

平成30年9月3日現在

機関番号：22604

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2013～2017

課題番号：25249022

研究課題名(和文) グローバル絶対静粛空間の生成

研究課題名(英文) Generation of an essentially global zone of quiet

研究代表者

田中 信雄 (Tanaka, Nobuo)

首都大学東京・システムデザイン研究科・名誉教授

研究者番号：70305423

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 34,600,000円

研究成果の概要(和文)：静粛性がシステムの支配因子である現在、静粛性を担保する至上命題として、グローバルな絶対静粛空間の生成法を明らかにすることを本研究の目的とする。まず、先行研究で解明した強連成場における固有問題を敷衍する過程で見出されたエバネセント波(伝搬しない音)に本研究の基礎を置いた。ついで有限平板における反共振現象にエバネセント波が発現する事実に着目し、分布定数系を点音源アレイで具現化することにより放射音の局在化を図る。また、実生活空間場における静粛化を追求すると共に、能動制御過程で発現する相乗効果の解明を行った。

研究成果の概要(英文)：With a view to establishing a control strategy for generating an essentially global zone of quiet, evanescent waves which do not propagate in the air play a significant role in the present research. As the preceding research clarified the existence of the evanescent modes in a strongly coupled cavity, the fundamental properties of the generation mechanism are further investigated. The evanescent waves are also found even in a structural vibration of a finite panel in the open space, so that the point source array is then employed to emulate the vibration patterns that produce the evanescent waves. As with a real residential circumstances, the zone of quiet is experimentally achieved using both vibration and sound control.

研究分野：静粛性工学

キーワード：絶対静粛空間 強連成場 エバネセント波 固有値問題 反共振現象

### 1. 研究開始当初の背景

音響・構造振動強連成場における固有値問題は、ごく最近まで未解決のままにおかれた。一面弾性・五面剛性で構成される単純な直方体キャビティですら、固有ペア(固有関数と固有値)が陽な形で求まらなかったのである。強連成問題の難しさは空間境界条件にある。弾性平板のあらゆる箇所、平板速度と粒子速度が等しくなければならないという制約条件は、弾性平板が分布定数系であることを考えると無限個存在するため、固有値問題を解くために必要な自由パラメータが本質的に不足するからである。研究代表者らは先行科研費研究プロジェクトにおいて、真性特異点に由来するクラスタ関数を提案し、これまで未解明とされていた固有ペアを導出することに成功した。さらに強連成場の基本特性を解明する過程で、連成固有関数の中にエバネセントモードが存在することを見出した。連成固有値がカットオン周波数より小さい場合に発生するこのモードは興味深い特性を有しており、当該モードを構成する音場では音が伝搬しない。本研究は、伝搬しない音、すなわちエバネセント波を主要なキーワードの一つとして位置づけており、本研究の主題であるグローバル絶対静粛空間の創成に向けて展開される際の基軸となる。しかしながら、音は伝搬するという視点から展開されている在来の音響工学にはエバネセント波に関する知見が乏しいため、本研究を進めるに当たってはエバネセント波に関する理論的インフラを新たに構築することから始める必要がある。

### 2. 研究の目的

高効率・高性能・高出力を至上命題とした従来のシステム設計因子に加え、現在では静粛性がシステムの価値を支配するようになっている。それでは「静粛性を担保するには如何にすべきか」という問いに、グローバルな絶対静粛空間を生成するための本質的な手法を提供することが本研究の目的である。言うまでもなく、静粛化対策の基本は発生源対策にある。端的に言えば、騒音源が無くなればよい。それでは、「実存する騒音源を無きものとするには如何にすべきか」、このテーマに対する答を、これまで余り顧みることのなかったエバネセント波の特性に見出し、騒音源をエバネセント場で支配させることにより、根源的でグローバルな絶対静粛空間生成法を、音響振動強連成場、開空間場、閉空間場の三つの場において追求する。

