

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（速報補遺）

目次

1. はじめに（速報概要と課題）
2. ヴィコフォルテ教会堂の振動モード推定
3. 地盤の常時微動測定計画
4. アウグスタ飛行船格納庫の常時微動測定計画

1. はじめに

2006 年 12 月 20 日の中間報告会において報告した（速報）の概要は以下のとおりである。

ヴィコフォルテ教会堂での常時微動測定結果から、

- (1) 教会堂 1 階床面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位相で振動していた。
- (2) 教会堂上部構造の平面（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振動性状を示すものと推察される。

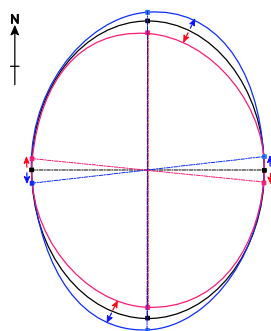


図 2-30 第 2 コーニス部分の水平方向振動性状概念図（速報より）

- (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地盤と概ね一体となって振動していると考えられる。

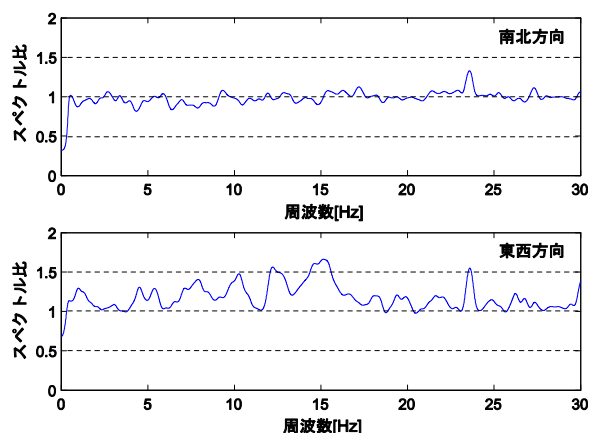


図 2-31 地下 1 階レベルに対する 1 階床レベルの水平方向常時微動記録のスペクトル比（速報より）

- (4) 教会堂のドーム+ドラム外周をとりまく比較的low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。固有周期（ロッキング動・スウェイ動含む）を $T_{\text{FIX}+\text{R}+\text{S}}$ ，ロッキング率を R ，スウェ

イ率を S ，固有周期（基礎固定時）を T_{FIX} と表すと，補表 1-1 のようになる。

補表 1-1 教会堂上部構造固有周期

	R	S	$T_{FIX+R+S}$	T_{FIX}
長軸方向	60.6%	28.0%	0.47s (2.11Hz)	0.16s (6.25Hz)
短軸方向	59.8%	33.3%	0.51s (1.95Hz)	0.13s (7.69Hz)

ここで， T_{FIX} は $T_{FIX+R+S}/T_{FIX}=(100/(100-R-S))^{0.5}$ より求めた。

(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，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。

アウグスタ飛行船格納庫での常時微動測定結果から，

(7)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，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。

また，中間報告会において提示された課題は以下のとおりである。

- (1)ヴィコフォルテ教会堂の振動モードについて言及する。
- (2)地盤の微動測定方法改善策について検討する。
- (3)アウグスタ飛行船格納庫の常時微動測定計画を作る。
- (4)ヴィコフォルテ教会堂の 1984 年における補修方法（エポキシ樹脂ではなく発泡ウレタンなのは？）と具体的な補修位置を確認する。
- (5)アウグスタの飛行船格納庫の 1989 年における大扉倒れ防止のためのワイヤーとアンカー設置と関連して，鉄パイプによる大扉自体の補強時期を確認する。

