

ヴィコフォルテ教会堂およびアウグスタ飛行船格納庫の 常時微動測定報告書（速報）

目次

1. 調査目的とその概要
2. ヴィコフォルテ教会堂
 - 2.1 建物概要
 - 2.2 常時微動測定
 - (1) 測定位置と測定方法
 - (2) 測定結果
3. アウグスタ飛行船格納庫
 - 3.1 建物概要
 - 3.2 劣化および損傷に関する概要調査
 - 3.3 常時微動測定
 - (1) 測定位置と測定方法
 - (2) 測定結果
4. まとめ

1. 調査目的とその概要

本報告は科学研究費補助金「イタリアにおける歴史的な組積造建築と RC 建築の構造・材料と修復に関する調査（研究代表者：青木孝義 名古屋市立大学大学院 芸術工学研究科助教授，平成 18 年度～20 年度 基盤研究(A)（海外学術調査）」の調査の一環として，その調査対象のひとつであるモンドヴィ近郊のヴィコフォルテ教会堂（1596 年建設開始，1880 年国宝指定）の常時微動測定結果および今後の実施を予定しているアウグスタ飛行船格納庫（1917 年建設，1987 年国宝指定）の振動性状把握調査のための予備調査結果を取りまとめたものである．上記調査計画は，a) イタリアにおける歴史的な組積造建築と RC 建築の学術調査を実施して資料価値の高い調査報告書を作成すること，および b) 劣化現況調査・診断と構造解析による耐震性能の評価に基づき具体的な補修・補強方法を提案すること，を主目的としており，本測定調査ではそのための基本的なデータの蓄積に主眼を置き，ヴィコフォルテ教会堂ではその基本的な振動特性を把握すべく詳細な常時微動測定を，また アウグスタ飛行船格納庫では今後の調査計画を立案するに当たっての建物およびその周辺の概要調査および予備的な地盤の常時微動計測を，それぞれ実施した．

調査の日程および調査メンバーは以下のとおりである．

調査メンバー

青木孝義（名古屋市立大学） 研究統括および微動計測
中埜良昭（東京大学生産技術研究所） 微動計測
高橋典之（東京大学生産技術研究所） 微動計測
込山貴仁（株コンステック） 微動計測
佐藤大輔（株コンステック） 微動計測

調査日程（2006 年 9 月 21 日～10 月 1 日）

9/21 日本発（中埜・高橋）/ 青木・込山・佐藤と合流
22（晴） 微動計のチェック^{*1}，
教会堂 1 階床 4 点（東西南北）3 成分の微動計測（夕方および夜間），南側鉛直方向 4 点（1 階床，第 1 コーニス，第 2 コーニス，ドーム基部またはランタン）3 成分の微動計測（夜間）
23（晴） 教会堂第 2 コーニスレベル 4 点（東西南北）3 成分の微動計測（昼間および夜間），教会堂周辺の地盤微動計測地点の検討と地勢調査（昼間）
24（曇） 教会堂第 2 コーニスレベル 4 点（東西南北）3 成分の微動計測（微動レベル確認のための再計測（昼間）），測定結果の分析（終日）

^{*1} No. Vel-5（3 成分計）の Y 方向不調を確認したため，No. Vel-5 を用いた水平 2 方向計測は（同時計測ではなく）X-Z 成分の計測方向を 90° 回転させ独立に 2 回計測することで対応した．

- 25 (雨) 教会堂第 2 コーニスレベル 4 点長軸方向再計測 (昼間)^{*2}, 南側鉛直方向 5 点 (1 階床, 第 1 コーニス, 第 2 コーニス, ドーム基部, ランタン) 長軸方向再計測 (昼間)^{*2}, 1 階床 4 点 (長軸)^{*2} + 地下地盤 1 点 3 成分の計測 (夜間), 教会堂西側地盤の予備計測 (夜間: 雨天, やや風強し)
- 26 (雨) 1 階床 1 点 (北) + 地下地盤 1 点 (いずれも短軸方向) の計測 (昼間), 1 階床南正面入り口 1 点 + 低層棟第 1 コーニスレベル 1 点 (長軸および短軸方向) の微動計測 (昼間), 教会堂西側自由地盤上での計測 (3 成分) (教会堂から 12m および 33m の 2 点) (地盤計測時は小雨)
- 27 (晴) シラクサに移動 (込山・佐藤帰国)
- 28 (晴) アウグスタの飛行船格納庫の予備調査と地盤の微動計測 (南, 北の 2 点) (いずれも昼間)
- 29 (晴) 計測結果の分析
- 30 (晴) 出国
- 10/1 帰国 (青木・中埜・高橋)

^{*2} 9/24 までの計測データ分析の結果, 長軸方向の計測に用いていた No. Vel-11 (水平 1 成分計) でやや長周期成分側が鈍感である傾向が認められたので再計測した。

2. ヴィコフォルテ教会堂

2.1 建物概要[1]

ヴィコフォルテ教会堂（1596 年建設開始，1731 年ドーム建設，1880 年国宝指定）は，イタリア北西部ピエモンテ州モンドヴィ近郊に位置する世界最大規模の楕円形ドーム（長軸 37.15m，短軸 24.80m，高さ 16.60m）を持つ組積造建築物である．本教会堂はローマのパンテオン（ドーム平面形状：円形 / 2 世紀建設），サン・ピエトロ聖堂（ドーム平面形状：円形 / 16 世紀建設），フィレンツェのサンタ・マリア・デル・フィオーレ大聖堂（ドーム平面形状：八角形 / 15 世紀建設）などの観光地にある宗教建築ほどには日本では知られてはいないものの，イタリア国宝として指定された，時代・都市・様式・文化を代表する重要建築物のひとつであり，また世界最大規模の楕円形ドームを持つ優れた空間構造を有する宗教建築である．図 2-1 に教会堂の外観を，図 2-2～2-7 に構造概略図，代表部位の平面図，断面図をそれぞれ示す．



図 2-1 ヴィコフォルテ教会堂 南正面（左） / 北立面（右）

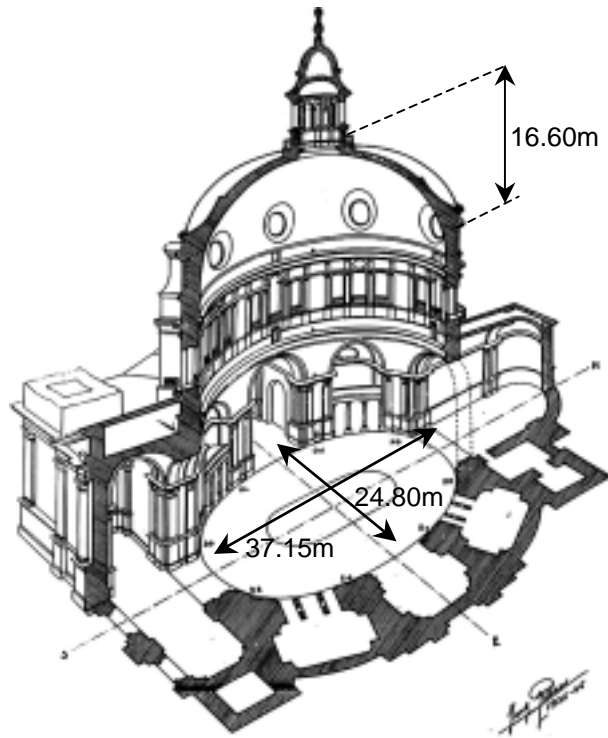


図 2-2 ヴィコフォルテ教会堂の構造概略 (文献[1] 図 1-4 に一部加筆)

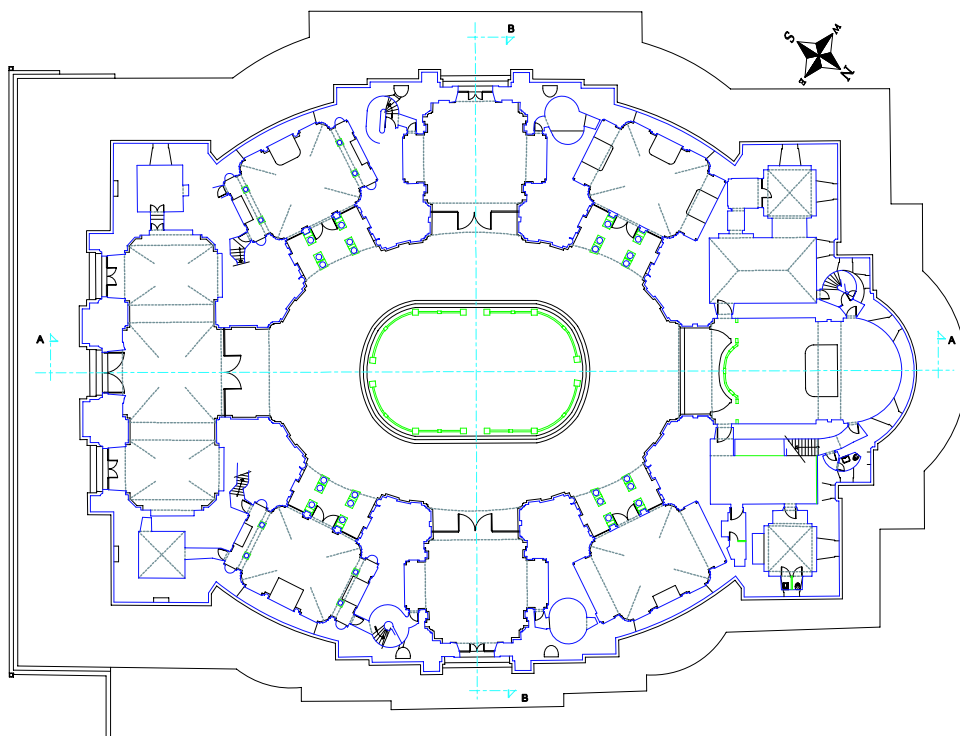


図 2-3 教会堂の平面図 (床レベル)

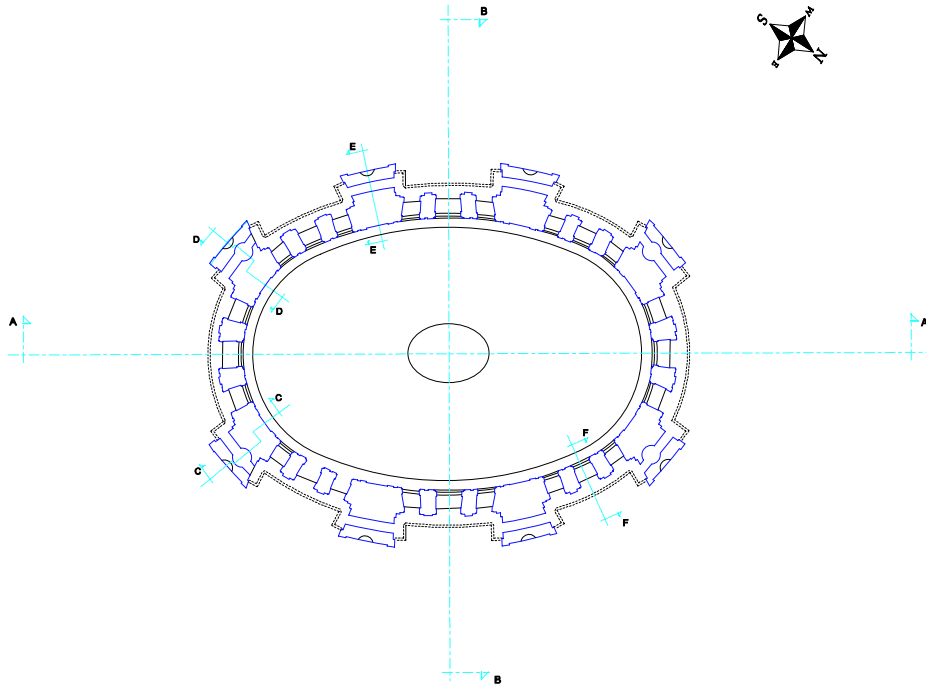


図 2-4 教会堂の平面図 (第 1 コーニスレベル)

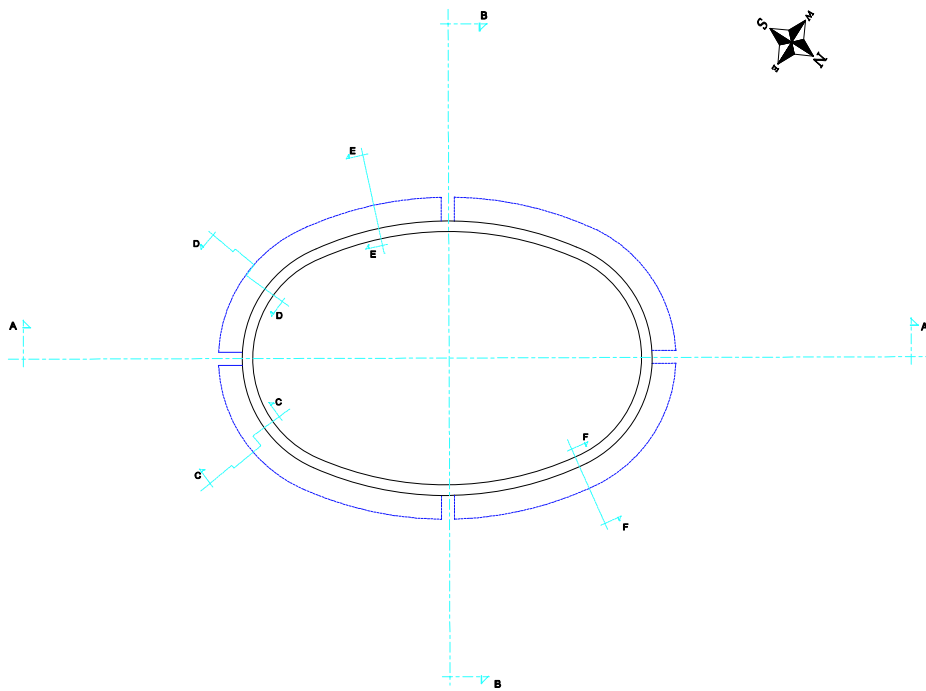


図 2-5 教会堂の平面図 (第 2 コーニスレベル)

