

平成 21 年 6 月 15 日現在

研究種目：基盤研究 (C)  
 研究期間：2006～2008  
 課題番号：18560584  
 研究課題名（和文）空間の幾何的対称性に着目したコンサートホール音場の性能評価に関する研究  
 研究課題名（英文）A study on acoustic quality of concert auditoria from the point of view of symmetrical features of room shape  
 研究代表者  
 古屋 浩 (FURUYA HIROSHI)  
 九州共立大学・工学部・教授  
 研究者番号：00238700

## 研究成果の概要：

コンサートホールの室形状は、音の良し悪しを決定する最も基本的かつ重要な要因である。ホール音場の物理特性を空間の幾何対称性との関連から分析し、非対称ホール空間の音響的可能性について検討した。幾何音響シミュレーションおよび模型実験の結果から、非対称形状は反射音レベルの距離減衰量が小さく音圧分布特性が改善される効果を有していることを明らかにし、非対称形状を視野に入れた設計が建築計画上の選択肢拡大に寄与することを示した。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	2,200,000	0	2,200,000
2007年度	500,000	150,000	650,000
2008年度	400,000	120,000	520,000
年度			
年度			
総計	3,100,000	270,000	3,370,000

研究分野：建築環境工学

科研費の分科・細目：建築学・建築環境設備

キーワード：空間音響，形状設計，コンサートホール，音場評価，非対称形状

## 1. 研究開始当初の背景

空間の「幾何的特性」、すなわち室の形状は、音場の性質を決定する最も基本的かつ重要な要因である。コンサートホールの建築計画において、特に室の平面形状は、経済性、使い勝手（例えば演者による室中央の視認性など）および動線計画上の問題等から、線対称形（以下、対称形と呼ぶ）を前提に検討されることが多い。すなわち、非対称或いは不整形の平面形を有するオーデトリウムは、そのユニークな平面形で有名なリーダーホール (Stuttgart, Germany) などの数例に見られるだけでその数は多くない。

一方、音響設計の立場からは、極端な不整

形を除き非対称形状を否定する理由は見あたらず、むしろ定性的には音響拡散等の観点から非常に興味深い形態であるといえる。しかしながら、これまでコンサートホール等の大規模空間の計画においては、室全体の基本形状や有効な反射音の確保を意図した局所的な反射壁や拡散壁に関して、空間の非対称性を積極的に意識して設計された実例は少なく、また空間の対称性に着目し室形状と音場特性の関連について系統的な検討を行った研究例も見あたらない。

## 2. 研究の目的

本研究は、コンサートホールの音響物理特

性(反射音レベル等の空間分布性状)を空間の幾何的対称性との関連という視点から分析し、非対称空間の音響的可能性について明らかにするとともに、建築計画上の選択肢拡大への寄与に資する形状評価指針を提供することを目的とする。

### 3. 研究の方法

#### (1) 幾何音響解析

音線法と虚像法のハイブリッド手法である Cone Beam Method (放射音線本数: 52, 502 本, 反射次数: 9 次) を用いてホールモデル内の観測点におけるインパルス応答を求めた。得られたインパルス応答から、初期/後期反射音エネルギー比  $C_{80}$ , 初期残響時間 EDT, 側方反射音エネルギー率 LF, 並びに Strength G, 初期音レベル  $G_{80}(t=0-80 \text{ ms})$ , 後期音レベル GL ( $t=80-\infty \text{ ms}$ ) を算出した。音源は舞台全域に 8 個 (s1~s8) および代表点位置に 1 個 (s0) の無指向性音源を設定し、観測点は客席内全域に  $2\text{m} \times 2\text{m}$  の格子状に 153~199 点を設けた。周波数範囲は中高音域 (250~2k Hz, 1/1 オクターブバンド幅) を対象とした。

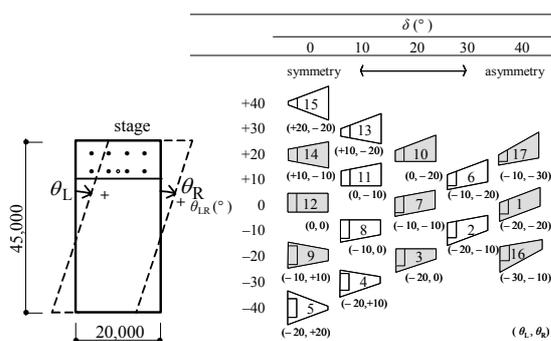
#### (2) 音響縮尺模型実験

1/20 縮尺のホール模型内にて、スパーク放電パルスを音源とし、1/4in. 無指向性マイクロフォンによりインパルス応答を測定した (サンプリング周波数 128kHz, 同期加算 128 回)。得られたインパルス応答に 5k~40kHz (オクターブバンド, 実物換算 250~2kHz) のフィルタリング処理を行った後、得られた時間応答波形から上述の室内音響物理指標を算出した。観測点は 24~32 点である。測定装置の概要を図 1 に示す。