### 3. 研究の方法

音響振動強連成場、開空間場、閉空間場において静粛化問題をアプローチする。

(1) 音響振動強連成場における固有値問題：一面弾性・五面剛性で構成される直方体キャビティを対象とする固有値問題の求解には成功しているものの、分布定数系を対象

とするので固有マトリックスの次数が高まり演算時間の負担が大となる点は否めない。そこで連成モード間に存在するカップリング特性を考慮して、固有マトリックス方程式のクラスタ化を行い、簡素な固有マトリックス方程式を導出することにより、求解に要する演算時間の大幅な短縮を図る。さらに当該強連成固有値問題を強制応答の視点からアプローチし、系統だった解析が可能な伝達マトリックス法により固有ペアの獲得を目指す。さらに、車両室内こもり音の本質的な解決を志向して、太鼓型直方体キャビティを対象とする固有値問題を解くと共に、直交条件およびモード方程式を導出する。

(2) 開空間場：有限平板の振動放射音特性に見られる反共振現象は、平板全体が振動しているにも関わらず全音響パワーがゼロとなる現象であり、まさにグローバルな静粛性が達成される。本研究はこの不思議な自然現象に着目し、当該現象を招来させる平板振動分布を点音源アレイで模擬することにより、音源近傍をエバネセント場で支配することによりグローバルな静粛空間の生成を図る。

(3) 閉空間場：通常の日常生活を想定し、一面が窓ガラスで構成される直方体キャビティを対象として、実験的アプローチにより振動制御および音響制御を講ずることによりグローバルな静粛空間を生成する。

### 4. 研究成果

(1) 音響振動強連成場における固有値問題：一面弾性・五面剛性で構成される直方体キャビティを対象として固有マトリックス方程式を導出する。そのためには、まずキャビティ内音圧が平板をフィードバック加振するため、斉次方程式ではあるものの平板変位はインバキュオの平板固有関数を基調とする展開定理で記述できる。これに対してヘルムホルツ方程式の解、すなわち速度ポテンシャルは展開定理で記述することができないので、この問題を解決するために真性特異点に由来するクラスタ関数を導入し、その無限和を速度ポテンシャル解とする。さらに弾性平板速度分布と粒子速度分布を等しいと置くことで固有マトリックス方程式  $\mathbf{M}\mathbf{a} = \mathbf{0}$  を得る。ここでマトリックス  $\mathbf{M}$  は連成固有マトリックス、 $\mathbf{a}$  は連成固有ベクトルである。

つぎに矩形平板固有関数および音響固有関数が4種類のクラスタに分割できることに加え、クラスタカップリングは同属クラスタ同士としか連成しない特性を考慮して固有マトリックス方程式を展開すると、4つのクラスタ毎の独立した固有マトリックス方程式に分解される。したがって、強連成問題における固有ペアを導出するには、 $\mathbf{M}_i \mathbf{a}_i = \mathbf{0}$  ( $i = A, B, C, D$ ) にダウンサイジングされた固有マトリックス方程式を解き、それらを統合すれば良いことが示された。さらにキャビティ内の音響ポテンシャルも4クラスタにおける音響ポテンシャルの和として

記述できるので、クラスタ制御の観点からグローバルな静粛空間を得ることができる。

つぎに太鼓型直方体キャビティを対象とする固有マトリクス方程式を導出した。その際には二つの平板に関する振動方程式とキャビティ音場におけるヘルムホルツ方程式、さらに二つの空間境界条件を総合して固有方程式を記述する。またその有意性を立証するためのモード直交条件を導出すると共に、強制振動問題を解くためのモード方程式を導出した。数値解析例として、図1は太鼓型キャビティ ( $L_x \times L_y \times L_z \times h = 0.18m \times 0.38m \times 0.866m \times 0.8mm$ ) における3次モード (112Hz) として発現する音響モード姿態を示しており、図から明らかなように強連成効果として生成されるエバネセントモードが上下より発達していることが分かる。

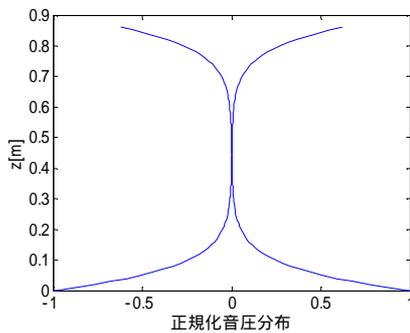


図1 太鼓型直方体キャビティにおけるエバネセントモード (112Hz)

