

超高压電子顕微鏡の振動特性

The Vibration Characteristics of High Voltage Electron Microscope

森田 千明^a, 荒井 重勇^a, 澤田 義博^{b, c}

Chiaki Morita, Shigeo Arai and Yoshihiro Sawada

^a名古屋大学エコトピア科学研究所

^b名古屋大学工学研究科

^c現所属(財)地震予知総合研究振興会

要旨 名古屋大学を含む各機関の超高压電子顕微鏡の地盤振動、基礎、支持構造物および架台の振動特性を計測すると共に、吊り下げ架台除振方式(：日立製)と2重基礎床除振方式(：日本電子製)の特徴を検証した。その結果、本学の超高压電子顕微鏡は、交通振動などの地盤振動レベルが高い場所に立地していること、顕微鏡架台を支える支持構造物の振動増幅特性や除振装置のロックング振動への対策が必要であること等が明らかとなった。

キーワード：環境振動、吊り下げ架台、2重基礎床、振動伝達特性

1. はじめに

周知のように、超高压電子顕微鏡(以後、超高压電頭)の大きさと重量は、加速電圧と共に増大する。即ち、加速管の大きさと重量は、各段の電極・絶縁碍子・真空界面の3重点の電界を緩和して沿面放電を阻止する電極形状及び、加速管の真空度とその質により決まる。また、焦点距離(・レンズ定数)を一定とするには、相対論補正的に高くなる加速電圧の平方根に比例して、コイル巻数や励磁電流が大きくなる。その他に、X線遮蔽対策による重量増加も加わり、レンズ鏡筒の大きさと重量が必然的に増大する。そのため、加速電圧300～400kVの中高電圧電子顕微鏡に比べて外部振動に敏感となり、立地点の地盤や振動環境の十分な事前調査を含めた防振対策は、装置設計上の重要な要素となる。

そこで、名古屋大学(以後、名大)の超高压電頭においては、高分解能観察時の振動による像障害の定性的かつ定量的な解明を目的とする強制加振実験¹⁾及び、振動低減を図る一つの方策であるアクティブ除振実験²⁾を行った。また、図1に示す北海道大学(以後、北大)の日本電子：JEM-ARM1300、日立製作所基礎研究所(以後、日立基礎研)の

日立：H-1000FT、物質・材料研究機構として統合された旧無機材質研究所の日立：H-1500、旧金属材料技術研究所の日本電子：JEM-ARM1000について、各機関の環境振動と顕微鏡の振動を計測し、シミュレーションによる振動低減方策の検討を行った^{3,4)}。

これらの各種検討のうち、本稿ではページ数の制約もあることから、主として名大、日立基礎研、および北大における振動環境と超高压電頭の振動特性の概要を述べる。

2. 振動除振方式

超高压電頭の振動低減方策には、装置のほぼ重心点の近傍となるデッキプレートに除振装置を配置した、以後「吊り下げ架台除振方式」と称する日立製作所方式、上基礎(あるいは除振台)にカウンターウエイトを持たせて装置の重心点と除振装置を低い位置に下げた、以後「2重基礎床除振方式」と称する日本電子方式がある。

2.1 吊り下げ架台除振方式

図2(a)に名大：H-1250STの「吊り下げ架台除振方式」の概念図を示す。本装置は電子銃・加速管と高電圧発生装置を二つのタンクに分離収納し、高圧ケーブルによって接続する2タンク・ケーブル結合である。

超高压電頭本体の除振は、4本の鋼管支柱による支持構造物上に除振装置として4個の積層ゴム(図2(c))とさらに減衰材としてエラストマーを使用した除振ダンパー4個を組み合わせ配置し、その上にデッキプレートを置く。さらに、デッキプレート上に電子銃・加速管を収納した高圧タンクを置き、デッキプレートを介した4本の鋼管支柱による吊り下げ架台上にレンズ鏡体を配置している。積層ゴムは、せん断方向には柔らかい剛性を保ったまま圧縮方向の剛性を高める

