

振動実験及び継続的な振動観測に基づく名古屋テレビ塔の振動特性の推定

Vibration Characteristics of NAGOYA TV TOWER

Based on Vibration Test and Long-term Observation

2. 構造 -2. 振動

鉄塔構造物	常時微動	人力加振
固有振動数	減衰定数	振動モード

正会員

○豊部 立*

TOYOBE Ryu

正会員

飛田 潤**

TOBITA Jun

正会員

福和 伸夫***

FUKUWA Nobuo

1. はじめに

1954年に完成した名古屋テレビ塔は、名古屋市のシンボルとして現在も市民に親しまれており、2005年には国の登録有形文化財に指定された。2011年7月の完全デジタルテレビ化によりアナログテレビ電波塔としての役目を終えたが、今後も長く保存していくことになっている。

そのためには、耐震性の確保が重要である。本建造物は、南海トラフの大地震に対する応答がかなり大きいと予想され、一方で登録文化財であるため大幅な外観の変更を伴う改修は適さないことなどから、基礎免震による耐震改修も検討されている。

以上の背景により本論文では、名古屋テレビ塔について、常時微動計測、人力加振実験及び継続的な振動観測を実施し、近接固有値の評価や多様な振動モードなどの振動特性について考察する。

2. 対象建造物概要

対象建造物は、愛知県名古屋市中区栄の久屋大通公園内に位置しており、アンテナ部分を含む最高高さ180m、塔体最高高さ約140mの自立式鉄塔である。図1に建造物概形及び観測点を、写真1に外観を示す。地上高さ約90mの位置に床面積約230m²の展望台が、高さ約20mの位置には合計床面積約2500m²の3層建屋が設置されており、それを結ぶエレベーターシャフトが塔体の中央を通っている。塔体の平面形状は正方形をしており、低い層ほど平面の面積が大きくなり柱脚が広がる形状をしている。4本の柱脚を2本のRC造アーチが対角線上につないでおり、これにより上部の建屋やエレベーターシャフトによる鉛直荷重を支持している。¹⁾

3. 計測概要

3.1 振動実験概要

振動実験は、2010年9月3～4日（第1回）、2011年7月28日（第2回）、2011年8月5日（第3回）の計3回にわたり、常時微動計測と人力加振実験を実施した。図

1に観測点配置を示す。

常時微動計測は図1中の☆印の動コイル型微動計で収録を行った。第1回目は深夜3時～5時の120分間、第2回目は午前8時から約20分間、計測を行った。約1年離れた計測日による固有振動数の変化はなかったため、本論における微動記録の分析では第1回目の記録を用いる。

テレビ塔から約5km離れた名古屋地方気象台で観測された実験時の気象条件は、第1回目の常時微動計測時では気温：27.8℃、風向：北北西、平均風速：2.6m/s、第3回目の人力加振実験時では気温：27.6℃、風向：東南東、平均風速：3.4m/sであった。

人力加振実験は、加振力やその偏心による影響を考慮して計3回にわたり実施した。各回での応答に大きな変化はなかったため、本論では観測点数が最も充実している第3回の記録について分析を行う。人力加振実験時には、☆印のセンサーの他に、図1中に△印で示した動コイル型微動計と、▲印で示したサーボ型加速度計を用いて記録の収録を行った。加振振動数は常時微動記録から決定し、加振方向は対象建造物の正方形の平面形状を考慮して東西・南北・北東・北西の4方向へ加振を行った。本論では加振する4方向を東西、南北、北東、北西と漢字で表記し、その方向の振幅成分をそれぞれEW、NS、NE、NWとアルファベットで表記する。加振場所は展望台床面で、1分間の拍数(bpm:beats per minute)を整数で設定する電子メトロノームに合わせて加振を行った。

加振方法は、加振振動数が1Hz以下の場合は加振者が直立した状態から左右に体重移動を行い、1往復で1周期として加振した。1Hz以上の加振では、塔体骨組みを1周期に1回のテンポで水平方向に押し、重心移動することで加振した。ねじれ加振では、鉛直上から見て右回転の方向に加振を行った。

3.2 継続的観測概要

微動計による観測とは別に、地震計（加速度計）を展

*名古屋大学大学院環境学研究科 大学院生

**名古屋大学災害対策室 教授・工博

***名古屋大学大学院環境学研究科 教授・工博

Graduate Student, Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University

Prof., Disaster Management Office, Nagoya University, Dr. Eng.

