

# 山脇学園講堂の音響設計と監理

## ACOUSTICAL DESIGN AND SUPERVISION OF YAMAWAKI GAKUEN AUDITORIUM

土屋 裕 造\*<sup>1</sup>, 小 泉 穂 高\*<sup>2</sup>, 堀 内 信 男\*<sup>3</sup>, 有 森 憲 治\*<sup>3</sup>, 服 部 道 信\*<sup>3</sup>  
 Yuzo TSUCHIYA, Hodaka KOIZUMI, Nobuo HORIUCHI, Kenji ARIMORI and Michinobu HATTORI

In the school improvement project of the Yamawaki junior high and high schools to celebrate the 110th anniversary, the auditorium was built in the new school building, and we were involved in the acoustical design and supervision. In the plan of this auditorium, we were conscious of the acoustic of the old auditorium, taking in the owner's requests with some construction restrictions. This paper is reported on the acoustical design, the supervision related to acoustic quality during construction, and acoustic characteristics measured at the completion time of this auditorium.

**Keywords :** School auditorium, Acoustic reflective form, Comparison with the old auditorium, Chair absorption, Reverberation modification

学校講堂 音響反射形状 旧講堂比較 椅子吸音 残響可変

### 1. はじめに

開校 110 周年を迎える山脇学園中学校高等学校の校舎整備事業において新校舎の建設に伴い講堂が計画され、筆者らがその音響設計に携わった。新講堂の計画では建築的な制限がある中で建築主の要望を取り入れつつ旧講堂の音響を意識した。本報では新講堂の設計時の音響計画、施工時の音響品質に関わる監理、及び竣工測定による音響特性について報告する。

### 2. 新講堂の音響検討条件

新講堂の諸元を表-1、平面図・断面図及び仕上を図-1、内観を写真-1 に示す。1968 年竣工の旧講堂は、音響の観点で天井及び側壁形状等の検討が行われており<sup>1)</sup>、室内音響は音楽の生演奏聴取を中心に良好であった。参考として 7 頁に旧講堂の諸元を参考表-1、平面図・断面図及び仕上を参考図-1、後方の内観を参考写真-1 に示す。新講堂は式典における音声の明瞭性確保、下階教室に対する軽量床衝撃音（説明会等使用時の歩行音）の低減が命題であり、固定の劇場用椅子、歩行通路部分のタイルカーペット、エコー低減のための後壁有孔板の採用など内装に吸音材料が使用されることにより残響時間が抑制傾向となることは明らかであった。その一方で旧講堂のような長めの響きも期待されたため、必要な吸音性内装の使用や限られた形状、容積といった制約の中で聴感上の響きが長くなる工夫をした。

### 3. 設計時の検討

#### 3.1 形状の決定

新講堂は最上階(5, 6 階)に位置し、高度斜線制限と意匠性等の関係から短手方向の屋根側方が斜めであり、容積確保のために天井を屋根に沿った形とする必要があった。そのため旧講堂を参考とする長めの残響感が得られるような天井形状を幾何音響解析<sup>2)</sup>により検討した。図-2 に音発生から 20, 200, 500 msec.後の短手断面の反射性状について、旧講堂、側天井斜め形状案、新講堂採用案を比較並列して示す。ステージ中央音源から粒状に模擬した音が球状に広がり壁面に鏡面反射する状況を解析して可視化し、空間内の粒の残存状態と経路により残響やフラッターエコーの様子を観察する。床は抜けた状態とす

表-1 新講堂諸元

建築主	学校法人山脇学園	
工期(1期)	2012年10月～2013年10月	
設計・施工	戸田建設株式会社	
延べ面積(1期)	5,370 m <sup>2</sup>	
構造	地上6階 RC造 講堂柱 SRC造, 屋根S造	
講堂	容積	5,950 m <sup>3</sup>
	表面積	3,700 m <sup>2</sup>
	座席	900席 V/N = 6.6 m <sup>3</sup> /人 座背メット張クッション, キャビティ有

\*1 戸田建設開発センター

\*2 戸田建設開発センター 修士(工学)

\*3 戸田建設株式会社計画設計部

Research and Development Center, TODA CORPORATION

Research and Development Center, TODA CORPORATION, M.Eng.