本速報補遺では，上記課題の(1)～(3)について報告を行う。

2. ヴィコフォルテ教会堂の振動モード推定

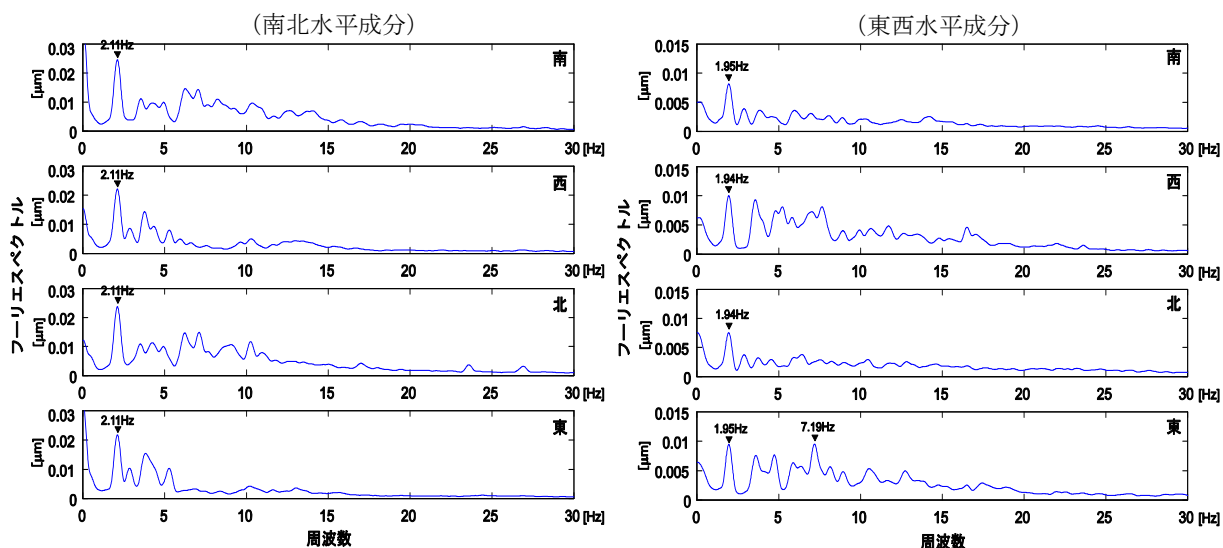
(1) 対象とした計測ケースの概要

速報で示したヴィコフォルテ教会堂の微動計測ケースのうち，計測ケース Vico2 および計測ケース Vico5 を用いた振動モードの推定を行う．計測ケース Vico2 は教会堂上部構造の水平面内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り，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．

補表 2-1 振動モード推定に用いた計測ケース

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
Vico2	第 2 コーニス (東西南北×3 成分)	建物の水平成分振動性状の把握
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

計測ケース Vico2 では，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，南北水平成分については 2.11Hz を，東西水平成分については 1.94Hz～1.95Hz を卓越周波数とするフーリエ振幅スペクトルを得た（補図 2-1）．



補図 2-1 第 2 コーニスレベル各測定位置の常時微動記録のフーリエスペクトル

計測ケース Vico5 では，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じた記録について，1 階床南側測定点に対する，第 1 コーニス南側測定点，第 2 コーニス

南側測定点，ドーム屋根基部南側測定点およびランタン南側測定点におけるフーリエスペクトル比を求めたところ，図 2-35（速報）に示すように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 と推定された．ここで，計測ケース Vico5 の南北方向は構造体（構造壁）の面外方向を意味し，東西方向は構造体（構造壁）の面内方向を意味している．

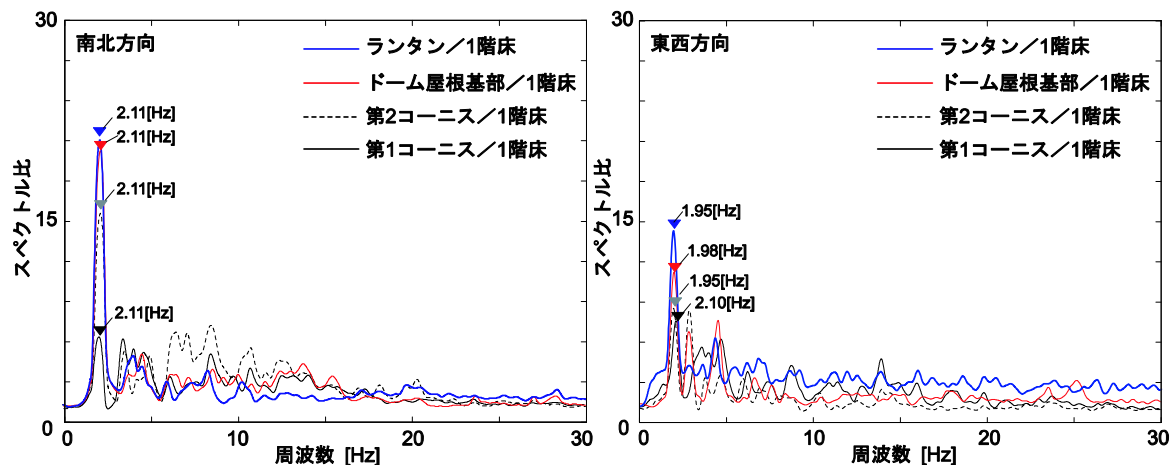


図 2-35（速報） 1 階床レベルに対する上部計測点の水平方向常時微動記録のスペクトル比

(2) 振動モード推定方法

振動モードの推定には，(1)で示した振幅に関する情報に加えて，位相差（位相遅れ）の情報が必要である．その際，対象とする位相が何に対して遅れているのかを測る基準点が必要となるが（一般的には入力波形に対しての位相の遅れを考えるが），例えば計測ケース Vico2 の場合，どの測定点も対等な関係であり基準点を一意に定めるのが難しい．また各測定ケースについて，いずれかの測定点を基準点と仮定して位相差スペクトルを求めたが，位相差スペクトルに明瞭な傾向が見られなかったため，本速報補遺では以下の仮定に基づき振動モードを推定した．