Prof., Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, Dr. Eng.

展望台内の南西側床面と地下1階に1台ずつ設置し、継続的に強震観測を実施している。地震計では水平2成分と鉛直成分の観測が可能で、いずれかの成分の振幅が2galを上回った際にトリガーが作動する。展望台南西に設置した地震計では、2010年8月から2011年3月末までの観測期間で約3000の強風時微動記録を収録した。

4. 基本的な振動特性

4.1 固有振動数と減衰定数

第1回の振動実験において展望台中央(sdcc)で観測された120分間の微動時速度記録から計算したフーリエスペクトルを図2に示す。ここでは、163.84秒×43区間の速度記録からアンサンブル平均したものを示している。

図2から、10Hz以下の振動数範囲で多数のピークが存在し、特に2Hzより振動数の低い範囲で明瞭な5つのピークが確認できる。これらの5つのピークを振動数の低い方からピークⅠ～Ⅴとし、人力加振実験の加振振動数とした。この図では、それぞれのピークでEW成分とNS成分のピーク位置が非常に近接している。

図3では展望台中央(sdcc)のフーリエスペクトルを0.775Hz～0.800Hzの範囲で示し、座標軸を回転することでピークⅡの振動主軸を検討している。E方向を $\theta=0$ とし座標軸を左回りに10°毎に回転した成分を示している。また、ここでは展望台中央(sdcc)で収録された120分間の微動記録を655.36秒間×10区間でアンサンブル平均してフーリエスペクトルを計算している。

この図からピークⅡ付近の振動数範囲では0.781Hzと0.792Hzに左右に割れて2つのピークが存在していることが分かり、座標軸の回転に伴うピーク形状の変化から、その振動主軸は前者では約60°、後者では約140°であり、NE方向、NW方向に近い方向にあると考えられる。

同様に2Hzより低い振動数範囲に存在する5つのピーク付近をそれぞれ拡大したものを図4に示す。ここでは、EW, NS, NE, NWの4成分について検討しており、各ピークとも上段にEW, NS成分を、下段にNE, NW成分を示している。振動数刻みは図3と同様である。図4に示したフーリエスペクトルのピーク形状からピークⅠ～Ⅲ、ピークⅤでの振動主軸はNE方向、NW方向に近い方向であると考えられ、いずれのピークでもNE方向に比べてNW方向の固有振動数が若干高いことが確認できる。ここから読み取ったNE, NW成分のピーク振動数を表1に示す。なお、ピークⅣは後に述べるようにねじれモードである。

