

立体振動分析支援アニメーションツールの開発と効果的分析のための多点観測体制の提案

名古屋大学大学院 環境学研究科 都市環境学専攻
環境・安全マネジメント講座 福和研究室 廣野 衣美

1 はじめに

観測機器の発展や観測体制の整備により、地盤-建物系で多点の振動記録が得られるようになってきた。建物については、免震・制振建物や超高層建物、大規模発電施設などの重要構造物で多点多成分観測体制を備えている場合が多い。加えて、地盤・建物の常時微動計測や振動実験など、地震記録以外にも振動現象に関する多点多成分観測記録が得られている。

これらの観測記録が効果的に分析できれば、地震時の現象を空間的に詳細に検討することができる。しかし、このような多点多成分の高密度観測記録から複雑な立体振動挙動を適切に捉えることは、波形やスペクトル等の一般的な分析のみでは困難であり、高度な分析技術や経験を必要とする。また、多数の観測点間の関係を捉える方法としてモード図が描かれるが、これはある一瞬の様子を図化したものまたはスペクトル比などから求められた図であり、時間的な変化を捉えることはできない。実際には、それぞれの分析の特性を活かしながら複数の図（波形・スペクトル等・モード図など）を比較しての分析となるが、地震時の現象を総合して空間的に詳細に検討することは容易ではない上、図化する段階での手間も多い。

一方、建物の振動実験で多チャンネルの観測体制を整えることも多いが、観測体制やデータに問題がないかどうかを現場でチェックするには、経験豊かな技術者をもってしても容易ではなく、短時間で効率的にデータチェックが行えるようなツールの必要性は高い。

以上の背景・経緯を受けて、本論では地震や常時微動の多点多成分同時観測記録等について、空間的・時間的な振動状態をアニメーションにより可視化する汎用アプリケーションソフトウェアを、動的ウェブコンテンツ作成環境である adobe 社の Flash を用いて構築した。

また、開発した立体振動分析支援ツールを用いて、様々な観測・計測条件で得られた多点多成分観測記録について、立体振動挙動の把握を行った。さらに、既往の研究により隣接建物間相互作用が確認されている名古屋大学工学研究科 9 号館に対し、立体振動分析支援ツールで立体挙動の確認を行うことを前提とした計測を行い、隣接建物の振動現象の把握を試みた。

2 立体振動分析支援ツールの開発

本ツールは、従来の分析手法を総合しながら多点多成分観測記録について立体振動挙動をアニメーションにより可視化することで、空間的・時間的な振動状態を把握することを目的としている。開発にあたり、要求性能としては大きく分けて以下の2点が挙げられる。

・インタラクティブな設定変更を可能にする

アニメーションで着目したい振動数範囲の設定・変更をツール内部で簡単に行えるようにする。また、視点の切

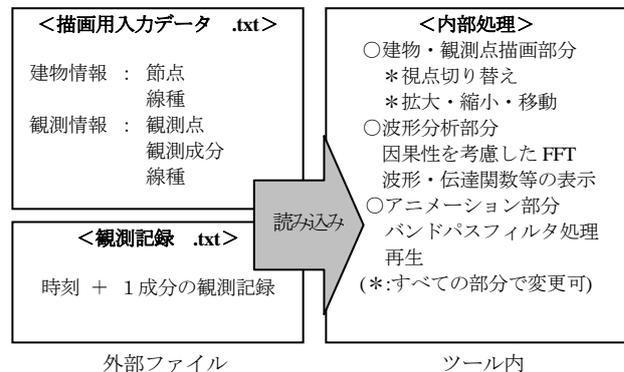
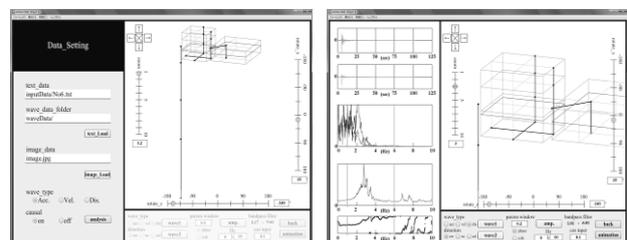
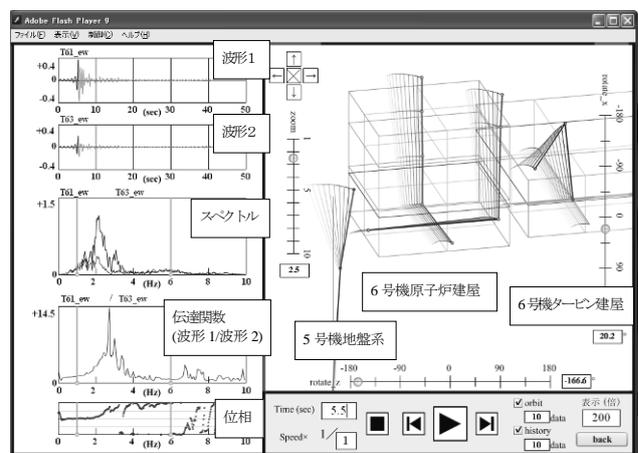