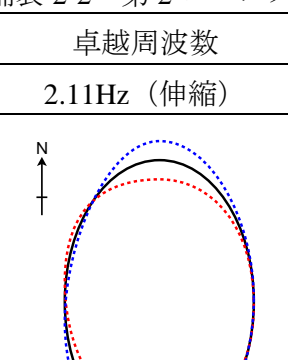
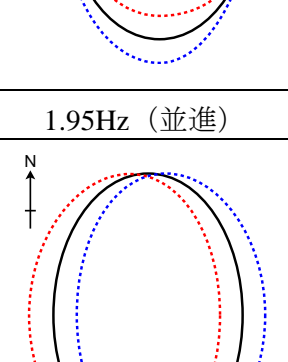
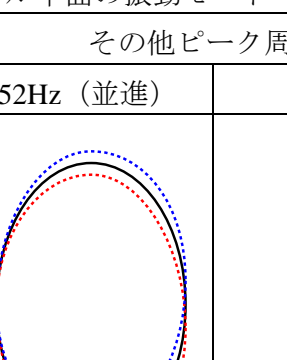
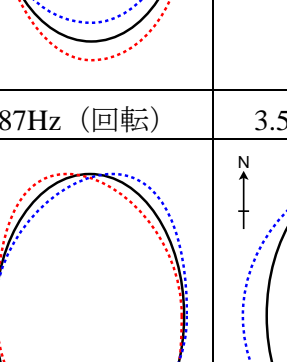
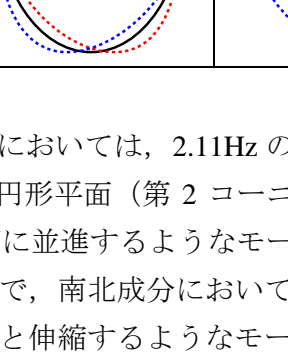
まず，フーリエ振幅スペクトルでピークを示す周波数における振幅スペクトル値（または振幅スペクトル比）が最大となる測定点を基準点とし，同じ周波数におけるその他の測定点と基準点との位相差をフーリエ位相スペクトル値の差 $\Delta\theta$ ($-\pi < \theta < \pi$) として求めた．このとき，振幅スペクトル値に位相スペクトル値の差の余弦 $\cos \Delta\theta$ （同位相であれば $\Delta\theta=0$ より $\cos \Delta\theta=1$ ，逆位相であれば $\Delta\theta=-\pi$ または π より $\cos \Delta\theta=-1$ ）を乗じたものがモード形状を模擬するものと仮定して振動モードを推定した．ただし，位相差スペクトルに明瞭な傾向が見られないということは，ピーク周波数の読み取り方によって位相差が大きく異なる可能性を示唆していることから，各測定点の振幅スペクトルピーク値が大きく明瞭な卓越周波数における振動モード以外の振動モードは，推定出来なかった，あるいは，参考までに算出した結果である点を付記しておく．

(3) 計測ケース Vico2 の振動モード

速報の結論において、定常的な波形を示した時間区間の微動波形の目視により、教会堂上部構造の楕円形の平面（第 2 コーニスレベル）が“北東 - 南西”方向に伸び縮みする振動性状を推察しているが、(2)の方法による振動モード推定からこれを再確認する。

補図 2-1 では、各観測点（東西南北）に共通した卓越周波数は 1 つ程度で、各観測点で共通した高次モードを明瞭に判読できるようなスペクトルになっていない。そのため、目視による振動モード推定は、各観測点で共通した卓越周波数のモードのみが読み取れたものと考えられる。補表 2-2 に(2)の方法で推定した振動モードを示す。

補表 2-2 第 2 コーニスレベル平面の振動モード

	卓越周波数	その他ピーク周波数	
南北成分	2.11Hz (伸縮)	3.52Hz (並進)	
			
東西成分	1.95Hz (並進)	2.87Hz (回転)	3.53Hz (伸縮)
			

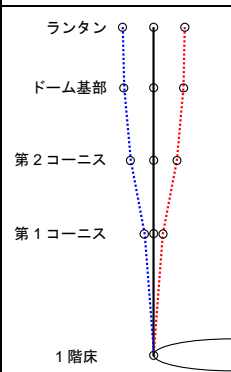
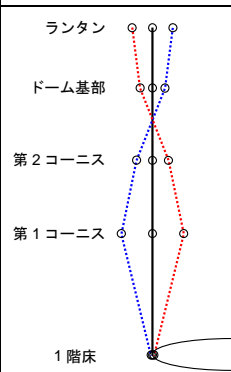
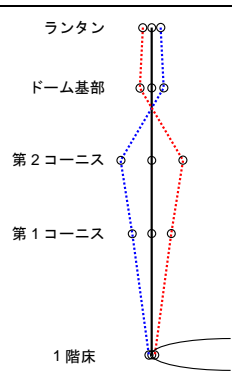
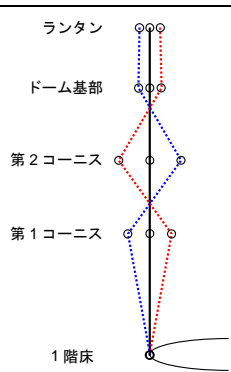
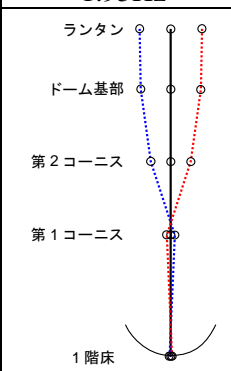
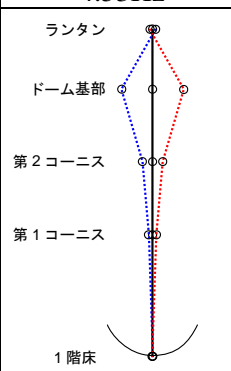
楕円形平面（第 2 コーニスレベル）の南北成分においては、2.11Hz の卓越周波数において南北に伸縮するようなモードを示した。一方、楕円形平面（第 2 コーニスレベル）の東西成分においては、1.95Hz の卓越周波数において東西に並進するようなモードを示した。また、明瞭な卓越周波数ではないその他のピーク周波数で、南北成分においては並進するようなモード、東西成分においては回転するようなモードと伸縮するようなモードが推定された。速報において“北東 - 南西”方向に伸び縮みする振動性状を目視により推察しているが、これは主に南北成分の伸縮するモードにおいて、長軸方向のみが伸縮しているのではなく、（補表 2-2 中の図では僅かなので分かりにくい）伸びるときは北東側と南西側が膨らみ、縮む