強連成固有値問題を解くために、伝達マトリクス法の観点からもアプローチした。本手法は斉次方程式と境界条件をセットとして展開されるオーソドックスな固有値解法とは異なり、強制応答解を得ることが本来の目的ではあるが、連成固有値における音圧分布が固有関数形状とほぼ等しいことを前提として、系統立った固有値問題を展開することができる。状態方程式を構成する状態ベクトルはキャビティ内の音圧および粒子速度で構成し、境界条件は平板速度と剛壁として与える。なお当該手法の有意性は、空間境界条件、すなわち平板速度分布と粒子速度分布の合致度より確認している。

(2)開空間場：有限平板における振動放射音に発現する反共振現象は、平板全体が振動しているにも拘わらず全音響パワーがゼロとなる、まさにグローバルな静粛性が達成される自然現象である。そこでその際の平板振動分布状態を点音源アレイで模擬し、音源近傍をエバネセント場で支配することによりグローバルな静粛空間を生成することを試みた。図2は矩形アルミ平板 ( $0.575m \times 0.945m \times 2mm$ ) の中央点を固体加振して奇数・奇数モードのみを励起させた場合の、反共振状態 (77Hz) における放射音圧分布である。

この場合、反共振現象は(1,1)モードと(1,3)モードが連成した際に発現する。放射音圧分布を見ると、平板の上方0.3mで73dBあるが、そこから更に1m離れた位置での音圧は48 dBまで減少しており、1mで25dBの減衰効果が得られている。これに対して図3は、(1,3)モードのみを加振(77Hz)した際の放射音圧分布を示しており、反共振現象が発生しない状態では、点音源より放射する距離減衰とほぼ等しい音圧減衰が見られる。このように反共振現象においては、平板近傍に音圧が局在化しており、これを俯瞰するとグローバルな静粛空間が生成されていることが分かる。

そこで平面音源をマトリクス状に並べたスピーカアレイによって平板の振動モードを模擬する手法を考案した。スピーカアレイは、半径0.0275mの平面分割音源をエンクロージャに埋め込み、3×7のマトリクス状に並べたものとする。図4はスピーカアレイを100 Hzで加振した際の放射音圧分布を示したものである。なお図中の黒点は平面分割音源の中心位置を表している。図2と図4を比較すると明らかなように、反共振現象を呈する振動分布を点音源アレイにより模擬することで、平板の振動放射音と同様の音場を生成することができる。

