VRS により網羅できるように独自の基準点アンテナ網を構築した。それによってヴァーチャルな基準点データを作成し、その精度検証によりよい結果を得た。

以上により GPS を用いた変位応答計測精度の飛躍的な向上を達成した。

研究成果の概要（英文）：

For making the VRS data, it is needed to use the data at electronic reference point by the Geospatial Information Authority of Japan. At the beginning of this project, the software for data acquisition was established. The accuracy has strong dependency on the distance between the standard GPS sensor and the GPS sensors at the measuring point. So, to get the accurate data, the virtual stand point was established using the data at the relatively-near multi standard points. The procedure for this matter was examined and established. Using the 8 GPS antennas, the virtual reference points cover the whole Tokyo area. Then the high accuracy of virtual reference data was confirmed. Then the significant advancement on the accuracy could be achieved on this project.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学 建築構造・材料

 キーワード：RTK-GPS、都市建物群、広域ネットワーク型、応答観測システム、
ヴァーチャル基準点

1. 研究開始当初の背景

構造物の風応答計測を行う際には共振成分だけでなく、静的成分や準静的成分の計測が必要となるが、従来用いられている加速度計や速度計では静的成分、準静的成分の計測が

不可能であった。この問題を解決すべく、筆者らを含む多くの研究者が測量分野で用いられていた RTK-GPS（動的干渉測位）を建築物の変位計測へと応用し、GPS 技術による構造物の変位応答計測の可能性を検討してきた結果、振動数 2Hz 以下かつ振幅 2cm 以

上の変位応答であれば共振成分の計測が可能であり、静的成分や準静的成分についても5mm～1cm程度の応答があれば十分に計測が可能であることが示された。また、高さ108mの試験タワーにGPSアンテナを取り付け、台風接近時の試験タワーの応答計測を行い、加速度計で得られた加速度記録とGPSにより得られた変位記録について様々な検討を行い、パワースペクトル密度や動特性についても精度良く推定が可能であることなどが示された。

GPSによる変位応答計測を行う際には、計測対象建築物の屋上に設置するGPSアンテナ（以下、計測点）とは別に、地面付近の既知座標に設置され計測点の基準となるGPSアンテナ（以下、基準点）が必須となる。この基準点のGPSアンテナは不動点である必要があり、かつGPS衛星からの電波を受信できるように上空が開けている必要がある。しかしながら、主な計測対象となる超高層建築物などは都市部に建てられることが多く、前述したような条件の場所に基準点を設けることが非常に難しい。また、計測点と基準点の距離が長くなるとGPSの計測精度は悪くなるため、測定条件の良い郊外に基準点を設けることが解決には繋がらない。GPSによる都市部における建物群の変位応答計測を行う際にはこの基準点の問題を解決する必要がある。

2. 研究の目的

そこで本研究では仮想基準点の考え方を導入し、仮想基準点の適用可能性について検討した。また、都市建物群の変位応答計測を行うために、東京都心部の3棟の超高層建築物にGPSアンテナを取り付け、変位応答記録を東京工芸大学で一括モニタリング可能な応答観測網の構築を目的とした。

3. 研究の方法

3.1 仮想基準点の概要

仮想基準点(VRS)とはVirtual Reference Stationのことで、複数の基準点を用いて仮想的な基準点を作成し、あたかも計測点の近くに基準点があるかのように観測を行う方法である。仮想基準点の作成は図1に示すように国土地理院が全国に有している電子基準点や独自に設置した基準点から最低3点を用い計測点付近の任意の位置に設定することができる。各基準点における観測データをもとに電離層・対流圏及び衛星軌道誤差をモデル化することにより推定し、より広い範囲での幾何補間計算によって、計測点の近くに作成した仮想基準点において受信されるであろうGPS信号を作成する。この仮想基準点におけるGPS信号を用いて計測点との間でRTK-GPSなどの干渉測位を行うことが可

能となる。電子基準点エリア内では任意の場所に仮想基準点を設置することができるので、従来型のRTK-GPSなどの干渉測位のようにより基準点と計測点の距離の制約を免れることができる。この方式により都市部における建物の変位計測について周辺建物やマルチパスの影響を受けずに高精度な計測を行う可能性を有している。