展望台中央(sdcc)での観測記録から推定した微動時の減衰定数を表2に示す。推定値は、2Hz以下の振動数範囲に存在する5つのピークにそれぞれバンドパスフィル

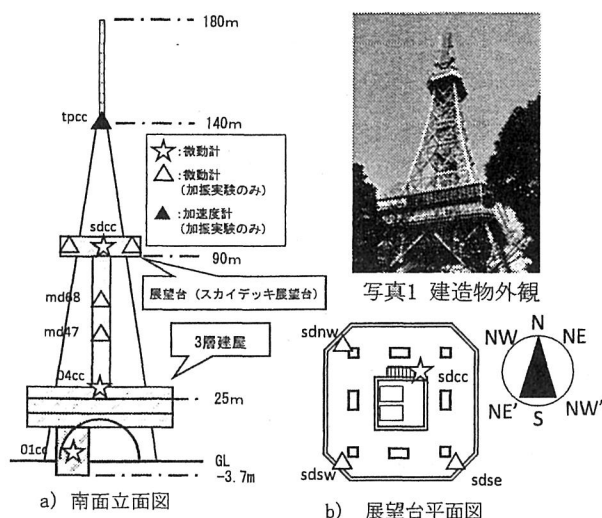


図1 建造物形状と観測点

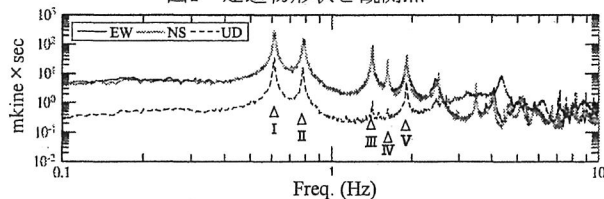


図2 微動時フーリエスペクトル

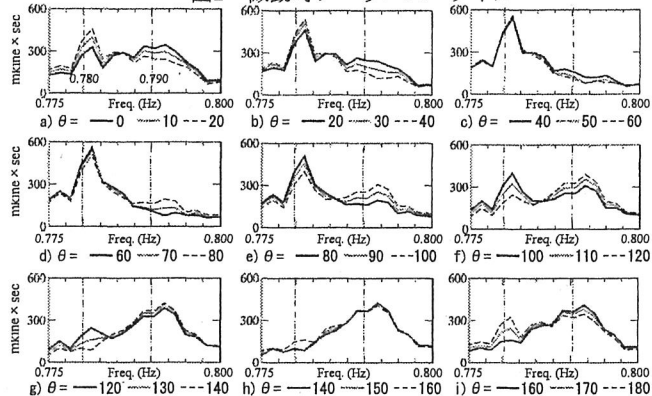


図3 微動時フーリエスペクトル (ピークⅡ付近拡大)

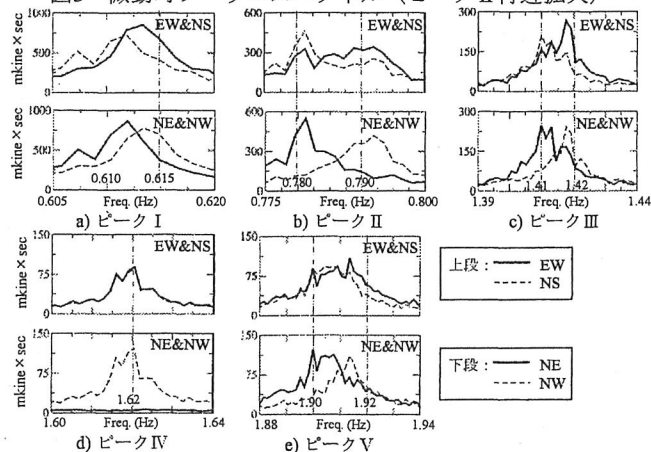


図4 微動時フーリエスペクトル (各ピーク付近拡大)

タを施し、RD 法によって生成した自由振動波形に 1 自由度系の自由振動波形フィッティングを行い推定したものを示しており、振動主軸の方向を踏まえて NE,NW 成分について検討している。ここでは、表 3 に示した区間で、その外側に幅 0.01Hz のコサインテーパを有するバンドパスフィルタを施し、各振動数成分の抽出を行った。フィッティングの評価区間は、自由振動波形の極値の振幅が初期振幅のおよそ 2 分の 1 になる長さで設定し、データの重ね合わせ数は 8000~27000 個であった。表 2 の推定値では、すべてのモードで 1% を大きく下回る値を示し、対象建造物の減衰定数の小ささが確認できる。

また、人力加振後の自由振動波形から推定した固有振動数と減衰定数についても表 1 と表 2 にまとめて示す。微動時に比べて、固有振動数は低く、減衰定数は大きい値を示しており、振幅依存性の影響がみられる。なお、ピーク IV のねじれ加振は NW 成分について推定している。