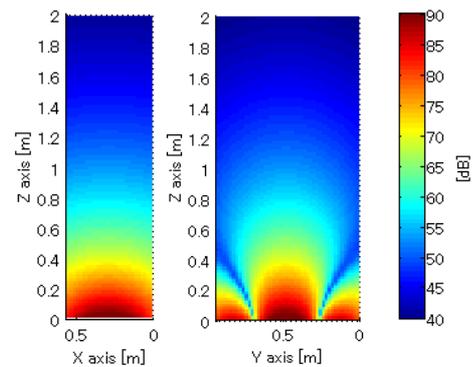


図2 反共振現象における振動放射音圧分布

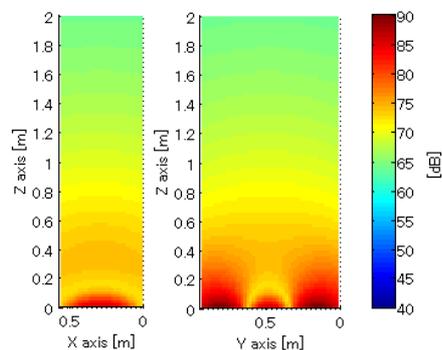


図3 連成効果のない振動放射音圧分布

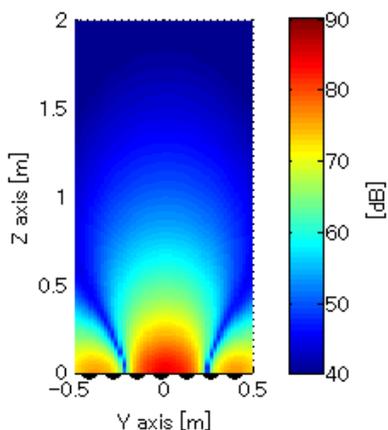


図4 点音源アレイによる音圧分布

(3) 閉空間場：日常生活に遍在する窓ガラスを構成部材とする居住空間は、構造物と音場が連成する強連成場に位置づけられる。また、人の性として快適な居住空間を希求することは極めて自然な要請であり、それに応える技術開発は必然と言える。このような視点より、窓ガラスを強連成場における一部材として構成する直方体キャビティ ( $L_x=0.7\text{m}$ ,  $L_y=0.5\text{m}$ ,  $L_z=0.46\text{m}$ ) を試作して、実験により居住空間の特性を捕捉することから始めた。まずキャビティに組み込まれている窓ガラスの動特性を実稼動モード解析法により測定したところ、窓ガラス自体の固有な支持法が強連成場には強く影響を及ぼすことが判明すると共に、窓ガラスのインバキュオな振動モードが支配する連成モードと、音響モードが支配する連成モードに加えて、窓ガラス支持部の特性に由来する内爆モードが存在することを明らかにした。内爆モードとは強連成場に存在する孤立モードであり、その特殊性からして振動制御に可制御性はないことが判明した。さらに、内爆モードにおいては音響制御のみが可制御であることが明らかとなり、振動制御と音響制御を併用することにより静粛性と追求した。

振動・音響併用制御の実験結果を図5に示している。奇数/奇数クラスターの周波数特性をプロットしたもので、800Hz までに見られるピークが全て抑制されていることが分かる。この結果で注目すべきは、制御効果がピークの抑制のみにとどまらず、広帯域にわたり奇数/奇数クラスターモード群が低減されている点である。また、ここで示されたクラスター制御効果は、振動制御単独の効果と音響制御単独の効果とを足し合わせても、併用制御を適用することにより得られている制御効果には及ばず、この大幅な振動レベルの抑制は振動制御と騒音制御の2つの手法を併用したことで発現した相乗効果によることを明らかにした。

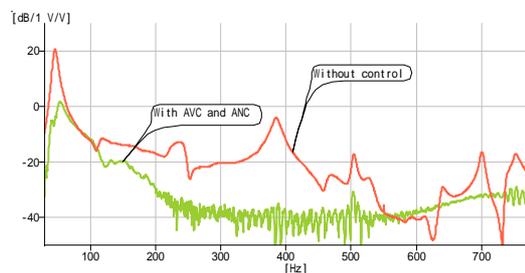


図5 音響振動制御を講じた場合の奇数・奇数モードクラスター

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計17件)

岩本 宏之、田中 信雄、眞田 明、Wave filter based approach for generation of a quiet space in a rectangular cavity, Mechanical Systems and Signal Processing, 査読有, Vol. 100, 2018, pp.570-587, DOI: 10.1016/j.ymsp.2017.07.050

眞田 明、Extension of the frequency range of normal incidence sound-absorption-coefficient measurement using four or eight microphones Acoustical Science and Technology, 査読有, Vol.38, 5, 2017, pp. 261-263, DOI:10.1250/ast.38.261

眞田 明、辻 善夫、岩田 和夫、川野 道則、岩路 仁、下山 安彦、リング型動吸振器を組み込んだ低騒音チゼルの開発、日本機械学会論文集, 査読有, (早期公開) 2018, pp.1-8 DOI:10.1299/transjsme.17-00511

眞田 明、岩田 和夫、中川 弘、Extension of frequency range of normal-incidence sound absorption coefficient measurement in impedance tube using four or eight microphones Acoustical Science and Technology, 査読有, 掲載決定

貝塚 勉、田中 信雄、中野 公彦、Active control of sound transmission using structural modal filters, Journal of sound and vibration, 査読有, vol.381, 27, October, 2016, pp.14-29, DOI: 10.1016/j.jsv.2016.06.018

眞田 明、田中 信雄、Active control of sound transmission through a honeycomb panel with feedforward and feedback control, Mechanical Engineering Journal, 査読有, 3(6), 2016, pp.1-11, DOI: 10.1299/mej.16-00466

鄭 小蘭、西郷 宗玄、岩本 宏之、Control of a crane rope-and-mass system by wave absorption with support feedback control, Mechanical Engineering Journal, 査読有, vol. 4,