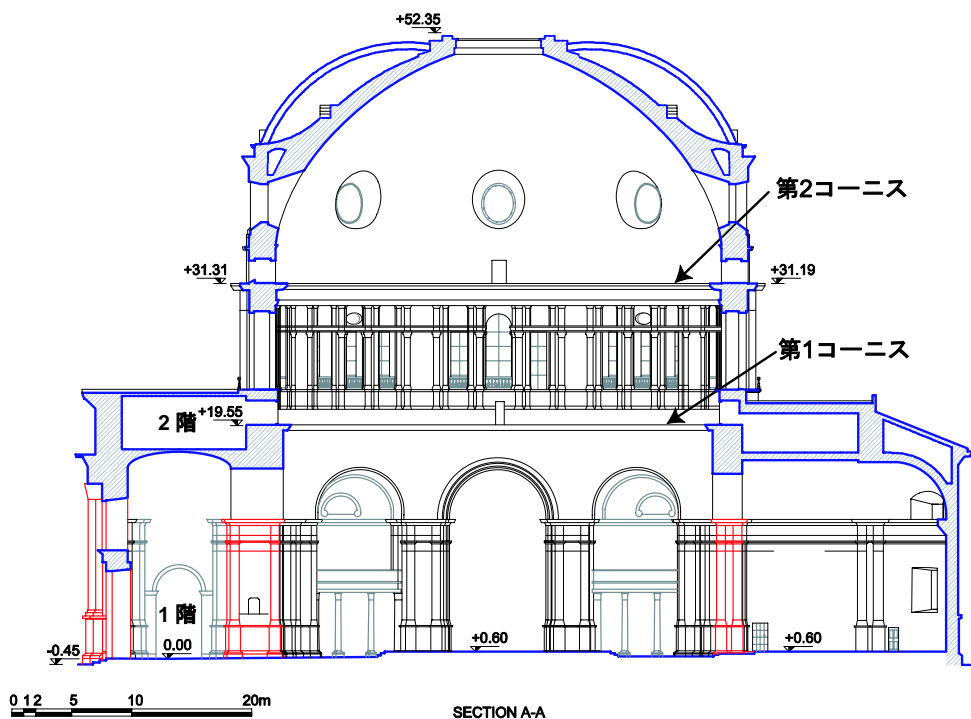


図 2-6 教会堂の断面図 (長軸 section A-A)

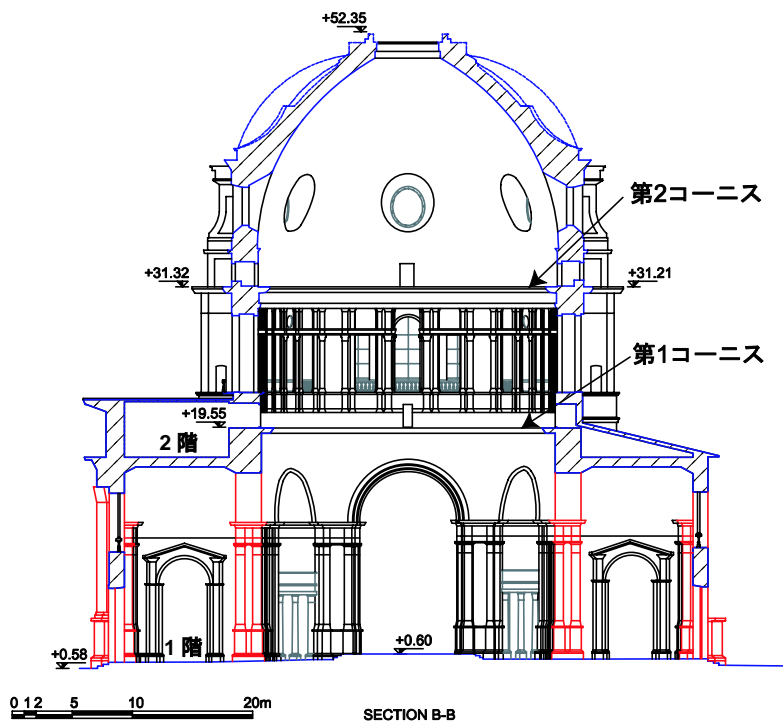


図 2-7 教会堂の断面図 (短軸 section B-B)

本教会堂の建設の経緯ならびに修復の歴史は文献[1]に詳述されているが、構造躯体に関わる事項の概略は表 2-1 のとおりである。

表 2-1 ヴィコフォルテ教会堂の建設の歴史

1596 年	建設開始
1600 年	地盤沈下のため工事を中断
1701 年	工事再開，損傷したドラムを取り壊し，再建
1701～1705 年	コーニス，ドラム基部から大窓まで再建
1724 年	6本のメインの柱を建設
1729 年	組積工事の開始
1730 年	ドラムまで完成
1731 年	ドームの建設
1732 年	ランタンとドームのレンガ屋根工事の開始，ドーム基部に鋼製補強リングの設置
1733 年	ランタンとドームのレンガ屋根（瓦ぶき）の完成
1880 年	国宝指定
1883 年	レンガ屋根を銅版の木造屋根に吹き替え
1894 年	主要ファサードの完成
1934～63 年	教会堂の測量調査研究（技師 M. Garro による）
1984 年	ひび割れ部分へのエポキシ樹脂の注入，および，ドーム基部（ドラムの第 2 コーニス上部）への補強リングによる補強
1987 年	ドーム基部のポストテンションリングによる補強とフレスコ画の修復

ヴィコフォルテ教会堂はサヴォイア家の霊廟として建築家 Ascanio Vittozi により 1596 年に建設が開始されたが（教会堂のオリジナル案は Ercole Negri di Sanfront による），層厚の不均一な粘土層（その下部は泥炭層）上に建てられたため，建設の初期から不同沈下およびこれによるれんが躯体のひび割れを生じさせている．図 2-8 に泥炭土層の等高線と基礎の様子を示す．同図に示すとおり，教会堂の基礎は，その北東部のみが泥炭層に設置され，その他は粘土層上（西面の D の柱は粘土層と泥灰土層との変遷層上）にあるため，北西面の大きな不同沈下と，これによる西側丸窓と北面の大きなひび割れが生じている．なお，1945 年に Garro らの調査による不同沈下測定結果と 2002 年の青木らによる調査結果の比較によると，最近の 60 年間の沈下は停止しているか比較的緩やかであると推定されている[1]．

基礎から上部構造に目を向けると，ドームの崩壊防止策として，1987 年にドーム基部へのポストテンションリングの挿入が実施されている．これは，1962 年の Garro による調査，1983 年の Rodio による調査に基づいて実施された補強工事であるが，導入張力については未だに確定しておらず，保存や補強の面から構造特性の解明が切望されている．

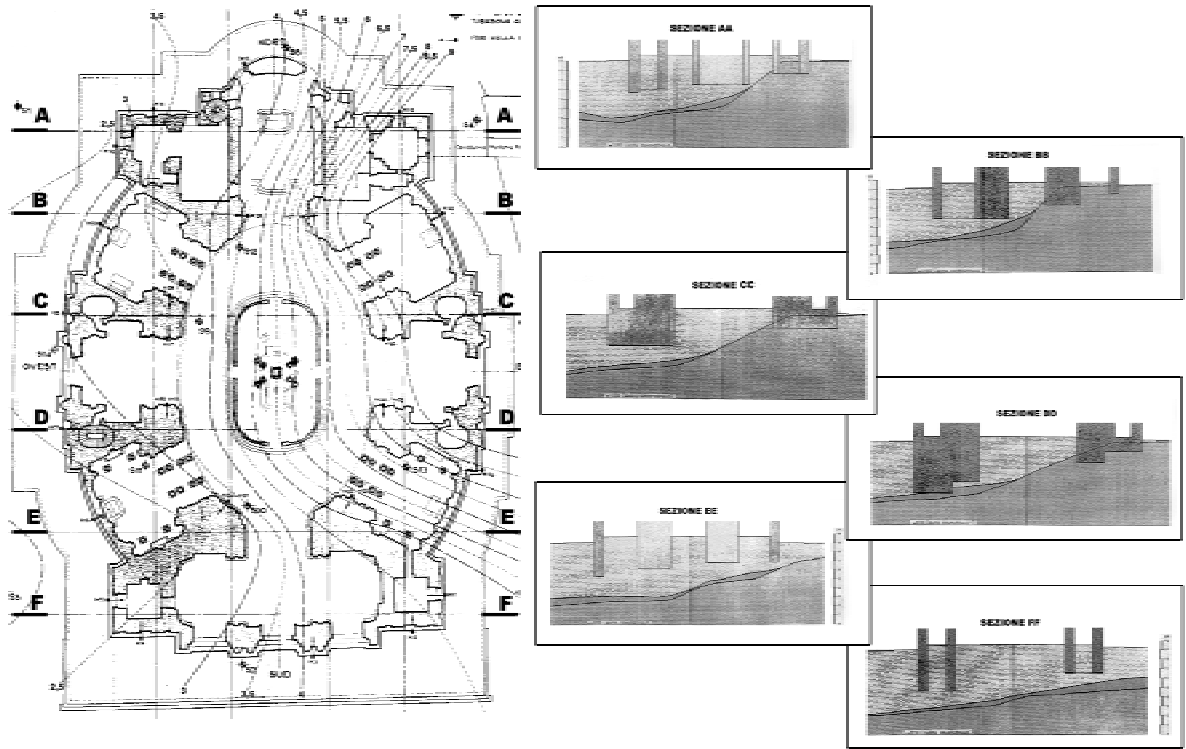


図 2-8 泥炭土層の等高線と基礎の様子[2]



図 2-9 世界最大の楕円ドームをもつ教会内部

2.2 常時微動測定

(1) 測定位置と測定方法

各ピックアップの設置箇所（測定位置）によって、本調査の計測ケースは大まかに 6 つに分類される。計測ケースの概要を表 2-2 に示す。ただし 1 章の調査日程に記してあるように、同じ計測ケース（同じ測定位置の組合せ）であっても、測定装置の不具合などから数回に分けて測定しており、調査日時が異なるため外乱要因が全く同一ではないことに留意されたい。

計測ケース Vico1 は、比較的定常的な波形が観測されている時間区間にみられる上下方向の波形ピークの位相差から建物のロッキング成分を把握することと、水平方向の波形ピーク位相差から建物 1 階床面の並進成分（捩じれ成分の有無）を把握することを目的とした計測である。計測ケース Vico2 は、比較的定常的な波形が観測されている時間区間にみられる主に水平方向の波形ピークの位相差からドラム+ドーム構造部分の水平成分の振動性状を把握することを目的とした計測である。計測ケース Vico3 は、計測ケース Vico1 を参考にしながら、建物基礎に関する水平方向の振動性状を把握することを目的とした計測である。計測ケース Vico4 は、教会堂のドーム外周をとりまく比較的low層な構造部分の振動性状の把握を目的とした計測である。計測ケース Vico5 は、教会堂上部構造の高さ方向に現れる振動性状を把握することを目的とした計測である。計測ケース Vico6 は、教会堂周辺地盤の振動性状を把握することを目的とした計測である。

表 2-2 計測ケースの概要

計測ケース名	測定位置レベル (括弧内：同レベルの測定位置×成分数)	測定の目的
Vico1	1 階（東西南北×3 成分）	建物のロッキング成分の把握
Vico2	第 2 コーニス（東西南北×3 成分）	ドラム+ドーム構造物の水平成分振動性状の把握
Vico3	地下 1 階（北×3 成分） + 1 階（北×3 成分+東西南×2 成分）	建物基礎のスウェイ成分の把握
Vico4	1 階（南×3 成分） + 2 階（南×1 成分）	ドーム外周構造物の振動性状の把握
Vico5	1 階（南×3 成分） + 第 1 コーニス（南×3 成分） + 第 2 コーニス（南×3 成分） + ドーム屋根基部（南×3 成分） + ランタン（南×3 成分）	建物の振動性状の把握
Vico6	地盤（西×3 成分） 建物からの距離 L=12m および 33m	周辺地盤の振動性状の把握

表 2-2 に示した測定位置レベルおよび測定位置については、図 2-10～図 2-15 に示すとおりである。実際の方角より表 2-2 および図 2-10～図 2-15 で定めた「東」「西」「南」「北」は反時計回りに約 37.5°ずれているが、これは、楕円形ドームの長手方向を「南北方向」、短手方向を「東西方向」と設定したためである。

