報　　告

新たな音響学の学術領域の創成とそれを推進するコンソーシアムの創設に向けて

令和８年（２０２６年）９月２９日

日　本　学　術　会　議

総合工学委員会・機械工学委員会合同

計算科学シミュレーションと工学設計分科会

この報告は日本学術会議総合工学委員会・機械工学委員会合同計算科学シミュレーションと工学設計分科会計算音響学小委員会の議論の結果を、計算科学シミュレーションと工学設計分科会が取りまとめ公表するものである。

日本学術会議総合工学委員会・機械工学委員会合同
計算科学シミュレーションと工学設計分科会

委員長	金田千穂子	（連携会員）	東北大学国際集積エレクトロニクス研究開発センター教授
副委員長	渋谷　陽二	（連携会員）	信州大学特任教授／長崎大学客員研究員／大阪大学名誉教授
幹　事	大出真知子	（連携会員）	国立研究開発法人物質・材料研究機構構造材料研究センター計算構造材料グループ主任研究員
幹　事	松尾亜紀子	（連携会員）	慶應義塾大学理工学部教授
	越塚　誠一	（第三部会員）	東京大学大学院工学系研究科システム創成学専攻教授
	髙木　周	（第三部会員）	東京大学大学院工学系研究科教授
	伊藤　恵理	（連携会員）	東京大学先端科学技術研究センター教授
	伊藤　宏幸	（連携会員）	ダイキン工業株式会社テクノロジーイノベーションセンターリサーチコーディネーター
	今水　寛	（連携会員）	東京大学大学院人文社会系研究科教授
	大島　まり	（連携会員）	東京大学大学院情報学環/生産技術研究所教授
	大林　茂	（連携会員）	東北大学流体科学研究所教授
	河合　宗司	（連携会員）	東北大学大学院工学研究科教授
	岸本喜久雄	（連携会員）	東京工業大学（現 東京科学大学）名誉教授
	北村　隆行	（連携会員）	滋賀県立大学理事
	小林　広明	（連携会員）	東北大学大学院情報科学研究科特任教授（研究）／総長特別補佐（国際共創担当）
	小山田耕二	（連携会員）	大阪成蹊大学データサイエンス学部長／教授
	坂本　真樹	（連携会員）	電気通信大学大学院情報理工学研究科情報学専攻教授／副学長
	佐々木直哉	（連携会員）	立命館大学総合科学技術研究機構客員教授／山形大学客員教授
	高田　章	（連携会員）	ロンドン大学特任教授
	高橋　桂子	（連携会員）	早稲田大学ナノ・ライフ創新研究機構規範科学総合研究所上級研究員／研究院教授
	店橋　護	（連携会員）	東京科学大学工学院教授
	坪倉　誠	（連携会員）	神戸大学大学院システム情報学研究科教授／理化学研究所計算科学センターチームリーダー
	所　千晴	（連携会員）	早稲田大学理工学術院教授／東京大学大学院工学系研究科教授

	藤井　孝藏	（連携会員）	東京理科大学工学部情報工学科客員教授
	藤代　一成	（連携会員）	駒澤大学グローバル・メディア・スタディーズ学部教授／慶應義塾大学名誉教授
	藤田喜久雄	（連携会員）	大阪大学大学院工学研究科機械工学専攻教授
	福田　弘和	（連携会員）	大阪公立大学大学院工学研究科機械系専攻機械工学分野教授
	山本　誠	（連携会員）	東京理科大学工学部機械工学科教授

日本学術会議総合工学委員会・機械工学委員会合同
計算科学シミュレーションと工学設計分科会
計算音響学小委員会

委員長	坂本　真樹	（連携会員）	電気通信大学大学院情報理工学研究科情報学専攻教授／副学長
副委員長	吉村　卓也		東京都立大学システムデザイン研究科機械システム工学域特任教授
幹　事	山本　崇史		工学院大学工学部機械工学科教授
幹　事	若槻　尚斗		筑波大学システム情報系教授
	金田千穂子	（連携会員）	東北大学国際集積エレクトロニクス研究開発センター教授
	満倉　靖恵	（連携会員）	慶應義塾大学理工学部システムデザイン工学科教授
	饗庭絵里子		電気通信大学情報理工学研究科機械知能システム学専攻准教授
	石濱　正男		明治大学客員研究員
	大久保　寛		東京都立大学システムデザイン研究科電子情報システム工学域教授
	岡村　宏		芝浦工業大学名誉教授
	雉本　信哉		九州大学大学院工学研究院機械工学部門教授
	小机わかえ		神奈川工科大学工学部機械工学科教授
	坂本　慎一		東京大学生産技術研究所教授
	嵯峨山茂樹		東京大学名誉教授（大学院情報理工学系研究科）／電気通信大学客員研究員（大学院情報理工学研究科）
	篠崎　隆宏		東京科学大学工学院情報通信系教授
	戸井　武司		中央大学先進工学部精密機械工学科教授
	西口　磯春		神奈川工科大学情報学部情報メディア学科名誉教授
	西脇　眞二		京都大学大学院工学研究科機械理工学専攻教授
	萩原　一郎		明治大学研究・知財戦略機構研究特別教授／東京工業大学（現東京科学大学）名誉教授

矢田部浩平	東京農工大学工学部知能情報システム工学科准教授
横山　真男	明星大学情報学部情報学科教授

本報告作成にあたり、以下の職員が事務及び調査を担当した。

事務	新田　浩史	参事官（審議第二担当）
	渡邊英一郎	参事官（審議第二担当）（令和８年７月から）
	角田美知子	参事官（審議第二担当）付参事官補佐
	冨岡千香子	参事官（審議第二担当）付審議専門職付
調査	辻　　政俊	上席学術調査員

要　　旨

１　作成の背景

計算力学を基盤とするコンピュータシミュレーションは、1990 年代、製造業の製品開発プロセスの大変革をもたらし、開発期間の短縮、開発コストの削減に大きく貢献した。また、計算力学は消費者に対して製造者への即時のフィードバックを与えることを可能とし、製造者と消費者の一体化も加速する。一方、近年、電動走行車や自動走行車、空飛ぶクルマの開発などにより、特に、製品開発における音の問題は大きく変わりつつある。例えば、空飛ぶクルマの市街地上空の飛行による騒音問題の発生は、都市騒音としての３次元的音場での解決が必須である。さらに、騒音からストレスレス環境音への変換や都市空間での静止・移動騒音源間の連携、生活空間騒音の音質と生体反応との連鎖など、従来技術の延長上にない技術革新が必要となる。そのためには、多様な分野との本質的な連携が不可欠である。このような課題は、日本では、学術(大学など)と技術(企業など)とさらに社会(地域・行政など) の連携がないと、前に進まない場合が多い。

すなわち、従来の音響学に加え、生体反応に関する生命科学や音楽などの芸術・心理学、環境、都市、モビリティなどの多分野を融合し、手法・データ群を集約する包括的な新たな音響学と、その基盤技術と適切な応用を推進する研究母体としてコンソーシアムの創設が急務である。ここで扱うシミュレーションは、音や振動といった物理量を評価する従来のコンピュータシミュレーションを基軸とするが、受け手となる人を想定し、人間に与える影響までを考慮したシミュレーションという包摂的な意味合いを持つものとする。工業製品に対しては、産業革命以降は機能や性能など物理的価値が着目されてきたが、単なる物理的価値が諸外国との差別化要因とならない現状では、人間が体感できる高品質な感性価値や空間価値が求められ、多分野と連携した音響環境の研究推進は高い国際競争力を有する。

計算音響学小委員会では、音の発生、音の伝播、聴覚器官による音響に対する感覚、音楽、騒音等、音に関するあらゆる現象を扱っており、真に工学・芸術・心理学・感性工学・生理学・医学・環境学など幅広い学際領域を議論の対象としてきた。これまで、スーパーコンピュータによるコンサートホールの音響シミュレーション、音声に関するシミュレーション、AI と音質シミュレーション、楽器の発音機構から作曲、さらに、感性の領域に及ぶシミュレーションにも踏み込むなど、多様な議論が進んでいる。これは、日本学術会議の特徴である、単独の学会では扱えない多様な領域を含んでおり、これらの音を中心とした多様な研究は世界的に見てもユニークな学際的研究になり得る。すなわち、理工学が芸術・心理学・生理学などと融合した新たな学際的研究になり得るものであり、他の理工学系の学際研究とも双方向の波及効果を持ち得る。第６期科学技術・イノベーション基本計画（2021～2025年度）で掲げた、サイバー空間とフィジカル空間を高度に融合させたシステムによる多様な幸せ（well-being）を目指した「人間中心設計」の推進のためにも、上記研究の展開は喫緊の課題である。

２　現状及び問題点

コンピュータシミュレーションに基づくモデルベース開発技術はドイツが描く第４次産業革命「インダストリー4.0」の中核をなすもので、ドイツでは大きな予算が注がれている。項目１で述べたとおり、第 23 期に計算音響学小委員会が誕生して以来、議論されたテーマは多岐にわたり、その学際的な研究領域のコンセプトは「インダストリー4.0」とは異なる独自のものである。しかし、計算力学分野を見てみると、スーパーコンピュータ「富岳」における重点課題は、破壊・流体解析が中心であり、芸術・心理学・感性工学・生理学などとの連携は必ずしも十分ではない。すなわち、各分野で先端的な研究が進んでいるものの、これらを相互に連携させる機能がなく、十分なシナジー効果が得られていない。以上を踏まえ、本小委員会では、新たな学際的音響学の創出に向けた音響を核とするシミュレーション技術の開発についての課題と解決について検討してきた。具体的には、以下の課題が確認された。

１）HPC (High Performance Computing)技術、音響信号処理技術、モデルベース開発技術、ディープラーニング(深層学習)を中核とする AI 技術を駆使し、芸術・心理学・感性工学・生理学などと連携した新たな音響学を核とするシミュレーション技術が開発できるか？

２)これらの諸分野のそれぞれが発展し、互いに連携可能な段階に達しているか？

３)如何にして、製品が希望するものとなるように、消費者自身がシミュレーションを通して作り手とコミュニケーションをとれるようになるか[1,2]？

４)AI の適用技術に関する大きな変化として、この数年の AI 学習機能の複雑系への適用の飛躍的な向上がある。音響計算の分野において、既存の学術分野の壁を越えた幅広い取組に対応できるか？

３ 課題解決のための方策

本小委員会における議論の結果を計算科学シミュレーションと工学設計分科会において取りまとめ、以下のような意見を得た。

(1) 明確な国家的政策立案と施策

１）関連する産官学の機関は、工学・芸術・心理学・感性工学・生理学・医学・環境学などが融合した新たな音響学として、それを核とする包括的音響基盤の創出に向けた環境の整備を進めるべきである。

２）関連する産官学の機関は、この新たな音響学の創出における取組に関し、工学・芸術・心理学・感性工学・生理学・医学・環境学などを連携した科学技術のさらなる創出に展開していくべきである。