No.1, 16-00397, 2017, pp.1-11,  
DOI:10.1299/mej.16-00397

岩本 宏之、振動音響連成系における静  
粛場の生成(波動論的モデリングとその制御)  
日本音響学会誌、査読無、72(11), 2016,  
pp.706-714, DOI: 10.20697/jasj.72.11\_709

眞田 明、振動音響連成現象のメカニズム  
を利用したアクティブ遮音制御、日本音響学  
会誌、査読無、72(11), 2016, pp.715-720,  
DOI:10.20697/jasj.72.11\_715

福田 良司、田中 信雄、窓ガラスを構  
成要素とする直方体キャビティにおける強連  
成モードとその抑制(実験的アプローチ)、日  
本機械学会論文集、査読有、Vol. 81, No. 830,  
2015, pp.1-12, DOI: 10.1299/transjsme.15-00075

田中 信雄、超指向性音源(PAL)による  
グローバル静粛空間の生成、日本機械学会誌  
2月号、査読無、vol.119 No1167, 2015,  
pp.72-73, DOI:10.1299/jsmemag.119.1167\_7  
2

眞田 明、東山 孝治、田中 信雄、岩本  
宏之、閉空間からの透過音のアクティブ制御、  
日本機械学会論文集、査読有、Vol. 80 (2014)  
No. 812, pp.1-13, DOI: 10.1299/transjsme. 2014  
trans0066

眞田 明、東山 孝治、田中 信雄、Active  
control of sound transmission through a  
rectangular panel using point force actuators and  
piezoelectric film sensors, Journal of Acoustical  
Society of America、査読有、137 (1), January  
2015、pp.458-469, DOI:10.1121/1.4904506

眞田 明、東山 孝次、田中 信雄、能  
動制御型防音ボックスに関する研究(ポイント  
アクチュエータと圧電フィルムセンサに  
よるアクティブ遮音制御の適用)日本機械学  
会論文集、査読有、C編第79巻第805号,2013,  
pp.3049-3058, DOI:10.1299/kikaic.79.3049

田中 信雄、振動放射音の連成現象 日  
本音響学会、査読無、Vol.89,No.12 2013,  
pp.647-652, DOI:10.20697/jasj.69.12\_647

眞田 明、東山 孝次、田中 信雄、能  
動制御型防音ボックスに関する研究(参照信  
号の取得方法について)、査読有、日本機械  
学会論文集C編第80巻第809号,1月,2014,  
pp.3049-3058,DOI:10.1299/transjsme. 2014  
dr0012

岩本 宏之、田中 信雄、Simon Hill、  
Feedback control of wave propagation in a  
rectangular panel, part 1: Theoretical  
investigation of fundamental characteristics,

Mechanical Systems and Signal Processing, 査  
読有, vol.39, 1-2, pp.3-19, 2013, DOI: 10.1016/  
j.ymssp.2012.06.012

[学会発表](計38件)

田中 信雄、岩本 宏之、Clusterization  
for deriving eigenpairs of a vibro-acoustic  
rectangular cavity, 14<sup>th</sup> international congress of  
sound and vibration, 2017年7月25日、London  
(UK)

岩本 宏之、田中 信雄、Wave absorption  
of a flexible beam for band-limited spectra using  
direct feedback, 14<sup>th</sup> international congress of  
sound and vibration, 2017年7月25日、London  
(UK)

松田 誠、岩本 宏之、Semi-active vibration  
isolation using an inerter connected to a spring,  
46th International Congress and Exposition on  
Noise Control Engineering (INTER-NOISE 2017),  
2017年8月27日、Hong Kong (PRC)

岡田 健太郎、岩本 宏之、田中 信雄、  
Active control of sound radiated from a  
double-walled structure using active noise control  
and active vibration control, 46th International  
Congress and Exposition on Noise Control  
Engineering (INTER-NOISE 2017), 2017年8月  
30日、Hong Kong (PRC)

田中 信雄、岩本 宏之、Active control of  
noise in a strongly coupled rectangular cavity,  
Internoise 2016, 2016年8月22日、Hamburg  
(Germany)

岩本 宏之、田中 信雄、Wave absorption of  
an orthotropic rectangular panel based on direct  
feedback, MOVIC & RASD2016, USB Memory,  
2016年7月4日、Southampton (UK),