3.2 実験概要

仮想基準点の適用可能性を検討するための基礎実験を行った。本実験では図2に示す国土地理院が日本全国に設置した約1200点の電子基準点のうち、大井、山梨大月、町田の3点を利用して、東京工芸大学厚木キャンパス風工学研究センター屋上に仮想電子基準点の座標を設定した（以後、これにより計測された変位を仮想基準点とする）。また、比較のため、仮想基準点と同じ位置に実基準点としてGPSアンテナを設置した（以後、実基準点（短基線）とする）。

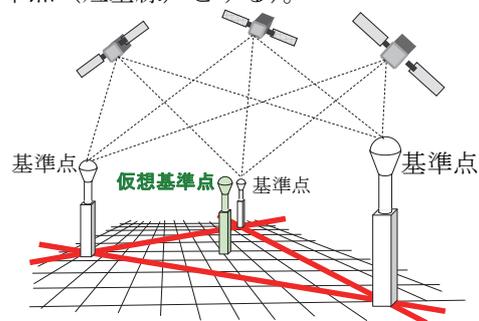


図1 仮想基準点作成のイメージ



図2 仮想電子基準点の作成

なお、GPSの測定精度は計測点から基準点までの距離（以後、基線長）により変化するため今回の基線長は35mと短基線として実験を行った。また、長基線とした場合の実験結果とも比較が可能なように、基線長が約41kmとなる東京工芸大学中野キャンパスにも実基準点としてGPSアンテナを設置した（以後、実基準点（長基線）とする）。なお、実基準点は不動点に設置するのが望ましいが、理想的な設置場所を確保するのは非常に困難である。また、主な計測対象を風応答と

するため、低層建物頂部を不動点と仮定して、基準アンテナを建物頂部に取り付けた。なお、国土地理院が提供している電子基準点のデータのサンプリング周波数は 1Hz であるため本研究で用いた仮想電子基準点のデータも 1Hz であり、高層建物の応答計測を行うにはデータ間隔が粗いが、本研究では仮想基準点を用いた場合の計測精度の検証に主眼をおいて解析を行った。図 3 に計測点、実基準点および仮想基準点の位置関係を示す。計測点は東京工芸大学厚木キャンパス 5 号館屋上に設置した加振器（写真 1 参照）に取り付けられた GPS アンテナである。

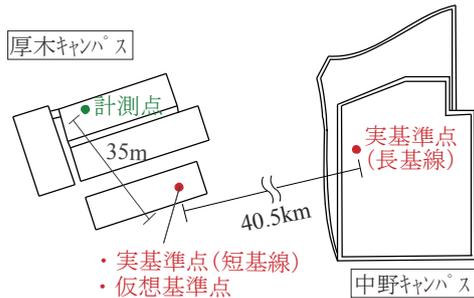


図 3 各基準点と計測点の位置関係



写真 1 加振器に設置された計測点

3. 3 都市建物群の応答観測網の構築

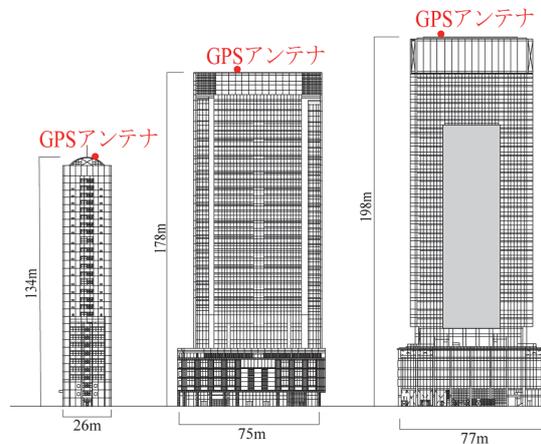
前節の経緯を踏まえて、都市建物群の応答観測網の雛形を構築した。

図 4 に示すように、東京都心部を対象とし、高層建物が隣立する範囲をカバーできるように、仮想基準点のための基準点を中野区（基準点 1）、墨田区（基準点 2）、江東区（基準点 3）の 3 箇所に設置した。それぞれの基準点には周囲に際立った高層建物の無い、基準点として環境の良い場所を選定し、GPS アンテナおよび受信機を設置した。これにより新宿の超高層ビル群、東京丸の内エリア、建設中のスカイツリーなど東京都心部で計測を行う際に必要となる基準点を設置すること無く、仮想基準点を用いた計測が可能とな