Planning Design Dept., TODA CORPORATION

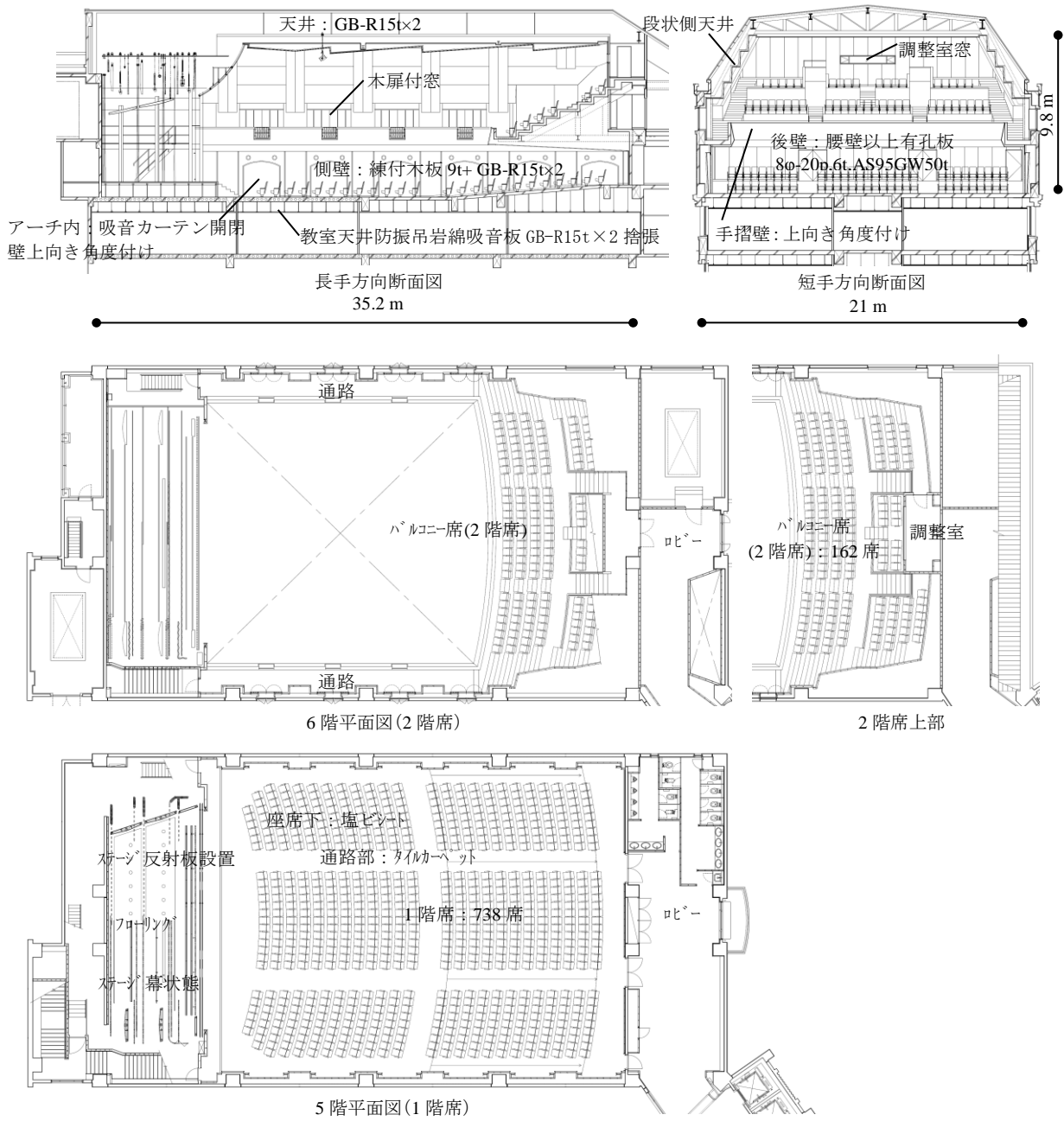


図-1 新講堂平面図・断面図 及び 仕上



後方



斜め前方 (ステージ側)

写真-1 新講堂内観

ることで、床に到来した音が椅子によって吸音されたことを粒の透過、消滅で表す。旧講堂は側壁に傾斜があり音響障害となるフラッターエコーがなく音が往復反射して長く残る。これに対し、側天井斜め形状案は天井の一次反射音が床に到達して椅子に吸音されるので音が残りにくい。また水平方向に平行な複数の経路がみられるが、これは平行な側壁が原因として発生するフラッターエコーである。そこで段状天井を採用し、更に1階席側壁及びバルコニー手摺壁を上向き角度付形状にしたところ、フラッターエコーはなく音が長く残ることが確認できたためこの形状を採用の基本案とした。形状の具体的な位置・状況について図-3, 4, 写真-2 に示す。