#### (3) 基本形状モデル

収容人員 1500 名規模のコンサートホールを想定し、表 1 に示すようにシューボックス型平面形を基準にホール両側壁 (傾斜角:  $\theta_L, \theta_R$ ) を  $-30 \sim +20^\circ$  の範囲で傾斜させた計 17 タイプの 3 次元モデルを対象とした。全モデルとも床面積 ( $900\text{m}^2$ )、天井高 (18m) および残響時間はほぼ一定である。また、対称/非対称の違いを表現するパラメータとして  $\delta = |\theta_L + \theta_R|$  ( $\delta = 0^\circ$ : 対称形,  $\delta \neq 0^\circ$ : 非対称

表 1 基本形状モデル ( $\delta = |\theta_L + \theta_R|$ )



形) を、両側壁の相対開き角度を  $\theta_{LR} = \theta_L - \theta_R$  ( $\theta_{LR} > 0^\circ$ : 扇形,  $\theta_{LR} < 0^\circ$ : 逆扇形) により各々定義した。例えば、Type 9, 3, 16 は、 $\theta_{LR}$  を  $-20^\circ$  で、Type 12, 7, 1 は  $0^\circ$  で、Type 14, 10, 17 は  $+20^\circ$  で各々一定に保ちながら  $\delta$  を変化 (対称  $\rightarrow$  非対称) させた形状群となる。

### 4. 研究成果

コンサートホール空間の幾何的対称性という視点から、室の基本形状と音場特性の関連について、一連の幾何音響解析並びに音響縮尺模型実験手法を用い検討した。結果を以下にまとめる。

(1) 第一に、ホール内壁を平壁にて構成する単純形状モデルを対象として幾何音響解析を実施した。その結果、非対称形状では対称形状に比べ反射音レベルの距離減衰量が小さく、特に音圧レベルの物理指標である Strength G 並びに後期音レベル GL の空間分布特性が改善される効果を示した (図 2, 3)。

(2) 第二に、床面以外の内装面を全て反射性とした形状モデルについて考察することにより、(1) の結果が吸音壁面の影響によるものではなく室形のみに影響されていることを検証した。また、形状間における音圧レベルの空間分布特性の差異は、概ね 150ms 以降に到来する反射音数の増減に起因していることを明らかにした (図 4, 5)。

(3) 第三に、側壁および天井面に凹凸のある拡散形状モデルを対象に検討した。その結果から、単純形状モデルの場合と同様に、非対称形状が音圧分布特性の改善効果を有することを示した。

(4) 第四に、壁面における散乱を考慮した音響散乱モデルを対象に乱反射率の変化による音圧分布特性への影響並びに室の基本形状との関連について考察した。その結果から、音響散乱モデルにおいても上記と同様の結果が得られること、乱反射率の値が大きくなるほど音圧レベルは低下し 0.50 のときに最小となること、また室内平均乱反射率が概ね 0.50 を超えると室の基本形状の違いによる音圧分布特性の差は小さくなり形状固有の改善効果が徐々に見えなくなることを等を確認した (図 6)。

(5) 最後に、単純形状モデル並びに拡散形状モデルを対象に音響縮尺模型実験を実施し、幾何音響解析によって得られた上述の結果が同様に得られることを検証した (図 7)。すなわち、非対称形状は対称形状に比べ反射音レベルの距離減衰量が小さく音圧分布特性が改善される効果を有していることを示した。

