

東京大学本郷キャンパス

安田講堂 耐震改修後 常時微動測定 報告書

東京大学 生産技術研究所

中埜研究室

目次

- 1 概要
- 2 常時微動測定
 - 2.1 建物概要
 - 2.2 耐震改修工事概要
 - 2.3 測定方針および測定方法
 - 2.4 測定位置
 - 2.5 測定結果
 - 2.5.1 各計測ケースの結果および考察
 - 2.5.2 減衰特性
 - 2.5.3 基礎固定時における振動モード性状の推定
 - 2.5.4 階段室が講堂の振動性状に与える影響
3. まとめ

1 概要

本報告は、東京大学本郷キャンパス内に立地する安田講堂（大正 15 年（1926 年）竣工，地下 1 階，地上 5 階（一部 9 階）建ての鉄筋コンクリート造（一部鉄骨造）建物）における耐震改修前後の常時微動を計測し，その振動性状の変化をまとめたものである。本対象建物では，2010 年度から耐震補強を含めた全面改修が行われており，改修前の調査は，東京大学生産技術研究所 中埜研究室 東京大学本郷キャンパス 安田講堂 耐震改修後 常時微動測定 報告書（速報）^[1]を参照されたい。本報告では，改修後の常時微動測定結果とその考察，および改修前後における振動性状を比較し検討を行っている。

調査メンバーおよび調査の日程は以下のとおりである。

■ 調査メンバー

中埜 良昭（東京大学生産技術研究所 教授）

崔 琥（東京大学生産技術研究所 助教）

松川 和人（東京大学生産技術研究所 助教）

李 煥九（東京大学大学院 工学系研究科 大学院生）

楊 勇（東京大学大学院 工学系研究科 大学院生）

浅井 竜也（東京大学大学院 工学系研究科 大学院生）

板倉 正英（東京大学大学院 工学系研究科 大学院生）

宋 在璟（東京大学大学院 工学系研究科 大学院生）

DEVJYOTI PAUL（東京大学大学院 工学系研究科 大学院生）

鈴木 彩夏（東京大学大学院 工学系研究科 大学院生）：本調査報告取りまとめ担当

ISKREN MIHAYLOV（東京大学大学院 工学系研究科 研究生）

調査協力：

高橋 健太（東京大学 施設部）

梅園 雅一（万建築設計事務所）

■ 調査日程

2015 年 2 月 22 日（日） 曇り一時雨

07：25 東京大学生産技術研究所 出発

08：05 東京大学本郷キャンパス 安田講堂 到着

08：10 計測ケース 6 の計測準備

08：20 計測ケース 6 の計測

08：20 計測ケース 6 の計測

09：10 ピックアップ設置場所の確認

10：30 計測ケース 4-3 の計測準備

安田講堂 耐震改修後(2015) 常時微動測定報告書

- 11 : 00 計測ケース 4-3 の計測
- 11 : 10 計測ケース 5-1 の計測準備
- 11 : 55 計測ケース 5-1 の計測
- 12 : 10 計測ケース 5-2 の計測準備
- 12 : 45 計測ケース 5-2 の計測
- 12 : 55 計測ケース 5-3 の計測準備
- 13 : 00 計測ケース 5-3 の計測
- 13 : 10 計測ケース 4-2 の計測準備
- 13 : 30 昼食
- 14 : 00 計測ケース 4-2 の計測準備
- 14 : 45 計測ケース 4-2 の計測
- 14 : 55 計測ケース 3-2 の計測準備
- 15 : 05 計測ケース 3-2 の計測
- 15 : 20 計測ケース 4-1 の計測準備
- 15 : 45 計測ケース 4-1 の計測
- 15 : 55 計測ケース 3-1 の計測準備
- 16 : 10 計測ケース 3-1 の計測
- 16 : 20 計測ケース 1-1 の計測準備
- 16 : 55 計測ケース 1-1 の計測
- 17 : 05 計測ケース 1-2 の計測準備
- 17 : 20 計測ケース 1-2 の計測
- 17 : 40 計測ケース 2 の計測準備
- 17 : 50 計測ケース 2 の計測
- 18 : 00 計測終了
- 18 : 50 東京大学本郷キャンパス 安田講堂 出発
- 19 : 10 東京大学生産技術研究所 到着, 解散

《参考文献》

- [1] 東京大学生産技術研究所 中埜研究室 : 東京大学本郷キャンパス 安田講堂 耐震改修後 常時微動測定 報告書 (速報)

2 常時微動測定

2.1 建物概要

東京大学本郷キャンパスに立地する安田講堂は、地下1階、地上4階（一部9階）建ての鉄筋コンクリート造建物（一部鉄骨造）で、最高高さは39.5mである。建物は平面的に大きく2つの部分に分けられ、建物東側半円形平面部（以下、講堂）、建物西側梁間4スパンの矩形平面部（以下、本館）からなる（図2-1参照）。本館3階にエントランスをもつこと、大講堂を有する講堂の4階は吹き抜けとなっていること、および建物周辺には大きな段差が存在することが大きな特徴である。

図2-2に基礎伏図、図2-3に地下1階伏図、図2-4に1階伏図、図2-5に3階伏図、図2-6に5階伏図、図2-7に9階伏図をそれぞれ示す。また、南北（桁行）方向において、図2-8に軸組図①（Y1通り）、図2-9に軸組図②（Y5通り）、東西（張間）方向において、図2-10に軸組図③（X1通り）、図2-11に軸組図④（X3通り）、図2-12に軸組図⑤（X9通り）、図2-13に軸組図⑥（X10通り）をそれぞれ示す。また、写真2-1に改修後の安田講堂全景、写真2-2に改修後の大講堂内観をそれぞれ示す。

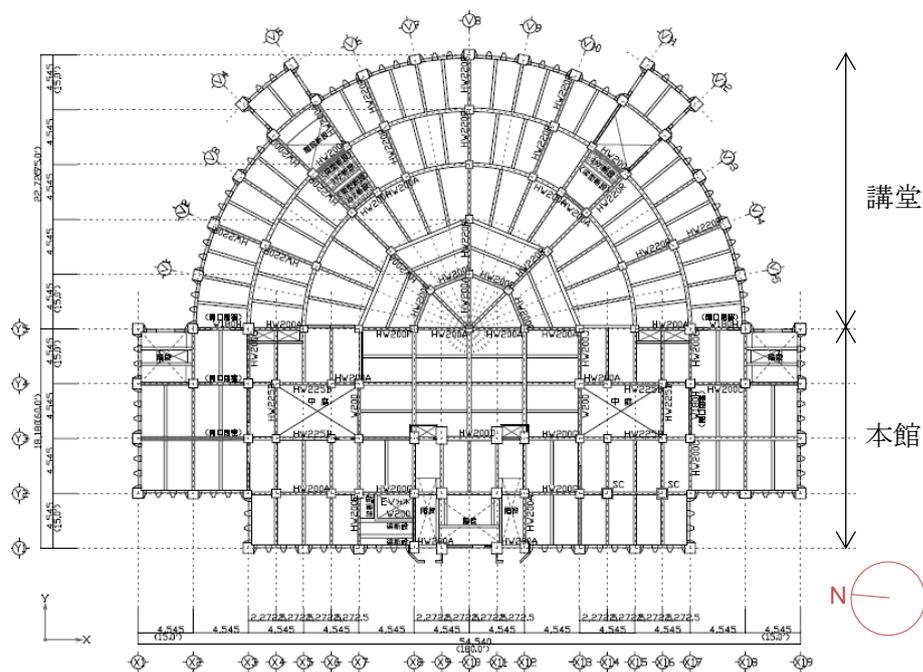


図 2-1 棟の名称

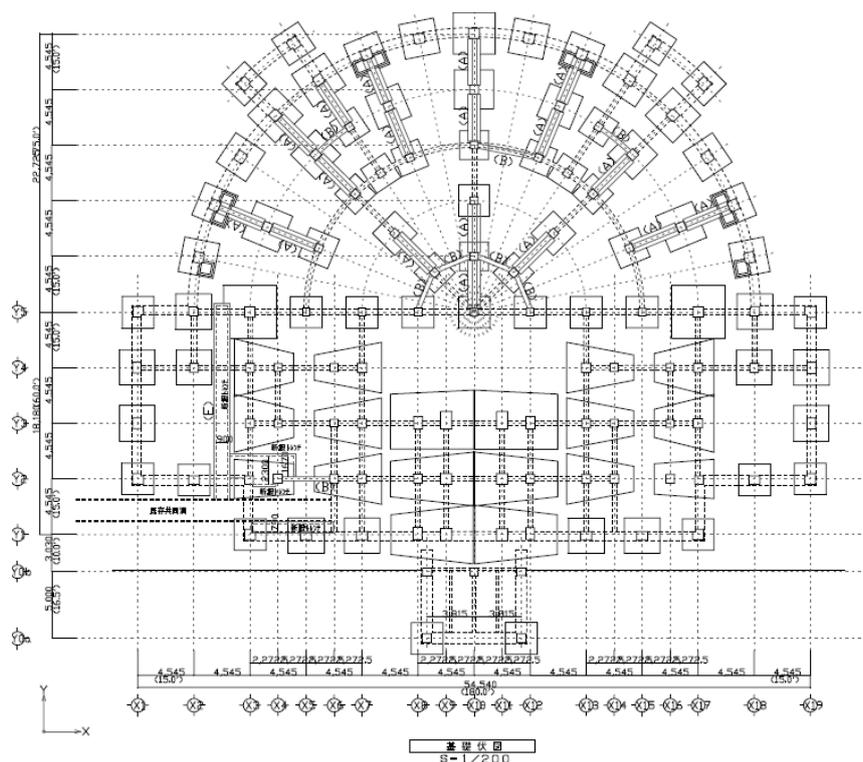


図 2-2 基礎伏図

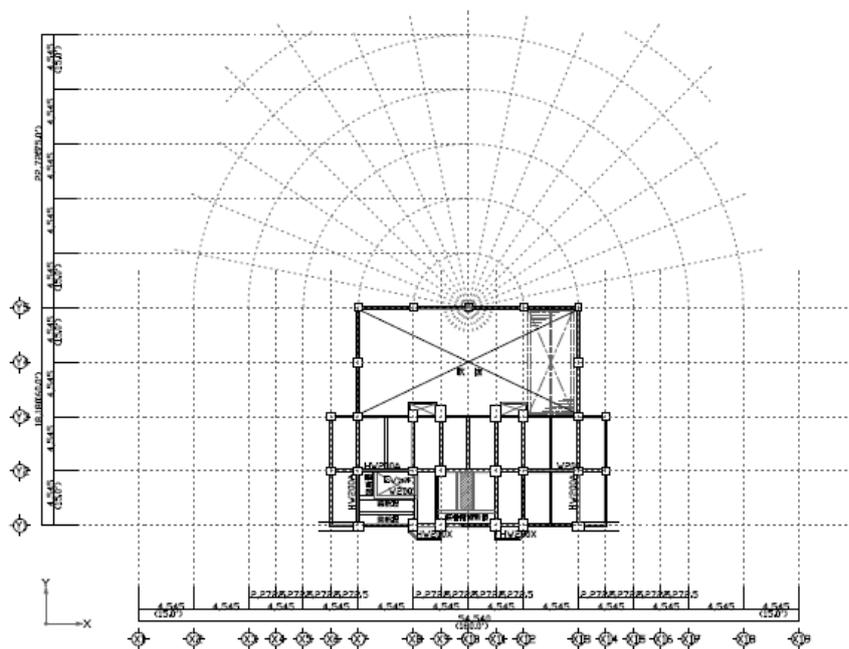


図 2-3 地下1階伏図

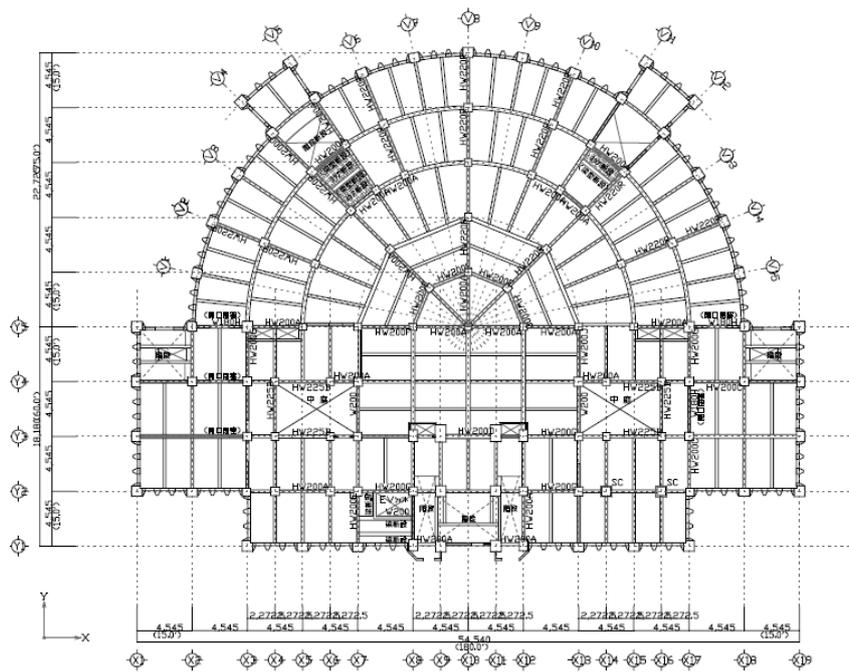


図 2-4 1階伏図

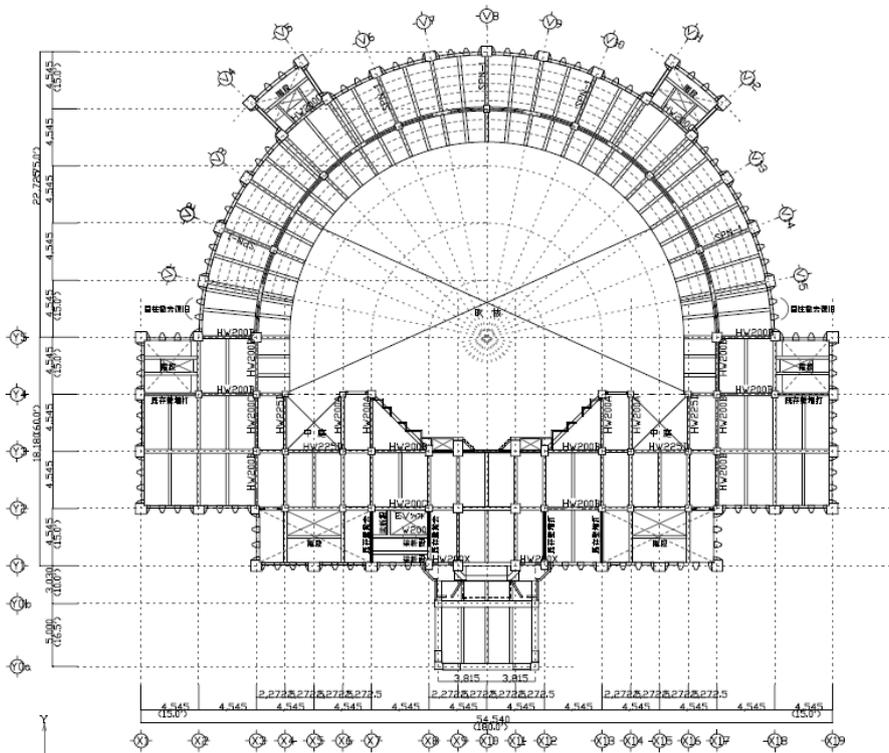


図 2-5 3階伏図

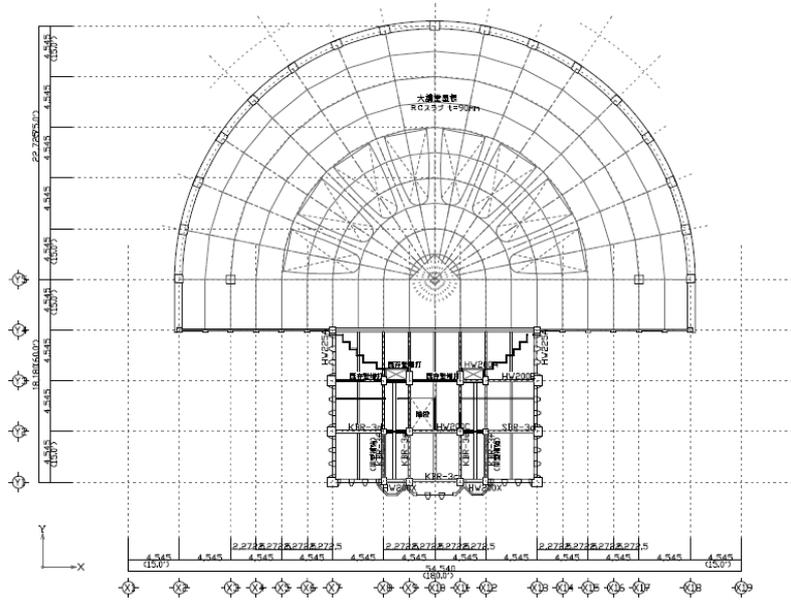


図 2-6 5階伏図

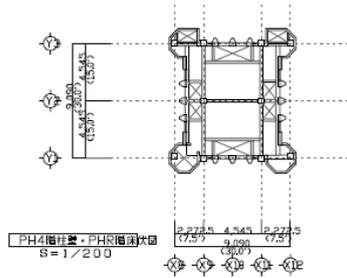


図 2-7 9階伏図

図表(1)-9

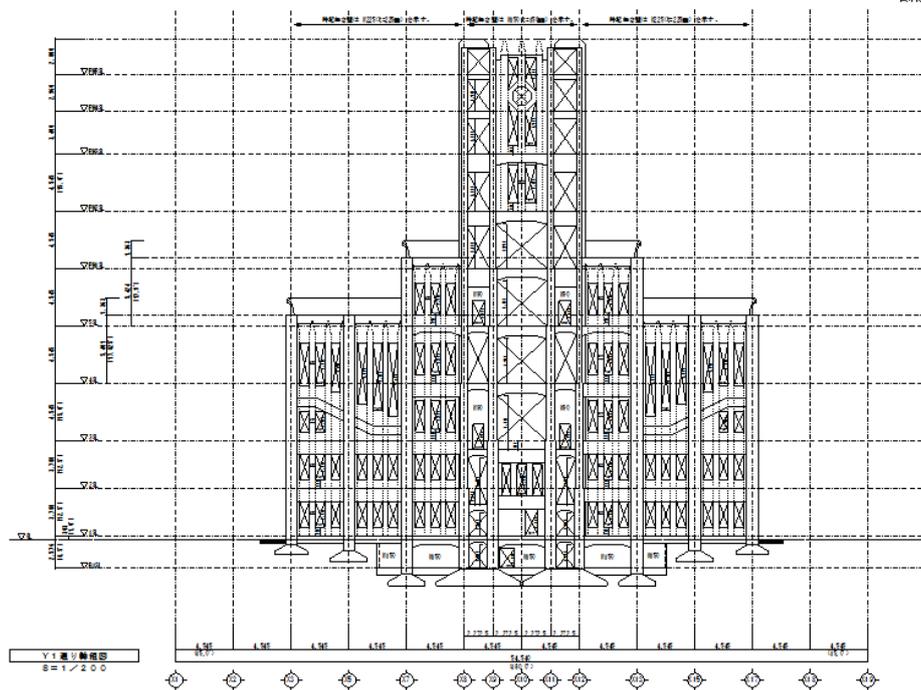


図 2-8 軸組図① (Y1通り)

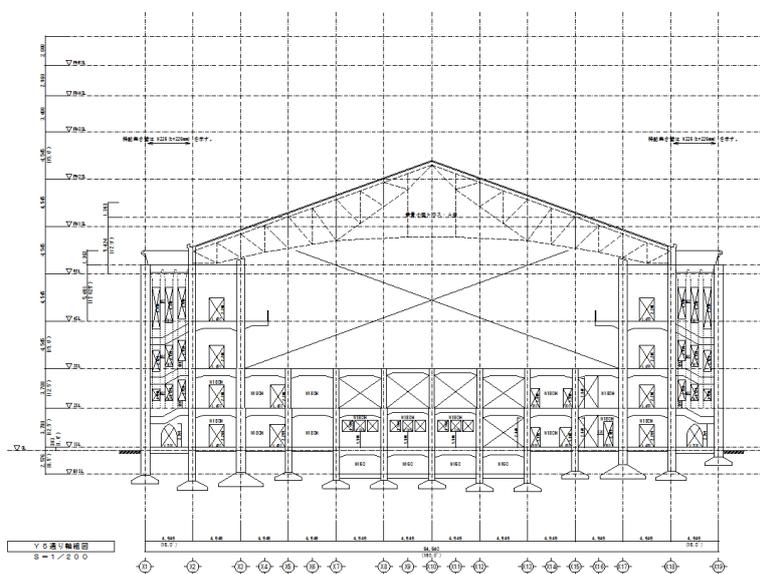


図 2-9 軸組図② (Y5通り)

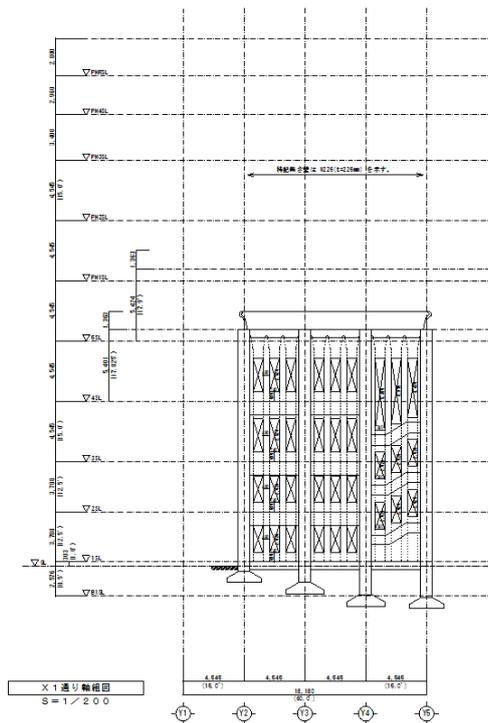


図 2-10 軸組図③ (X1通り)

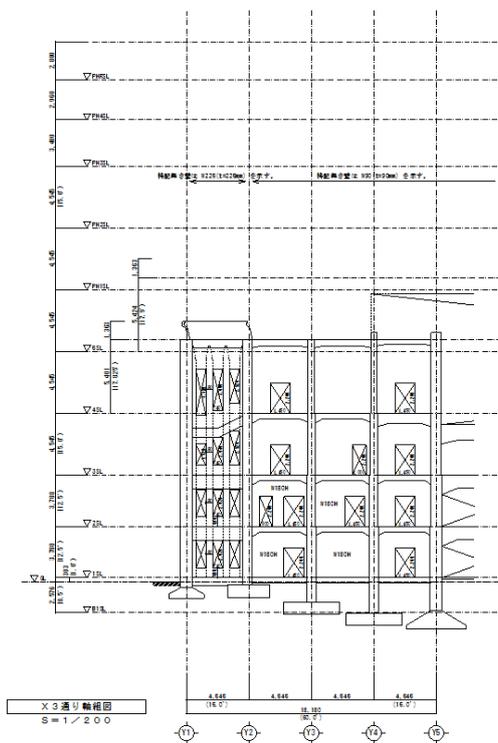


図 2-11 軸組図④ (X3通り)

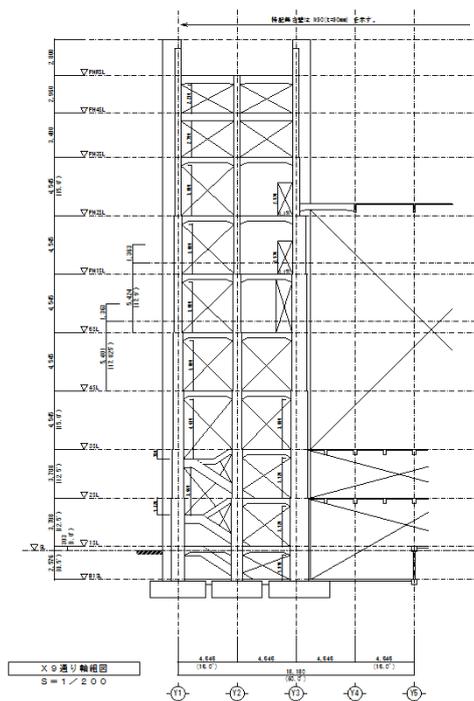


図 2-12 軸組図⑤ (X9通り)

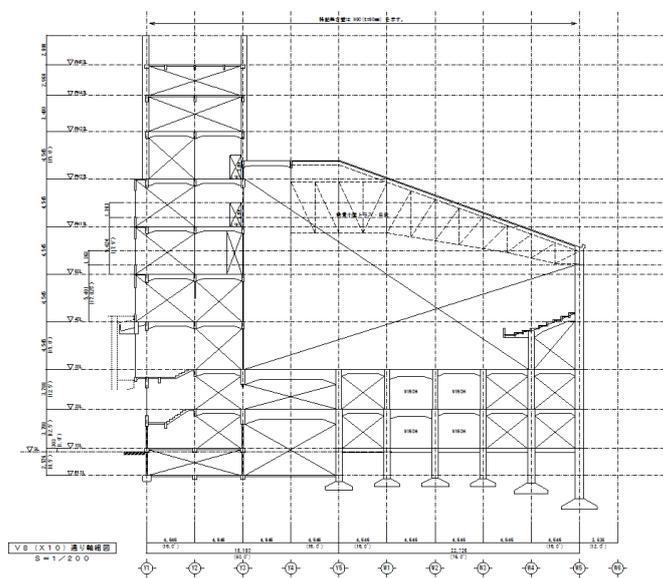


図 2-13 軸組図⑥ (X10通り)



写真 2-1 改修後の安田講堂全景

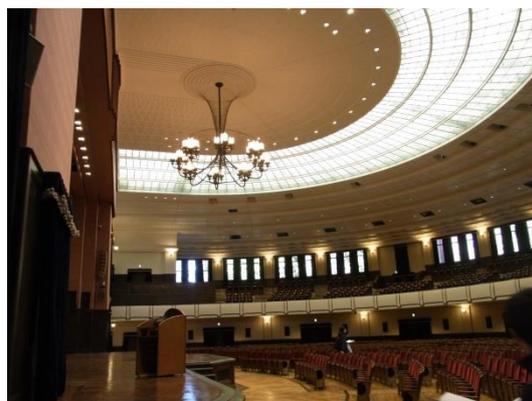


写真 2-2 改修後の大講堂内観

2.2 耐震改修工事概要

本対象建物では、2010 年度より耐震補強を含めた全面改修が行われた。主な耐震改修工事概要を図 2-14 に示す。主な改修計画は、以下の 4 つが挙げられる。

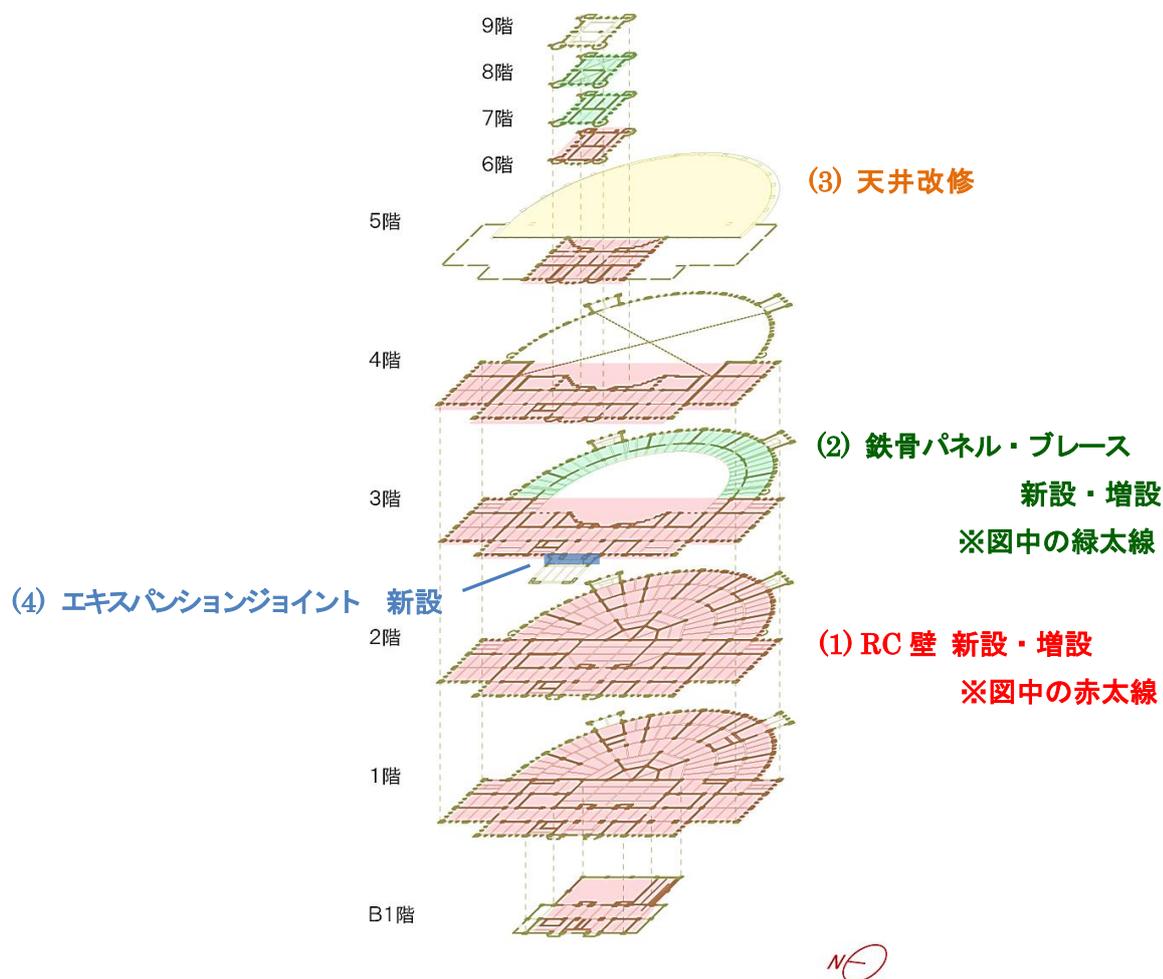


図 2-14 耐震改修工事概要

(1) 本館・講堂 1, 2 階における RC 壁の新設・増設 (写真 2-3, 写真 2-4)

本館・講堂 1, 2 階には、開口のあるものを含め多数の RC 壁が増設された。既存架構、補強部材はともに左右対称に配置されている。補強数が多いが (約 250 箇所)、1 箇所あたりの強度向上が小さいアーチフレーム (袖壁) 増設補強が主体であり、外周フレームを除き独立柱はなくなった。

(2) 3 階講堂回廊における鉄骨パネルの増設および搭屋における鉄骨ブレースの新設

3 階講堂回廊には、鉄骨パネルが増設され (写真 2-5)、搭屋には鉄骨枠付 K 型ブレースが新設された。

(3) 講堂における天井改修

講堂天井では、主に天井下地材の軽量化、鉄骨架構増築による天井吊り材の強化、および鉄骨ブレースによる下地面の水平補剛といった大規模な改修が行われた(写真 2-6)。既存の天井(ラスモルタル天井およびガラス天井)は下地材も含めすべて撤去され、既存ラスモルタル天井部は、GRG(硝子繊維補強石膏)天井へと取替えられ、棟部では、天井吊り高さが大きくなるようにトラス弦材が追加配置された。また、下地鉄骨面全区間において、水平ブレースによる面補剛が行われた。



写真 2-3 RC壁増設 開口なし
[1階 事務スペース]



写真 2-4 RC壁増設
左側：開口なし 右側：アーチ開口
[1階 事務スペース]

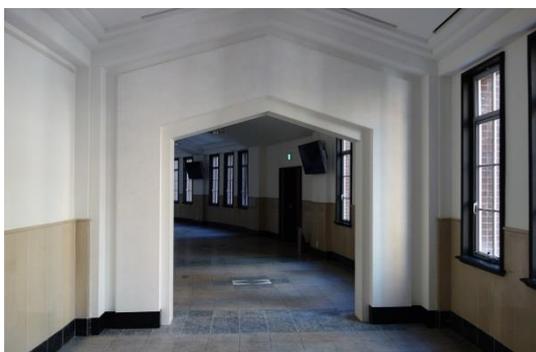


写真 2-5 鉄骨パネル増設 [3階 講堂回廊]

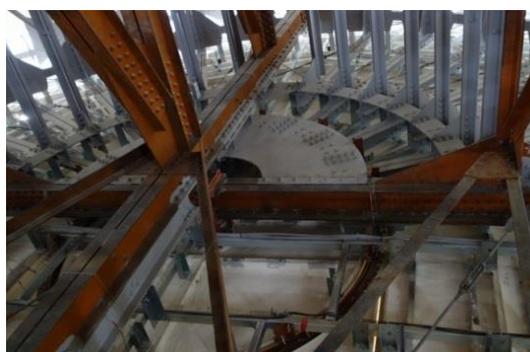


写真 2-6(a) 天井裏 (棟部, ガラス部)
※オレンジ色の鉄骨部材：既存 灰色の鉄骨部材：新設

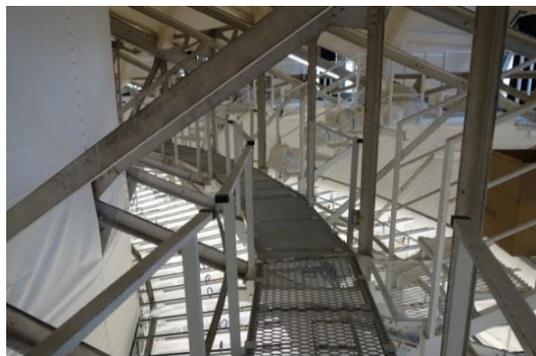


写真 2-6(b) 天井裏 (軒部)

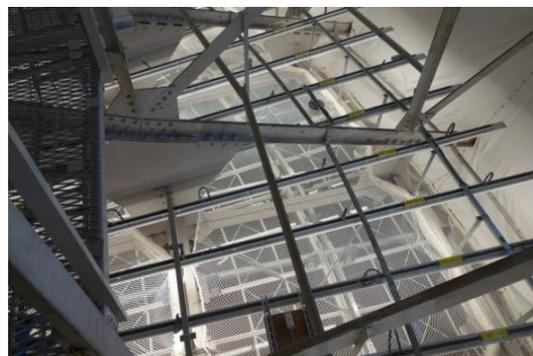


写真 2-6(c) 天井裏 (軒部 水平ブレース)

写真 2-6 天井の鉄骨架構

(4) エキスパンションジョイントによる分断

3 階西のエントランス前の小屋および本館の間にエキスパンションジョイントが新設された (写真 2-7)。本館および講堂の基礎は地下 1 階床面レベルにあるのに対し、エントランス前の小屋の基礎は 3 階床面レベルにあるが、本館および講堂と小屋が分断されたことにより、構造的により明快になった。

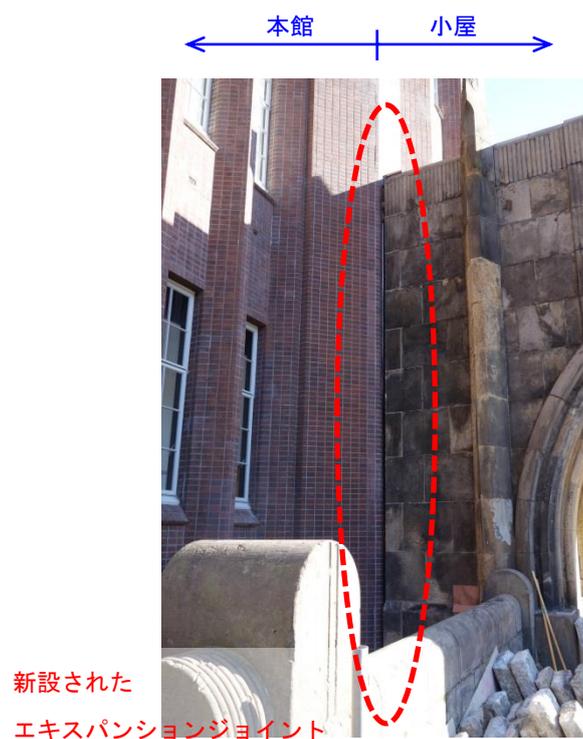


写真 2-7 エキスパンションジョイントによる分断

2.3 測定方針および測定方法

測定方法は、測定機器に収録器（物探サービス株式会社製 GEODAS-15-HS）およびピックアップ（物探サービス株式会社製 ムービングコイル型速度計 CR4.5-2 型）を使用し、サンプリング周波数を 100Hz、収録時間を 300 秒間とする。各 12 計測ケースにおいて 2 回測定を行い、比較的定常的な波形を示すケースまたは区間を分析データとして用いた。尚、改修前の結果についても同様に安定した微動波形部分を取り出し再度検討を行っている。測定時の様子を写真 2-8、ピックアップ設置の様子を写真 2-9 にそれぞれ示す。



