

# 早稲田大学大隈記念講堂 保存再生工事における音響調査と管理



土屋 裕造 \*1

山口 直樹 \*2  
高橋 顕吾 \*3

## 概 要

早稲田大学大隈記念講堂は建築音響の分野でも重要な位置を占め、国内で初めて「科学的な音響設計」が導入され、その後のホール建築に多大な影響を与えた建物である。このため、保存再生工事では大講堂の音響保存に重点を置くとともに、音響上の弱点を克服するための検討を行う必要があった。

ここでは、大講堂創建時の音響計画の調査結果と今回の保存再生工事の音響改修計画を紹介するとともに、ヤマハ(株)と協力して行われた当該歴史建造物改修の音響管理、および改修前後の音響測定結果について報告する。

## Acoustic investigation and management in the project of the preservation and renovation for the Okuma Auditorium in the Waseda University

Yuzo TSUCHIYA\*1  
Naoki YAMAGUCHI\*2  
Kengo TAKAHASHI\*3

The Okuma auditorium in the Waseda University occupies the important position in the field of construction acoustics. It is the building, which began in our country, introduced "the scientific acoustic design", and had great influence on subsequent hall construction. For this reason, in preservation reproduction construction, it was required to save the acoustics of the Okuma auditorium and to conquer the weak point on acoustics.

This report is about introduction of the results of an investigation of the acoustic plan at the time of the Okuma auditorium foundation and the acoustic repair plan of this preservation and renovation, and the acoustic management in the historical repair construction, and the acoustic measurement results before and behind the repair performed with YAMAHA.

\*1 戸田建設(株) 技術研究所 \*2 戸田建設(株) 名古屋支店建築部工事課 \*3 ヤマハ(株) サウンドテクノロジー開発センター  
\*1 Technical Research Institute, Toda Corp. \*2 Nagoya Branch, Toda Corp. \*3 YAMAHA Center for Advanced Sound Technologies

# 早稲田大学大隈記念講堂

## 保存再生工事における音響調査・管理

土屋 裕造<sup>\*1</sup>  
山口 直樹<sup>\*2</sup>  
高橋 顕吾<sup>\*3</sup>

### 1. はじめに

早稲田大学では、創立者大隈重信が「人壽 125 歳説」を提唱していたことから、2007 年に創立 125 周年を迎えることを機にさまざまな記念事業が計画された。その一環として、早稲田大学の象徴である「大隈記念講堂」でも、老朽化対策・耐震補強大改修の必要性による保存再生工事が行われ、多機能型ホールとして再竣工した。その後大隈講堂は国の重要文化財に指定されている。

大隈講堂は建築音響の分野でも重要な位置を占め、黒川兼三郎、佐藤武夫らにより国内で初めて「科学的な音響設計」が導入され、その後のホール建築に多大な影響を与えた建物である。このため、保存再生工事では大講堂の音響保存に重点を置くとともに、音響上の弱点を克服するための検討を行う必要があった。

本工事では、改修前の設計段階から施工終了に至るまでヤマハ（株）サウンドテクノロジー開発センター（以下ヤマハと記す）が音響コンサルタントとして参画し、施工では当技研も管理を進めた。ここでは、ヤマハが行った大講堂創建時の音響計画の調査結果と今回の保存再生工事の音響改修計画を紹介するとともに、

当該歴史建造物改修の音響改修計画、音響管理、および改修前後の音響測定結果について報告する<sup>1,4,5)</sup>。

表-1 に工事概要、図-1 に改修後の平面・断面図を示す。

### 2. 音響調査

#### 2.1 創建時の音響計画概要

大隈講堂は、当初 1 万人収容の大ホールとして計画されていたが、客席全体への明瞭な音声伝達のために設計見直しが提案され<sup>2)</sup>、現在の大きさとなった。当時の高田早苗総長から「ゴシック様式であること」、「演劇に使えること」といった条件を受けて設計されている。

表-1 工事概要

	創建時	保存再生工事
総合監理	—	早稲田大学キャンパス企画部
設計	佐藤功一・佐藤武夫	(株) 佐藤総合計画
音響	黒川兼三郎・佐藤武夫	ヤマハ(株) S T 開発センター
施工	戸田組	戸田・熊谷共同企業体
竣工	1927 年(昭和 2 年)	2007 年 10 月
構造等	SRC 3 / 1	
法床面積	3,710m <sup>2</sup>	
大講堂座席数	2100 席	1121 席(改修前 1436 席)
大講堂容積	6,074m <sup>3</sup>	

表-2 大隈講堂大講堂 創建時音響検討内容<sup>3)</sup>

項目	内容
用途	講演～演劇
直接音の確保	視野の確保(柱等の障害物がないこと 舞台を斜めからみる席がないこと)
初期反射音の確保	プロセニウム周りアーチ壁からの反射音 →1 F 後部～バルコニー席へ付与 主天井からの反射音 →バルコニー席へ付与 バルコニー下天井の反射音 →直下の席へ付与
音響障害の除去	客席全域で「屋外で音源から 50 尺 (= 15.15m) 以内」と同等の音圧確保 直接音後の 1/20 秒以内の反射音を重視(室幅・天井高の抑制) 水平壁からの反射音の寄与 <残響過多防止> 反射音の低減(セロテックスによる弱い吸音) 舞台幕による吸音 舞台袖・すのこ空間によるエネルギー散逸 <音響集中の除去> パラボラ型の局面形状の採用(反射音線の平行化) <エコーの防止> バルコニー後方カーテンによる吸音 1 F 後壁反射音の低減(セロテックスによる弱い吸音) 1 F 後部バルコニー下の天井形状(傾斜面+凹曲面)
屋外騒音伝搬の防止	<配置計画> 道路側に道具庫、前庭側にロビーを配置(サウンドロックスペース) <換気・採光> 外気は道路・前庭から直接取り入れない 外光は客席上部の天窗から取り入れる(講堂壁に窓を設けない)

\*1 戸田建設(株) 技術研究所 \*2 戸田建設(株) 名古屋支店建築部工事課 \*3 ヤマハ(株) サウンドテクノロジー開発センター

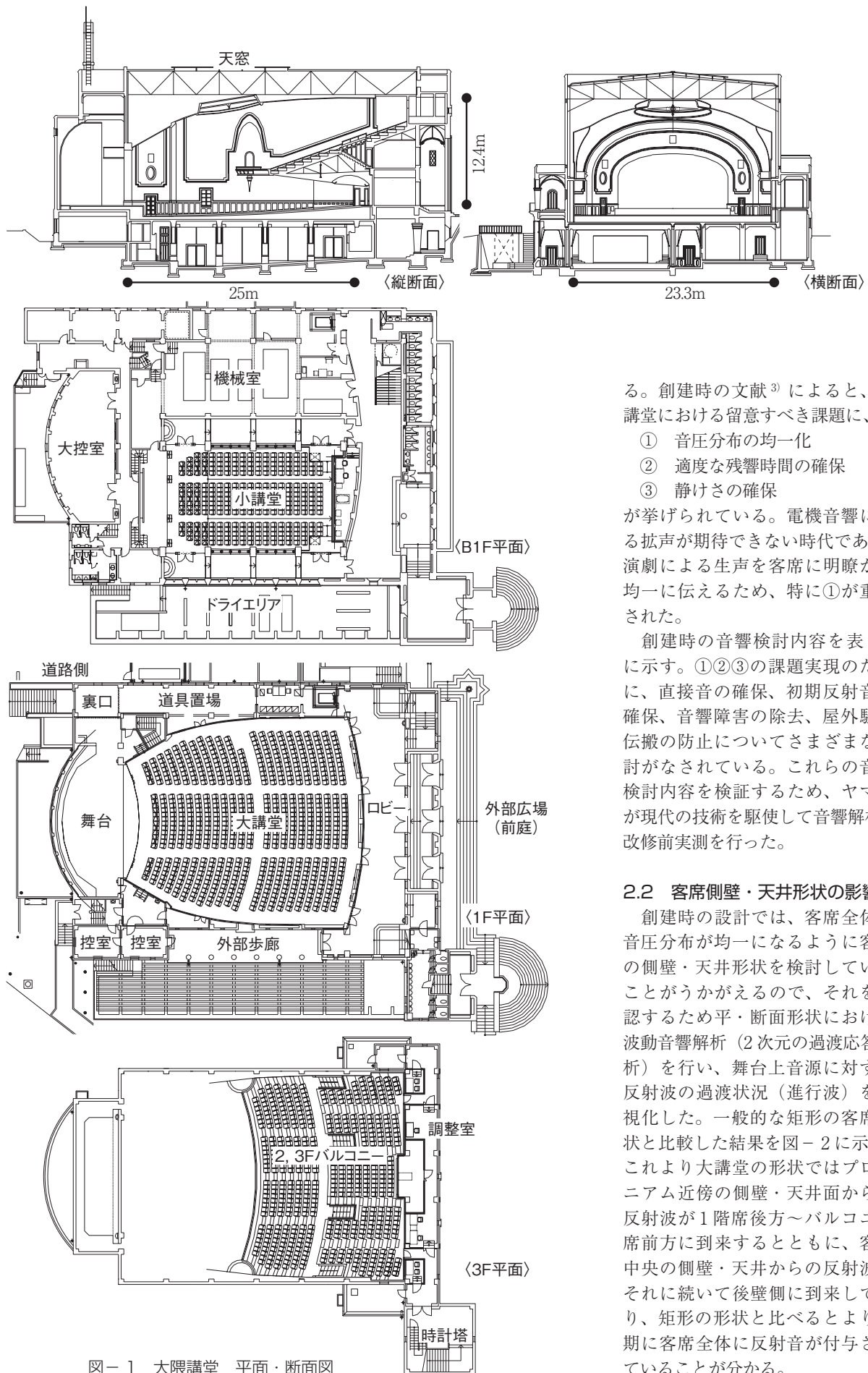


図-1 大隈講堂 平面・断面図

る。創建時の文献<sup>3)</sup>によると、本講堂における留意すべき課題に、

- ① 音圧分布の均一化
- ② 適度な残響時間の確保
- ③ 静けさの確保

が挙げられている。電機音響による拡声期待できない時代であり、演劇による生声を客席に明瞭かつ均一に伝えるため、特に①が重視された。

創建時の音響検討内容を表-2に示す。①②③の課題実現のために、直接音の確保、初期反射音の確保、音響障害の除去、屋外騒音伝搬の防止についてさまざまな検討がなされている。これらの音響検討内容を検証するため、ヤマハが現代の技術を駆使して音響解析・改修前実測を行った。

## 2.2 客席側壁・天井形状の影響

創建時の設計では、客席全体の音圧分布が均一になるように客席の側壁・天井形状を検討していたことがうかがえるので、それを確認するため平・断面形状における波動音響解析(2次元の過渡応答解析)を行い、舞台上音源に対する反射波の過渡状況(進行波)を可視化した。一般的な矩形の客席形状と比較した結果を図-2に示す。これより大講堂の形状ではプロセニウム近傍の側壁・天井面からの反射波が1階席後方~バルコニー席前方に到来するとともに、客席中央の側壁・天井からの反射波がそれに続いて後壁側に到来しており、矩形の形状と比べるとより早期に客席全体に反射音が付与されていることが分かる。