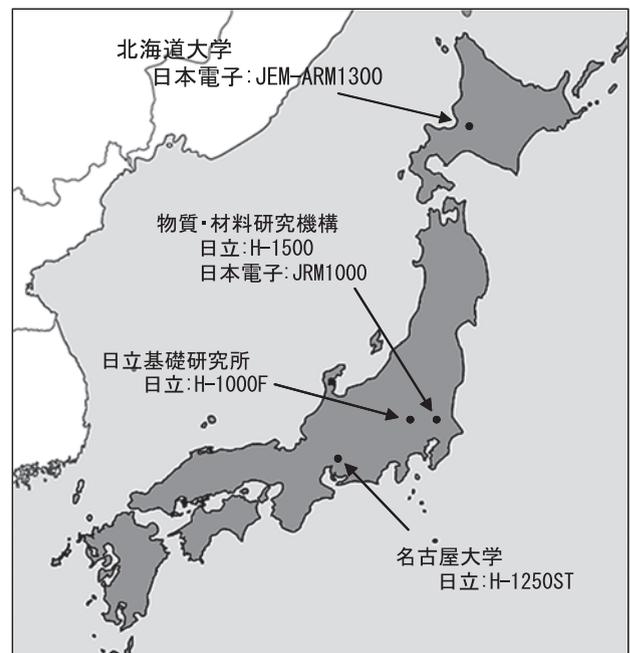


図1 計測地点と超高压電子顕微鏡

^a〒464-8603 名古屋市千種区不老町
TEL & FAX: 052-789-4524
E-mail: morita@esi.nagoya-u.ac.jp
2009年11月16日受付

ことができ、高振動数での絶縁性が良い特徴がある。一方、耐熱性、耐寒性、耐候性などが劣ることから、周辺環境には十分注意する必要がある。

その後、設置された日立基礎研：H-1000FTは、電子銃・加速管、電子銃制御用電源及び、高電圧発生装置を三つのタンクに分離収納し、高圧ケーブルによって接続する3タンク・ケーブル結合である。さらに、レンズ鏡体は、周辺から操作・観察機能を隔離した遠隔操作としている。

超高電圧顕微鏡本体の除振は、床基礎から立ち上げた円筒形コンクリート支持構造物上に4個の複合除振ダンパーを配置し、その上にデッキプレートを置く。支持構造物は4分割した開口部を可能な限り狭くし、円筒柱に近い形状となっている。さらに、デッキプレート上に電子銃・加速管を収納した高圧タンクを配置し、デッキプレートを介して強化リブを入れた円筒形吊り下げ架台にレンズ鏡体を配置して、支持構造物と吊り下げ架台のさらなる剛性強化が図られている。複合マウントはコイルバネと高分子化合物を組み合わせ、弾性体と粘弾性体を複合化した除振マウントで、ロッキング振動を抑える効果がある。

2.2 2重基礎床除振方式

図2(b)に日本電子の「2重基礎床除振方式」の概念図を示す。旧金材研：JEM-ARM 1000、北大：JEM-ARM1300は基本的な設計変更がなく、上基礎を含むカウンターウエイト(約300t)により装置の重心を下げ、それを支える下基礎上に除振装置として26個の空気ばね(図2(d))と減衰材としてシリコンオイルを使用した4個の減衰ダンパーを配置し、その上に上基礎を置く。さらに、上基礎上に組み上げた6本の支柱による構造物(以後、トラス)に電子銃・加速管と高電圧発生装置に分離収納し、二つの高圧タンクをパイプで連結したツインタンクとレンズ鏡体を配置している。

空気バネ方式は、一般に空気供給源、補助タンク、自動高さ調節弁と組み合わせて用いられ、構造はやや複雑であるが、他のバネには見られない高い調節機能を持つ特徴がある。即ち、一般の軟弱地盤では2～3 Hzに卓越振動数を有する場合が多いので、除振装置としてはより低い固有振動数が求められるが、空気バネ方式は、水平0.5、鉛直1.0 Hzと超低振動数を実現し、粘性ダンパーを併用することにより共振倍率も低く抑えられている⁵⁾。また、耐熱性、耐寒性、耐候性なども優れている。