った。なお、本観測網を拡大することは容易であり、インターネットに繋げる環境にあれば計測建物を増やすことが可能である。また、本観測網を用いて、複数の建築物群の変位応答計測を行うために、新宿区の 1 棟、千代田区の 2 棟の超高層建物に GPS アンテナを設置し、3 箇所の計測点を設けた。図 5 に実測対象建物の立面図を示す。図 5 (a) の計測建物 1 は東京都新宿区にある高さ 134m、幅 26m の工学院大学であり、計測建物 2 は高さ 178m の東京都千代田区にある丸の内ビルディング、計測建物 3 は隣接して建っている高さ 198m の新丸の内ビルディングである。それぞれの計測点の屋上に GPS アンテナを設置した。なお、GPS のサンプリング周波数は 10Hz である。



図 4 GPS 変位応答観測網



計測建物（左から 1、2、3）

図 5 計測建物立面図

図 6 に計測システム構成図を示す。それぞれの計測点に GPS アンテナおよび受信機以外に、GPS による変位記録と比較するために加速度計を取り付けている。GPS アンテナで受信したデータは IP コンバータ、ルータ、ONU（計測建物 1 ではルータ、ONU は使用していない）を通り、インターネットを通して解析および監視を一括して行うため東京工芸大学に集約される。リアルタイムで集約されたデータは解析用 PC で基線解析が行われ、各計測点

の変位をリアルタイムで監視することが可能である。

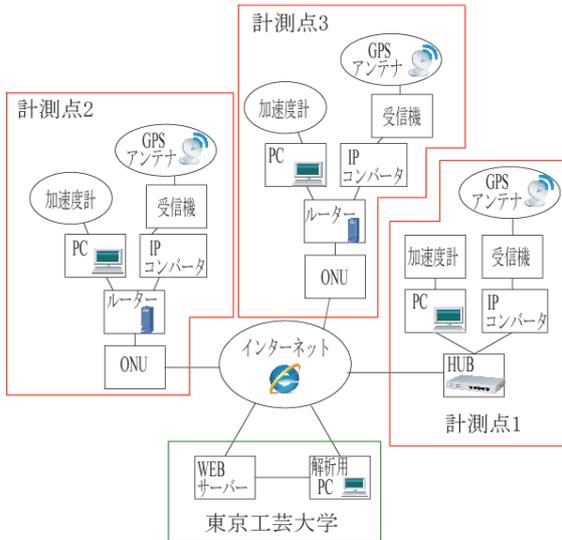


図6 計測システム構成図

4. 研究成果

4. 1 ゼロ点の決定

GPS を用いて建物などの応答計測を行う際には、あらかじめ基準点から計測点までの距離を求めておく必要があるため、ここでは全てのGPSアンテナが静止している状態で計測を行い、その中で計測精度の良かった約50分間のデータを抽出してゼロ点を定めた。

4. 2 静止状態での計測

仮想基準点の適用可能性を検討するために、加振器に取り付けられた計測点が静止している状態(以後、静止状態)でそれぞれのGPS信号を計測し、計測精度の検証を行った。図4(a), (b)に静止状態で計測されたGPS信号の10分間の平均値と標準偏差を示す。図4(a)の平均値が0であると誤差が無いことを示しており、実基準点(短基線)の平均値が最も0に近く誤差が小さいことがわかる。実基準点(長基線)の平均値は1.5cm程度となる場合も有り、全てにおいて誤差が最も大きくなった。仮想基準点の平均値はこの間に位置しているが、時間によっては実基準点(短基線)と同等の結果が得られていることが分かる。図4(b)の静止状態で計測されたGPS信号の標準偏差では、実基準点(短基線)と仮想基準点は同程度の誤差となっている。実基準点(長基線)は前者に比べ誤差が大きいことがわかる。図5は静止状態のGPS信号のリサージュ(20分間)である。(a)の実基準点(短基線)は南北、東西方向共に1cmの範囲に納まっている。(b)の仮想基準点(短基線)は実基準点(短基線)とほぼ同じであるが、NS方向に若干ばらつきがみられる。(c)の実基準点(長基線)は全計測点で最もばらつきが大きいことがわかる。

