



オーディトリウムにおける舞台床の音響特性に関する研究

中西, 伸介

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

1998-09-16

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

乙2262

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D2002262>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



氏名・（本籍）	中 ^{なか} 西 ^{にし} 伸 ^{しん} 介 ^{すけ} （兵庫県）
博士の専攻分野の名称	博士（工学）
学位記番号	博ろ第179号
学位授与の要件	学位規則第4条第2項該当
学位授与の日付	平成10年9月16日
学位論文題目	オーディトリウムにおける舞台床の音響特性に関する研究

審査委員	主査 教授 森 本 政 之	
	教授 中 山 昭 彦	教授 北 村 泰 寿
	教授 日下部 馨	

論文内容の要旨

本論文では、オーディトリウムの舞台床の設計において有用となる、その音響特性に対する基礎的知見を得ることを目的として、舞台床の音響的条件を考慮した弾性板の音響反射特性の理論的解析を行った。舞台床は、音源である楽器から音波入射と同時に加振力を受けるので、楽器と床の振動の連成を考慮する必要がある。楽器と床の連成が音場に及ぼす効果には、楽器と床の振動の連成による楽器の放射特性の変化、及び、加振力による床からの放射音の影響の二つが考えられるが、本研究では後者に着目して理論解析を行った。

第1章では、序論として、オーディトリウムの舞台床に対する従来の設計に関する知見と問題点を述べ、舞台床の音響特性を音響振動連成問題、特に、本研究で弾性板の音響反射問題として取り扱う意義を述べた。理論解析における舞台床の取り扱いについては、舞台床とその上で演奏される楽器の関係を考慮して、球面波入射と点加振力を同時に受ける弾性板としてモデル化した。また、本研究に関連した、振動する境界面による音響反射問題について従来の研究を概観し、音波入射のみを受ける場合に限定されていることから、舞台床の音響的条件を考慮して、音波入射と機械的加振力が同時に弾性板に加わる場合について解析する必要を指摘した。

第2章では、本研究の各章で共通して用いる基礎関係式を示した。

第3章では、舞台床の音響反射特性の特徴と床板の諸定数の影響を考察するために、単一の無限大弾性板による反射音場を理論的に解析した。舞台床を無限大弾性板とモデル化して解析することは、楽器の音域の周波数範囲で波長との関係から考えると舞台床は十分に大きい場合が多いので、妥当であろう。一方、弾性板が球面波入射と同時に点加振力を受ける場合について、本研究では低音弦楽器が床に接している場合を考慮しているが、加振力を受ける床板による放射音が音場に及ぼす影響に着目して定式化を行った。しかし、その加振力による影響を検討するために、楽器の放射音と加振力の関係を定式化する必要がある。これを厳密に扱うには、楽器と床の連成振動を解く必要があり、困難である。そこで、本研究では、楽器と床の機械的、音響的連成を含んだものとして、点加振力と点音

源の関係が複素振幅比で与えられるものとして取り扱った。

球面波入射のみの場合については、既存の研究を紹介し、得られている知見についてまとめた。一方、球面波入射と同時に点加振力が板に加わる場合について、解析結果から反射音場の特徴を考察した。反射音場は球面波入射による反射成分と点加振力による放射成分から成り、両者の干渉によって反射音場の周波数特性が周波数と共に変動する。また、点加振力が反射音場に及ぼす顕著な影響として、反射音場の周波数特性にコインシデンス効果による非常に顕著なピークが生じることを示した。

既存のオーディトリウムに関する調査によると、空気層をその背後構造として有する舞台床が多く見られた。また、古くから「舞台床の構造として、背後空気層を有する木床が良い」と言われているが、経験的な知見であり、明快な根拠はない。そこで、舞台床の音響反射特性に対する背後空気層の影響を明らかにするために、第4章では、背後空気層を有する弾性板による球面波の反射音場を理論的に解析した。

解析結果から、背後空気層を有する弾性板の反射音場の特徴として、単一の弾性板による特徴に加えて、板と背後空気層の共振系によって生じる板振動型吸音、及び、背後空気層の音響的な共振の影響が現れることを示した。これらは、音波入射のみの場合、それぞれの共振周波数において全てディップとして現われ、音波入射と加振力が同時に加わる場合、板振動型吸音によるディップと背後空気層の音響的な共振によるピークとディップとして現れる。さらに、背後空気層の影響によって生じるこれらのピークとディップの発生メカニズムについて、システムのインピーダンスを用いて考察を行い、その解釈を与えた。また、従来の研究に見られる舞台床で使用される難燃による楽器音の増加について、本論文の理論を若干修正し、現象の解釈を試みた。