３）関連する産官学の機関は、我が国の工業製品のプレゼンス向上や人材育成についての政策を立案するにあたり、オープン科学時代に入った今、製品開発における視点の多角化として、Push 型から Pull 型(ユーザー目線)も包含し、付加価値創出のアプローチ推進を勘考すべきである。

⑵ 長期的研究体制と産官学連携によるコンソーシアムの創設

1）音響学の他、工学・芸術・心理学・感性工学・生理学・医学・環境学などの分野において、それらを個々に深化させつつ、それらの融合研究に向けた、個人や組織の属する領域を超えた有機的な連携をするコンソーシアムを創設し、長期的な研究体制を構築すべきである。

2）革新的HPCI(High Performance Computing Infrastructure) においては、これらの分野を連携した音響学に関する、永続的かつ学際的な研究開発組織を構築すべきである。

⑶ 人材育成

1）大学等の高等教育機関においては、音響学を核として専門性を高めながら、工学・芸術・心理学・感性工学・生理学・医学・環境学など関連領域の専門家の講義を受講し、卒業研究などの研究段階で関連分野の研究室とも連携できるカリキュラムをデザインすべきである。

2）音や振動といった物理量を評価する従来のコンピュータシミュレーションを基軸とするが、人間に与える影響までを考慮する人間中心の視点を教育課程において習得させるべきである。

目　　次

１　はじめに 1
２　報告の背景、課題、提案 4
(1) 背景 4
(2) 課題 4
(3) 提案 5
３　新たな音響学を構成するテクノロジー 7
(1) 音響信号処理・波動解析の緻密化モデルの構築技術 8
① 音響信号処理に関するモデル構築技術 8
② 高度波動解析（ミクロ組織・複合構造・混相・接触など）に関するモデル構築技術 9
(2) 計算処理高度化による大規模モデル処理/深層学習・AI 技術 9
① HPC（High-Performance Computing）技術 9
② ディープラーニングを中核とする AI 技術 10
(3) 心理学、感性工学、生理学（脳科学）、芸術 11
(4) 予防医学、音楽療法 12
(5) 社会システム、環境、都市計画、VR 12
４　新たな音響学創成のための分野連携 14
(1) 音響と心理学、感性、芸術分野の連携 14
(2) 音響と生理学・医学の連携 15
(3) 音響と環境・社会との連携 15
５　新たな音響学創成のための方策とその波及効果 18
(1) 明確な国家的政策立案と施策 18
(2) 長期的研究体制と産官学連携によるコンソーシアムの創設 19
(3) 人材育成 19
(4) 学術領域の創成 20
(5) コンソーシアムの創設と期待される成果 21
＜用語の説明＞ 22
＜参考文献＞ 24
＜参考資料１＞審議経過 35
＜参考資料２＞シンポジウム開催 38

1　はじめに

1)デジタルデータの活用: 計算力学を基盤とする計算機による物理シミュレーションの普及は、自動車業界での物理モデルからデータモデルへと開発スタイルの変革をもたらし、開発効率向上に著しく貢献した[3]。さらに、世界的な環境規制、自動車の電動化、自動走行の実現などへの迅速な対応のため、多分野が連成した統合・融合問題を扱う必要が生じるなど、実機評価に代わりデータモデルを用いるコンピュータシミュレーションに対する新たな技術ニーズが生じている。

2)インダストリー4.0: ドイツではこのような動きを第４次産業革命と位置付け「インダストリー4.0」が精力的に進められている。また、米国では IIoT（産業向け IoT）を推進する IIC が設立され[4]、中国では 2015 年に「中国製造 2025」が打ち出されるなど、情報化と産業化の融合や品質の強化、環境への配慮などを重視した産業構造の強化が進められている[5,6]。ここでは、実体とデジタル空間を交互に活用するサイバーフィジカルシステムやデジタルツインなどの適用による製造業の構造的な改革を目指している[7,8,9]。具体的には、製品や製造工程などをコンピュータシミュレーションによってデジタル空間上に再現し、デジタル空間上で開発を進め、その結果を現実に展開する。また、現実世界における結果をコンピュータシミュレーションにフィードバックすることで、開発をさらに加速する[7,8,9]。さらに、デジタルモデルは、消費者にも、製造者への即時のフィードバックにより、製造者と消費者の一体化を加速し、品質の確保や製品の魅力度が問われる時代となる。最近では、音質の良さへの付加価値が問われている[10]。

3)新たな音響学へのアプローチ: このような科学技術の製品への新しいアプローチとニーズは、音響に関する多くの学術分野に跨る学際的領域での研究にも重要である。

4)音響学に関わる産業界の動向 ： 自動車業界では、車の音は商品性に深く関係しており、扱う問題も、車外騒音から音質まで極めて多様である。また、自動車産業は、機械工業全体に対して約４割の売上を占め、研究開発費は約 3.7 兆円で、研究開発者の多くが何らかの形で振動騒音問題に関わる程、音響学に多くの資金・物・人が注がれ、先端的な取組が進んでいる[11,12]。また、我が国には世界的な楽器メーカーが多く、音響に関する科学技術は我が国の一つの強みである。世界市場におけるピアノのシェアではヤマハ株式会社は首位、株式会社河合楽器製作所も２番手グループ、ヤマハ株式会社の電子ピアノやポータブルキーボードなどの電子楽器は世界シェアの約半分である[13]。

各種の電動モビリティでは、電動走行車や自動走行車、空飛ぶクルマの開発などにより、音の問題は質的に変化し、音質に関する新たな技術の研究開発が必要となる[14]。また、空飛ぶクルマが市街地上空を飛行するには、多岐にわたる騒音問題の解決は必須で、従来技術の延長上にない、新たなアプローチが求められつつある。また、電気自動車ではエンジンの消滅により車室内は静粛となるが、電動化に伴う耳障りな高周波音やタイヤと路面で発生するロードノイズなどを調節することで快適なサウンドデザインが実現できる[15,16]。また、エアコンでは動作音の周波数特性の変更による体感温度の変化[17]、受動的な聴覚刺激が主となる後席乗員での体感する音圧変化[18,19]、乗員の視覚による車速の変化[20]、変速操作での五感における感覚間相互作用[21]などを考慮した高次元な

人間中心設計が求められている。

5)関連する学会などの動向: 計算音響学小委員会では、音の発生、音の伝播、聴覚器官による音響に対する感覚、音楽、騒音等、音に関するあらゆる現象を扱っており、工学・芸術・心理学・感性工学・生理学・医学・環境学など幅広い学際領域を成している。これまで、スーパーコンピュータを用いた「コンサートホールの音響」のシミュレーション、AI と音質シミュレーション、機械学習に基づく自動車走行音の特徴量抽出[22,23]、楽器の発音機構のモデリングとシミュレーションから作曲に至るまで、また、感性の領域にも踏み込むなど、多様な議論が進んでいる。

6)音に関連する手法の動向: 自動車の自動運転等で熟成している AI の適用範囲の拡大により、この数年の AI 学習機能の複雑系への適用拡大がある。ここでは、適切な教師データ群等の習得が重要であり、生体系を含む広範囲の多量なデータ群の習得が有効である。そのためには、既存の学術分野の壁を越えた新分野での研究活動・機械学習への寄与が求められている[24,25,26]。音のデザイン手法としては、音の印象を主観評価に捉え、音色を多次元的に分析して改善する研究[27]、さらに、映像と音楽や効果音などとの相乗効果を体系的に捉えるマルチモーダル性が研究されている[28]。他国では、フランス国立音楽音響研究所(IRCAM)で、人間の知覚や感性に基づいた音デザインを標榜しており[29]、EU では環境騒音に関するガイドラインが定められており[30]、環境音の与える人への影響を考慮した先鞭をつける実施例がある。「人間中心設計と音響学」に関して、「令和４年版情報通信白書」[31]にあるメタバースやテレワーク､オンライン授業の急速な普及､動画・音楽配信市場の拡大などを背景に音声技術は成長分野である。音に関する科学技術を、感性を含めた心理的、生理的な領域にまで拡大させることは、広域分野を融合した新たな学際的研究になり得る。音を人間視点で評価する「人間中心設計」を入れた「ものづくり」は、我が国のものづくりにおいても重視されるべき視点である[32]。包括的音響シミュレーションの考え方は、①従来の音響学に加え、生体反応に関する生命科学や「心地よい音」を明らかにする芸術・心理学を融合した、新たな音響学と②人間の感覚・特性・感性を踏まえ、人に与える影響までを積極的に評価する人間中心設計視点とを核とするものである。包括的音響シミュレーション基盤の創出が急務である。

以上のように、計算音響学小委員会では、日本学術会議の特徴である、単独の学会だけでは扱えない多岐にわたる最先端の音響関連技術の現状と課題を議論しており、日本音響学会が扱ってきた領域にとどまらない幅広い分野の連携を想定した、極めて学際的な取組がなされている。

以上を踏まえ、本報告では第５章に示す方策を提案する。

前で述べたインダストリー4.0 では、その実働組織としてプラットフォーム・インダストリー4.0 が構築されていた[33]。同様に、我が国においても、本コンセプトの実現のための実働組織が必要である。

本取組は音響学のみならず、理工学・人文社会科学・生命科学等、多くの分野に関わっている。そのため、新たな研究組織では、これまでの縦糸的研究組織に加えて横糸的組織も加えた、分野横断型の取組を進める必要がある。このような学際研究を効果的に進める際には、核となって動くグループがなくては、表面的な議論に終わってしまいかねない。例えば、インダストリー4.0 では、フラウンホーファー研究所が産学連携の核となっている[7,8,9]。一方、自動車業界では、現在、100 年に一度の大改革が起こっていると言われており、ハードウェアだけでなく AI や IoT などの情報技術との深い連携が進みつつある。その中で、音響技術についても大幅な進歩を遂げようとしている[14,34,35]。

また、本コンソーシアムの創設は、Society 5.0 の実現に向けた、well-being の実現への貢献も期待できる。音響は心身という個人的でミクロな面と、環境という社会的でマクロな面をもつ。情報過多でストレスの多い現代社会において、人体に適度な刺激を与える音響システムは、人体への刺激と効果のバランスの取れた音響支援医療を提供する可能性も示唆されている[36,37,38]。

2　報告の背景、課題、提案

(1) 背景

音響学は、理工学分野の一大テーマである一方、幸福度、安心・安全性、ストレス緩和の面から、人文社会学と深く関係する。さらに、音や振動の刺激が人の生理・心理状態に影響を及ぼすことが知られており、これを活用した音楽療法[39,40]なども研究されているなど、音響学は生命科学とも深く関わっている。