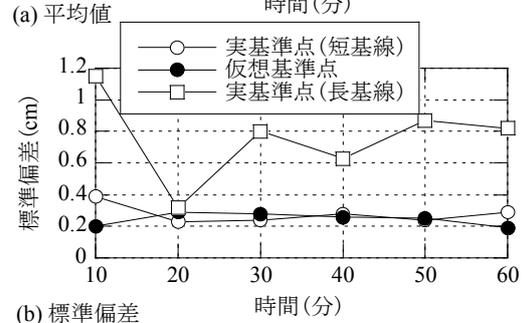
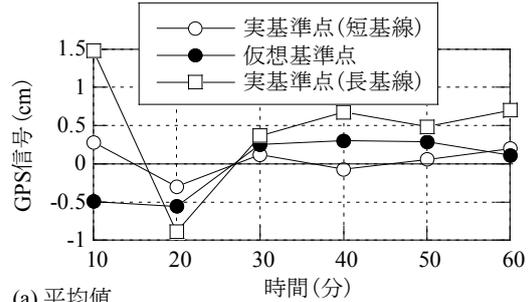
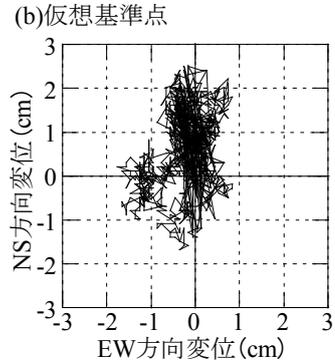
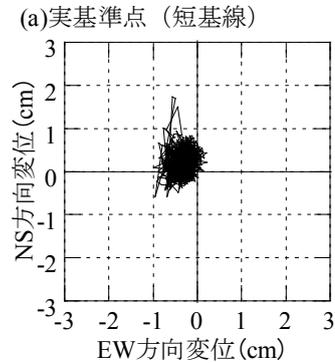
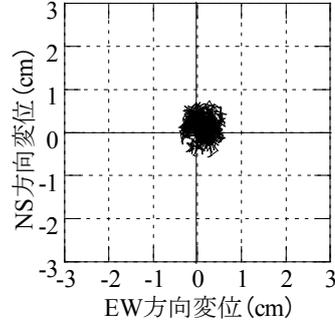


図4 静止状態での10分間毎の統計値の時間変化 (NS方向のGPS信号)



(c)実基準点(長基線)

図5 静止状態での20分間のGPS信号のリサージュ (NS方向のGPS信号)

4. 3 加振器を用いた振動計測

静止状態での計測精度の検証に続いて、写真1の加振器を正弦波加振させ、計測点が振動している際の変位計測を行い、仮想基準点の可能性について検討した。加振器は東西方向に振動するように設置し、加振振動数を0.15Hz~3Hz、加振振幅を5mm~25mmまで変化させて実験を行った。その結果の一例として、加振器の加振振動数を0.15Hz、加振振幅を25mmとした場合の東西方向の変位計測結果を図6に示す。なお、図中には実変位も図示した。図6(a)の実基準点(短基線)、図6(b)の仮想基準点(長基線)は実変位とほぼ同じ値を示しているが、実基準点(長基線)の計測結果は実変位から大きくずれていることがわかる。以上、都市部の建物群の応答計測を実施する際に問題となる基準点に仮想基準点を適用することの可能性を検討した結果、基準点を仮想基準点とした計測では短基線の実基準点を用いた計測よりは若干精度が劣ったが状態の良い時にはほぼ同程度の精度で計測が可能であることがわかった。また、今回の仮想基準点を作成するために用いた3点の電子基準点で作られる三角形のセル1辺が35km~50kmと非常に大きかったため、仮想基準点としての精度が十分でなかったことも考えられる。東京都市部などの高層建物群の計測を行う際には、仮想基準点を作成に用いる基準点のセルを小さくすることにより、仮想基準点を用いての計測精度の向上が可能であると考えられる。