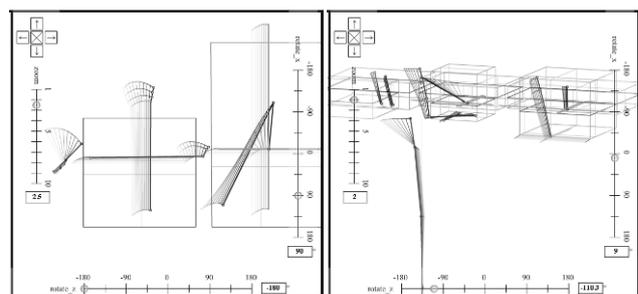
図1 システムの構成イメージ



- 1) 建物・観測点描画部分 (左部分で読み込むファイルを指定し、読み込み・描画を行う。)
- 2) 波形分析部分 (右上で表示する観測点を選択し、右下で数値などの設定を行う。)



- 3) アニメーション部分 (経過時間:5.5秒 振動数範囲:1~6Hz) (スペクトルや伝達関数上のスライダーで指定した振動数範囲についてアニメーションで確認できる。視点切り替えなども可。)



- 4) 視点の切り替え(3と同範囲)
- 5) 入力データ変更(5-7号機)

図2 Flash画面

り替えや拡大、再生速度の変更などの機能をつける。このような設定を変更しながらアニメーションで確認することにより、簡単にひとつの記録について多面的な分析が行えると考えた。

- 観測対象の建物形状と観測点配置の多様性に対応する
 具体的には、建物形状や観測点・観測成分についての情報を外部ファイルとして管理し、それらをツール側が読み込む方式とした。これにより、様々な観測対象・観測記録対応できるようになる。

システムの構成イメージを図1に、それに対応する画面例を図2に示す。アニメーション部分では、再生速度の指定や、一時停止・コマ送り、さらに指定した範囲の粒子軌跡やアニメーションの残像も残すことができるようになっており、時間的に変化する立体振動挙動を効果的に確認することが可能となっている。これらの機能は、実際にツールを使った分析を通して随時追加していったものであり、開発と使用を同時に行ったことで実現できた部分である。

観測記録については、当然ながら時刻同期が必須であり、複数のレコーダによる強震記録など、成分間の同期が取れていないデータに関しては、長周期域のフィルタリング波形に対して相互相関関数などを用いることにより、時刻合わせを行っている。

本ツールの開発は、動的ウェブコンテンツ作成環境である adobe 社の Flash を用いて行っている。これにより、容易に結果やアプリケーションをウェブコンテンツとして公開することが可能である。

3 分析支援ツールによる多点多成分同時記録の分析

前章で述べたツールを用いて、隣接した建物・地盤の空間的な揺れの分析、高密度強震観測・常時微動計測を行った免震建物や中低層事務所建物の複雑な立体振動挙動の分析、また、高層建物の震動台実験の記録から実験の条件を考慮した振動の把握についての分析を行う。