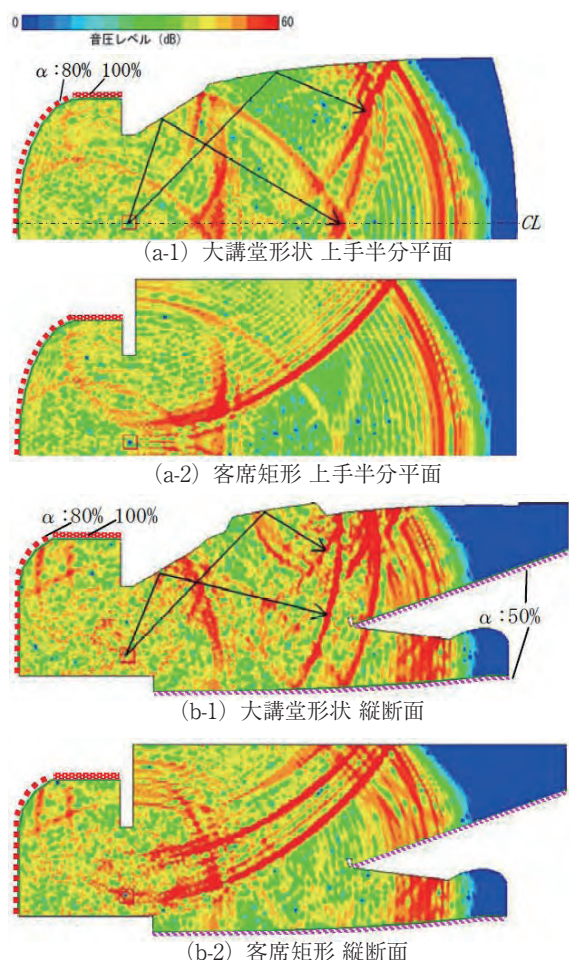


図-2 波動音響解析 側壁・天井の影響  
(時刻:62msec、吸音率:客席床50%、舞台周囲開口100%、水平幕80%)

### 2.3 客席後壁周りの影響

1階後方のバルコニー下部の天井は、舞台側が高くなるようにわずかに傾斜するとともに、客席最後列～3列目までの部分は縦断面が凹曲面で構成されている。文献によると、舞台側に開いた断面形状によりバルコニー下の客席に直接音と初期反射音を到来しやすくするとともに、後部曲面天井の凹みにより後壁からの反射音が舞台側に戻りにくくすることでエコー防止を図っていたことがうかがえる。また、バルコニー最後部にはエコー防止を意図して吸音カーテンが導入されていた。これらを断面形状の波動音響解析結果の可視化により確認した。大講堂の形状（バルコニー後壁を吸音性に変更）とバルコニー下部天井を水平とした場合（バルコニー後壁は反射性のまま）を比較した結果を図-3に示す。これより大講堂のほうが舞台側に戻る反射音が大幅に低減されている様子が見える。

### 2.4 舞台水平形状の影響

舞台背後は曲面の反射壁（ラスモルタル仕上げ）で構成されている。これは舞台演出の一手法として水平を曲面で構成した“クッペル水平”と呼ばれるものであるが、音響的にも舞台上の音を反射させる“音響反射板”として機能するように形状が検討

されている。波動音響解析によりこの効果を確認した（図-4参照）。平面形状での比較により、水平曲面（大講堂）のほうが平面の場合に比べ反射波が太くかつ直線状になっており、客席側により強い反射波が均等に伝播していることがわかる。同時に曲面端部から舞台中央に反射波が到来している。また断面形状の比較により、水平上端の曲面から音源側に反射波が戻ってくる様子が見える。

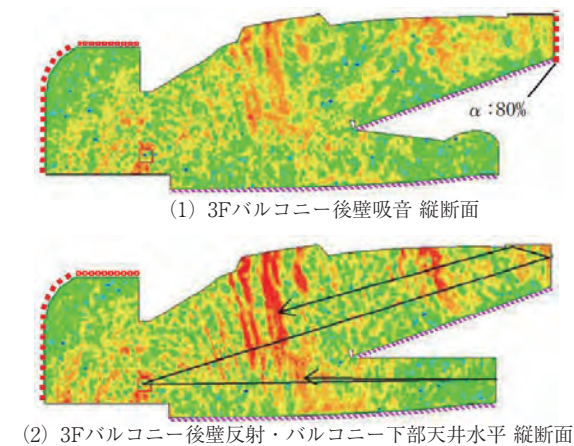


図-3 波動音響解析 後壁周りの影響  
(時刻:163msec、大講堂バルコニー後壁吸音率80%、他は図-2と同条件)

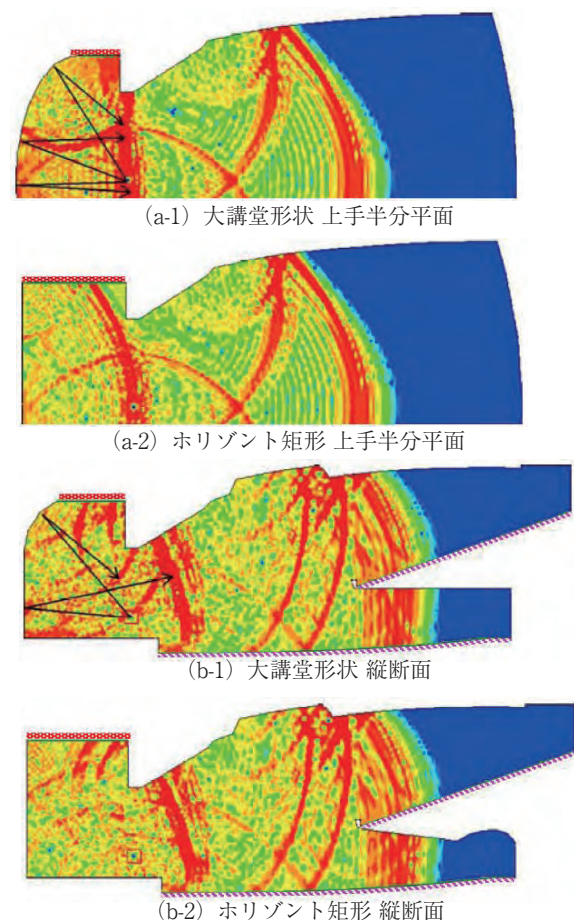


図-4 波動音響解析 水平形状の影響  
(時刻:55msec、水平反射性、他は図-2と同条件)

### 3. 音響改修計画

大隈講堂の保存再生工事の目的は、キャンパス景観上のシンボル再生に留まらず、講堂で展開されるさまざまな催事がキャンパス生活において大切な役割を担い、存在価値が継承されていくように改修されることにある。このため、設備計画における課題が3点あった。

- ① 設備機能を一新する
- ② 空間性能を継承する
- ③ 両者の両立を図る

このため、音響改修計画の基本方針として、創建時の意匠・音響の維持を前提としながら最新の設備を導入すること、遮音性能の改善、新たな騒音源対策、電気音響は室内音響特質を生かしたスピーカシステムを採用することなどを旨とした。

建築音響における改修計画のポイントを表-3、改修前の問題点と対策案、性能目標値を表-4にまとめ、各改修計画の具体的な方法、図示について次項4. 音響管理に示す。

表-3 音響改修計画のポイント

種別	ポイント
室内音響	大講堂：創建時の音場保存を前提とした内装補修・椅子改修 小講堂：用途拡大を前提とした室形状・内装のリニューアル
遮音・騒音	遮音：主要空間・屋外まわりの遮音上弱点の改善 騒音：環境騒音・設備機器騒音の低減
電気音響設備	デジタル化、スピーカ刷新、回線拡充など、設備全体のグレードアップ 大講堂の室内音響の特質を生かしたスピーカシステムの見直し

### 4. 音響管理

#### 4.1 留意点

建築音響は、構造体・内装・建具など各種工事の総合で空間性能が決定し、その検討項目は多岐に渡る。このため、工事開始前に現地調査が行われ、目標とする性能が設定され、それを満足するために多角的な視点から検討されてきた。それによって確認された音響上の不確定要素については実験・測定などを行い、その結果を施工の各種工事に反映しながら工事を進めてきた。

表-4 改修前の問題点と対策案、性能目標値

種別	場所・経路	改修前の問題点	元の性能	対策案	性能目標値
室内音響	大講堂	椅子老朽化で交換、吸音力増 凹面形状 1F 後壁改修 調整室拡張、3F 後壁位置前へ	RT1.2 ~ 1.3 秒	残響時間低減の抑制 室形状の保存 代替材料 3F 後壁リブ	RT1.1 秒 $\bar{\alpha}$ 0.26
	小講堂	ややライブ	RT 約 1.2 秒 $\bar{\alpha}$ 0.17	後壁・天井の吸音 ロールスクリーン残響可変	RT0.8 ~ 0.7 秒 $\bar{\alpha}$ 0.23 ~ 0.25
遮音	大控室	全内装が反射性	-	天井を吸音	-
	大講堂~屋外	前庭~大講堂客席中央 前庭~大講堂客席後部 客席扉	D-40 D-30' D-15 以下	大講堂扉を防音扉 (T-3 相当) に交換 エントランス扉隙間対策	D-45 D-25 ~ 30
	大講堂~小講堂	大講堂舞台下部床スラブに開口あり	D-40	大講堂舞台袖階段、遮音壁・扉新設 開口の遮蔽	D-55
	大講堂~大控室	大控室~大講堂舞台 大控室~大講堂客席前部	D-40 D-35		D-55
	小講堂~ドライエリア	旧窓のみ ドライエリア空調熱源機器新設にともなう新たな騒音源発生	D-20	サッシの追加 (二重窓化) 小講堂側路化にともなうガラス壁+扉新設	D-45
	小講堂~B1F 機械室	壁に換気口 小講堂上手袖のダクトルートを経由したクロストーク	-	換気口の遮蔽 小講堂側路化にともなうガラス壁+扉新設 遮音ダクト+遮音天井追加	-
	小講堂~大控室	-	D-35 程度	小講堂舞台扉スチール化	-
搬入口シャッター	シャッター一重、老朽化	D-15	防音シャッター新設、二重化	D-25 ~ 30	
騒音	大講堂	新たな空調騒音の発生 (椅子吹出・吸込) 道路交通騒音、ヘリコプター騒音の侵入	-	椅子構造検討 外壁面の換気口を塞ぐ 道具置場窓二重化 (サッシ追加)	NC-25
	小講堂	新たな空調騒音の発生 (天井チャンパー)	-	ドライエリア、機械室からの騒音侵入対策	NC-30
	外部歩廊建物周囲	ドライエリアドライエリア空調熱源機器新設にともなう新たな騒音源発生	-	遮音フード、消音ルーバーの新設 ドライエリア内吸音処理	45dBA