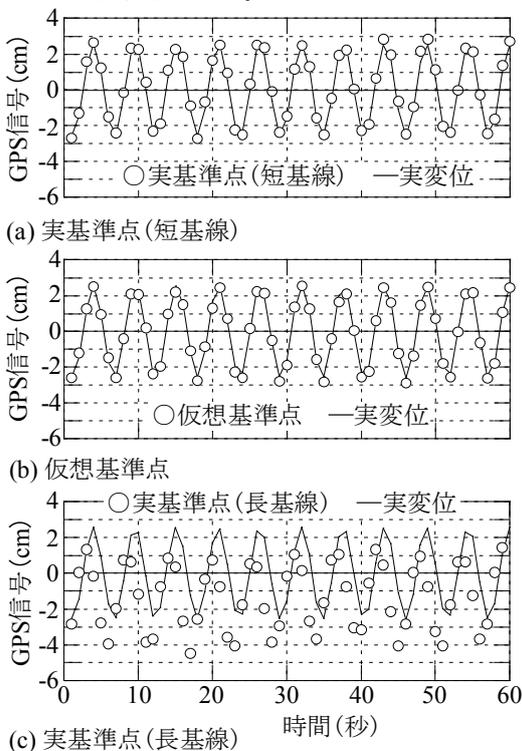


図6 正弦波加振時の時刻歴波形(東西方向、加振振動数:0.15Hz、加振振幅25mm)

4. 4 ゼロ点の決定

各計測点のゼロ点を決めるにあたって、計測建物1は平成21年10月2日~12月31日、計測建物2は平成21年12月26日~平成22年1月20日、計測建物3は平成21年12月19日~平成22年1月5日のGPSデータのうち、各計測点で捕捉された人工衛星の配置状況を表す指標GDOP(Geometrical dilution of precision, 値の小さい方が衛星配置が良い)が2.0以下、かつ、10分間でのデータ取得率が92%以上となるデータを抽出した。さらに、風や日射による変形がないデータを選ぶため、午前0時から5時までのデータで、平均風速が1.5m/s以下のものを対象とした。以上の条件に適合したデータのみを選び、その全時間の平均位置を各計測点のゼロ点とした。

4. 5 強風時における超高層建物の変位応答の一例

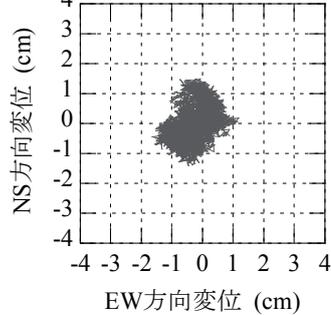
3箇所の計測点を設置してから、それほど期間が経過しておらず、台風などの強風による応答記録はあまり計測できていないが、一例として、計測建物1において計測された強風時の変位応答について示す。なお、計測建物1は基準点1から2km程度と基線長が短いため、仮想基準点ではなく、実基準点を用いて基線解析を行っている。図7に計測建物1においてGPSにより計測された応答変位のリサージュを示す。図7(a)は静穏時のリサージュである。GPSのバックグラウンドノイズにより、±1cm程度の変動が見られる。図7(b)は観測期間中で最も強風が計測された日のリサージュである。なお、観測当時は計測建物1に設置された風速計が動作していなかったため、参考のため計測建物1から南側に300m離れたKDDIビル(高さ164.7m)の屋上で計測された平均風速と最多風向を示した。KDDIビルにおける最多風向はNNEであるが、計測建物1では東西方向へ1cm程度の静的変位がGPSにより計測できていることが分かる。図8に計測建物1においてGPSにより計測された東西方向の応答変位のパワースペクトル密度を示す。強風時には0.38Hzに1次固有振動数に対応するピークが見られる。なお、図示しないが加速度計で計測された加速度のパワースペクトル密度でも当然のことながら同じ振動数にピークが見られた。

4. 6 加速度計による風応答計測

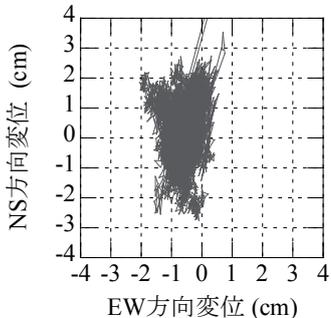
加速度計により得られた加速度応答の一例として、計測建物1における平均風速(KDDIビル屋上)と加速度の関係を図9に示す。計測期間中の最大風速は2009年10月8日の台風0918号が接近した際の24.1m/sであり、その時刻における最多風向はNNEであった。平均風速が大きくなるに従って応答加速度も大きくなっており、東西方向と南北方向の加速度応答を比較すると短辺方向の加速度