3. 振動計測結果

吊り下げ架台除振方式の振動計測は、図2(a)に示すように、振動伝達経路となる地表、基礎、支持構造物上、デッキプレート、吊り下げ架台の5測点で実施した。2重基礎床除振方式の振動計測は、図2(b)に示すように、地表、下基礎、上基礎、トラス上の4測点で実施した。従って、後述するように、各除振方式の振動低減効果は、吊り下げ方式では地表と顕微鏡架台、2重基礎方式では地表と顕微鏡上基礎の間のスペクトルを比較した図(図4、図7)に最も端的に表れて

いる。

計測機器は、過減衰方式加速度センサーの3成分地震計(センサー感度：1 V/G、測定範囲：± 2G、振動特性：0.1～100 Hz)を用いて、30 Hzのハイカットフィルターを通してデジタル収録した。

3.1 顕微鏡基礎における環境振動

最初に、各機関の顕微鏡基礎における環境振動について調べた。図3は、一日のうちで最も静穏な深夜の0時～5時の時間帯(静穏時)の1分間における最大加速度値を時系列的に示したものである。

水平成分・鉛直成分ともに、名大の場合は0.1 gal、旧金材研は0.4 gal、北大は0.02 gal、日立基礎研は0.01 gal程度を示しており、名大と日立基礎研では、振動レベルに10倍の差がある。