前章では、舞台床の背後構造として多く見られる空気層の音場に対する影響を考察したが、舞台床が有する背後層は必ずしも空気層とは限らない。既存のオーディトリウムにおいて、舞台床の背後構造は空気層ばかりでなく、吸音層を有するものも見られた。また、舞台床下に設置される断熱材や防振のための緩衝材が吸音層として作用する場合が考えられる。そこで、背後層に充填、または、挿入される吸音層が舞台床の音響特性に及ぼす影響について考察するために、第5章では、空気層と吸音層の任意の組み合わせからなる背後層を有する無限大弾性板の音響反射特性を解析した。

解析結果から、吸音層による影響は、主として、板振動型吸音と背後層の音響的な共振によるピークとディップに現れることを示した。また、吸音層の材質や厚さ、位置がこれらのピークとディップに及ぼす影響について考察した。その結果、板振動型吸音によるディップは、背後層内の吸音層の流れ抵抗の増加と共に低減へ移動する。しかし、板振動型吸音によるディップに対する吸音層の位置の影響は見られなかった。この結果から、吸音層の材質と厚さによって板振動型吸音のディップの生じる周波数を制御できることが示唆された。一方、背後層の音響的な共振によるピークとディップは、吸音層の流れ抵抗の増加と共に顕著でなくなり、一般の建築材料の流れ抵抗では、これらのピークとディップが消失する。ピークとディップが消失する場合は、その周波数で背後層内の固有モードが生じ、層内の音圧分布において音圧振幅が大きくなる位置に吸音層が挿入される場合に対応している。また、点加振力によって生じるコインシデンス効果による顕著なピークは、吸音層の流れ抵抗によってそのピーク値が変化し、最小のピーク値を与える流れ抵抗値があることを示した。この最小のピーク値を与える流れ抵抗値は、吸音層の位置によって変化し、システムのインピーダンスの絶対値の変化と関連があることが示唆された。

前章までは、床への加振力と音源からの放射音は、周波数の変化に関わらず一定の振幅、且つ、同位相であるとして、床の材質や背後構造の影響を検討してきた。しかし、現実の楽器において、楽器

からの放射音と床への加振力の複素振幅比が周波数に関わらず一定であるとは考えにくく、その周波数特性によって音場に及ぼされる影響は異なると考えられる。そこで、舞台床に加わる楽器の加振力が舞台床の反射音場に及ぼす影響について検討するために、第6章では、チェロによる床への加振力を実測し、その実測値を用いて本論文による考察を行った。その結果、ほとんどの周波数では、加振力と放射音圧の複素振幅比の絶対値が大きくないために、チェロの加振力が音場に及ぼす影響は顕著でなかった。しかし、板の質量が小さい場合やコインシデンス効果によってチェロの加振力による反射音場への影響が大きくなる場合もある。

前章までは、舞台床を無限大弾性板として扱い、床の材質や背後構造が音場に及ぼす影響について検討してきた。さらに、前章において実際の楽器から床への加振力を測定し、本論文に導入して検討した結果、無限大弾性板による反射音場に対して楽器の加振力が必ずしも顕著な影響を与える訳ではなかった。しかし、本来、舞台床や雛壇が有する有限性による固有振動によって、楽器からの加振力が音場に及ぼす影響が増幅されることも考えられる。そこで、舞台床の音響特性に対する有限板の固有振動の影響について検討するために、第7章では、剛バフル中の弾性円板の反射特性を理論的に解析した。計算結果から、剛バフル中の弾性板による反射音場には、無限大板の場合には見られなかったピークとディップが見られた。これらのピークとディップは、弾性円板の振動による放射成分の影響を表わしており、板の固有周波数付近に見られることから、円板の共振振動の影響によるものと考えられる。また、点加振力が加わる場合の反射音圧は、点加振力を受けない場合に比べて非常に大きく、加振力が反射音場に及ぼす影響が非常に顕著であることが示唆された。

本研究では、舞台床の音響設計に有用となる基礎的な知見を得るために、点加振力を受ける無限大弾性板による球面波の反射音場を理論解析した。解析結果から、点加振力を受ける弾性板による反射音場を明らかにし、反射音場に対する、床板の材質や厚さ、背後構造、楽器からの加振力、及び、床板の固有振動の影響を検討した結果、舞台床の設計指針となりうる基礎的な知見を得ることができた。

しかし、本研究では、舞台床、及び、雛壇の大きさや形状が音場に及ぼす影響について検討するには至らなかった。また、舞台床は根太や大引きによって支持される。これらの間隔や拘束条件によって床板の振動性状が変化し、音場に影響を及ぼすことが考えられるが、本研究では、舞台床の支持条件を考慮していない。今後、現実の舞台床が有する建築的条件である、床板の大きさや形状、及び、根太や大引きと言った舞台床の支持条件が音場に及ぼす影響について、さらに研究を進める必要がある。

また、本論文では、楽器と舞台床の振動の連成が楽器の放射特性に及ぼす影響については、その定式化の複雑さから考慮していない。もし、楽器と舞台床の振動の連成によって楽器の放射特性が変化するならば、舞台床に適当な機械的特性を持たせることで楽器の放射特性を制御することが可能かもしれない。この舞台床の機械的特性がその上で演奏される楽器の放射特性に及ぼす影響に対する検討は、本理論とは別のモデル、及び、別の解析手法を用いる必要があるだろう。