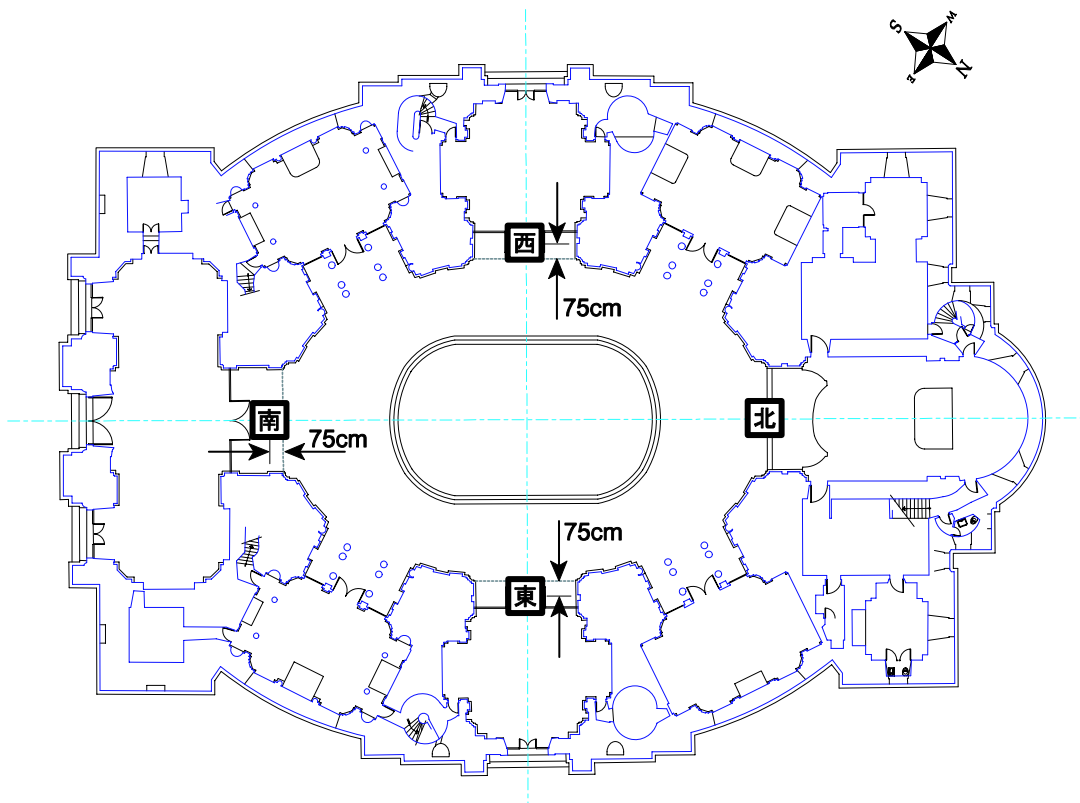


図 2-10 計測ケース Vico1 / 設置位置 = 1 階の東西南北

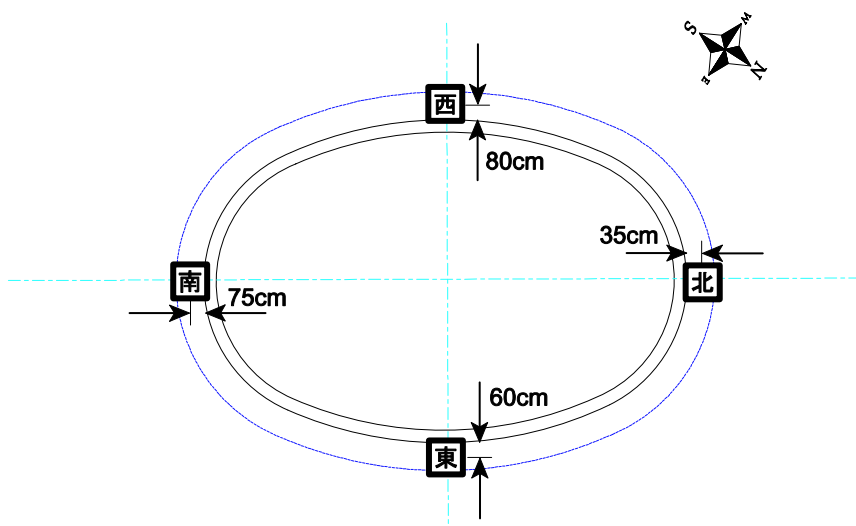


図 2-11 計測ケース Vico2 / 設置位置 = 第 2 コーニスの東西南北

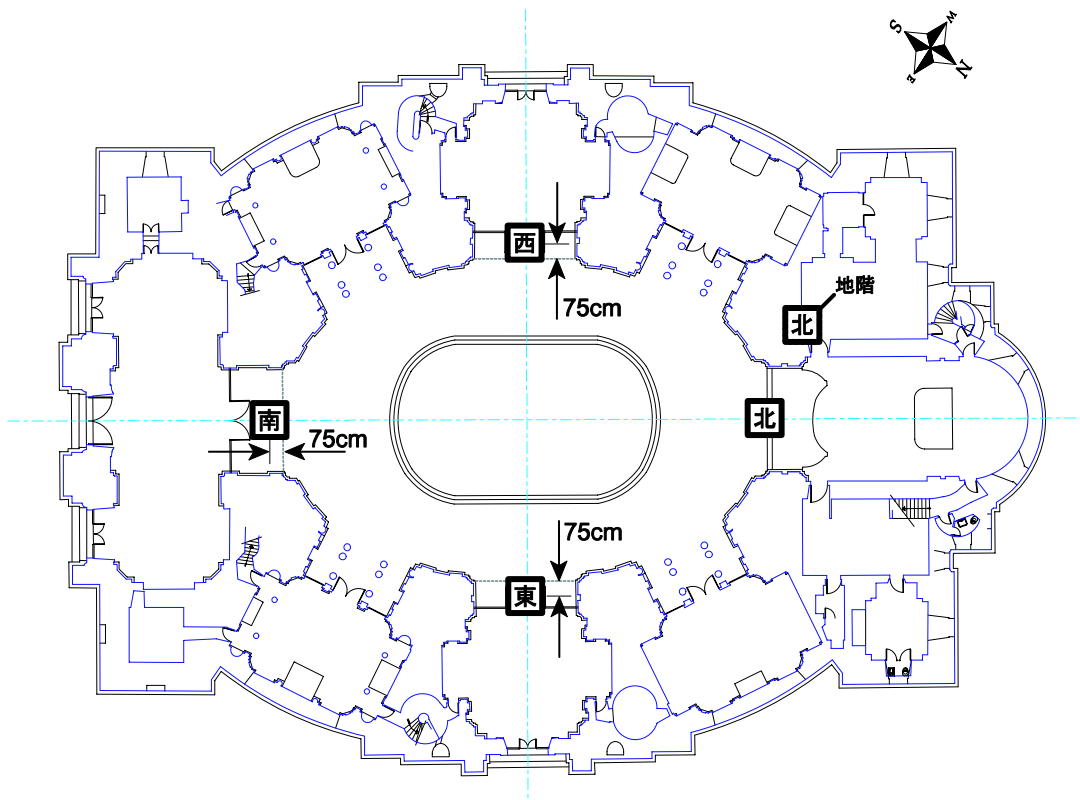


図 2-12 計測ケース Vico3 / 設置位置 = 1 階の東西南北および地下 1 階

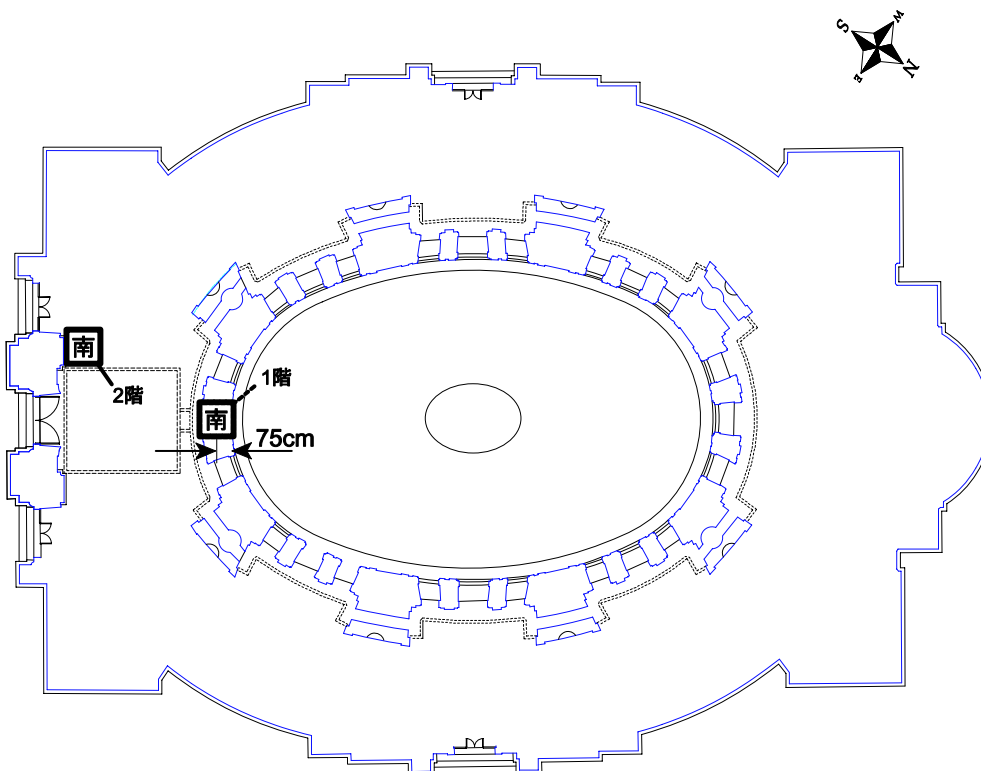


図 2-13 計測ケース Vico4 / 設置位置 = 1 階の南側および 2 階の南正面柱際

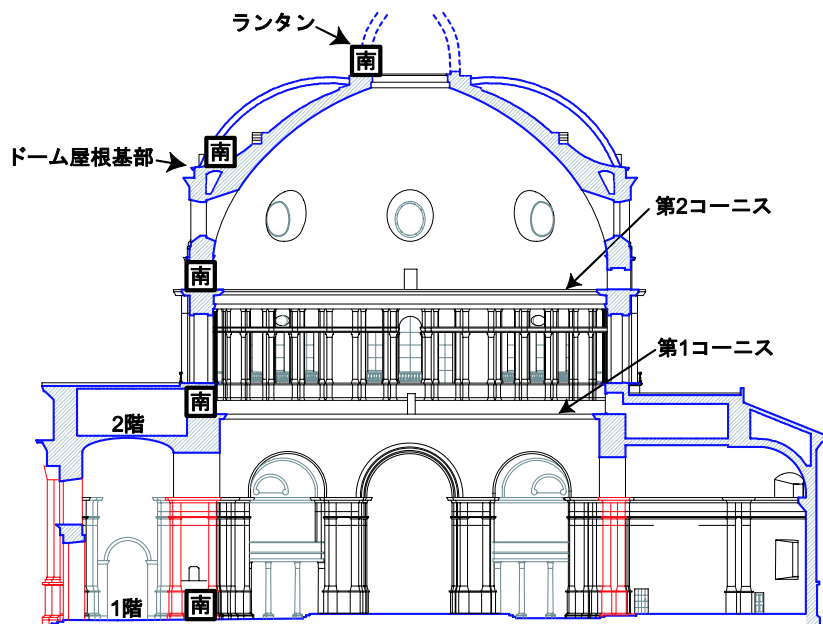


図 2-14 計測ケース Vico5 / 設置位置 = 各レベル南側 (長軸 section A-A)

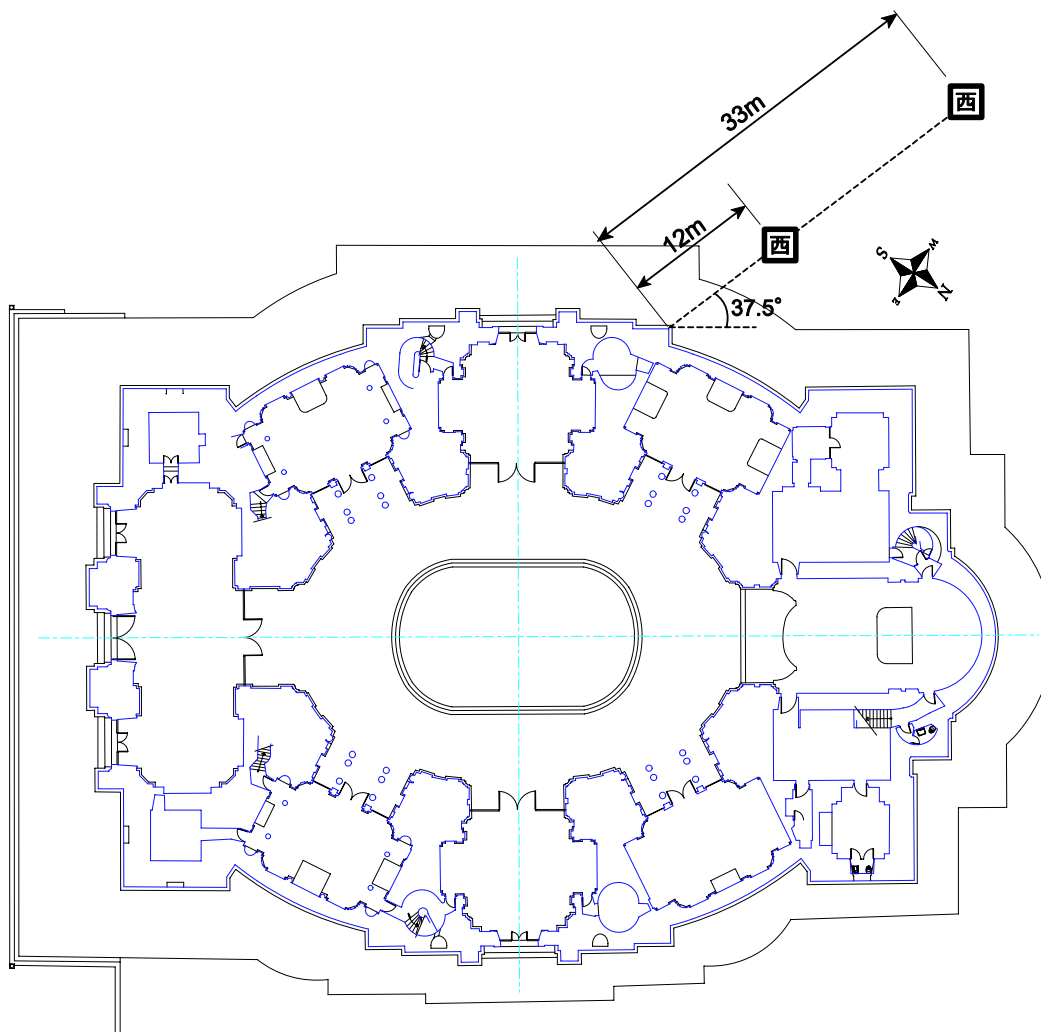


図 2-15 計測ケース Vico6 / 設置位置 = 西側地盤 (建物からの距離 12m および 33m)

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-10-24DS）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 100Hz で収録時間を 300 秒間とした。

ピックアップ波形を概観したところ、ピックアップ No.5（3 成分計）の Y 方向成分、および、ピックアップ No.11（水平 1 成分計）の波形が、他のピックアップの波形特性と異なっていたことから、該当成分については他のピックアップで別途測定することとした。測定時の様子を図 2-16～図 2-19 に示す。



図 2-16 測定準備の様子



図 2-17 ピックアップ設置状況



図 2-18 測定波形確認の様子



図 2-19 測定時の様子

(2) 測定結果

表 2-2 に示した各計測ケースについて測定結果を以下に示す。

計測ケース Vico1 :

計測ケース Vico1 は、比較的定常的な波形が観測されている時間区間にみられる上下方向の波形ピークの位相差から建物のロッキング動を把握することと、水平方向の波形位相差から建物 1 階床面の並進動成分（擦じれ振動の有無）の把握を目的とした計測である。