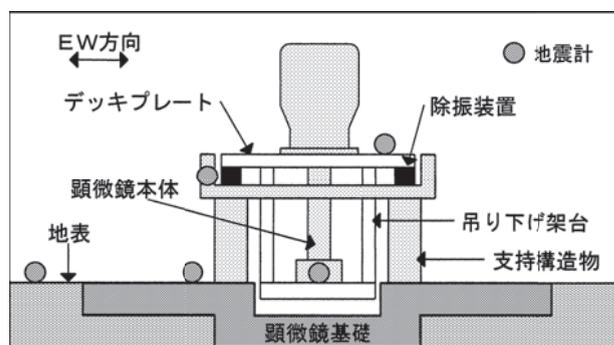


図2(a) 日立：吊り下げ除振方式

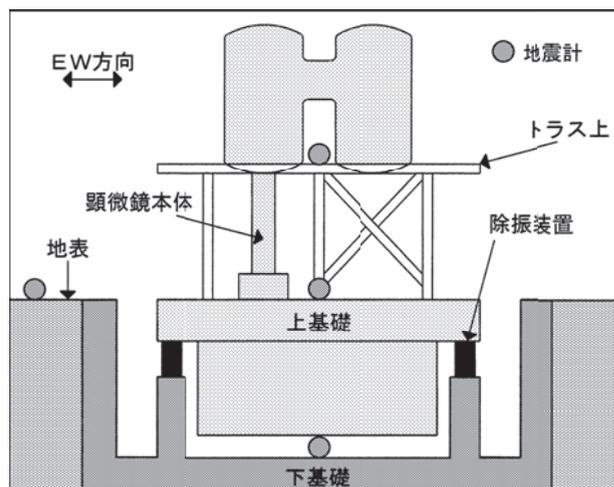


図2(b) 日本電子：2重基礎床除振方式



図2(c) 積層ゴム



図2(d) 空気バネ

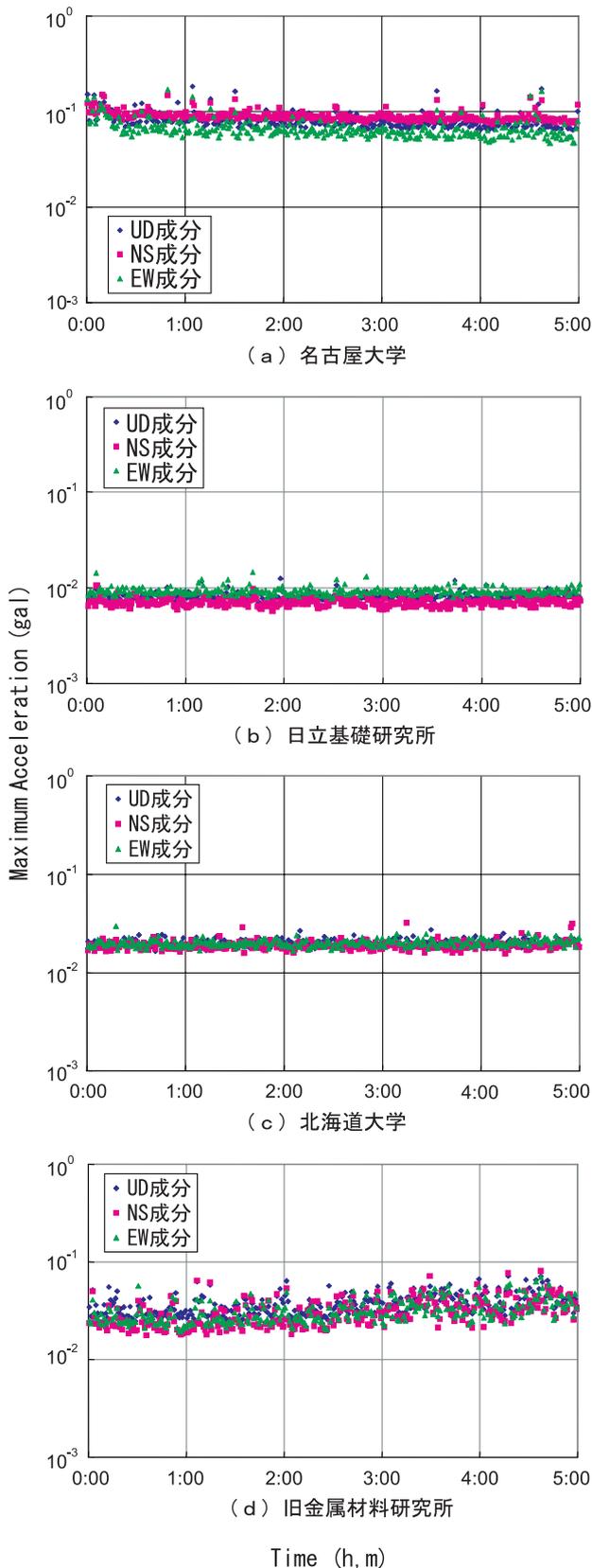


図3 立地地点の顕微鏡基礎における環境振動
 ◆ : UD成分, ■ : NS成分, ▲ : UD成分

こうした振動レベルの違いの主な要因は、顕微鏡の立地地点と周辺の交通振動の多い幹線道路との距離が考えられる。名大は都市域である東山キャンパスの北端にあり、道路までの距離が約20mと近い。旧金属材料研はつくば学園研究都市にあり、道路までの距離が約50mである。北大は都市域に立地しているが、道路までの距離が約500mと離れている。日立基礎研は強固な地盤であることその他、広大な敷地内に設置されており、周辺に道路がないことが振動のレベルが低い要因と考えられる。

3.2 吊り下げ架台除振方式の振動特性

1) 地表と顕微鏡架台の振動

図4に、名大と日立基礎研の昼間時における電子顕微鏡建屋付近の地表(—)と顕微鏡架台(---)の振動の加速度フーリエスペクトルを示す。

名大の地表スペクトルは、水平、鉛直成分ともに10Hz以上で振幅が大きくなっているが、その要因の一つは道路交通振動である。顕微鏡架台のスペクトルは、除振装置の卓越振動数に相当する水平成分1.5Hz、垂直成分4.6Hzにピークが見られる。その他、水平成分では、3Hzおよび10Hz以上にもスペクトルのピークが見られる。前者は顕微鏡架台のロッキング振動、後者は顕微鏡架台の支持構造物の振動に相当する。

一方、日立基礎研の顕微鏡架台のスペクトルは、名大のような10Hz以上で大きな振幅はないが、除振装置の卓越振動数に相当する水平成分1.3Hz、垂直成分3.6Hzにピークが見られる。