写真 2-8 測定の様子



写真 2-9 ピックアップ設置の様子

ここで、測定にあたり、各ピックアップの向きは測定位置によらず、図 2-15 の図①に示すように全体座標系である X-Y 軸に統一する必要がある。しかし、本建物は講堂部が半円状の形状をしており、柱もその法線方向に沿って造られているため、各ピックアップの向きを全体座標系の X-Y 軸に沿った向きに正確に統一して配置することが困難であると判断した。したがって、建物形状による内部環境、およびピックアップ設置時の対応の容易さなどを考慮して、図②に示すように、耐震改修前の計測と同様、講堂では、各ピックアップの向きを柱の向きに沿うように配置し、計測を行うこととした。計測により得られた x' 方向および y' 方向の波形データを下式により座標変換すると、 x 方向および y 方向の波形データが得られる。

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} : \text{座標変換}$$

座標変換による補正の有効性を確認するために、あらかじめ全体座標系にあわせた配置・計測で得られた波形データ①と、柱に沿って配置・計測した後に座標変換を施して得られた波形データ②をそれぞれフーリエ変換し、フーリエスペクトルより両者の特性の違いの有無を検証した（図 2-15）。これより、X、Y、Z 方向すべてにおいて、両者はフーリエスペクトルの大きさ、形状および卓越周波数が概ね一致していることが確認できた。

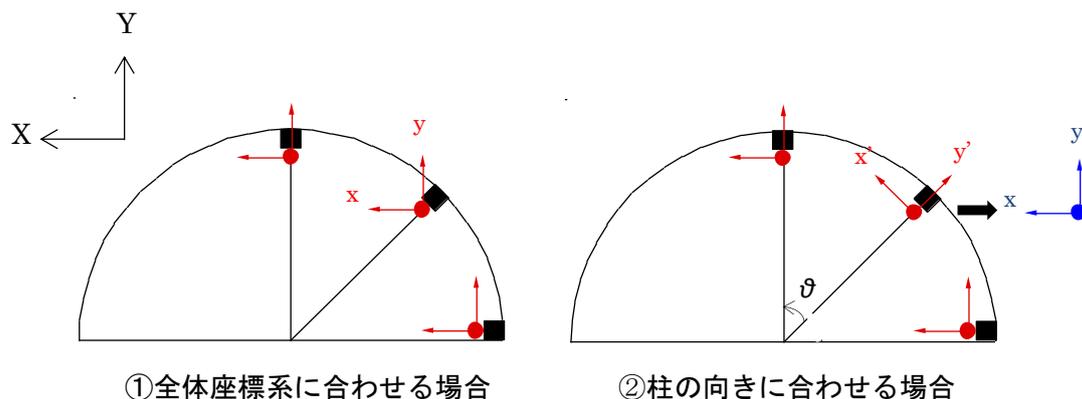


図 2-15 測定方法の検討 (各ピックアップの向き)

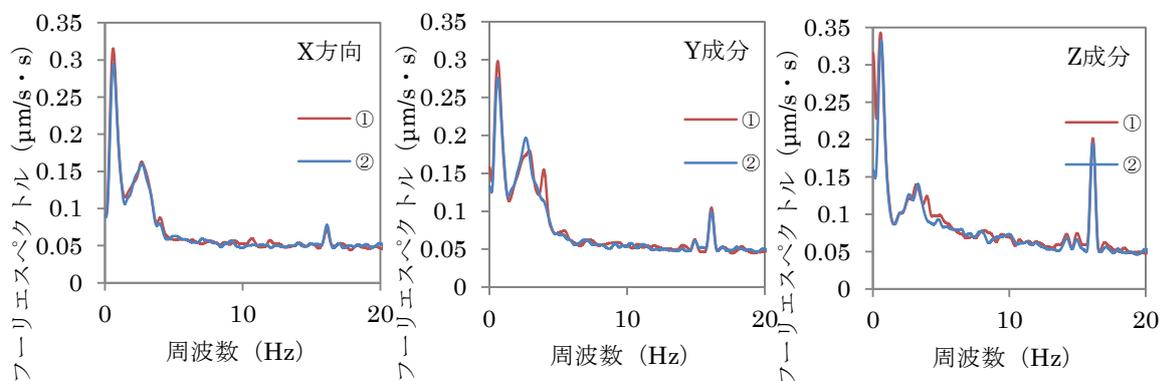


図 2-16 座標変換による波形補正がフーリエスペクトルに及ぼす影響

また、改修前の計測では、カーペット等を剥がしてピックアップを設置していたが、本計測では、カーペット上にピックアップを設置せざるを得なかった箇所がいくつかある(例えば、講堂1階事務スペース)。そこで、測定の事前に、東京大学生産技術研究所建物内において、近接する2箇所、一方はカーペット上(タイルカーペット、OAフロア)、もう一方はカーペット以外にそれぞれピックアップを設置して常時微動計測を行い、カーペットの有無による波形およびフーリエスペクトルの違いを検討した。その結果、図2-17に示すように、ほぼ同じ微動波形が得られ、図2-18より、各成分のスペクトルの形および卓越周期も一致し、カーペット上で計測されたデータを用いて分析を行っても問題ないと判断した。

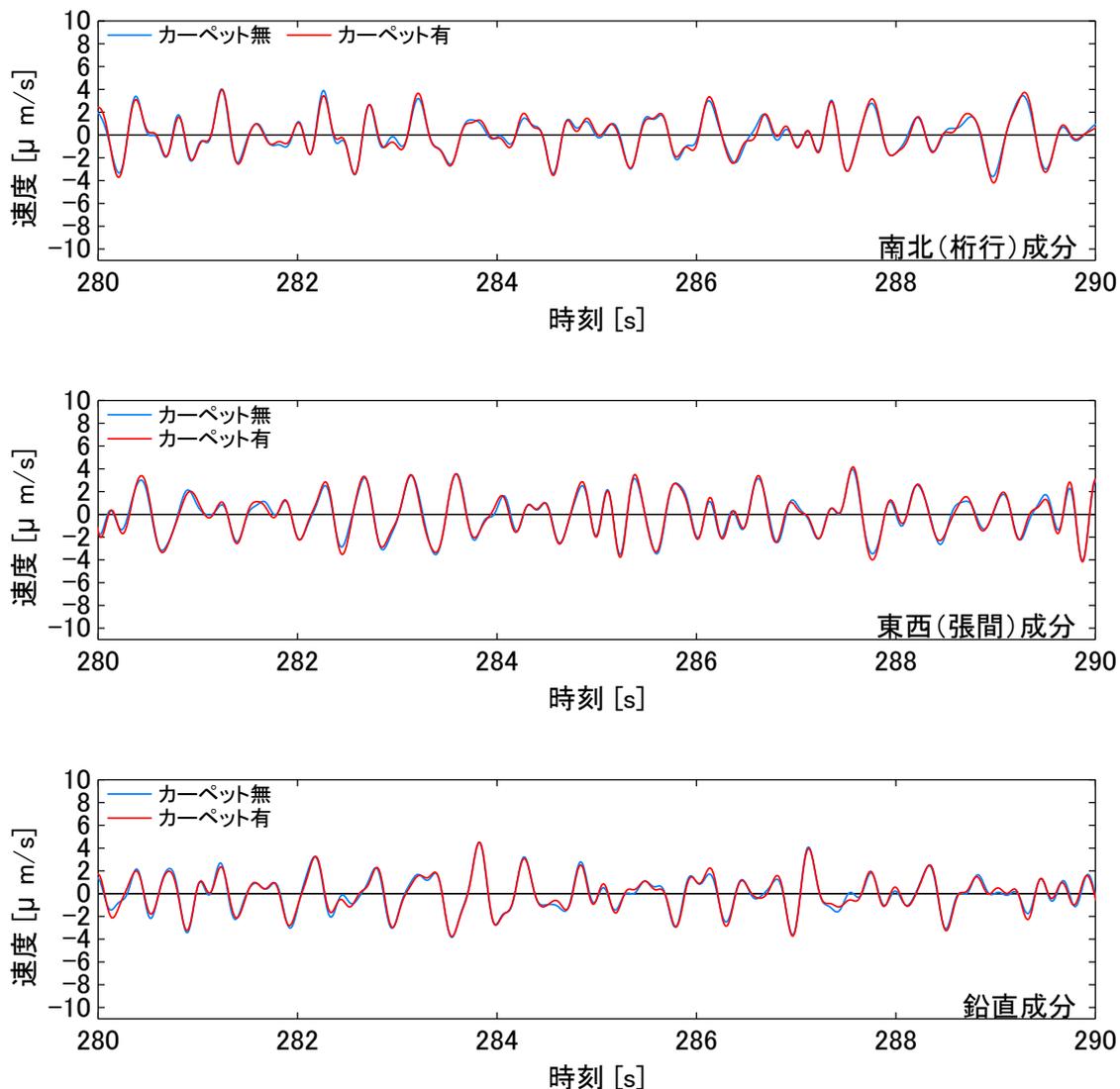
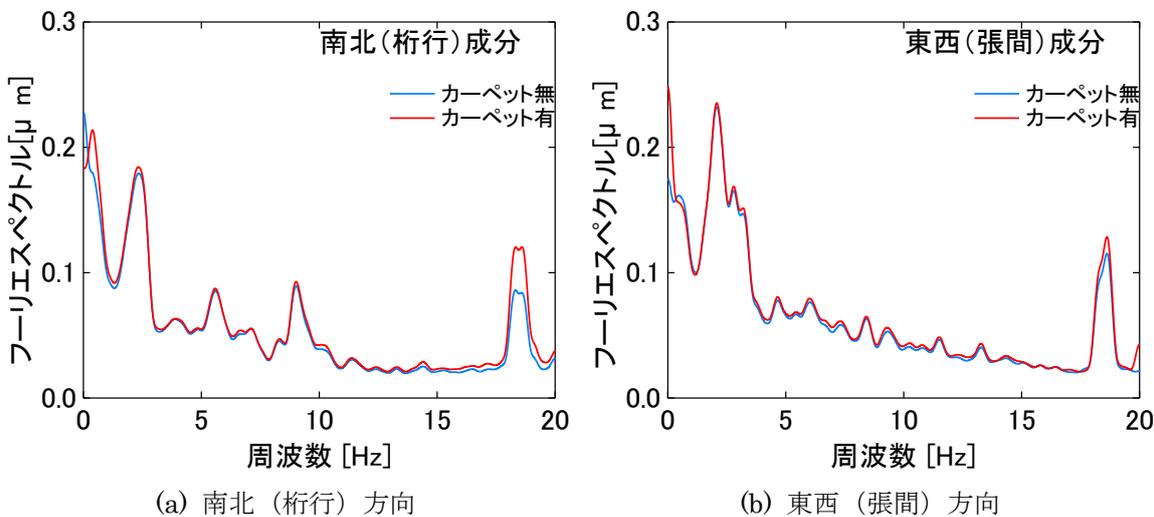
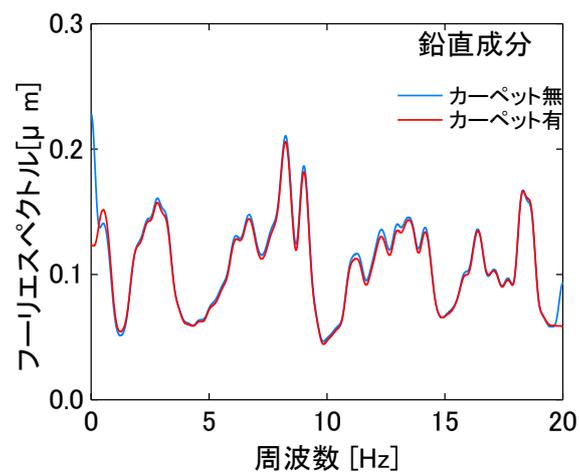


図 2-17 カーペットの有無による微動波形の比較



(a) 南北 (桁行) 方向

(b) 東西 (張間) 方向



(c) 鉛直方向

図 2-18 カーペットの有無によるフーリエスペクトルの比較

2.4 測定位置

測定位置は、改修前と同様、図 2-19～図 2-30 に示す全 12 ケースとし、各計測ケースについて多点同時計測を実施し、各測定点について 3 成分（水平 2 成分，鉛直 1 成分）を計測した。

計測ケース 1-1（図 2-19）は、本館の固有周期および南北方向のスウェイ・ロッキング動を調べることを目的とした計測で、本館 1 階床レベル西側隅角部 2 点および中央 1 点，中央高さ方向の 3，5，6，9 階床レベルで 1 点ずつ計測した。

計測ケース 1-2（図 2-20）は、計測ケース 1-1 同様、本館上部構造の振動性状を把握するとともに、スウェイ・ロッキング率を 1 階の測定結果を用いて算定するため、1 階および地下 1 階それぞれを H/H スペクトルの分母として算定したときの固有周期が相違ないことを確認することを目的とした計測で、本館中央高さ方向の地下 1 階，1 階，3，5，6，9 階床レベルで 1 点ずつ計測した。

計測ケース 2（図 2-21）は、本館の東西方向のスウェイ・ロッキング動を調べることを目的とした計測で、本館 1 階床レベル東西方向両端 2 点およびその 2 点間に 1 点，高さ方向の地下 1，3，5 階床レベルで 1 点ずつ計測した。

計測ケース 3-1，3-2（図 2-22，図 2-23）は、本館および講堂 1 階，4 階床面それぞれにおけるねじれ挙動を含めた挙動の一体性を調べる目的とした計測で、本館西側隅角部 2 点，本館東側隅角部 2 点，および講堂北東，中央，南東にそれぞれ 1 点ずつ計測した。

計測ケース 4-1，4-2，4-3（図 2-24，図 2-25，図 2-26）は、講堂 1 階，4 階床面，および屋根面それぞれにおけるねじれ挙動を含めた挙動の一体性を調べる目的とした計測で、講堂北北東，北東東，中央，南東東，南南東にそれぞれ 1 点ずつ計測した。

計測ケース 5-1（図 2-27）は、講堂の固有周期および東西方向のスウェイ・ロッキング動を調べることを目的とした計測で、1 階床レベルの本館西側 1 点および講堂東西方向両端 2 点，東端高さ方向の 3，4 階床レベル，屋根面で 1 点ずつ計測した。

計測ケース 5-2（図 2-28）は、計測ケース 5-1 同様、講堂上部構造の振動性状を把握することを目的とした計測で、1 階床レベルの講堂北東東方向両端 2 点，北東東端高さ方向の 3，4 階床レベル，屋根面で 1 点ずつ計測した。

計測ケース 5-3（図 2-29）は、計測ケース 5-1 同様、講堂上部構造の振動性状を把握することを目的とした計測で、1 階床レベルの講堂北北東方向両端 2 点，北東東端高さ方向の 3，4 階床レベル，屋根面で 1 点ずつ計測した。