まず、比較的定常的な波形が観測されている 200 秒からの 81 秒間の観測記録について、東

西南北の各ピックアップで計測した上下動速度成分微動データのフーリエスペクトルを高速 FFT により算出した．バンド幅 0.5Hz の Parzen Window を用いてスペクトルの平滑化を行った結果を図 2-20 に示す．東西南北の各計測ポイントとも 0.22Hz 付近にピークがあるが工学的に卓越周波数ではないと判断し，図 2-20 において次に高いピークを示した 13.6Hz をここでは 1 階床上下方向の卓越周波数と呼ぶことにする．ただし，東および西の計測ポイントにおいては，卓越周波数と判断できるほど明瞭なピークは表れていないので注意が必要である．

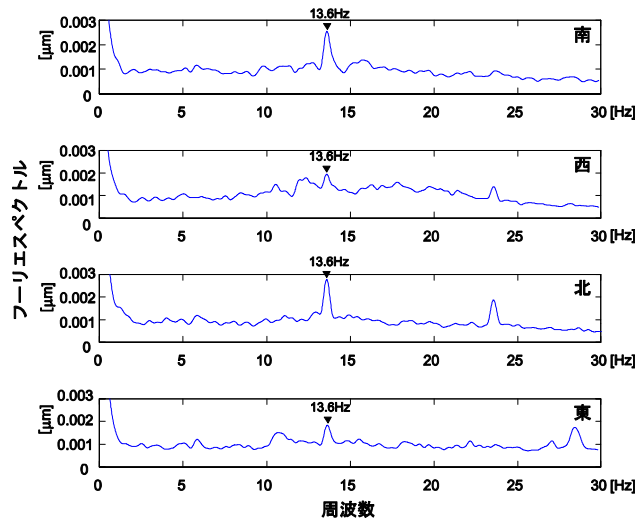


図 2-20 1 階レベル各測定位置での常時微動記録（上下方向）のフーリエスペクトル

全計測時間を通した上下動速度成分の波形を概観したところ，各測定位置について有意な位相差を明瞭に確認することは難しかった．ただし，比較的定常的な波形を示している時間区分において，いくらか図 2-21 のような速度成分波形を見ることができた．卓越周波数 13.6Hz の比較的定常的な波形が現れる時間区分（図 2-21 のように 0.5 秒間を取り出せば，平均 6.8 波長観測されるはずである）において，北と東の成分が同位相でよく似た波形を示し，南と北，東と西では逆位相となる波形が見られる．すなわち，上下動速度成分において“北・東”および“南・西”がそれぞれ同位相になる場合が多く，“北・東”と“南・西”が互いに逆位相になる場合がある．

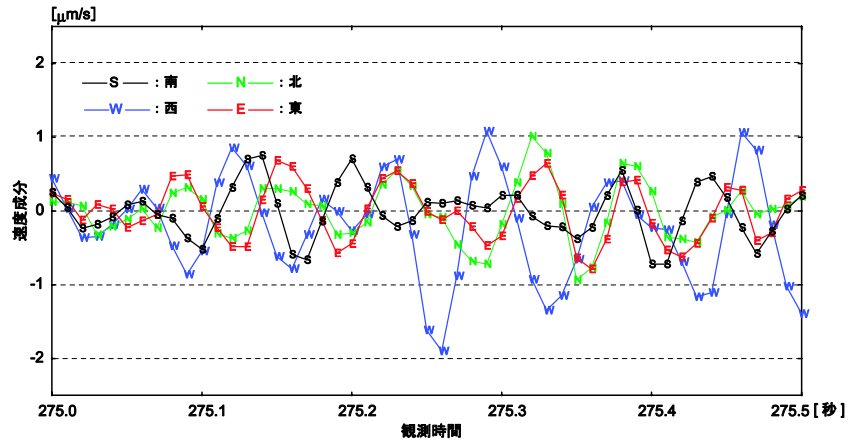


図 2-21(a) 上下動速度成分の波形 (Vico1 の東西南北)

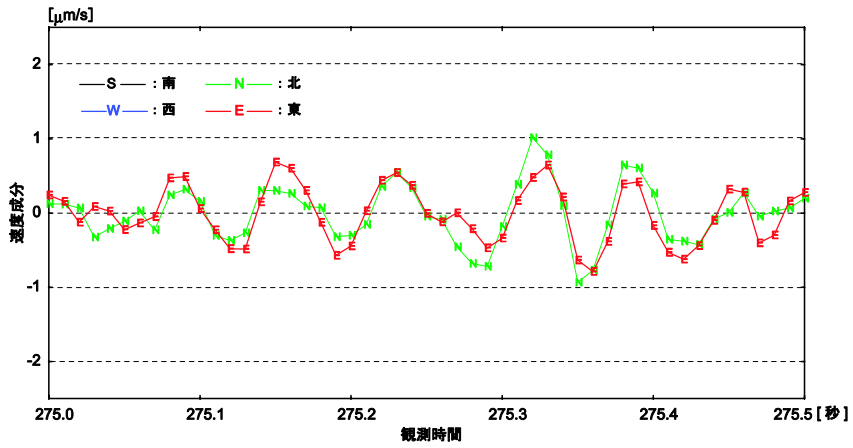


図 2-21(b) 上下動速度成分の波形 (Vico1 の東・北)

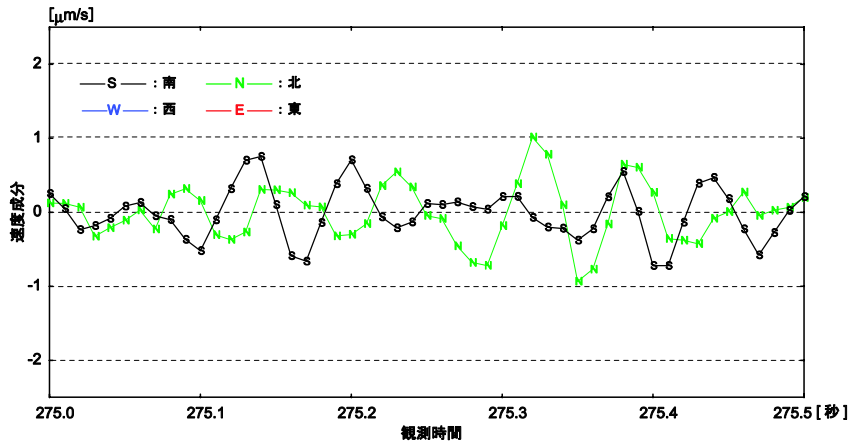


図 2-21(c) 上下動速度成分の波形 (Vico1 の南・北)

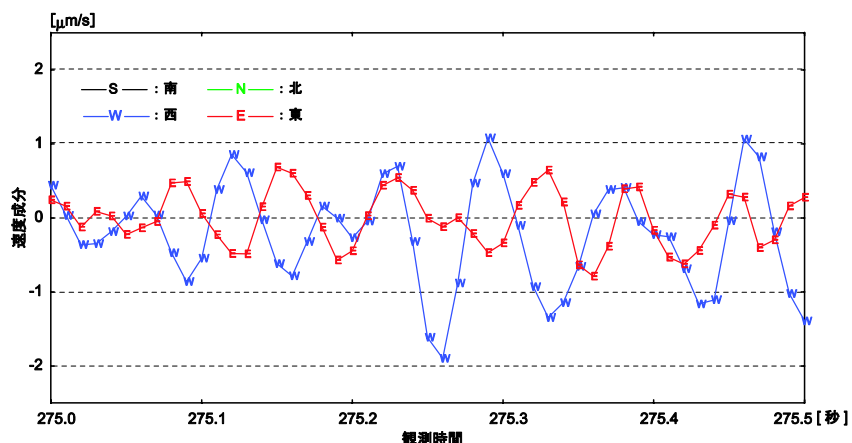


図 2-21(d) 上下動速度成分の波形（Vico1 の東・西）

東西南北の各ピックアップで計測した南北方向の水平速度成分微動データのフーリエスペクトルを高速 FFT により算出した．バンド幅 0.5Hz の Parzen Window を用いてスペクトルの平滑化を行った結果を図 2-22 に示す．各計測ポイントで 0.02Hz ~ 0.17Hz 付近にピークがあるが工学的に卓越周波数ではないと判断し，図 2-22 において示した 11.8Hz ~ 12.9Hz をここでは 1 階床南北方向の卓越周波数とする．

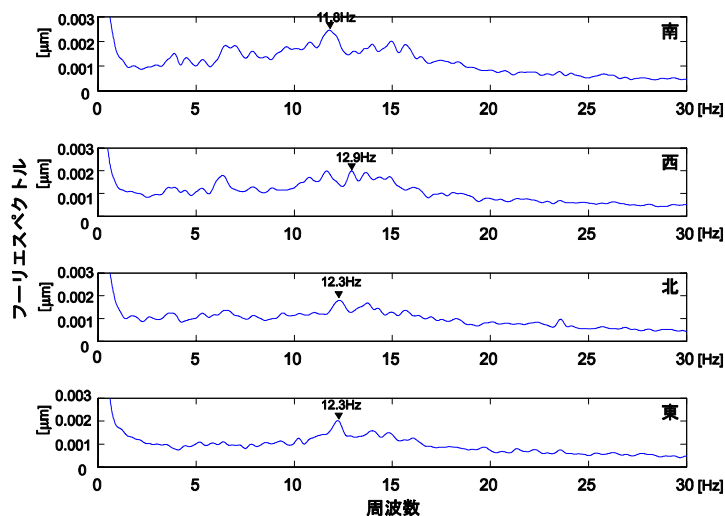


図 2-22 1 階レベル各測定位置での常時微動記録（南北水平方向）のフーリエスペクトル

全計測時間を通した南北水平動速度成分の波形を概観したが，各測定位置について明瞭な位相差を確認することは難しかった．ただし，比較的定常的な波形を示している時間区分においては，東西南北ともよく似た位相波形を示しているように見受けられる（図 2-23）．

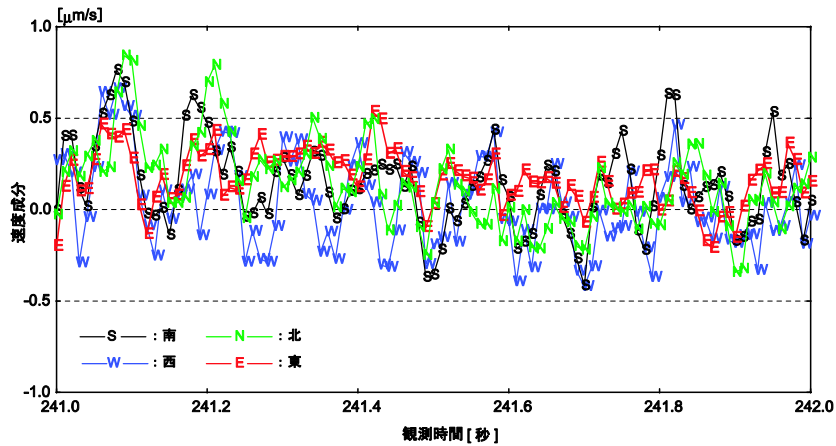


図 2-23 南北水平動速度成分の波形（Vico1 の東西南北）

東西南北の各ピックアップで計測した東西水平方向の水平速度成分微動データのフーリエスペクトルを高速 FFT により算出した．バンド幅 0.5Hz の Parzen Window を用いてスペクトルの平滑化を行った結果を図 2-24 に示す．各計測ポイントで 0.02Hz ~ 0.20Hz 付近にピークがあるが工学的に卓越周波数ではないと判断し，図 2-24 において次に高いピークを示した 13.6Hz ~ 13.7Hz をここでは 1 階床東西方向の卓越周波数と呼ぶことにするが，いずれも卓越周波数と判断できるだけの明瞭なピークを示しているわけではない点に注意が必要である．

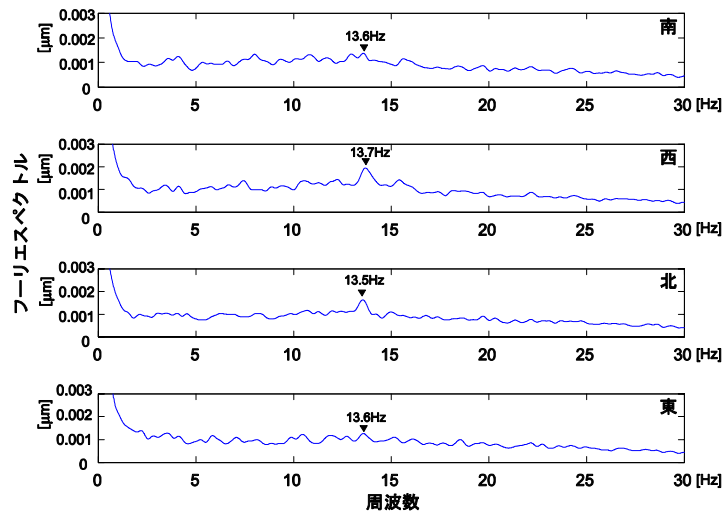


図 2-24 1 階レベル各測定位置での常時微動記録（東西水平方向）のフーリエスペクトル

全計測時間を通した東西水平動速度成分の波形を概観したが，各測定位置について有意な位相差を明瞭に確認することは難しかった．ただし，比較的定常的な波形を示している時間区分においては，東西南北ともよく似た位相波形を示しているように見受けられる(図 2-25)．

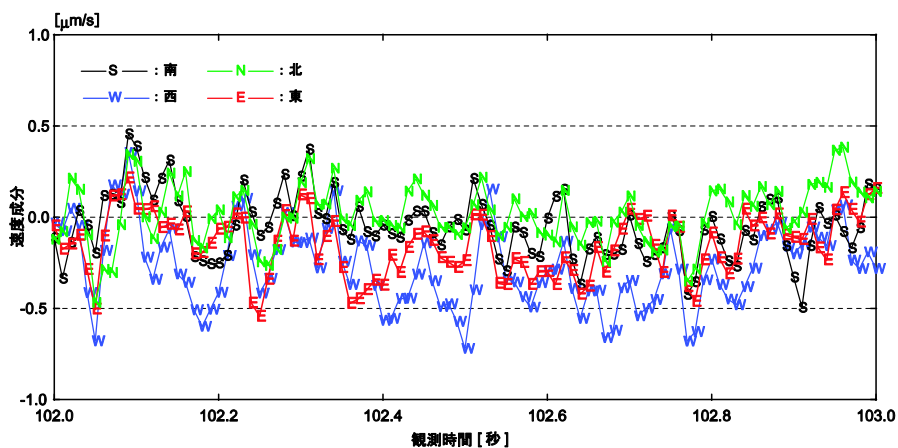


図 2-25(a) 東西水平動速度成分の波形 (Vico1 の東西南北)