注 RT : 残響時間 (s)  $\bar{\alpha}$  : 平均吸音率 D : 音圧レベル差 (遮音評価) NC : Noise Criteria (騒音評価)

大隈講堂改修における音響上の主眼は次の3点になる。

- ① 我が国の音響設計の先駆けとなった大講堂の音響設計思想を踏襲し、改修前の室内音響状態をできるだけ保存すること
- ② 遮音・騒音上の弱点部分を発見し、意匠保存に配慮しながら対策を施すこと
- ③ 改修にともなう新たな騒音源が、建物内外に影響を及ぼさないこと

これらを踏まえてさまざまな音響検討・測定が行われた結果、

目標とする音響性能を確保することができた。

## 4.2 室内音響

### 1) 検討事項

大講堂については、創建時の意匠・音響の保存・復元を前提として、基本的には改修前の音響状態の保存を目標とした。具体的には、凹曲面を主体とした室形状の維持と残響時間低減の抑制（内装吸音力の増加を抑える）であり、改修前 250Hz～2kHzの平均が約 1.2～1.3 秒（舞台上水平幕あり～なし）であった残響時間を 1.1～1.2 秒程度に低減の歯止めがかけられるよう検討した。小講堂については、視聴覚関連の用途拡大を優先し、音響・映像設備の機能を充実させ、室内音響についてもこれに適した室形状や内装仕様への変更が施された。具体的には後壁・天井を中心とした内装の吸音処理により、残響時間を低減させるとともに、用途に応じて残響時間が調整できるように吸音力をともなうロールスクリーンの導入を検討した。

#### ①大講堂の音場保存のための仕上げ材選定

舞台の対向壁（後壁）は、ホールなどの大空間で、舞台の発生音が後壁に反射して音声の明瞭度を損なう原因となるロングパスエコーを軽減するため、吸音や拡散等の配慮が必要な部位である。今回、大講堂の後壁 1F 部分はダクト撤去・新設などにより全面改装されることとなった。

改修前に使用されていた材料セロテックスは、繊維状のものを板状に固めた創建当時の材料で、その上に塗料を数 mm 厚塗りしたものが天井・壁面に採用されていた。表面は弾力があり、図-5 に示す垂直入射吸音率の測定結果から、音響的には特定の周波数で吸音率のピークを持つ膜のような性質であることが判明し、音声帯域の反射の緩和に寄与しているものと考えられた。このセロテックスが現在入手困難であるため、代替品で吸音率の近いものを選定することになった。その結果、代替品として、岩綿吸音板の虫食い模様のないものに EP 塗装（1 回）すると、セロテックス+表面塗装と吸音率が近いことが測定により判明したため、それを使用することとなった。

バルコニー後壁部分については、舞台設備改修にともなう調整室拡張のため、後壁の位置が舞台側に約 3m 突出する、ともに大きな壁面で構成されることになった。後壁の仕上げについては、エコー防止の観点からは「吸音性」、音響保存の観点からは「反射性」、あるいは「一部吸音、一部反射」といういくつかの方

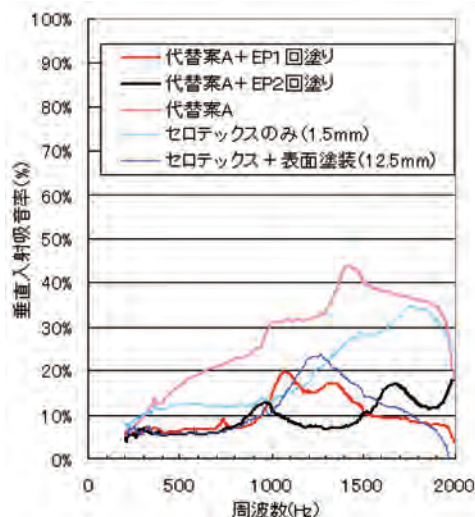


図-5 後壁材料の垂直入射吸音率測定結果



写真-1 セロテックス+塗装



写真-2 セロテックス代替品  
(虫食い模様なし岩綿吸音板) 貼り付け前



写真-3 1F 後壁施工状況

法が考えられたが、図面上や音響解析での正確な予測・判断が困難なため、後壁下地壁が施工された段階で音響実験を行い、最終仕上げを検討することとした。舞台上の生音、およびスピーカからの拡声音を音源として、音響テストを行った結果、聴感上もデータ上もエコーなどの音響障害がないことが確認されたため、後壁の仕上げを反射性とする事とした。最終的には意匠に配慮しながら、わずかな散乱が期待できるリブ構造（吸音材なし）を採用した。

②椅子改修への対応

椅子はホール室内全吸音力の約1/3を占め、残響時間に大きな影響を及ぼす。大隈講堂創建当時は、板状の椅子で比較的反射性であったが、改修前の椅子は、椅子の表面がビニールレザーで覆われた劇場型椅子で、座も背もクッション（ウレタン）が入って吸音力が大きくなり、残響時間が創建時（1.5秒）より短くなっていること（1.3秒程度）が調査によりわかっていた。この椅子が老朽化のため今回の改修で全面的に取り替えられることになり、残響時間が更に短くなることが予想され、大幅に変化することが懸念された。また、新しい椅子には空調設備や情報コンセントが内蔵されており、吸音力以外にもビリツキや不当な音鳴りなど音響的な不具合の発生しやすい部分が多々あった。以上の懸案事項により、今回改修で3代目となる新しい椅子を音響面から検討した。ここでは改修前の椅子を旧椅子、改修された椅子を新椅子とする。

(i) 椅子表面材の検討

椅子の表面材料は垂直入射吸音率を測定し、モケット、人工皮革（バックスキン風）と、改修前のビニールレザーとの吸音率を比較確認した。測定結果を図-6に示す。モケット、人工皮革は、1kHz以上の高音域でビニールレザーと比べて吸音率は大きくなるが、モケットと人工皮革との比較では、若干ではあるが、人工皮革のほうが吸音率のピークは高く、ビニールレザーに近い周波数特性を示した。測定結果により大きな問題は生じないと予測され、デザイン上の観点もあり、椅子表面材は人工皮革に決定した。

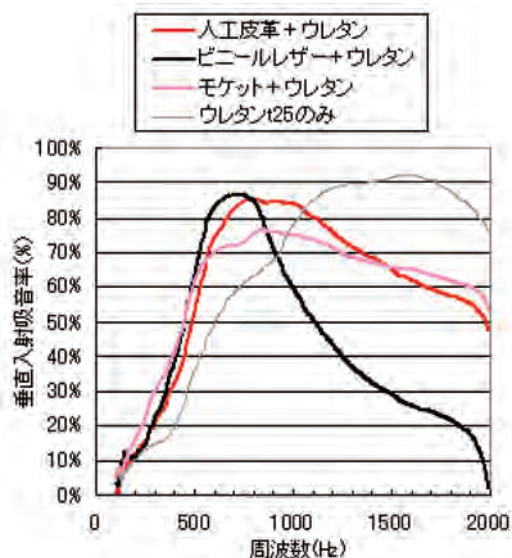


図-6 椅子表面材の垂直入射吸音率測定結果

(ii) 音響不具合チェック

椅子の仕様がある程度決まったところで、確認用のサンプルが作成され、それを使用して音響上の不具合チェック試験を行った。測定はヤマハの簡易無響室で行われた。

今回の大講堂椅子は、収納式テーブル、空調吸込・吹出口、さらに、電源コンセント・LAN接続口・通信用ヘッドホンジャックと音量・チャンネルスイッチが付加された多機能椅子のため、ビリツキや音鳴りなどの音響的な不具合が懸念された。試験方法は、ユニットになった椅子（3脚セット）に、試験音を放射し、振動・異音発生の有無を測定するといった方法を取った。結果、パンチングメタルの接触部分の隙間が原因となるビリツキが発生した（図-7参照）。これにより、溶接箇所を増やし緊結を強化する対策がとられた。空調吹出口の共鳴の有無に関しては、測定結果も聴感も明確には検知されず、問題なしと判断した（図-8）。

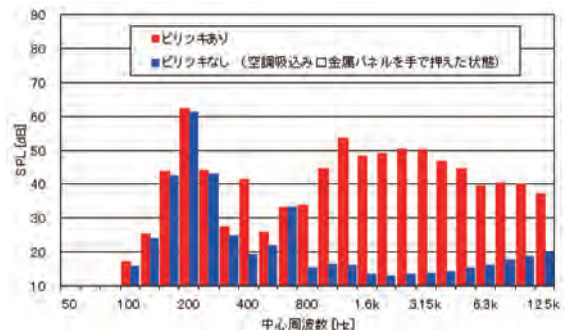


図-7 大講堂椅子ビリツキ試験結果

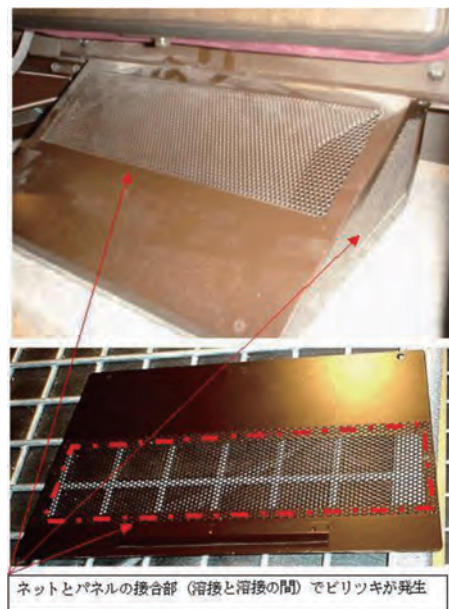


写真-4 大講堂椅子ビリツキ試験状況と発生箇所

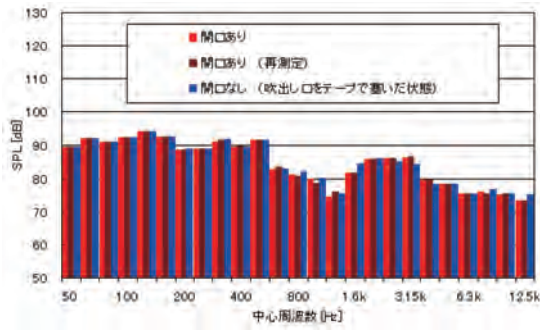


図-8 椅子共鳴試験結果

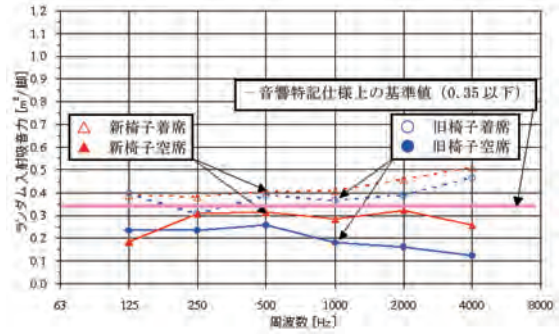


図-9 大講堂椅子吸音力測定結果



写真-5 椅子共鳴試験状況

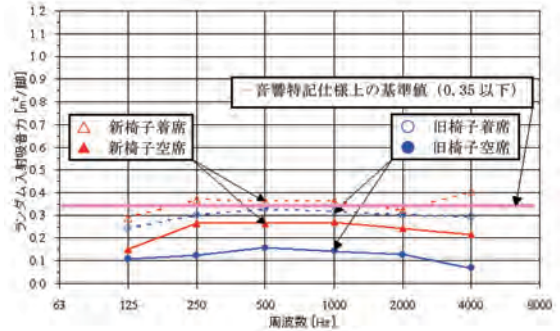


図-10 小講堂椅子吸音力測定結果



写真-6 椅子吸音力測定状況1 (人着席)