ときは北西と南東側が膨らむ（あまり縮まない）傾向を読み取った結果であるといえる。これに、東西成分の並進が組み合わさったモードが楕円形平面（第 2 コーニスレベル）の主な振動モードであると考えられる。

(4) 計測ケース Vico5 の振動モード

計測ケース Vico5 においては、南北成分（面外方向）は 1 階床レベルからランタンまで同時多点計測を行ったが、東西成分（面内方向）は 1 階床レベルから第 2 コーニスまでとドーム基部かランタンのどちらかを加えた多点計測であったため、1 階床レベルからランタンまでの東西成分（面内方向）の位相差を一斉に求めることができない。そこで東西成分（面内方向）については、ランタンを除く振動モードとドーム基部を除く振動モードをそれぞれ求めておき、1 階床レベルのフーリエ振幅スペクトル値で基準化した両モードベクトルの平均（ランタンおよびドーム基部で互いに欠落した情報がある部分は平均がとれないのでそのままの値を入れた）を振動モードと仮定した。補表 2-3 に推定した振動モードを示す。

補表 2-3 教会堂南側高さ方向の振動モード

	卓越周波数	その他ピーク周波数		
南北成分 (面外方向)	2.11Hz	4.08Hz	8.61Hz	10.75Hz
				
東西成分 (面内方向)	1.95Hz	4.53Hz		
				

南北成分（面外方向）においては、2.11Hz の卓越周波数で 1 次モードと推定されるモードが現れた。また明瞭な卓越周波数ではないその他のピーク周波数では、高次モードと思われる

るモード形状が推定された。一方，東西成分（面内方向）では，ランタンあるいはドーム基部が大きく振幅するときに，第 1 コーニス部分の位相が 90° 程度ずれることで，あたかも第 1 コーニスより上部のみが振動しているようなモードが現れた。ここで，速報のまとめに記載した結論より，特に 4.5Hz 付近の振動は教会堂周辺に取り付く低層構造物の卓越周波数帯域であったことを踏まえると，東西成分（面内方向）の振動は，1 階床からの入力のみならず，第 1 コーニス部分から上部への入力によって振動が励起されている可能性が考えられる。

3. 地盤の常時微動測定計画

(1) ヴィコフォルテ教会堂周辺地盤について

ヴィコフォルテ教会堂周辺地盤（北西側）の H/V スペクトルのピーク周波数は 6.6Hz (0.15 s) 程度と推定され、国土交通省告示 1793 号の分類（地盤周期 $T_g \leq 0.2s$: 第 1 種, $0.2s < T_g \leq 0.75s$: 第 2 種, $0.75s < T_g$: 第 3 種）に従えば「第 1 種地盤」ということになる。ただし、測定時の風雨のため定常的な波形を観測できた時間は殆どなく、測定結果にやや疑問が残るものであった。また、2002 年の調査では、ヴィコフォルテ教会堂周辺地盤北側で 8~9Hz 程度、北東側で 3~4Hz 程度に H/V スペクトルのピーク周波数が見られるが、今回の調査で同じ測定点の再計測をしていないため、測定結果の信頼性を検証することが出来ていない。

次回の測定計画として、既に速報で言及した「外乱要因の少ない測定環境で再計測すること」以外の方策を以下に記す。

- ①地盤の測定においては地表用受振器（ピックアップ）を地表面に十分安定した状態で設置する必要があるため、安定用ベース（セメントを流すわけにはいかないため、紙粘土のようなもの、あるいは、鉛板のような重量物？）の上で計測する。
- ②ピックアップに風除けを設置すると風除けが受けた風圧力が地面に流れ、測定波形に影響を与えてしまう。また、草地にピックアップを設置する場合、風でなびいた草が測定波形に影響を与えることもあり、ピックアップ以外に風でモーメントがかかる背の高いものが周りに無い状態で観測するのが望ましい（①のベース上に何も無い状態）。
- ③2002 年の調査および今回の調査と同じ測定点での再計測によって、常時微動計測システムの検証を行うことが望ましい。

(2) アウグスタ飛行船格納庫周辺地盤について

アウグスタ飛行船格納庫周辺地盤の H/V スペクトルのピーク周波数は、飛行船格納庫北側で 0.55Hz (1.82s) , 南側で 0.48Hz (2.08s) と測定されたが、地盤の周期としてはかなり長周期になっている。アウグスタ飛行船格納庫は海岸から 500m あまりの距離にあり（補図 3-1）, 海の波によって長周期側が励起されている可能性がある。海の波は、表面張力波（周期 0.1s 以下）, 短周期重力波（周期 0.1s~1s）, 重力波（周期 1s~30s）, 長周期重力波（周期 30s~数 10 分）, 長周期波（周期 5 分~12 時間）, 潮汐波（周期 12 時間以上）に分類される^[1]。アウグスタ飛行船格納庫周辺地盤における常時微動観測においては、重力波によるエネルギー伝播が幾らか影響している可能性が考えられる。余談であるが、波のエネルギーは波高の 2 乗および周期に比例し、波力発電の主要なエネルギー源としては重力波が用いられている。次回の測定計画として、(1)までに示した以外の方策を以下に記す。