計測ケース 6（図 2-30）は、本建物周辺の地盤の振動性状を把握することを目的とした計測で、講堂中央（建物東端）周辺 2 点を計測した。

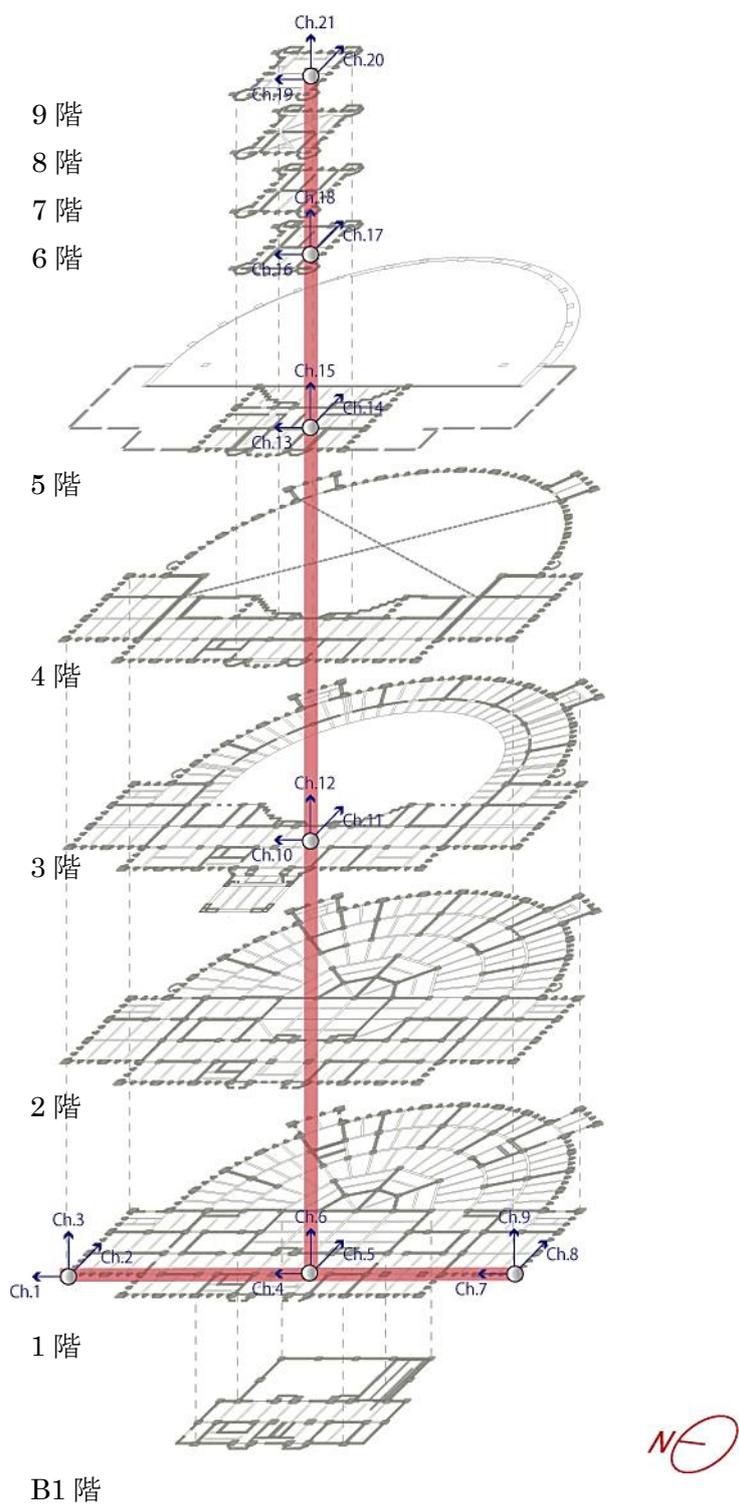


図 2-19 計測ケース1-1

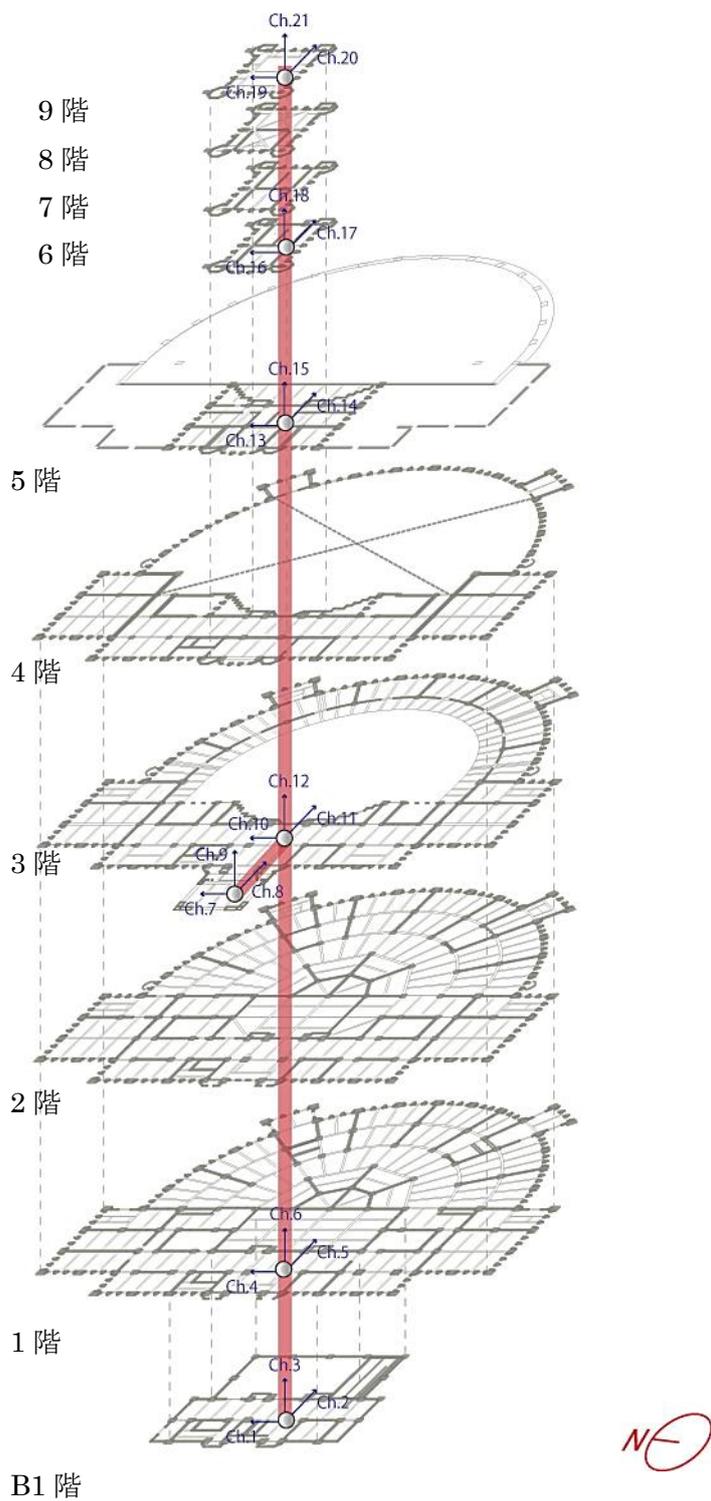


図 2-20 計測ケース1-2

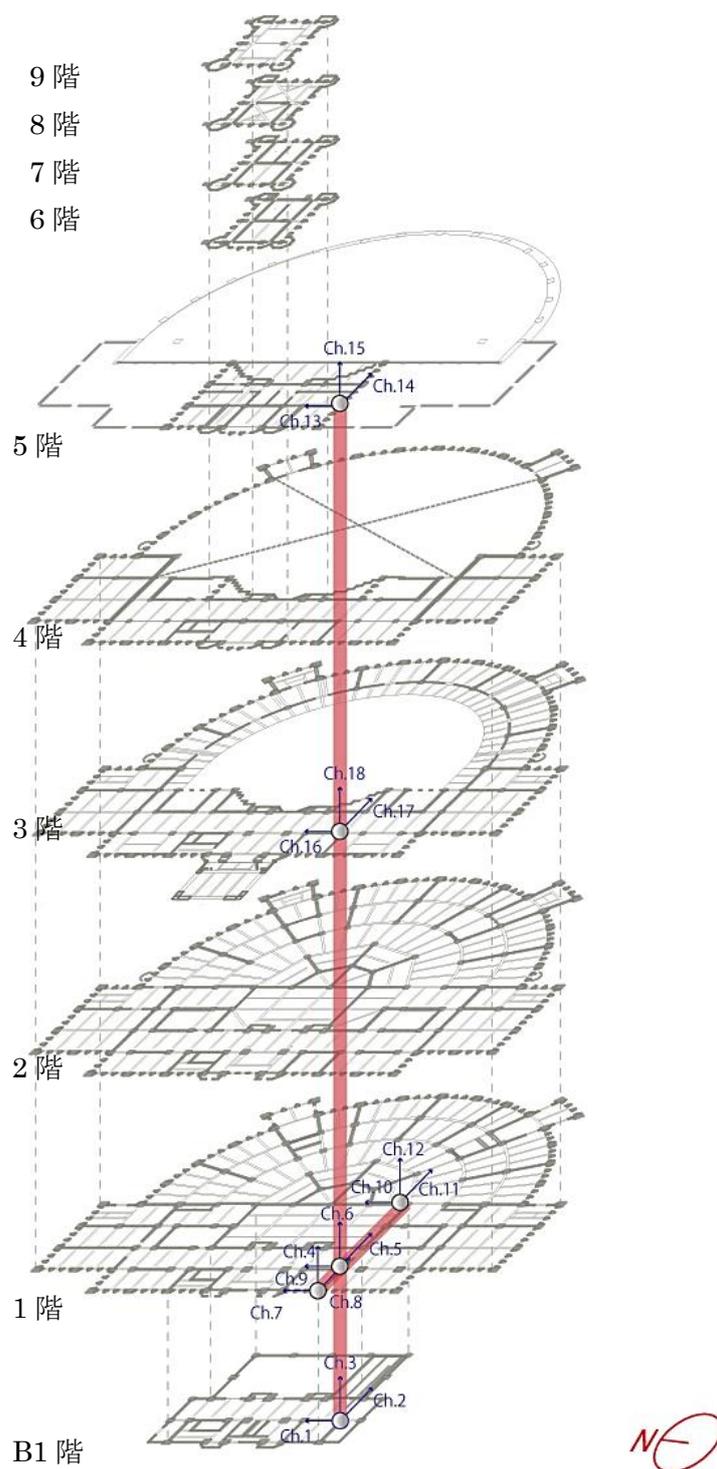


図 2-21 計測ケース2

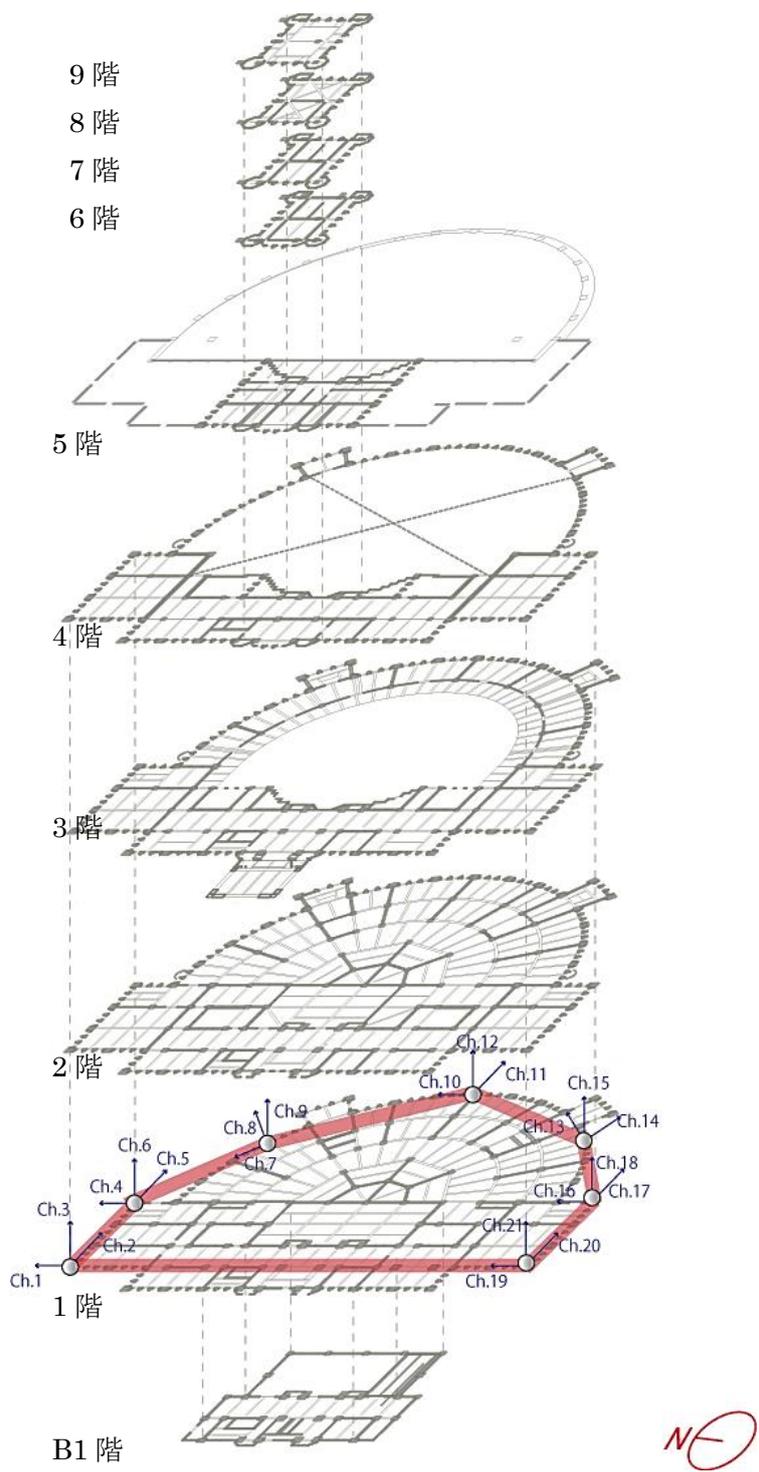


図 2-22 計測ケース3-1

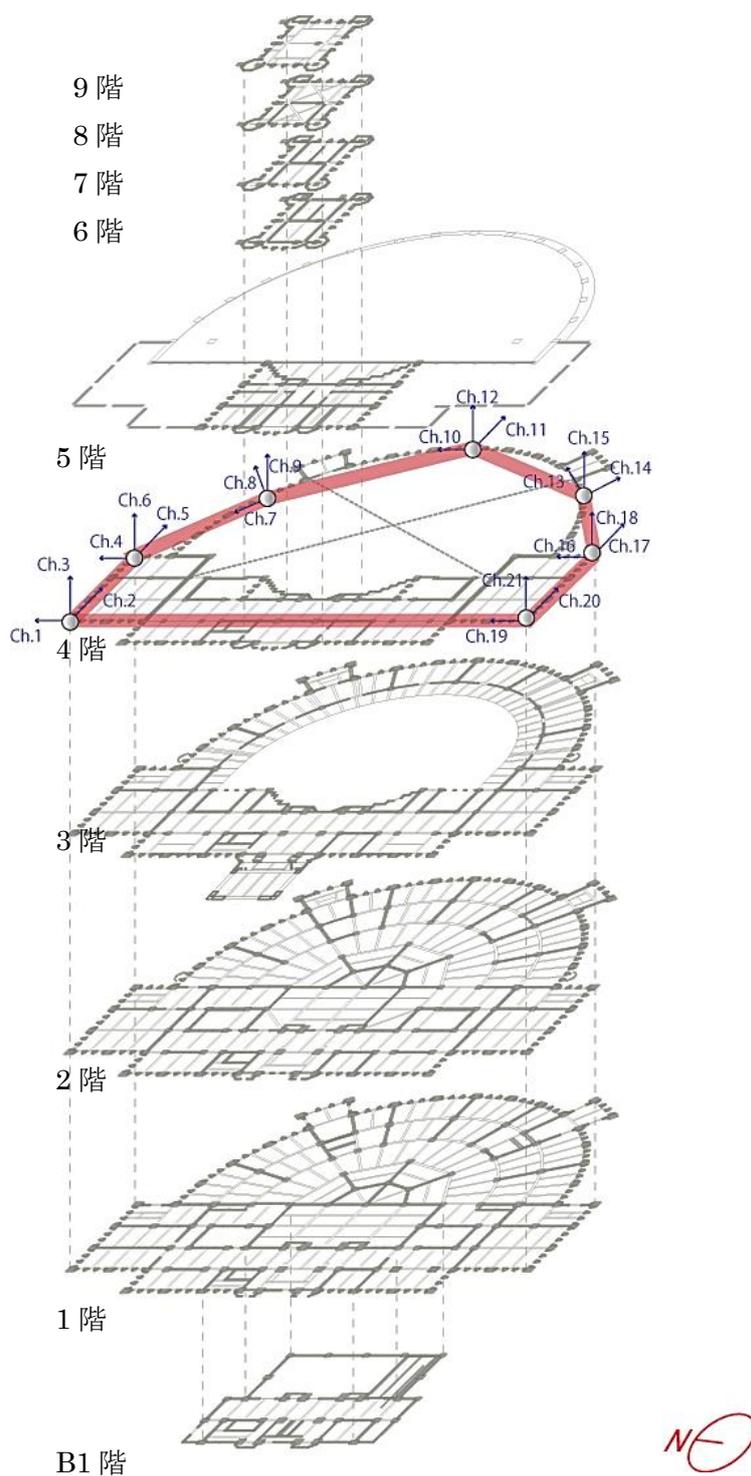


図 2-23 計測ケース3-2

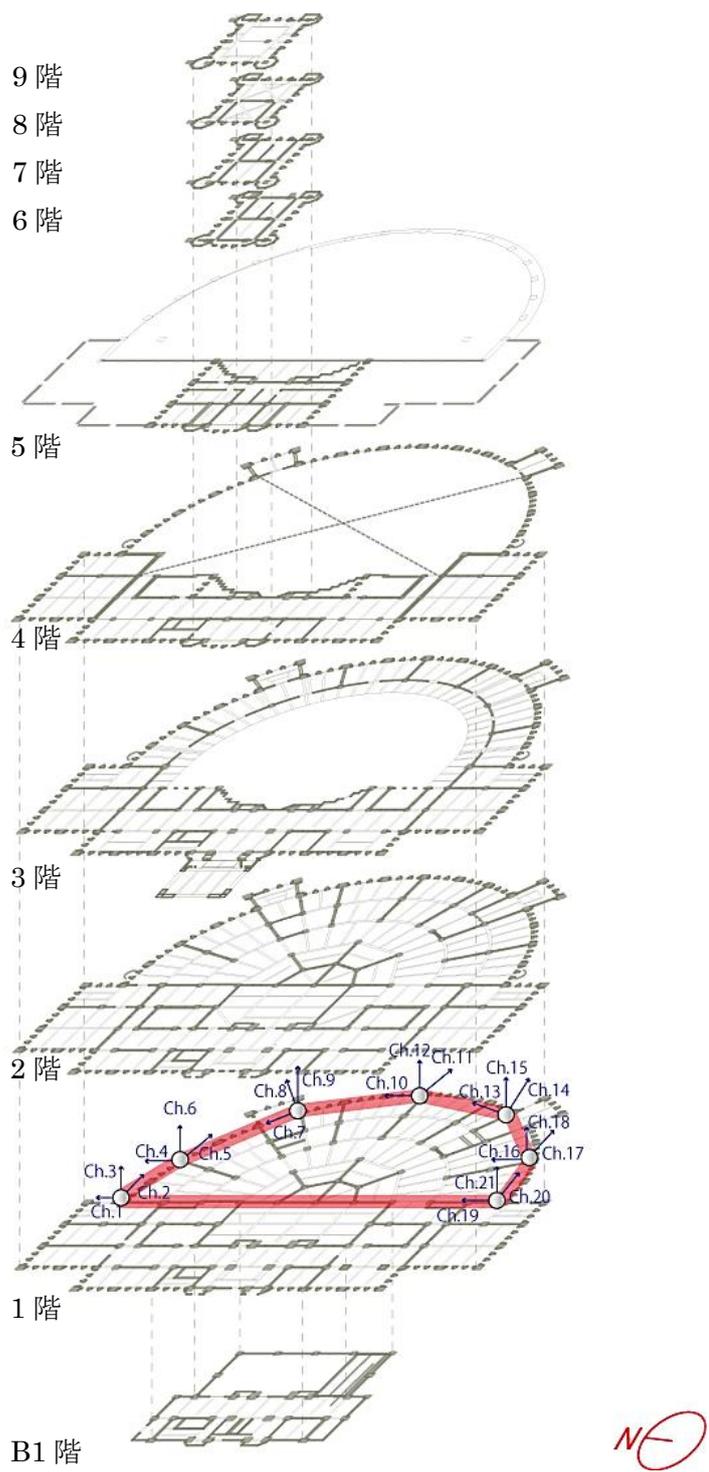


図 2-24 計測ケース4-1

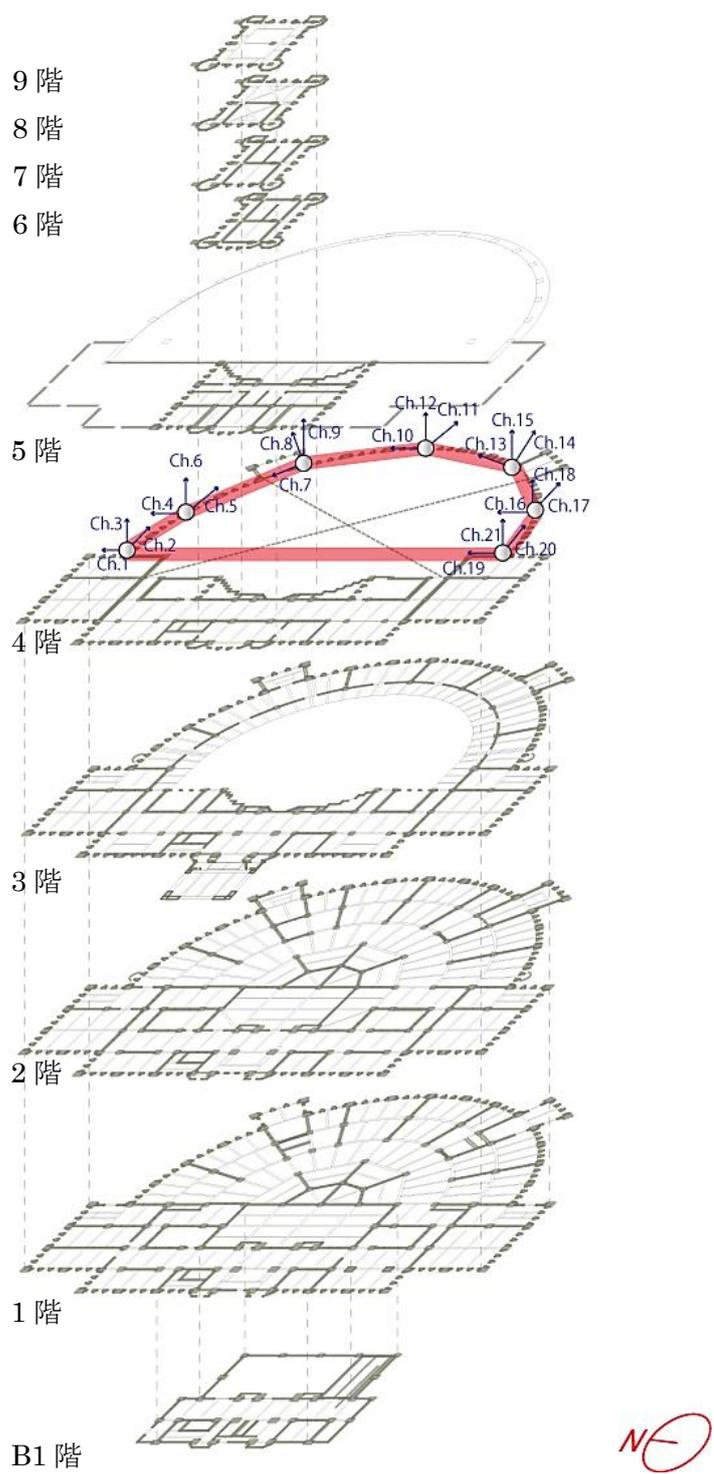


図 2-25 計測ケース4-2

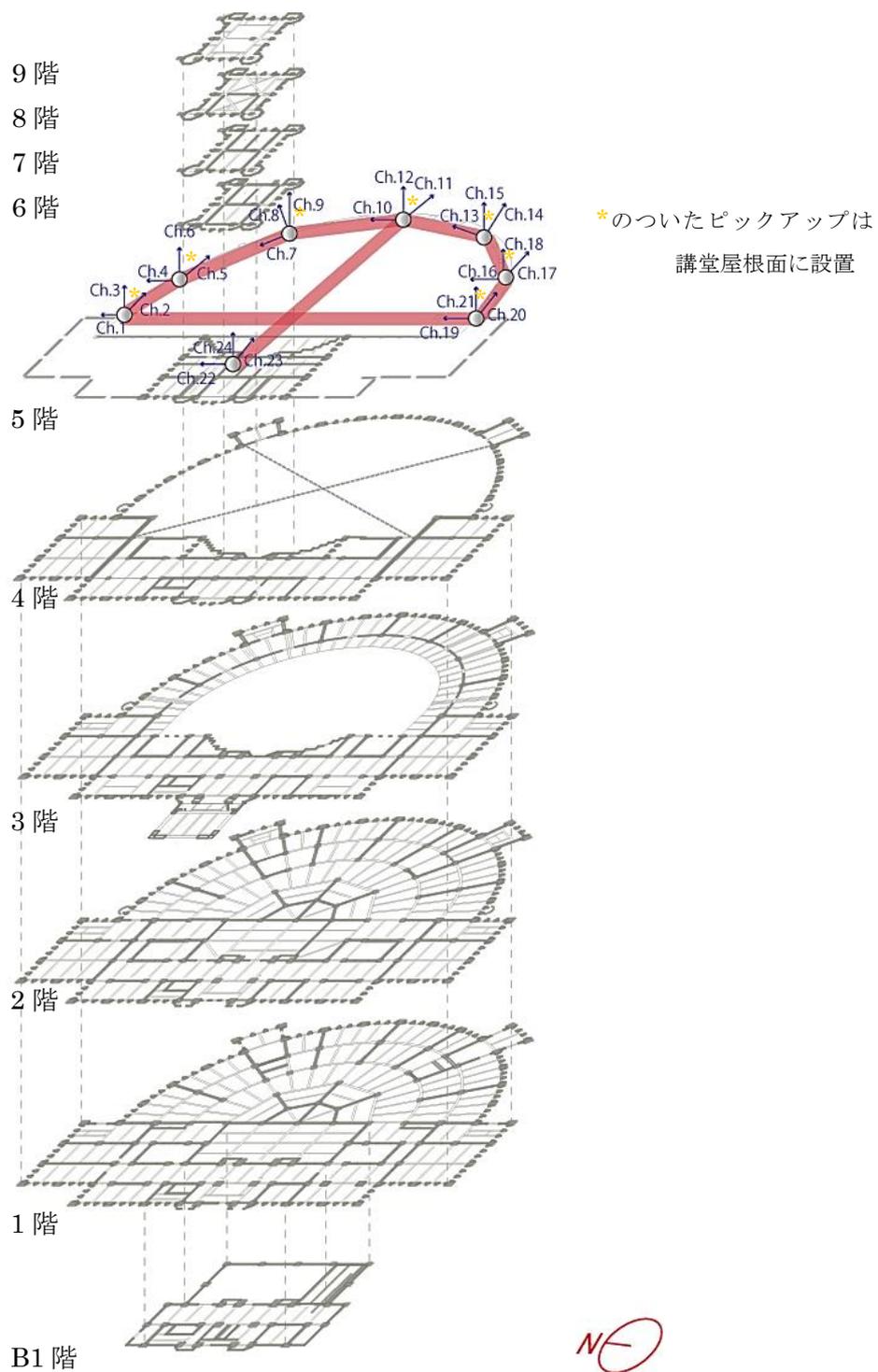


図 2-26 計測ケース4-3

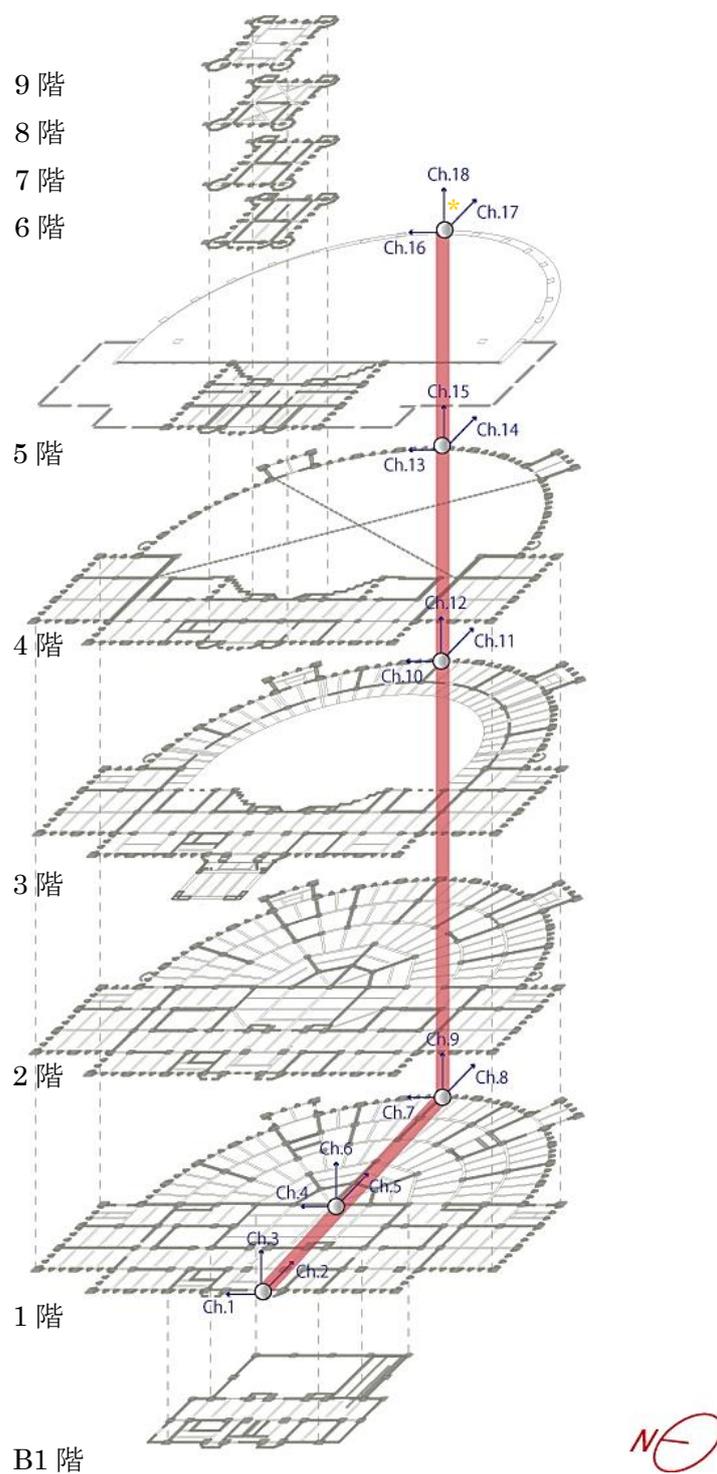


図 2-27 計測ケース5-1

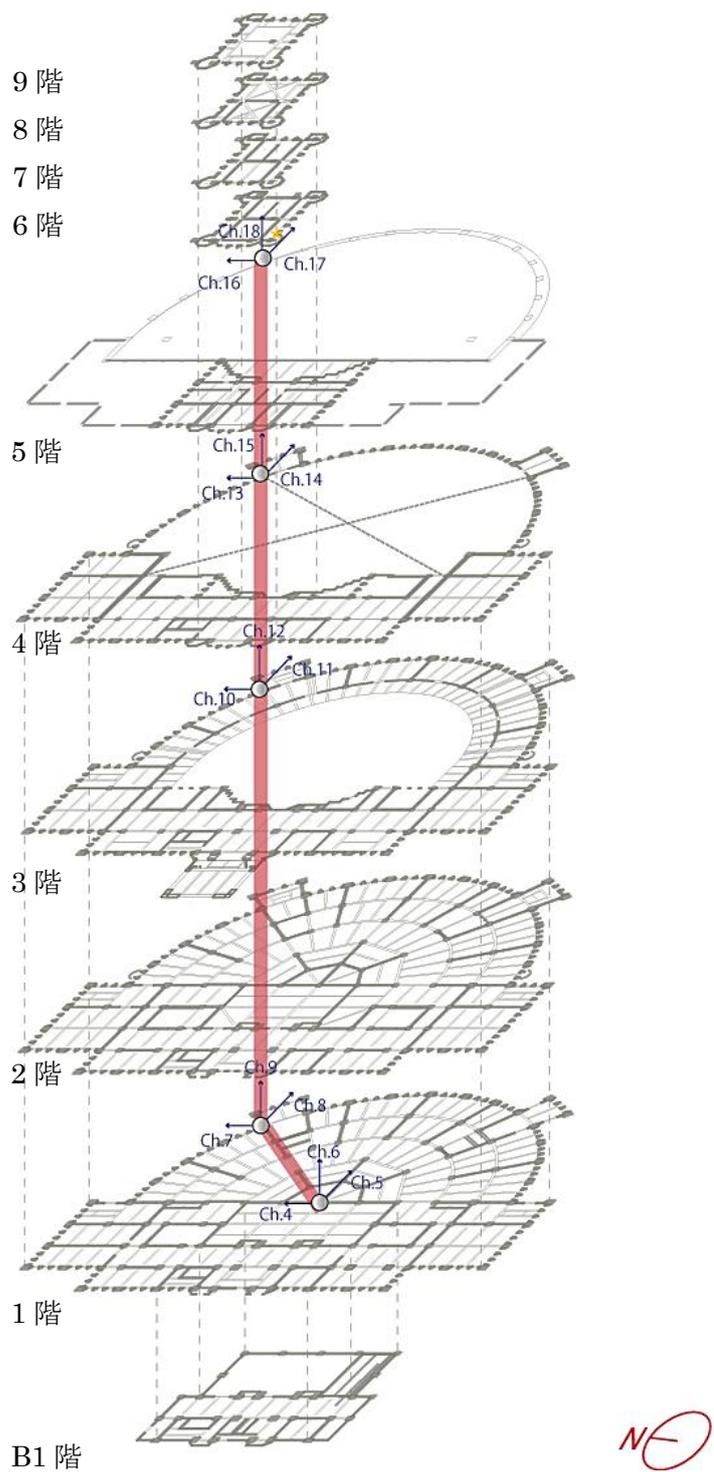


図 2-28 計測ケース5-2

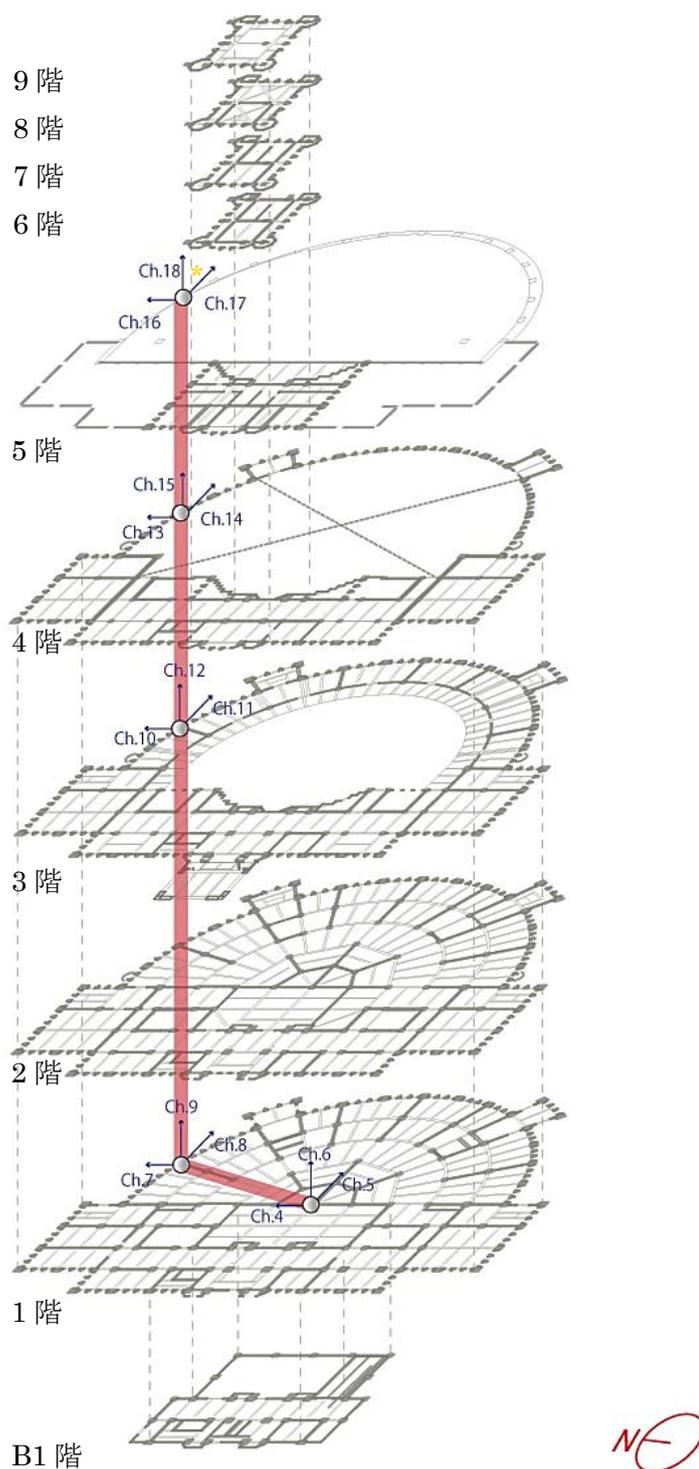


図 2-29 計測ケース5-3

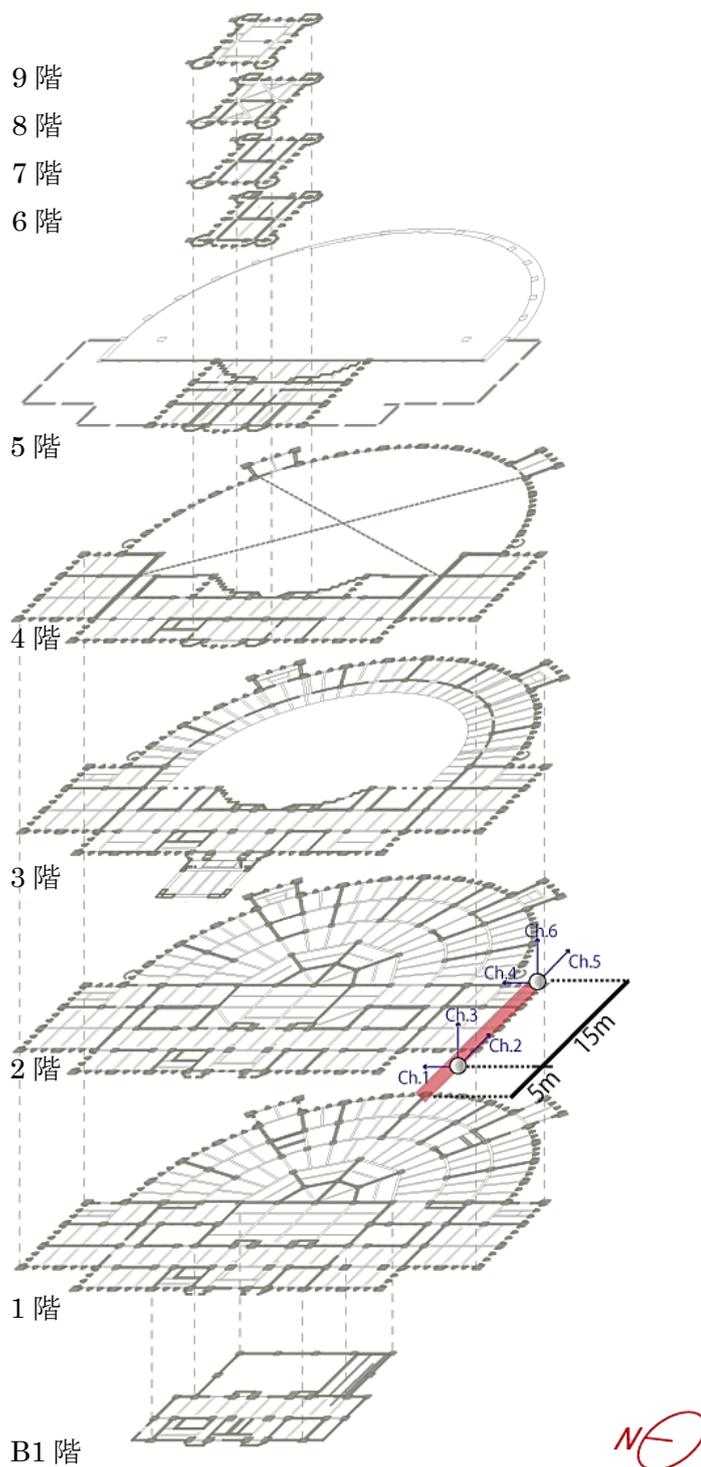


図 2-30 計測ケース6

2.5 測定結果

2.5.1 各計測ケースの結果および考察

本節では、常時微動計測を行った全 12 ケースの結果、および本館・講堂の 1 次固有周期やスウェイ率とロッキング率といった振動性状の検討を行った。

(1) 計測ケース 1-1

計測ケース 1-1 (図 2-19) では、固有周期、南北 (桁行) 成分のスウェイ率・ロッキング率といった、本館上部構造の振動性状を把握する目的で実施した計測である。尚、本館の固有周期およびスウェイ率とロッキング率の算定にあたり、本対象建物では地下 1 階平面が他階と比較して極端に小さいため、正確な算定は困難であると考えられる。そこで、耐震改修前と同様に 1 階および地下 1 階それぞれを H/H スペクトルの分母として算定したときの固有周期が相違ないことを確認したのち、1 階の計測データを用いて算定を行った。

図 2-33 に各階の常時微動水平成分のフーリエスペクトルを示す。また、図 2-34 に 1 階の常時微動水平成分のフーリエスペクトルに対する 9 階および 6 階、5 階、3 階の常時微動水平成分のフーリエスペクトルの比 (伝達関数) を示す。尚、本計測ケースでは、図 2-31 に示すような振幅が大きくなる区間が見られたため、これらの区間は分析データから除外した。以降の計測ケースにおいても同様な処理を行った。南北 (桁行) 成分については、9 階/1 階の伝達関数では 4.22Hz (0.24s)、6 階/1 階の伝達関数では 4.20Hz (0.24s)、5 階/1 階の伝達関数では 4.20Hz (0.24s)、3 階/1 階の伝達関数では 4.15Hz (0.24s) に 1 次と思われるピークが見られた。一方、東西 (張間) 成分については、9 階/1 階の伝達関数では 3.34Hz (0.30s)、6 階/1 階の伝達関数では 3.34Hz (0.30s)、5 階/1 階の伝達関数では 3.34Hz (0.30s)、3 階/1 階の伝達関数では 3.32Hz (0.30s) に 1 次と思われるピークが見られた。図 2-35 より、卓越周期は、耐震改修により、南北 (桁行) 成分では 0.05 秒程度短くなり、東西 (張間) 成分では 0.02 秒程度とやや短周期化したことが分かる。

本館南北 (桁行) 成分のスウェイ率およびロッキング率は、後述する 2.5.3 における高さ方向のモード形状の 1 次モード、すなわち 1 次固有周期 $T_{\text{FIX+S+R}}$ において最大の変形をした 9 階の微動波形を用いて算定を行った。ここで、微動波形には 1~10Hz の周波数帯を透過するバンドパスフィルタをかけ、平滑化した (以下、すべての微動波形においても同様)。また、スウェイ率 S およびロッキング率 R は、比較的定常的な振動を示した区間における、1 階水平波形から得た振幅 (スウェイ成分) および 1 階鉛直波形から求めた最上階水平振幅 (ロッキング成分) のそれぞれ最上階水平振幅に対する比として定義すると、以下の通りとなる (図 2-32, 表 2-1)。

$$S_{\text{南北成分}}=16.8\% \text{ (改修前では } 17.4\%) \quad R_{\text{南北成分}}=25.1\% \text{ (改修前では } 19.0\%)$$

耐震改修前後において、スウェイ率はほぼ同様、ロッキング率は増加する傾向が見られたが、これは、耐震改修により基礎固定時の上部構造応答成分の割合が減少したことに起因すると考えられる。さらに、前述した 9 階 /1 階の伝達関数から求められた固有周期 (0.23s)

を、スウェイ動およびロッキング動を伴う系の周期 $T_{FIX+S+R}$ とし、スウェイ動およびロッキング動を除いた建物基礎固定時における系の周期 T_{FIX} を求めると、

$$T_{FIX} = T_{FIX+S+R} \times \sqrt{(100 - S - R)/100} = 0.18\text{s} (5.47\text{Hz})$$

となり、建物基礎固定時における本館南北方向の系の周期 T_{FIX} は、耐震改修により、0.04秒程度短周期化したことがわかる。

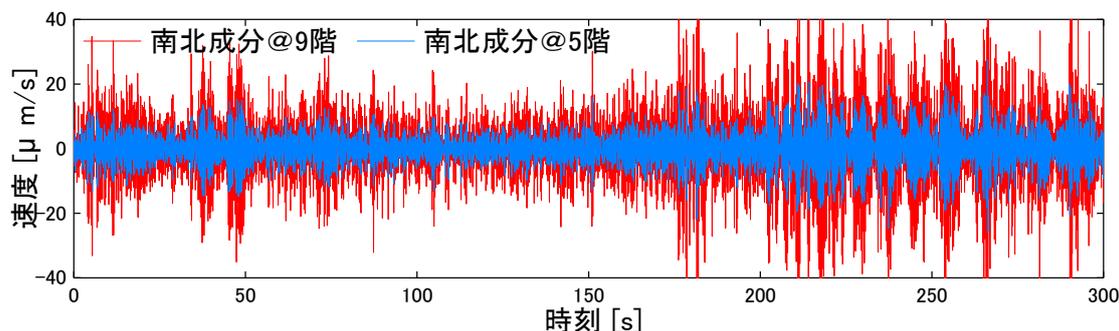


図 2-31 計測された微動波形

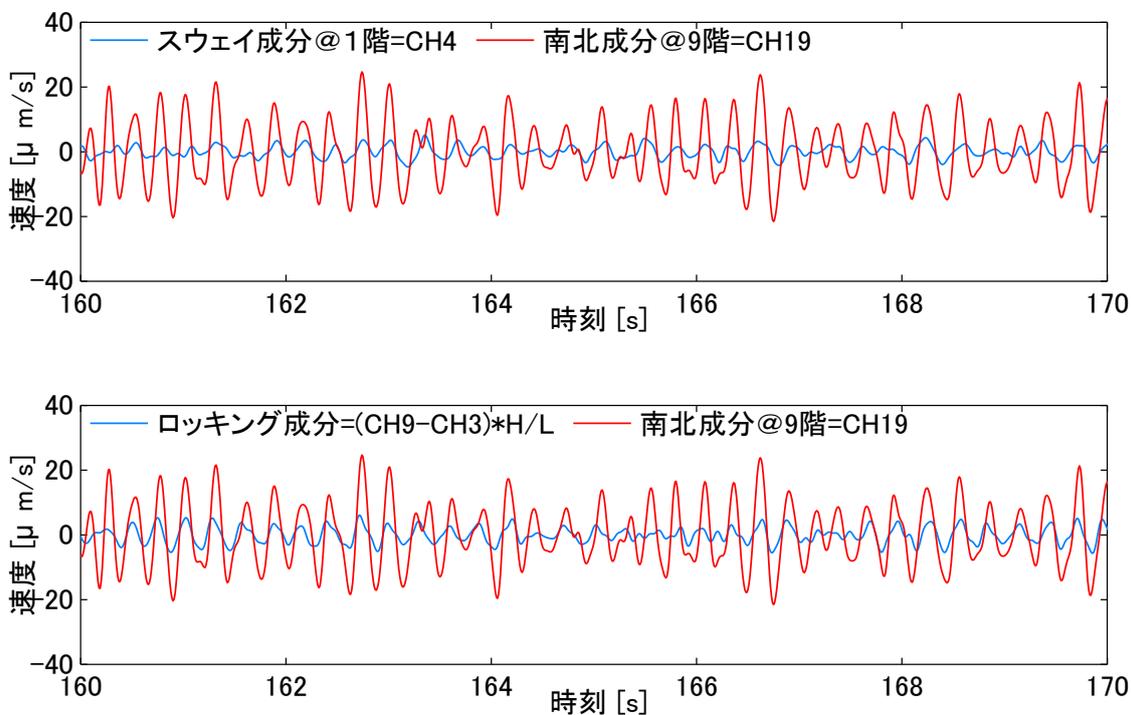
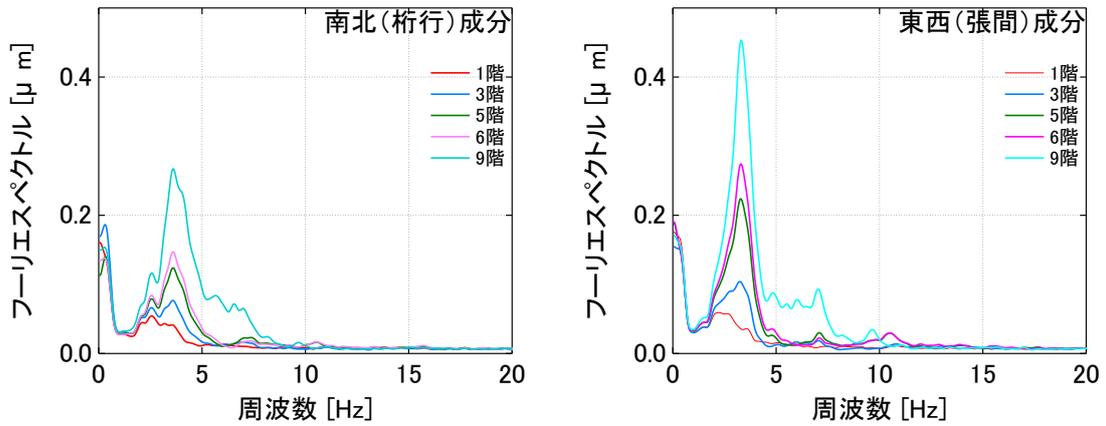


図 2-32

本館南北（桁行）方向におけるスウェイ成分およびロッキング成分に相当する微動波形

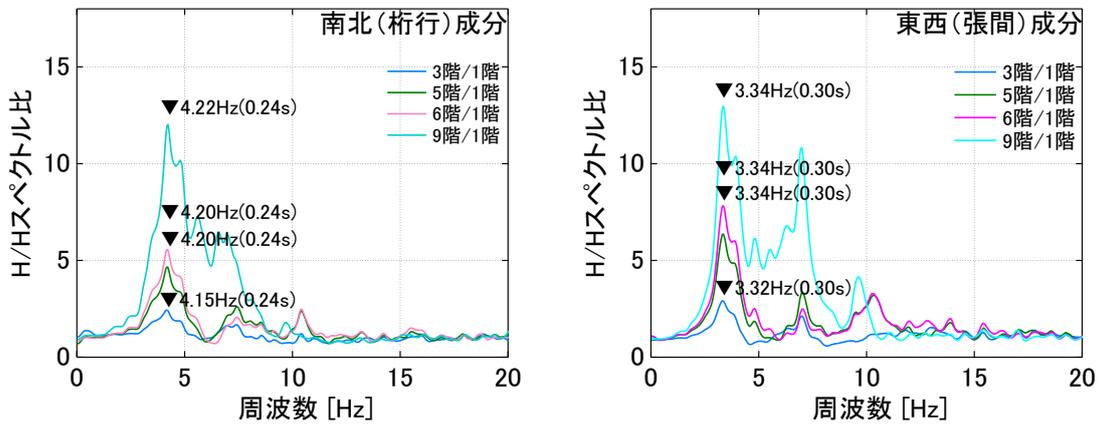
表 2-1 本館南北（桁行）方向におけるスウェイ率，ロッキング率および卓越周期一覧

	S	R	100-S-R	$T_{FIX+S+R}$	T_{FIX}
改修前	17.4%	19.0%	63.6%	0.28s(3.56Hz)	0.22s(4.48Hz)
改修後	16.8%	25.1%	58.1%	0.24s(4.22Hz)	0.18s(5.47Hz)



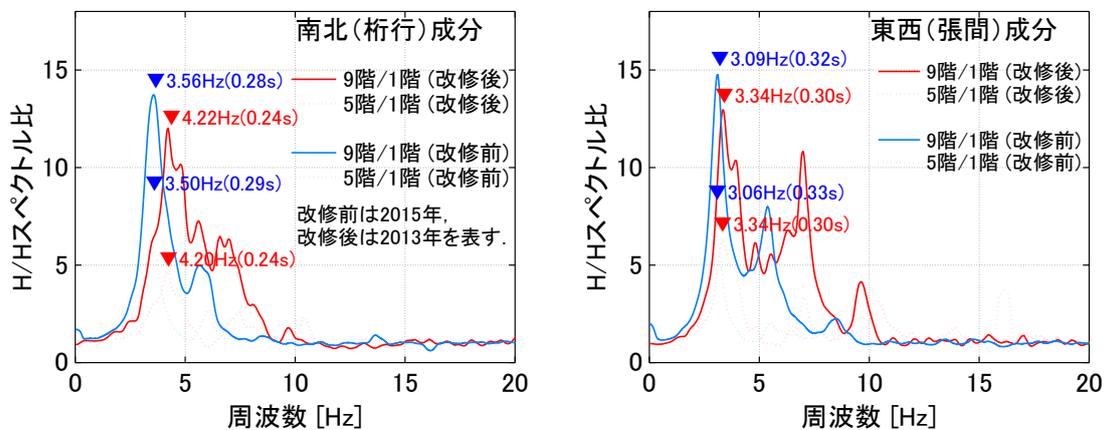
(a) 南北 (桁行) 成分 (b) 東西 (張間) 成分

図 2-33 成分別のフーリエスペクトル



(a) 南北 (桁行) 成分 (b) 東西 (張間) 成分

図 2-34 伝達関数 (H/Hスペクトル比)



(a) 南北 (桁行) 成分 (b) 東西 (張間) 成分

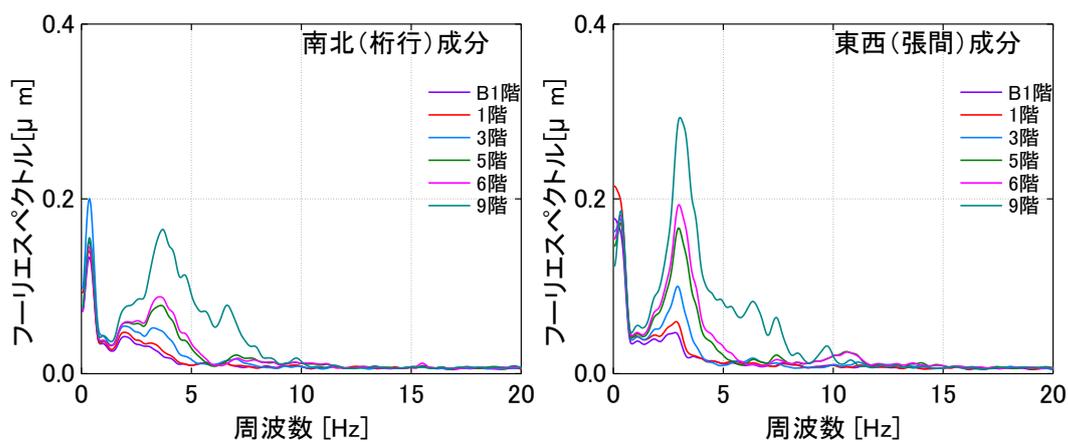
図 2-35 周波数スペクトルの比較

(2) 計測ケース 1-2

計測ケース 1-2 (図 2-20) では計測ケース 1-1 同様、本館上部構造の振動性状を把握する目的で実施した計測である。また、前述のように、本対象建物は地下 1 階平面が他階と比較して極端に小さいため、1 階の計測データを用いて固有周期およびスウェイ率とロッキング率の算定を行った (計測ケース 1-1) が、1 階および地下 1 階それぞれを H/H スペクトルの分母として算定したときの固有周期が相違ないことを確認するために実施した計測でもある。

図 2-36 に各階の常時微動水平成分のフーリエスペクトルを示す。また、図 2-37 に地下 1 階および 1 階の常時微動水平成分のフーリエスペクトルに対する 9 階および 6 階、5 階、3 階の常時微動水平成分のフーリエスペクトルの比 (伝達関数) を示す。南北成分については、9 階/地下 1 階の伝達関数では 4.39Hz (0.23s)、6 階/地下 1 階の伝達関数では 4.37Hz (0.23s)、5 階/地下 1 階の伝達関数では 4.32Hz (0.23s) に 1 次と思われるピークが見られ、3 階/地下 1 階の伝達関数では明瞭なピークは見られなかった。9 階/1 階の伝達関数では 4.81Hz (0.21s)、6 階/1 階の伝達関数では 4.76Hz (0.21s)、5 階/1 階の伝達関数では 4.76Hz (0.21s) に 1 次と思われるピークが見られ、3 階/1 階の伝達関数では明瞭なピークは見られなかった。一方、東西成分については、9 階/地下 1 階の伝達関数では 3.39Hz (0.30s)、6 階/地下 1 階の伝達関数では 3.36Hz (0.30s)、5 階/地下 1 階の伝達関数では 3.36Hz (0.30s)、3 階/地下 1 階の伝達関数では 3.33Hz (0.30s) に 1 次と思われるピークが見られ、9 階/1 階の伝達関数では 3.39Hz (0.29s)、6 階/1 階の伝達関数では 3.39Hz (0.29s)、5 階/1 階の伝達関数では 3.39Hz (0.29s)、3 階/1 階の伝達関数では 3.36Hz (0.30s) に 1 次と思われるピークが見られた。

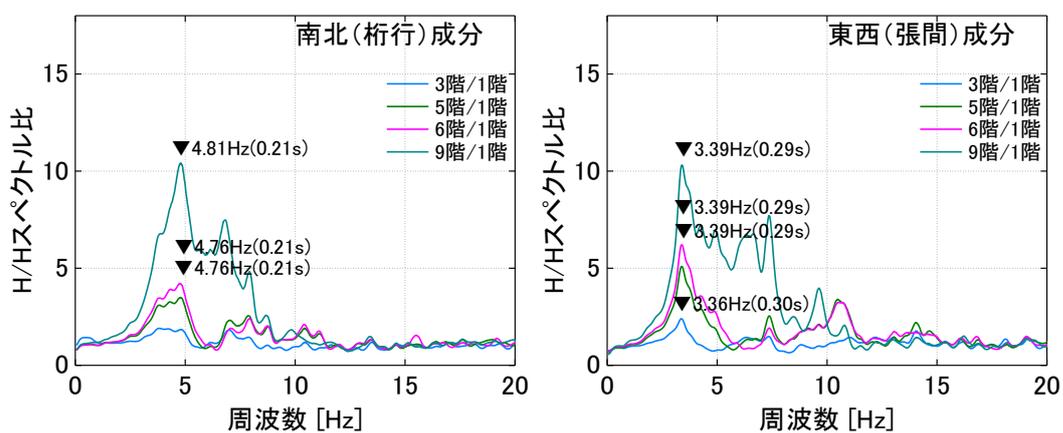
以上より、地下 1 階あるいは 1 階のどちらを基準としてもその差は 0.02 秒程度とほぼ同様の固有周期となり、計測ケース 1-1 における固有周期およびスウェイ・ロッキング率の算定方法は適切であることが確認された。また、図 2-38 より、卓越周期は、耐震改修により、南北 (桁行) 成分では 0.07 秒程度短くなり、東西 (張間) 成分では 0.03~0.04 秒程度とやや短周期化したことが分かる。