このように、音響学には多くの学術分野が関係しているが、これらは別個のコミュニティで検討・展開されてきた。計算音響学小委員会では、個別ではなく、多くの学会に帰属するメンバーからなるという日本学術会議の特徴を活かし、これらを融合すべく、議論を進めてきた。その中で、従来の音響学に加え、生体反応に関する生命科学や「心地よい音」を明らかにする芸術・心理学を融合した、新たな音響学の構築の必要性が指摘された。音楽などの創造芸術は、単に「心地よい」ではなく、高度な精神的影響を与えていることが知られているが、「心地よい音」とはどのような音であるのかという問いに対して現時点でも明確な解はない。人にとってストレスを与えず、リラックス感や前向き感等を与えるものであると考えることはできるが、その本質については単に工学の視点のみからでは解決不可能であると考える。そのため、この問い自体も本報告で想定する重要なテーマであると位置づけ、芸術の観点からも音の関わりに注目する。このように本報告では「心地よい音」の本質を問う中で音と芸術の関わりを重要視し、工学・芸術・心理学・感性工学・生理学・医学・環境学など幅広い学際領域で多様な議論を重ねることで、この問いに対する解を提示することを目指す。

これらのねらいは、「人間特性を考慮した音を製品に与える」というコンセプトを提示するものである。また、この新しい音響学は、well-being の実現にも貢献する。

Society 5.0 に向け、このコンセプトを実現していくには、従来の延長にない、音響を核とし、芸術や心理学、生理学などを融合した、新たな科学技術基盤の開発が必要である。また、そのためには、研究開発を進めるための基盤的組織が必要である。特に、これは、従来のような、分野ごとの縦糸型組織だけでなく、ダイバーシティに富んだ、分野融合の横糸型組織を指向する。そのような柔軟性に富んだ組織として、音響環境に関する新たなコンソーシアムを創設すべきである。

(2) 課題

日本学術会議総合工学・機械工学委員会合同計算科学シミュレーションと工学設計分科会計算音響学小委員会では、音響計算分野で取り組むべき対象を検討し分科会でも共有してきた。以下に、指摘された課題を示す。

1)電動化、自動運転、空飛ぶクルマ等の大変革が起きている移動体の交通音環境の研究

2)幼児発育(脳の発達)や高齢者の認知症対応等の音声・言語処理技術も取り入れた複合的な取組の研究

3)自動車に関する「音と脳の反応」及び「音の場での複合感覚利用による豊かさや能力の向上」の研究
4)生活空間(居住乗り物、オフィス、教室等)で曝露される音響の音質の生体への影響に関する研究
5)都市空間、工場・オフィス、道路・空港等の騒音における騒音規制・音環境の評価視点の改善に関する研究
6)都市空間における車と人の流れのコンピュータシミュレーションによる賑わいに対する音環境と行動変容に関する研究
7)楽器による音響の場と癒し効果に関する研究
8)楽器の音質の作り込みに関する研究
9)ニューラルネットワークを用いた、癒し効果を人間の表情、しぐさで評価する研究
10)グループ間での会話ネットワークによる心のケアの評価に関する研究
11)生活環境で曝露される環境音響の生体(生理・心理)や脳機能への影響に関する研究

これらの課題の解決に向けた、音響を核とする分野融合型シミュレーション技術の開発と、そのための環境構築、人材育成が必要である。

特に、音響計算として、AIに関するアプローチは重要である。この数年を経て、自動運転モデルは、従来の 3D 精密地図を用いるルールベースのシステムから、センサー入力への移動体や Map 情報を機械学習する方式に大きくシフトしている。すなわち、走行道路状況の把握を複合センシング機能と必要な教師データで処理する方式である。この最先端として、VLM(Vision Language Model)が主流であり、カメラ情報から必要な対象物認識と対応すべきアクションを同時に、柔軟に獲得できる。さらに、生成 AI 等の大幅な機能が向上したシステムの実現により、チップの計算能力の効率化と相まって、自動車システム全体へのアプローチへと拡大し、広域の教師データ群の学習・充実を獲得することで、その付加価値は飛躍的に進化し始めている。

ビジュアルと同様に、音響関係の課題に対しても、これらのシステムモデルは適用が可能である。しかし、音響関係の付加価値は、心理・生理的側面、健康・医学関連や社会性とつながっており、人権、倫理面等の高い壁があるため、俯瞰的見地からのアプローチは、大きな困難を伴う。まず必要となるのは、現在の学術的分野の壁を取り外し、お互いに連携し、新しい学問分野としての協力体制と学習する教師データ群の蓄積と活用が重要となる。したがって、音響計算分野は、これらの連携のコアテクノロジーとして、有機的に機能すべきである[41,42,43,44]。

(3) 提案

提案１ 新たな音響学の学術領域の創成
提案２ 新たな音響学創成のためのコンソーシアムの創設

これらの提案に基づく取組によって、以下の成果が期待される。

1)オープンイノベーションや MBD（モデルベース開発）など DX による知識・技術の国際的結集
2)空飛ぶクルマ等新製品での問題の先取り
3)転動による非線形加振や複合構造内の波動伝搬現象であるロードノイズ、空気力学的音響と構造振動の連成現象である風音という自動車騒音の最難課題の実現象の解析
4)対象を構造物振動や空中音響から、分子レベルのトライボロジや生体内波動へと深化
5)ヒトの聴覚の作用を定量的に計測し、モデル化する機能を実現
6)設備等の音の場の構築自体を研究課題として捉え、新しい機能・環境を創造
7)社会空間でのコミュニケーション・相互理解・体験共有を含む音響伝達の位置、距離、時間を超える音響の共有の実現・普及支援の実現
8)人間等の行動や生活に適合する環境音の提供、さらに積極的である健康維持、医学療法支援や認知症を含む高齢者生活支援等の well-being の体系化への寄与拡大
9)音楽としての創造的、芸術的行動への可能性の支援の増大
10)俯瞰的見地より、国民、世界の豊かさ、幸福度の向上への寄与拡大

上記(2)で述べた課題の解決に向けたシミュレーション技術の開発は、単純な計算技術の発展で達成することは困難であり、分野融合的な横断研究に加え、実験やモデリング技術の開発も必要となることに留意が必要である。

３　新たな音響学を構成するテクノロジー

国連が提唱するSDGsのように、近年、GDPのような経済成長を目指す指標だけでなく、精神的な豊かさや幸福感、健康度・健康寿命・安全度・教育への新指標が社会目標として模索されている。人間本来の感性・知能・身体の観点からの人間らしさの追求である。

第 23 期に計算音響学小委員会が誕生して以来、議論されたテーマには、モデルベース開発技術の他、HPC技術、音響信号処理技術、ディープラーニングを中核とするAI技術などが挙げられ、このような分野横断的な議論は「人間中心設計」を目指す極めてユニークなものである。また、音楽療法は、普段より音響・情報にさらされる生活の中での効果の科学的検証は難しく、現在の技術の延長にはなく、これを実現するためには、理工学・人文社会科学・生命科学などの分野の深い連携によるブレイクスルーが必須である。この幅広い分野が連携した、新たな音響学の包括的音響シミュレーションというコンセプトは「インダストリー4.0」とは異なる独自のものである。また、ゲームや映画等において視覚、聴覚、触覚（さらに場合によっては嗅覚も）への刺激を与えるバーチャルリアリティ技術が発達している[45]。これらは刺激の再現性を高め「疑似体験させる」ことの影響や効果を追求しているが、本報告においては、後述するように人に与える影響を、計算音響学を通じて多面的かつ積極的に評価することで新しい分野を拡げようとする点が異なっている。

すなわち、音響や振動現象への対応技術だけでは、要求されるニーズに対して対応が難しくなっており、その対応法の可能性が包括的音響シミュレーションに求められている。具体的には、「AI とデータサイエンスを活用し、生体反応や個人の感受性、微細な振動エネルギーの動きまで再現・予測するデジタルツイン・シミュレーション」、「ナノ等のミクロな現象領域や多重のパラメータを含む大規模なモデルも含めた解析シミュレーション」等がある[46,47]。すなわち、包括的音響シミュレーションでは、これらの手法を包括的に扱い、音響に関連する複合領域でのアプローチを試みる必要がある。同時に、これらの手法を実現するには、リアル情報の取得が重要であり、個人、グループをはじめ、関連産業、公的機関の IoT 等による情報の取得及び保全の協力体制やそこから得られるデータベースの活用が求められる。新しい音響学の立場からも、産官学をカバーするプラットフォームの実現への働きかけが重要である。

下記の(1)は、ミクロな振動エネルギー挙動の解明により、音源レベルから音質改善にも踏み込んだ検討を試みるものである。音響として課題の多い人工音の代表として、例えば、交通騒音ロードノイズや生体・社会への生活・都市音響の影響等による複雑系モデルの課題を取り上げる[34,35]。さらに引き続き、他の対象分野に展開する。(2)は、新たな音響学の包括的音響シミュレーションの前提となる大規模計算モデルや AI 技術を取り上げている。人間中心設計に適合するために、データサイエンス等の体系化等の推進も含むものである。(3)～(5)は、音響の対象モデルとして、生体や社会モデル等を内含する複合領域へのアプローチを推進するもので、AI によるデジタルツイン等の手法の適用が課題である。

以下、包括的音響シミュレーションを支える諸技術について、それぞれの現状とニーズ

の方向性を述べる。これらの内容からも分かるように、すでに多くの分野で、音響・振動の工学的アプローチや演算能力の高度化が複合的に取り組まれている。科学技術全般としての統計資料[48]や音響を取り巻くいくつかの研究領域(サウンドスケープ[49]、聴覚刺激研究[50]、音楽と健康全体[51]、音と回復・健康[52]など)の文献調査を行うと、主要研究拠点として英国勢(University College London (UCL)など)が突出しており、欧州主導の研究ネットワーク形成[53,54]が活動している。音響学分野の研究活動の統計学的分析に関する文献は直接ないものの、これらの文献や日本では日本音響学会誌や各大学等の論文調査を行うと、日本は自動車や建築などの音響研究、快適性評価の分野が活発であり、欧州は日本の活動分野からさらに先の健康、Well-being、都市政策との音響の連携に関する研究文献が多い。

すなわち、日本では、音響学研究その大半は、その分野の主要テーマの解明や最適化に取り込むことが主題であり、その分野でのより広域での新しいテーマの発掘や他の分野との境界領域での新しい命題の構築までは届いていない場合が多い可能性がある。その達成のためには、様々な分野の研究連携やデータベースの構築が欠かせない。特に、人間中心課題には、プライバシーや社会的制約をクリアするための共同連携と価値観の共有が欠かせない。世界でのトップグループの研究を確保するには、大規模な多様な研究内容が求められ、それによる研究能力の構築につながる[48]。

(1) 音響信号処理・波動解析の緻密化モデルの構築技術

①音響信号処理に関するモデル構築技術

音響信号処理に関する技術は、デジタル信号処理を中心に多様な発展を遂げてきている。基礎技術としては、音場計測、各種フィルタ、時間周波数分析等があるが、その他にも以下のような核となる基礎技術がある[55,56,57]。

1)音源分離関連技術・音源定位関連技術：適応型アレー等を用いたビームフォーマー、ICA(独立成分分析)等によるブラインド(目隠し)信号処理、SAFIA(音源分離法)等信号のスパース(まばらな)性を用いた方法、CASA(計算論的聴覚情景分析)による情景分析等。さらに各種遅延時間推定法による音源定位と音源追跡等。