- ④ハイパス・フィルタを通して、重力波の影響を取り除いた場合の常時微動測定結果により地盤の固有周波数を再検討する。

- ⑤飛行船格納庫周辺の波浪観測に関する統計データが入手できれば，波の有義周期 $T_{1/3}$ と観測された地盤の卓越周波数とが近い帯域にあるかを確認する．

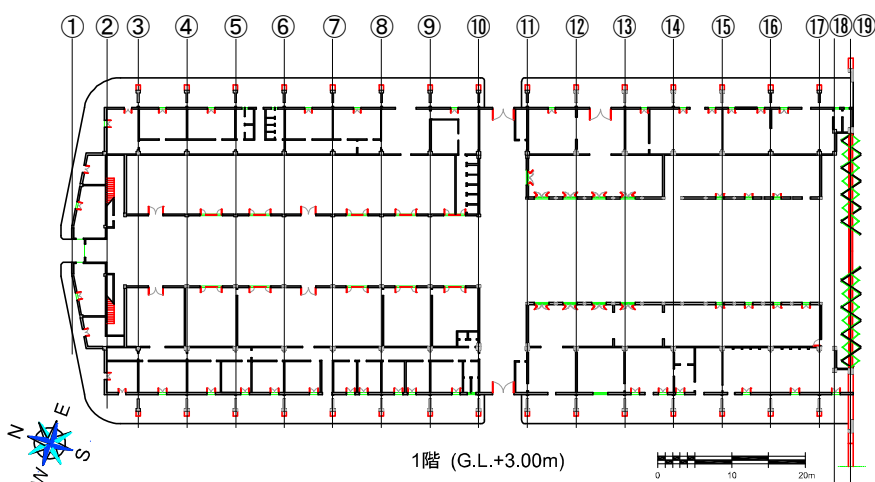


補図 3-1 アウグスタ飛行船格納庫の衛星写真（Google Earth より）

[1] 土木学会・エネルギー土木委員会新エネルギー技術小委員会：波エネルギー利用技術の現状と将来展望，1990年

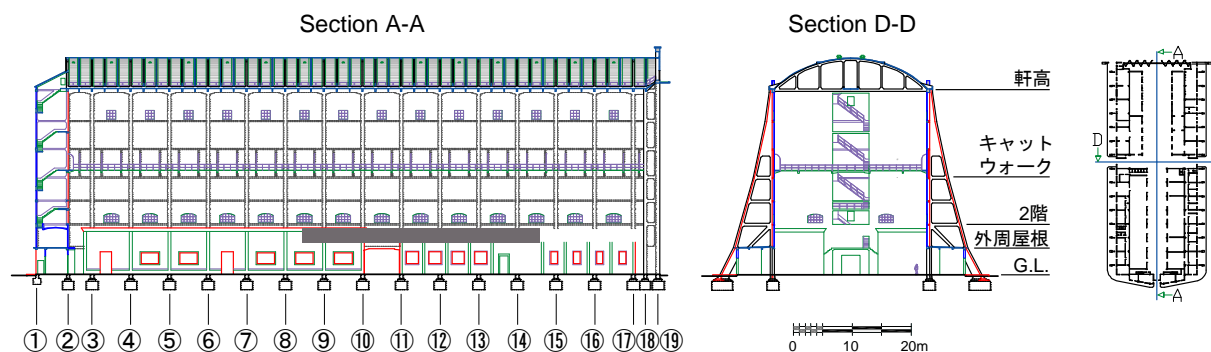
4. アウグスタ飛行船格納庫の常時微動測定計画

アウグスタ飛行船格納庫は、南北方向（桁行方向）に、階段室を有する 2 構面、格納庫を本体をなす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 15 構面（14 スパン）、鉄製大扉がとりつく南側フレーム 2 構面から構成され、東西方向に飛行船が格納される大きな 1 スパン（内部は桁行方向に間仕切壁が設置されている）を有する外形長さ 105.50m、幅 45.20m、高さ 37.00m、内法長さ 100.00m、幅 26.00m、高さ 31.00m の構造物である（補図 4-1）。