(a) 南北（桁行）成分

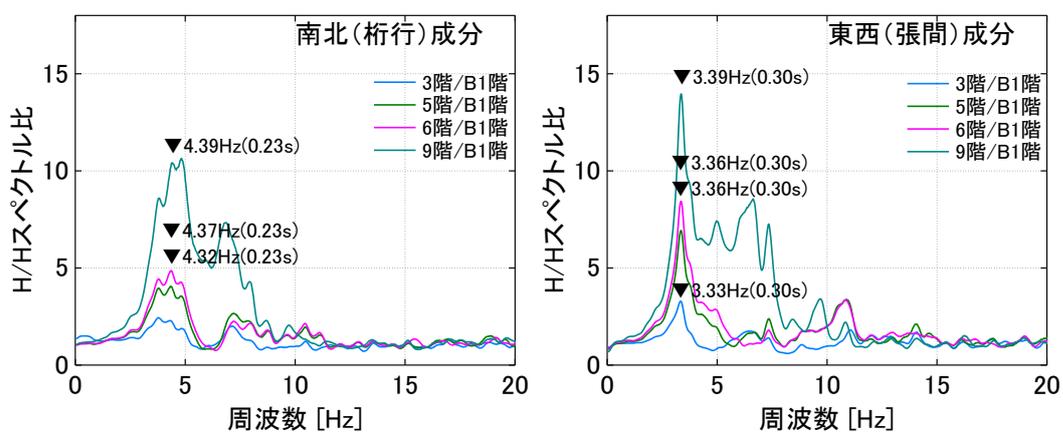
(b) 東西（張間）成分

図 2-36 成分別のフーリエスペクトル



(a) 南北（桁行）成分（基準：1階）

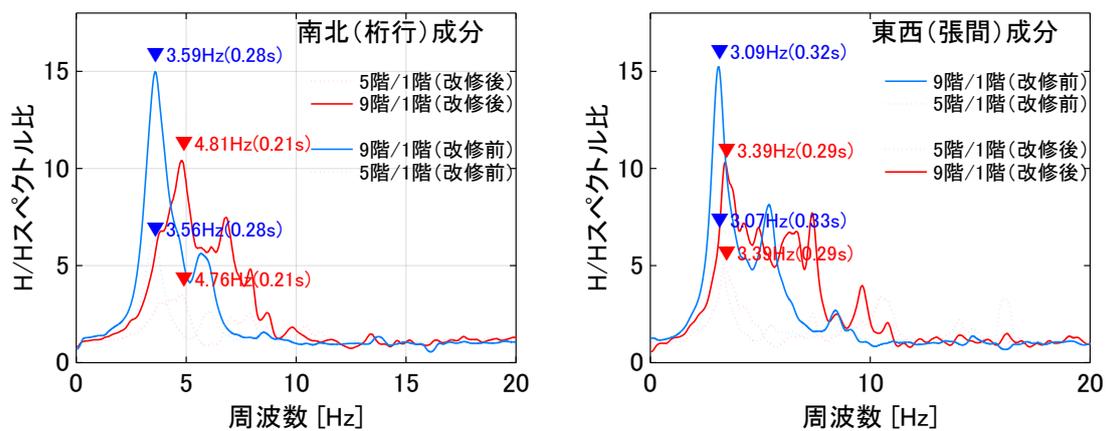
(b) 東西（張間）成分（基準：1階）



(a) 南北（桁行）成分（基準：地下1階）

(b) 東西（張間）成分（基準：地下1階）

図 2-37 伝達関数 (H/H スペクトル比)



(a) 南北 (桁行) 成分

(b) 東西 (張間) 成分

図 2-38 周波数スペクトルの比較

(3) 計測ケース 2

計測ケース 2 (図 2-21) では、固有周期、東西成分のスウェイ・ロッキング率といった、本館上部構造の振動性状を把握する目的で実施した計測である。

図 2-39 に各階の常時微動水平成分のフーリエスペクトル、図 2-40 に地下 1 階および 1 階の常時微動水平成分のフーリエスペクトルに対する 5 階および 3 階の常時微動水平成分のフーリエスペクトルの比 (伝達関数) を示す。また、図 2-41 に改修前後の周波数スペクトルの比較を示す。南北成分については、5 階/地下 1 階の伝達関数では 4.43Hz (0.23s)、3 階/地下 1 階の伝達関数では 4.37Hz (0.23s) に 1 次と思われるピークが見られ、5 階/1 階の伝達関数では 4.38Hz (0.22s)、3 階/1 階の伝達関数では 4.33Hz (0.23s) に 1 次と思われるピークが見られた。一方、東西成分については、5 階/地下 1 階の伝達関数では 3.56Hz (0.28s)、3 階/地下 1 階の伝達関数では 3.49Hz (0.29s) に 1 次と思われるピークが見られ、5 階/1 階の伝達関数では 3.54Hz (0.28s)、3 階/1 階の伝達関数では 3.49Hz (0.29s) に 1 次と思われるピークが見られた。以上より、地下 1 階あるいは 1 階のどちらを基準としても同様の固有周期となることが計測ケース 1-2 と同様に確認できた。

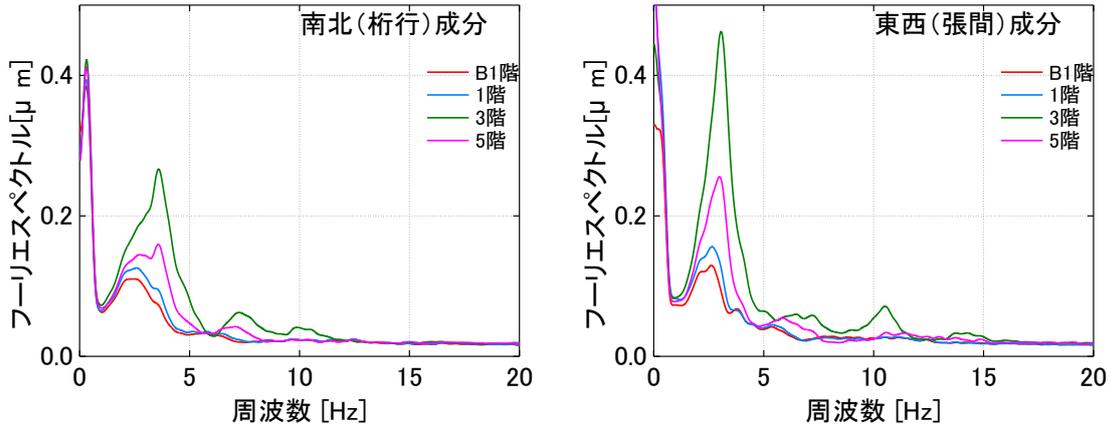
本館東西 (張間) 成分のスウェイ率およびロッキング率は、計測ケース 1-1 における本館南北 (桁行) 成分のスウェイ率およびロッキング率の算定と同様、1 次固有周期 $T_{FIX+S+R}$ において最大の変形をした 5 階の微動波形を用いて算定を行った。スウェイ成分およびロッキング成分に相当する微動波形を図 2-42 に示す。本館南北方向におけるスウェイ率およびロッキング率は、以下の通りである (表 2-2)。

$$S_{\text{南北成分}}=35.3\% \text{ (改修前では } 28.5\%) \quad R_{\text{南北成分}}=34.2\% \text{ (改修前では } 17.2\%)$$

耐震改修前後において、スウェイ率、ロッキング率ともに増加する傾向が見られたが、これは、耐震改修により基礎固定時の上部構造応答成分の割合が減少したことに起因すると考えられる。さらに、前述した計測ケース 1-1 における 5 階 / 1 階の伝達関数から求められた固有周期 (0.30s) を、スウェイ動およびロッキング動を伴う系の周期 $T_{FIX+S+R}$ とし、スウェイ動およびロッキング動を除いた建物基礎固定時における系の周期 T_{FIX} を求めると、

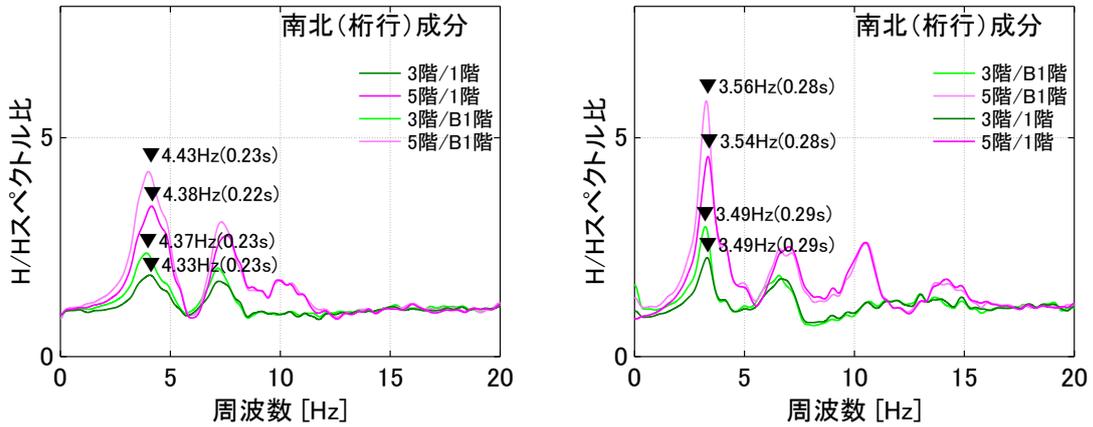
$$T_{FIX} = T_{FIX+S+R} \times \sqrt{(100-S-R)/100} = 0.17\text{s} \text{ (6.04Hz)}$$

となり、改修により、本館南北方向における卓越周期は 0.07 秒程度短くなったことがわかる。



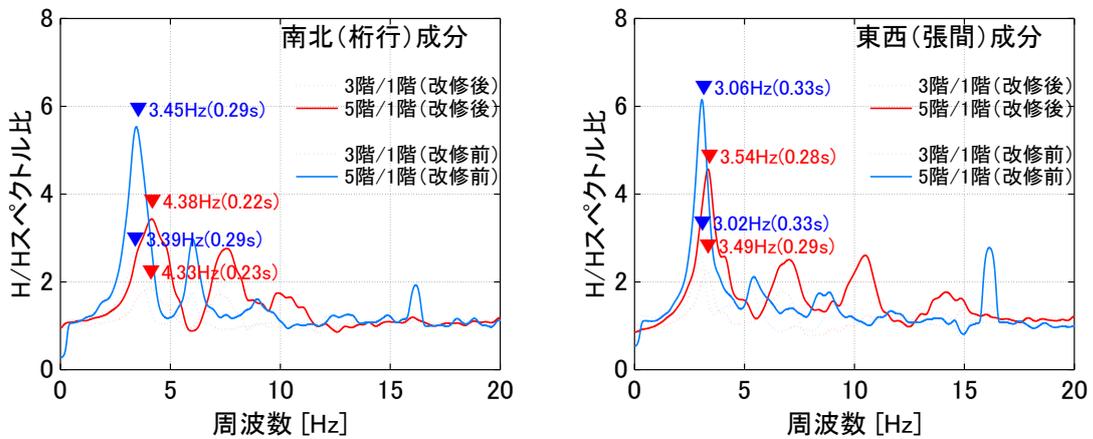
(a) 南北（桁行）成分 (b) 東西（張間）成分

図 2-39 成分別のフーリエスペクトル



(a) 南北（桁行）成分 (b) 東西（張間）成分

図 2-40 伝達関数 (H/Hスペクトル比)



(a) 南北（桁行）成分 (b) 東西（張間）成分

図 2-41 周波数スペクトルの比較

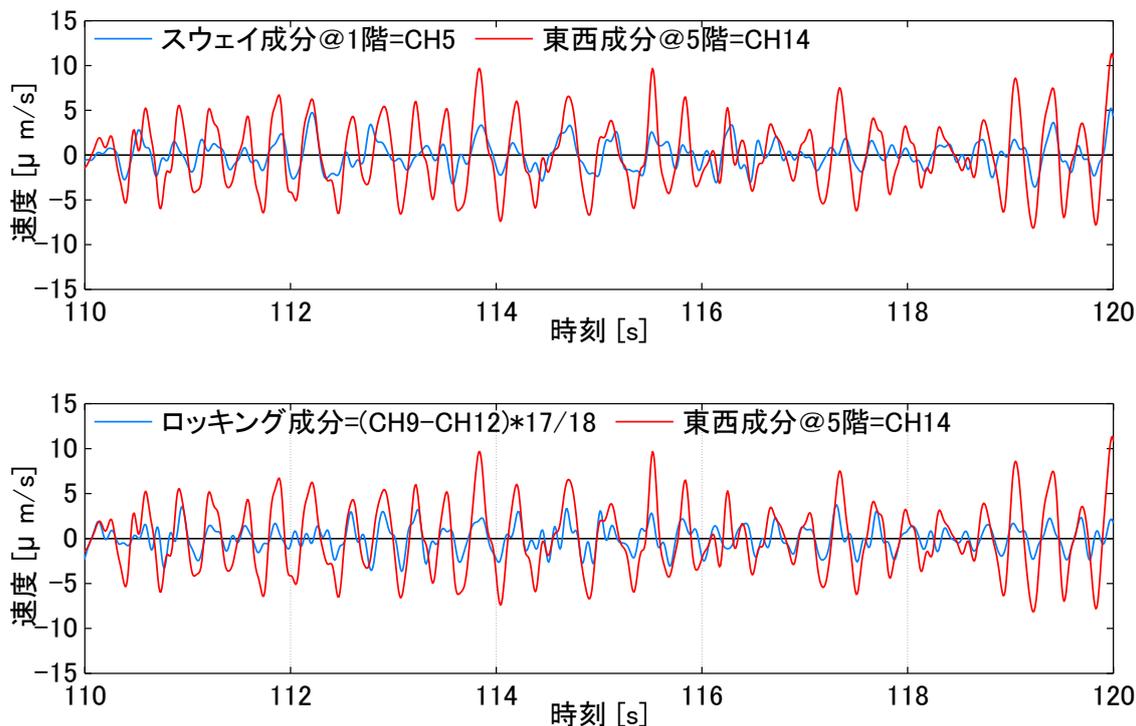


図 2-42

本館東西（張間）方向におけるスウェイ成分およびロッキング成分に相当する微動波形

表 2-2 本館東西（張間）方向におけるスウェイ率，ロッキング率および卓越周期一覧

	S	R	100-S-R	$T_{FIX+S+R}$	T_{FIX}
改修前	28.5%	17.2%	54.3%	0.32s(3.09Hz)	0.24s(4.17Hz)
改修後	35.3%	34.2%	30.5%	0.30s(3.34Hz)	0.17s(6.04Hz)

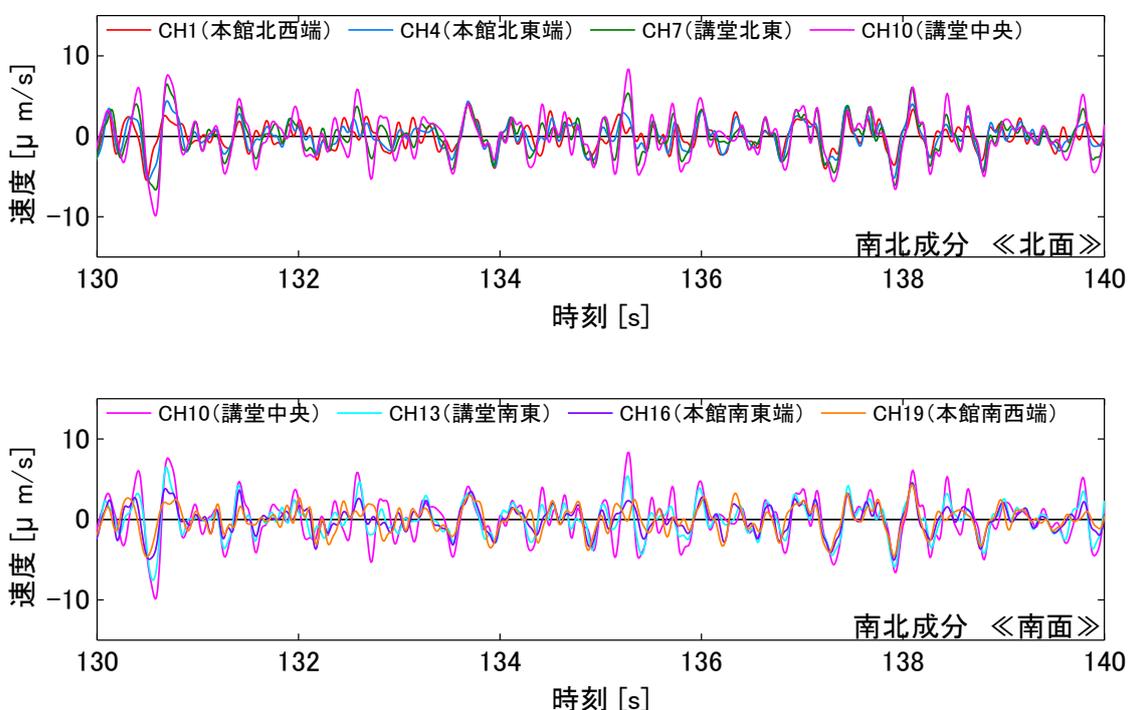
(4) 計測ケース 3-1

計測ケース 3-1 (図 2-21) では、本館および講堂 1 階床面におけるねじれ挙動を含めた挙動の一体性を調べる目的で実施した計測である。

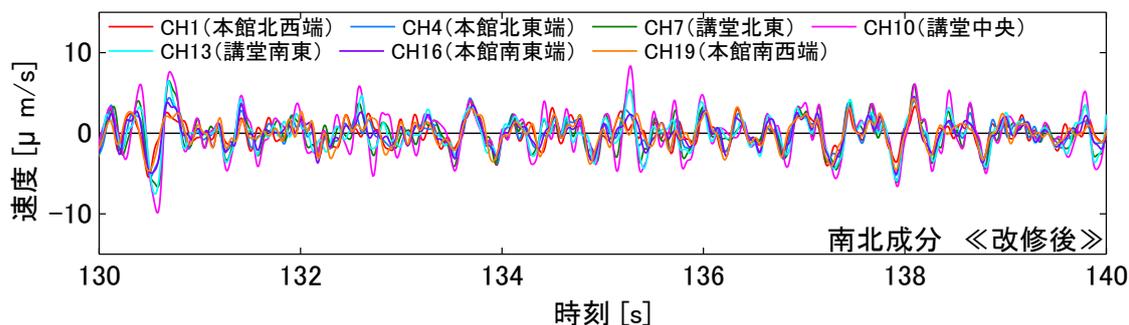
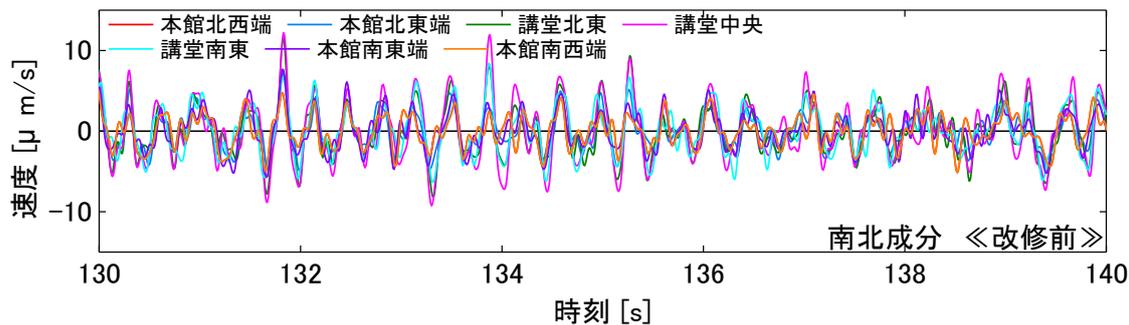
比較的定常的な振動を示した区間 (130~140 秒) の成分別の微動波形を図 2-43 (a-1), (b-1), (c-1)にそれぞれ示す。水平方向において、南北 (桁行) 成分および東西 (張間) 成分ともに、各波形の振幅は一致する区間と一致しない区間が混在しているものの、位相は概ね一致している。一方、鉛直方向においては、各波形の振幅・位相はあまり一致していない。また、成分別の微動波形の改修前後における比較を図 2-43 (a-2), (b-2), (c-2)にそれぞれ示す。同図より、微動波形の振幅および位相は、水平方向・鉛直方向ともに改修前と同様の傾向を示した。

また、図 2-44 に各成分別のフーリエスペクトルを示す。同図より、卓越周期は、改修前と同様、水平方向ではピックアップ設置点により 0.02 秒程度の違いはあるものの概ね一致する傾向が見られた。鉛直方向では、改修前にはややばらつきが見られたが、改修後には概ね一致する結果となった。

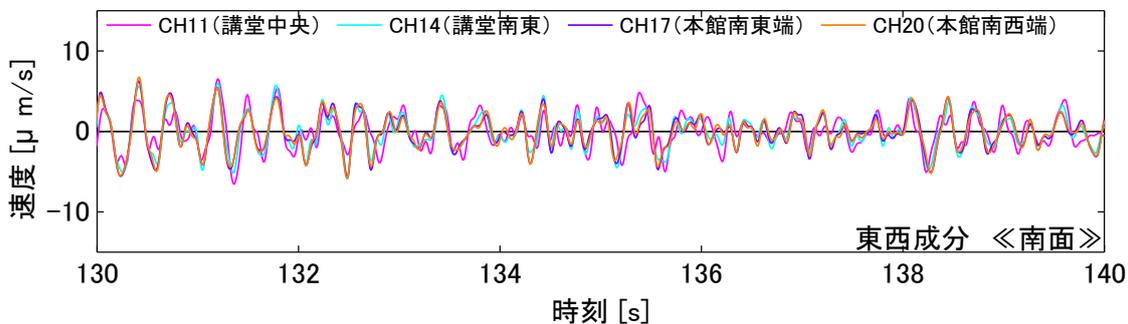
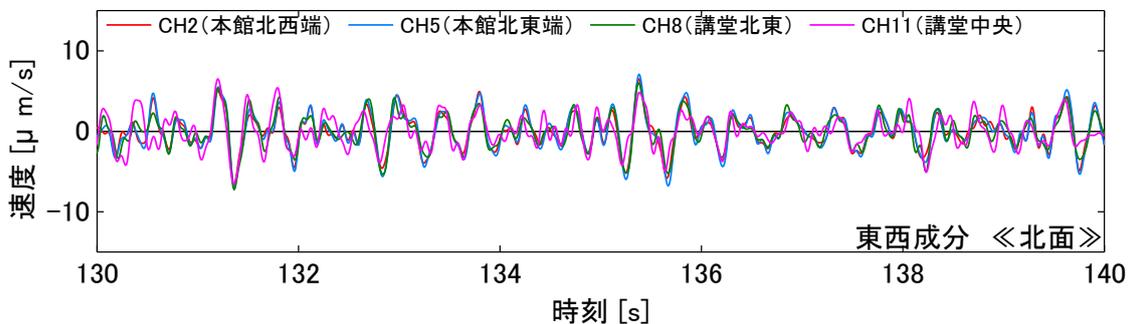
以上より、改修前と同様、本館および講堂 1 階床面において、水平方向には一体となって並進的な挙動を示すのに対し、鉛直方向には位相ずれが生じていると考えられる。



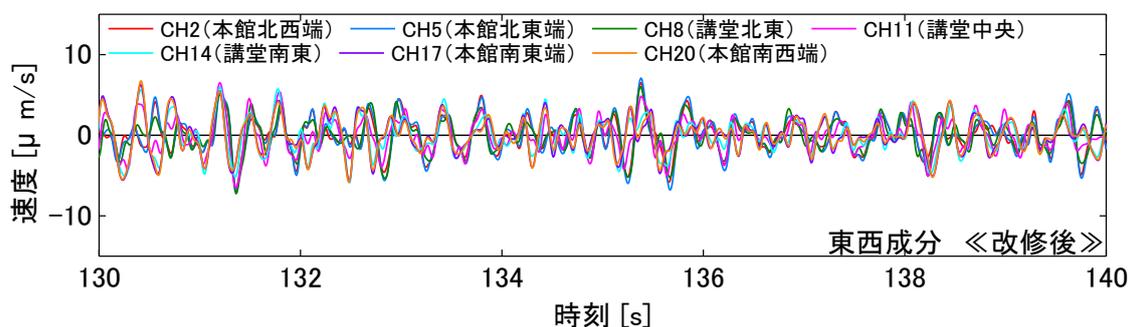
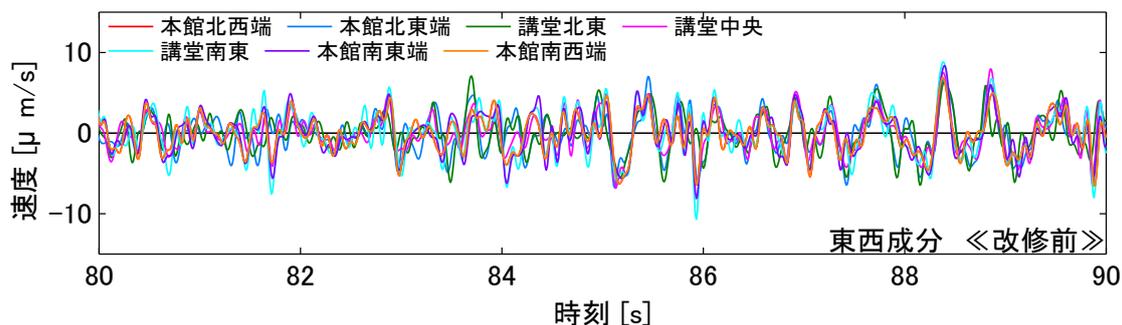
(a-1) 南北 (桁行) 成分



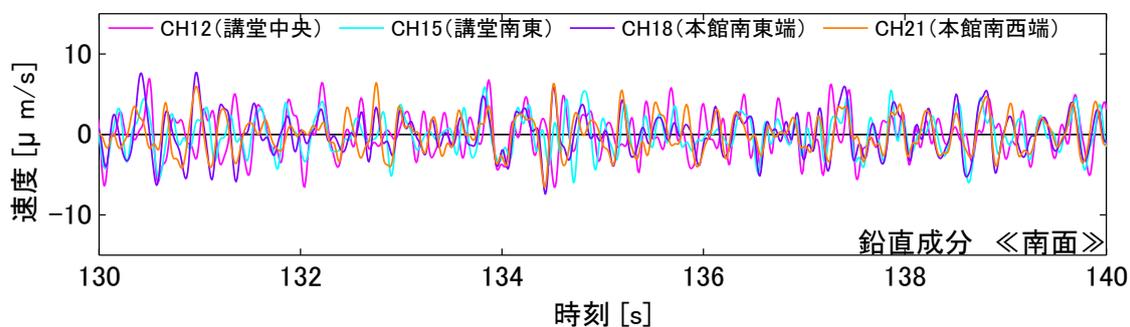
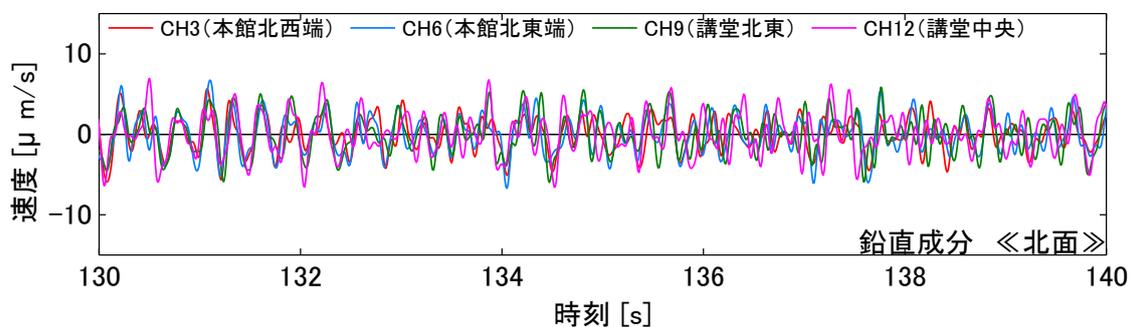
(a-2) 南北 (桁行) 成分における改修前後の比較



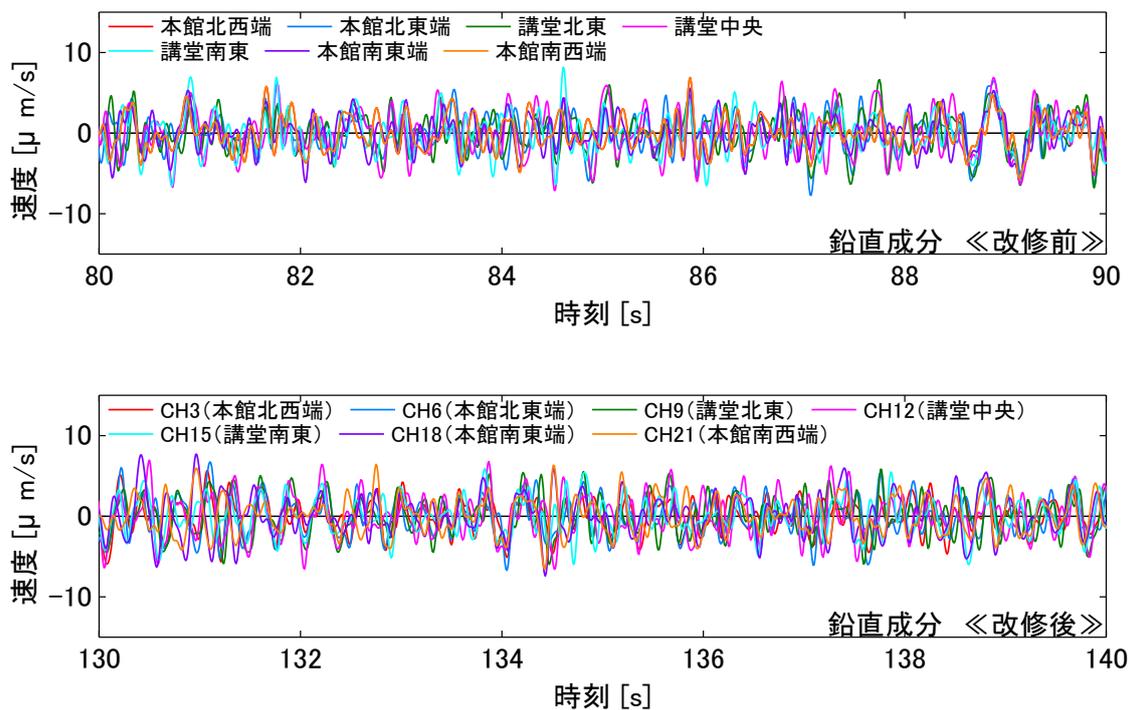
(b-1) 東西 (張間) 成分



(b-1) 東西（張間）成分における改修前後の比較

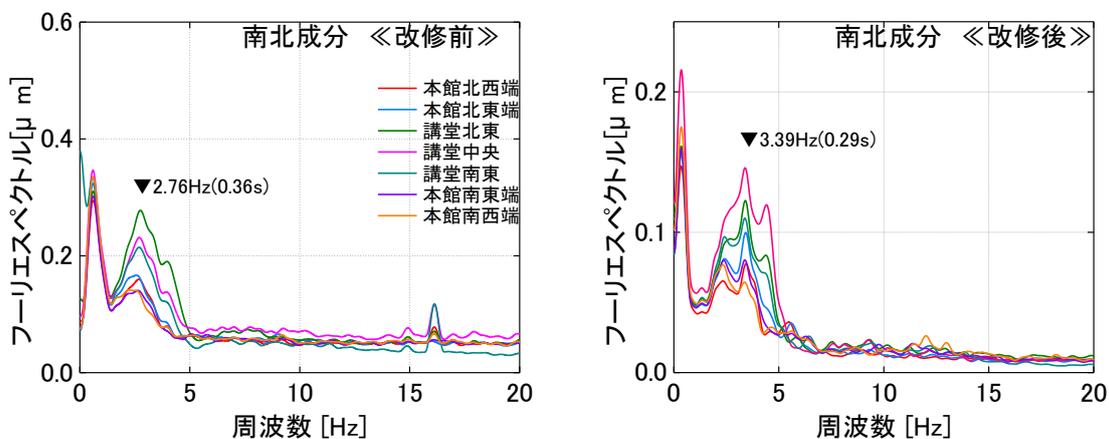


(c-1) 鉛直成分

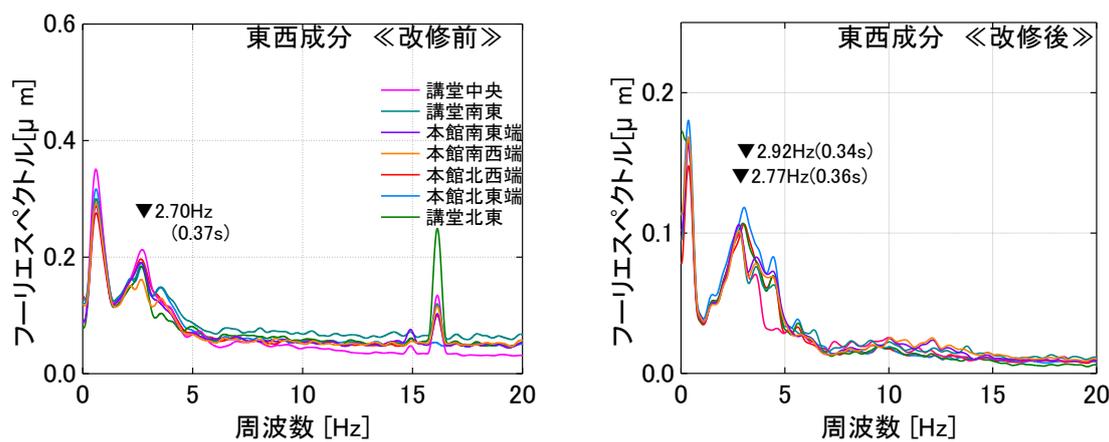


(c-2) 鉛直成分における改修前後の比較

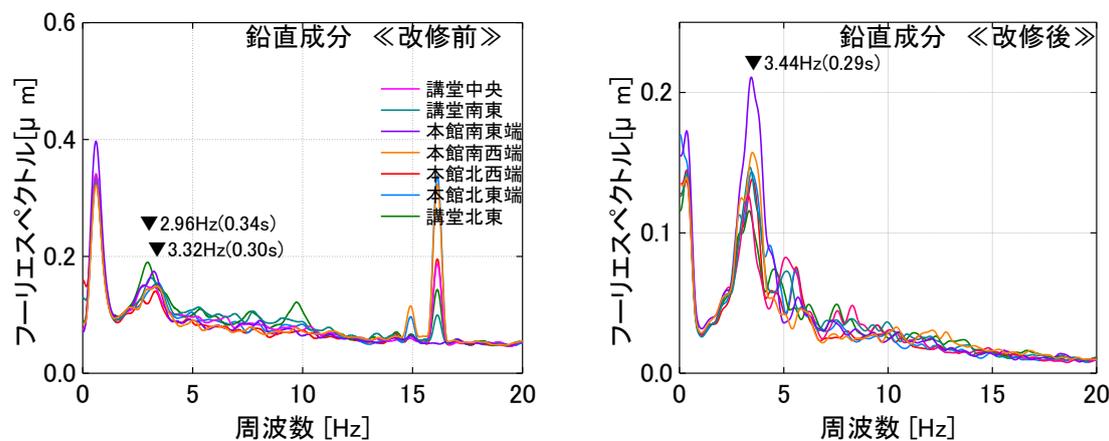
図 2-43 本館・講堂1階床面における成分別の微動波形



(a) 南北（桁行）成分



(b) 東西（張間）成分



(c) 鉛直成分

図 2-44 本館・講堂1階床面における改修前後のフーリエスペクトルの比較

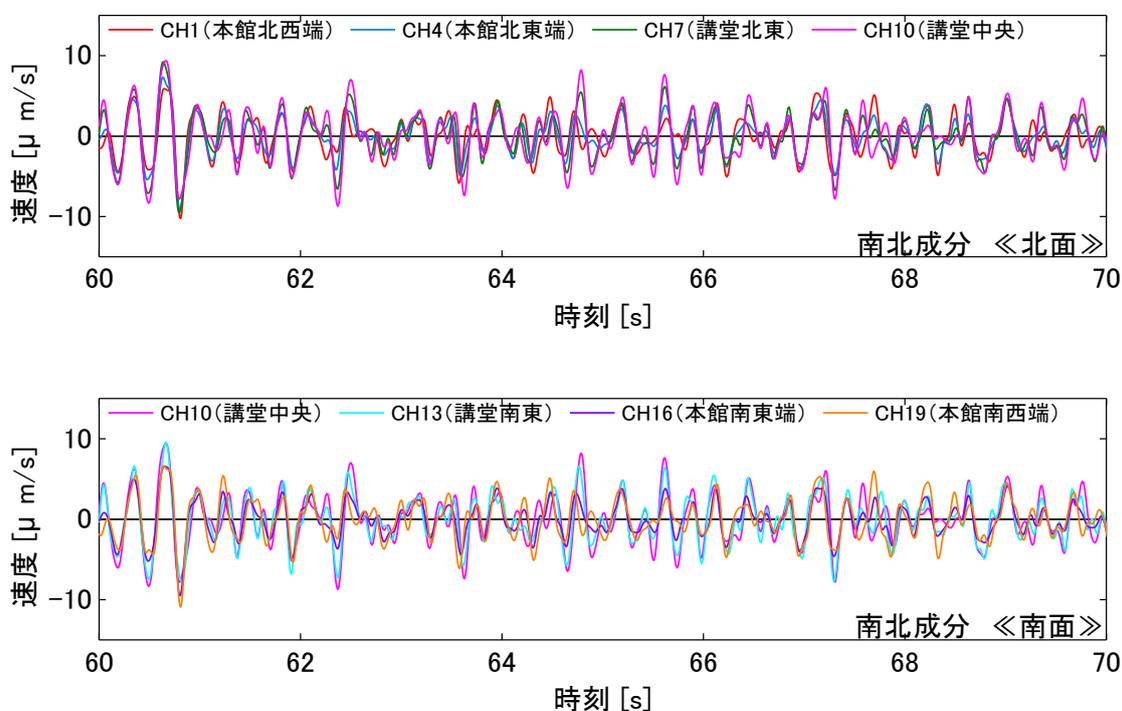
(5) 計測ケース 3-2

計測ケース 3-2 (図 2-22) では、本館および講堂 4 階床面におけるねじれ挙動を含めた挙動の一体性を調べる目的で実施した計測である。

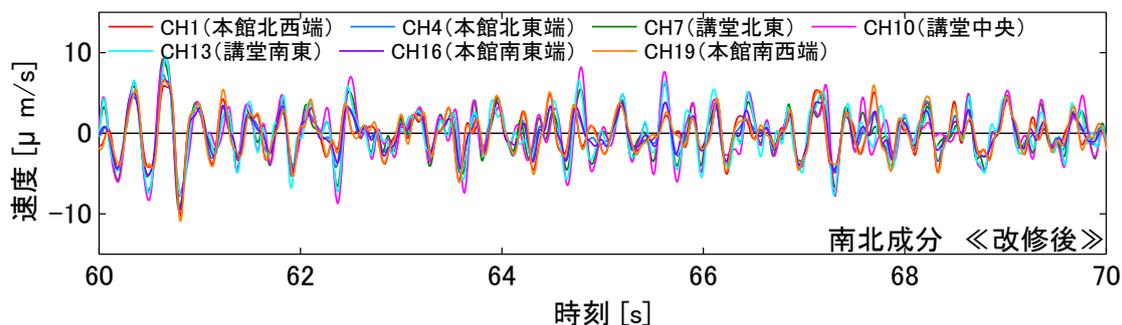
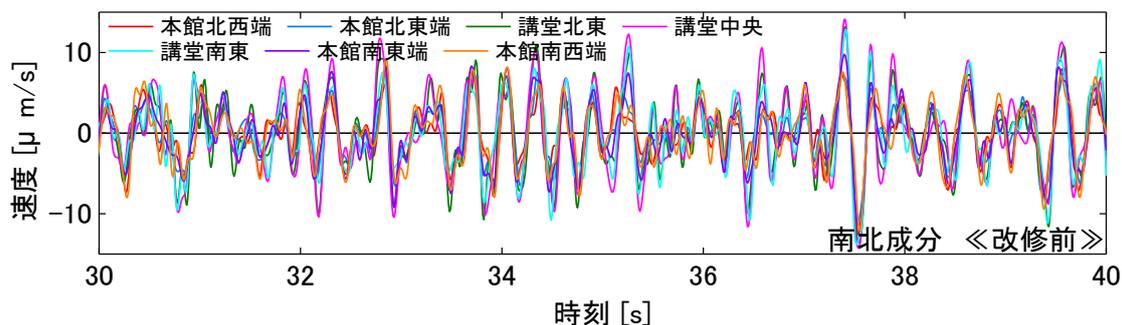
比較的定常的な振動を示した区間 (60~70 秒) の成分別の微動波形を図 2-45 (a-1), (b-1), (c-1)にそれぞれ示す。水平方向において、南北 (桁行) 成分および東西 (張間) 成分ともに、各波形の振幅は一致する区間と一致しない区間が混在しているものの、位相は概ね一致している。一方、鉛直方向においては、南半面における位相はやや一致するものの、概ね各波形の振幅・位相はあまり一致していない。また、成分別の微動波形の改修前後における比較を図 2-45 (a-2), (b-2), (c-2)にそれぞれ示す。これより、微動波形の振幅および位相は、水平方向・鉛直方向ともに改修前と同様の傾向を示した。