論文審査の結果の要旨

本論文は、オーデトリウム舞台床の音響特性に対する基礎的な知見を得ることを目的として、舞台床に特有の条件を考慮して、弾性板の音響反射特性の理論的解析を行ったものである。

第1章では、序論として、オーデトリウム舞台床に対する従来の知見と問題点を述べ、舞台床の

音響特性を音響振動連成問題、特に、本研究で弾性板の音響反射問題として取り扱う意義を述べている。また、本研究に関連する従来の研究をレビューしている。さらに、本論文で行なう理論解析における舞台床の取り扱いについて、舞台床とその上で演奏される楽器の関係を考察し、球面波入射と点加振力を同時に受ける弾性板とするモデル化を提案している。

第2章では、本論文で共通して用いる基礎関係式をまとめている。

第3章では、まず最も単純な単一の無限大弾性板による反射音場について解析し、舞台床による反射音場に対する床の材質、及び、加振力の影響について考察している。球面波入射のみの場合について既往の研究を紹介し知見をまとめたのち、球面波入射と同時に点加振力が板に加わる場合について解析を行なっている。その結果から、反射音場は球面波入射による反射成分と点加振力による放射成分から成り、両者の干渉によって反射音場の周波数特性が周波数と共に変動することを示している。また、点加振力が反射音場に及ぼす顕著な影響として、反射音場の周波数特性にコインシデンス効果による非常に顕著なピークが生じることを明らかにしている。

第4章では、舞台床の背後構造として一般に見られる、空気層が反射音場に及ぼす影響を考察するために、背後空気層を有する弾性板の反射音場を解析している。解析結果から、背後空気層を有する弾性板の反射音場の特徴として、板と背後空気層の共振系によって生じる板振動型吸音、及び、背後空気層の音響的な共振の影響が現れることを明らかにした。また、これらは、音波入射のみの場合、それぞれの共振周波数において全てディップとして現われ、音波入射と加振力が同時に加わる場合、板振動型吸音によるディップと背後空気層の音響的な共振によるピークとディップとして現われることを明らかにした。さらに、背後空気層の影響によって生じるこれらのピークとディップの発生メカニズムについて、システムのインピーダンスを用いて考察を行い、その解釈を与えている。一方、従来報告されている、舞台床で使用される雛壇による楽器音の補強効果について、本論文の理論を若干補正した上で解析を行ない、既存の実験値との比較を行なった上で、この現象の解釈を試みている。

第5章では、現実の舞台床の背後構造として若干見られ、音響以外の建築的条件によって、背後層内に充填、若しくは、挿入されることがある吸音層が反射音場に及ぼす影響について理論解析を行っている。解析結果から、吸音層による影響は、主として、板振動型吸音と背後層の音響的な共振によるピークとディップに現れることが示された。また、吸音層の材質や厚さ、位置がこれらのピークとディップに及ぼす影響について考察している。その結果から、吸音層の材質と厚さによって板振動型吸音のディップの生じる周波数を制御できることを示唆している。さらに、挿入される吸音材の材質についても、その影響を考察しており、特性の変化との関係について詳しい考察を行なっている。

第6章では、現実の楽器による床への加振力が反射音場に及ぼす影響を考察するために、木製平台の上で演奏されるチェロの放射音圧と加振力を実測し、本理論の解析解に含まれる加振力と放射音圧の複素振幅比を算出し、計算結果から考察を行っている。その結果、ほとんどの周波数では、加振力の絶対値が小さく、チェロの加振力が音場に及ぼす影響は顕著でないことが示された。しかし、板の質量が小さい場合やコインシデンス効果によってチェロの加振力による反射音場への影響が大きくなる場合があることを示唆している。

第7章では、舞台床の音響特性に対する弾性振動の影響について、板の有限性を考慮した場合の基礎的知見を得るために、背後構造を持たない剛バフル中の弾性円板による反射音場を理論的に解析している。剛バフル中の弾性板による反射音場には、無限大板の場合には見られなかったピークとディップが生じることを示している。これらのピークとディップは、弾性円板の振動による放射成分の影響を表わしており、板の固有周波数付近に見られることから、円板の共振の影響によるものであるこ

とを示している。また、点加振力が加わる場合の反射音圧は、点加振力を受けない場合に比べて非常に大きくなっており、加振力が反射音場に及ぼす影響が非常に顕著であることが示唆されている。

以上のように、本研究はこれまでにほとんど研究されていないオーディトリウムの舞台床の音響特性について、理論的な解析を中心として研究したものであり、舞台床の設計や舞台空間で生じる音響的な諸現象の解明のために重要な知見を得たものとして価値ある集積であると認める。

よって、学位申請者 中西伸介は、博士（工学）の学位を得る資格があると認める。