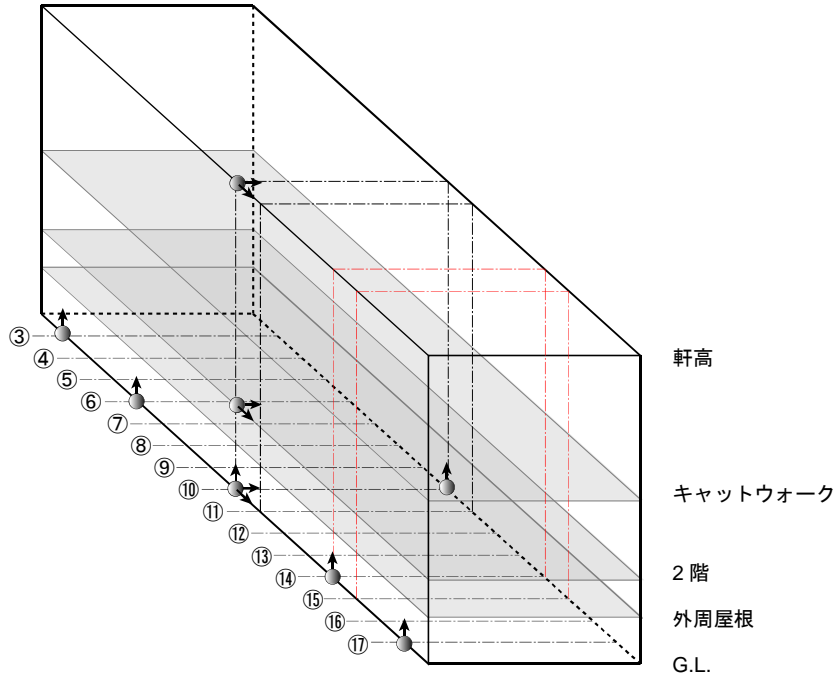
補図 4-1 アウグスタ飛行船格納庫平面図

平面計画においては、補図 4-1 の⑩構面と⑪構面の間に入口が設けられており北側と南側とで桁行方向に設置されている内部間仕切壁の配置が異なっている。また、補図 4-1 の⑭構面と⑮構面の間に大きな亀裂があり、⑭構面より南側では鉄製大扉の重量による不同沈下に伴って亀裂・ひび割れ等の損傷がかなり進行している。立面計画においては、補図 4-2 に示すように外周屋根、2階、キャットウォーク、軒高レベルで振動性状の変化が予想される。

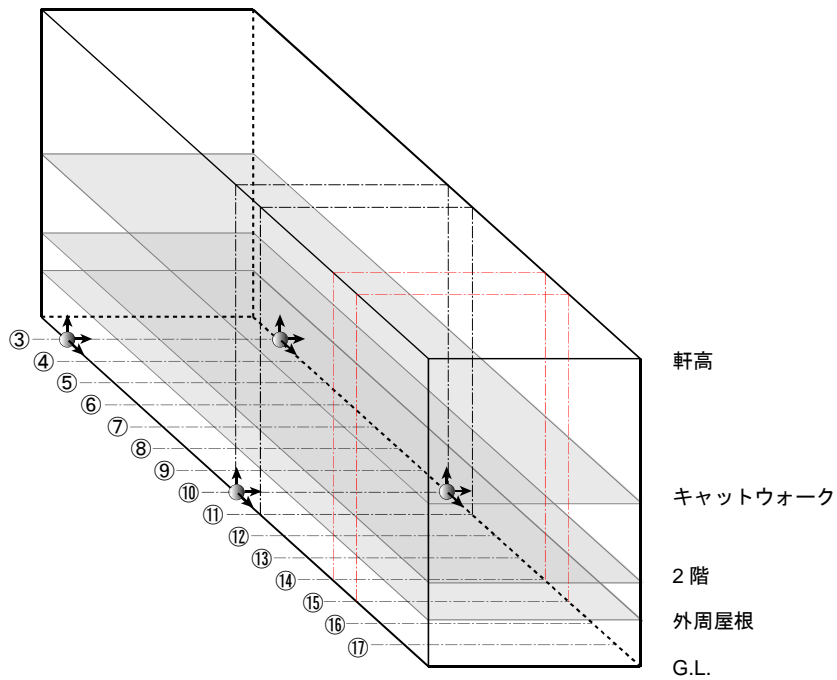


補図 4-2 アウグスタ飛行船格納庫断面図

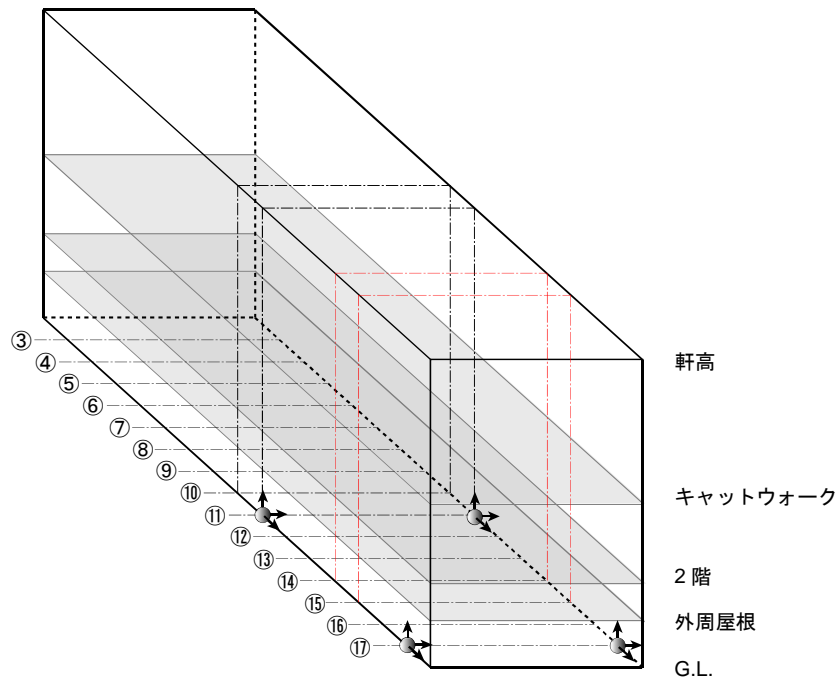
そこで、アウグスタ飛行船格納庫の常時微動測定箇所計画（12ch を最大とする）を、補図 4-3～補図 4-10 に示す。