2) 基礎と支持構造物間の振動伝達特性

図5に、支持構造物の振動スペクトルを基礎の振動スペクトルで除した(支持構造物/基礎)の振動伝達特性を示す。

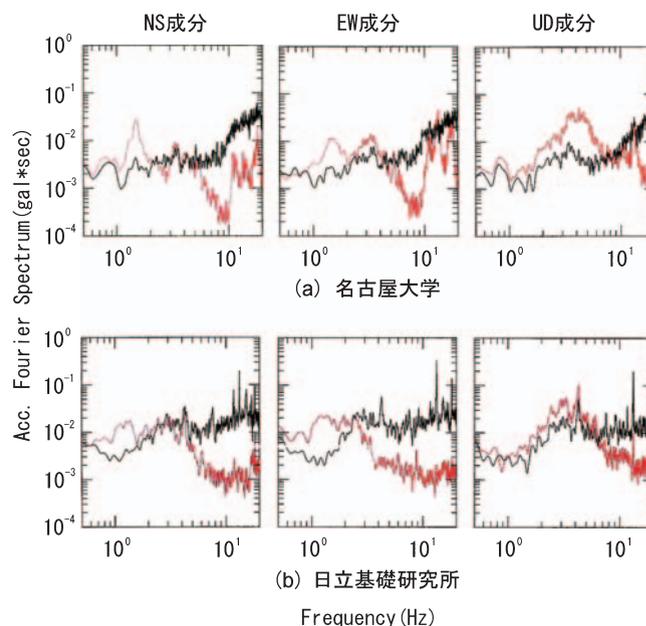


図4 地表と顕微鏡架台の振動加速度フーリエスペクトル
 — : 電子顕微鏡建屋付近の地表, --- : 顕微鏡架台

名大では、水平成分の10～20 Hzにおいて顕著な増幅が見られ、NS成分の13 Hz付近で4倍、EW成分の17 Hz付近で10倍近い。この増幅は既述のように、支持構造物の剛性が不十分なことを示唆している。

日立基礎研では、NS成分の17 Hzで2倍、EW成分の16 Hzの1.9倍の増幅があるが、名大のような大きな増幅は見られない。即ち、円筒形状に近い形状とした支持構造により、水平方向の増幅が顕著に抑えられている。なお、名大、日立基礎研ともに鉛直成分では、特に増幅は見られない。