2)音場制御技術：頭部伝達関数、バイノーラル(両耳による立体音響)システムを活用した音場制御法。境界音場制御、スピーカアレー(列)による制御等。さらに、雑音・残響抑制技術、騒音の能動制御技術等の手法も含む。

3)距離・時間をキャンセルするコミュニケーション技術：音楽や音声の録音・再生の自由度を向上させる音響周辺技術も広義の音響信号処理とする。以下のような進展が想定される。

(a)遠隔地間の同時録音技術

遠隔の複数の演奏者が一つの楽曲を完成させる過程を実現する技術。遠隔地での通信の時間遅れの影響を双方向送受信に関する低遅延伝送により、録音と再生の質を飛躍的に高める手法[58]。

(b)高精度な音響領域分離制御[59]

展示会やオフィスシェアリングなどの一つの空間で異なる音の再生を複数の人が利用できる技術。

4)音響と振動の複合知覚での連成解析技術：両者の相互作用に関する新しい音響複合モデル構築技術、リアル・バーチャルな映像との複合知覚連成モデル等の構築技術。例えば、高精度の臨場感再生技術によりバーチャルな臨場感を実現し、well-beingにも寄与する[60]。

②高度波動解析（ミクロ組織・複合構造・混相・接触など）に関するモデル構築技術

1)ランダム加振力解析：現象モデルの解明が課題となる事例が多い。例えば、変動感の要因として、ロードノイズ評価では、路面表面近くの通気性の変動やタイヤ空洞内音響共鳴等がある[61,62]。

2)波動伝搬解析：モード解析や統計的エネルギー解析では難しい中周波波動伝搬に対し、グリーン関数(単発インパルス加振応答に対応)の応用や大規模計算による時間軸での波動伝搬解析手法が求められる[63,64,65]。

3)非線形・可変性モデル解析：複合的複雑加振メカニズムを伴う課題への解析技術、接触問題の事例で、ゴムと路面凹凸の滑り転動接触加振力発生の力学モデルの構築[66]。張力構造・薄板構造問題では、タイヤでの空気圧による復元力を利用する独特の構造特性のモデル化等が課題である[67]。

4)分散系と群速度：振動の固体伝搬は周波数により速度が異なるために分散現象が生じる。群速度として現象を記述する理論的手法の開発が求められる[68]。また、回転体のコリオリ力(地球自転に起因)による半径方向と周方向の振動連成等を含めた解析技術も課題である[69]。

5)化学的ポテンシャル力を考慮する分子設計を内含する高度材料技術の開発との連携が必要である[70]。

6)計算流体力学による流れ場・音場の定量的な解明と予測技術を構築する[71]。

7)加振による音響・振動エネルギーの挙動とその因果関係の可視化が求められる[72,73]。

(2) 計算処理高度化による大規模モデル処理/深層学習・AI技術

①HPC (High-Performance Computing) 技術

音響の波動シミュレーションは、周波数領域で有限要素法を用いて行われるものが多い。この場合、対象となる空間領域全体を離散化して得られる、大規模な線形方程式に帰結される。求解のための計算負荷は非常に大きいため、領域分割法を用いて並列計算はしているが[74,75]、大規模なマトリックスを分解するプロセスに時間を要し、並列度を大きくしても効率向上には限界がある。そのため、理化学研究所等が公開している「京」や「富岳」の利用事例[76]には、構造力学や音響に関するものはほとんど見当たらない。更なるHPCの活用が求められる。

一方、船舶のプロペラや風車の翼回りの流れのコンピュータシミュレーションな

ど流体工学に関する事例が中心になっているのは、時間領域で流速分布の発展を解くアルゴリズムが並列計算に向いていることが要因と考えられる。これまで、音響波動シミュレーションを時間領域で行った事例としては、時間領域有限差分法（FDTD法）を用いた音場シミュレーション[77]、発生音響車室内の音場解析[78]や人体内の波動伝搬の問題を扱ったものが検討されている[79]。また都市・建築・環境に関連するものとして環境音が快適性に与える影響[80]についての検討や、減衰に関する材料特性や壁の反射・吸音特性など周波数依存性を有するものの時間領域での表現が困難であることも[81]、波動音響の時間領域シミュレーションに関する課題であると考えられる。

さらに、今までアプローチが難しかった複合領域へのHPCの活用が期待される。

1）音響の脳等への生理的、心理的影響のミクロなメカニズムの解明
特に、領域横断の複合アプローチや時系列変化を伴う生体ミクロ反応など
例えば、極低侵襲型BMI(Brain Machine Interface: 脳と機械をつなぐ)デバイスの開発により、IoB(Internet of Brains)の脳波計測が実用化されると、HPCの活用により、AI 技術による膨大なデータサイエンスで、生理学的能力と音響を中心とする知覚能力の関連性の見える化等が可能となる[82]。

2）社会環境での音場の広域解析、都市・道路レベルの音環境予測、建築物等の生活環境でのマクロなアプローチ
例えば、コンサートホールのような建築空間の室内インパルス応答等の音響数値シミュレーションを、高精度で効率的に音響設計するには、HPC 技術の活用が実用化されることが望まれる[81]。これらの新しい音響学での大規模複合モデル処理には、モデル構築技術とともに、スーパーコンピュータさらに光コンピュータ等のHPC活用が重要である。

②ディープラーニングを中核とするAI技術

ディープラーニング(深層学習)をはじめとする機械学習技術は急速に発展しており、音に関する応用としては、従来からの音声認識や音声合成にとどまらず、音響のコンピュータシミュレーションにも広がりつつある。そのような流れの研究としては、以下のようなものが知られており、現在も発展し続けている[25,41,44]。

1）2019 年ごろからは、物理現象の観測データから物理法則を発見するための深層学習が開発されている[83,84,85]。これらの手法では、エネルギー保存則などの物理法則を保つようにニューラルネットワークが設計されており、これを利用すれば、ロバスト(ばらつきに安定)なコンピュータシミュレーションが可能となる[86]。これにより、音をデータとして与えるだけで、それを再現するための物理モデルの導出とコンピュータシミュレーションが自動的に行えるようになると期待される。

2）従来、画像に対して利用されていた超解像技術[87]の、コンピュータシミュレーションの高精度化への応用が進んでいる。これは、高速に実行可能な粗い精度のシミュレーションデータを元に精密な物理シミュレーションを可能とする技術であ

り、これによるコンピュータシミュレーションの高速化・高精度化によって音響技術の開発の加速が期待される。

3)ニューラル作用素と呼ばれる方法は、コンピュータシミュレーション時に与えられるパラメータや初期値データなどからシミュレーション結果を直接に予測することを可能にする手法である[88,89]。従来のコンピュータシミュレーションと比較し、精度に劣る一方、極めて高速であり、リアルタイムシミュレーションの実現可能性をもつ。これらのデータサイエンスの手法は、生体モデルや思考・感覚・感情モデルを取り込んだ音響複合モデルへの適合が求められる。

(3) 心理学、感性工学、生理学（脳科学）、芸術

空気伝播による音響信号に対する生体の感受性に関するテクノロジーは、主として聴覚として扱われる。単なる音波の物理現象としてだけでなく、耳での電気信号への変換に関する生体機能や、脳での生理的、心理的な知覚に関する機能の研究も含まれる[90,91]。これらは、音響心理学として包括される。さらに、脳波等の客観的な生理的指標と主観評価を関連付けることにより音質評価も音響心理学の領域と融合しながら、多様に発展している[92,93,94]。

人の聴覚特性に関しては、一般的に、周波数認知能力は、対数的音階と認知され、蝸牛（基底膜）における周波数分析はフィルタバンク（ウェーブレット分析）的であり、また、音圧変化にも非線形で対数的とされる。脳で処理されるものとしては、マスキング効果、うなり、和音、ミキシング等への反応、感情への反応等がある。これらの現象を説明する指標として、音響の各種な数理処理とパラメータが用意されている[95]。このように、人間の聴覚は時間的な変化・非線形な感性反応・意味の重層性を含む[96]。さらに、音が「快」か「不快」か、「安心」か「警戒」かは、物理量だけでなく文脈・記憶・情動・文化に大きく依存する。このように、聴覚のモデル化は困難であり[97]、これに対して学際的な立場から取組む意義は大きい。

また、音などの感性に関する包括的音響シミュレーションとして、人の心に計算論的アプローチで迫ろうとする（Affective Computing）試みがある[98]。また、ニューラルネットワークを用いるAI深層学習は幅広い学術分野にまたがる生体等の複雑系(表情、感情、心理等を含む)の大規模モデルへの適用が可能で、計算能力の拡大とともに、因果のわかるアルゴリズム等が用いられ因子の明確化が可能となった[99]。音楽、楽器、作曲に対する芸術的、創生的追求とその生体(生理、心理、脳)に対する影響への科学的アプローチは近年試みられるようになっており、その分野は複合領域としてその体系化が求められている[100,101,102,103,104]。

加えて、音響技術は芸術領域、とりわけ音楽分野においても本質的な役割を果たしている。従来の音楽制作や演奏における音響技術は、録音、再生、音場設計といった支援的機能にとどまっていたが、近年ではこれらが創作そのものに深く関与するようになっている。すなわち、音響信号処理やAI技術の進展により、作曲・編曲・演奏・評価の各過程が計算論的に拡張され、新たな芸術表現を創出する基盤となりつつある

[105]。

例えば、音響特徴量の抽出や統計的モデル化に基づく音楽分析は、楽曲構造や音楽的文脈の理解を支援するだけでなく、創作支援や自動作曲システムの実現にも寄与している[105]。また、深層学習を用いた音楽生成技術は、作曲スタイルの学習や即興生成を可能とし、人間と AI の協調的創作という新たな芸術形態を生み出している[106]。さらに、演奏時の音響フィードバックをリアルタイムで制御する技術や、演奏者の身体動作や生体信号を音響に結び付けるインタラクティブシステムは、演奏行為そのものを拡張する試みとして注目される[107]。

加えて、建築音響や音場制御技術は、コンサートホールや劇場空間における音響体験の設計において不可欠であり、空間そのものを含めた芸術表現の質を規定する要素となっている[108]。近年では、バーチャルリアリティや拡張現実と連動した音響提示技術により、物理的制約を超えた音楽体験の設計も可能となり、鑑賞者の没入感や情動反応を計算的に設計する研究が進展している[28]。

このように、音響技術は単なる再現・伝達手段を超え、芸術表現の生成・拡張・評価に関与する基盤技術として位置付けられる。今後は、音楽理論や芸術学と、音響工学・AI・脳科学を統合した枠組みにより、創造性や感性の定量化と設計が可能となることが期待される。この方向性は、新たな音響学における「人間中心設計」の重要な柱の一つである。

(4) 予防医学、音楽療法

音響による健康保全や予防医学への効果、音響による生体へのストレス回避のアプローチは、身体的な不調や心の働きを含めた生体反応データベースの分析とスコーピングが主体であり、最近は、データに対する AI 分析による支援システムへの試みも活発である[36,47]。しかし、予防医学としては、PHR(Personal Health Record)の整備によるデータベース構築は緒に就いたばかりである。データ群の AI 制御モデルと解析的数理モデルによる生体・環境・音響モデルの構築によるデジタルツインが提案されている[109]。