長手方向の天井形状は旧講堂の形状を踏襲し、座席全域に対する反射音の到来を考慮した。

### 3.2 残響時間の設定とシミュレーション試聴確認

残響時間の目標値は旧講堂幕設置空席実測から計算した 500 Hz 満席時の予測値である 1.0 秒とし（参考図-2 参照）、それを基に新講堂反射板設置空席の残響時間を検討した。ホールなどの拡散音場に近い室は通常 Eyring-Knudsen の残響理論による予測式により残響時間を計算することが多いが、今回 3.1 項の検討からこの値より長めとなることを期待した。空席 500 Hz において予測式の残響時間 1.3 秒に対し、幾何音響解析<sup>2)</sup>で計算された反射音を分析した残響時

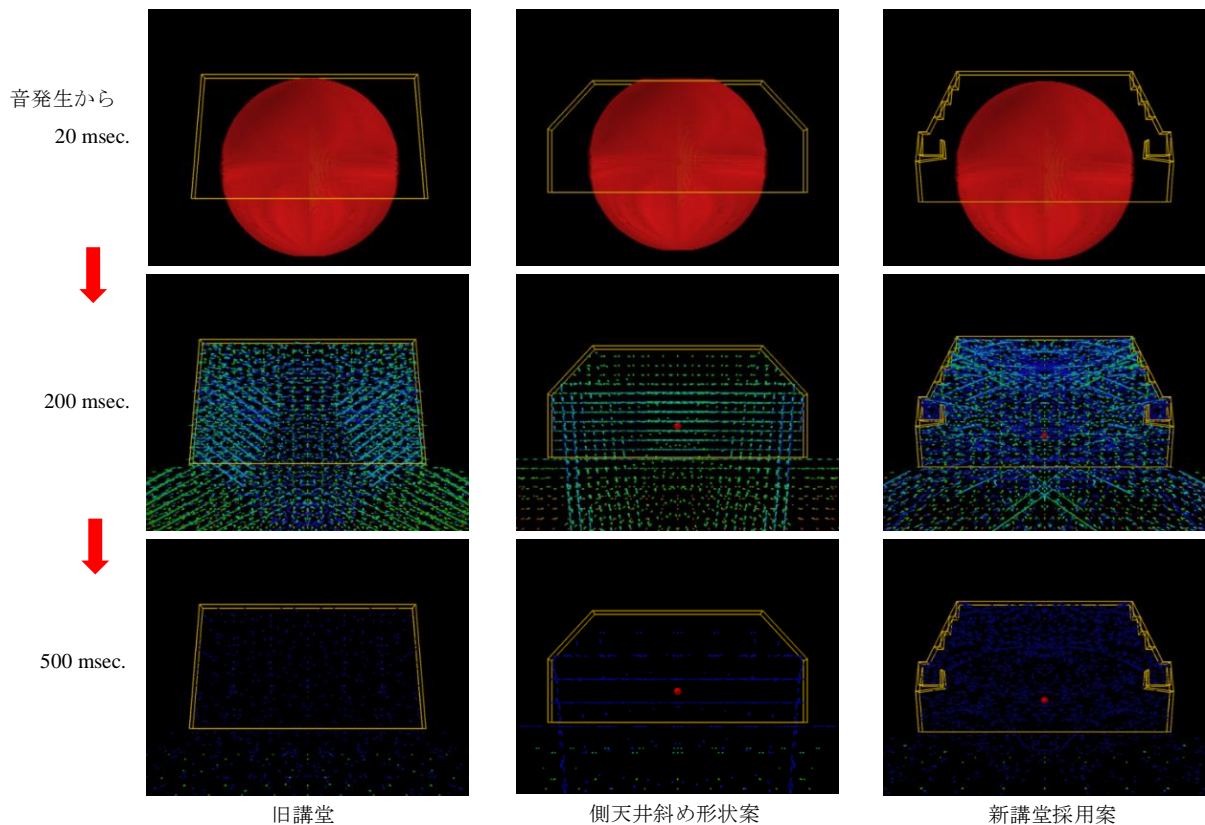


図-2 短手方向反射音解析結果

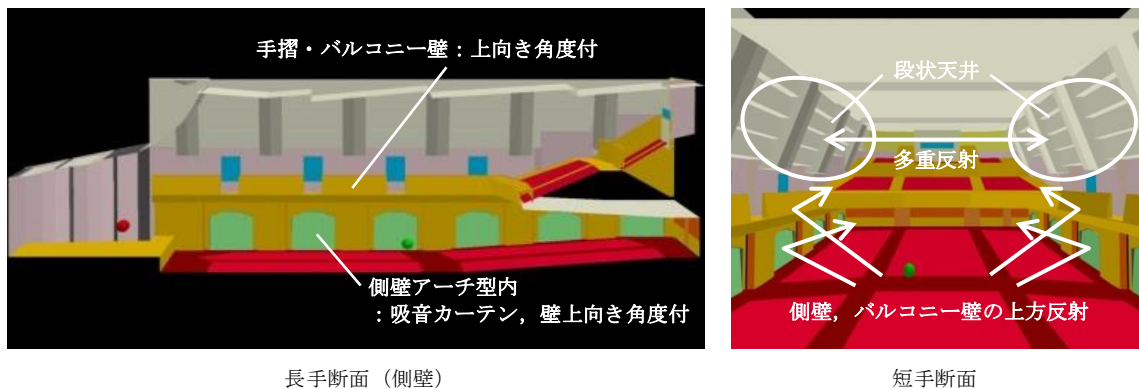


図-3 短手方向天井・側壁検討

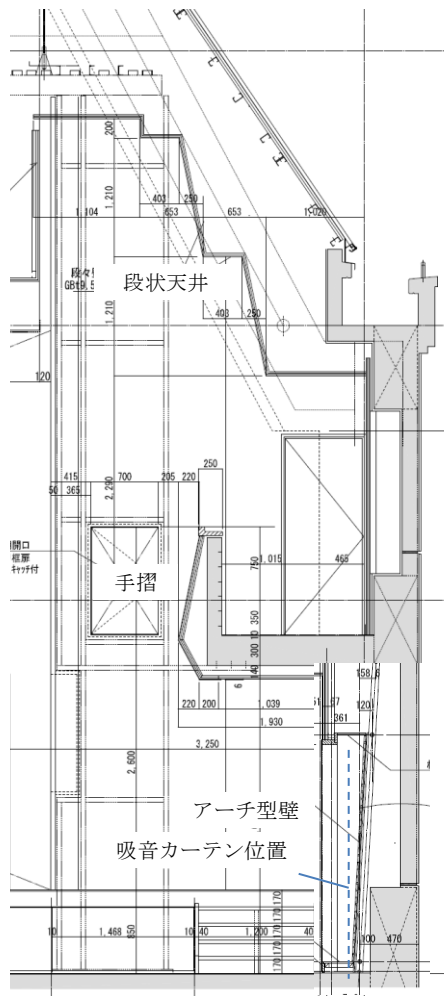