3.1 隣接建物群と周辺地盤の観測記録

2007年7月16日新潟県中越沖地震の際に柏崎刈羽原子力発電所で観測された記録を分析する。この記録の特徴は、隣接した建物・地盤で多点多成分の記録が得られていることであり、一部の建物群に着目したもの(図2)と全体を捉えるために概略の模式図であらわしたもの(図3)を作成した。これらのアニメーションから、地盤増幅、建物応答、そして地盤-建物動的相互作用、隣接建物間相互作用などに関するさまざまな特性を見ることが出来る。たとえば基礎と地表の間の地盤増幅、地表面から建屋内への入力の振幅や位相の変化、建物がスウェイ・ロッキングしている様子などを周波数帯域毎に分析でき、複雑な応答特性を視覚的に理解することで、重要な挙動を確認できる。

3.2 免震建物の高密度強震観測記録

高密度強震観測が行われている免震病院建物で得られた記録を分析する。設計時の性能の確認と、設計で考慮されていない特性の検出などの観点からも、免震建物の高密度強震観測の果たす役割は大きく、時間的に変化する複雑な

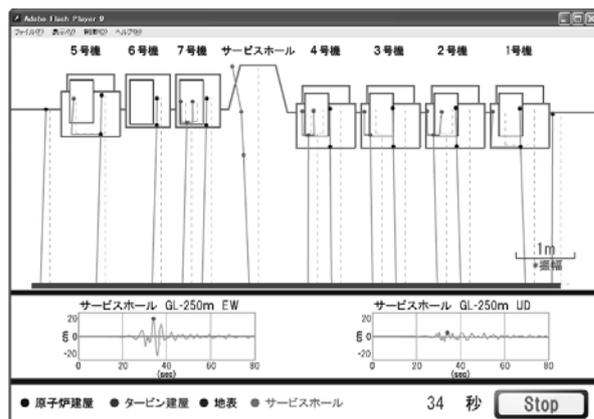


図3 柏崎刈羽原子力発電所の記録

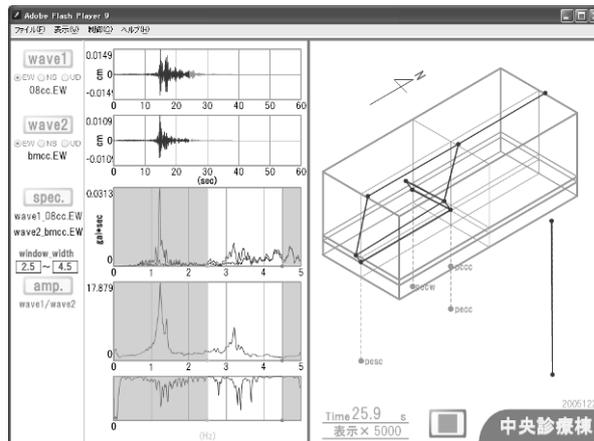


図4 免震建物 逆せん断モード
(経過時間: 25.9秒 振動数範囲: 2.5~4.5Hz)

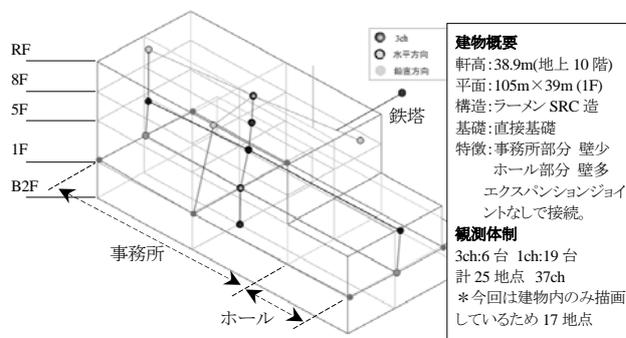


図5 高密度常時微動計測
(経過時間: 15秒 振動数範囲: 1.3~1.6Hz)