音楽療法[39,40]は、高齢化社会での認知症に対する効果も含めて、有効な事例がいくつか報告されているが、その寄与を明確にするテクノロジーは少ない。また、生体への音響学の影響の科学的検討としては、脳科学の分野での計測値と療法等との統計学的研究、AI 学習による評価指数の数値モデル化などが提案されている[99,110,111,112]。子供、特に乳幼児期では、聴覚情報処理能力が十分でないため、保育の音環境には課題が多くあり、多角的取組が求められている[113,114]。さらに、児童青年期での教育現場や最近の成人・学生のリモートワーク、オフィスでのストレスに対しても、音環境の影響が注目される事例があるが、多角的で体系的なアプローチは少ない[115]。

(5)社会システム、環境、都市計画、VR

社会学面では、都市空間等の統計学的な生体、都市・住宅環境の挙動に関する数理

モデルの構築と数値シミュレーションが行われている。

交通騒音予測は、都市環境空間において移動を含む音源モデルを用いるマルチエージェントシミュレーションが行われている。さらに、都市空間における環境音の聴感モニターによる因子分析が統計学的手法で導入されている[116,117,118]。

最近では、サイバーフィジカル空間としての社会空間の構築がスマートシティ等のプロジェクトとして、社会導入の試行が加速している。スマートフォン、タウンカメラ等に代表される IoT によるデータ群の蓄積、活用が進みつつあり、社会システムの可視化シミュレーションの活用が推進されている[119]。

日本においては高齢化が一段と進み、人口当たりの認知症発生率は世界の中でも高く、重要な課題である[120,121]。認知症の予防・ケアにおける音環境やコミュニケーションの役割が注目されており、個人レベルでの研究とともに、社会生活でのコミュニケーションが大きく寄与する。実体験だけでなく、バーチャルリアリティによる疑似体験を含む社会での高齢者の交流モデルの検討が進みつつある[122,123,124]。

また、近年のバーチャルリアリティ（VR）及び拡張現実（AR）技術の進展は、音響と視覚の統合による新たな社会環境設計の可能性を大きく広げている。従来の音環境設計が物理空間の制約に強く依存していたのに対し、VR 技術の導入により、視覚・聴覚を統合した仮想空間において音環境を設計・評価することが可能となっている[125,126]。

特に、空間音響技術と視覚提示の同期は、没入感（プレゼンス）を向上させる重要な要素であり、仮想環境における体験の質を規定する[108]。このようなマルチモーダル統合環境は、エンターテインメントにとどまらず、ストレス低減や心理的回復といった well-being への直接的応用が期待されている。

例えば、自然環境の映像と環境音を組み合わせた VR コンテンツは、注意回復やリラクゼーション効果をもたらすことが報告されており、都市生活における精神的負荷の低減手段として注目されている[28]。また、医療・福祉分野においては、音響と視覚を統合した仮想体験が認知機能の維持や情動安定に寄与する可能性が示されている[127]。

さらに、スマートシティに代表されるサイバーフィジカルシステムにおいては、実空間の音環境データと仮想空間のシミュレーションを統合することで、都市環境設計の高度化が可能となる。すなわち、都市音環境をデジタルツインとして再現し、その上で視覚・聴覚統合型の仮想環境評価を行うことで、快適性や健康影響を事前に予測する新しい設計手法が期待される[128]。

このように、視覚と聴覚を統合したバーチャルリアリティ技術は、個人の感性や心理への作用にとどまらず、都市・社会システム全体の設計においても重要な役割を担う。新たな音響学においては、これらの技術を基盤として、人間中心の well-being を実現する環境設計が重要な研究課題となる。

４　新たな音響学創成のための分野連携

製造業は我が国 GDP の２割弱を占めており[129]、我が国の産業構造を支える業界である。我が国の強みであるものづくり産業が、サイバーフィジカル技術を牽引しつつ、ハイパフォーマンスコンピューティング技術や生命科学・芸術・社会科学と連携して、発展することができれば、Society 5.0 を実現し、真に豊かな社会に向けた新時代の産業を、ものづくり産業のみならず、社会・芸術・医療の全ての分野において創出し、我が国から世界に展開できると期待される。その一環として、新しい音響学の持つ付加価値創生による役割は大きい。

以下に、そのような連携の代表的な例を挙げる。世界での音響学などに関する科学技術の動向[48,49,50,51,52,53,54]でも、研究トピックの継続(音響基盤領域)は維持しているものの、新規(複合領域)では、諸外国に後れを取っている。また、科学から技術へのバランスの移動が続いており、研究者の伸びは他の主要国と比べて小さい傾向は音響学にも影響が及ぶものと考えられる。音響・振動分野は世界のトップクラスを維持しているものの、従来研究の深化より、より新しい、付加価値の大きい、魅力的な複合分野での連携が重要である。以下の例などの深化・拡張が求められる。（図１参照）

(1) 音響と心理学、感性、芸術分野の連携

我々の生活の中には、情報伝達音、環境音、音楽として、多くの音響が密度濃く浸透している。音楽や放送等による音響のビジネスだけでなく、生活環境音の改善、音響の癒し効果、音楽療法、さらに芸術の領域等まで音の付加価値に対してニーズが強まっている。その結果、音響の明解な認識だけでなく、well-being としての音響の俯瞰的研究が注目を浴びている[130]。 音環境の個人、社会への影響、特に音楽による脳への影響は大きく、知能、記憶力、心身制御、健康から協調性、社会性への影響、さらに脳の発育の重要な課題として注目されている[131]。欧米では、この横断的複合分野での研究や新指標の設定への動きが始まっている[132]。日本は、個別には優れた研究があるが俯瞰的な研究分野では後れている。

例えば、英国王立音楽大学の演奏科学センターでは、心理学・音楽学・工学・医学・教育学などの異分野協働型の「演奏科学」研究拠点を構築し、異なる視点から多分野の専門家が協働し研究を開始している[133]。演奏科学は、演奏者の微視的な身体挙動をバイオメカニクス的な手法で調査し、また発せられる音の変化を音響工学的に分析し、その関係を数理的に明らかにしようとするもので、こうした分野との協働により、楽器などの音源のモデル化や、より心地よい音の生成などをすすめることができる[134,135]。また、我が国でもムーンショット目標９において、音楽の効果を脳科学的に解明し次世代の感性を育むことを目指すプロジェクト[136]が 2022～2024 年に実施され、音楽・医学・心理学の分野融合による研究開発が取り組まれた。本報告は、これに加えて AI・デジタルツインを取り入れた包括的音響シミュレーションによるアプローチを目指すものである。

⑵ 音響と生理学・医学の連携

計算音響学で現在用いられている多くの手法は、耳からの聴覚に限定されており、その結果の数理的評価は、脳の反応に関する評価の一部に過ぎない。生体への観察による評価との関係を明らかにするには、音響に関する生体反応を知ることが重要であり、生体、脳との生理的、心理的検討の連携により、研究領域を広げる必要がある。さらに、音刺激が特定の遺伝子群の発現パターンの変容に与える影響を扱う等の DNA の研究も重要になるものと考える[137]。

すなわち、音響学と合わせて、医学領域での脳科学や健康、予防・回復期医学、各種治療支援等のミクロな面から、社会学の領域から生活社会環境音としてのマクロな面までの複数領域での検討が求められる。

宗教や医学との音楽の結びつきは古代から現代まで続いている。しかし、近代の医学は自然科学として独自に発達しており、音楽との連携を行うには、音楽による患者への治療的特性を客観的に明らかにするために、総合的(生理的、心理的、社会的)な働きの影響を明確にする必要がある。音楽療法は、音楽による心理療法ということができ、言葉を超える心と身体への影響が研究されてきたが、明確な見える化が難しい。日本では、特に知的障害者や認知症高齢者に対する音楽療法は多くの取組があるが、効果指標の確立、音楽方法の選択、施法最適化等を明確化し、医学的エビデンスに基づいて医療の中で活用される音楽療法である音響支援医療の構築を目指すべきである[138]。さらに、心地よい音、生理的に効果のある音など音響支援医療分野における研究成果や知見を取り入れることで、well-being の改善に向けた人間特性を考慮した音を備える製品の設計が可能になる。

⑶ 音響と環境・社会との連携

生体や社会構造に関して、適合するモデルの設定に当たり、明解な演繹的機能は把握が難しいものが多い。これらを含む計算音響学においては、包括的音響シミュレーションとして、HPC を活用するデジタルツインによる解析手法が有効である。すなわち、現在進行しつつあるサイバーフィジカルシステムの実現により、IoT により得られたリアルデータ群の AI によるデータの学習に基づくシミュレーションと従来の数理モデルシステムとの連携が重要となる[43]。

包括的音響シミュレーションにおいては、異なるアプローチが混在する学術分野を連携させ新領域を形成する際に、柔軟性のある計算音響学を両者の接着剤の役割として活用することができる。色々な分野で音響の効果は認められているが、説得力のある論理展開が難しい場合が多い。特に人間に関わる分野では、芸術としての独自の観点に基づき歩んでいるものも多い。しかし、自然界に広く分布し、生体にも深くかかわっている音響は、その働きは省エネルギー的であり、言語以上にユニバーサルであり、代替不可能な効果も多く紹介されている[138]。ここでは、振動・音響の理工学の演繹的シミュレーションと医学、社会等の科学的観察によるデータベースのアプローチを、計算音響学を介して融合して、音響をキーワードとして新しい成果を創出するこ

とを試みる。数理モデルではモデル化が難しいものを AI データ制御モデルによるデータサイエンスのアプローチで補う、あるいは逆に、AI データ制御モデルでは物理的な説明が難しいところを数理モデルで補うという相互補完的な連携が有効であり、これによりモデルの高精度化が可能になる。

我が国では、因果の分かる機械学習技術を用いて、データの集合からその数理モデルを導く、従来型の解析スタイルの逆のアプローチを用いた研究が、進められている[99,112]。この研究の中で開発される数理モデルは、これまで数式モデルがないがために汎用的な解決が得られなかった人文社会やより多様な生命現象への波及効果も期待される。さらに、近年の生成 AI 技術の進展は、生成 AI 音楽のレベルから、音響データの合成、感性に基づいた音環境生成などのより高いレベルへのアプローチにより、音による情動調整もしくは情動誘導といった分野への応用の可能性も期待できる[26]。

そのためには、コンソーシアムの創設を手がかりとして、音響学に関する連携拠点を形成し、国内外の研究者と協働する体制を構築することができれば、世界的リーダーを目指すことができる。具体的には、まずは、ゼロカーボン化等の大変革が起きている交通音環境及び人口構成課題の幼児発育・認知症対応等への複合的な音響の生体影響や音楽支援療法等の研究を取り上げるべきである。

以上に挙げたような連携を実現するためには、包括的音響シミュレーション構築に加え、異なる分野を連携する観点から下記項目が必要となる。

1)複合分野でのリアルデータのデータベースの構築と連携

2)各分野でのセンシング方式のリアルタイム、ウェアラブル機能の充実(含、センサー装着時の違和感や生活パターンへの影響の排除、データ互換)