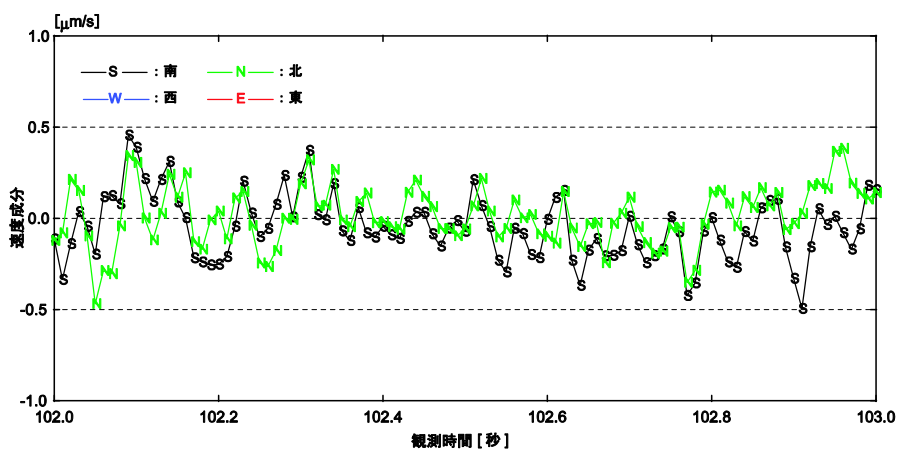


図 2-25(b) 東西水平動速度成分の波形 (Vico1 の南・北)

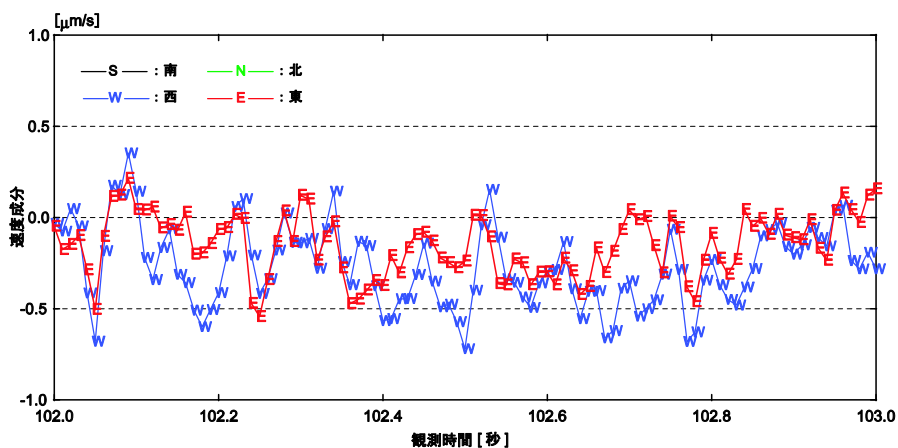


図 2-25(c) 東西水平動速度成分の波形 (Vico1 の東・西)

以上より、建物 1 階床面における振動性状について、上下動成分が“北・東”と“南・西”

が互いに逆位相になる場合があることから，“北西 南東”線を軸としたロッキング動の発生が推定された。また，水平動成分では東西南北ともよく似た位相波形を示す場合があることから，建物 1 階床面における擦じれ振動の発生は確認されなかった。

計測ケース Vico2 :

計測ケース Vico2 は，第 2 コーニスレベルでの計測で，比較的定常的な波形が観測されている時間区間にみられる主に水平方向の波形ピークの位相差からドラム+ドーム構造部分の水平成分の振動性状を把握することを目的とした計測である。

まず，比較的定常的な波形が観測されている 100 秒からの 81 秒間の観測記録について，東西南北の各ピックアップで計測した南北水平動速度成分微動データのフーリエスペクトルを高速 FFT により算出した。バンド幅 0.5Hz の Parzen Window を用いてスペクトルの平滑化を行った結果を図 2-26 に示す。南および西の計測ポイントで 0.02Hz 付近にピークがあるが工学的に卓越周波数ではないと判断し，図 2-26 において高いピークを示した 2.11Hz をここでは卓越周波数とする。

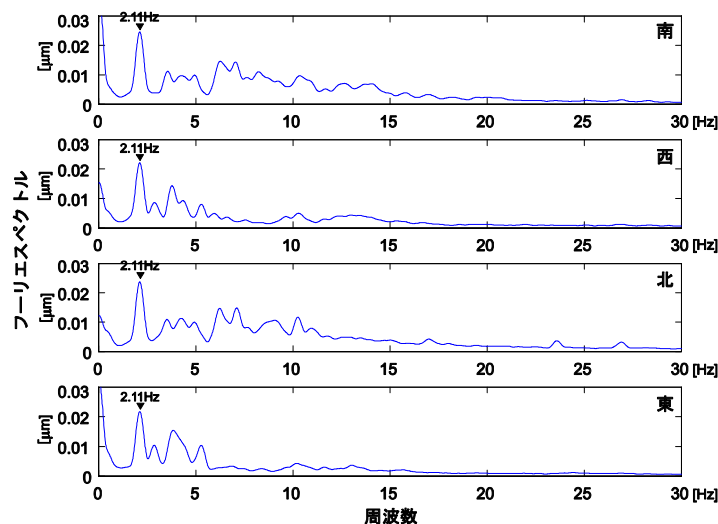


図 2-26 第 2 コーニスレベル各測定位置の常時微動記録（南北水平方向）のフーリエスペクトル

全計測時間を通した南北水平動速度成分の波形を概観したところ，各測定位置について有意な位相差を明瞭に確認することは難しかった。ただし，比較的定常的な波形が現れる時間区分において，“北・東”および“南・西”成分が似た位相の波形を示し，“東・南”では逆位相の波形を示す場合がしばしば見られた（図 2-27）。

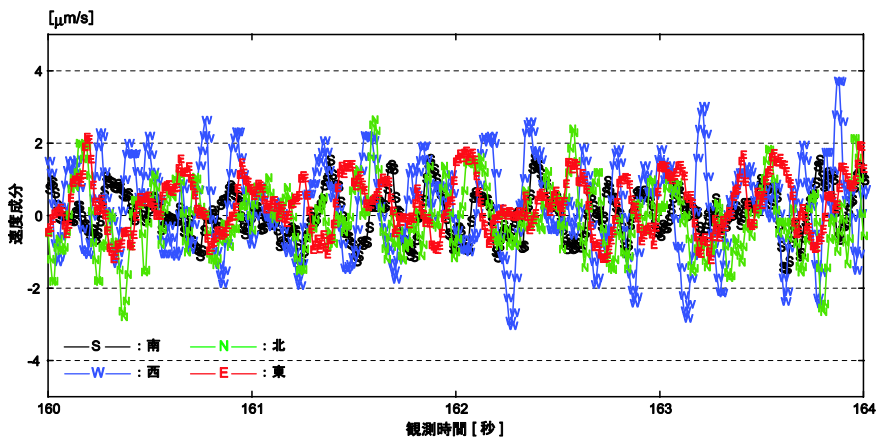


図 2-27(a) 南北水平動速度成分の波形 (Vico2 の東西南北)

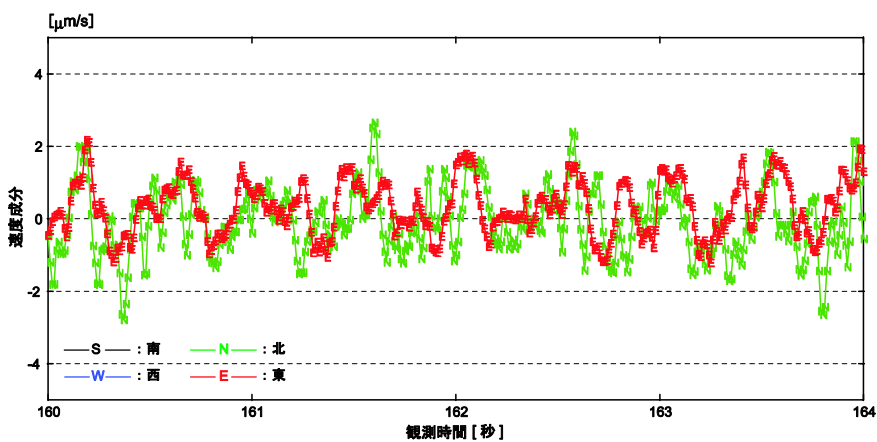


図 2-27(b) 南北水平動速度成分の波形 (Vico2 の東・北)

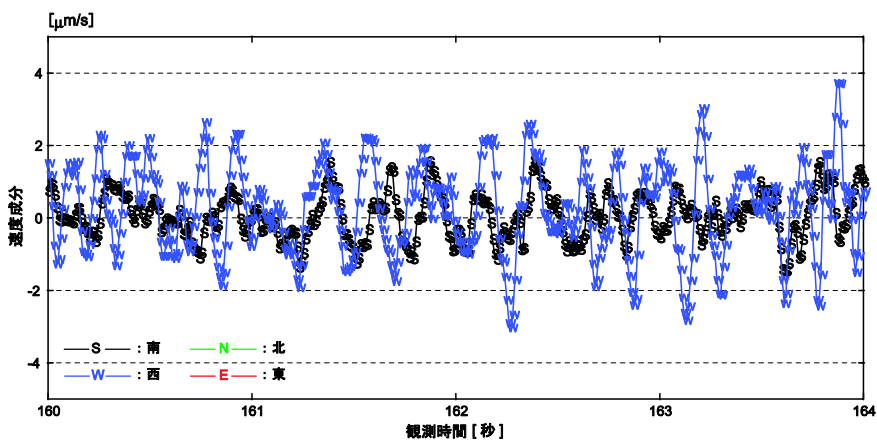


図 2-27(c) 南北水平動速度成分の波形 (Vico2 の西・南)

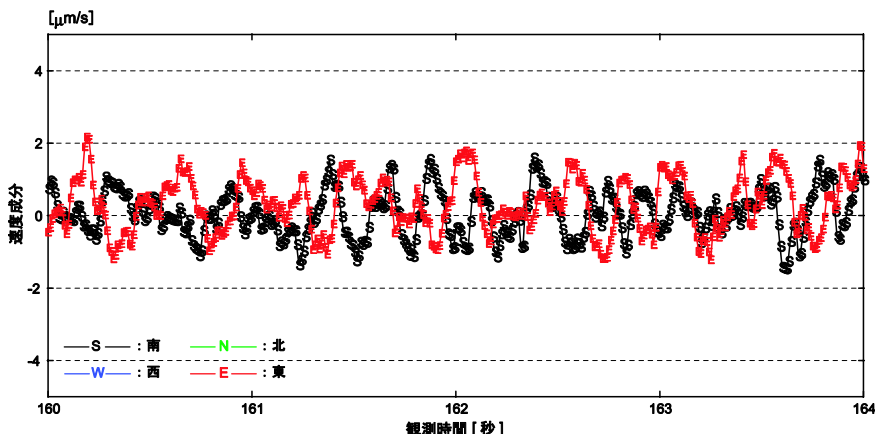


図 2-27(d) 南北水平動速度成分の波形（Vico2 の東・南）

次に、0 秒からの 81 秒間の観測記録について、東西南北の各ピックアップで計測した東西水平動速度成分微動データのフーリエスペクトルを高速 FFT により算出した。バンド幅 0.5Hz の Parzen Window を用いてスペクトルの平滑化を行った結果を図 2-28 に示す。図 2-28 において、南・北・西の計測ポイントでは 1.94Hz ~ 1.95Hz が最も高いピークを示し、東の計測ポイントでは 7.19Hz が最も高く 1.95Hz が次に高いピークを示したことから、これらをここでは卓越周波数とする。

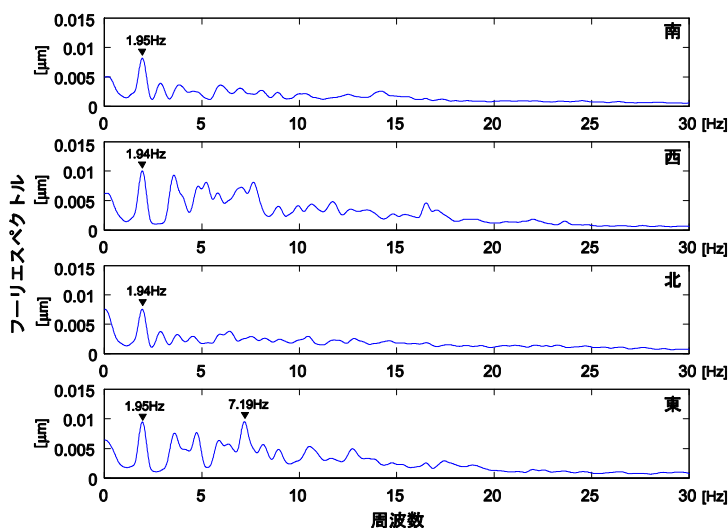


図 2-28 第 2 コーニスレベル各測定位置の常時微動記録（東西水平方向）のフーリエスペクトル

全計測時間を通した南北水平動速度成分の波形を概観したところ、各測定位置について有意な位相差を明瞭に確認することは難しかった。ただし、比較的定常的波形が現れる時間区分において、東西南北いずれのピックアップも似た位相の波形を示していた（図 2-29）。

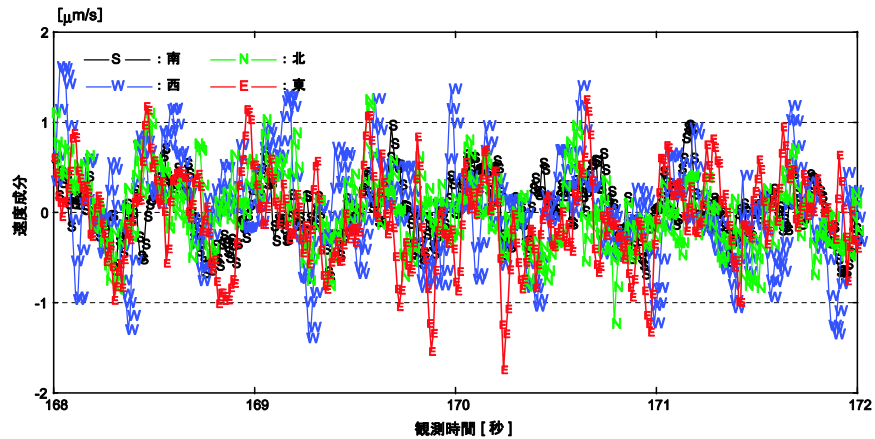


図 2-29 東西水平動速度成分の波形（Vico2 の東西南北）

以上，南北水平動および東西水平動の位相波形の観察により，第 2 コーニスレベルにおける振動性状については，コーニス部分が図 2-30 に示した概念図のように“北東 南西”方向に伸び縮みするような挙動を示すものと推定される