図 2-46 に各成分別のフーリエスペクトルを示す。同図より、卓越周期は、東西方向では改修前後ともに概ね一致し、鉛直方向では、改修前後ともにピックアップ設置点により 0.03~0.04 秒程度の違いがあり、ややばらつきが見られた。一方、南北方向では、改修前は概ね一致していたものの、改修後には、本館北西端および南西端において 0.06 秒程度他のピックアップより短周期であったが、これは、本館と講堂の南北方向において、卓越周期が 0.05 秒程度異なることに起因すると考えられる。

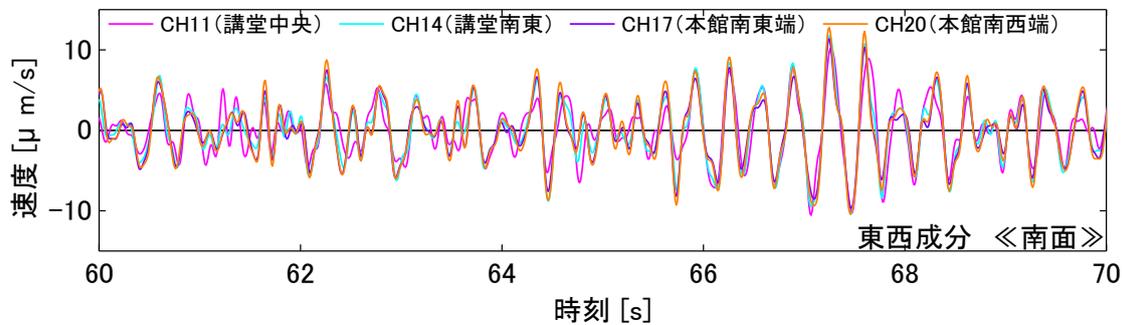
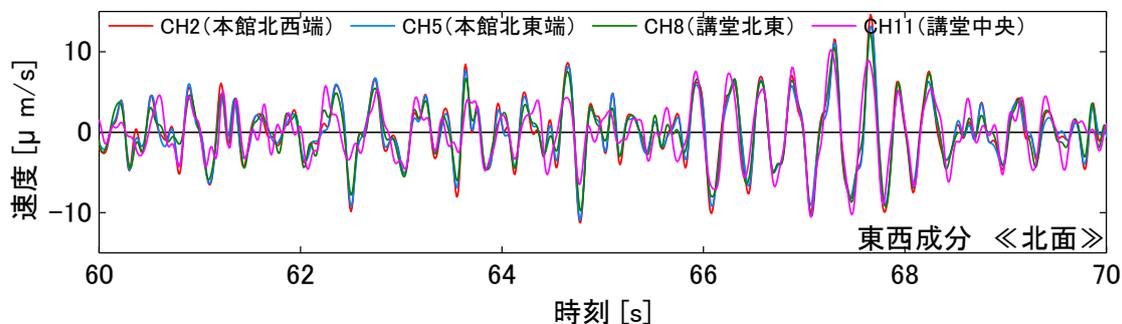
以上より、改修前と同様、本館および講堂 1 階床面において、水平方向には一体となって並進的な挙動を示すのに対し、鉛直方向には位相ずれが生じていると考えられる。



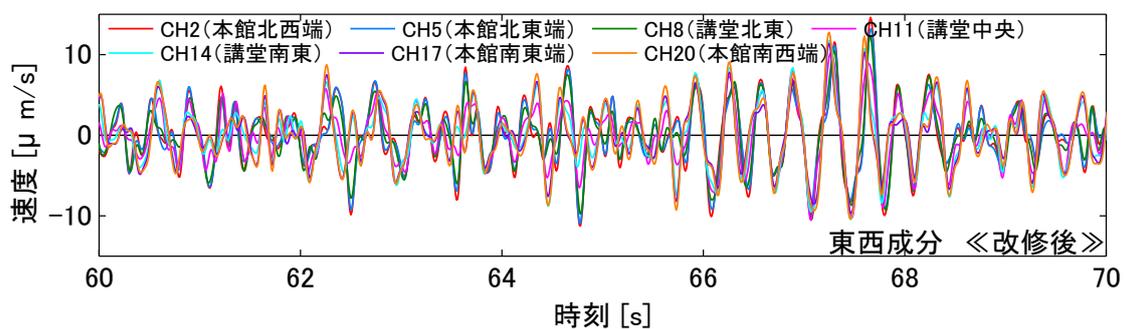
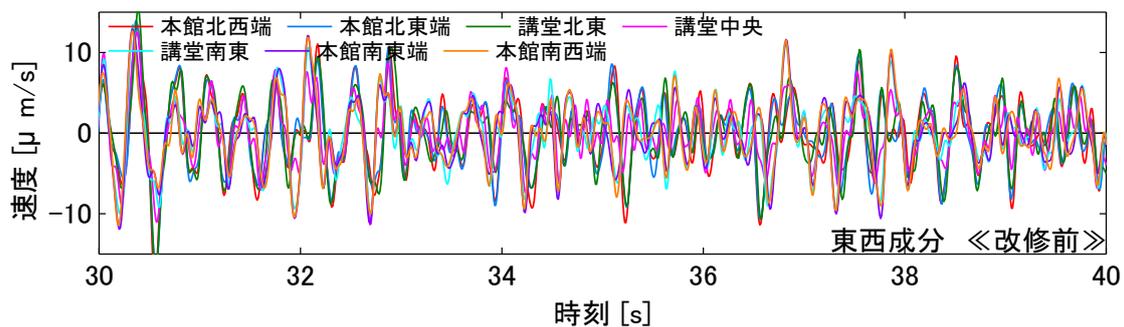
(a-1) 南北 (桁行) 成分



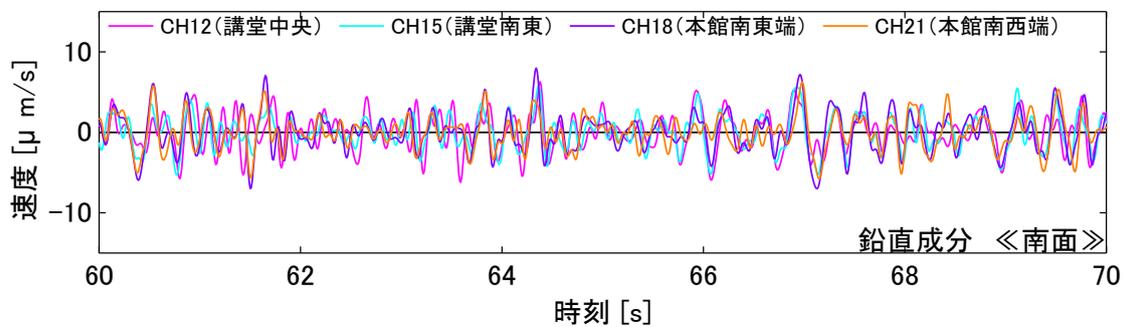
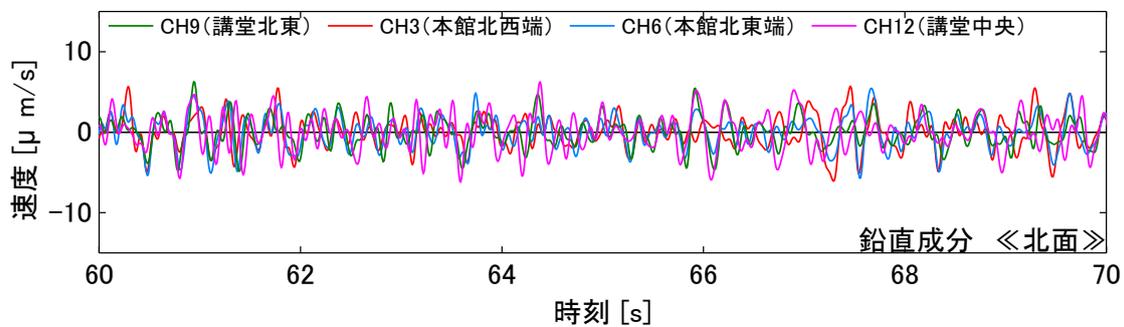
(a-2) 南北（桁行）成分における改修前後の比較



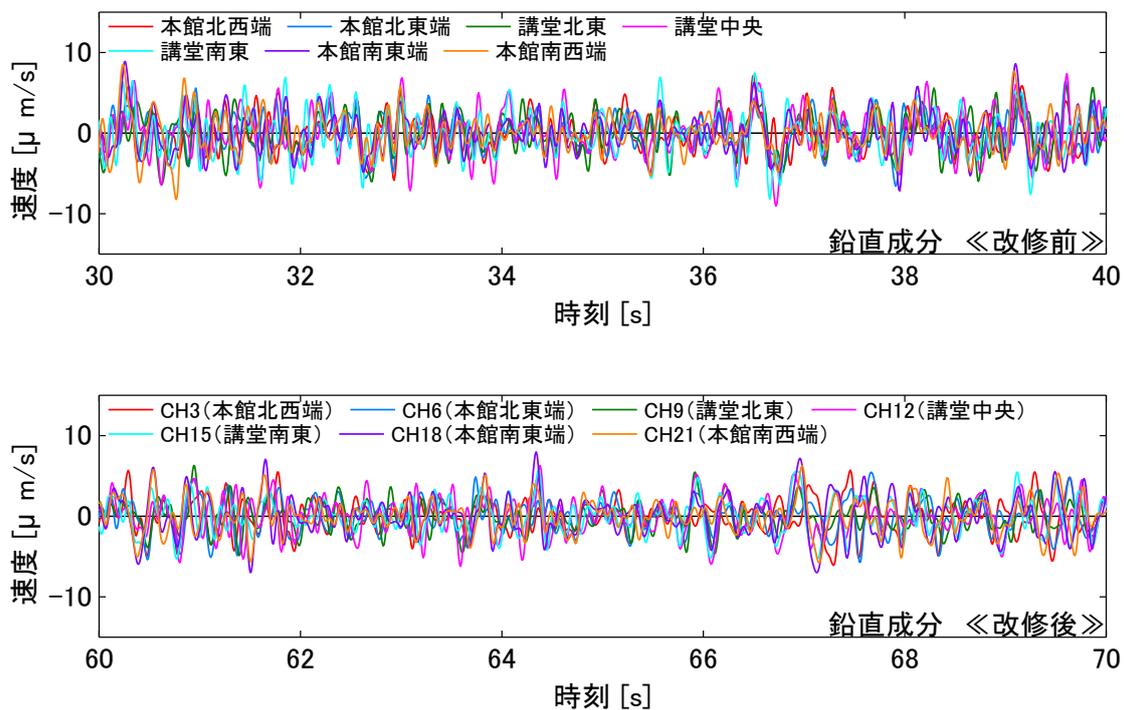
(b-1) 東西（張間）成分



(b-2) 東西（張間）成分における改修前後の比較

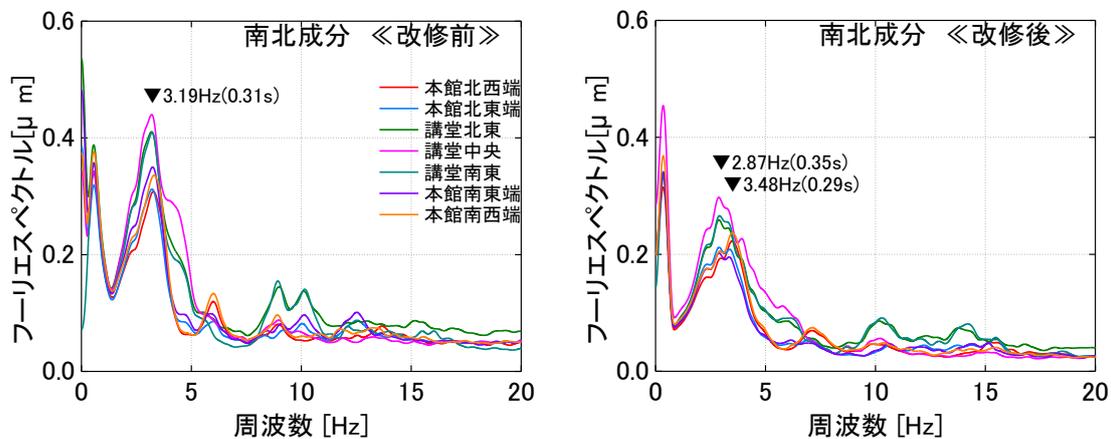


(c-1) 鉛直成分

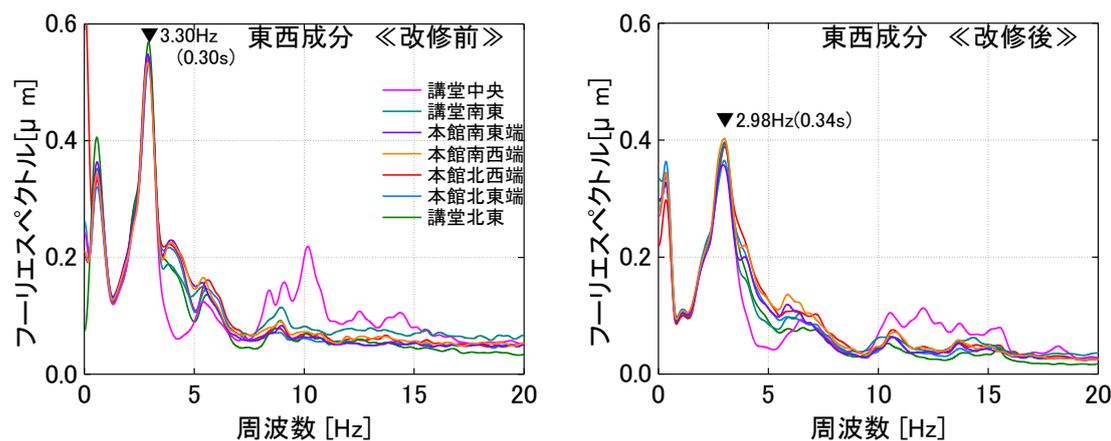


(c-2) 鉛直成分における改修前後の比較

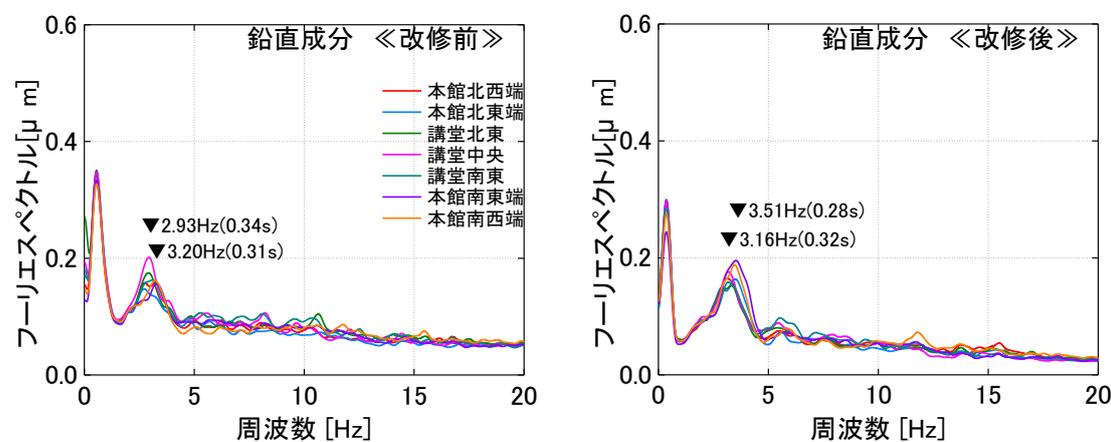
図 2-45 本館・講堂4階床面における各微動波形



(a) 南北 (桁行) 成分



(b) 東西 (張間) 成分



(c) 鉛直成分

図 2-46 本館・講堂4階床面における改修前後のフーリエスペクトルの比較

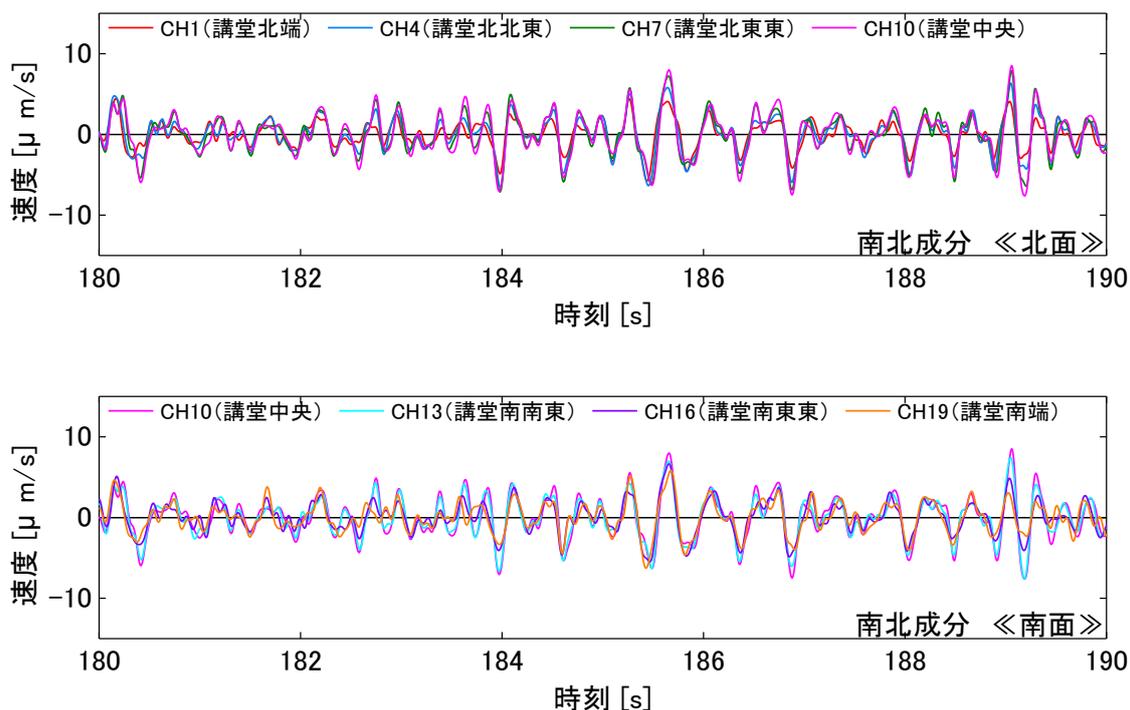
(6) 計測ケース 4-1

計測ケース 4-1 (図 2-23) では、講堂 1 階床面におけるねじれ挙動を含めた挙動の一体性を調べる目的で実施した計測である。

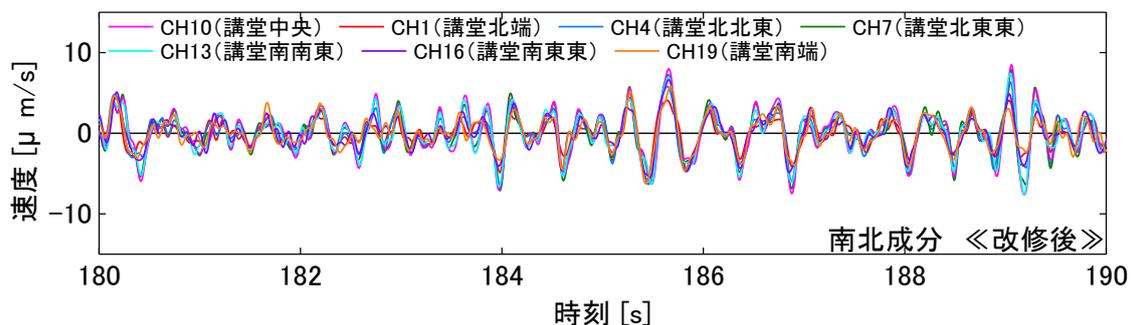
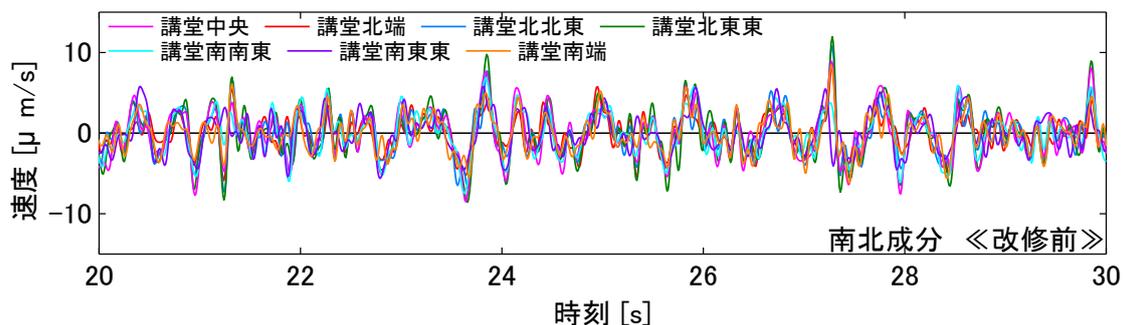
比較的定常的な振動を示した区間 (180~190 秒) の成分別の微動波形を図 2-47 (a-1), (b-1), (c-1)にそれぞれ示す。また、成分別の微動波形の改修前後における比較を図 2-47 (a-2), (b-2), (c-2)にそれぞれ示す。水平方向において、南北 (桁行) 成分および東西 (張間) 成分ともに、各波形の振幅はややばらつきが見られるものの、位相は概ね一致している。一方、鉛直方向においては、改修前と同様、各波形の振幅および位相は一致する時間と一致しない時間が混在していることが分かる。

図 2-48 に各成分別のフーリエスペクトルを示す。同図より卓越周期は、水平方向では、改修前と同様概ね一致し、鉛直方向では、改修前と同様、ピックアップ設置点によってややばらつきが見られる。

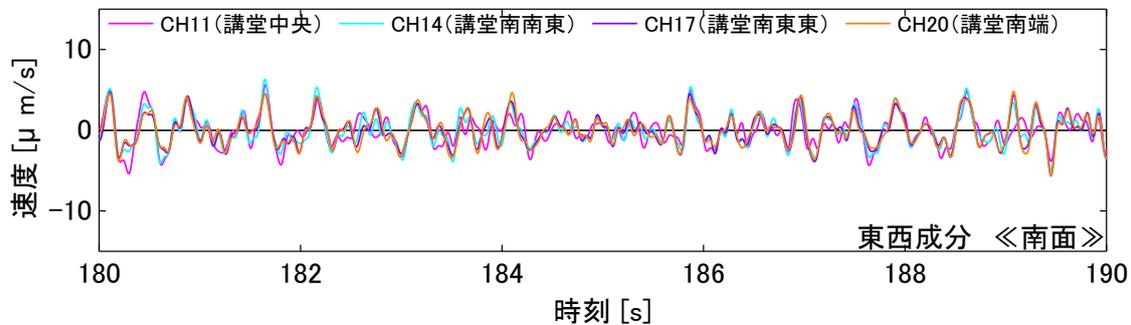
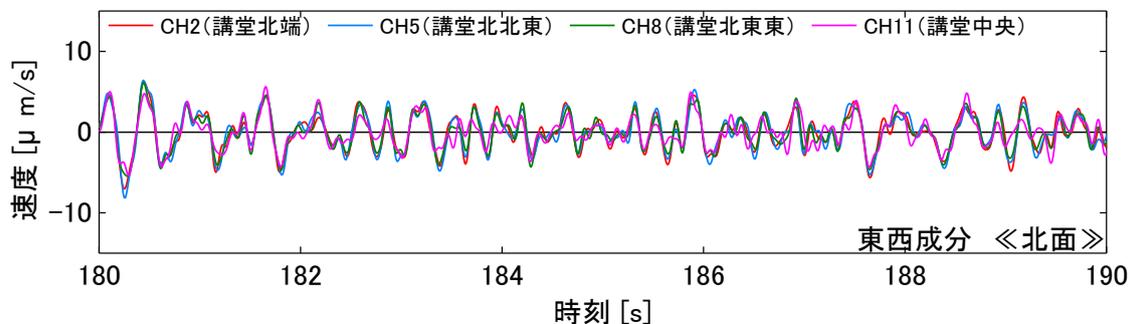
以上より、改修前と同様、講堂 1 階床面において、水平方向には一体となって並進的な挙動を示すのに対し、鉛直方向には位相ずれが生じていると考えられる。



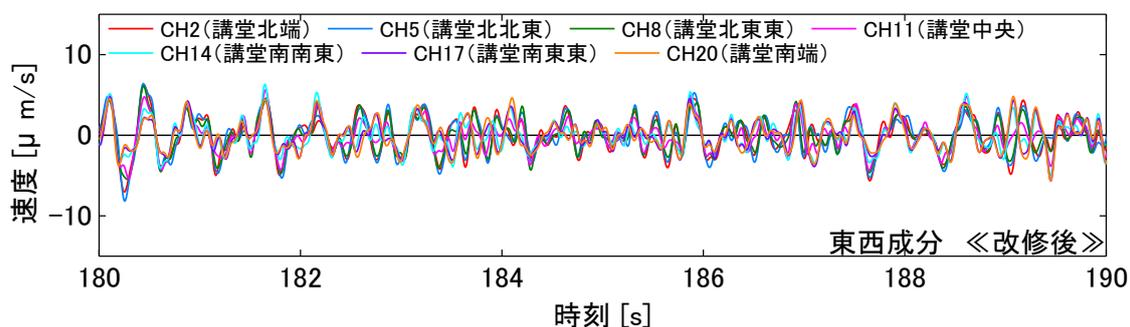
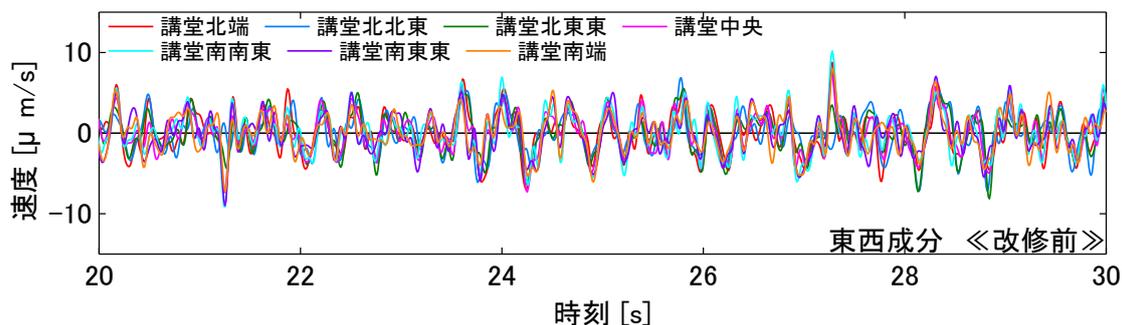
(a-1) 南北 (桁行) 成分



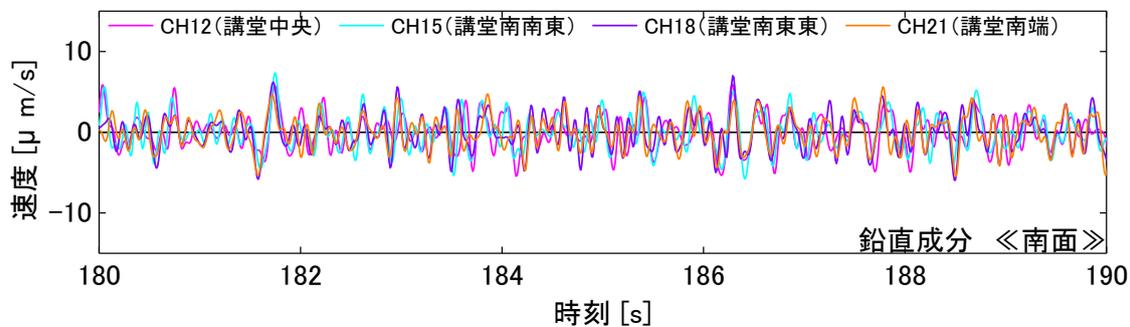
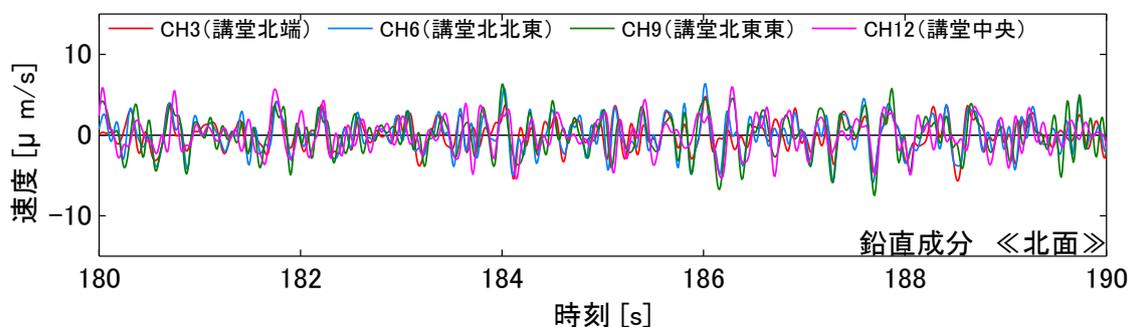
(a-2) 南北（桁行）成分における改修前後の比較