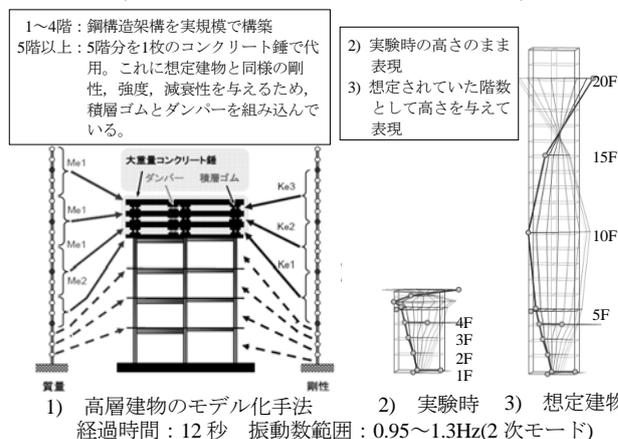


図6 E-defense 振動実験

立体振動挙動を適切に捉えることは重要である。免震建物特有のモード形である、逆せん断型のモードを図4に示す。また、ねじれ振動も確認されており、ねじれ成分、並進成分を含む振動数範囲を抽出したアニメーションを見ることで、はじめは並進成分が優勢であるが、途中でねじれ成分が生じてくることなどの時間変化も確認できる。

3.3 中低層事務所建物の高密度常時微動計測

大規模な事務所建物で行われた高密度な常時微動計測記録を分析する。常時微動計測では、短時間のうちに計測システムや機器のチェックを行う必要があること、また、その場で得られた記録の確認を速やかに行うことが重要となる。本格的な計測の前に本ツールで全体の様子を捉えることにより、計測体制の確認を行うこともできる。

対象となった事務所建物は、比較的整形なフレーム構造の事務所建物であるが、低層張り出し部として壁の多いホールがあるため、複雑なねじれを含む立体挙動を示している(図5)。また、屋上に通信鉄塔があり、建物応答との関係も重要である。これらの応答特性を即時に把握できれば、観測点の変更・移設なども容易になる。さらに、応答性状を適切に把握するためには、モード分離が重要となるが、本ツールは振動数範囲を変えながら応答を確認できる点で有用である。

3.4 長周期地震動を受ける高層建物の震動台実験

2008年3月に防災科学技術研究所のE-defenseで行われた長周期地震動を受ける高層建物の震動台実験の記録を分析する。試験体は、地上21階、高さ80mの高層建物を想定したもので、1階から4階までを実規模の鉄骨造架構とし、5階から21階については集約を行い、質量は5層ずつをコンクリート錘で再現し、剛性・減衰は積層ゴム・ダンパーで再現している(図6-1))。図6-2が実験の試験体の様子をそのまま再現したもの、図6-3が想定されていた地上21階の建物として高さを与えて表現したものである。試験体そのままの揺れを見ているだけでは高層建物の揺れとしてイメージすることは難しいが、想定していた条件で表現することにより受ける印象は変わってくる。実験で仮想的に模擬したものを、想定された本来の形に戻して確認することも本ツールの利点と言える。

4 分析支援ツールを前提とした観測体制と得られる知見

4.1 対象建物概要

対象建物は、名古屋大学工学研究科9号館西館(6F建物)と東館(3F建物)である。この建物は、松山ら¹⁾により強震観測・強制振動実験・常時微動計測に基づき隣接する中低層建物振動特性に関する分析がなされている。鳥瞰図を図7に、断面図・平面図をセンサ配置図と共に図8に示す。センサ配置は、●▲◎が既往の研究、☆が今回行った計測である。

対象とする2棟は6F建物がSRC造、3F建物がRC造であり、両棟は構造的には独立しており、通路部分のエキスパンションジョイントを介して3mの距離で東西に隣接している。これらは、洪積丘陵地の尾根筋に立地し、その南

側は約10m、西側は約3mの崖となっている。基礎形式はともに杭基礎であり、GL-12m付近(N値50)を支持層とし、基礎は約2mの埋め込みがある。西館には振動台が設置されており、振動台基礎は建物基礎と縁が切れており、間に砂が挿入されている。

4.2 既往の研究結果

松山らの研究で得られた知見を以下に示す。

- 1) 南側の崖が長辺方向の地盤振動の差を生み出し、その結果生じたねじれ動入力が6F建物のねじれ応答を励起し、さらに地盤を介して3F建物短辺方向の応答に影響を与えていると考察され、隣接建物を介した複数動入力の存在が示唆される。
- 2) 強震観測と強制振動実験の6F建物長辺方向の卓越振動数でのモード形(図9)から、両建物の長辺方向(隣接する方向)のロッキングがほぼ逆位相で励起されること、隣接位置で両建物の上下動は同じ動きをすることが確認された。
- 3) 強震観測・強制振動実験・常時微動の3種類の記録ともに基礎固定系では隣接建物の影響が認められないことから、上部構造を介した力の伝達はないと考えられる。