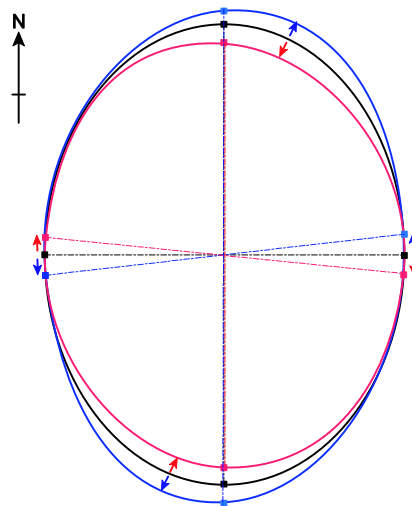


図 2-30 第 2 コーニス部分の水平方向振動性状概念図

計測ケース Vico3 :

計測ケース Vico3 は，計測ケース Vico1 を参考にしながら，建物基礎に関する水平方向の振動性状を把握することを目的とした計測である．ここで地下 1 階というのは，基礎部分の土を掘り下げて作成した 1 階床下の空間を指し，地下 1 階の床面は粘土質の土がむき出しになっている．Vico1 の測定結果より，1 階床レベルの水平方向については東西南北で似た位相を示していたことから，スウェイ成分の把握に際しては，最低限，北側の地下 1 階レベルと同じ北側 1 階床レベルの 2 点が計測されていれば問題ないと考えられる．

そこで，全観測時間に対して，北側の地下 1 階レベルおよび 1 階床レベルの水平動速度成分微動データのフーリエスペクトルを南北方向および東西方向それぞれについて高速 FFT に

より算出した．バンド幅 0.5Hz の Parzen Window を用いてスペクトルの平滑化を行い，北側の地下 1 階レベルに対する 1 階床レベルのスペクトル比を求めたところ，南北方向，東西方向それぞれについて図 2-31 のような結果を得た．南北方向のスペクトル比はほぼいずれの周波数帯でも 1 程度，東西方向のスペクトル比はいずれの周波数帯でも 1 から 1.5 程度であり，卓越周波数を特定できるだけの明瞭なピークは見られなかった．即ち，1 階床レベルが地下 1 階レベルと異なる特定の周波数で振動することはなく，基礎部分が支持地盤の土と概ね一体となって振動しているものと推察される．また，全計測時間を通じた常時微動記録の観測波形（基線補正を行った波形）について，微動波形の傾きが変化する点をピーク点とし，その時の速度の絶対値を全ピーク点数について平均したものを求めたところ，南北成分の地下 1 階では 0.208[$\mu\text{m/s}$]，1 階床では 0.205[$\mu\text{m/s}$]，東西成分の地下 1 階では 0.242[$\mu\text{m/s}$]，1 階床では 0.311[$\mu\text{m/s}$]と算出され，地下 1 階と 1 階床レベルの振幅に大きな差は見られなかった．このことから，基礎部分が地盤と南北方向にはほぼ一体となって，東西方向にはやや増幅しながらも概ね一体となって振動していると推察される（図 2-32）．

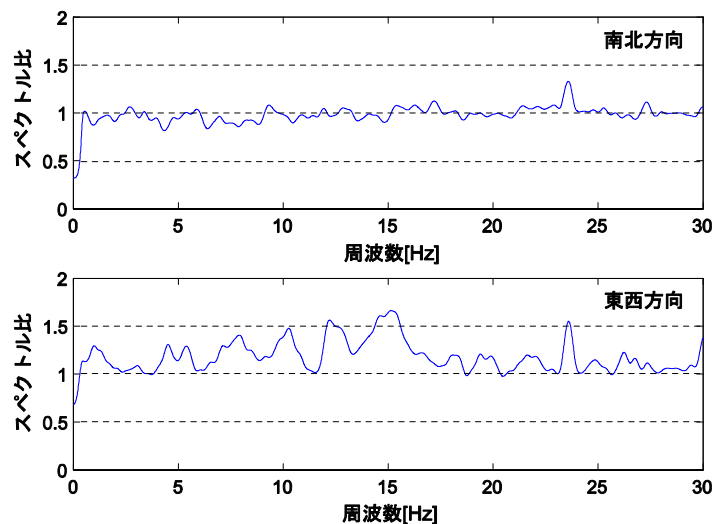


図 2-31 地下 1 階レベルに対する 1 階床レベルの水平方向常時微動記録のスペクトル比

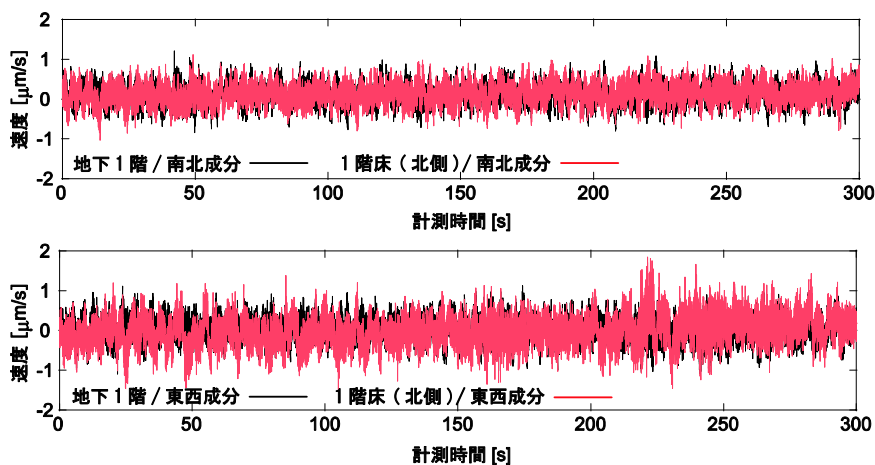


図 2-32 水平方向常時微動記録強さの比較（地下 1 階レベルと 1 階床レベル）

計測ケース Vico4 :

計測ケース Vico4 は、教会堂のドーム+ドラム外周をとりまく比較的低層な構造物の振動性状の把握を目的とした計測である。

比較的定常的な波形が観測されている（南北方向水平動を測定したケースでは 0 秒からの、東西方向水平動を測定したケースでは 10 秒からの）81 秒間の観測記録について、教会堂のドーム+ドラム外周部南側に付随する構造物に設置した 1 階床レベルおよび 2 階床レベルのピックアップにより計測された南北方向および東西方向の水平動速度成分微動データのフーリエスペクトルを高速 FFT により各々算出した。バンド幅 0.5Hz の Parzen Window を用いてスペクトルの平滑化を行い、2 階床レベルのフーリエ振幅を、1 階のフーリエ振幅で除すことによりスペクトル比を求め、教会堂のドーム+ドラム外周をとりまく比較的低層な構造物の卓越周波数を推定した。南北方向では 4.69[Hz]でスペクトル比にピークがみられ、東西方向では 4.47[Hz]でスペクトル比にピークが見られた（図 2-33）。

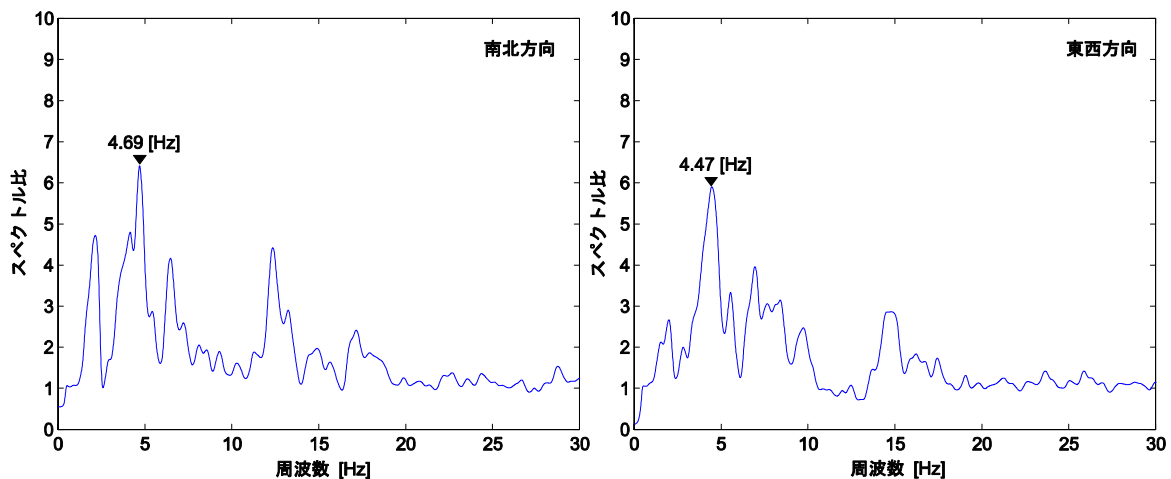


図 2-33 1 階床レベルに対する 2 階床レベルの水平方向常時微動記録のスペクトル比

図 2-33 に示した教会堂のドーム+ドラム外周をとりまく比較的低層な構造物の卓越周波数は、後述する計測ケース Vico5 で対象としている上部構造物（教会堂のドラムおよびドーム）の振動性状にいくらか影響を与える可能性があることに留意する必要がある。

計測ケース Vico5 :

計測ケース Vico5 は、教会堂上部構造の高さ方向に現れる振動性状を把握することを目的とした計測である。東西方向水平動を測定したケースでは比較的定常的な波形が観測されている 81 秒間の観測記録について、南北方向水平動を測定したケースでは全観測時間を通した記録について、図 2-14 に示した 1 階床、第 1 コーニス、第 2 コーニス、ドーム屋根基部およびランタンにおける各水平動速度成分微動データのフーリエスペクトルを高速 FFT により算出した。バンド幅 0.5Hz の Parzen Window を用いてスペクトルの平滑化を行い、第 1 コーニスレベル以上の計測点におけるフーリエ振幅を、1 階床のフーリエ振幅で除すことによりス

ベクトル比を求め、教会堂上部構造の卓越周波数を求めたところ、東西方向の卓越周波数は 1.95Hz から 2.10Hz の間、南北方向の卓越周波数は 2.11Hz であった（図 2-34）．図 2-14 に示した設置箇所から、計測ケース Vico5 で対象としている南北方向は構造体（構造壁）の面外方向を意味し、東西方向は構造体（構造壁）の面内方向を意味する．この違いが、振動方向によって卓越周波数が完全に一致する場合（南北方向：構造壁面外方向）と若干ばらついた場合（東西方向：構造壁面内方向）とに分かれたことに影響しているものと思われる．

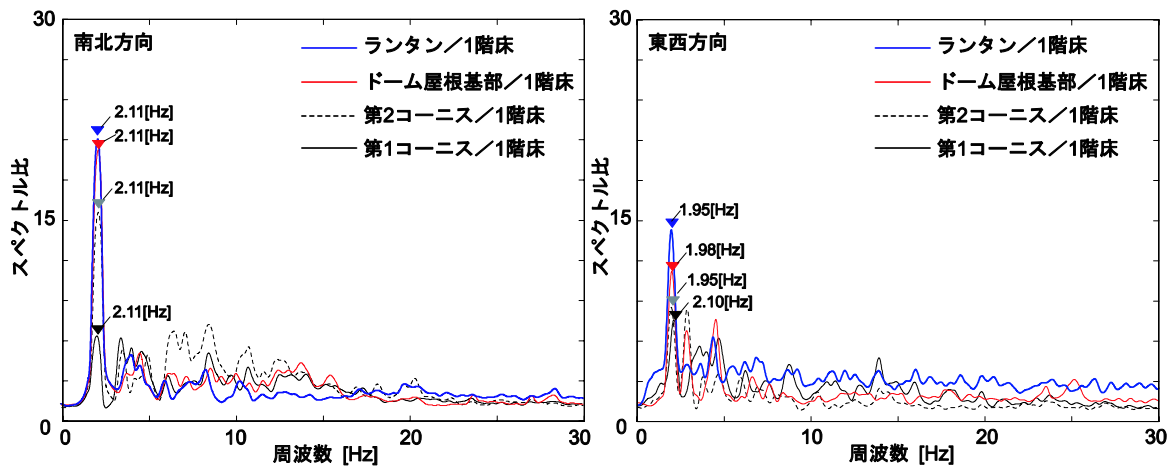


図 2-35 1 階床レベルに対する上部計測点の水平方向常時微動記録のスペクトル比

また、計測ケース Vico4 で言及した外周構造物の影響を図 2-34 に示したスペクトル比から判断すると、いずれの場合も 2 番目から 3 番目に高いピークを示している周波数が 4.5[Hz]付近であることから、外周構造物の振動特性が、教会堂上部構造物（ドーム+ドラム）の高次の振動モードに少なからず影響しているといえる．

次に、計測ケース Vico5 に加えて Vico1 および Vico2 の結果を用いて、上部構造の振動性状におけるロッキング動の割合を推定する．計測ケース Vico1 の結果より、ロッキング動は南西側と北東側が互いに逆位相になる場合が多いが、これを、教会堂上部構造の長軸方向および短軸方向に関するロッキング動に分離して検討を行う．まず、教会堂上部構造の長軸方向（南北方向）の振動におけるロッキング動成分の推定を行う．計測ケース Vico1 における南北の上下動速度成分に 1 階床から第 2 コーニスまでの高さを乗じ、これを南北のピックアップ間距離で除すと、第 2 コーニスレベルでの教会堂上部構造長軸方向（南北方向）のロッキング動によって生じた南北方向の水平動速度成分が計算される．これを、計測ケース Vico5 の第 2 コーニスレベルでの南北方向水平動速度成分と比較することで、教会堂上部構造の南北方向水平動速度成分におけるロッキング動成分の寄与率を求めるが、その際、計測ケース Vico1 と計測ケース Vico5 では測定日時が異なるので、微動レベルの補正係数を乗じて比較を行う．ここで補正係数は、1 階床レベル南側に設置されたピックアップの上下動速度成分について、計測ケース Vico1 に対する計測ケース Vico5 のピーク平均値（微動波形の傾きが変化する点をピーク点とした時の速度の絶対値を、全ピーク点数について平均値）の比を補正