4.2 モード形状

図 5、図 6 にアニメーションによる可視化ツール²⁾を用いて描画した加振時の立体振動挙動とその軌跡を示す。図 6 ではピーク I~III、ピーク V での加振時立体振動挙動を水平方向視点と鉛直方向視点に分けて示している。なお、加振方向によるモード形状の大きな違いはなかったため、ここでは北東方向加振について示している。

図 6a),b) に示したピーク I、ピーク II では全体に曲げ変形しており、展望台より高い部分で振幅に差がある。図 6c),d) に示したピーク III とピーク V では、振動の節の高さに違いがあるが、全体にほぼ同形状をしており、140 m より上で異なる形状をしていると考えられる。

図 5 ではピーク IV を対象としたねじれ加振時の振動挙動とその軌跡を鉛直上視点で示しており、図心を中心としたねじれ振動の様子が確認できる。

5. 振動特性の季節変動

5.1 分析に用いる記録

本節の分析では、展望台南西に常時設置されている地震計で 2010 年 8 月~2011 年 3 月に収録された微動記録を用いる。月別の観測記録数を表 4 に、平均気温・平均風速を図 7 に示す。風速の大きい 12 月~3 月で観測記録数が多いが、完全に対応しているわけではない。

日別の観測記録数を図 8 に、時間帯別の観測記録数を図 9 に示す。ここでは一例として 2010 年 8 月と 2011 年 2 月について示す。図 8 を見ると記録数は日によるばらつきが大きく、休日で観測記録数が多い。図 9 を見ると、多くの記録が 8 時~20 時の営業時間内に収録されており、トリガーのかかる原因としては、エレベーター稼働や展望台内の人の動きによる影響が大きいと考えられる。

5.2 振動特性の季節変動

図 8、図 9 より収録記録は、ひと月を通して、特定の期間に集中することはなく、また収録された時間帯も各月でほぼ同じである。そこで全観測記録を月毎に分類し、各月での振動特性を推定し、その変動を検討する。

各観測記録にバンドパスフィルタを施した後、極値を始点とした 40 秒間の波形を一定数ずつ抽出し、RD 法を用いて重ね合わせ生成した自由振動波形に、1 自由度の自由振動波形をフィッティングし、振動特性の推定を行った。各ピーク振動数成分を抽出するバンドパスフィルタの幅は表 3 に示したものと同様である。

推定結果と自由振動波形の初期振幅を図 10 に示す。固有振動数の推定値を見る

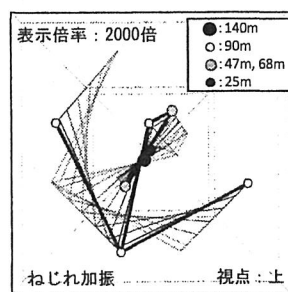


図5 ねじれ加振時振動挙動 (ピーク IV)

表 1 固有振動数 (微動時/加振時) (単位: Hz)					
	対象ピーク				
	I	II	III	IV	V
NE	0.612 / 0.606	0.781 / 0.778	1.410 / 1.406	- / -	1.900 / 1.894
NW	0.613 / 0.612	0.792 / 0.785	1.418 / 1.411	1.620 / 1.609	1.913 / 1.906

表 2 減衰定数 (微動時/加振時) (単位: %)					
	対象ピーク				
	I	II	III	IV	V
NE	0.28 / 0.33	0.31 / 0.40	0.22 / 0.48	0.30 / -	0.29 / 0.29
NW	0.32 / 0.31	0.30 / 0.36	0.18 / 0.52	0.19 / 0.38	0.24 / 0.36

表 3 バンドパスフィルタ区間 (単位: Hz)					
	対象ピーク				
	I	II	III	IV	V
	0.58~0.65	0.75~0.85	1.35~1.50	1.58~1.66	1.80~2.00