3)人体に関しては、個人情報の保護及び研究倫理上の要件を満たしたうえで、各分野ごとの倫理上の規定を遵守し、個人情報が特定されない状態でのデータ保全

4)AI 学習の演算速度及び推論能力の向上

ここで、1)は、異分野間のフォーマット変換、リアルタイム連携を含むデータベース構築[139]、2)は、互換性を有するストレスフリーな生体計測データ[140,141]と音や振動等の物理量との相互活用、3)は、人間工学研究における倫理基準の担保[142]とデータ保全等のガバナンスの構築[143]、4)は、複合領域での AI 利活用促進のため、超高速かつ省電力でリアルタイム推論を行う計算環境の構築[144]、これらの観点から、それぞれが必要とされる。

図１は、新たな音響学がどのような分野の連携から成り立つかを俯瞰的に図示したものである。

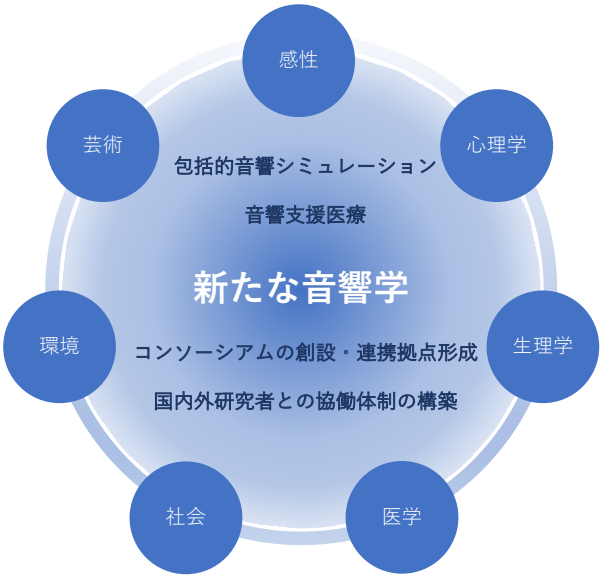


図１．新たな音響学創成のための分野連携

５　新たな音響学創成のための方策とその波及効果

計算科学シミュレーションと工学設計分科会では、上記の議論の結果として、以下のような意見を得た。

(1) 明確な国家的政策立案と施策

1)関連する産官学の機関は、工学・芸術・心理学・感性工学・生理学・医学・環境学などが融合した新たな音響学として、それを核とする包括的音響基盤の創出に向けた環境の整備を進めるべきである。

2)関連する産官学の機関は、この新たな音響学の創出における取組に関し、工学・芸術・心理学・感性工学・生理学・医学・環境学などを連携した科学技術のさらなる創出に展開していくべきである。

3)関連する産官学の機関は、我が国の工業製品のプレゼンス向上や人材育成についての政策を立案するにあたり、オープン科学時代に入った今、製品開発における視点の多角化として、Push 型から Pull 型(ユーザー目線)も包含し、付加価値創出のアプローチ推進を勘考すべきである。

これまで説明してきたように、音響学とその関連分野は、大きな変革の時を迎えている。一方、我が国の学術分野の国際的な位置付けは昨今大きく後退しており、文部科学省の科学技術・学術政策研究所[145]によれば、2018～20 年の年平均数で、引用数が上位10%に入る質の高い論文の数は 12 位であり、20 年前の４位、10 年前の６位からの下落傾向が続いている。本報告は、音響学を中心とした幅広い学際領域の学問基盤の強化を目指すものであり、これは、先に述べた学術分野の創出及び推進に資するものである。

本報告が示す方向性が国の政策や関連機関の取組に反映され、我が国の学術・産業分野の競争力向上につながることが期待される。本報告に関する、我が国の優位性や社会的な価値、SDGs への貢献などは以下のとおりである。

【国際的な我が国の優位性】我が国は世界トップクラスの音響性能をもつ製品を開発できる産業力がある。例えば、高性能で快適な音質の自動車、世界的な音楽再生システムブランド、国際コンクールで使われる楽器などである。特に、自動車関係は強力であり、電動化時代の自動車車内騒音を支配する風音の解析では、我が国の強みであるスーパーコンピュータ「富岳」による CFD(Computational Fluid Dynamics)を行っており、実車風洞での高度計測技術と組み合せて、世界トップレベルにある。

【社会的な価値・SDGs への貢献など】現在のグローバル化社会は、情報過多や価値観の違い等が干渉し複雑な多層構造を持ち、対応が難しい。そのため、人類の目標が、経済的利便社会だけでなく、人間性の確保、幸福度、健康度、安らぎ等へとシフトしている。本報告が目指す、横断的複合領域的な、人間の感受性を取り入れた音響学は、このような社会で重要な役割を果たす。

また、本報告の目指す新たな音響学は、学際的な多面的視点とそれらを包括する数理に支えられ、科学的知見として説得力をもつ（知的価値）。また、新たなコンソーシアムの目指すサイバーフィジカル技術は、経済的利便性と well-being を考慮しており、人類が抱える様々な大きな課題を解決（国民の理解）するイノベーションを創出する（経済的・産業的価値）。

音響による情報伝達は言語の壁を取り除きコミュニケーションのユニバーサル化につながることが期待される[96,146]。音楽によるコミュニケーションは、生育において協調性、社会性を増強させ、パートナーシップ、平和と公平、不平等の回避等につながると言われている[147,148]。また、音楽による脳の活性化は、音響支援医療や認知症への効用が期待され、健康と福祉に貢献する（SDGs への貢献）[149]。

⑵ 長期的研究体制と産官学連携によるコンソーシアムの創設

1）音響学の他、工学・芸術・心理学・感性工学・生理学・医学・環境学などの分野において、それらを個々に深化させつつ、それらの融合研究に向けた、個人や組織の属する領域を超えた有機的な連携をするコンソーシアムを創設し、長期的な研究体制を構築すべきである。

2）革新的 HPCI(High Performance Computing Infrastructure) においては、これらの分野を連携した音響学に関する、永続的かつ学際的な研究開発組織を構築すべきである。

【音響環境に関する新たなコンソーシアムの考え方】

このコンソーシアムの創設は、これらの課題を解決する下地となるものである。

まず、工学・芸術・心理学・感性工学・生理学・医学・環境学などを融合した音響学の研究を推進するためには、関連する研究者が適宜コミュニケーションを取り、連携して研究開発を進める必要がある。また、コンソーシアムに海外との連携も加えれば、組織の壁を越えた国際的な協力体制を構築することができる。その際、文化的背景による感性の差異を考慮し、我が国の強みを活かした技術が構築されるよう留意する必要がある。

⑶ 人材育成

1）大学等の高等教育機関においては、音響学を核として専門性を高めながら、工学・芸術・心理学・感性工学・生理学・医学・環境学など関連領域の専門家の講義を受講し、卒業研究などの研究段階で関連分野の研究室とも連携できるカリキュラムをデザインすべきである。

2）音や振動といった物理量を物理現象として定量評価する従来のコンピュータシミュレーションを基軸とするが[150,151]、人間に与える影響までを考慮する人間中心の視点を教育課程において習得させるべきである。

文理融合研究や分野横断型アプローチの重要性は、以前から指摘されている一方、現在のところ、実際に連携が進んでいるのは一部の研究分野に限られる。音響は、工学・芸術・心理学・感性工学・生理学・医学・環境学などが自然に連携する分野であり、幅広い研究分野からなる文理融合研究・分野横断型アプローチによるイノベーションの創出が期待される。音響分野での連携手法は、他分野にも応用可能であり、これを教材とした分野横断型人材の育成カリキュラムの構築が望まれる。

また、今後は製造者と消費者の距離が縮まっていくことが想定され、シミュレーションを活用した消費者から製造者へのフィードバックが進むと予想される。それを可能とするためには、シミュレーション技術の教育も必要である。実際、現在も、義務教育へのプログラミングの導入は進んでいるが、その際、活用法を併せて学ぶことが、教育効果上、極めて重要である。そのため、単純にプログラムの書き方を教えるにとどまらず、その活用方法であるシミュレーション手法の教育も行われるべきである。

(4) 学術領域の創成

以下、上記５(1)～(3)までで述べた活動の結果として期待される成果・展開について述べる。まず、新たな音響学とそれを支えるシミュレーション技術の創出によって、人文・社会科学、生命科学、理学・工学などが連携した、新たな研究領域創出が期待される。具体的には、例えば、以下のような新たな研究領域が期待できる。

１）音響と心理学、感性、芸術分野の連携領域

音が人間に与える心理的な影響を基本として、感性や芸術分野まで幅広く取り扱う。以下のような項目を扱う研究領域が挙げられる。

(a) 機械や自然界の音や振動が人体に与える心理的影響
(b) 機械製品の持つ音響特性と感性評価
(c) 音楽音響が人体に与える心理的影響と芸術性
(d) 音(振動)の物理特性と心理・感性的影響の因果関係
(e) 画像／映像／VR などの画像系分野と音声・音響分野の融合

２）音響と生理学・医学の連携領域

音が人間に与える生理的な影響を基本として、医学・医療までを含めた連携を考える。以下のような項目を扱う研究領域が挙げられる。

(a) 音響の生理量・脳活動に対する影響
(b) 音響や音楽が持つ医療的な効果（音響支援医療）
(c) 音(振動)の物理特性と生理的・医学的影響の因果関係

３）音響と環境・社会との連携領域

音が環境に与える影響を基本として、広く社会への影響を取扱う。以下のような項目

を扱う研究領域が挙げられる。

(a) サウンドスケープによる音環境の評価と設計
(b) 交通による振動騒音と住環境の評価（法規制と関連）
(c) 音振動環境と健康影響（疫学的調査を含む）
(d) 高速インターネット等を用いる臨場感のあるリアルタイム音響共有の検討
（→３項(1)①３)）も参照）

(5) コンソーシアムの創設と期待される成果

提案するコンソーシアムにおいては、まず、我が国の強みであるものづくり関係の音響技術を活かしながら、他の研究を牽引しつつ、学際的な研究へと発展させる。さらに、前項で挙げた新たに創出される研究領域における進展が付け加えられることにより、多様なイノベーションの創出を目指し、国際会議やフォーラムの開催により、その成果を発信する。

成果の社会への還元については、成果をこのコンソーシアムにストックしてゆくとともに、透明性を持たせながら社会に還元させる。また、参加者がシミュレーション・計測により得た基本的なデータは原則、データベースに登録し公開し、オープンデータ化を推進する。また、音楽、楽器、人体振動、環境騒音、輸送機器振動騒音などのデータについても、可能な限り、必要とされる研究開発機関に提供されるよう配慮する。