が大きいことがわかる。

10 分間の加速度記録に対して、RD 法を適用し、固有振動数、減衰定数を推定した。ここでは、10 月 8 日の加速度記録で最多風向が N から NE となる加速度記録に対して RD 法を適用し、かつ、RD 減衰波形を 1 質点系自由振動の理論式で最小二乗近似し、誤差率が 5% 以下となった動特性のみを採用した。図 10 に RD 法により得られた固有振動数と加速度の標準偏差の関係を示す。図 11 に示すように東西、南北方向共に、加速度の標準偏差が増加するにつれて固有振動数が減少する傾向が見られた。図 12 に RD 法により得られた減衰定数と加速度の標準偏差の関係を示す。図 12 ではばらつきは大きい、南北方向では、加速度の標準偏差が増加するにつれて減衰定数も増加しており、両図ともに振幅依存性が見られた。振幅の増大で 2 次部材等の接合部の摩擦によるものと考えられる。計測データが少ないこともあり、現段階では空力減衰の影響については、不明である。



(a) 静穏時 (2009 年 11 月 11 日)



(b) 強風時 (2009 年 11 月 14 日)

図 8 GPS により計測された応答変位のリサージュ (計測建物 1)

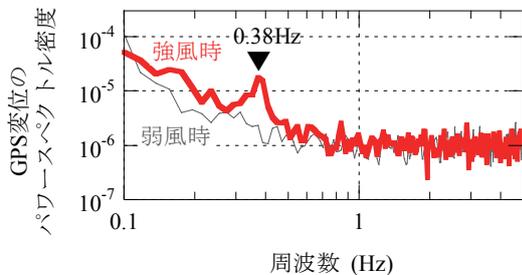


図 9 強風時の応答変位のパワースペクトル密度 (計測建物 1, 東西方向)

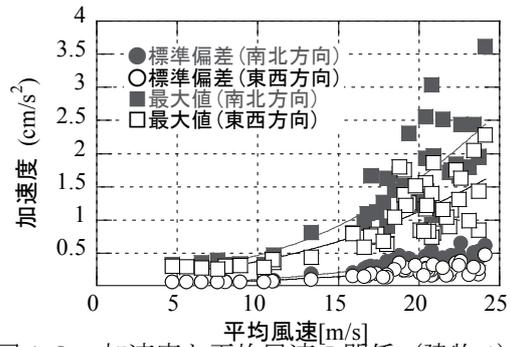


図 10 加速度と平均風速の関係 (建物 1)

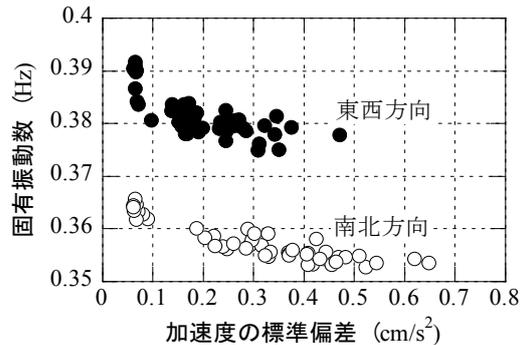


図 11 固有振動数の振幅依存性 (建物 1)

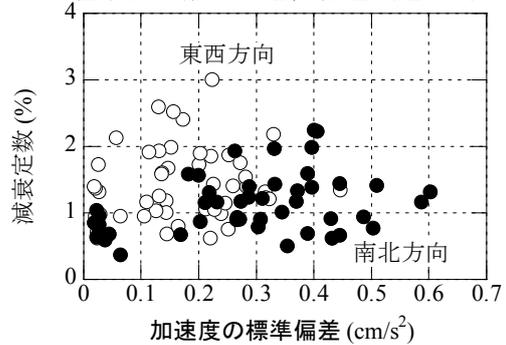


図 12 減衰定数の振幅依存性 (計測建物 1)

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計 1 件)

Akihito Yoshida, Rei Okada, Yukio Tamura, Yoshiaki Hisada, Establishment of response monitoring network of buildings using GPS technology, 13th International Conference on Wind Engineering, 2010.07, Amsterdam

[その他]

ホームページ等

Real time monitoring for wind resistant design

http://wind.arch.t-kougei.ac.jp/system/file/GCOE_researcher/Homepage_self_introduction_Okada.pdf

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岡田玲 (OKADA REI)

東京工芸大学・工学(系)研究科・研究員

研究者番号: 40514170