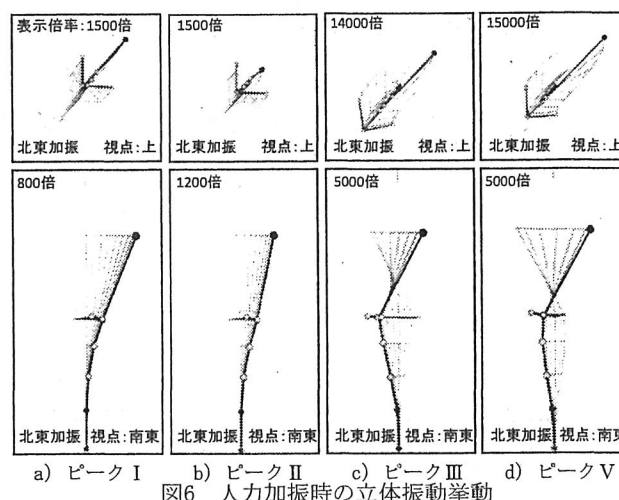


図6 人力加振時の立体振動挙動

と、夏で小さく、冬で大きい。減衰定数の値に着目すると、図10a)のピークⅠ、図10e)のピークⅤなど一部で、振幅と対応する傾向もみられる。しかし、これらの変動には、気温や風向・風速など種々の要因が複合的に影響していると考えられるため、今後は個別の要因が振動特性に与える影響を詳細に把握する。

6. まとめ

名古屋テレビ塔について常時微動計測、人力加振実験、継続的な振動観測を行い、振動特性の把握を行った。以下に分析結果をまとめる

- 1) 対象建造物には多数の固有モードが存在し、特に低次から順に約0.61Hz、0.79Hz、1.42Hz、1.62Hz、1.91Hzの5つの振動数が卓越する。
- 2) ねじれモード(1.62Hz)以外の固有モードでの振動の主軸は塔体平面のほぼ対角線方向にあり、2方向の固有振動数は若干異なる。
- 3) 上記の5つのモードの減衰定数は、各方向とも0.2%~0.4%となり、小さい値を示す。
- 4) 高さ方向のモード形状は、0.61Hzと0.79Hzでは全体が同方向に変位しており、主に展望台より上で振幅が異なる。1.42Hzと1.91Hzでは高さ140m以下で2次のモード形をしており、その相違は明確ではない。
- 5) 継続的な振動観測記録から、固有振動数は夏で低く、冬では若干高くなる傾向があり、減衰定数は振幅増大にともない大きくなる傾向が見られる。

謝辞

本研究で実施した振動実験や継続的な振動観測に関して、名古屋テレビ塔株式会社、日建設計の方々に多大なご協力をいただきました。記して感謝いたします。

参考文献

- 1) 内藤多伸：名古屋テレビ塔の設計計画、日本建築学会研究報告、29-1、1954.10.15、pp.109-110
- 2) 廣野衣美、牧原信一郎、福和伸夫、飛田潤、護雅史、小島宏章：多点多成分振動観測記録の効果的な分析を支援する動画アプリケーションの開発、日本建築学会技術報告集、第14巻、第28号、2008.10、pp.423-428

表4 観測記録数

月	記録数
8	254
9	170
10	258
11	293
12	513
1	371
2	339
3	507

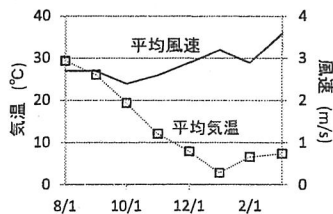


図7 月別の気象条件
(左軸：気温、右軸：風速)