3) 基礎と吊り下げ架台間の振動伝達特性

図6に、吊り下げ架台上の振動スペクトルを基礎の振動スペクトルで除した(吊り下げ架台/基礎)の振動伝達特性を示す。

名大では水平成分の1.5 Hz付近で5～6倍、3～4 Hzで

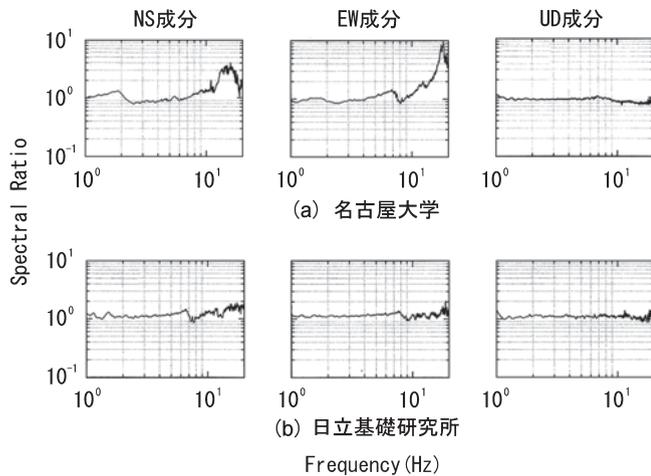


図5 (支持構造物/基礎)のスペクトル比

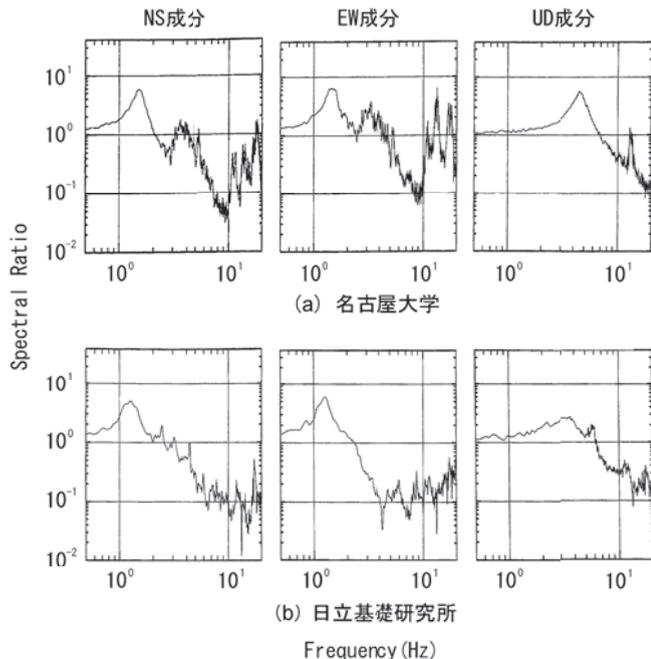


図6 (吊り下げ架台/基礎)のスペクトル比

1～4倍の増幅がある。前者は吊り下げ架台の水平振動、後者はロッキング振動と考えられるほか、10 Hz以上においても顕著な増幅がある。鉛直成分は4.6 Hzで5.5倍の増幅がある。

日立基礎研では、水平成分1.3 Hz付近で5～6倍の増幅があるが、ロッキング振動や10 Hz以上での増幅が認められない。鉛直成分では、3.6 Hzで2.7倍の増幅がある。

以上より、吊り下げ架台除振方式は、概ね水平成分の1.3～1.5 Hz、鉛直成分の3～5 Hz付近に卓越振動数がある。また、名大に見られた水平成分の3～5 Hz付近のロッキング振動は、日立基礎研には見られない。これは、日立基礎研のコイルバネと高分子化合物を組み合わせた比較的新しい複合ダンパーの性能向上の効果と考えられる。

3.3 2重基礎床除振方式の振動特性

1) 地表と顕微鏡上基礎の振動

図7に、北大の電子顕微鏡建屋付近の地表(—)と顕微鏡上基礎(---)における振動の加速度フーリエスペクトルを示す。

地表の振動スペクトルは1 Hz付近で振幅が小さくなる傾向がある。また、上基礎のスペクトルは、除振装置の卓越振動数に相当する0.6 Hzにピークが見られるが、1～2 Hzより高振動数側で地表の振動に比して顕著な低減効果を示している。