図-4 段状天井・手摺・アーチ型壁詳細図



写真-2 アーチ型壁  
壁上向き角度付、吸音カーテン開閉による残響可変

間は1.4秒と約0.1秒長くなる結果が得られた。

なお今回も他のホール物件と同様、シミュレーション<sup>3)</sup>により建築主に対する試聴確認を行った。今回は新旧講堂の響きを比較して建築主に新講堂の響きの妥当性について納得していただき、その上で施工を進めている。

#### 4 施工時の検討

今回新講堂の音響監理を通して今後の参考となる音響上の知見を得たのでそれについて述べる。

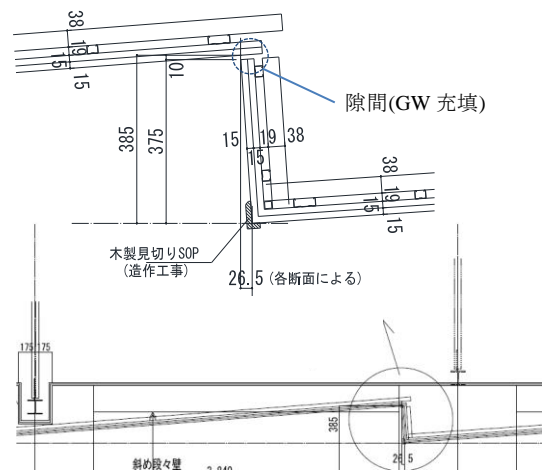


図-5 天井段差部詳細図

#### 4.1 行政指導による緩衝隙間の影響

耐震基準の変更に伴い施工中に行政より吊り天井と他部位の緩衝を指導されたため、隙間を設け整形グラスウールを充填した。天井詳細図の一部を図-5に示す。吸音部分の増加による残響時間の減少が懸念されたが、5項測定結果から残響時間の予測と差が小さいことがわかり、緩衝のために設ける程度の隙間は残響時間に対して影響が小さいと考えられる。