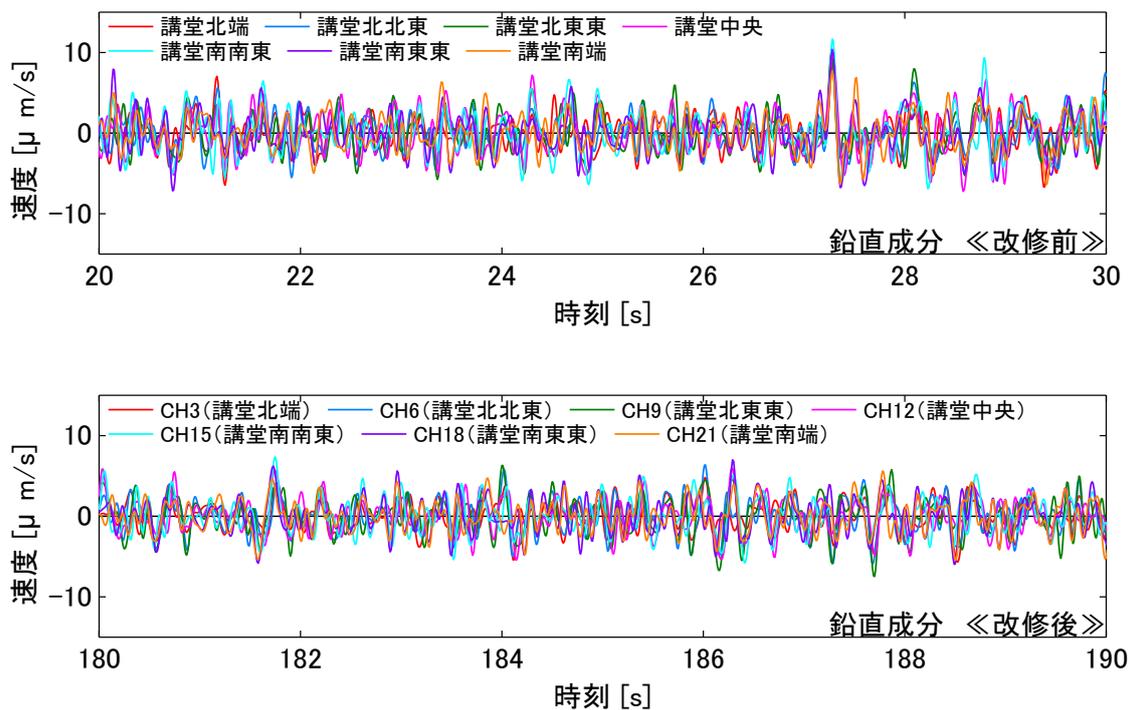
(b-1) 東西（張間）成分



(b-2) 東西（張間）成分における改修前後の比較

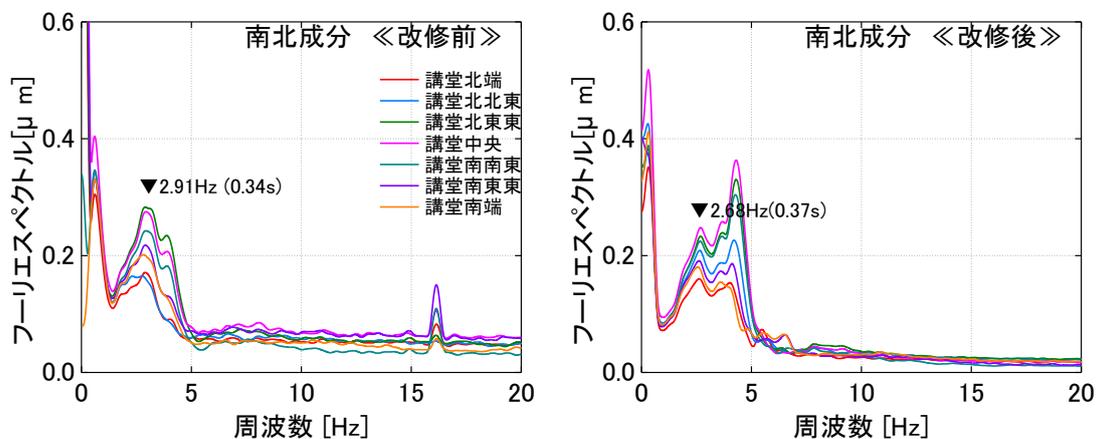


(c-1) 鉛直成分

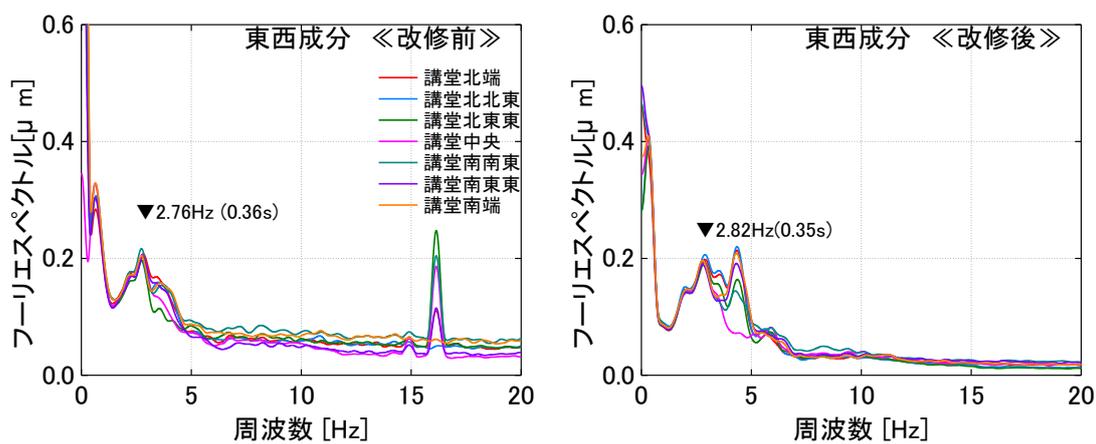


(c-2) 鉛直成分における改修前後の比較

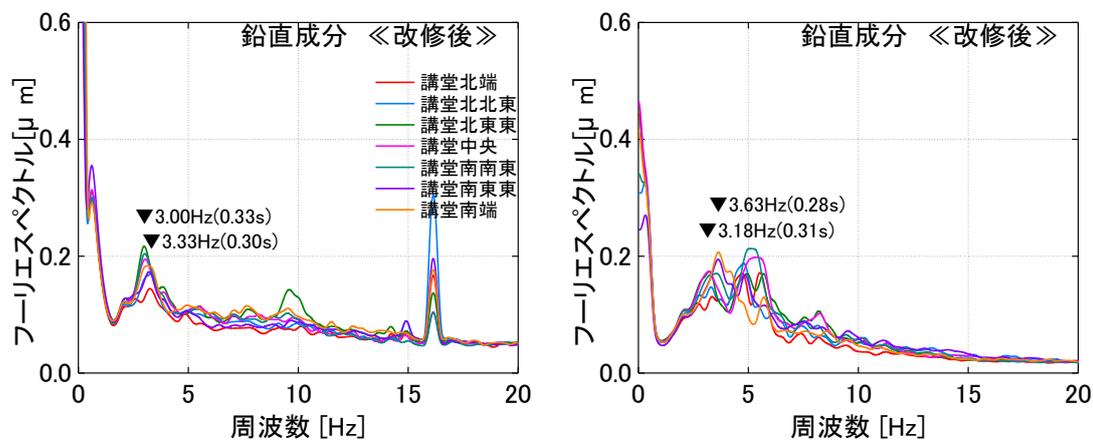
図 2-47 講堂1階床面における各微動波形



(a) 南北 (桁行) 成分



(b) 東西 (張間) 成分



(c) 鉛直成分

図 2-48 講堂1階床面における改修前後のフーリエスペクトルの比較

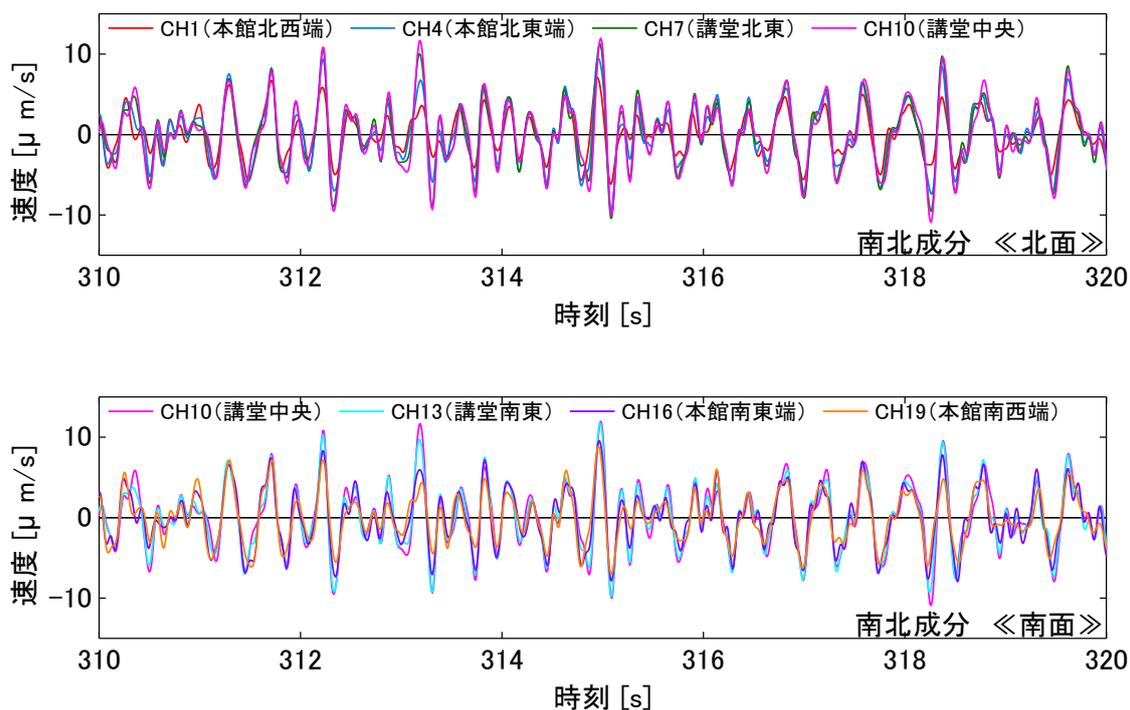
(7) 計測ケース 4-2

計測ケース 4-2 (図 2-24) では、講堂 4 階床面におけるねじれ挙動を含めた挙動の一体性を調べる目的で実施した計測である。

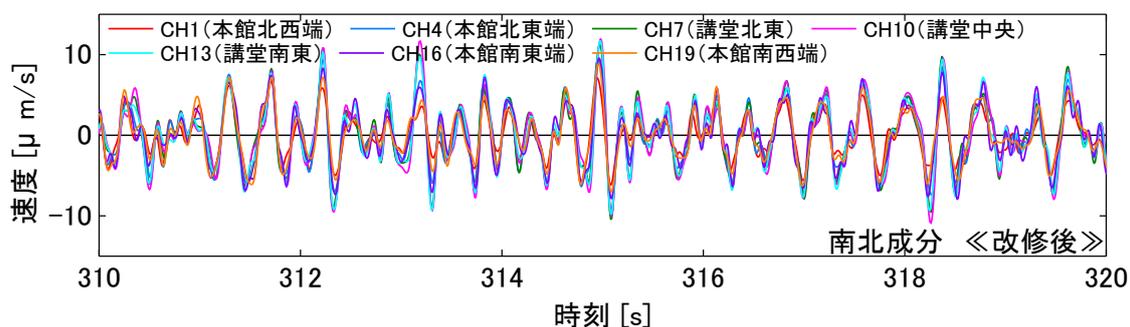
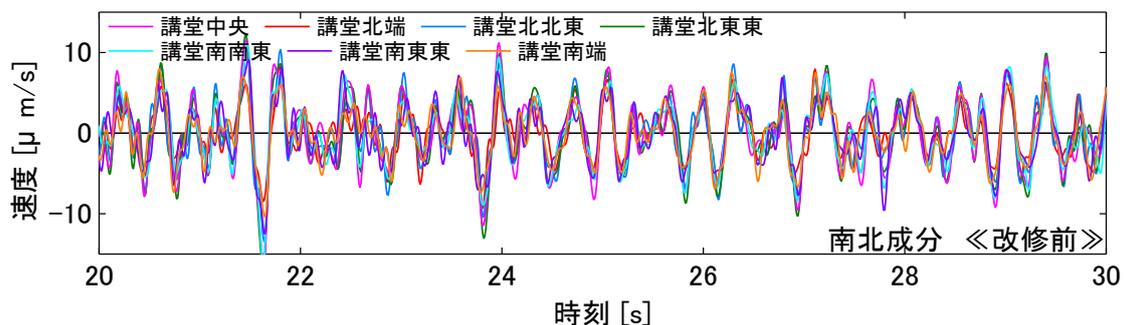
比較的定常的な振動を示した区間 (180~190 秒) の成分別の微動波形を図 2-49 (a-1), (b-1), (c-1)にそれぞれ示す。また、成分別の微動波形の改修前後における比較を図 2-49 (a-2), (b-2), (c-2)にそれぞれ示す。水平方向において、南北 (桁行) 成分および東西 (張間) 成分では、改修前と同様、各波形の振幅は一致する区間と一致しない区間が混在しているものの、位相は概ね一致している。その一方で、鉛直方向においては、改修前と同様、各波形の振幅および位相は一致する時間と一致しない時間が混在していることが分かる。

図 2-50 に各成分別のフーリエスペクトルを示す。同図より、卓越周期は、改修前と同様、水平方向では概ね一致し、鉛直方向では、ピックアップ設置点によってややばらつきが見られる。

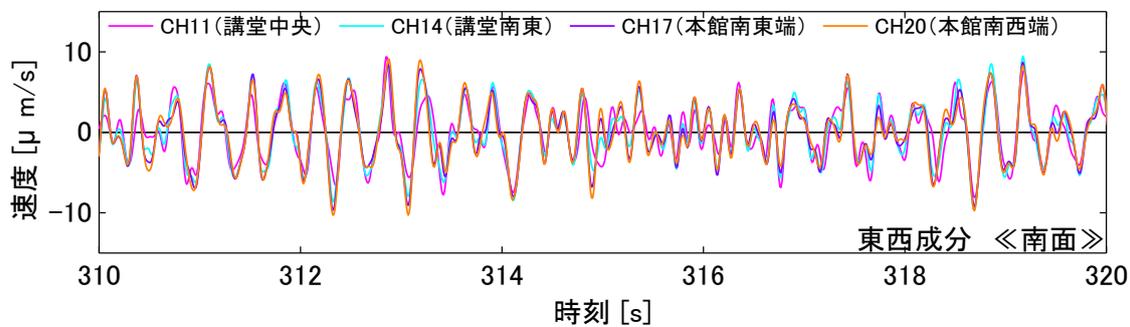
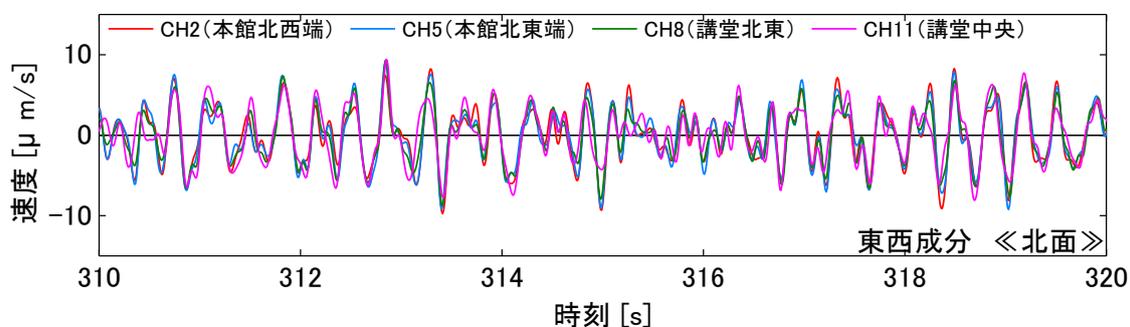
以上より、本館および講堂 1 階床面において、水平方向には一体となって並進的な挙動を示すのに対し、鉛直方向には位相ずれが生じていると考えられ、改修前と同様の結果となった。



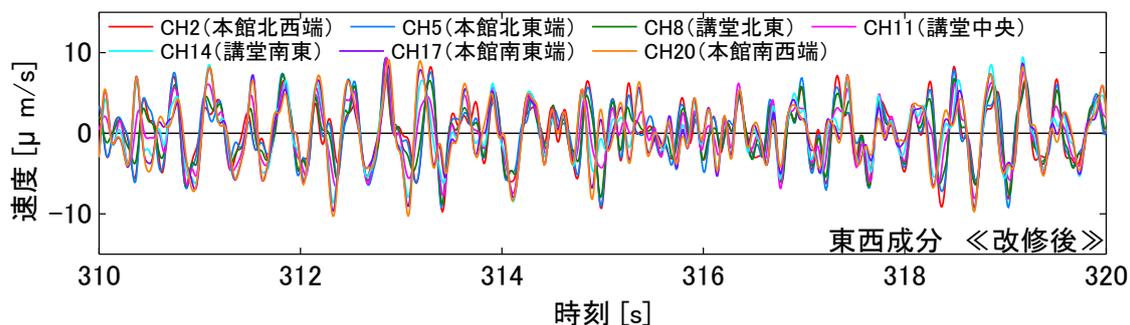
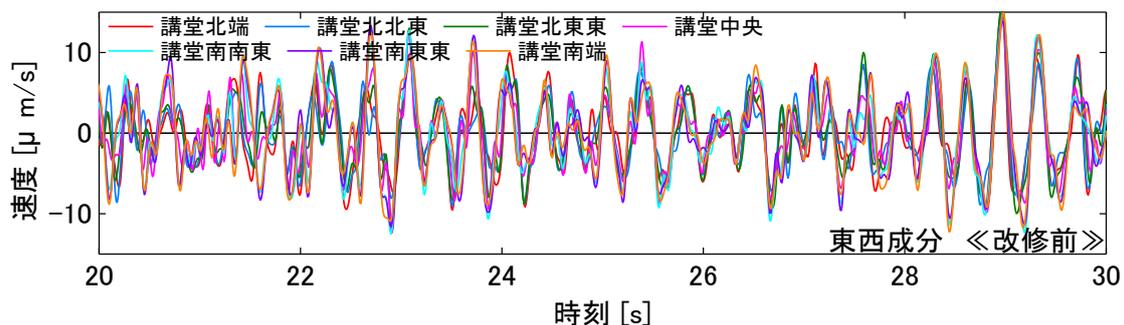
(a-1) 南北 (桁行) 成分



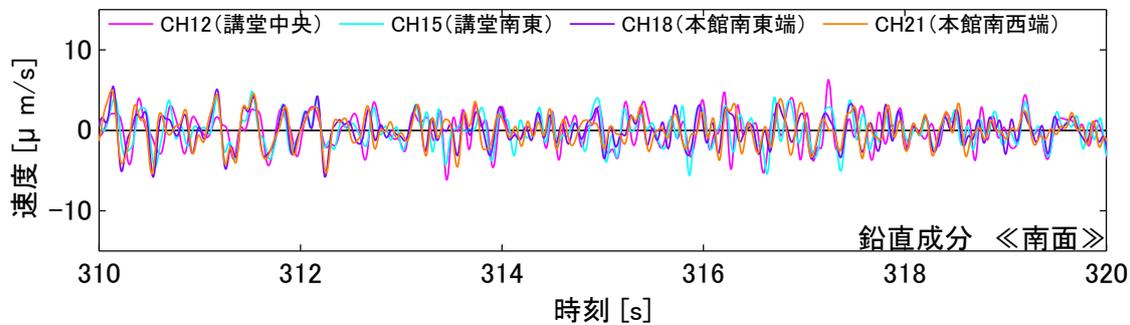
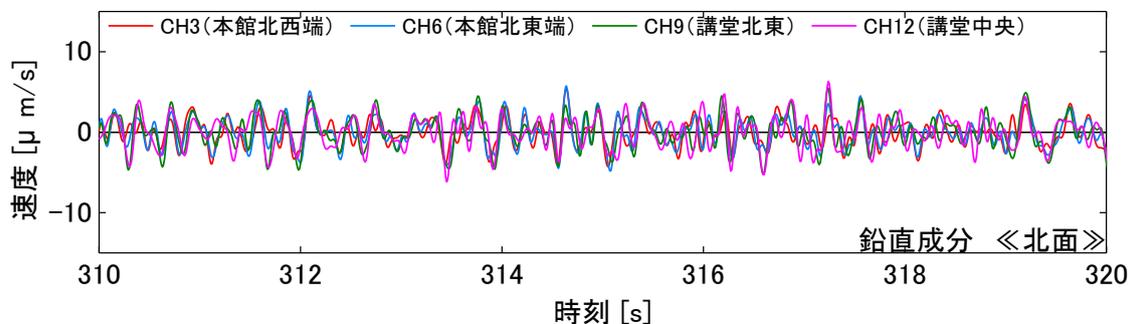
(a-2) 南北（桁行）成分における改修前後の比較



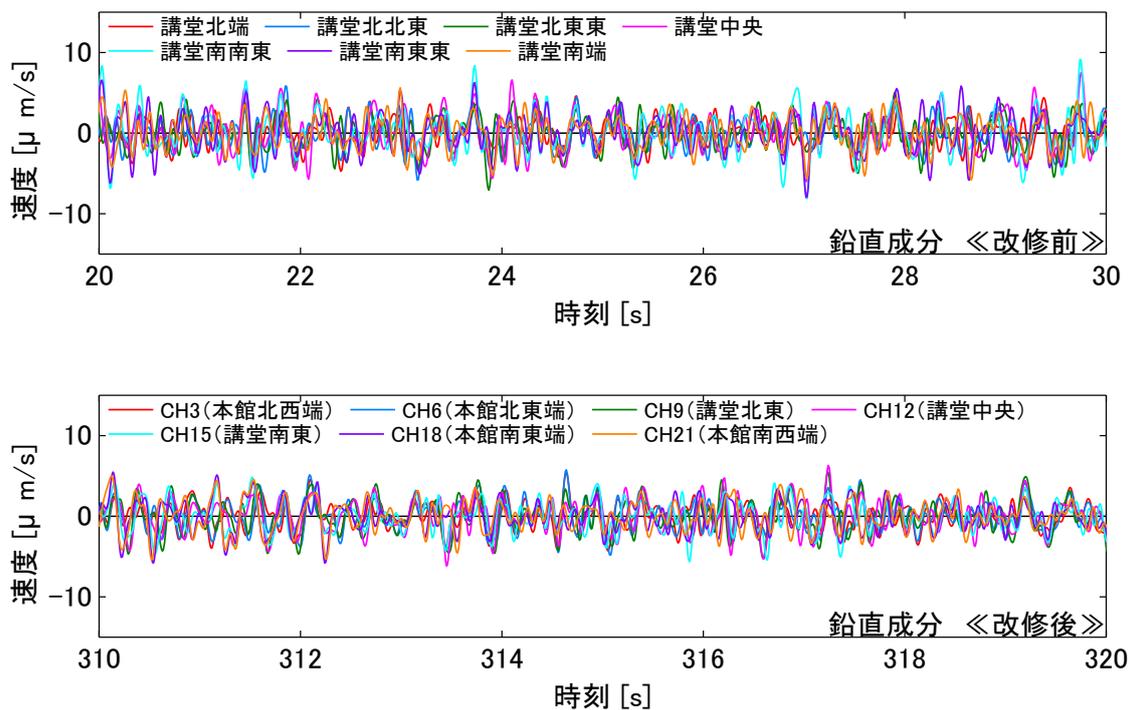
(b-1) 東西（張間）成分



(b-2) 東西（張間）成分における改修前後の比較

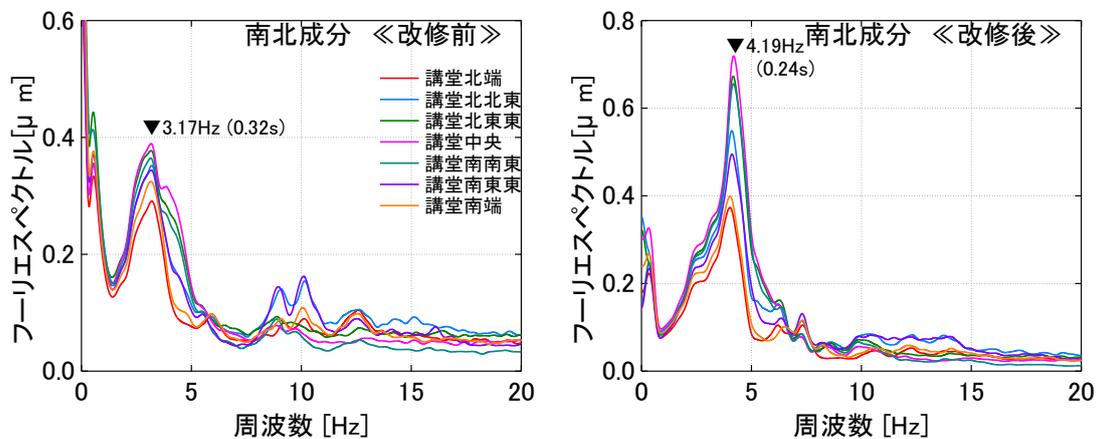


(c-1) 鉛直成分

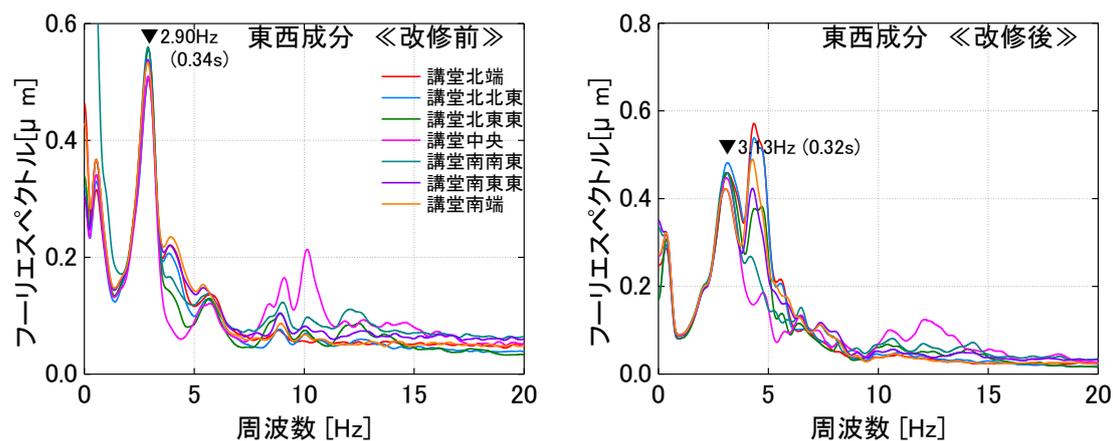


(c-2) 鉛直成分における改修前後の比較

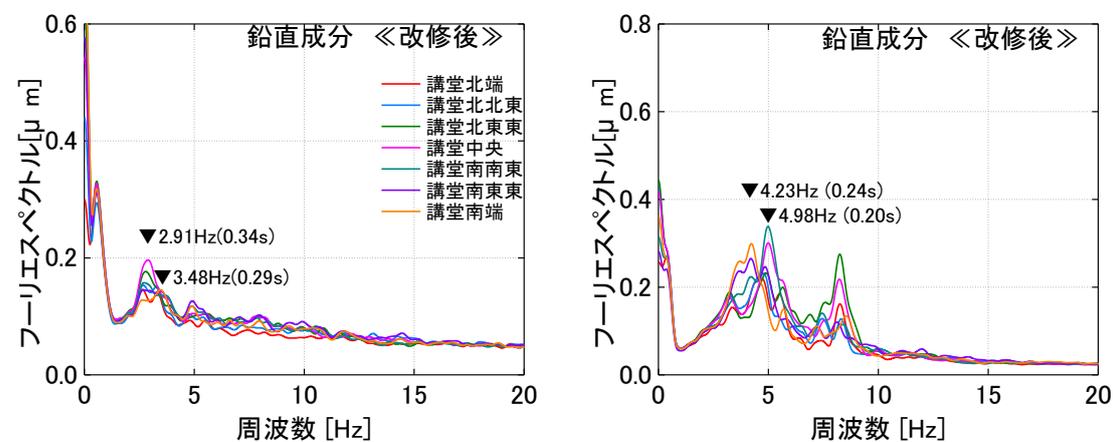
図 2-49 講堂4階床面における微動波形



(a) 南北 (桁行) 成分



(b) 東西 (張間) 成分



(c) 鉛直成分

図 2-50 講堂4階床面における改修前後のフーリエスペクトルの比較

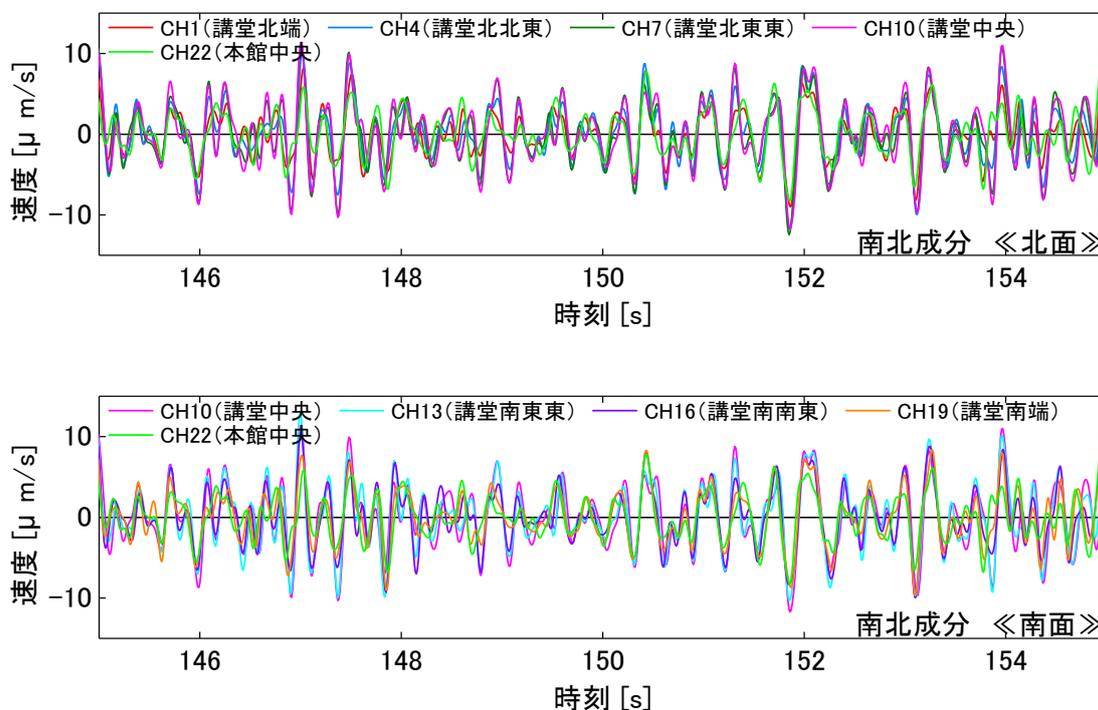
(8) 計測ケース 4-3

計測ケース 4-2 (図 2-25) では、講堂屋根面および 5 階床面におけるねじれ挙動を含めた挙動の一体性を調べる目的で実施した計測である。

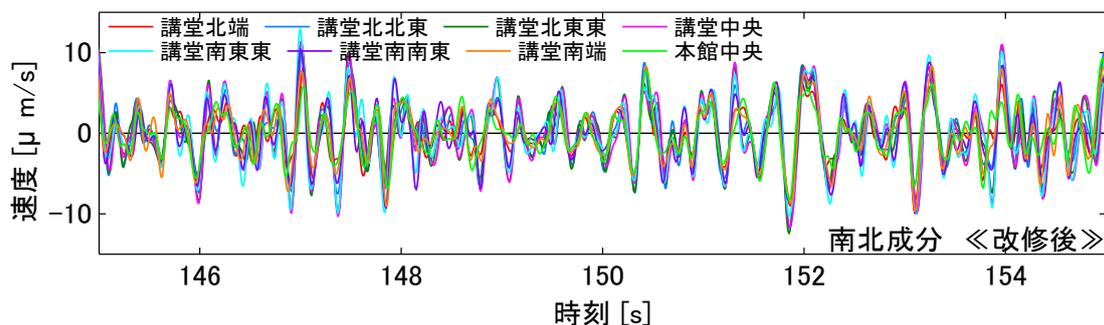
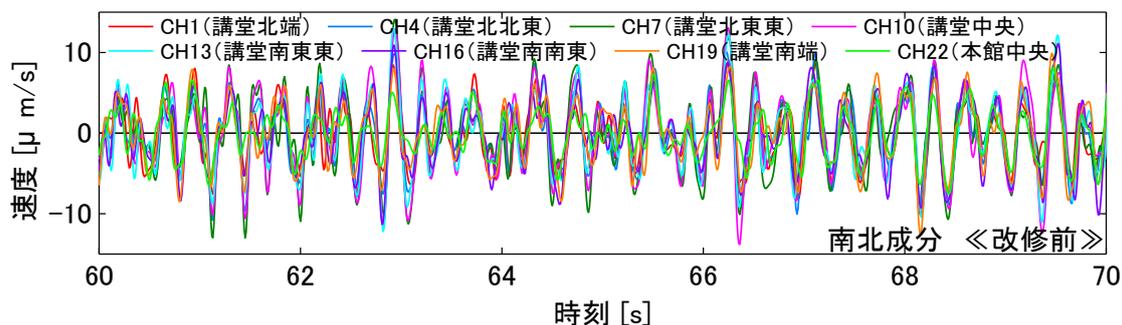
比較的定常的な振動を示した区間 (145~155 秒) の成分別の微動波形を図 2-51 (a-1), (b-1), (c-1)にそれぞれ示す。また、成分別の微動波形の改修前後における比較を図 2-51 (a-2), (b-2), (c-2)にそれぞれ示す。水平方向において、南北 (桁行) 成分および東西 (張間) 成分では、改修前と同様、各波形の振幅・位相は概ね一致している。また、鉛直方向においては、改修前と同様、各波形の振幅および位相は一致する時間と一致しない時間が混在していることが分かる。

図 2-52 に各成分別のフーリエスペクトルを示す。同図より、卓越周期は、改修前と同様、水平方向では概ね一致し、鉛直方向では、ピックアップ設置点によってばらつきが見られる。ここで、各成分において 15Hz あたりでスペクトルの値が大きくなっているが、これはケーブルの不具合によるもので、フーリエスペクトル全体には影響を及ぼさないことを確認済みである (計測ケース 5-1, 5-2, 5-3 においても同様)。

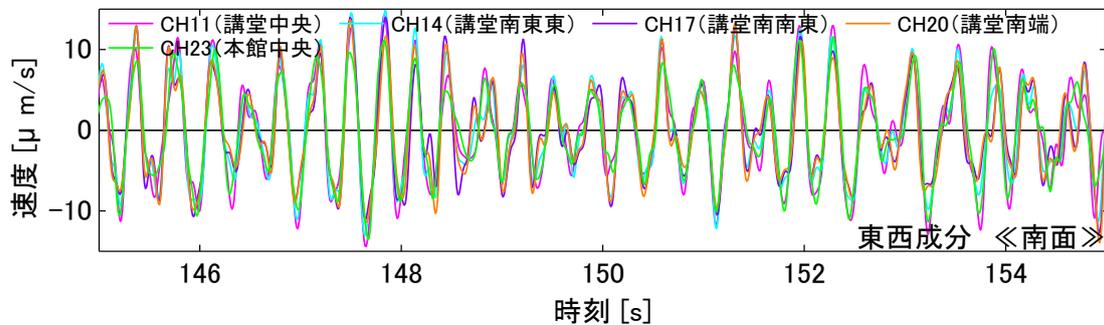
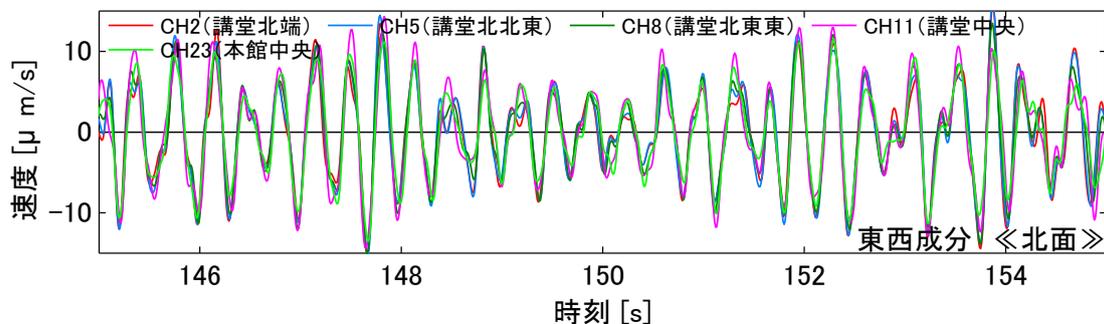
以上より、改修前と同様、本館および講堂 1 階床面において、水平方向には一体となって並進的な挙動を示すのに対し、鉛直方向には位相ずれが生じていると考えられる。



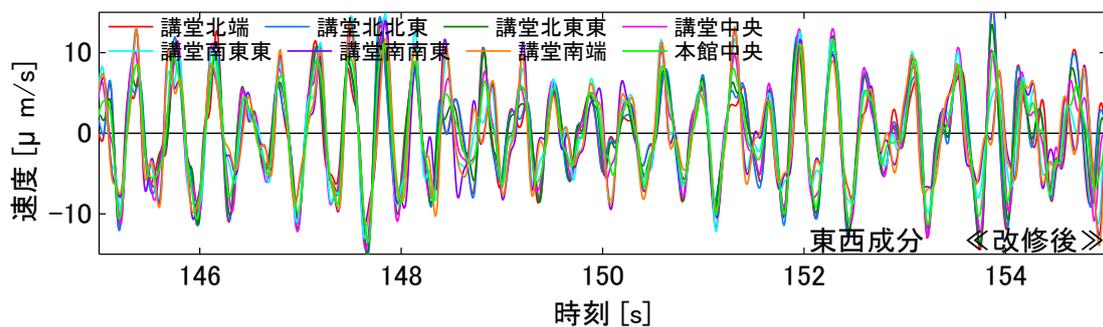
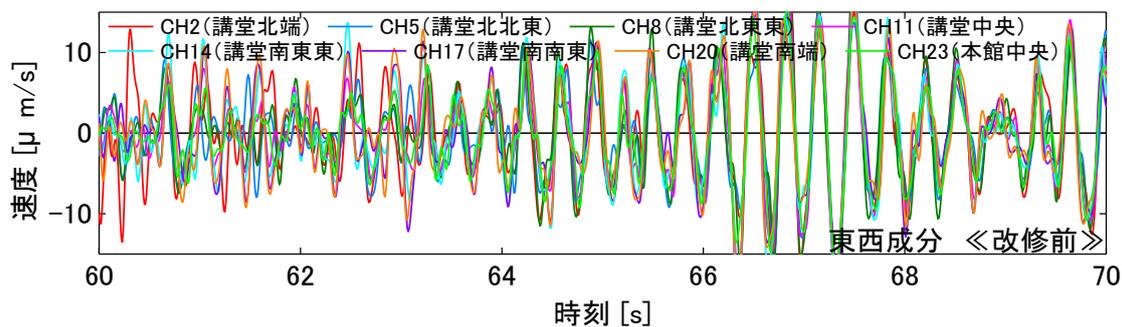
(a-1) 南北 (桁行) 成分



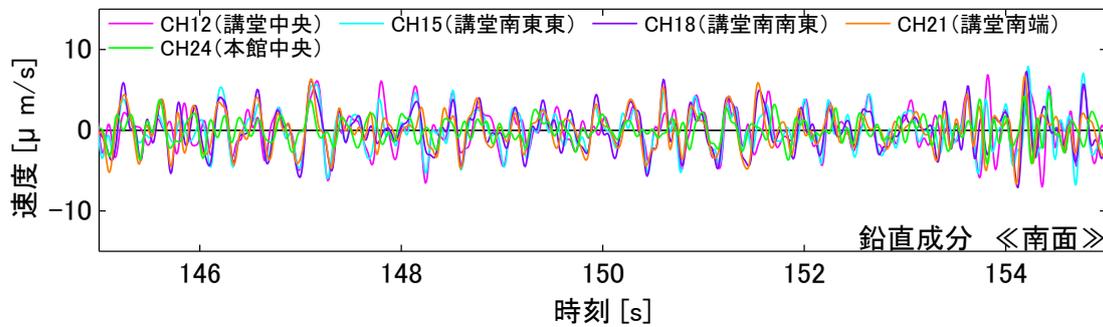
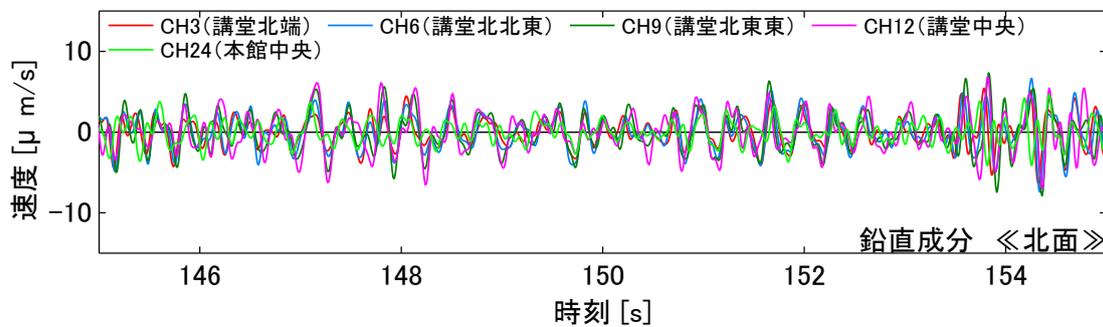
(a-2) 南北（桁行）成分における改修前後の比較