写真-7 椅子吸音力測定状況2 (空席)

### (iii) 吸音力試験

最後に、新旧椅子の吸音力の比較と、取り付け後の残響時間を予測するため、大小講堂、旧椅子と新椅子8脚ずつによる吸音力試験を行った。測定はヤマハの残響室で行われた。大講堂新椅子の吸音力測定結果を図-9に示すが、人工皮革の表面材と多機能性により、旧椅子よりも吸音力の増加要素が多く、予想された通り、新椅子は空席状態で、旧椅子より特に中高音域で吸音力が大きくなった。ただし、着席状態では大きな差がなく、500Hzでほぼ一致することが判明した。また、席数が約1400から1100に減少しており、椅子1脚当たりの吸音力が増加しても残響時間が大幅に短くなることはない判断した。以上の結果より、新椅子の音響上の妥当性を確認した。

小講堂の椅子も同様の測定を行った。結果を図-10に示すが、小講堂の椅子は大講堂と比べると、デザインはほぼ同等だが幅が50mm程狭く、機能的には収納式テーブルのみの比較的シンプルな構造で、吸音力は小さい。

### ③小講堂吸音スクリーン

講堂は映画上映も用途として含まれていたが、両側壁は全面ガラスで反射性のため、吸音力付加と反射の



低減を昇降式のスクリーンにより対応した。採用した吸音スクリーン（エコノクターン）の垂直入射吸音率を図-11に示すが、通常のロールスクリーンのほうが吸音率は落ちる。意匠上昇式スクリーンが採用されたため、このなかで吸音率が高いものを選んだ。なお、側壁ガラスはフラッターエコー（音の往復反射）緩和のため平面的に角度をつけており、それによりスクリーンとの空気層が100～200mmと変化する。これにより実際の吸音率はこの空気層の違いと音のランダム入射によりピークはなだらかになるよう配慮されている。

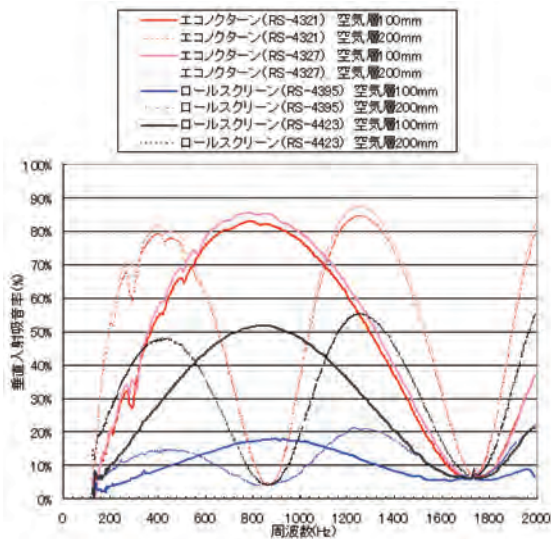


図-11 吸音スクリーンの垂直入射吸音率測定結果



写真-8 吸音スクリーン取付状況

④大講堂室形状の調査

創建時の音響設計思想を確認するため、室形状を音響CADに入力し（図-12）、コンピュータによる音響解析も試みた。設計図では、壁から天井にかけての三次元的な曲線が不明であったため、天井の主要なポイントの測量を実施した。

2) 性能確認

①残響時間

最終的な音場を予測するために各段階で残響時間の測定・予測を行い、対策の必要性の有無を確認していった。

まず大講堂及び小講堂の、改修前の残響時間を測定している。改修前における250～2kHz平均の大講堂

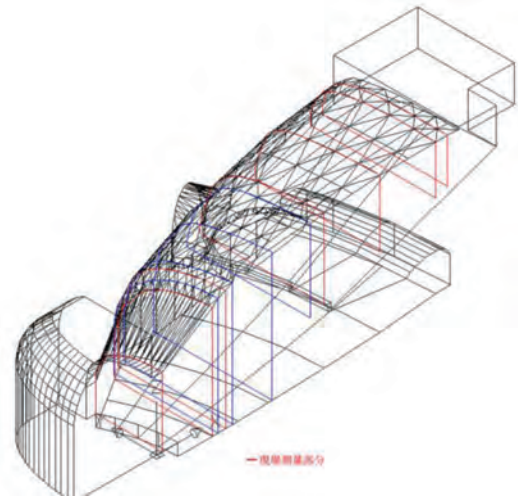


図-12 天井測量+解析形状

残響時間は、舞台上 Horizont幕ありの状態では1.19秒、幕なしの状態では1.25秒であった。その後、新旧椅子の吸音力測定実施により椅子の吸音力が明らかになった時点で、改修前の残響時間に椅子の吸音力を入力することにより、改修後の残響時間を予測した。

次に、椅子設置直前に、椅子がない状態の残響時間を測定した。その結果に椅子吸音力測定による吸音力を入力し、椅子設置後と人が着席した場合の残響時間を予測した。

最後に、椅子が設置された後の残響時間を測定し、250～2kHz平均、Horizont幕ありの状態では1.09秒、幕なしの状態では1.20秒という結果になった。残響時間周波数特性も平坦で良好な特性となり、63～500Hzにおいては改修前とほぼ一致した。さらに満席状態の残響時間の推定計算値はHorizont幕ありの状態では0.92秒、幕なしの状態では1.04秒と、改修前の計算値（幕あり：0.92、幕なし：0.96秒）とほぼ一致しており、残響時間が保存されていることが確認された。（図-13参照）

小講堂は、吸音スクリーンなしの状態では0.84秒、吸音スクリーンありの状態では0.67秒であり、ロールスクリーンによる残響可変が有効に作用していることを確認できた。（図-14参照）

②明瞭度特性

図-15に示した測定点における会話の明瞭性に対応した指標であるD値特性（D50）の500～2kHzの平均値を図-16に示す。Horizont幕なしの状態では、改修前と改修後ではほぼ一致しており、改修により明瞭性に大きな変化がなかったことがわかる。また、Horizont幕ありの状態では、すべての測定点で目安である50%を上回る特性を示している。ちなみに幕あり状態の改修前後を比較すると、ほとんどの測定点の値が大きくなっていることがわかる。これは残響時間が短くなったことと、Horizont幕の吸音力が大きくなったためと考えられる。この結果により、生声に対する明瞭性が良好であることを確認できた。

注 D値特性（D50）：全反射音に対する50msec. 以内の反射音の割合を表した明瞭度に関する物理指標。

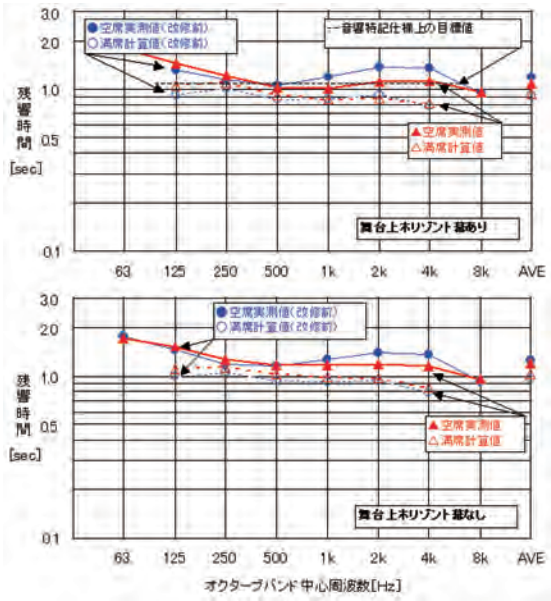


図-13 残響時間（大講堂）

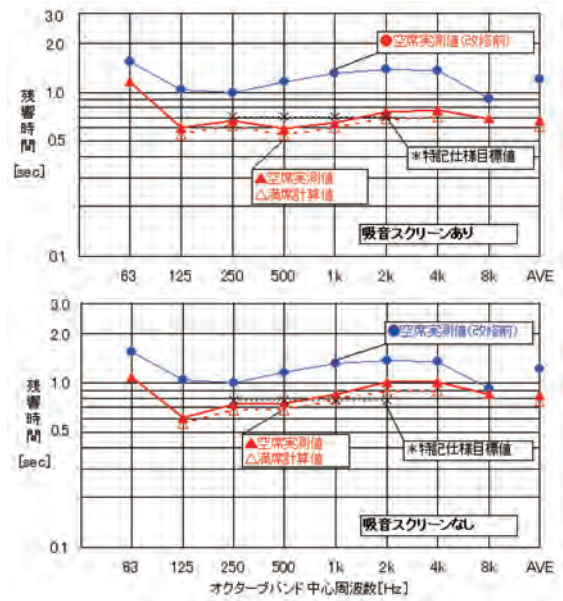


図-14 残響時間（小講堂）



写真-9 残響時間測定状況（大講堂・椅子取付前）



写真-10 残響時間測定状況（小講堂）

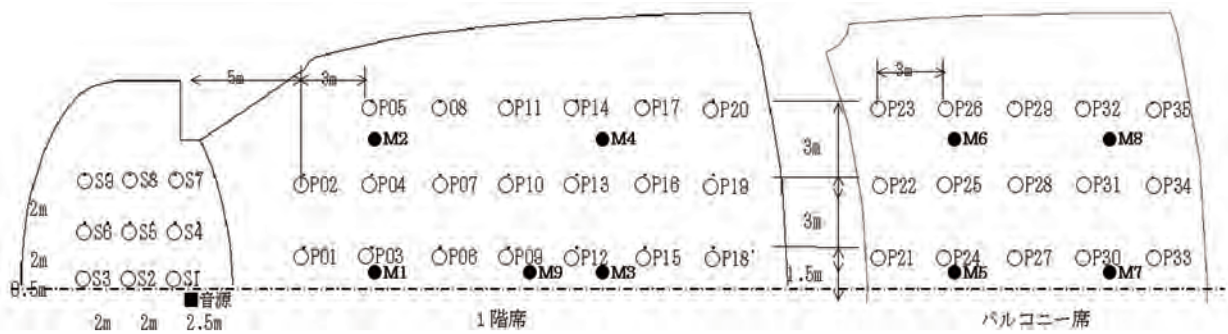


図-15 測定ポイント

一般に50%以上で「会話の明瞭性が良好」といわれている。

③初期反射音特性

音楽演奏時の「音の拡がり感・包まれ感」に対応した指標である側方反射音特性（LE5）の500～2KHzの平均値を図-17に示す。水平幕ありの状態では多くの点で多目的ホールの目安である15%を上回る特性であり、音楽演奏にも対応可能な音場といえ