4.3 強制振動実験と常時微動計測概要

既往の研究で得られた知見について、立体振動分析支援ツールを用いて検討する。具体的には、崖地の影響や、6F

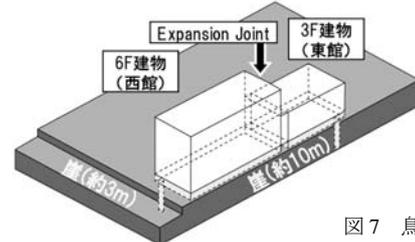


図7 鳥瞰図

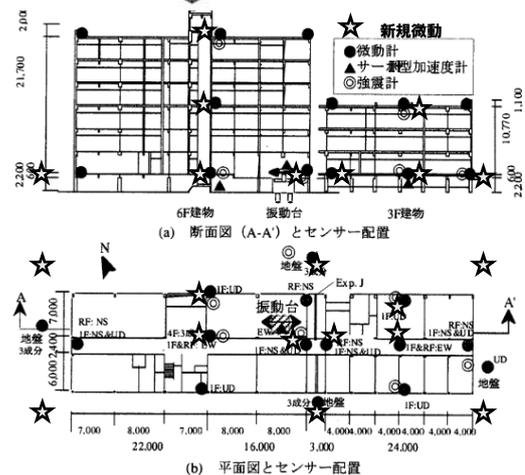


図8 断面図・平面図及びセンサ配置図

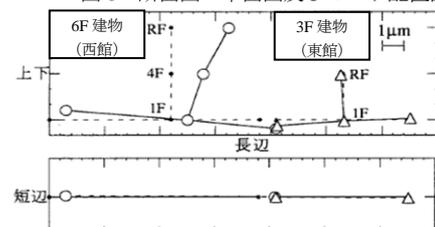


図9 強制振動実験の変位モード図(松山ら)

建物の振動が地盤を介して 3F 建物に伝わっていることについて、アニメーションによりさらに現象の把握を試みる。

従来の観測体制は、収録機やセンサ数による制限、分析手法の関係から、質点系で表現されるような観測点配置で、分析に必要な成分のみ計測する場合が多かった。このような記録を 3 次元で可視化するにはデータの補完を行って表現していたが、アニメーションによる現象の把握を行う場合はやはり 3 成分の計測を行うことが望ましい。また、多数の観測点間の関係を捉えるためには、点ではなく面で表現できるような観測点配置にする方が観測点・成分は増えるが全体像の把握が行いやすくなる。そこで、今回新たに全点 3 成分のデータを得る観測体制で計測を行うことにした。センサ配置を図 8 の☆で示す。この配置から、地盤の平面的な揺れの違いが把握でき、崖地の影響などが確認できる。また、建物を囲むように設置することで、建物間での地盤を介した力の伝達について確認が行えると考えた。地盤の記録は建物近傍の記録であり、建物の影響を含んだ動きとなっている。

強制振動実験は、可動部質量約 600kg の振動台に質量約 1ton のおもりを積載し、振動数を時間とともに掃引する正弦波スイープ加振を行った。スイープ加振の加振振動数は、強震観測結果から得られた両建物の 1 次固有振動数を含む 2Hz~15Hz とした。また、強制振動実験にあわせて、常時微動計測を同じセンサ配置で行った。分析には、100Hz サンプリング、速度 1 秒計での結果を用いる。

4.4 立体振動特性

崖地の影響でフーリエスペクトル振幅の高振動数側が地盤地点により異なるという知見に対して、常時微動の 4Hz から 9.5Hz の振動数範囲の様子を図 10 に示す。地盤がくの字に変形しており、両建物もそれにあわせてねじれた形となっている。地盤の動きは、崖地のある西側と南側の動きが大きく、特に南側中央の点の動きが大きくなっている。