以上の結果は、非対称平面形を視野に入れたコンサートホールの形状設計が音場分布改善のために有効であることを示すものである。

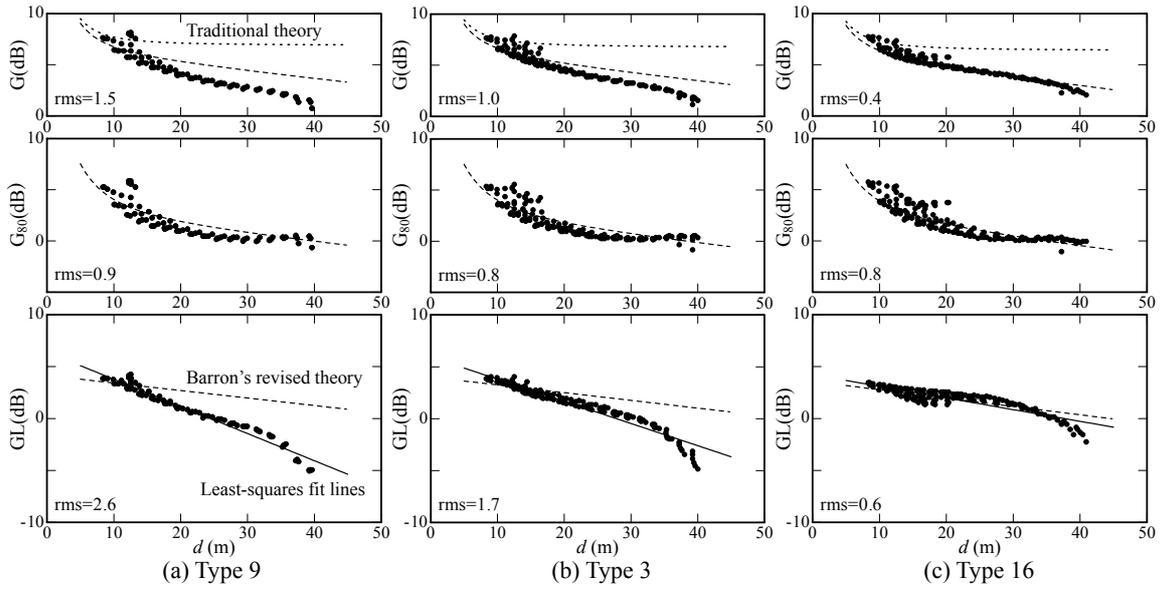


図2 音圧レベル分布の解析結果 ( $\theta_{LR}=20^\circ$ )

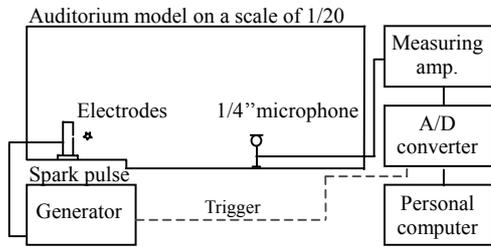


図1 音響縮尺模型実験装置

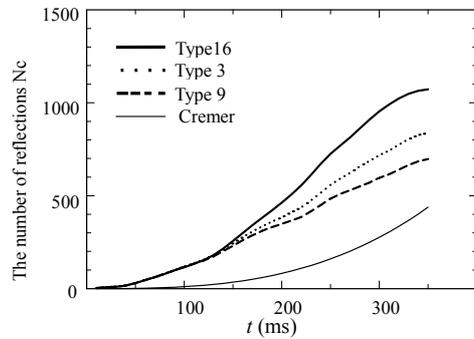


図5 累積幾何反射音数  $N_c$  ( $\theta_{LR}=-20^\circ$ )

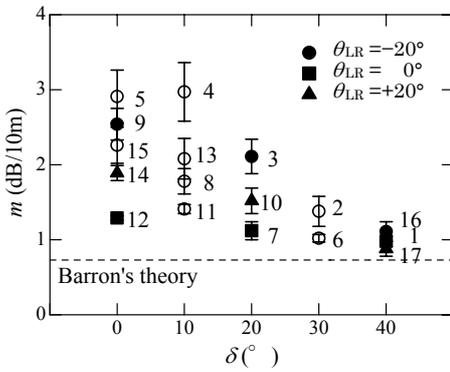


図3 GLの距離減衰率  $m$  と非対称度  $\delta$  の関係

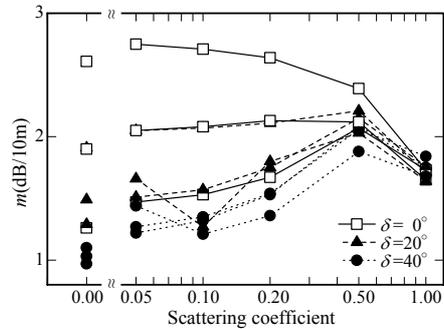


図6 GLの距離減衰率  $m$  と乱反射率の関係

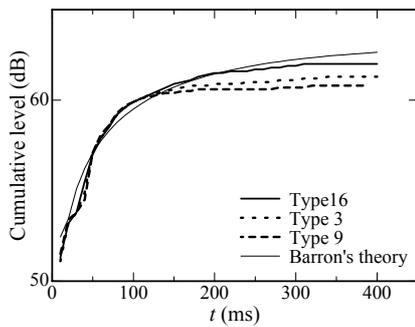


図4 累積反射エネルギー曲線

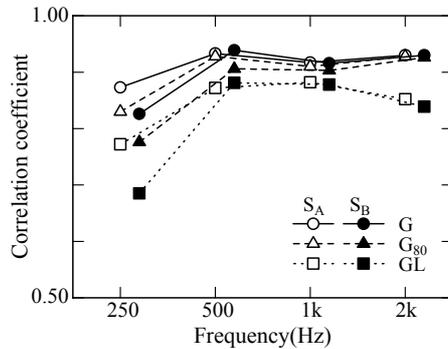


図7 解析値と実験値の比較(相関係数)

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 7 件)