る。ちなみに改修前の測定値と比較してもバルコニー側壁に新たに設置された吸音カーテン近傍（p26,p29）以外ほとんど変化は認められない。

注 側方反射音特性（LE5）：80msec.までの前方向からのエネルギーに対する5～80msec.感の側方反射エネルギーの比を表した物理指標。側方からの初期反射音は聴感上に影響を与え、値が大きいほど広がり感が大きくなる。

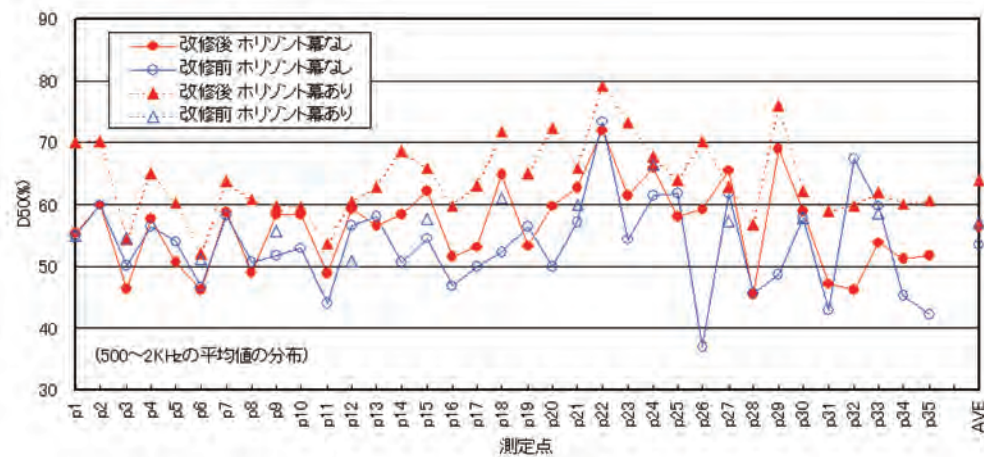


図-16 D値特性 (D50)

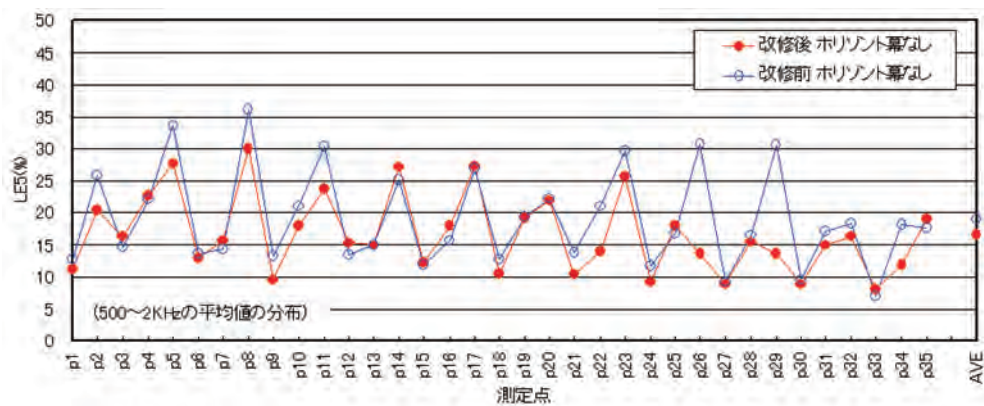


図-17 側方反射音特性 (LE5)

### 4.3 遮音

#### 1) 検討事項

大隈講堂は、講演や演劇などが使用目的であるため、静寂性が必要である。講堂配置の特徴として、大講堂と小講堂が上下階でスラブを隔てて接しているが、改修前の現地調査と学校側に対するヒアリングにより、大講堂～小講堂間の遮音性能が低いことが判明していた。また、道路交通騒音、ヘリコプター騒音、サークル活動などの外部騒音が比較的大きいこと、改修にともない新たな設備騒音が発生することなどが問題点として挙げられていた。そこで、設計図面上で遮音区画を明示し、改修前測定結果と比較することにより、必要な遮音が得られていない部分、図面から弱点となりそうな部分を抽出し、対策を講じて遮音改修を徹底した。

#### ①大講堂～小講堂・大控室間

改修前は、大講堂～小講堂間の遮音が十分ではなかったため、一方で静寂が保たれて一方で大音量の拡声設備を使用する、といった場合の大講堂・小講堂同時使用が不可能であった。原因は、大講堂～小講堂に通じるルート上にある扉類が遮音性の弱い木製であること、舞台付近の開口、大講堂～小講堂間のスラブに設備の貫通開口がみられたことなどが挙げられる。そのため、遮音性の高い鋼製扉の採用、小講堂の天井防振振り、舞台付近に重量ブロック+ボードの遮蔽追加、

客席床の開口のモルタル埋め、などの対策を行い、同時使用に耐えうる遮音仕様とした。

大控室は大講堂の舞台直下にあり、控室の発生音は大講堂に対してできるだけ遮断する必要がある。改修前の調査で舞台床スラブの設備用開口による遮音欠損が発見されたため、コンクリートにより遮蔽した。このスラブには扇状に梁があり、その間に軽鉄が組まれてボードが張られる。表面を岩綿吸音板で吸音することで、室内が響き過ぎることによる喧騒感を低減し、下地材として硬質石膏ボード二層張りとする事で遮音性を高めた。

#### ②外部～ロビー・廊下～大講堂・小講堂間

大講堂～ロビー間の扉は、意匠上二重扉とすることは不可能なため、一重で遮音性能の高い鋼製扉に改修された。外部広場（前庭）～ロビー間は既存の木製扉を再利用するため多くの隙間があり遮音性能は低い、大講堂～ロビー間の扉とあわせて十分な遮音性能が得られることを目標とした。

舞台側の上手にある搬入用大開口は、シャッターを二重とすることにより遮音性能を増した。

小講堂は、新設されたガラスウォール（側壁）の扉と廊下～ロビー間の扉で二重扉とすることにより、十分な遮音性能が得られることを目標とした。

#### ③ドライエリア～小講堂、各諸室間

設備の屋外機器が配置されるドライエリアに対して、

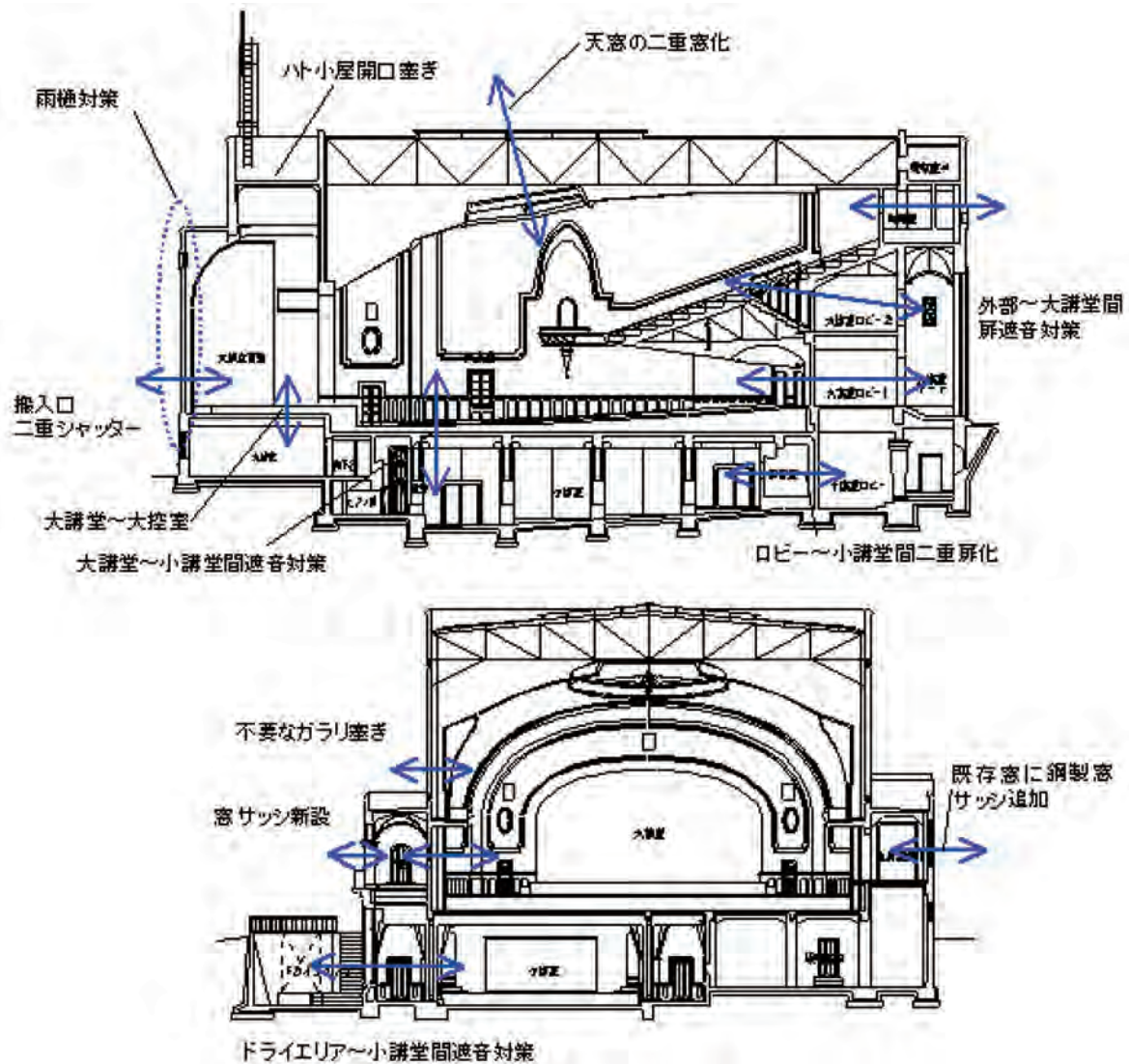


図-18 遮音検討部分

遮音対策としてドライエリア～小講堂間の既存窓の外側に更にサッシを新設することによって二重窓とした。また、小講堂はその両側に廊下を設け、廊下～小講堂間は扉とガラスウォールで間仕切られた。これらの対策により、ドライエリア騒音の大幅な低減を期待した。

④その他

以上の項目以外にも、講堂で大音量を発生させて外部や隣室できいて音漏れを調査する、といった確認試験を行い、遮音上の弱点を発見していった。外部に対しては、不要になった屋上ハト小屋や側壁などの換気用ガラリが音漏れの原因となっていたので、開口を塞ぐなどの対策を行った。