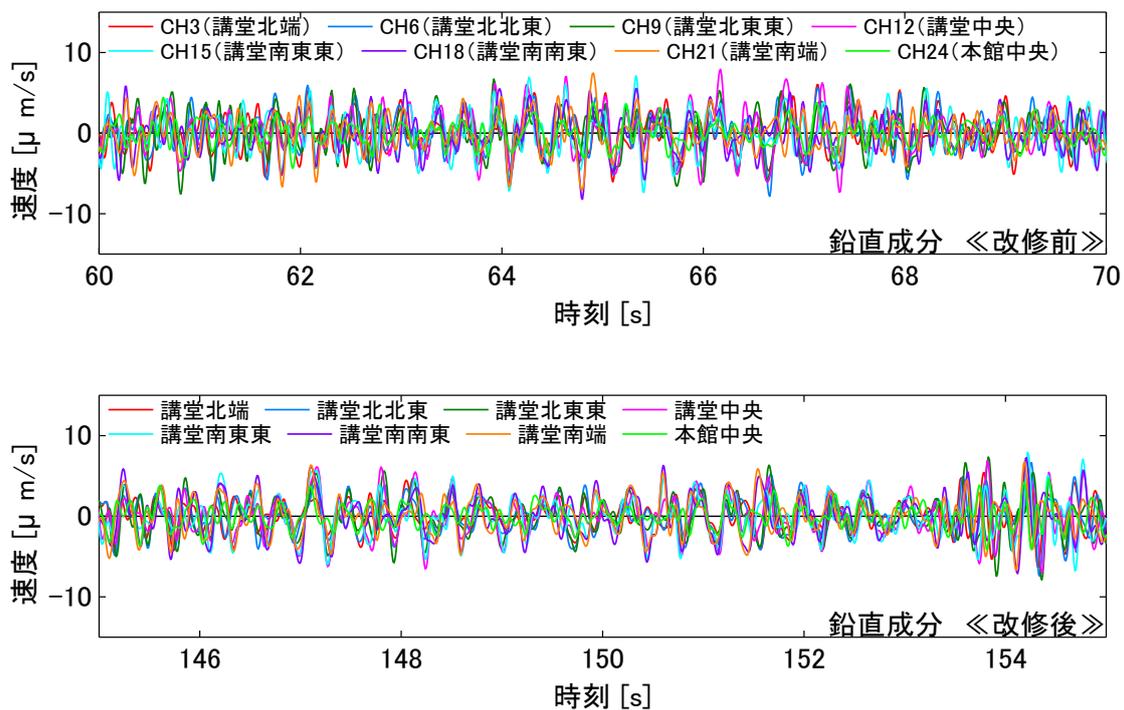
(b-1) 東西（張間）成分



(b-2) 東西（張間）成分における改修前後の比較

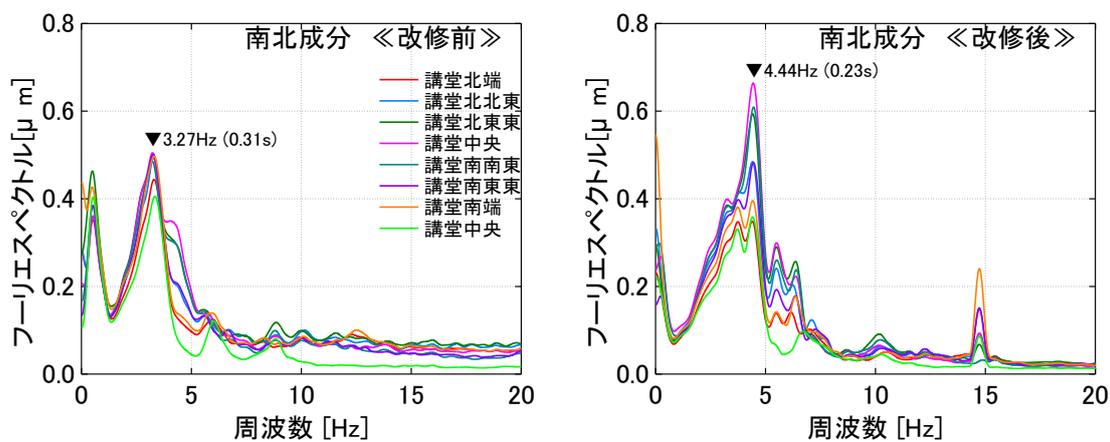


(c-1) 鉛直成分

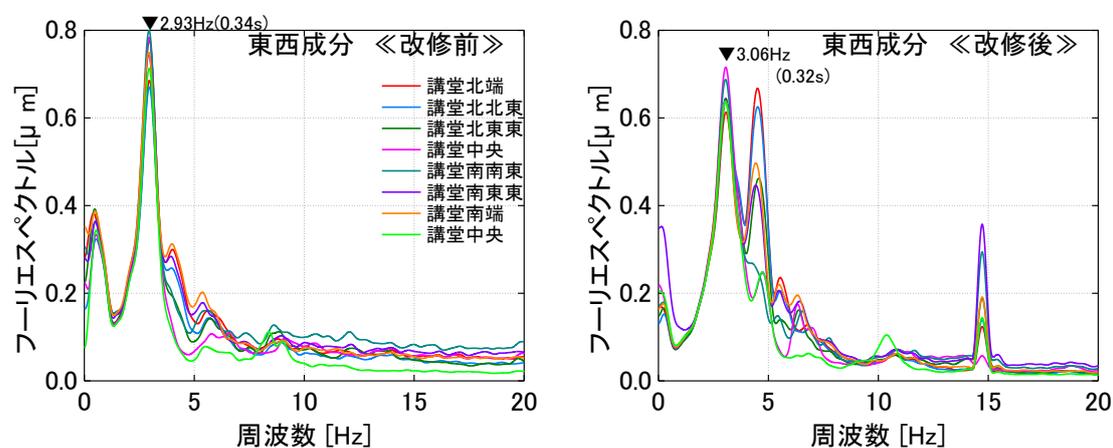


(c-2) 鉛直成分における改修前後の比較

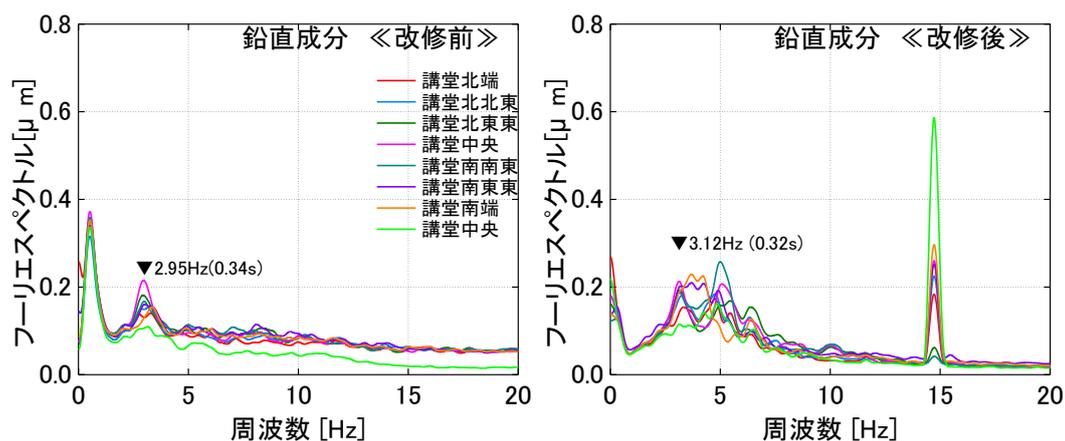
図 2-51 講堂屋根面における微動波形



(a) 南北 (桁行) 成分



(b) 東西 (張間) 成分



(c) 鉛直成分

図 2-52 講堂屋根面における改修前後のフーリエスペクトルの比較

(9) 計測ケース 5-1

計測ケース 5-1 (図 2-26) では、講堂上部構造の振動性状を把握する目的で実施した計測である。

図 2-53 に各階の常時微動水平成分のフーリエスペクトルを示す。また、図 2-54 に 1 階の常時微動水平成分のフーリエスペクトルに対する講堂屋根面および 4 階、3 階の常時微動水平成分のフーリエスペクトルの比 (伝達関数) を示す。南北成分については、屋根/1 階の伝達関数では 6.37Hz (0.16s)、4 階/1 階の伝達関数では 6.13Hz (0.16s)、3 階/1 階の伝達関数では 6.04Hz (0.17s) に 1 次と思われるピークが見られた。一方、東西成分については、屋根/1 階の伝達関数では 3.45Hz (0.29s)、4 階/1 階の伝達関数では 3.41Hz (0.29s)、3 階/1 階の伝達関数では 3.34Hz (0.30s) に 1 次と思われるピークが見られた。図 2-55 より、改修前後における結果を比較すると、南北 (桁行) 成分で 0.05 秒、東西 (張間) 成分で 0.03 秒程度短周期化する傾向が見られた。

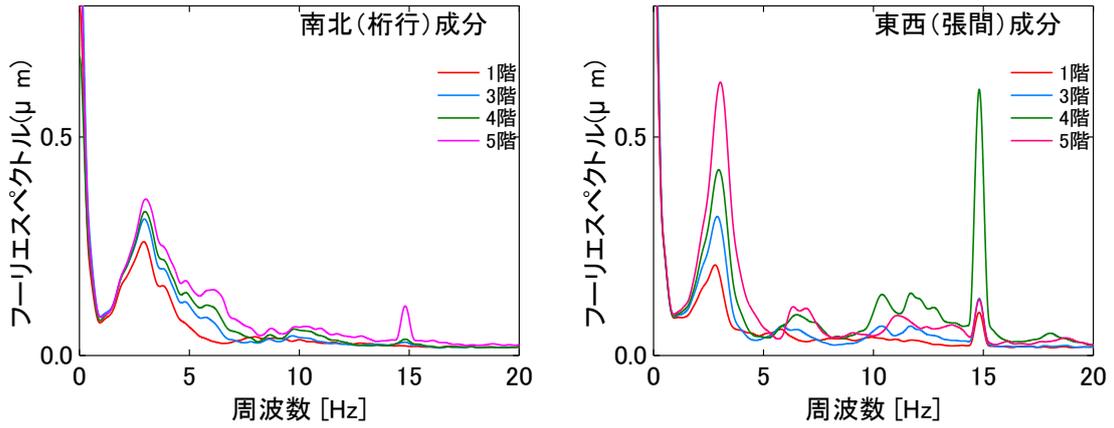
講堂東西 (張間) 成分のスウェイ率およびロッキング率は、後述する高さ方向のモード形状の 1 次モード、すなわち 1 次固有周期 $T_{FIX+S+R}$ において最大の変形をした屋根面の微動波形を用いて算定を行った。比較的定常的な振動を示した区間について、屋根面の微動波形とスウェイ成分およびロッキング成分に相当する 1 階の微動波形を図 2-56 に示す。ここで、ロッキング成分は、固有周期および位相が屋根面の微動波形と対応していないため、ロッキング率の算定は出来なかった。講堂におけるスウェイ率は以下の通りである (図 2-56, 表 2-3)。

$$S_{\text{東西成分}}=44.1\% \quad (R_{\text{東西成分}}=-\%)$$

尚、東西成分のスウェイ率について、改修前 (2013 年速報) に行った検討では 60.2% と報告されているが、安定した微動波形計測部分を取り出し再度検討を行った結果、改修前のスウェイ率は、41.8% と推定された。すなわち、改修前後において講堂東西成分のスウェイ率は僅かに大きくなった。さらに、前述した屋根 /1 階の伝達関数から求められた固有周期 (0.29s) を、スウェイ動およびロッキング動を伴う系の周期 $T_{FIX+S+R}$ とし、スウェイ動を除いた建物基礎固定時における系の周期 T_{FIX} を求めると、

$$T_{FIX} = T_{FIX+S+R} \times \sqrt{(100-S)/100} = 0.22\text{s} (4.61\text{Hz})$$

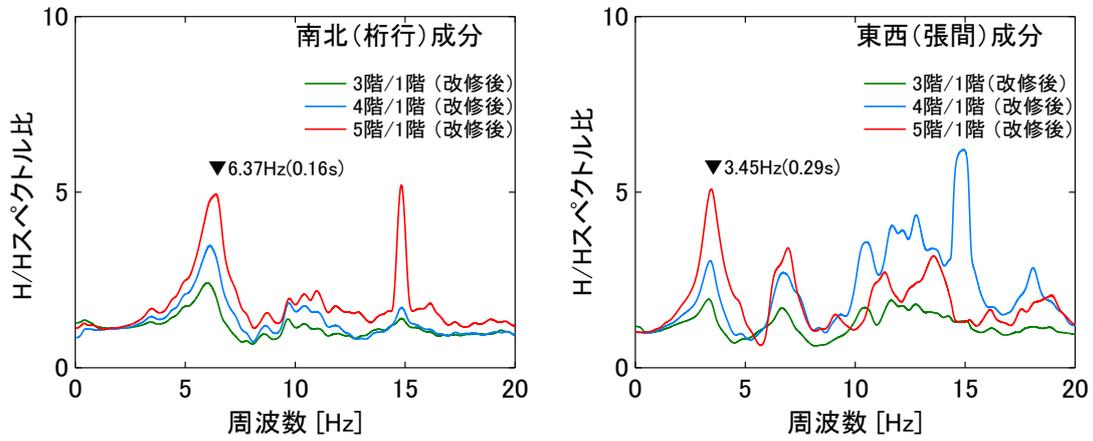
となり、耐震改修により、講堂東西方向において 0.02 秒程度短周期化したことがわかる。



(a) 南北（桁行）成分

(b) 東西（張間）成分

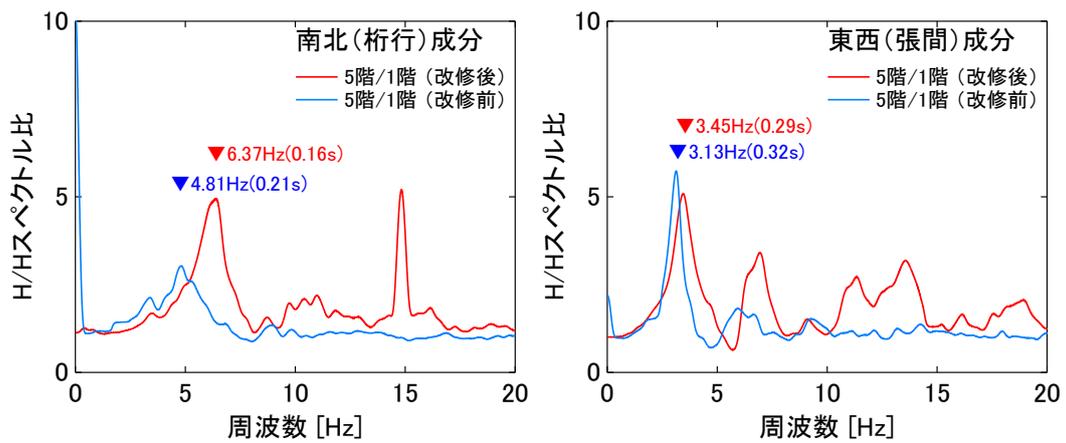
図 2-53 成分別のフーリエスペクトル



(a) 南北（桁行）成分

(b) 東西（張間）成分

図 2-54 伝達関数 (H/Hスペクトル比)



(a) 南北（桁行）成分

(b) 東西（張間）成分

図 2-55 周波数スペクトルの比較

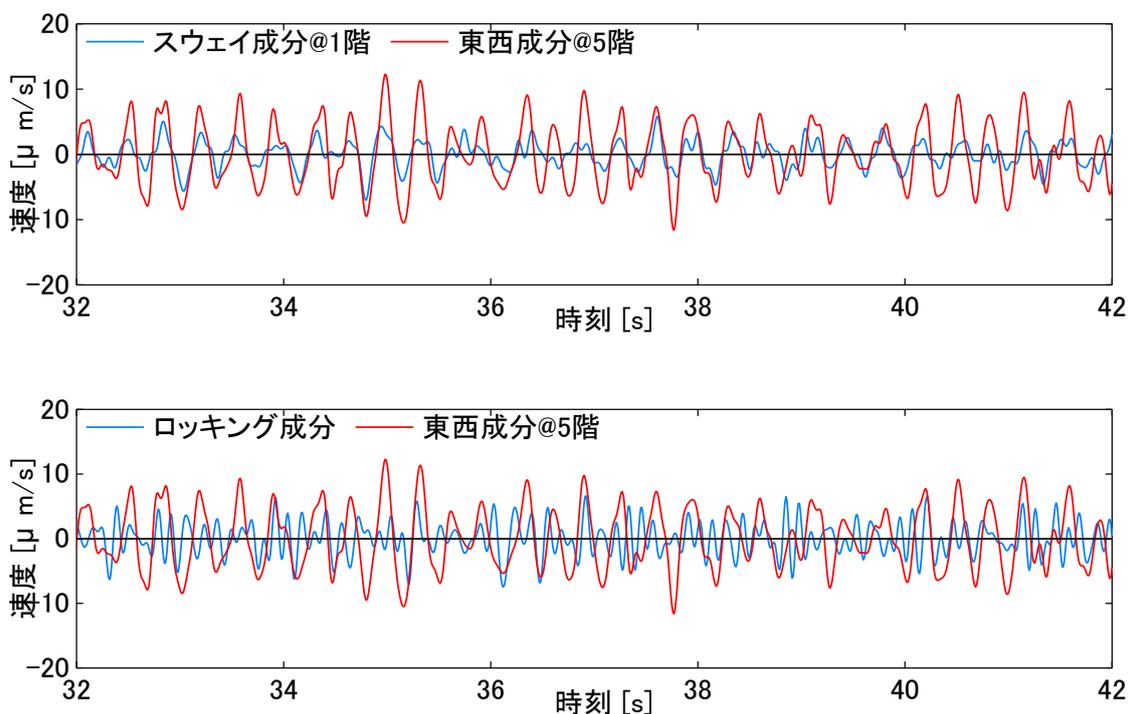


図 2-56

講堂東西（張間）方向のスウェイ成分およびロッキング成分に相当する微動波形

表 2-3 講堂東西（張間）方向におけるスウェイ率，ロッキング率および卓越周期一覧

	S	R	100-S	$T_{FIX+S+R}$	T_{FIX}
改修前	41.8%	計測不能	58.2%	0.32s(3.13Hz)	0.24s(4.10Hz)
改修後	44.1%	計測不能	55.9%	0.29s(3.45Hz)	0.22s(4.61Hz)

(10) 計測ケース 5-2

計測ケース 5-2 (図 2-27) では計測ケース 5-1 同様, 講堂上部構造の振動性状を把握する目的で実施した計測である。

図 2-57 に各階の常時微動水平成分のフーリエスペクトルを示す。また, 図 2-58 に 1 階の常時微動水平成分のフーリエスペクトルに対する屋根面および 4 階, 3 階の常時微動水平成分のフーリエスペクトルの比 (伝達関数) を示す。南北成分については, 屋根/1 階の伝達関数では 6.37Hz (0.16s), 4 階/1 階の伝達関数では 6.16Hz (0.16s), 3 階/1 階の伝達関数では 5.83Hz (0.17s) に 1 次と思われるピークが見られた。一方, 東西成分については, 屋根/1 階の伝達関数では 3.28Hz (0.30s), 4 階/1 階の伝達関数では 3.26Hz (0.31s), 3 階/1 階の伝達関数では 3.24Hz (0.31s) に 1 次と思われるピークが見られた。以上より固有周期は南北成分で 0.16s 程度, 東西成分で 0.3s 程度であり, 計測ケース 5-1 と同様となることが確認できた。

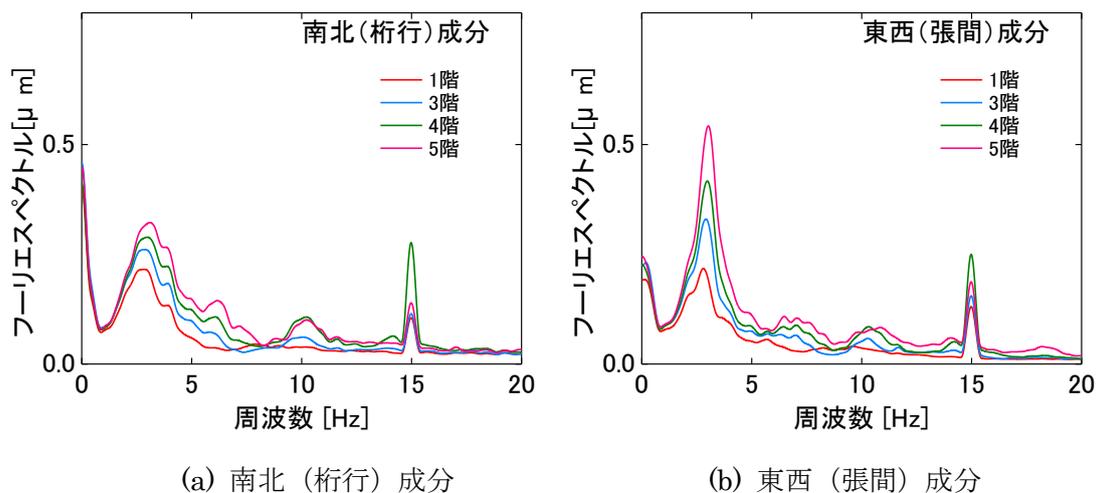


図 2-57 成分別のフーリエスペクトル

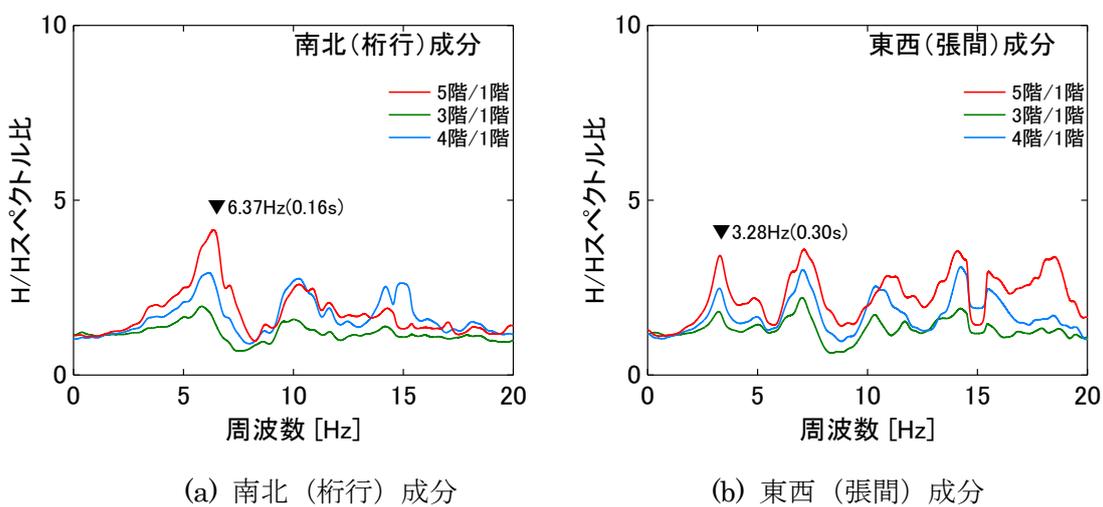


図 2-58 伝達関数 (H/Hスペクトル比)

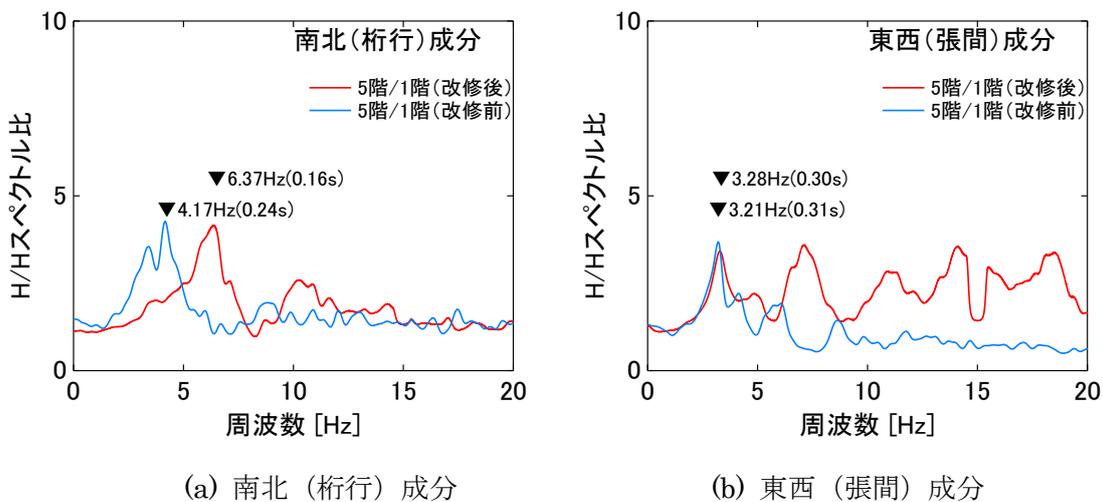


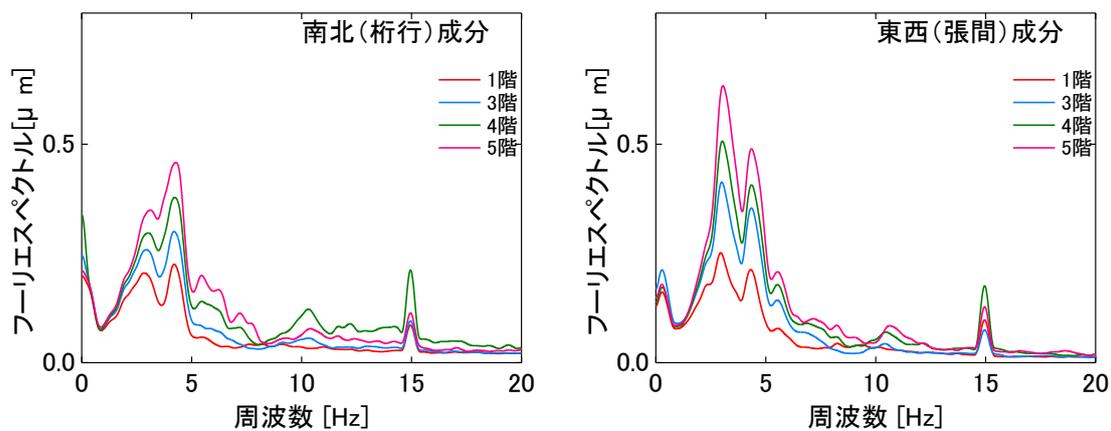
図 2-59 周波数スペクトルの比較

(11) 計測ケース 5-3

計測ケース 5-3 (図 2-28) では計測ケース 5-1 同様、講堂上部構造の振動性状を把握する目的で実施した計測である。

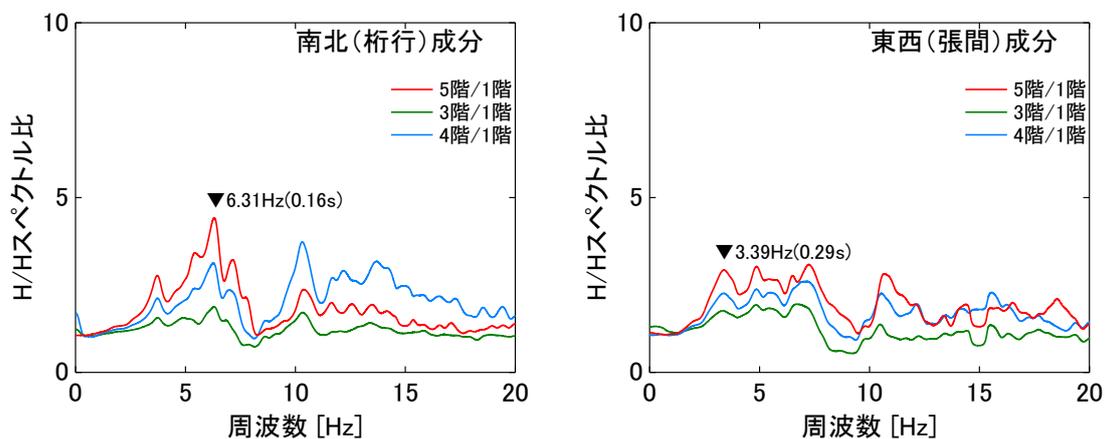
図 2-60 に各階の常時微動水平成分のフーリエスペクトルを示す。また、図 2-61 に 1 階の常時微動水平成分のフーリエスペクトルに対する屋根面および 4 階、3 階の常時微動水平成分のフーリエスペクトルの比 (伝達関数) を示す。南北成分については、屋根/1 階の伝達関数では 6.31Hz (0.16s)、4 階/1 階の伝達関数では 6.10Hz (0.16s)、3 階/1 階の伝達関数では 6.31Hz (0.16s) に 1 次と思われるピークが見られた。一方、東西成分については、屋根/1 階の伝達関数では 3.39Hz (0.29s)、4 階/1 階の伝達関数では 3.37Hz (0.30s)、3 階/1 階の伝達関数では 3.33Hz (0.30s) に 1 次と思われるピークが見られた。

以上より、固有周期は南北成分で 0.16s 程度、東西成分で 0.3s 程度であり、計測ケース 5-1 とほぼ同様の結果となった。



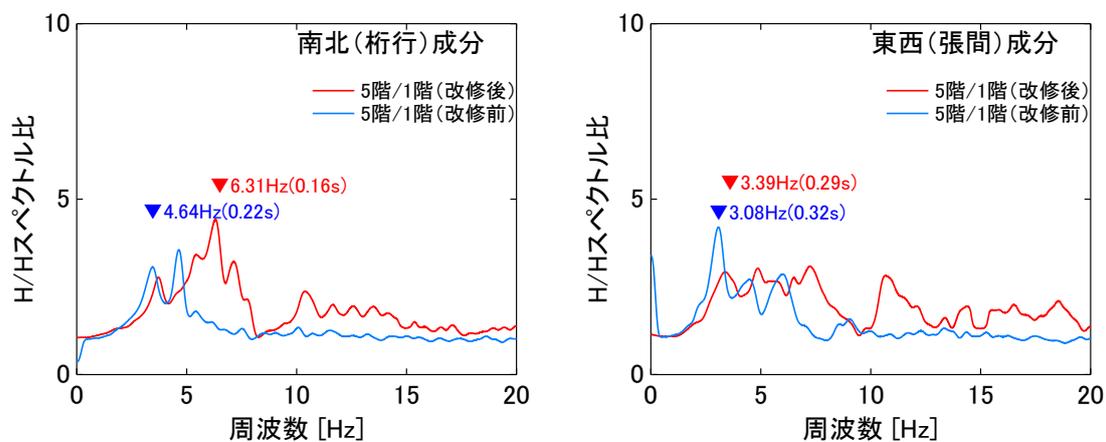
(a) 南北（桁行）成分 (b) 東西（張間）成分

図 2-60 成分別のフーリエスペクトル



(a) 南北（桁行）成分 (b) 東西（張間）成分

図 2-61 伝達関数 (H/Hスペクトル比)

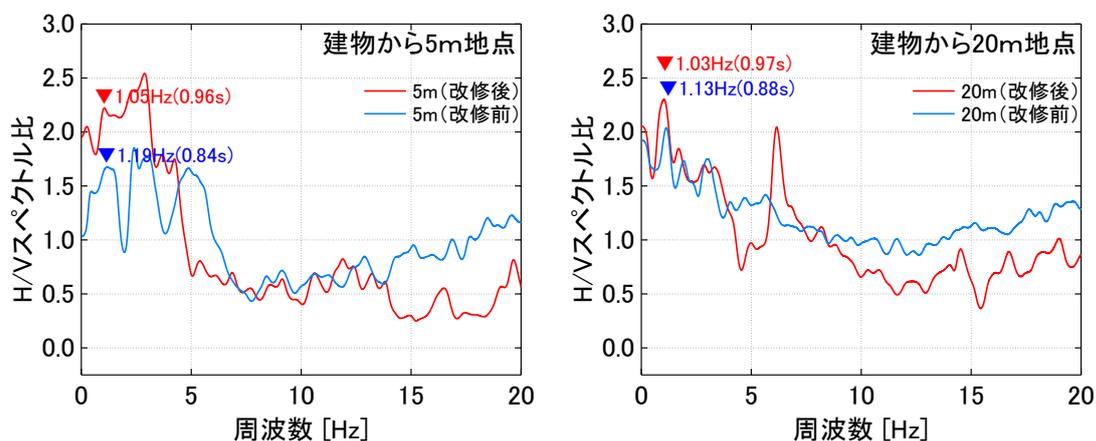


(a) 南北（桁行）成分 (b) 東西（張間）成分

図 2-62 周波数スペクトルの比較

(12) 計測ケース 6

計測ケース 6 (図 2-30) は、安田講堂周辺地盤の振動性状を把握することを目的として実施した計測である。周辺地盤上 (1 点につき 3 成分) の速度成分微動測定結果を用いて、水平 2 方向のフーリエ振幅の 2 乗和平方根として得られるフーリエ振幅を鉛直方向のフーリエ振幅で除した H/V スペクトルを算出した。建物東側の地盤における測定点の H/V スペクトルを図 2-63 に示す。H/V スペクトルは、改修前後ともに 1~3Hz あたりの低い振動数に最大のピークを持ち、振動数が高くなるにつれて大きな谷を形成し、低い振動数を示す軟らかい地盤に多く見られる形状であった。本対象建物は、武蔵野ローム層上に立地するが、そのすぐ東側には不忍池などが存在する沖積層が広がっており、その影響を受けているのではないかと推察される。参考までに、建物東側の H/V スペクトルの卓越周期は建物から 5m の位置では 0.96s, 20m の位置では 0.97s となった。



(a) 建物から5m地点

(b) 建物から20m地点

図 2-63 地盤のH/Vスペクトル比

2.5.2 減衰特性

前述の計測ケース 1-1 および計測ケース 5-1 の計測データを利用して、対象建物の減衰定数を RD 法(Random Decrement Technique)^[1]により評価を試みた結果を以下に示す。

(a) RD 法の原理

外力 $f(t)$ が作用する 1 質点系の運動方程式は一般に①式で表される。

$$\ddot{u} + 2\xi\omega_0\dot{u} + \omega_0^2u = f(t) \quad \text{①}$$

ξ : 減衰定数, ω_0 : 固有円振動数, u : 系の変位

ここで、外力 $f(t)$ を期待値 0 のランダム確率過程とすると、①式の解 u は、以下に示す自由振動解 $D(t)$ と外力定常振動解 $R(t)$ の和として表される。

$$u = D(t) + R(t) \quad \text{②}$$

$$D(t) = A \exp\left\{\left(-\xi + i\sqrt{1-\xi^2}\right)\omega_0 t\right\} \quad \text{③}$$

$$R(t) = \int_0^t f(\tau)h(t-\tau)d\tau \quad \text{④}$$

A : 初期条件によって定まる定数, $h(t)$: 単位衝撃応答関数

次に、⑤式で表されるような②式の両辺の期待値を考えると、 $f(t)$ が期待値 0 のランダム確率過程であることから、⑥式が得られ、したがって⑦式が導かれる。

$$E[u] = E[D(t)] + E[R(t)] \quad \text{⑤}$$

$$E[R(t)] = \int_0^t E[f(\tau)]h(t-\tau)d\tau = 0 \quad (\because E[f(\tau)] = 0) \quad \text{⑥}$$

$$E[u] = E[D(t)] \quad \text{⑦}$$

一方、図 2-49 に示すように、ある応答 u の空間サンプルが多数得られたとすると、これらの波形を図示の通り $t=0$ で極大値をとるように並べ、これらを重ね合わせる（足し合わせる）と Σu は⑦式より $\Sigma D(t)$ に収束し、自由振動の項のみが残ることとなる。ここで定常エルゴード過程を仮定すれば、アンサンプル平均が時間平均で近似できるため、ある地点におけるサンプルの極大値をずらしながら（すなわち波のスタート時間をずらしながら）抽出・作成した波形に対して上記の作業を行えば、自由振動波形を近似した波形が得られ（図○の最下段）、これに基づき通常の減衰自由振動時と同様の手順で減衰を求めることができる。