#### 4.2 椅子等価吸音面積

設計採用椅子の等価吸音面積において、採用元メーカーからの受領データが残響時間予測に採用した文献データ<sup>4)</sup>と大きく乖離することが判明した。そこで残響時間予測精度向上と今後の採用データの妥当性確認のためJIS A 1409に準じた椅子の等価吸音面積測定を行った。使用残響室は当開発センター環境棟第2残響室<sup>5)</sup>である。

椅子の等価吸音面積はホール、講堂など床の殆どを椅子が占めるような室全体の等価吸音面積の約1/3を占め、室の残響時間を予測する上で重要なデータとなるが、椅子の仕様はホール毎に異なることが多く、その場合椅子の等価吸音面積も異なる。設計段階における残響時間予測は文献または実績のデータを入力し、椅子のサンプルができた段階でその等価吸音面積を測定確認し、設計段階と乖離が生じる場合目標残響時間に適応するために内装で調整するなどの処置が採られることが通常である。

JIS における等価吸音面積の算出式は次式に示される。

$$A = 55.3 \frac{V}{c} \left[ \frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right] \quad (1)$$

$$\alpha_s = A/S \quad (2)$$

ここで、A：試料の等価吸音面積(m<sup>2</sup>)、V：試料を入れない状態における残響室の容積(m<sup>3</sup>)、c：空気中の音速 c = 331 + 0.6t t：気温(°C)、T<sub>1</sub>：試料を入れない状態における残響室の残響時間(s)、T<sub>2</sub>：試料を入れた状態における残響室の残響時間(s)、α<sub>s</sub>：平面

吸音材料の吸音率,  $S$ : 試料の面積( $m^2$ )である. 椅子のような個別吸音体は  $A$  を試験体の数で除し, 1 試験体当たりの等価吸音面積で表す. 椅子測定の場合は「その配列どおりに設置する」, 「配列の端は反射性の材料で覆い」と JIS に明記されており, 当開発センターではその覆いにウェル (囲い) を用いている.  $T_1$  に関する「試料を入れない状態」における定義が JIS では明記されていないが, 当開発センターでは今まで残響室内にウェルのみがある状態 (試料はなし) を「試料を入れない状態」としてきた.

椅子空席 1 席当たりの等価吸音面積を図-6, 測定の様子を写真-3 に示す. 測定結果をみると, 文献データに近いのは「試料を入れない状態」を「ウェルのみあり」とした場合であり, メーカーデータは「試料を入れない状態」を完全な空室状態とした場合に近似した. 一方で中間測定として講堂の内装検証のため本講堂椅子設置前の残響時間を測定したが, これが椅子設置前後を測定する機会となり, JIS による椅子の等価吸音面積測定値の妥当性を検証した. 講堂残響時間実測からの椅子 1 席当たり等価吸音面積計算値は JIS 測定における残響室の「試料を入れない状態」を「ウェルのみあり」とした場合の値に近似する結果となった. 以上により, 椅子の等価吸音面積はその実験室測定に関して残響室の「試料を入れない状態」を「ウェルのみあり」とした場合に室の残響時間を予測する上で実測と対応することが示唆されたが, 他機関の測定例も考慮し, その対応に

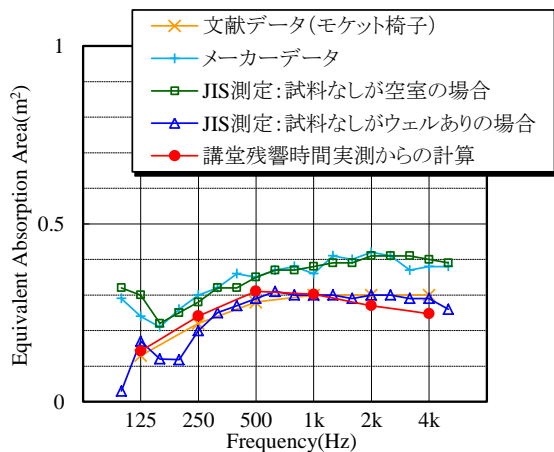


図-6 椅子空席 1 席当たりの等価吸音面積各条件の比較



写真-3 椅子等価吸音面積測定の様子 (環境棟残響室 椅子設置ウェルあり)

ついて更なる検証が必要と考えている.

### 4.3 カーテン吸音率

新講堂の側壁アーチ型内に設置するカーテンは残響可変を期待しているものであり, その吸音率が大きいほどその開閉によって室の残響時間の差が大きくなり, すなわち残響可変としての効果が大きくなる. メーカーの製品には「吸音カーテン」がありその吸音率データも存在するが, 今回採用が予定されるカーテンはその色調により選定され, 吸音が期待できそうな材質ではあるものの「吸音カーテン」とは記載されていず吸音率も不明であった. そこでカーテンについてもその採否を判断するため JIS A 1409 に準じた吸音測定を行った.