係数 α_{UD} とした（図 2-36）。

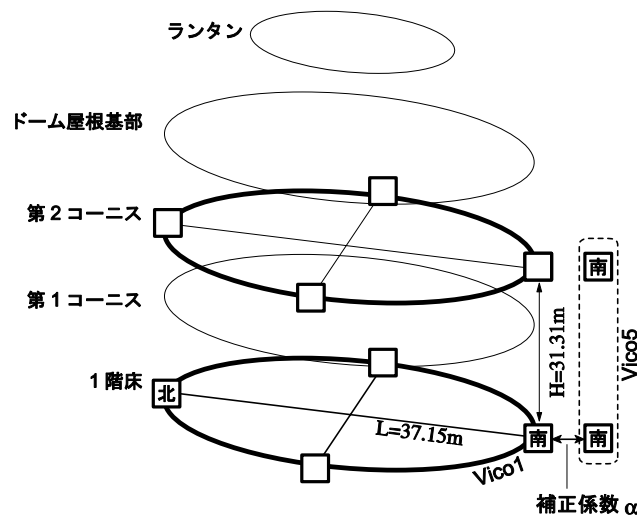


図 2-36 第 2 コーニス長軸方向成分におけるロッキング動成分の計算概念図

以上の定義に従い，計測ケース Vico1 の南北上下動速度成分から計算された第 2 コーニスレベルでの教会堂上部構造長軸方向（南北方向）のロッキング動のピーク平均値 R_{NS} は，

$$R_{NS} = \text{Ave}[(\text{Vico1}(\text{上下動@南}) - \text{Vico1}(\text{上下動@北})) \times \frac{H(=31.31\text{m})}{L(=37.15\text{m})}]_{\text{peak}} = 0.2061 \text{ } \mu\text{m/s}$$

計測ケース Vico1 と計測ケース Vico5 の微動レベル補正係数 α_{UD} は，

$$\alpha_{UD} = \text{Ave}[\text{Vico5}_{1F}(\text{上下動@南})]_{\text{peak}} / \text{Ave}[\text{Vico1}(\text{上下動@南})]_{\text{peak}} = 0.1725 / 0.2021 = 0.8538$$

第 2 コーニスレベル長軸方向（南北方向）のロッキング動成分の寄与率は，

$$(\alpha_{UD} \times R_{NS}) / \text{Ave}[\text{Vico5}_{\text{第2}}(\text{南北水平動@南})]_{\text{peak}} = (0.8535 \times 0.2061) / 0.2904 = 60.6\%$$

と計算される。

続けて，教会堂上部構造の短軸方向（東西方向）の振動におけるロッキング動成分の推定を行う。計測ケース Vico1 における東西の上下動速度成分に 1 階床から第 2 コーニスまでの高さを乗じ，これを東西のピックアップ間距離で除すと，第 2 コーニスレベルでの教会堂上部構造短軸方向（東西方向）のロッキング動によって生じた東西方向の水平動速度成分が計算される。これを，計測ケース Vico2 の第 2 コーニスレベルでの東西方向水平動速度成分と比較することで，教会堂上部構造の東西方向水平動速度成分におけるロッキング動成分の寄与率を求めるが，その際，計測ケース Vico1 と計測ケース Vico2 では測定時間が異なるので，微動レベルの補正係数を乗じて比較を行う。ここで補正係数は，第 2 コーニスレベル南側に設置されたピックアップの上下動速度成分について，計測ケース Vico5 に対する計測ケース Vico2 のピーク平均値の比（補正係数 β_{UD} ）を求め，これに，長軸方向のロッキング成分算出の際に用いた補正係数 α_{UD} （計測ケース Vico1 に対する計測ケース Vico5 のピーク平均値の比）を乗じた値（ $\alpha_{UD} \times \beta_{UD}$ ）とした。即ち，計測ケース Vico5 を介して，計測ケース Vico1 に対する計測ケース Vico2 のピーク平均値の比を求めたことになる（図 2-37）。

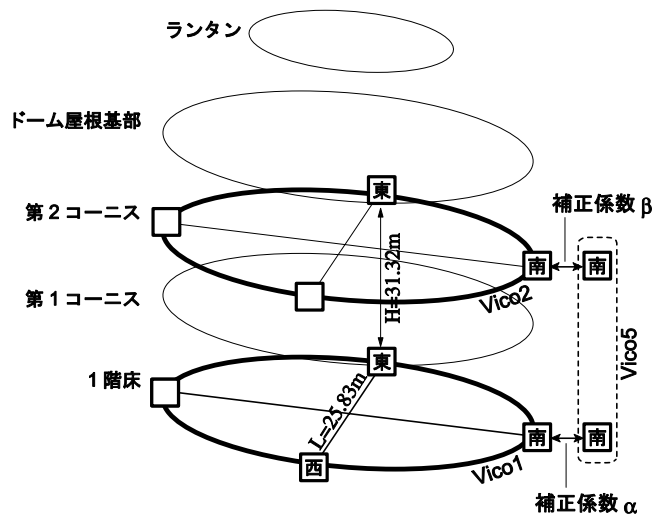


図 2-37 第 2 コーニス短軸方向成分におけるロッキング動成分の計算概念図

以上の定義に従い，計測ケース Vico1 の東西上下動速度成分から計算された第 2 コーニスレベルでの教会堂上部構造短軸方向（東西方向）のロッキング動のピーク平均値 R_{EW} は，

$$R_{EW} = \text{Ave}[(\text{Vico1}(\text{上下動@西}) - \text{Vico1}(\text{上下動@東})) \times \frac{H(=31.32\text{m})}{L(=25.83\text{m})}]_{\text{peak}} = 0.3651 \mu\text{m/s}$$

計測ケース Vico5 と計測ケース Vico2 の微動レベル補正係数 β_{UD} は，

$$\beta_{UD} = \text{Ave}[\text{Vico2}(\text{上下動@南})]_{\text{peak}} / \text{Ave}[\text{Vico5}_{\text{第2}}(\text{上下動@南})]_{\text{peak}} = 0.2232 / 0.2394 = 0.9690$$

第 2 コーニスレベル短軸方向（東西方向）のロッキング動成分の寄与率は，

$$(\alpha_{UD} \times \beta_{UD} \times R_{EW}) / \text{Ave}[\text{Vico2}(\text{東西水平動@東})]_{\text{peak}} = (0.8535 \times 0.9690 \times 0.3651) / 0.4858 = 59.8\%$$

と計算される．

同様の手法で，上部構造の振動性状におけるスウェイ動成分の割合を推定する．長軸方向に付いては，計測ケース Vico5 において，1 階床レベルでの南北水平方向速度成分をスウェイ成分とし，第 2 コーニスレベルでの南北水平方向速度成分に対するピーク平均値の比率を長軸方向に関するスウェイ成分の寄与率とすると，

$$\text{Ave}[\text{Vico5}_{1F}(\text{南北水平動@南})]_{\text{peak}} / \text{Ave}[\text{Vico5}_{\text{第2}}(\text{南北水平動@南})]_{\text{peak}} = 0.3126 / 1.1168 = 27.99\%$$

と計算される．また，短軸方向については，計測ケース Vico1（1 階床レベル）の東側ピックアップ東西方向水平成分をスウェイ成分とし，計測ケース Vico2（第 2 コーニスレベル）の東側ピックアップ東西方向水平成分に対するピーク平均値の比率を短軸方向に関するスウェイ成分の寄与率と考える．その際，計測ケース Vico5 を介した微動レベルの補正係数を用いて比較を行う．計測ケース Vico1 と計測ケース Vico5 の微動レベル補正係数 α_{EW} は，

$$\alpha_{EW} = \text{Ave}[\text{Vico5}_{1F}(\text{東西水平動@南})]_{\text{peak}} / \text{Ave}[\text{Vico1}(\text{東西水平動@南})]_{\text{peak}} = 0.1721 / 0.1893 = 0.9091$$

また，計測ケース Vico5 と計測ケース Vico2 の微動レベル補正係数 β_{EW} は，

$$\beta_{EW} = \text{Ave}[\text{Vico2}(\text{東西水平動@南})]_{\text{peak}} / \text{Ave}[\text{Vico5}_{\text{第2}}(\text{東西水平動@南})]_{\text{peak}} = 0.2848 / 0.3214 = 0.8861$$

以上より，短軸方向に関するスウェイ成分の寄与率は，

$$(\alpha_{EW} \times \beta_{EW} \times \text{Ave}[\text{Vico1}(\text{東西水平動@東})]_{\text{peak}}) / \text{Ave}[\text{Vico2}(\text{東西水平動@東})]_{\text{peak}}$$

$$= (0.9091 \times 0.8861 \times 0.1989) / 0.4811 = 33.32\%$$

と計算される。以上をまとめると、

長軸方向の固有周期 (ロッキング動・スウェイ動含む): $T_{\text{FIX+R+S}} = 0.47[\text{s}]$ (2.11[Hz]) ,

長軸方向のロッキング率 : $R = 60.6 [\%]$,

長軸方向のスウェイ率 : $S = 28.0 [\%]$ とおくと、

$T_{\text{FIX+R+S}}/T_{\text{FIX}} = (100/(100-R-S))^{0.5} = 2.96$ より $T_{\text{FIX}} = 0.16 [\text{s}]$ (6.25[Hz]) と計算される。

短軸方向の固有周期 (ロッキング動・スウェイ動含む): $T_{\text{FIX+R+S}} = 0.51[\text{s}]$ (1.95[Hz]) ,

短軸方向のロッキング率 : $R = 59.8 [\%]$,

短軸方向のスウェイ率 : $S = 33.3 [\%]$ とおくと、

$T_{\text{FIX+R+S}}/T_{\text{FIX}} = (100/(100-R-S))^{0.5} = 3.81$ より $T_{\text{FIX}} = 0.13 [\text{s}]$ (7.69[Hz]) と計算される。

計測ケース Vico6 :

計測ケース Vico6 は、教会堂周辺地盤の振動性状を把握することを目的とした計測である。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。図 2-15 に示した建物西側の地盤 (建物からの距離 12m および 33m) における測定点の H/V スペクトルを図 2-38 に示す。建物からの距離が 12m の場合、33m の場合ともに卓越周波数が概ね同じで、建物からの距離が 12m の場合で 6.63Hz、33m の場合で 6.67Hz であった。ただし、本測定ケースにおいては外乱要因の少ない夜間・無人・無風の測定環境の確保が出来なかったことを付記しておく。

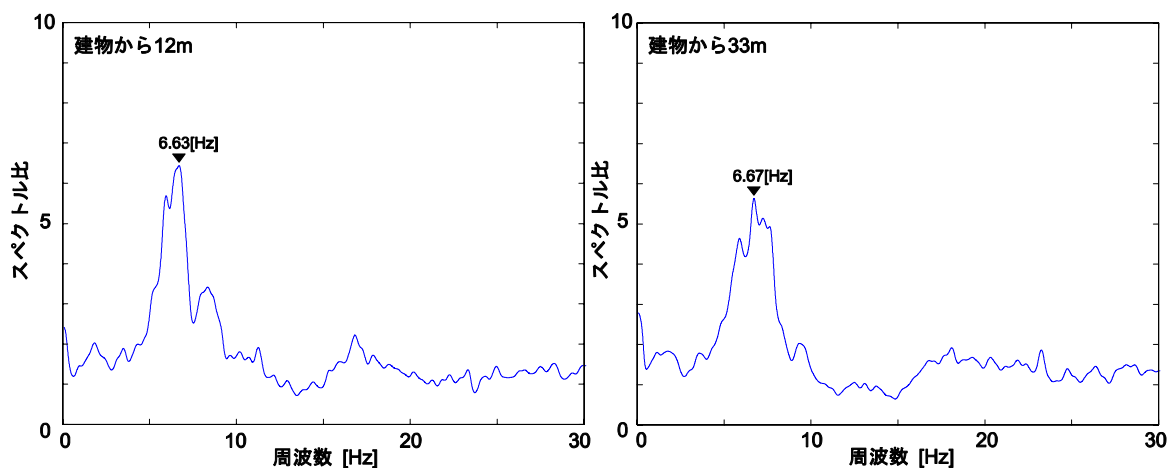


図 2-38 教会堂周辺地盤の H/V スペクトル

3. アウグスタ飛行船格納庫

3.1 建物概要

アウグスタの飛行船格納庫（1917年建設開始、1987年国宝指定）は、ヨーロッパで（恐らく世界中で）現存する鉄筋コンクリートで作られた唯一の例であるが、日本ではあまり知られていない。現在の飛行船格納庫は、鉄製の大扉の重量による不同沈下などの影響で、屋根スラブと壁面に大きな亀裂が生じ、その構造的安定性が危惧されている。1989年には大扉の倒れ防止のためのワイヤとアンカーが設置され、1994年には右側バットレスが補修され、1996年から土質調査が開始されている。飛行船格納庫の構造は、15の鉄筋コンクリートフレームと水平方向のつなぎ材である梁の上にレンガを詰めたものから成っており、外形長さ105.50m、幅45.20m、高さ37.00mで、内法は長さ100.00m、幅26.00m、高さ31.00mである。図3-1に飛行船格納庫の外観（南側）を、図3-2に飛行船格納庫のワイヤアンカー設置側（北側）からの内観を、図3-3～3-4に代表部位の平面図、断面図をそれぞれ示す。