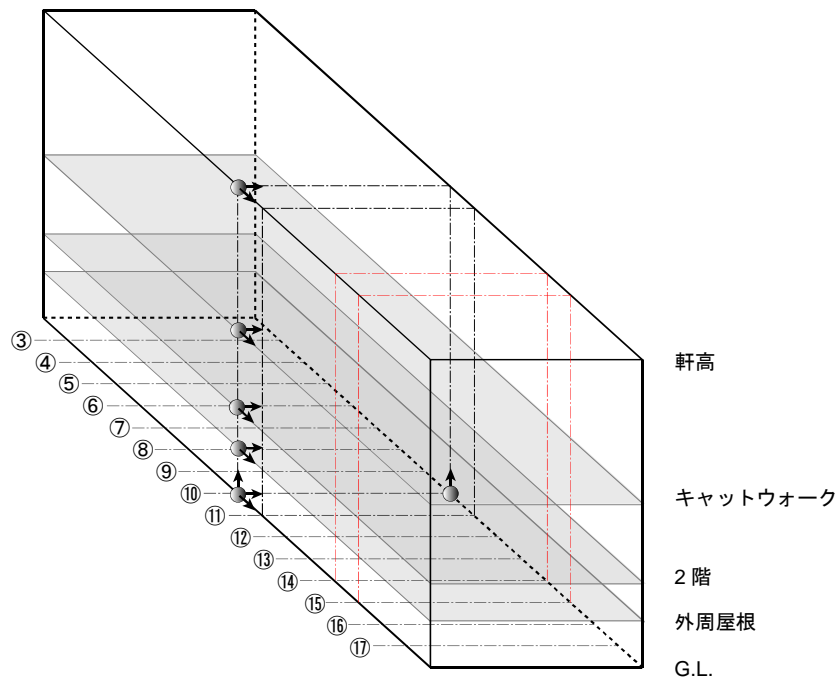
補図 4-3 アウグスタ飛行船格納庫微動計設置箇所案（ロッキング／スウェイ動確認）