カーテンの吸音データは測定された等価吸音面積を面積で除した吸音率として示される. 測定時のカーテンは当開発センター音響実験棟残響室<sup>6)7)</sup>の開口部囲みを利用して縦にぶら下げて設置した. カーテンの吸音率はその空気層と襞が大きく影響を及ぼすが, この開口部が 4.2 項のウェルに相当し, 側方入射音を遮断して側部の余分な吸音を排除し表面の吸音のみの測定を可能とすることから, カーテンの空気層と襞の違いを検討する際に有用であった.

採用カーテンと同一メーカーが提供した吸音カーテンの吸音率測定結果を文献データ<sup>4)</sup>と比較して図

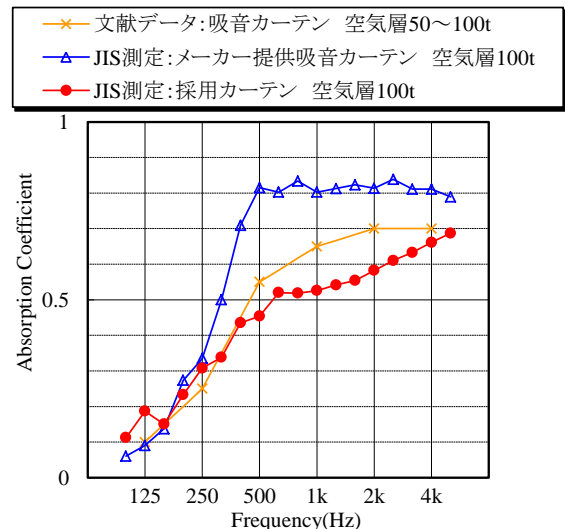


図-7 吸音カーテン吸音率



写真-4 吸音カーテン吸音率測定の様子 (音響実験棟残響室 採用カーテン)

ー7, 測定の様子を写真-4 に示す. 採用予定カーテンの吸音率は文献の吸音カーテンより 500 Hz 以上の高音域で若干小さいが近い値を示し, メーカー提供の吸音カーテン設置の場合の予測と比べて残響可変による残響時間の差は小さくなるものの, 設計段階の残響時間予測と大差はなく残響可変の効果があると判断されたため採用が決定した.

### 5 竣工測定における音響特性

竣工時における新講堂の残響時間測定結果を図-8 に示す. 空席 500 Hz においてステージ反射板設置・カーテン開時 1.4 秒, 幕状態・吸音カーテン閉時 1.1 秒と残響可変の効果が得られ, 予測とも一致した. 音源ステージ, 受音点中央席のエコータイムパターンを図-9 に示すが, 特異なエコーも検知されず減衰状況は良好である. 幕状態・吸音カーテン閉の STI 値 (音声伝送の物理指標) は 2 階席を含めた主要箇所 で 0.6 以上と生音声でも明瞭性を確保できることを確認した. 下階教室に対する室間音圧レベル差は  $Dr-55$  と講堂-教室間として十分な性能を示した. 床衝撃音遮断性能は図-10 に示す通り良好であるが, 特に講堂座席通路部分の軽量床衝撃音が  $L_{i,r,L}-30$  以下と高い遮断性能を示し, 建築主要望を十分に満足している.

### 6 おわりに

以上, 竣工測定により所期音響性能を満足していることを確認したが, 竣工後のこけら落とし演奏会, 学園祭を経て皆様から好評をいただいていることから, 各音響性能の目標設定及び検討過程は必要かつ十分であったと考えている.

### 謝辞

計画, 検討の過程でご協力いただいた山脇学園理事長様始め関係者の皆様, 及び戸田建設施工関係者に深く謝意を表します.