図 3-1 飛行船格納庫概観（南面より）



図 3-2 飛行船格納庫内観（北面より）

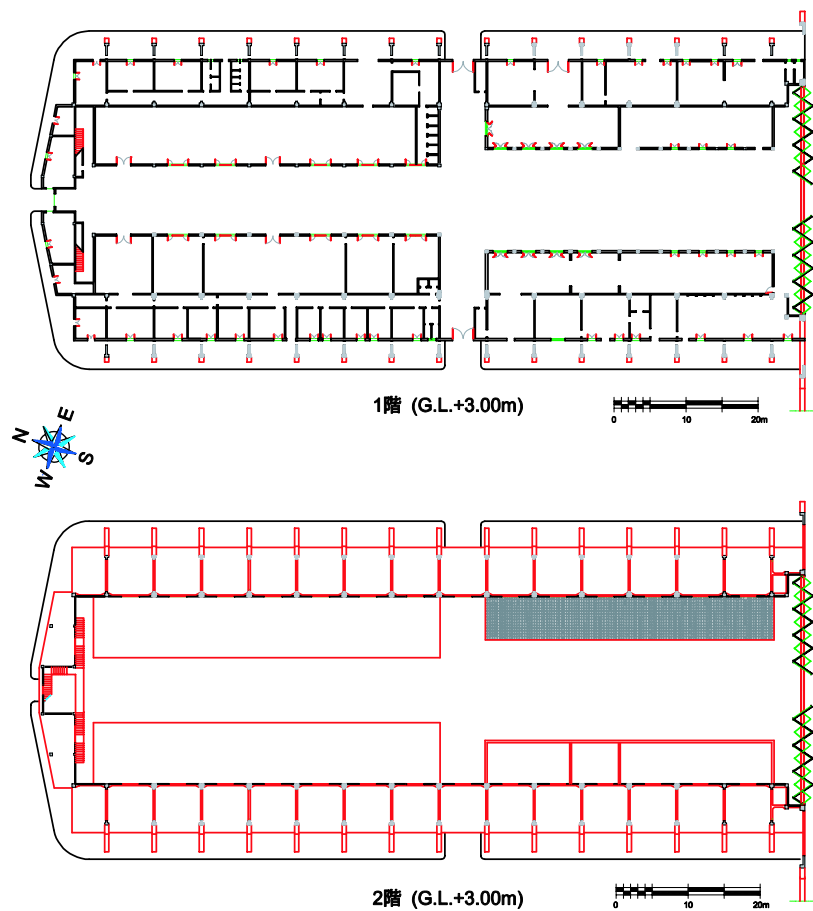


図 3-3 飛行船格納庫平面図

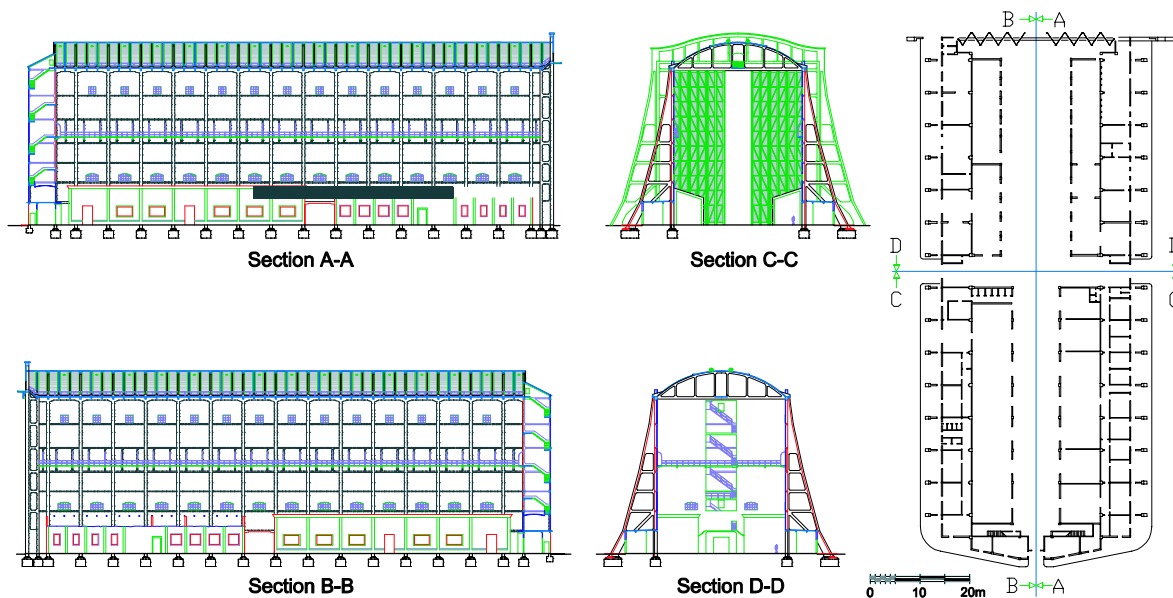


図 3-4 飛行船格納庫断面図

3.2 劣化および損傷に関する概要調査

飛行船格納庫の南側は鉄製大扉の重量による不同沈下などにより、屋根スラブと壁面に大きな亀裂が生じ、南側 3 スパン目から構造体が南北に分離するようなひび割れの進展を示す損傷状態にある。一方、飛行船格納庫の北側外観は、南側に比べて極めて甚大な損傷があるようには見えないが、内部に立ち入ると、放置されていた期間に受けた火災などの要因で強い材料劣化が生じており、壁、天井、階段などに大きな損傷を確認することが出来る。

図 3-5～3-8 は、1 階北側の壁に見られた崩落箇所の写真である。この壁は、壁厚がかぶりコンクリート込でおよそ 70～80mm、かぶりコンクリートの厚さは壁の両面とも約 15mm である。壁の配筋は約 400mm 間隔で、 $\phi 6$ の丸鋼を用いており 180° フックを用いて継いでいる。



図 3-5 壁の崩落箇所



図 3-6 崩落した壁の断面



図 3-7 崩落箇所の壁の配筋間隔



図 3-8 壁の配筋継ぎ手

図 3-9 は、1 階北側の小部屋天井および梁に観察されたかぶりコンクリートの剥落の様子である。図 3-5～3-9 で示した飛行船格納庫北側に見られる剥落などの損傷は、不同沈下に伴う南側の損傷とは別に、これまで放置されていた期間に発生した火災の経験などによる材料の劣化によるところが大きいと考えられるが、アウグスタ周辺はエトナ火山の活動に伴う地震

が観測される地域でもあり，耐久劣化のほか地震による損傷も念頭に置く必要があると考えられる．



図 3-9 天井および梁のかぶりコンクリート剥落の様子

3.3 常時微動測定

(1) 測定位置と測定方法

今回の調査では，十分な調査時間および安全な作業環境確保が困難であるなどの諸事情により予備的な計測にとどめることにした．そこで，今回の調査で安全に計測作業を行うことが出来る飛行船格納庫の周辺地盤にピックアップを設置し，常時微動測定を行った．

測定位置は，図 3-10 に示したように周辺地盤 2 箇所である．測定方法は，前述した教会堂調査と同様で，測定機器に収録器（物探サービス株式会社製 GEODAS-10-24DS）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 100Hz で収録時間を 300 秒間とした．

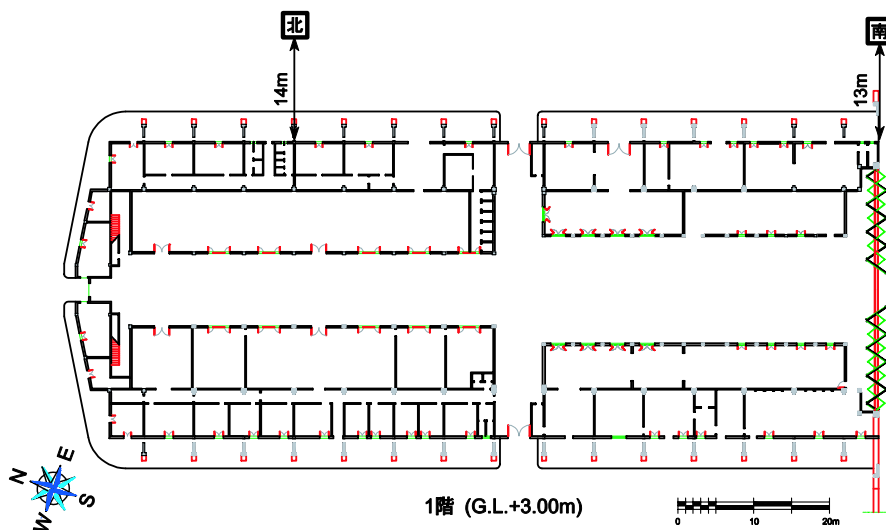


図 3-10 常時微動測定点の配置図

(2) 測定結果

飛行船格納庫周辺地盤の振動性状を把握することを目的として、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。図 3-10 に示した建物北東側および南東側の地盤における測定点の H/V スペクトルを図 3-11 に示す。建物北東側の H/V スペクトルは 0Hz にピークがあるが工学的に卓越周波数ではないと判断し、次に高いピークを示した 0.55Hz を卓越周波数とした。建物南東側の H/V スペクトルの卓越周波数は 0.48Hz であった。ただし本測定結果は、無風状態の測定環境を確保出来なかったこと（強風の下での計測であったこと）、調査日程の都合から昼間の測定しか実施できなかったことから、地盤の固有周期を判断するのに十分な観測条件ではなかったと考えられるため、あくまで予備的な調査結果と位置づけ、今後の詳細な微動計測とあわせて地盤の固有周期について検討を行う必要がある。

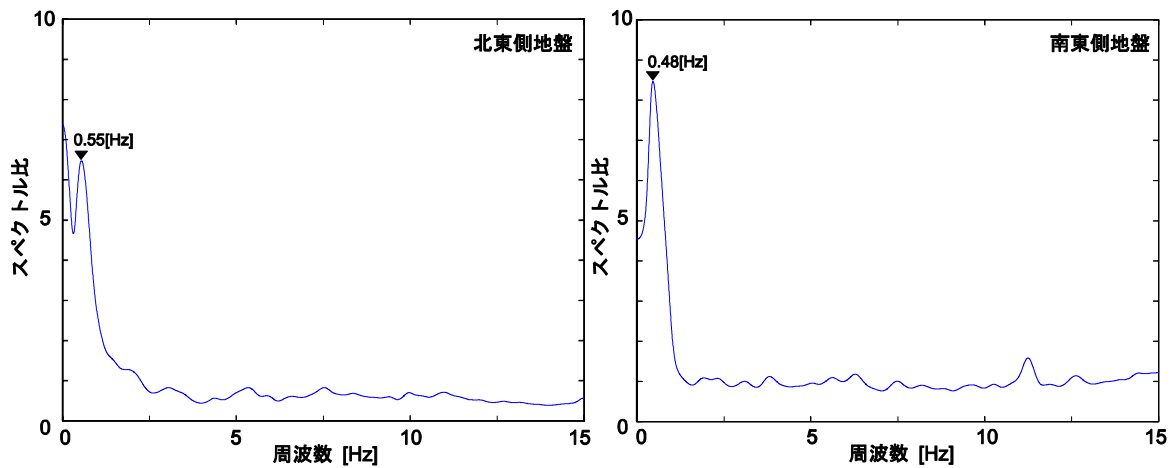


図 3-11 飛行船格納庫周辺地盤の H/V スペクトル

4. まとめ

ヴィコフォルテ教会堂の常時微動測定の結果から，以下の知見を得た．

- (1) 教会堂 1 階床面では，上下方向の振動において北東側と南西側が逆位相になる頻度が高く，ロッキング動が発生していると考えられる．一方，水平方向の振動においては概ね同じ位相で振動していた．
- (2) 教会堂上部構造（ドーム + ドラム）の水平方向の振動性状として，第 2 コーニスレベルに着目したところ，楕円形の平面が“北東 南西”方向に伸び縮みするような挙動を示していた．
- (3) 地下 1 階と 1 階床レベルのスペクトル比から，南北方向には基礎部分が地盤とほぼ一体となって，東西方向にはやや基礎部分で増幅しながらも基礎部分と地盤が概ね一体となって振動していると考えられる．
- (4) 教会堂のドーム + ドラム外周をとりまく比較的低層な構造物の卓越周波数は，南北方向に 4.69Hz (0.21s)，東西方向に 4.47Hz (0.22s) と測定された．
- (5) 教会堂上部構造物の固有周期をロッキング成分，スウェイ成分を分離して求めた．長軸方向の固有周期（ロッキング動・スウェイ動含む）： $T_{\text{FIX}+\text{R}+\text{S}} = 0.47\text{s}$ (2.11Hz)，長軸方向のロッキング率： $R = 60.6\%$ ，長軸方向のスウェイ率： $S = 28.0\%$ ， $T_{\text{FIX}+\text{R}+\text{S}}/T_{\text{FIX}} = (100/(100-R-S))^{0.5} = 2.96$ より長軸方向の固有周期は $T_{\text{FIX}} = 0.16\text{s}$ (6.25Hz) と計算された．また，短軸方向の固有周期（ロッキング動・スウェイ動含む）： $T_{\text{FIX}+\text{R}+\text{S}} = 0.51\text{s}$ (1.95Hz)，短軸方向のロッキング率： $R = 59.8\%$ ，短軸方向のスウェイ率： $S = 33.3\%$ ， $T_{\text{FIX}+\text{R}+\text{S}}/T_{\text{FIX}} = (100/(100-R-S))^{0.5} = 3.81$ より，短軸方向の固有周期は $T_{\text{FIX}} = 0.13\text{s}$ (7.69Hz) と計算された．
- (6) 教会堂周辺地盤の H/V スペクトルより，周辺地盤の卓越周波数は 6.6Hz 程度と推測されたが，本測定ケースについては夜間・無人・無風といった外乱要因の少ない測定環境で再計測することが望ましいと考えられる．

アウグスタの飛行船格納庫の常時微動測定の結果から，以下の知見を得た．

- (1) 飛行船格納庫周辺地盤の H/V スペクトルより，周辺地盤の卓越周波数は，飛行船格納庫北側で 0.55Hz，南側で 0.48Hz と測定されたが，本測定ケースについては夜間・無人・無風といった外乱要因の少ない測定環境で再計測することが望ましいと考えられる．

参考文献

[1] 青木孝義：ヴィコフォルテ教会堂を中心とする歴史的建築物の劣化現況調査と保存修復方法の提案，平成 14 年度～15 年度科学研究費補助金・基盤研究（B）（2）研究成果報告書（課題番号：14404009），平成 16 年 3 月

[2] M. Garro：Santuario - Basilica Regina Montis Regalis, Vicoforte -Mondovì, Opere di consolidamento e restauro, Relazione riassuntiva, Vicoforte di Mondovì, 1962