岩本 宏之、田中 信雄、[Invited lecture]  
Active control of bending waves propagating in  
an orthotropic rectangular panel、5th Joint  
Meeting of the Acoustical Society of America  
and Acoustical Society of Japan, 2016年11月30  
日、Honolulu (USA),

田中 信雄、田中 基樹、Global active noise  
control using parametric beam focusing source,  
Asia Pacific Vibration Conference, 2015年11月  
24日、Hanoi (Vietnam)

岩本 宏之、田中 信雄、Feedback control  
of bending waves propagating in an orthotropic  
rectangular panel, The 22nd International  
Congress on Sound and Vibration (ICSV22),  
CD-ROM, 2015年7月13日、Florence (Italy)

岩本 宏之、田中 信雄、Transfer matrix  
based approach for an eigenvalue problem of a

drum-like rectangular cavity, Asia-Pacific Vibration Conference 2015 (APVC2015), CD-ROM 2015年11月26日、Hanoi (Vietnam),

渡邊 元哉、岩本 宏之、田中 信雄、Active wave control of a coupled rectangular cavity, Asia-Pacific Vibration Conference 2015 (APVC2015), CD-ROM , 2015年11月24日、Hanoi (Vietnam)

眞田 明、田中 信雄、Active control of sound transmission through a panel with feedforward and feedback control, The 16th Asian Pacific Vibration Conference 2015, 2015年11月24日、Hanoi (Vietnam)

田中 信雄、岩本 宏之、Modal Orthogonality of a Strongly Coupled Rectangular Cavity, CST2014, 2014年9月5日、Naples (Italy)

眞田 明、東山 孝治、Experimental investigation of sound insulation property of active acoustic enclosure  
The Twelfth International Conference on Motion and Vibration Control, 2014年8月4日、北海道大学(札幌市)

岩本 宏之、田中 信雄、Transfer matrix based approach for an eigenvalue problem of a coupled rectangular cavity, The 43rd International Congress on Noise Control Engineering, 2014年11月18日、Melbourne (Australia)

深谷 紀元、岩本 宏之、眞田 明、田中 信雄、Generation of localized sound using speaker array, The 43rd International Congress on Noise Control Engineering, 2014年11月17日 Melbourne (Australia)

渡邊 元哉、岩本 宏之、田中 信雄、Active noise reduction of a coupled rectangular cavity using active wave control, The 43rd International Congress on Noise Control Engineering, 2014年11月17日、Melbourne (Australia)

田中 信雄、田中 基貴、Trivial control for generating a globally quiet space, 20th International Congress on Sound and Vibration (ICSV20) , 2013年7月9日、Bangkok (Thailand)

岩本 宏之、田中 信雄、眞田 明、Experiment on generation of a quiet space in a rectangular cavity using wave filters-updated results, 20th International Congress on Sound and Vibration (ICSV20) , 2013年7月9日、Bangkok (Thailand)

田中 信雄、Local and global active noise control using a parametric array loudspeaker, 166<sup>th</sup> Meeting of Acoustical Society of America 2013年12月5日、San Francisco (USA)

② 西郷 宗玄、岩本 宏之、Dong Nam、Wave absorption control of beam based on finite difference approach, Asia-Pacific Vibration Conference 2013 (APVC2013), 2013年6月3日 Jeju (ROK)

〔図書〕(計 1件)  
田中 信雄、岩本 宏之、機械力学ハンドブック(分担執筆)、2015、584

〔産業財産権〕

出願状況(計 1件)

名称：局所音場を生成するスピーカシステムおよび方法  
発明者：岩本 宏之、深谷 紀元、眞田 明、田中 信雄  
権利者：同上  
種類：特許、  
番号：特願 2015-010845  
出願年月日：2015年2月27日  
国内外の別：国内

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

田中 信雄 (TANAKA Nobuo)  
研究者番号：70305423  
首都大学東京・システムデザイン研究科・名誉教授

### (2)研究分担者

福田 良司 (FUKUDA Ryoji)  
研究者番号：60463030  
地方独立行政法人東京都立産業技術研究センター・開発本部開発第一部機械技術グループ・主任研究員

岩本 宏之 (IWAMOTO Hiroyuki)  
研究者番号：90404938  
成蹊大学・理工学部・准教授

### (3)研究協力者

眞田 明 (SANADA Akira)