ステンドグラス、木枠サッシを使用している箇所では不要なものは塞ぎ、必要に応じて二重サッシとなるよう、鋼製サッシを付加した。

設備騒音に関しては、講堂内の設備騒音低減のため、空調設備業者により消音計算が行われダクトに消音器を設置するなどの対策が施されたが、小講堂のように建築的な開口が空調の吸込口になっている場合なども

十分対策が行われるよう総合的な判断が必要となった。ダクトルートにおける遮音上のクロストークもチェックし、鉛板張りなどの対策が施された。

今回の改修によって、舞台両側2階部分は盤関係室となり、当初舞台～盤関係室間は既存シャッター一枚のみで遮音が弱く、調光盤の廃熱ファンとそれを冷却する空調の騒音の影響が大きかった。そこで、廃熱ファン部分に消音器を設置するとともに、シャッター部分には遮音壁・扉を設置した結果、騒音の影響は大幅に低減された。

2) 性能確認

事前の十分な検討により、遮音はそれぞれ目標値を満足することができた。大講堂～小講堂・大控室間の室間音圧レベル差測定結果を図-19に示す。大講堂～小講堂間は、改修前はD-40程度であった遮音性能が、目標であるD-55を満足する結果となった。

図-20に外部～ロビー・大講堂関係、図-21にシャッター・大講堂扉関係、図-22にドライエリア～小講堂間の音圧レベル差測定結果を示すが、改修前と比べて大幅な改善がみられる。外部広場～大講堂間

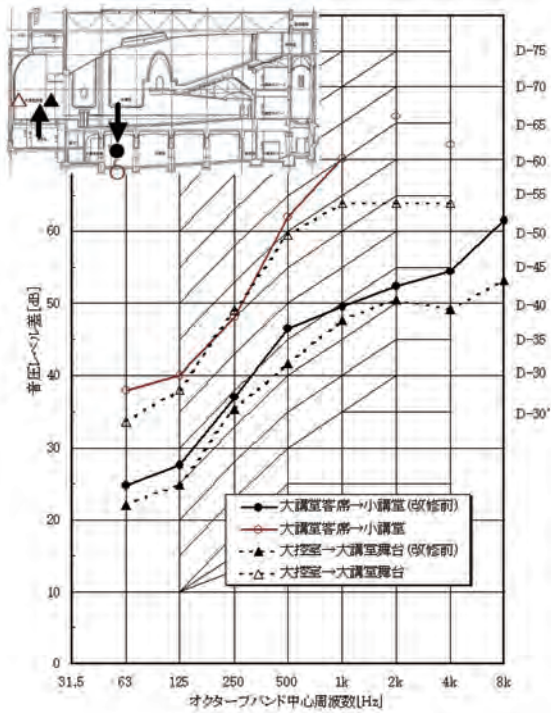


図-19 大講堂～小講堂間音圧レベル差測定結果

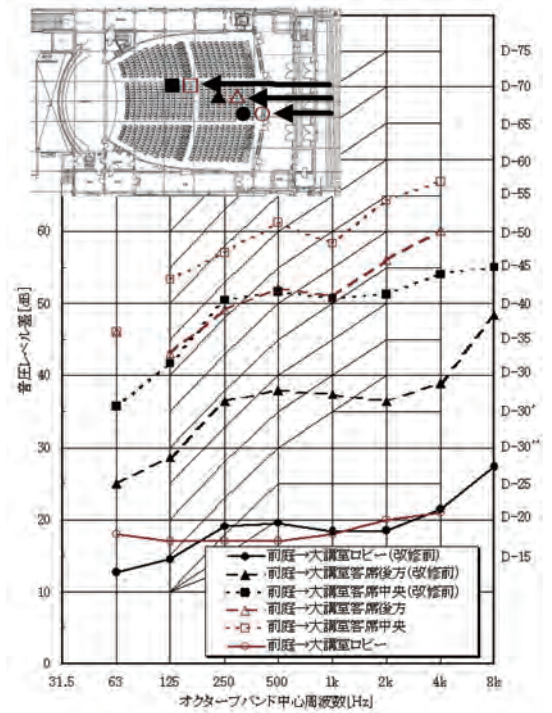


図-20 外部広場（前庭）～大講堂音圧レベル差測定結果

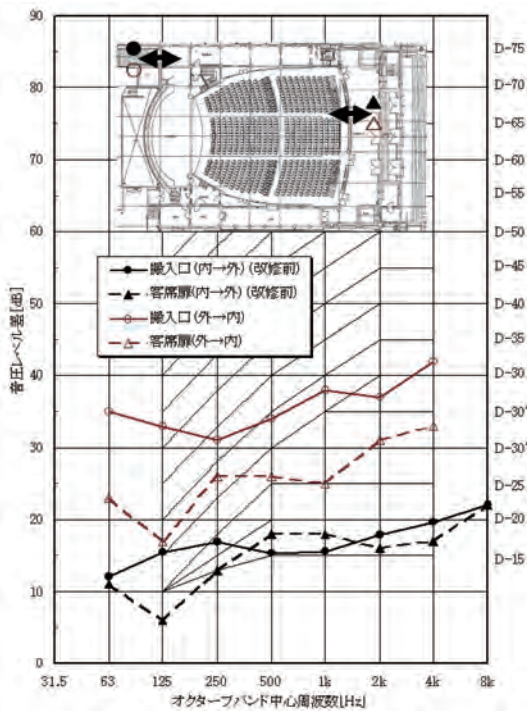


図-21 大講堂扉・シャッター音圧レベル差測定結果

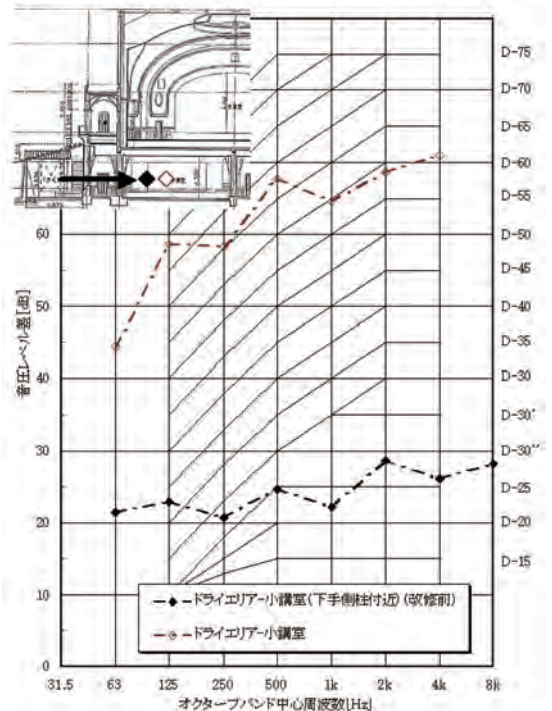


図-22 ドライエリア～小講堂音圧レベル差測定結果

は D - 45 と所期の目標を満足し、特にドライエリア～小講堂間は D - 60 と高い遮音性能が得られた。

また、外部騒音・盤関係室設備騒音の影響について大講堂の騒音測定結果を図-23, 24 に示す。外部騒音について、搬入口のシャッターおよび道路側窓の二重化により、大講堂客席ではほとんど聞こえないレベル（舞台中央先端で NC - 20）まで低減されている。大

講堂舞台両側 2 階部分の盤関係室からの設備機器騒音もシャッター部分の遮音対策により、ほとんど聞こえないレベル（NC - 15）まで低減している。

注 D：日本建築学会で定められた室内音圧レベル差に関する遮音等級。数字が大きいほど遮音性能がよい。

NC (Noise Criteria) 値：ペラネックにより提案さ

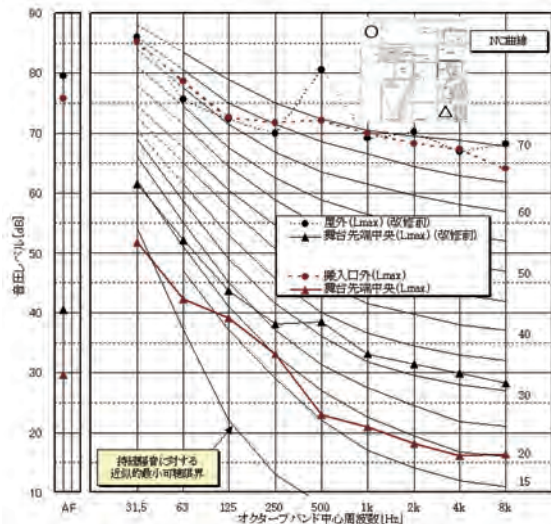


図-23 舞台における外部騒音の影響測定結果

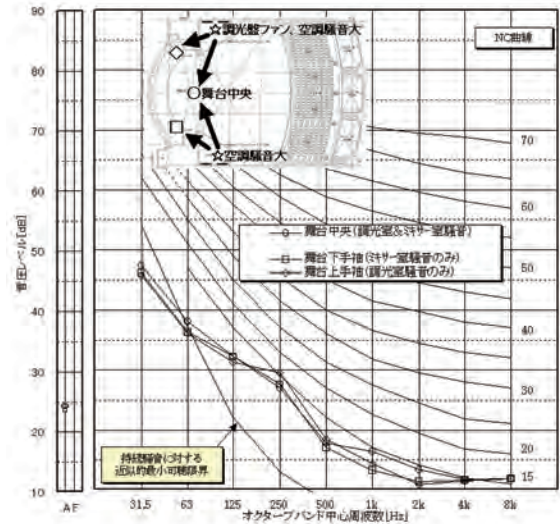


図-24 舞台における調光室・ミキサー室騒音の影響測定結果

れた騒音の評価量。空調騒音などの定常騒音を対象にしている。数字が小さいほど騒音が小さい。

#### 4.4 屋外機騒音

##### 1) 検討事項

大隈講堂は、今回の改修まで冷房設備がなく、大隈庭園側のドライエリアには設備機械などがなかったが、今回の改修で冷暖房完備となるため、空調設備がドライエリアに配置されることになった。すなわち、冷却塔やボイラーなどの騒音源が新たに設置されることに

なる。このことにより、講堂内外に対する騒音伝搬の影響が懸念されたため、騒音伝搬の低減対策を行った。

大隈講堂一帯は、比較的交通騒音が大きいのが、ドライエリアの面する大隈庭園は雰囲気の良い場所でもあるため、今までより新たな騒音が際立つことは避けたい。そのため、大講堂横の半屋外の歩廊（ドライエリア斜め上方）での騒音目標値を45dBAに設定し、設備機器騒音のデータから予測計算を行い、目標値以内となるよう対策を行った。