- ① 古澤眸, 片野坂好子, 古屋浩, オーディトリウム空間の幾何的対称性と音場特性に関する研究, 九州共立大学総合研究所紀要, 第 2 号, 57-70, 2009, 査読有
- ② 古澤眸, 古屋浩, 非対称ホール空間の音場特性に関する研究 その 6 反射音レベルに関する音響模型実験, 九州共立大学工学部研究報告, 第 33 号, 55-60, 2009, 査読無
- ③ 古澤眸, 古屋浩, オーディトリウムにおける音響散乱が音圧分布特性に与える影響, 九州共立大学工学部研究報告, 第 33 号, 61-66, 2009, 査読無
- ④ 片野坂好子, 古屋浩, オーディトリウム空間の幾何的対称性と音場特性に関する研究—拡散形状モデルによる幾何音響解析—, 九州共立大学総合研究所紀要, 第 1 号, 95-100, 2008, 査読無
- ⑤ 片野坂好子, 古屋浩, 非対称ホール空間の音場特性に関する研究 その 4 拡散形状モデルに関する検討, 九州共立大学工学部研究報告, 第 32 号, 7-14, 2008, 査読無
- ⑥ 古澤眸, 古屋浩, 非対称ホール空間の音場特性に関する研究 その 5 断面形状モデルに関する検討, 九州共立大学工学部研究報告, 第 32 号, 15-19, 2008, 査読無
- ⑦ 古屋浩, 安藤美月, 非対称ホール空間の音場特性に関する研究 その 3 反射音レベル分布に関する幾何音響的考察, 九州共立大学工学部研究報告, 第 31 号, 23-27, 2007, 査読無

[学会発表] (計 11 件)

- ① 古澤眸, 古屋浩, ホール空間の対称性と音場特性に関する研究 その 6 音響縮尺模型実験による検証, 日本建築学会九州支部研究報告, 2009. 3. 8, 琉球大学(沖縄)
- ② 古澤眸, 古屋浩, 非対称ホール空間の音場特性に関する検討 (その 5) 散乱モデルにおける音圧レベル分布特性, 日本建築学会学術講演会, 2008. 9. 20, 広島大学(広島)
- ③ 古澤眸, 古屋浩, 非対称形状を有するホールの音響特性 (その 3) 散乱モデルにおける検討, 日本音響学会秋季研究発表会, 2008. 9. 11, 九州大学(福岡)
- ④ 片野坂好子, 古澤眸, 江淵克志, 古屋浩, ホール空間の対称性と音場特性に関する研究 その 5 散乱モデルに関する検討, 日本建築学会九州支部研究報告, 2008.

3. 2, 崇城大学(熊本)

- ⑤ 古澤眸, 片野坂好子, 江淵克志, 古屋浩, ホール空間の対称性と音場特性に関する研究 その 4 断面形状モデルに関する検討, 日本建築学会九州支部研究報告, 2008. 3. 2, 崇城大学(熊本)
- ⑥ 片野坂好子, 古澤眸, 江淵克志, 古屋浩, 非対称形状を有するホールの音響特性 (その 1) 拡散壁モデルにおける検討, 日本音響学会秋季研究発表会, 2007. 9. 19, 山梨大学(山梨)
- ⑦ 古澤眸, 片野坂好子, 江淵克志, 古屋浩, 非対称形状を有するホールの音響特性 (その 2) 断面形状に関する検討, 日本音響学会秋季研究発表会, 2007. 9. 19, 山梨大学(山梨)
- ⑧ 古澤眸, 片野坂好子, 古屋浩, 非対称ホール空間の音場特性に関する検討 (その 3) 側壁と天井を拡散形状とした場合, 日本建築学会学術講演会, 2007. 8. 30, 福岡大学(福岡)
- ⑨ 片野坂好子, 古澤眸, 古屋浩, 非対称ホール空間の音場特性に関する検討 (その 4) 拡散形状モデルにおける音圧レベル分布特性, 日本建築学会学術講演会, 2007. 8. 30, 福岡大学(福岡)
- ⑩ 片野坂好子, 古屋浩, ホール空間の対称性と音場特性に関する研究 その 3 側壁と天井を拡散形状とした場合の検討, 日本建築学会九州支部研究報告, 2007. 3. 4, 日本文理大学(大分)
- ⑪ 安藤美月, 古屋浩, ホール空間の対称性と音場特性に関する研究 その 2 反射音レベル分布に関する幾何音響的考察, 日本建築学会九州支部研究報告, 2006. 3. 5, 北九州市立大学(福岡)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

古屋 浩(FURUYA HIROSHI)  
九州共立大学・工学部・教授  
研究者番号: 00238700

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし

### (4) 研究協力者

片野坂 好子  
九州共立大学大学院生(2007 年度修了)  
古澤 眸  
九州共立大学大学院生(2008 年度修了)  
江淵 克志  
九州共立大学大学院生(2008 年度修了)