2) 下基礎と上基礎間の振動伝達特性

図8に、上基礎のスペクトルを下基礎のスペクトルで除した(上基礎/下基礎)の振動伝達特性を示す。

水平成分0.6 Hzで2.0倍、10 Hz以上でも増幅が見られるが、増幅特性は小さいといえる。鉛直成分では1.1 Hzで

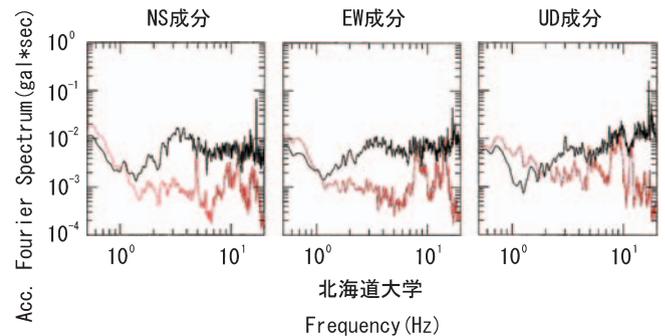


図7 地表と顕微鏡上基礎の振動加速度フーリエスペクトル
—: 電子顕微鏡建屋付近の地表, ---: 顕微鏡上基礎

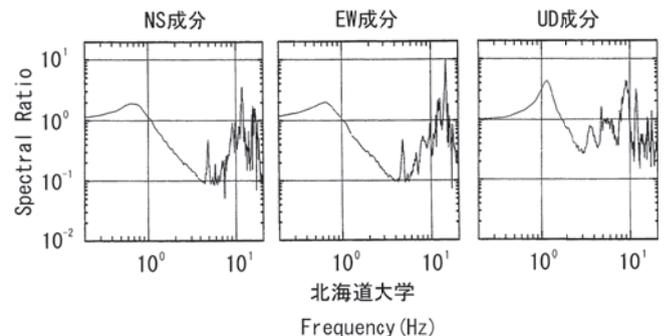


図8 (上基礎/下基礎)のスペクトル比

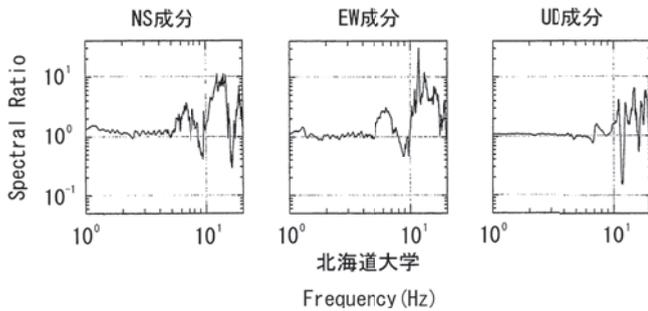


図9 (トラス/上基礎)のスペクトル比

4.2 倍のほか 10 Hz 付近にもピークがある。

3) 上基礎とトラス間の振動伝達特性

図9に、トラスの振動スペクトルを上基礎の振動スペクトルで除した(トラス/上基礎)の振動伝達特性を示す。

水平のNS成分14 Hzで10倍、EW成分11 Hzで30倍の増幅があり、鉛直成分は10 Hz以上の振動数に増幅が認められ、トラスの剛性を一層強固にすることが望まれる。

4. おわりに

名大の超高压頭を含む各機関の超高压電頭の振動を計測し、振動環境、振動特性や除振性能を明らかにした。日立基礎研の超高压電頭は振動環境の最も良い場所に立地している。名大の超高压電頭は道路に近く、他の機関に比べて振動環境が悪いことが確認された。さらに、名大の吊り下げ架台

除振方式は、支持構造物の剛性強化、除振装置の積層ゴムによるロッキング振動の対策が必要なが判明した。北大の2重基礎床除振方式は、空気ばねの限界に近い低振動数の固有振動数を実現し、吊り下げ架台方式に比べより高い徐振効果が得られている。ただし、トラスの一層の剛性強化が望まれる。

謝 辞

今回の計測では、北海道大学、旧無機材質研究所、旧金属材料技術研究所および、日立基礎研究所の各機関の顕微鏡関係者から多大なご協力を戴いた。また、計測に際しては、当時の土木工学研究室の大学院生諸君の協力を得た。ここに記して深く感謝の意を表します。

文 献

- 1) 森田千明, 荒井重勇, 畔柳友章, 日比野教倫夫, 寺村 彰, 澤田義博: 日本電子顕微鏡学会第55回学術講演会予稿集, 220 (1999)
- 2) 森田千明, 荒井重勇, 松浦 章, 南雲秀樹, 澤田義博: 日本電子顕微鏡学会第58回学術講演会予稿集, 245 (2002)
- 3) 森田千明, 荒井重勇, 澤田義博, 南雲秀樹, 飛田 潤, 石黒雅美: 日本電子顕微鏡学会第59回学術講演会予稿集, 193 (2003)
- 4) 澤田義博, 南雲秀樹, 飛田 潤, 石黒雅美: 物理探査学会第108回学術講演論文集, 274-277 (2003)
- 5) 田中宏幸, 岸 武夫, 小林直明, 石沢寛明, 大崎光明: 昭和電線レビュー, 47(2), 144-148 (1997)