これを実現するためには、データへのアクセシビリティを確保する手段を提供することが望ましい。例えば、オープンソースソフトウェアの開発等において、近年はGitHubに代表されるオープンソースプロジェクトの開発を支えるウェブプラットフォームが有効に活用されている。複数の研究機関における連携を推進するためには、研究プロジェクトの管理、研究データのバージョン管理やアップデート状況の可視化など、プロジェクトを推進するための有効なツールとなり得る。コンソーシアムでは、このようなツールを有効活用し、研究者間で円滑に基本的な研究データや研究成果を共有し、円滑な分野連携が図られることを推奨する。

音響環境に関する新たなコンソーシアムにおいては、新しい分野の構築が求められるため、柔軟な発想をもつ、ダイバーシティに富んだ人員構成とすべきである。また、コンソーシアムを構成する研究者に対する教育カリキュラムを用意し、各研究者も幅広い見識が得られるように配慮する。これにより、学際的研究の成果を広く国内に普及させ、我が国の研究能力を向上させる。

＜用語の説明＞

1］包括的音響シミュレーション

環境まで含む音や振動などの物理量を評価する従来のコンピュータシミュレーションに加え、受け手となる生体(人など)への影響などのモデル化(AI学習モデルなどを含む)を複合する包括的なシミュレーションである。従来の物理量に加え、人間の感覚・特性・感性などをパラメータとして音響を複合的に評価し、最適化に向けた提案を得ることをねらいとする。

2］音響支援医療

従来の音楽療法などでは明確でなかった音響による医学への支援に対して、音響支援の科学的アプローチを行い深化させ、音響支援による医療技術としての活用の可能性を明確にするものである。

3］新たな音響学

従来の音響学では、音響の物理現象と生体(人など)への影響の一面を評価することはできていたが、その評価の深化や生体の多面的評価を統合評価することはこれからの課題である。音響学を、心理学・感性工学・生理学などの幅広い側面から捉え、さらには感情や芸術的表現、環境などの社会的観点などを加え、音を核とする新たな学際研究として提案する音響学。

4］多様な幸せ(well-being)

第６期科学技術・イノベーション基本計画では、我が国が目指すべき Society 5.0 の未来社会像を、「持続可能性と強靭性を備え、国民の安全と安心を確保するとともに、一人ひとりが多様な幸せ（well-being）を実現できる社会」と表現している。このように、単なる富の追求ではない、新たな価値観としての多様な幸せ(well-being)が示されており、これと同義として用いている。

5］人間中心設計[152]

第５期科学技術基本計画において提唱された Society 5.0 では、サイバー空間（仮想空間）とフィジカル空間（現実空間）を融合させ、ビッグデータを踏まえた AI やロボット技術の活用により、一人一人の人間が中心となる社会実現を目指すと述べられている。人間に対する価値を向上させることを重視するこの考え方を「人間中心設計」としている。

6］HPC 及び HPCI

HPC（High Performance Computing)[153]は、大規模かつ複雑なデータを高速に処理するコンピュータの機能やシステムを示す。具体的には、複数のコンピュータ等をネットワークで接続し、並列処理を行う AI や IoT、ビッグデータ等の解法ニーズへの適用を期待されている。さらに、HPCI(High Performance Computing Infrastructure)[154]は、スーパーコンピ

ュータ「富岳」を中心に国内の大学や研究機関の HPC 群を連結した共用計算環境基盤である。

7] IoT

IoT(Internet of Things)[155]は、身の回りの様々なモノの状態の情報授受をインターネットを介して処理するシステムを表す。状態監視[156]、自動認識[157]、遠隔操作等の応用が可能である。

8] サイバーフィジカルシステム

サイバーフィジカルシステム[158,159]は、センサー、アクチュエーター、組み込みシステム等を含むフィジカル(現実)空間を、サイバー(デジタル情報仮想)空間とリアルタイムで融合させ、その最適化を目指すシステムである。

9] デジタルツイン[160]

デジタルツインは、IoT 機器などを介して現実空間の情報を取得し、サイバー空間内に現実空間の環境を再現することであり、ブラックボックスを持つ現象解析や未知未来の予測等に用いられる。

10] IIC

IIC(Industrial Internet Consortium)[161]は、産業技術分野の IoT 技術の普及と開発を推進する世界的な非営利団体を示す。

11] メタバース

メタバース(Metaverse)[162]は、仮想空間上に自分のアバター(分身)を介して、仮想体験や活動を可能とするシステムである。

＜参考文献＞

[1] 萩原 一郎, 計算科学における夢・ロードマップ, 学術の動向, 19 巻 10 号, pp.12-17, 2014. https://doi.org/10.5363/tits.19.10_12

[2] 橋口 真宜, 佟 立柱, 米 大海, 次世代を担う人のためのマルチフィジックス有限要素解析, 近代科学社, 2022 https://www.kindaikagaku.co.jp/book_list/detail/9784764960312/

[3] 山本 透, 脇谷 伸, 原田 靖裕, 香川 直己, 足立 智彦, 沖 俊任, 原田 真悟, 実習で学ぶ モデルベース開発: 「モデル」を共通言語とする V 字開発プロセス, コロナ社, 2023 https://www.coronasha.co.jp/np/isbn/9784339046830/

[4] Jetro: インダストリアル・インターネット・コンソーシアム (IIC) の活動状況、2021 https://www.jetro.go.jp/world/reports/2021/02/ed2b5f3d1764dc9d.html

[5] Ling Li, China's manufacturing locus in 2025: With a comparison of "Made-in-China2025" and "Industry 4.0", Technological Forecasting and Social Change, 135 (2018) pp. 66-74. https://doi.org/10.1016/j.techfore.2017.05.028

[6] Run Zhao, Exploring a New Lean Operation Model for Chinese Manufacturing Enterprises by Comparing Major "Industry 4.0" Strategies, 日本情報経営学会誌, 38, pp. 54-61, 2018. https://doi.org/10.20627/jsim.38.1_54

[7] 岩本 晃一, インダストリー4.0-ドイツ第 4 次産業革命が与えるインパクト, 日刊工業新聞社, 2015 https://pub.nikkan.co.jp/book/b10021129.html

[8] 尾木 蔵人, 決定版 インダストリー4.0 -第 4 次産業革命の全貌, 東洋経済新報社, 2015 https://www.gov-book.or.jp/book/detail.php?product_id=298301

[9] コンスタンツェ・クルツ, フランク・リーガー, 木本 栄(訳), 無人化と労働の未来-インダストリー4.0 の現場を行く, 岩波書店, 2018 https://www.iwanami.co.jp/book/b378353.html

[10] 戸井 武司, 脱炭素社会における生活空間のサウンドスケープ, 日本音響学会誌, 79 巻 2 号, pp.94-99, 2023. https://doi.org/10.20697/jasj.79.2_94

[11] 萩原 一郎, 応用数理の遊歩道(105) 第 2 回「騒音振動・最適化シミュレーション」, 応用数理, 2021, 31 巻 2 号, pp. 34-37. https://doi.org/10.11540/bjsiam.31.2_34

[12] 基幹産業としての自動車製造業, 一般社団法人 日本自動車工業会, https://www.jama.or.jp/statistics/facts/industry/

[13] Deallab: 楽器業界の世界市場シェアの分析、2025、ディールラボ web: https://deallab.info/music-instruments/

[14] 山内 勝也, 次世代自動車の静音性による新しい音デザイン課題の展望, 日本音響学会誌 73 巻 1 号, pp.21-24, 2017. https://doi.org/10.20697/jasj.73.1_21

[15] 柴橋 和真, 金澤 立哉, 田辺 総一郎, 戸井 武司, EV パワートレインノイズ知覚に基づく車室内暗騒音のサウンドデザイン, 自動車技術会論文集, 54 巻 2 号, pp.278-283, 2023. https://doi.org/10.11351/jsaeronbun.54.278

[16] 浅川 香, 矢野 敦仁, 木村 勝, 片平 建史, 山﨑 陽一, 長田 典子, 車室内エンジン加速音及び定速走行音の聴取時における感情評価の個人特性, 日本音響学会誌, 77 巻 11 号, pp. 694-697, 2021. https://doi.org/10.20697/jasj.77.11_694

[17] 有光 哲彦, 岡崎 啓吾, 戸井 武司, 音環境及び色環境の複合刺激が体感温度に及ぼす影響の評価,日本音響学会誌, 71 巻 6 号, pp.267-275, 2015. https://doi.org/10.20697/jasj.71.6_267

[18] 山口 雅夫, 渡邊 泰英, 前田 修, 大久保 信行, 戸井 武司, 視聴覚情報および運

転意志を考慮したEV 走行音の印象変化，自動車技術会論文集，45巻，5号，p. 859-864，2014，https://doi.org/10.11351/jsaeronbun.45.859
[19] 朝倉 巧，聴感実験における視覚情報の影響，日本音響学会誌，74巻12号，655-662，2018. https://doi.org/10.20697/jasj.74.12_655
[20] H. Fastl，Audio-visual interactions in loudness evaluation，Proc. 18th Int. Cong. Acoust.，pp. 1-6，2004. https://mediatum.ub.tum.de/doc/1138383/152725.pdf
[21] 五十嵐 啓紘，戸井 武司，変速音と変速ショックおよび変速操作力の感性調和設計に基づく変速操作感の創生，自動車技術会論文集，55巻3号，pp.442-448，2024. https://doi.org/10.11351/jsaeronbun.55.442
[22] 大島 遥汰，麻生 海，田辺 総一郎，戸井 武司，音響マルチパラメータを用いたニューラルネットワークによる自動車走行音の特徴量抽出，自動車技術会論文集，56巻2号，339-345，2025. https://doi.org/10.11351/jsaeronbun.56.339
[23] 吉川 岳，ニューラルネットワークによる列車走行音からの線路内異常検知手法，電気学会論文誌D，142巻10号，pp.752-761，2022. https://doi.org/10.1541/ieejias.142.752
[24] Jin S. Seo； A Focused Survey of Generative AI-Based Music Therapy Systems: Recent Progress and Open Challenges，Applied Sciences (MDPI)，16(9)，4120，2026. https://www.mdpi.com/2076-3417/16/9/4120
[25] Stowell D. 2022. Computational bioacoustics with deep learning: a review and roadmap. PeerJ 10:e13152 https://doi.org/10.7717/peerj.13152
[26] Li F，Zhang C，Liu C，Jia H and Wang Z (2026) AI-driven proactive music therapy in the era of digital mental health. Front. Psychol. 17:1832950. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2026.1832950
[27] 難波 精一郎，桑野 園子，音の評価のための心理学的測定法，コロナ社，東京(1998) https://www.coronasha.co.jp/np/isbn/9784339011043/
[28] 岩宮 眞一郎，音楽と映像のマルチモーダル・コミュニケーション，九州大学出版，福岡(2011) https://kup.or.jp/booklist/hu/art/978-4-7985-0059-1.html
[29] 川上 央，フランス国立音楽音響研究所(IRCAM)における音のデザイン活動の紹介，日本音響学会誌，68巻1号，pp.43-48，2012. https://doi.org/10.20697/jasj.68.1_43
[30] 横島 潤紀，森長 誠，欧州地域向け環境騒音ガイドライン(2018)の解説，日本音響学会誌 77巻 2号，pp.135-142，2021. https://doi.org/10.20697/jasj.77.2_135
[31] 令和4年版情報通信白書，総務省，https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/r04/pdf/index.html
[32] 永野 博,インダストリー4.0は何の革命か，ビッグデータ，オープンデータの動きと軌を一にする社会システム革命の始まり，情報管理 59 (3)，147-155，2016. https://doi.org/10.1241/johokanri.59.147
[33] 長島 聡，日本型インダストリー4.0，日本経済新聞出版社，2015 https://bookplus.nikkei.com/atcl/catalog/2015/9784532320355/
[34] 中嶋 聖雄ほか編，「100年に一度の変革期」を迎えた自動車産業の現状と課題，早稲田大学自動車部品産業研究所叢書，柘植書房新社，2019 https://tsugeshobo.com/modules/books/index.php?lid=115
[35] ＜特集＞未来社会を共創する自動車技術，会誌「自動車技術」，2022年10月号 https://www.jsae.or.jp/news/detail/949/
[36] 岸田 文，江頭 優佳，レジリエンス研究とストレスの客観的計測法，日本生理人類