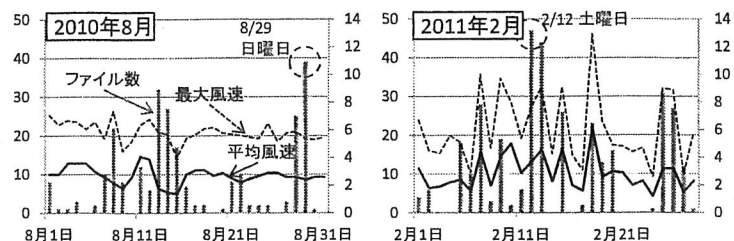


図8 日別の観測記録数(左軸)と平均風速・最大風速(右軸,単位:m/s)

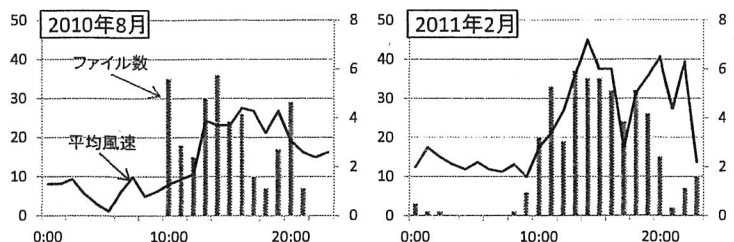


図9 時間帯別の観測記録数(左軸)と平均風速(右軸,単位:m/s)

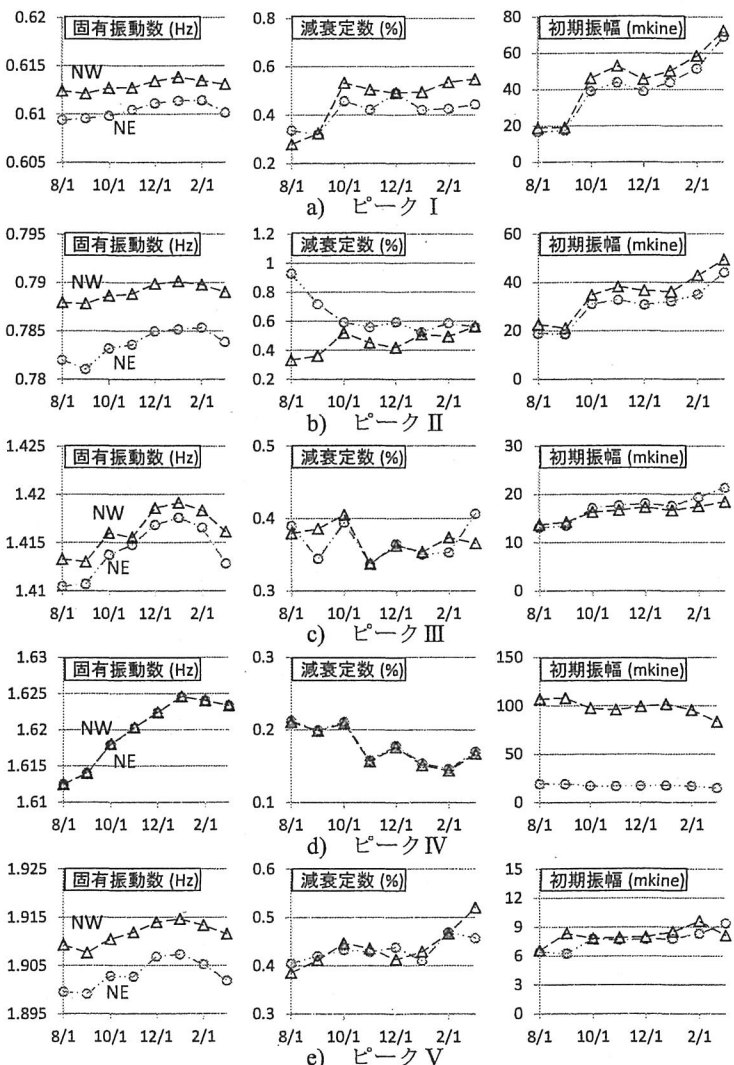


図10 振動特性の月変動