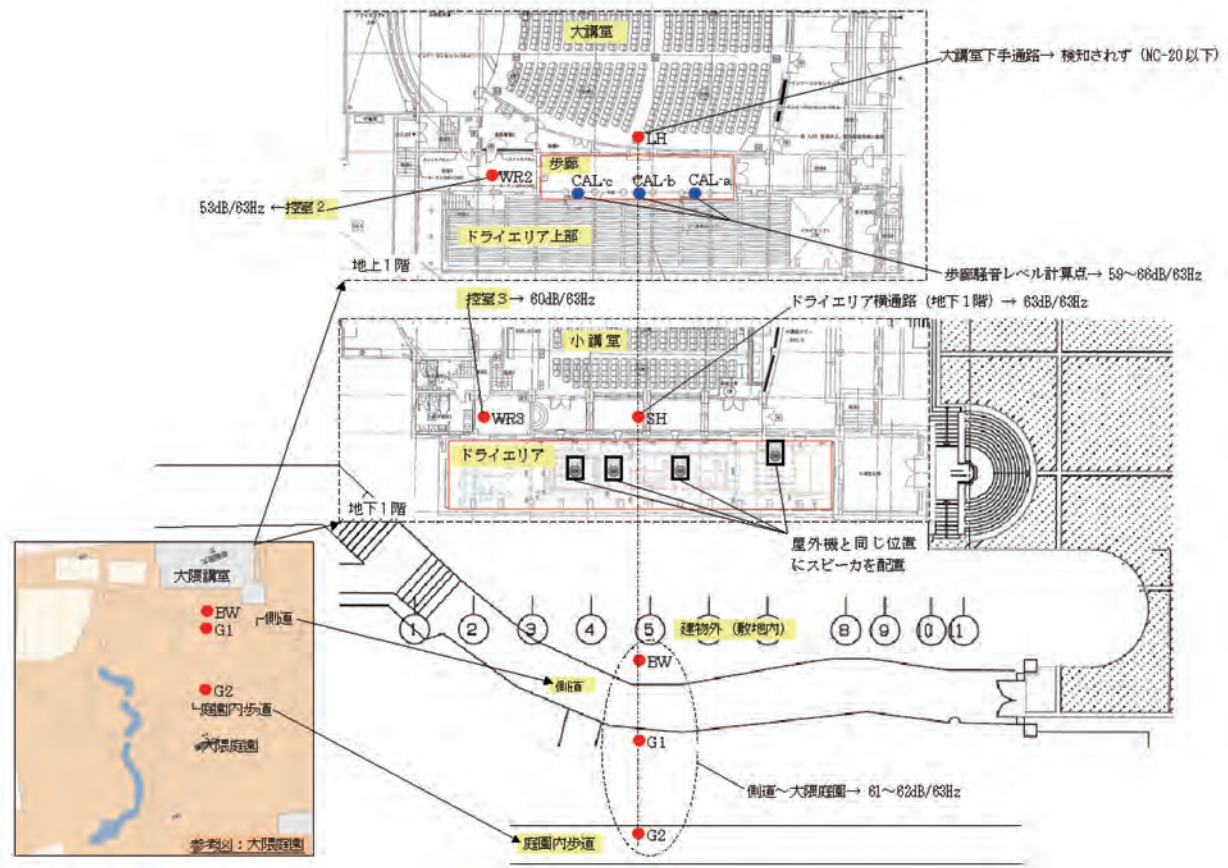


図-25 ドライエリア擬似騒音確認実験配置図

①ドライエリアの消音計画

ドライエリアの主な騒音源は、冷却塔、冷温水発生機、パッケージ室外機である。音源自身にも囲いや排気口に消音ダクトを設けるなど対策を行ったが、それだけでは不十分だったため、ドライエリア壁面に吸音パネル、ドライエリア上部に消音ルーバーを設置した。これにより、予測計算では、建物周辺に対する騒音値が目標値近辺となった。

②擬似騒音確認実験

しかし、実際どのように聴感できこえるか不明であったため、歩廊上の計算点で算出された騒音レベルを参考に、屋外機設置位置近傍にスピーカを設置し、空調騒音を擬似的に発生させる、といった擬似騒音確認実験を大学関係者立ち会いのもと現場にて実施した。図-25に音源位置、測定点、計算点を示す。

(i) 講堂外部

もともと、大隈講堂の外部歩廊、通り抜け側道、および大隈庭園では暗騒音が大きく、場所や時間帯によって42～49dBAの変動が確認され、ドライエリア騒音の聴感上検知できる周波数帯域は低音域(125Hz以下)のみで、250Hz帯域以上の音圧レベルは暗騒音を下回った。周波数特性のピークは63Hzであり、聴感上もこの帯域を中心に検知されているものと考えられた。

ドライエリア横の外部歩廊では63Hzで59～66dB(測定点:CAL-a,b,c点)と、暗騒音52～56dB/63Hzを4～9dB上回っているものの、聴感上はわずかに認識される程度であった。

大隈庭園および側道では61～62dB/63Hz(BW, G1, G2点)と暗騒音53dB/63Hzを3～4dB上回る程度であり、聴感上はON/OFFすればわずかな違いを確認できる程度で、ほとんど認識できない状態であった。

(ii) 講堂内部

大講堂内部に対しては、実験時点で暗騒音とほぼ同レベルであり、聴感上もまったく検知できずNC-20以下(LH点)であった。

小講堂のドライエリア横通路では63dB/63Hz(SH

点)と、暗騒音45dB/63Hzを大きく上回る値を示し、聴感上も明らかにきこえたが、外壁窓を二重サッシにし、更に通路～小講堂間のガラスウォール新設により15dB/63Hz(D-40)以上の減衰が予測できるため、NC-20以下まで低減すると考えられた。

大講堂横控室2は、まだ窓サッシのない状態であったため、53dB/63Hz(WR2点)と、暗騒音の46dB/63Hzに対し7dB上回っており、聴感上検知できたが、窓が装着されることによりD-15程度の遮音が期待できるため、NC-25以下のほとんどきこえないレベルまで低減するものと考えられた。

小講堂横控室3は、窓のない状態で60dB/63Hz(WR3点)と暗騒音50dB/63Hzを10dB上回っていたが、窓装着後は実用上問題のないレベル(NC-30以下)になるものと考えられた。

以上より、歩廊において設計目標として設定した45dBAが妥当であり、実使用上問題のないレベルと考えられ、大学関係者承認のもと、設計通り施工を進めることができた。

2) 性能確認

ドライエリアに設備機器が実装され、消音ルーバーなどが設置された最終的な竣工状態での測定結果は、外部歩廊で46dBA以下(図-27参照)と、目標値(45dBA)を満足する特性であり、擬似騒音確認実験時と同様に、暗騒音の影響が大きく、聴感上もほとんど検知できない状態であることを確認した。内部では、室内における空調騒音発生の影響も含めて測定し、大講堂・小講堂共NC-25と、目標値を満足するレベルになっていることを確認した。ドライエリアに隣接した控室1～3においても、空調OFFの状態でも外部の暗騒音(虫の音等)が主体であり、屋外機騒音はわずかにきこえる程度である(暗騒音下でNC-30)。空調ONの状態ではまったく検知されない。ちなみに歩廊でのドライエリア擬似騒音確認実験時の測定値(図-26)と竣工時の測定値(図-27)を比較すると、暗騒音の影響の小さい63～2KHzでおおむね一致しており、大隈庭園側への影響も基本的には擬似騒音実験時と同じ程度と考えられる。

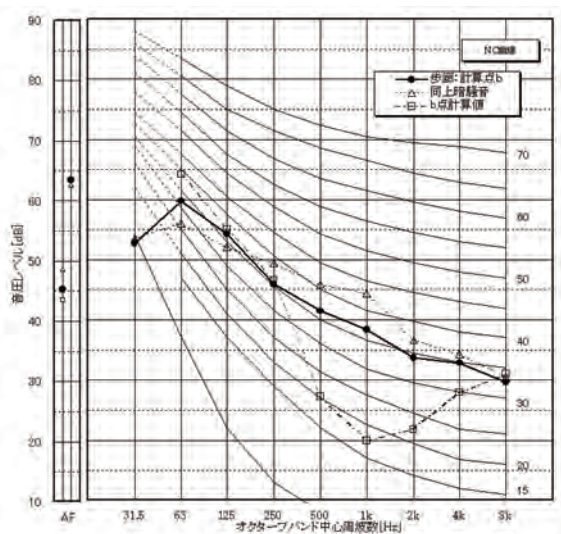


図-26 ドライエリア擬似騒音確認実験結果

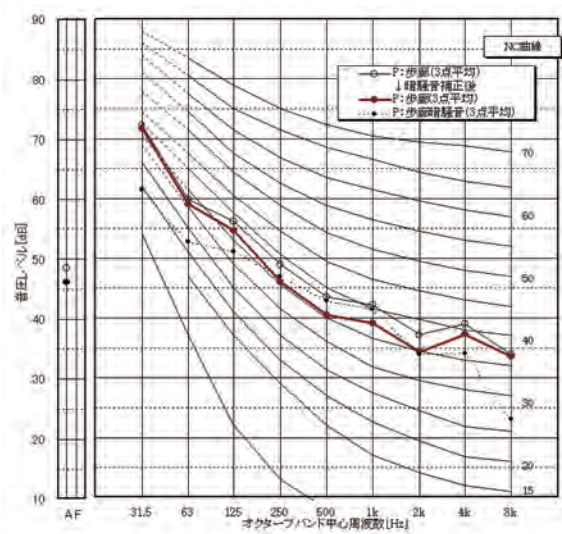


図-27 ドライエリア工事完了後測定結果

### 4.5 電気音響

#### 1) 検討事項

老朽化した機器の単なる更新ではなく、システム全体を最新のデジタル機器で構成・制御することで、音響性能と使い勝手を向上させ、電気音響設備全体のグレードアップを図った。

#### ①機器構成

電気音響設備全体を最新のデジタル機器で構成した。これにより、

(i) ノイズ混入や音質劣化の少ないクリアで聞きやすい音声を提供すること

(ii) 各機器の設定を記憶し、制御信号でリンクさせることにより、システム全体で安全かつ確実な管理・運営を可能とすること

(iii) デジタル処理部を集約することで、機器点数の少ないシンプルなシステムを実現することを目指した。

表-5 スピーカパターン制御 (音響測定時の設定パターン)

パターン No. / スピーカ	演台 スピーカ	メイン スピーカ	1 階補助スピーカ (メイン+ 70ms)	移動型 サイドスピーカ
1) 講演会 1 (演台 SP のみ)	○			
2) 講演会 2 (演台 SP 主体)	○	△ (演台+ 20ms)	△	
3) 講演会 3 (メイン SP 主体)	△	○ (同上)	○	
4) 通常拡声 (固定 SP のみ)		○	○	
5) その他 1 (固定 SP + 移動型 SP)		○	○	○
6) その他 2 (移動型 SP のみ)				○