強制振動実験記録の長辺方向の伝達関数を図 11 に示す。3F 建物の RF/1F で 3.9Hz 付近に応答が見られるが、これは 6F 建物のロッキングの影響である。図 9 と同様の条件 (3.9Hz を中心とするバンドパスフィルタ幅 0.5Hz) の様子を図 12 に示す。紙面では分かりづらいが、6F 建物の動きから若干の遅れをともなって地盤と 3F 建物が上下に振動していることが分かる。また、図 12 の下の平面モード図か

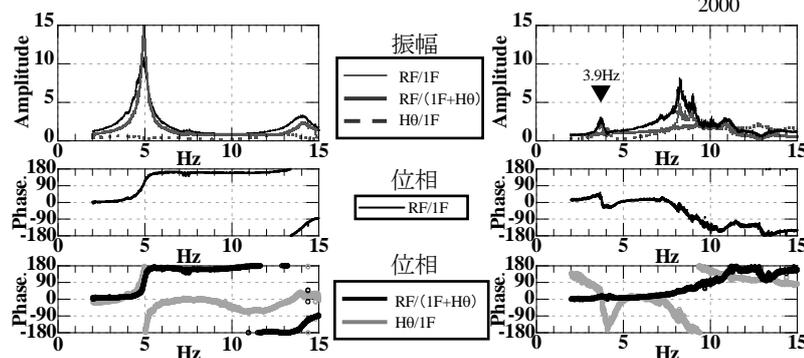


図 11 強制振動実験記録の長辺方向の伝達関数 (右: 6F 建物、左: 3F 建物)

ら、桁行方向の加振では建物内で平面内のねじれはほとんど励起されていないことも確認できた。この時、2 棟の建物はロッキングの影響で中央に向かって動いている。6F 建物の水平の動きが大きく、これにあわせて西側地盤も大きく動いている様子も確認できた。

5 おわりに

本論では、立体振動挙動をアニメーションにより可視化し、容易に分析条件を変えて結果を確認できる立体振動分析支援アニメーションツールを開発した。開発と使用を同時に行ったことで、例えば再生速度の指定などユーザーフェイス機能の向上につながった。

様々な記録の分析に本ツールを用いたことにより、多点の記録に対してツールを使用しても動作すること、複数の建物や地盤の記録を表現してもそれぞれの観測点の関係性を見ることができるとなどの確認ができた。また、複雑な立体挙動を示す建物について、スペクトル解析のみではなかなか抽出しにくい立体モードの形状や非正常特性も、パラメータを変えながらアニメーション表示ができることにより容易に確認できることが示された。さらに、本ツールの表現の自由さに対する確認も行った。

隣接建物や崖地の影響による複雑な動きが示唆された工学研究科 9 号館に対して再度計測を行い、現象の把握を試みた。地盤計測点を建物近傍に多数配置したことにより、従来の計測では捉えにくかった、地盤の動きや、建物と地盤の関係アニメーションにより把握することができた。

本論で開発したシステムを利用することで、観測や実験データの分析を通じて建物・地盤の複雑な動的挙動を効果的に明らかにすることができ、データ分析を扱う技術者・研究者だけでなく、一般技術者や設計者に大きなメリットがある。本システムの利用を前提として、より効果的な観測・モニタリングおよび解析との連携などの開発も期待できる

参考文献

- 1) 松山智恵他: 強震観測・強制振動実験常時微動計測に基づく隣接する中低層建物の振動特性, 日本建築学会構造系論文集 第 545 号, pp87-94, 2000

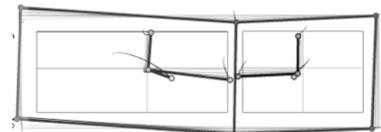
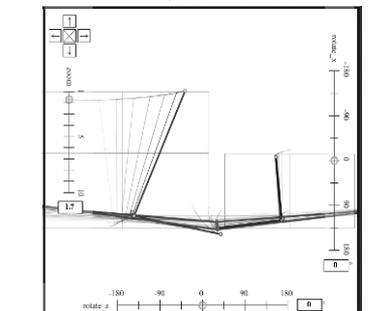


図 10 地盤のねじれの様子(平面) 振動数範囲: 4.0~9.5Hz



上: 立面, 下: 平面
図 12 ロッキングによる地盤を介した力の伝達 振動数範囲: 3.4~4.4Hz