### 参考文献

- 1) 宮尾他, 学校講堂の音響設計一例, 日本建築学会関東支部第 40 回学術研究発表会, pp.10-108,1969.
- 2) 室内音響解析ソフト RIMAGE, 日東紡音響エンジニアリング
- 3) 大阪谷他, 音場・騒音統合シミュレーションシステムの開発, 日本建築学会学術講演梗概集, A-2, 11019, pp.443-444, 2007.8.
- 4) 建築の音環境設計<新訂版>, 日本建築学会設計計画パンフレット 4, 彰国社刊
- 5) 渡邊他, 戸田建設(株)技術研究所音響実験施設の音響特性, 日本建築学会大会梗概集, 計画系, 4049, pp.97-98, 1984.10.
- 6) 土屋他, 戸田建設新音響実験施設の音響特性, 日本音響学会秋季研究発表会, 2-P-b8, 2012.9.
- 7) 土屋, 戸田建設技術研究所音響実験棟の音響特性, 音響技術 No.131, pp.59-63, 2013.3

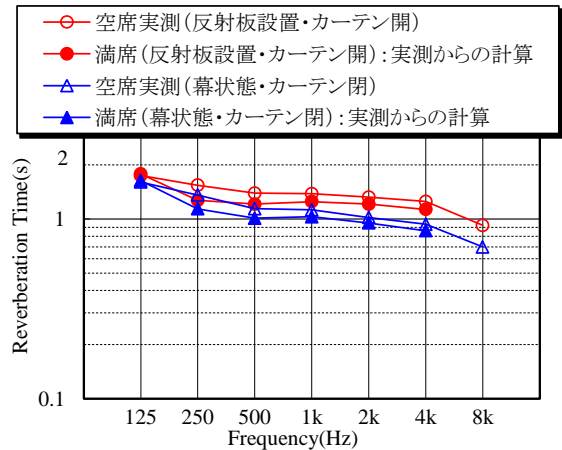


図-8 新講堂残響時間

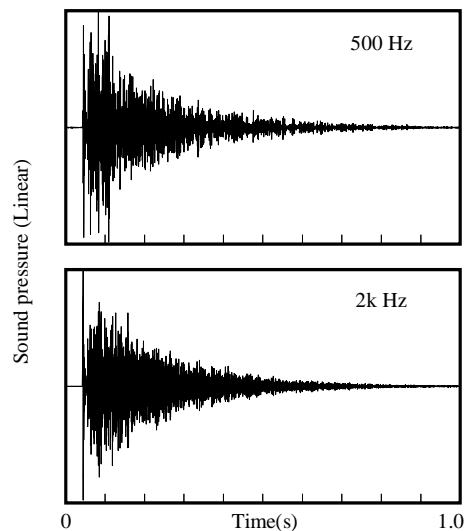


図-9 新講堂エコータイムパターン  
ステージ反射板設置・カーテン開  
音源ステージ, 受音中央席