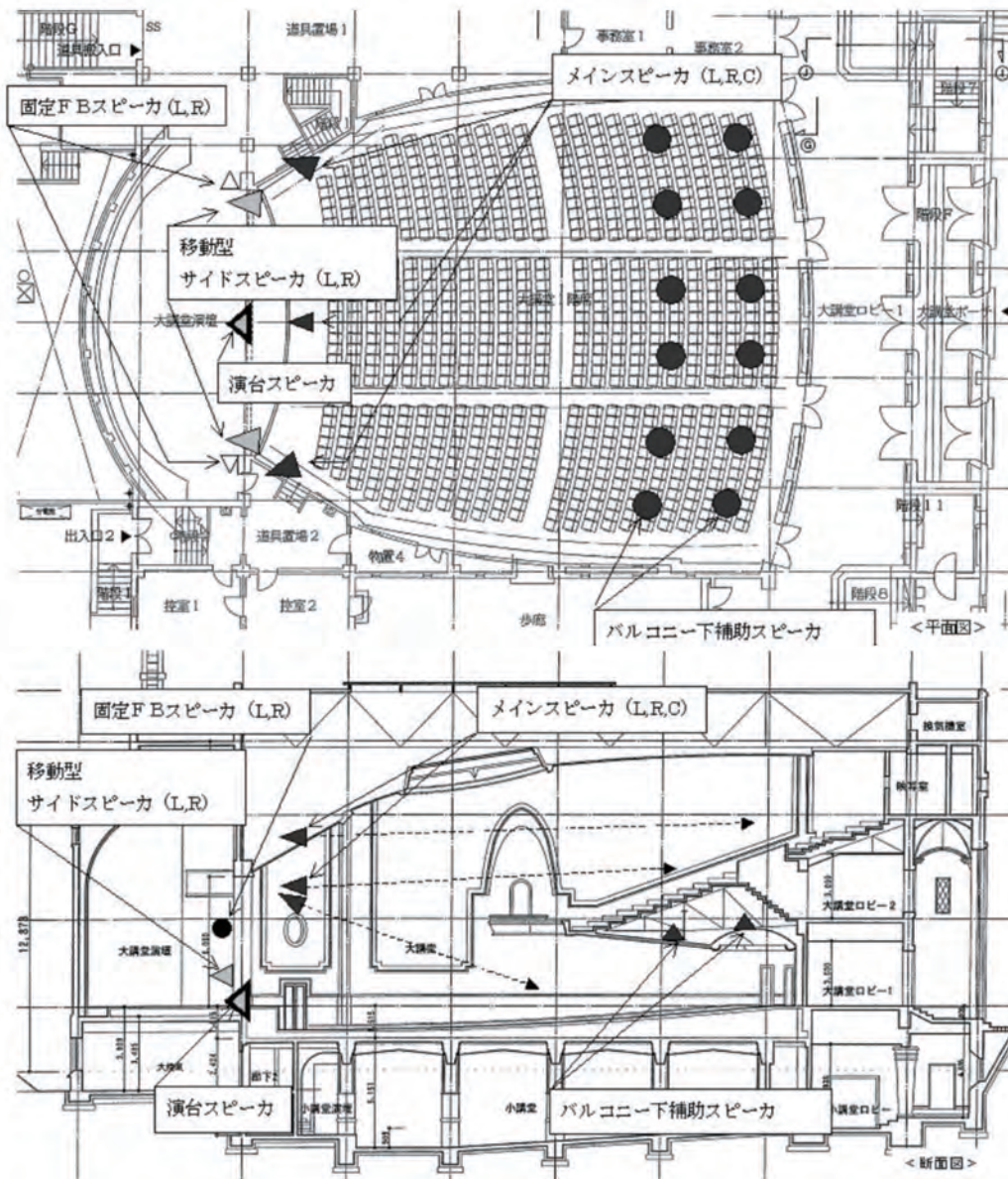


図-28 スピーカ配置計画



②音響調整卓

システムの核となる音響調整卓にはデジタル音響卓を採用した。これにより、催事ごとのパラメータの記憶・再現、オフライン作業による編集が可能であり、デジタルならではの使い勝手のよいシステム構築を実現できた。

③スピーカシステム

改修前にはプロセニウムを囲むようにメインスピーカが配置されていたので、この場所に指向制御されたスピーカを設置することにより、通常拡声時の十分な明瞭性と音場の均一性を確保可能とした。また、移動型のサイドスピーカおよびバルコニー下補助スピーカ(天井スピーカ)の追加により、各種催し物におけるさまざまな使用形態において、客席の最前列からアンダーバルコニーの最後列まで、客席全体をカバーできるよう検討した。これとは別に本講堂では、室内音響の特質(生音の大きさや明瞭性が良好)を生かして、舞台中央に演台スピーカ(前面中央にスピーカを内蔵した演台)を導入し、明瞭で自然な定位感のある拡声

を可能とし、簡単な講演会にはこれだけでも対応できるようにした。スピーカのパターン制御を表-5、スピーカ配置を図-28に示す。

④出力系統

フォールドバック系統・コンセント系統の充実を図り、利便性の向上、および将来的な用途拡大に対応した。

⑤機器レイアウト

舞台近傍にパワーアンプラックを設置することにより、音声信号の伝送ロスを最小限とし音質を確保した。

⑥利便性対応

舞台操作卓を導入し、講演会などの小規模催事において簡易なオペレートを可能とした。

2) 性能確認

大講堂の代表点(1階中通路中央M9点)における伝送周波数特性測定結果を図-29に示す。偏差がメインスピーカ使用時、移動型スピーカ使用時ともにおおむね10dB以内(125Hz~4kHz)であり、いずれのパターンも主要な周波数帯域では平坦で良好な特性を示している。

明瞭性に対応したD値特性の測定結果を図-30に示すが、大講堂では演台スピーカのみ使用するパターン1の値が72.5%(250~2kHz平均)と最も大きく、250Hz以上では電気音響未使用時(舞台中央無指向性スピーカ使用)の特性を5~15%上回っている。

また、小講堂では電気音響設備使用時の特性が74.8~66.3%(吸音スクリーンあり~なし)と、高い明瞭性が確保されている。

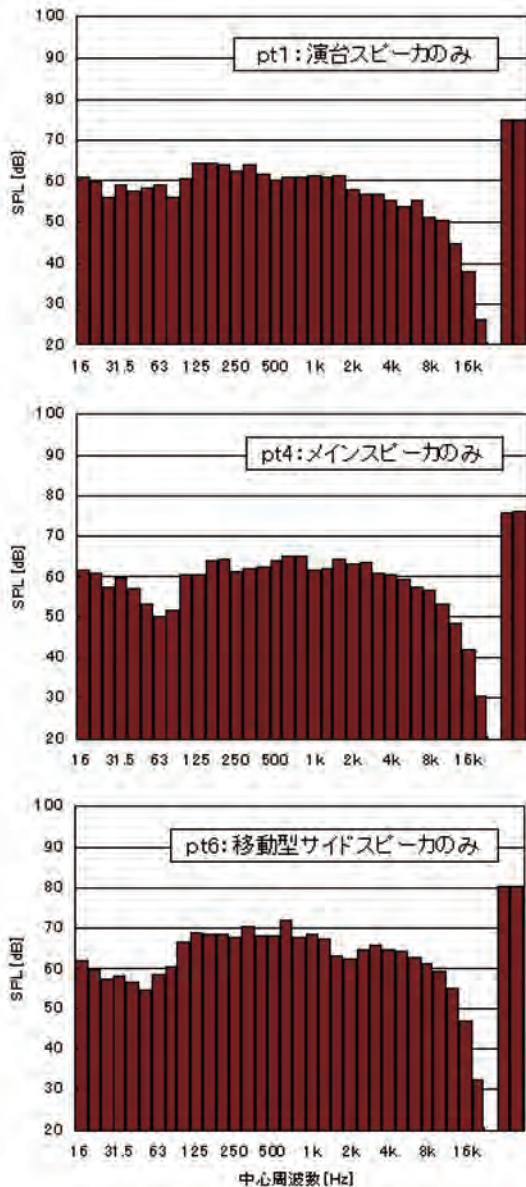


図-29 伝送周波数特性

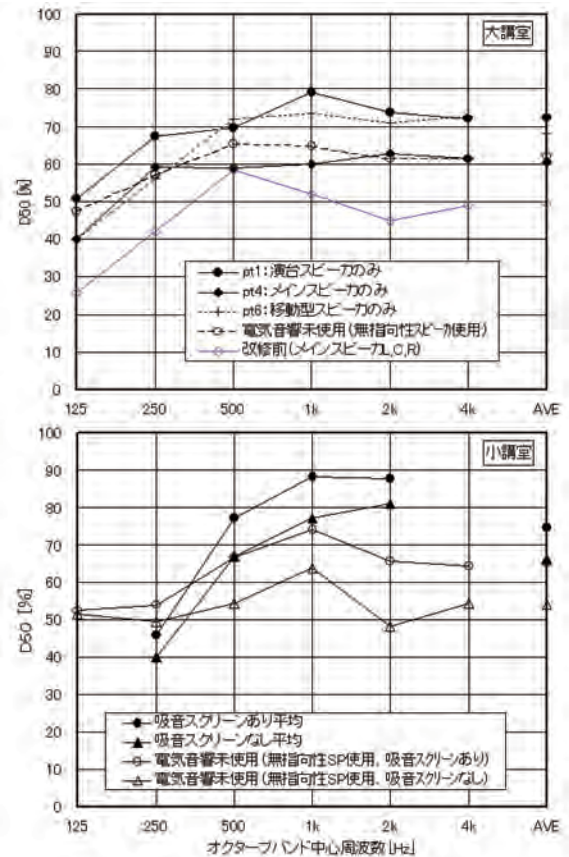


図-30 D値周波数特性

## 5. おわりに

本報告では、早稲田大学大隈記念講堂の保存再生工事において、創建時の音響検証、保存再生のための音響計画、一連の音響検討事項とその性能を紹介した。現代の音響解析技術を用いて創建時の音響コンセプトを検証したところ、生声に対する明瞭性をはじめとして室内音響の高い性能が再確認できた。この性能を保存し、遮音上の弱点克服、新たな騒音源からの騒音低減対策を行うとともに、演台スピーカを核としたスピーカシステムの導入により、改修前と比べて明瞭性・定位感の優れた音場を実現することができた。創建時の音響上の特長を生かしながら新しい多機能型ホールとして再生された大隈講堂の、一連の音響調査・管理における本報告が、今後の歴史建造物保存再生のみな

らず音響上重要な建築における音響検討・管理手法の参考となれば幸いである。

### 【参考文献】

- 1) 早稲田大学大隈記念講堂「保存再生工事報告書」,早稲田大学編,2008.3
- 2) 黒川,記念大講堂の音響的考察(その1,2),早稲田大学学報 No.330 - 331,1922.8 - 9
- 3) 佐藤武夫,オーデトリウム音響設計に就いて,通常会講演記録,1928.12
- 4) 高橋他,早稲田大学大隈講堂保存再生工事における音響計画,建音研,2007.12
- 5) 高橋他,早稲田大学大隈講堂保存再生工事における音響計画(その1,2)音講論(春),2008.3