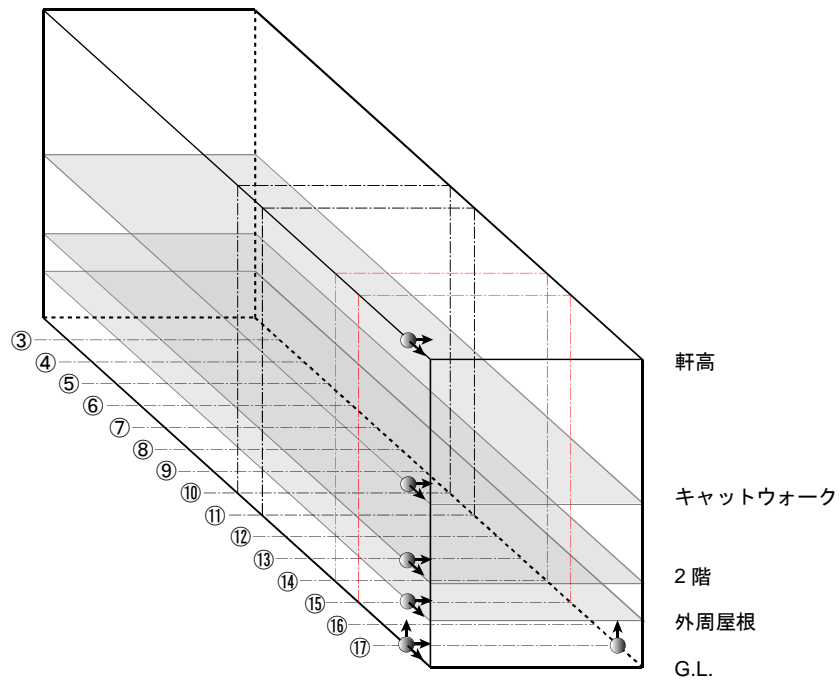
補図 4-4 アウグスタ飛行船格納庫微動計設置箇所案（入力動確認・北側床面）



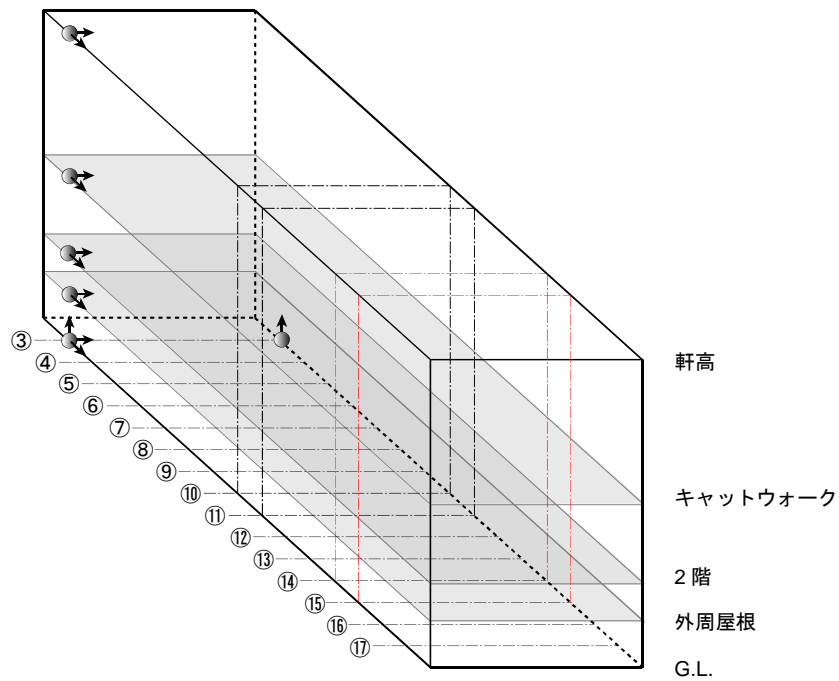
補図 4-5 アウグスタ飛行船格納庫微動計設置箇所案（入力動確認・南側床面）



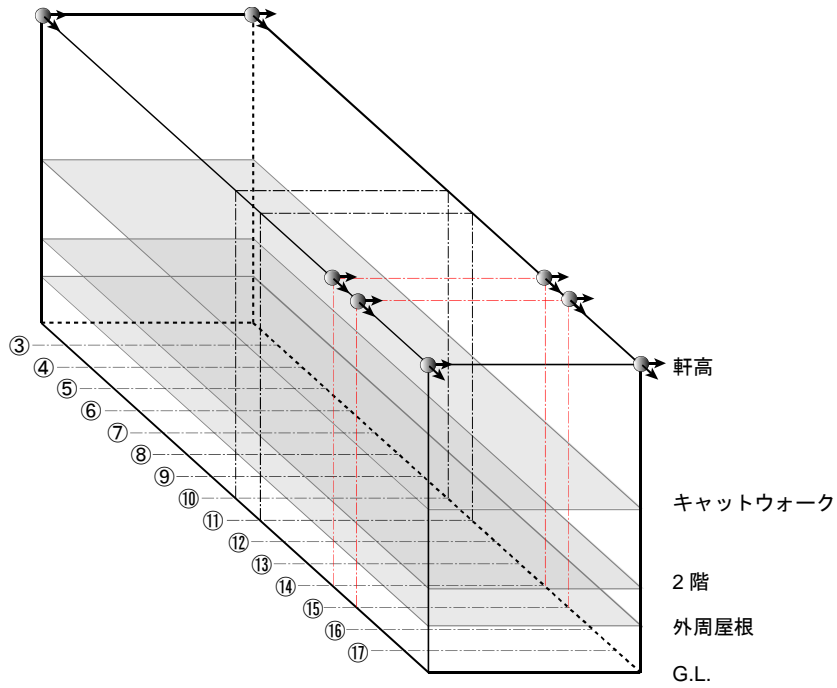
補図 4-6 アウグスタ飛行船格納庫微動計設置箇所案（中央部高さ方向振動性状）



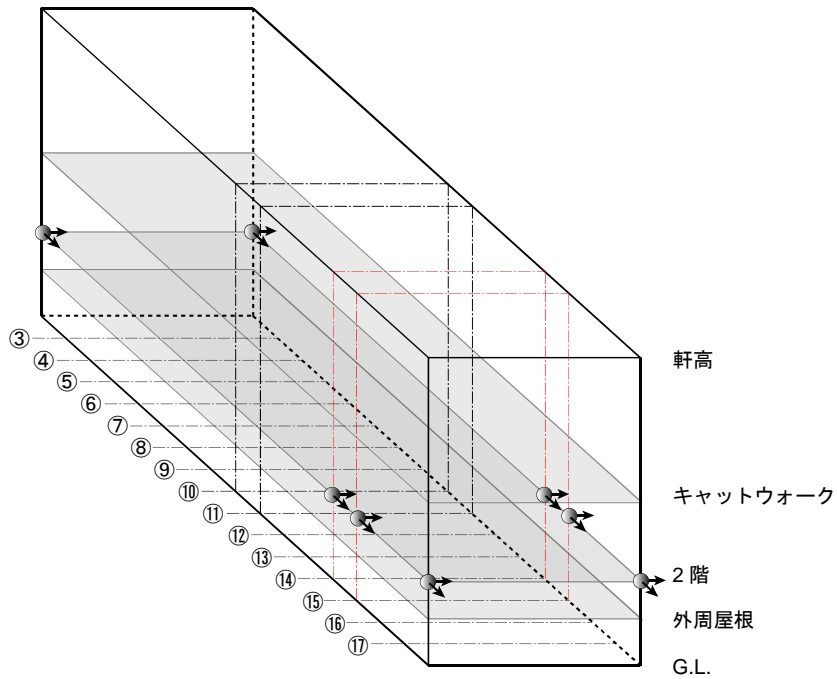
補図 4-7 アウグスタ飛行船格納庫微動計設置箇所案（南側高さ方向振動性状）



補図 4-8 アウグスタ飛行船格納庫微動計設置箇所案（北側高さ方向振動性状）



補図 4-9 アウグスタ飛行船格納庫微動計設置箇所案（軒高レベル平面振動性状）



補図 4-10 アウグスタ飛行船格納庫微動計設置箇所案（2階レベル平面振動性状）