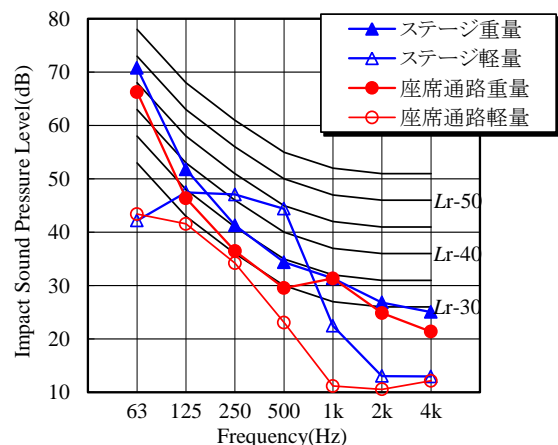


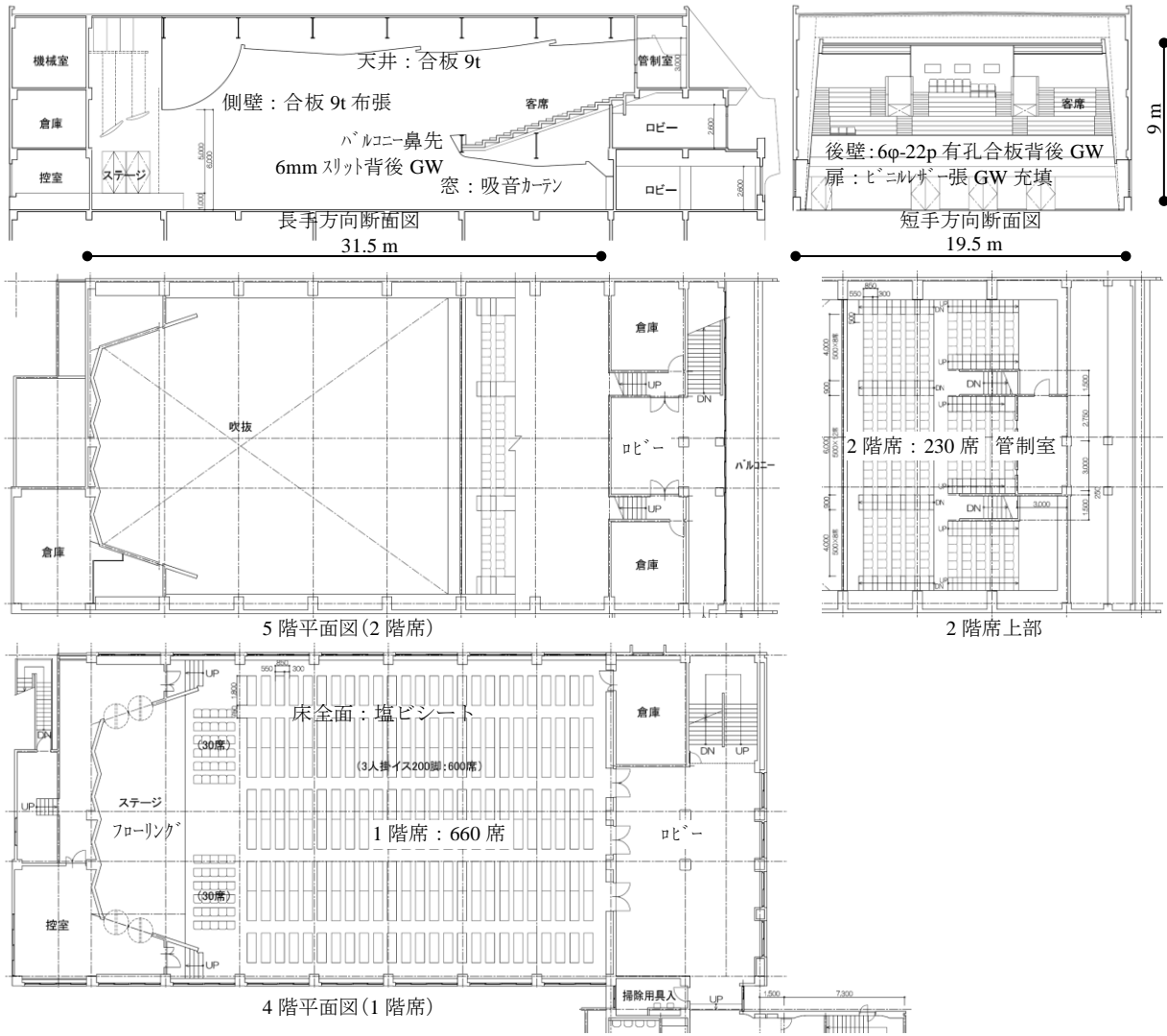
図-10 新講堂から下階教室に対する床衝撃音遮断性能

<参考>旧講堂

天井形状は光線トレース法を用いた模型実験を行い、客席に対する均一な音圧分布の検討を行うことにより決定した。また側壁を傾斜させて側壁間のフラッターエコーを低減する、後壁・バルコニー鼻先に有孔板（吸音）を設けてステージに対する反射音を緩和する等の音響設計が行われた。参考図-2の空席残響時間は解体前の当開発センター測定値であるが、文献<sup>1)</sup>記載の残響時間と概ね一致する。

参考表-1 旧講堂諸元

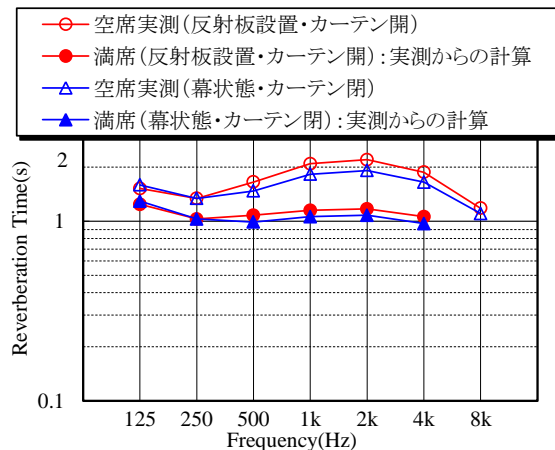
工期	1967年4月～1968年10月	
設計・施工	戸田建設株式会社	
構造	地上6階 RC造	
講堂	容積	4,720 m <sup>3</sup>
	表面積	3,700 m <sup>2</sup>
	座席	890席 V/N = 5.3 m <sup>3</sup> /人 1階席可動長椅子、座背ビニルサ <sup>ー</sup> 張クッション 2階席固定木製椅子



参考図-1 旧講堂平面図・断面図 及び 仕上



参考写真-1 旧講堂内観（後方）



参考図-2 旧講堂残響時間