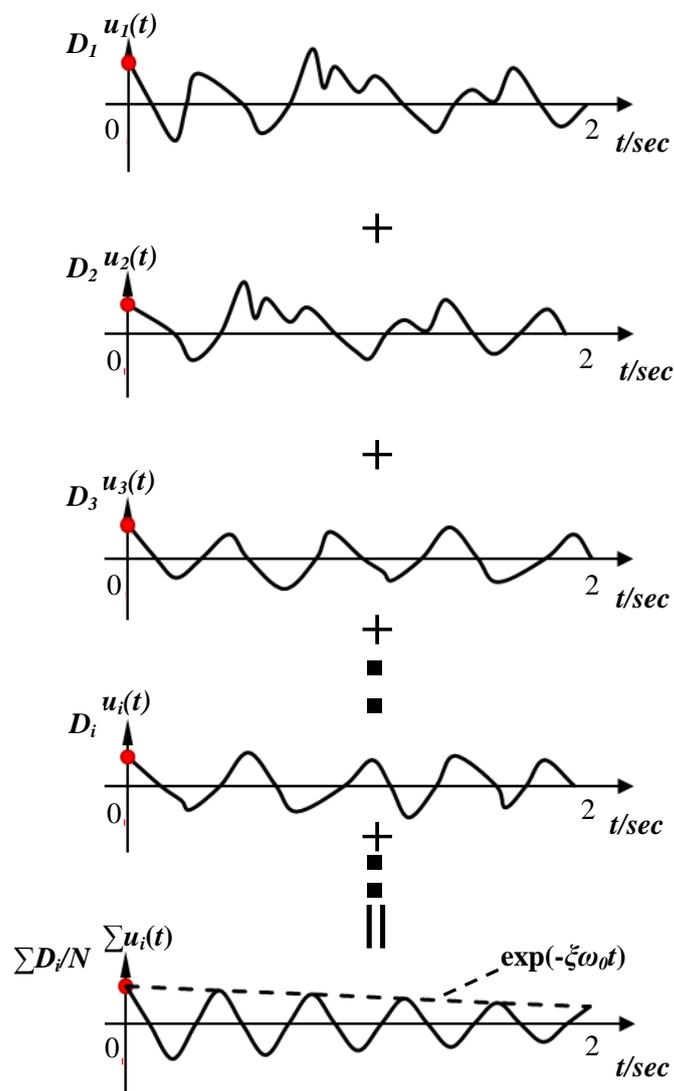


図2-49 波形重ね合わせによる近似自由振動波形の作成手法の概念図

(b) 算定手順

減衰評価は、本館に関しては計測ケース 1-1、講堂に関しては計測ケース 5-1 における最上階（計測ケース 1-1 では 9 階、計測ケース 5-1 では 5 階）の計測データを用いて行った。波形はまずその第 1 番目の正側の極大値を $t=0$ として後続の 2 秒間の波形を抽出し、次に第 2 番目の正側の極大値を同じく $t=0$ として 2 秒間の波形を抽出する、という作業を繰り返し行い、多数の重ね合わせ用のサンプル波形を作成した。なお、極大値を機械的に選択すると、図 2-50 に示すように局地的な極値を選択することが生じる。これを避けるために、極値の候補がこれの前後それぞれ 15 データ（図 2-50 の極値検証用データ）よりも大きい場合にのみ $t=0$ における極値として採用することとした。

減衰定数 ζ は図 2-51 に示す $P_1 \sim P_6$ を用いて算定される 4 セットの減衰定数の平均値として⑧式および⑨式で定義した。ここで、前回報告書においては P_0 (重ね合わせ後の波形における $t=0$ での値) を用いて算定を行ったが、田村らによると、実測記録においては高周波成分をフィルターでカットした場合でも、ある程度高周波ノイズが残ることがあり、 P_0 は純粋な固有振動数成分のみの自由減衰波形の初期値より大きい値になるため、今回の検討では改修前後の波形ともに P_0 を用いずに算定を行った。

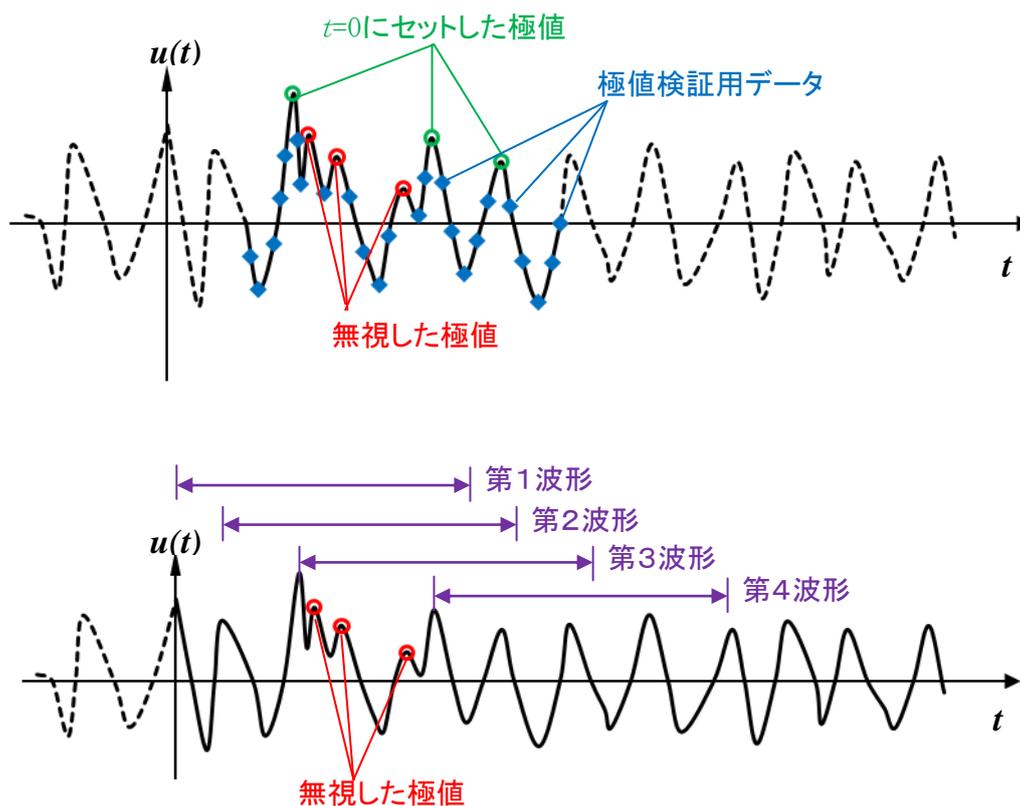


図2-50 減衰評価用波形の抽出概念図

(上図：ピークの抽出／下図：重ね合わせ波形の抽出)

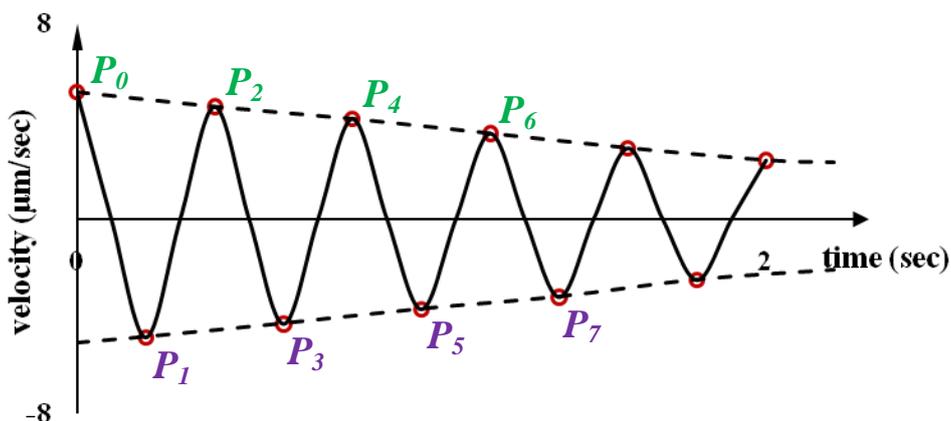


図 2-51 重ね合わせ後の波形と減衰算定用極値抽出の概念図

$$\xi_+ = \frac{1}{2} \times \frac{1}{2\pi} \left(\ln \frac{P_1}{P_3} + \ln \frac{P_3}{P_5} \right)$$

$$\xi_- = \frac{1}{2} \times \frac{1}{2\pi} \left(\ln \frac{P_2}{P_4} + \ln \frac{P_4}{P_6} \right)$$

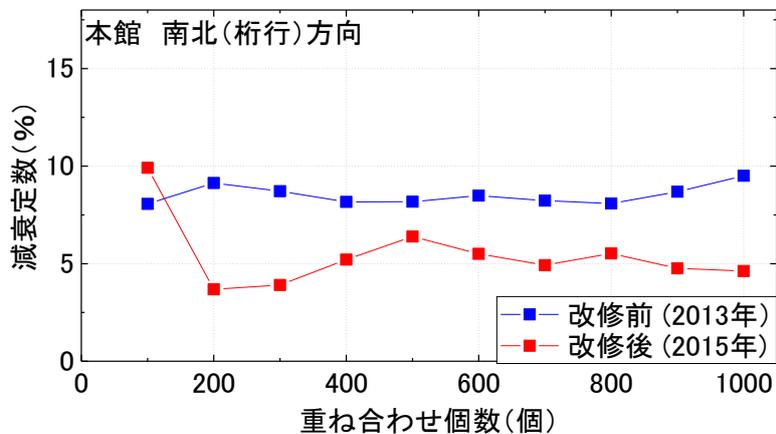
$$\xi = \xi_{average} = \frac{\xi_+ + \xi_-}{2}$$

(c) 算定結果

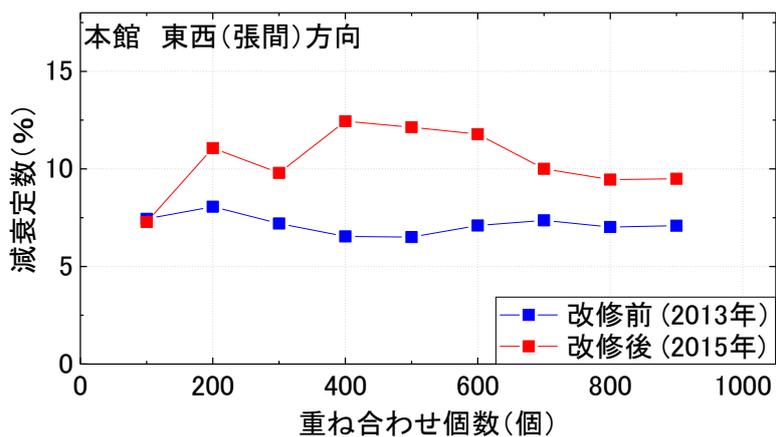
南北成分と東西成分それぞれの減衰定数の算定結果および波形の重ね合わせ数の比較を図 2-64, 図 2-65 に示す。尚, 改修前の算定においては, 安定した微動波形計測部分を取り出すよう再度検討を行った。また, 減衰定数の評価式(上式)を改修前の報告書から変更し再度計算を行っている。また, 改修前後の微動波形には 1~10Hz のバンドパスフィルタをかけ平滑化したのち減衰定数を評価した。ここで, 本検討においては, スウェイおよびロッキングの影響を除去していないため, これらの影響を含んだ算定結果であることに留意されたい。また, 講堂の南北方向では改修前後ともに微動波形が不安定であったため, 参考値として算出している。

得られた減衰定数は, いずれのケースにおいても, 波形の重ね合わせ数が 500 程度を超えると結果が安定する傾向が見られた。また, 耐震改修後の減衰定数は, 本館・講堂ともに南北方向では減少, 東西方向では増加する傾向が見られた。本館については, RC 壁の増設・新設といった耐震改修により減衰定数は小さくなる傾向があるものの, 東西方向では改修前後においてロッキング率が 17.2%から 34.2%ととくに大きく増加したため(本館と講堂のロッキング率は表 2-1, 表 2-2, 表 2-3 を参照), 建物・地盤の相互作用により, 建物だけの減衰低減を上回って減衰が増加し, 結果として系全体の減衰定数が大きくなったと考えられる。減衰定数が大きくなったと考えられる。一方, 講堂の減衰定数の増減につい

ては，原因を特定できていない。

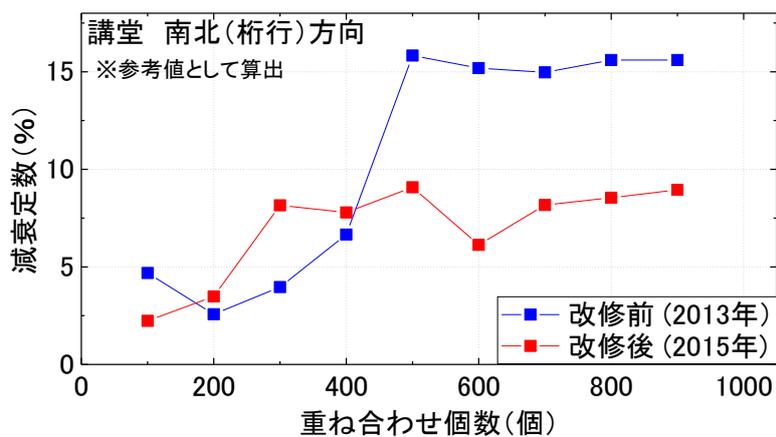


(a) 本館 南北(桁行)方向

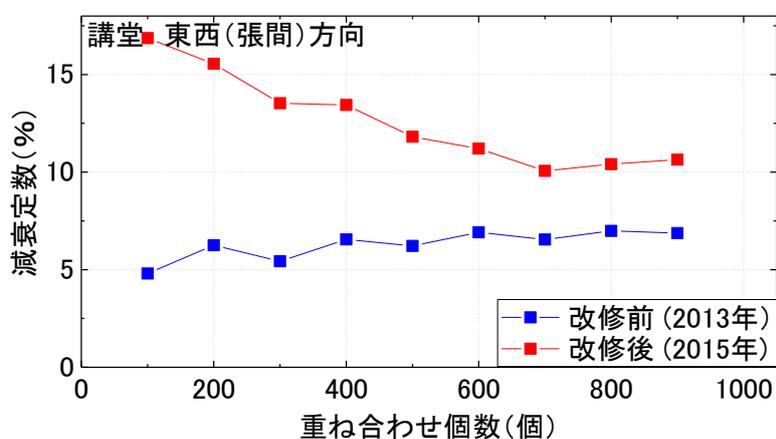


(b) 本館 東西(張間)方向

図 2-64 減衰定数の評価結果(本館)



(a) 南北(桁行)方向



(b) 東西(張間)方向

図 2-65 減衰定数の評価結果(講堂)

《参考文献》

- [1] 田村幸雄, 佐々木淳, 塚越治夫: RD法による構造物のランダム振動時の減衰評価, 日本建築学会論文報告集 第454号, pp. 29-38, 1993年12月

2.5.3 基礎固定時における振動モード形状の推定

前述の計測ケース 1-1 および 5-1 を利用して、対象建物の振動モード形状の評価を試みた結果を以下に示す。

まず、各階の波形成分のピークにおける位相ずれの補正について後述する。振幅を評価するにあたり、図 2-66 に示すようにある同じ振動数をもって振動している 2 つの波があるとする。これらの波は位相差が生じているため、振幅がピークをむかえる時刻は同じにならない。つまり、ある時刻 (t) におけるこれらの波の振幅はピーク値を抽出するだけでは不十分であり、位相差 ($\Delta\theta$) による補正を行う必要がある。すなわち、一方の波の振幅 (B) がピークするとき、もう一方の波の振幅はピーク時の振幅 (A) に位相差 ($\Delta\theta$) の余弦を乗じる ($A\cos\Delta\theta$) ことで求められる。具体的には下記に後述する。

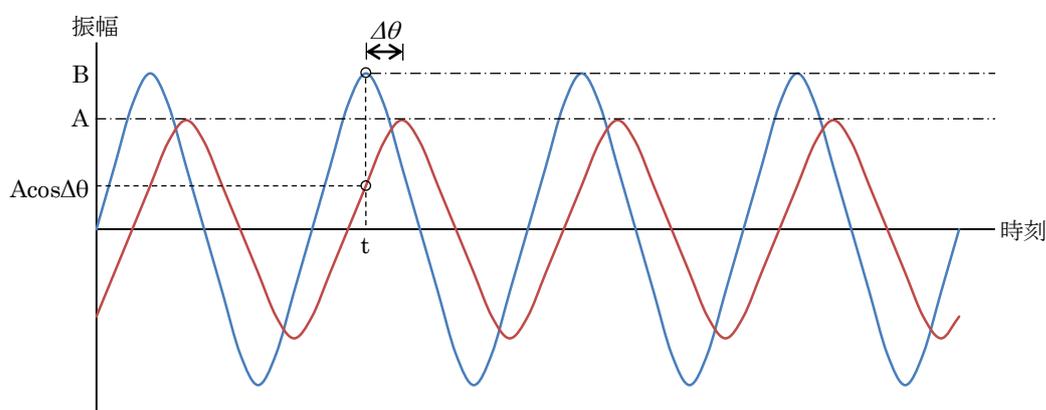


図 2-66 モード形状推定のための概念図

任意の時刻歴 $x(t)$ は、有限フーリエ近似より近似的に以下のように表される。

$$x(t) \cong \frac{A_0}{2} + \sum_{k=1}^{\frac{N}{2}-1} [A_k \cos 2\pi f_k t + B_k \sin 2\pi f_k t] + \frac{A_N}{2} \cos 2\pi f_{\frac{N}{2}} t \quad \text{式 1-1}$$

これは、次のように表すことができる。

$$x(t) \cong \frac{X_0}{2} + \sum_{k=1}^{\frac{N}{2}-1} X_k \cos(2\pi f_k t + \phi_k) + \frac{X_N}{2} \cos 2\pi f_{\frac{N}{2}} t$$

$$\text{ただし、} X_k = \sqrt{A_k^2 + B_k^2}, \quad \phi_k = \tan^{-1}\left(-\frac{B_k}{A_k}\right) \quad -\pi < \phi_k < \pi$$

上式より、 X_k および ϕ_k が $x_k(t)$ の振幅および位相差に相当することが分かる。

ここで、任意の波形 $x_i(t)$ 、 $x_j(t)$ について、それぞれの k 次の成分波は以下のように表さ

れる。

$$x_{ik}(t) = X_{ik} \cos(2\pi f_k t + \phi_{ik})$$

$$x_{jk}(t) = X_{jk} \cos(2\pi f_k t + \phi_{jk})$$

x_{ik} がピークするとき、すなわち $x_{ik}(t) = X_{ik}$ のとき、

$$\cos(2\pi f_k t + \phi_{ik}) = 1 \Leftrightarrow 2\pi f_k t + \phi_{ik} = 0$$

$$x_{jk}(t) = X_{jk} \cos(-\phi_{ik} + \phi_{jk}) = X_{jk} \cos \Delta\theta$$

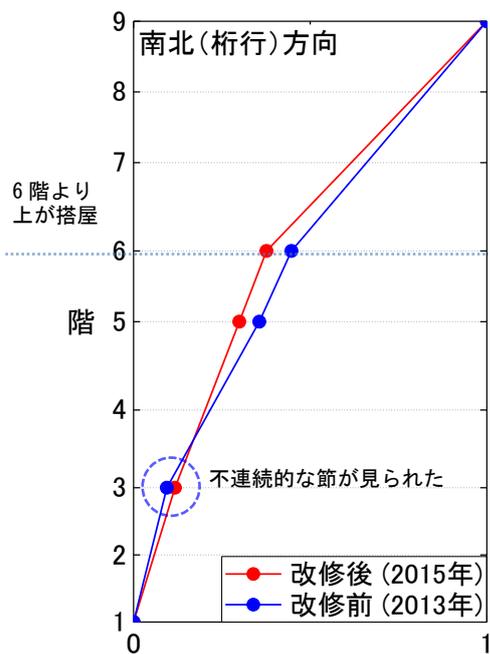
したがって、ある同じ振動数をもって振動している 2 つの波について、一方の波の振幅がピークするとき、もう一方の波の振幅は、ピーク時の振幅に位相差 ($\Delta\theta$) の余弦を乗じて ($A \cos \Delta\theta$) 求めることができる。

(a) 高さ方向の振動モード形状推定

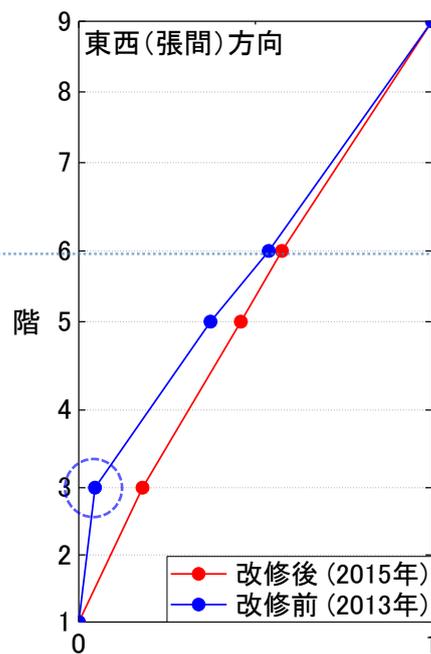
基礎固定時の本館および講堂の高さ方向の 1 次モード形状推定にあたり、2.5.1 より推定された 1 次固有周期 $T_{\text{FIX+S+R}}$ に対応する各階の波形成分のピークの位相ずれの補正、およびスウェイ成分とロッキング成分を除外して基礎固定時の建物応答成分のみを抽出するため、以下の手順で評価を行った。

- ① 各階の振幅スペクトルから 1 次固有周期 $T_{\text{FIX+S+R}}$ における振幅スペクトル最大の階 (計測ケース 1 では 9 階、計測ケース 3 では 5 階) を特定する。
- ② $T_{\text{FIX+S+R}}$ における①の階とその他の階のフーリエ位相の差 $\Delta\theta$ をそれぞれ求め、各階のフーリエ振幅に $\cos \Delta\theta$ を乗じたものを補正後の振幅とする。
- ③ 各階補正後の振幅からスウェイ成分およびロッキング成分の振幅を引いたものを基礎固定時の振幅とする。

図 2-67 に本館における高さ方向のモード形状、図 2-68 に講堂における高さ方向のモード形状をそれぞれ示す。これより、耐震改修前には本館および講堂 3 階付近に不連続的な節が見られたが、改修後にはその影響が小さくなったことが確認された。ただし、同図の改修前の結果については、安定した微動波形区間を再度とり直して検討したもので、改修前に行った検討結果とは少し異なることに留意されたい。

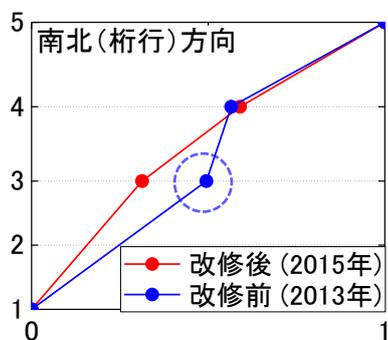


(a) 本館 南北（桁行）方向

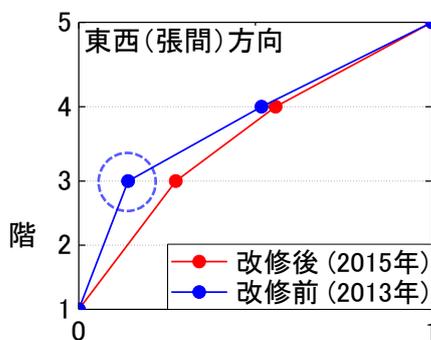


(b) 本館 東西（梁間）方向

図 2-67 本館の高さ方向のモード形状



(a) 講堂 南北（桁行）方向



(b) 講堂 東西（梁間）方向

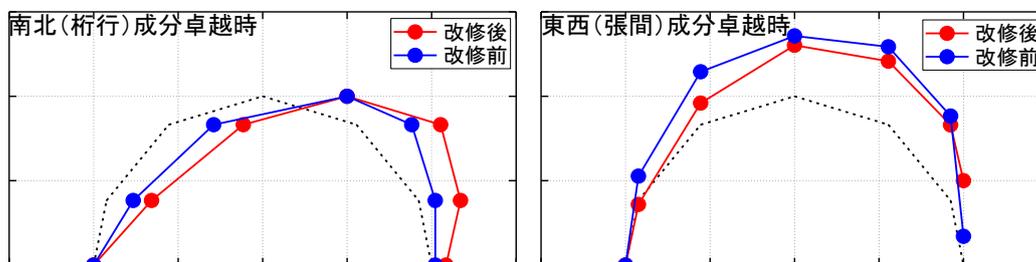
図 2-68 講堂の高さ方向のモード形状

(b) 平面の振動モード形状推定

基礎固定時の本館および講堂の高さ方向の 1 次モード形状推定にあたり，前述の計測ケース 5-1 における測定結果より推定された 1 次固有周期 $T_{FIX+S+R}$ を用い， $T_{FIX+S+R}$ における各階の波形成分のピークの位相ずれの補正，およびスウェイ成分とロッキング成分を除外し基礎固定時の建物応答成分のみを抽出するため，以下の手順で評価を行った。

- ① 各計測点の振幅スペクトルより，1 次固有周期 $T_{FIX+S+R}$ における振幅スペクトル最大となる計測点を特定する。
- ② $T_{FIX+S+R}$ における①の計測点とその他の計測点のフーリエ位相の差 $\Delta\theta$ をそれぞれ求め，各点のフーリエ振幅に $\cos\Delta\theta$ を乗じたものを補正後の振幅とする。
- ③ 各点補正後の振幅からスウェイ成分およびロッキング成分の振幅を引いたものを基礎固定時の振幅とする。ここで，スウェイ成分は，同様にして求めた補正後の 1 階の振幅を用いた。尚，ロッキング成分は，前述したように本報では算出できなかったため，後述する振動モード形状は，ロッキングの影響を含んだ算定結果であることに留意されたい。

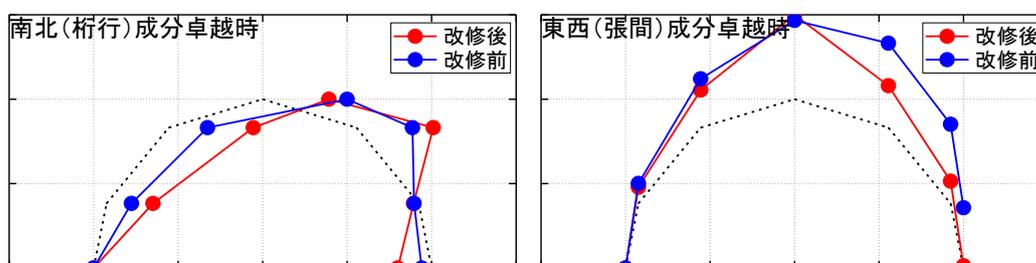
図 2-69 に講堂 4 階床面におけるモード形状，図 2-70 に講堂屋根面におけるモード形状をそれぞれ示す。南北（桁行）成分卓越時には，耐震改修前と同様，モード形状は“北東-北西”方向，および“南東-南西”方向に“伸び縮み”するような挙動を示すものと考えられる。一方，東西（張間）成分卓越時には，耐震改修前と同様，モード形状は“北-南”方向に“伸び縮み”するような挙動を示すものと考えられる。



(a) 南北（桁行）成分卓越時

(b) 東西（張間）成分卓越時

図 2-69 講堂4階床面のモード形状



(a) 南北（桁行）成分卓越時

(b) 東西（張間）成分卓越時

図 2-70 講堂屋根面のモード形状

2.5.4 階段室が講堂の振動性状に与える影響に関する考察

講堂では、図 2-71 に示すように、北東部と南東部に付属する階段室により講堂の変形が拘束されている可能性が考えられたため、計測ケース 4-1, 4-2, 4-3 の測定結果を用いて、その拘束効果の有無について分析を行った。図 2-72 に、比較的定常的な振動を示した区間（10 秒間）における各計測箇所での正側ピーク値の平均を示す。モード形状(図 2-69, 図 2-70) および図 2-72 より、階段室付近のピックアップは、その他の計測箇所の変形と比較し、顕著な変形状は確認できない。これより、講堂における階段室による変形拘束の影響は低いと考えられる。

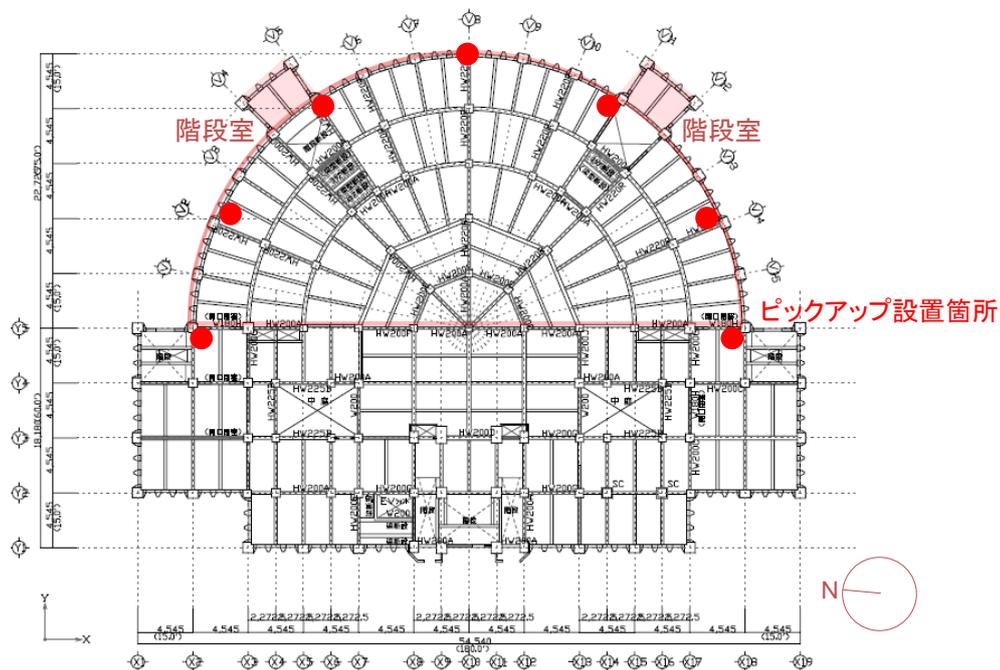


図 2-71 階段室概要

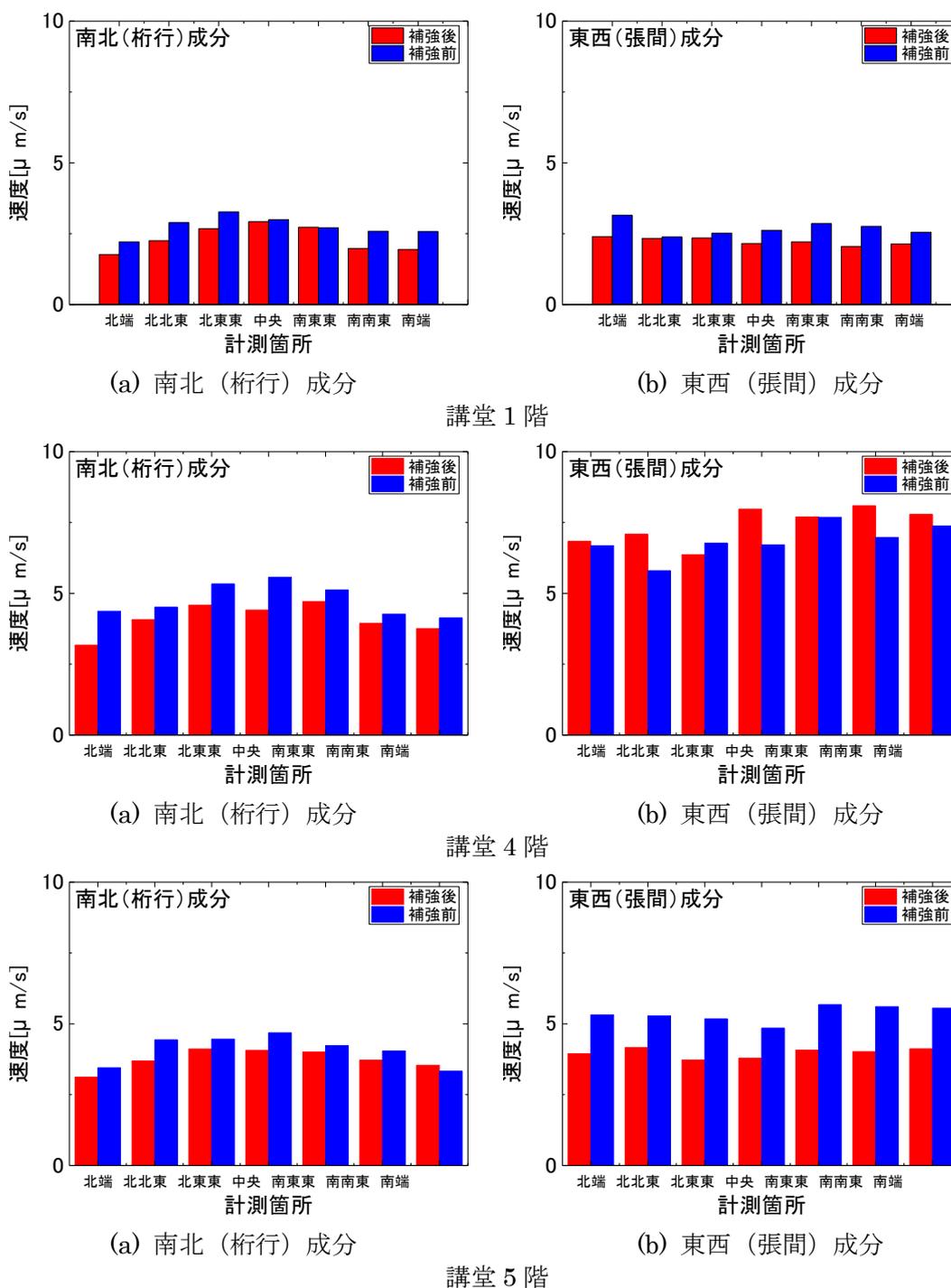


図 2-72 各計測箇所の正側ピーク値の平均

3 まとめ

東京大学本郷キャンパスに立地する安田講堂の耐震改修工事前後に常時微動測定を行い、振動性状の変化を分析した結果を以下にまとめる。

- (1) 計測ケース 1-1 および計測ケース 5-1 より、1次固有周期は、本館南北（桁行）方向では0.28sから0.23s、東西（張間）方向では0.32sから0.27s、講堂南北（桁行）方向では0.21sから0.16s、東西（張間）方向では0.32sから0.29sとなり、耐震改修により0.03~0.05秒程度短周期化した。
- (2) 計測ケース 1-1、計測ケース 2、計測ケース 5-1 より、本館南北（桁行）方向ではスウェイ率16.8%、ロッキング率25.1%、東西（張間）方向ではスウェイ率35.3%、ロッキング率34.2%、講堂東西（張間）方向ではスウェイ率44.1%となり、スウェイ率、ロッキング率は耐震改修前より概ね増加する傾向にあった。これは、RC壁やブレースを用いた耐震改修により剛性が増加し、基礎固定時の上部構造応答成分の割合が減少したことにより起ると考えられる。
- (3) 計測ケース 3-1 および計測ケース 3-2 より、本館・講堂ともに1階および4階床面は、水平方向には一体となって並進的な挙動を示すが、鉛直方向には位相ずれを示す場合があると考えられる。計測ケース 4-1、計測ケース 4-2、計測ケース 4-3 より、講堂1階、4階床面、屋根面においても同様の傾向が確認された。
- (4) 計測ケース 6 より、安田講堂東側の周辺地盤のH/Vスペクトル比は、改修前後ともに1~3Hzあたりの低い振動数に最大のピークを持ち、振動数が高くなるにつれて大きな谷を形成する形状を示し、比較的軟らかい地盤であると推察される。
- (5) RD法を用いて地盤の影響を含む建物の減衰評価を試みたところ、耐震改修後の減衰定数は、本館・講堂ともに南北方向では減少、東西方向では増加する傾向が見られた。本館については、RC壁の増設・新設といった補強により減衰定数は小さくなるものの、東西方向ではロッキング率が大きく増加したため、建物-地盤の相互作用により、建物のみの減衰低減を上回って減衰が増加し、結果として系全体の減衰定数が大きくなったと考えられる。一方、講堂については、原因は特定できていない。
- (6) 基礎固定時の本館・講堂の高さ方向の1次モード形状を推定した結果、耐震改修前には本館および講堂3階付近に不連続的な節が見られたが、改修後にはその影響は小さくなったことが確認された。

- (7) 基礎固定時の講堂平面の1次モード形状を推定した結果、南北(桁行)成分卓越時には、耐震改修前と同様、“北東-北西”方向、および“南東-南西”方向に“伸び-縮み”するような挙動を示すものと考えられる。一方、東西(張間)成分卓越時には、耐震改修前と同様、“北-南”方向に“伸び-縮み”するような挙動を示すものと考えられる。

- (8) 階段室による講堂の変形の拘束効果の有無をモード形状、計測ケース4の水平成分の速度波形の極値から検討したところ、階段室のある計測点の変形は他の計測点と同等またはやや大きい値を示したことから、階段室による変形の拘束効果は確認できなかった。

付録

2.5.3 では高さ方向および平面の振動モード形状を示したが，ここでは計測ケース 1-1, 5-1, 4-2, 4-3 の微動速度波形を用いて，本館および講堂の振動モード形状をシミュレートした動画を付録として DVD に収めた。

- (1) 本館高さ方向の振動モード形状
- (2) 講堂高さ方向の振動モード形状
- (3) 講堂 4 階床面の振動モード形状
- (4) 講堂屋根面の振動モード形状