学会誌 28 巻 1 号 pp. 10-16, 2023. https://doi.org/10.20718/jjpa.28.1_10
[37] 伊藤 英則, 個人身体信号から癒しの映像・音楽を生成するシステム, 人工知能学会誌 23 巻 3 号, 2008. https://doi.org/10.11517/jjsai.23.3_334
[38] 岩永 誠, 森 数馬, 音楽と自律神経系活動の関係：音楽への反応と心臓血管系反応の測定法, 音楽知覚認知研究 Journal of Music Perception and Cognition 23 巻 1 号, pp. 57-68, 2017. https://doi.org/10.32199/jsmpc.23.1_57
[39] 星野 悦子, 音楽療法とは何か: 音楽の根源に備わる多様な力の利用, 日本音響学会誌, 64 巻 8 号, pp. 468-474, 2008. https://doi.org/10.20697/jasj.64.8_468
[40] 中嶋 麻菜, 海老原 直邦, 西条 寿夫, 大平 英樹, 音楽のストレス解消効果について -心理的指標および生理的ストレス指標による検討-, 人間環境学研究, 11 巻 1 号, pp. 19-25, 2013. https://doi.org/10.4189/shes.11.19
[41] R. Zaheer, I. Ahmad, D. Habibi, K. Y. Islam and Q. V. Phung, A Survey on Artificial Intelligence-Based Acoustic Source Identification, in IEEE Access, vol. 11, pp. 60078-60108, 2023, https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3283982
[42] Meng, Yiping & Sun, Yiming. (2025). From Biometrics to Environmental Control: AI-Enhanced Digital Twins for Personalized Health Interventions in Healing Landscapes. https://doi.org/10.48550/arXiv.2505.06263.
[43] Karniadakis, G.E., Kevrekidis, I.G., Lu, L. et al. Physics-informed machine learning. Nat Rev Phys 3, 422-440 (2021). https://doi.org/10.1038/s42254-021-00314-5
[44] Brockmann-Bauser M. How Well Will AI Help Recognize Voice Disorders? A State-of-the-art Review of Current Acoustic Assessment Strategies and Future Applications. World J Otorhinolaryngol Head Neck Surg. 2025 Apr 8;11(4):518-523. https://doi.org/10.1002/wjo2.70015. PMID: 41477130; PMCID: PMC12753194.
[45] 平成 30 年 情報通信白書, 総務省 https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h30/html/nd111350.html
[46] 調査報告書, デジタルツインに関する国内外の研究開発動向, 研究開発戦略センター, 科学技術振興機構, 2021 https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2021/RR/CRDS-FY2021-RR-09.pdf
[47] 木下 翔太郎, デジタルツイン技術の医療・健康分野における応用可能性と倫理的・法的・ 社会的課題 (ELSI) , 総務省 学術雑誌「情報通信政策研究」6 巻 1 号 pp.89-109, 2022. https://doi.org/10.24798/jicp.6.1_89
[48] 文部科学省科学技術・学術政策研究所: 科学技術指標 2026、NISTEP REPORT No.212, DOI: https://doi.org/10.15108/nr212
[49] Andy W. L. Chung , Wai Ming To : Mapping Soundscape Research: Authors, Institutions, and Collaboration Networks, Acoustics2025, 7(2), 38;https://doi.org/10.3390/acoustics7020038.
[50] Meiqi Zhang, Fang Li, Dongyu Wang, Xiaohong Ba, Zhan Liu : Mapping Research Trends from 20 Years of Publications in Rhythmic Auditory Stimulation,2022. https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9819413/
[51] Koehler, F., Anglada-Tort, M., Silverman, M. J., Abbazio, J., Riegelman, A., & Saarikallio, S.: Research Trends in Music and Health in the Last 50 Years: A Bibliometric Analysis, Musicae Scientiae, 2026, https://doi.org/10.1177/20592043261484139
[52] Eleanor Ratcliffe: Sound and Soundscape in Restorative Natural Environments:

A Narrative Literature Review,2021, Frontiers in Psychology, https://doi.org/10.3389/fpsyg.2021.570563
[53] Dick Botteldooren, Tjeerd Andringa: Soundscape of European Cities and Landscapes: Understanding and Exchanging, WG1, COST Action TD0804, : Soundscape of European Cities and Landscapes, 2009-2013. https://www.cost.eu/actions/TD0804/#tabs|Name:parties
[54] Jian Kang, Francesco Aletta, Tin Oberman, Andrew Mitchell, Mercede Erfanian: On the Development of Soundscape Indices(SSID), ERC Advanced Grant (Grant No. 740696). https://api.semanticscholar.org/CorpusID:267366581
[55] 主要な音響処理技術一覧（東京電機大学音響処理研究室資料） https://www.kanedayyy.jp/asp/asp_ovview01.html
[56] 柏野 邦夫，小特集「音環境理解の近年の動向」にあたって，日本音響学会誌，75巻9号，pp. 510-511，2019. https://doi.org/10.20697/jasj.75.9_510
[57] 澤田 宏，荒木 章子，牧野 昭二，音源分離技術の最新動向，電子情報通信学会誌，91(4)，pp. 292-296，2008 https://www.journal.ieice.org/summary.php?id=k91_4_292&year=2008&lang=J
[58] 情報通信研究機構（NICT）ワイヤレスネットワーク研究センター ワイヤレスシステム研究室，低遅延・多数接続ワイヤレス（STABLE），2023 https://www2.nict.go.jp/wslab/pj_stable.html
[59] S. Kikiuchi et al., Region separation control for broadband sounds by multiple sources, Proc. of the 24th ICA2022, ABS-0133 (2022) (https://kyushu-u.elsevierpure.com/en/publications/region-separation-control-for-broadband-sounds-by-multiple-source-2/ にて概要参照可)
[60] 大山 英明ほか，体験共有における投射について，人工知能学会全国大会論文集，第32回，2018 https://doi.org/10.11517/pjsai.JSAI2018.0_3D2OS7b01
[61] M. Ishihama, I. Satoh, T. Yamashita: Road Noise Improvement Method Using Acoustic Power Flow Excitation in a Passenger Compartment, Proceedings of JSAE autumn conference, a181203 (2018) https://tech.jsae.or.jp/paperinfo/en/content/p201802.046/
[62] M. Ishihama, T. Kagaya, J. Wachi, Y. Komagamine: Analysis of Tire Noise Generation Mechanism Based on Tire Surface Shape Scanning and FEM Modeling, Outstanding Paper at FISITA 2014, F2014-NVH-051 (2014) https://go.fisita.com/store/papers/FISITA2014/F2014-NVH-051
[63] W. Desmet, et. al.: CAE Methodologies for Mid-Frequency Analysis in Vibration and Acoustics, Katholieke Universiteit Leuven, ISBN 978-94-6018-523-6 (2012) https://cordis.europa.eu/project/id/214909/reporting
[64] P.J. Shorter, B.K. Gardner, P.G. Bremner: A Review of Mid-Frequency Methods for Automotive Structure-Borne Noise, SAE Transactions, Vol. 112, Section 6, pp.1610-1616 (2003) https://doi.org/10.4271/2003-01-1442
[65] M. Ishihama: A Study on Vibration Transmission Through Body Structure Causing Road Noise by Considering Warping and Shear Center Location, Proceedings of JSAE autumn conference, a211070 (2021) https://tech.jsae.or.jp/paperinfo/en/content/p202102.163/
[66] M. Ishihama: Trochoidal Curve Representation of Tire Rolling Motion as The Basis of Tire Vibration Analysis. Proceedings of JSAE 2022 Spring Congress,

S221003 (2022) https://tech.jsae.or.jp/paperinfo/en/content/p202201.141/
[67] Y. Nakajima: Advanced Tire Mechanics, Springer ISBN 978-981-13-5798-5 (2019) https://link.springer.com/book/10.1007/978-981-13-5799-2
[68] J. F. Doyle: Wave Propagation in Structures, Chapter 8, Springer ISBN 978-3-030-59678-1 (2020) https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-59679-8
[69] M. Heckl, Tyre Noise Generation, Wear, Vol. 113, pp 157-170 (1986). https://doi.org/10.1016/0043-1648(86)90065-7
[70] H. Tanaka, et. al.: Prediction of the friction coefficient of filled rubber sliding on dry and wet surfaces with self-affine large roughness, Mechanical Engineering Journal Vol.3 No.1 (2016). https://doi.org/10.1299/mej.15-00084
[71] T. Kuraishi, K. Takizawa, T. E. Tezduyar: Tire aerodynamics with actual tire geometry, road contact and tire deformation, Computational Mechanics, Vol.63, pp. 1165-1185 (2019). https://doi.org/10.1007/s00466-018-1642-1
[72] 岡村 宏, 林田 興明, ダイナミックシンキング CAE : 機能から構造へのシンセシス, Dynamics & Design Conference 日本機械学会, No.528, 2004 https://doi.org/10.1299/jsmedmc.2004._528-1_
[73] 村田 和宏, 三山 壮, 村山 誠英, 中村 弘毅, 中満 翼, 川端 直人, 山崎 徹, 振動騒音低減のための二段階設計法の実験的検証, 自動車技術会論文集, 50 巻 3 号 pp. 810-815, 2019. https://doi.org/10.11351/jsaeronbun.50.810
[74] 村上 裕哉, 山本 広太, 工藤 彰洋, 武居 周, 時間領域並列有限要素法に基づく大規模音響解析, 日本シミュレーション学会論文誌, 10 巻 4 号, pp. 89-98, 2018. https://doi.org/10.11308/tjsst.10.89
[75] 奥園 健, 大鶴 徹, 岡本 則子, 富来 礼次, 反復解法を適用した時間領域有限要素法による室内音場解析, 日本建築学会環境系論文集, 73 巻 628 号, pp. 701-706, 2008. https://doi.org/10.3130/aije.73.701
[76] スパコン (HPCI) 利用事例の紹介, https://fugaku100kei.jp/cases/.
[77] 土屋 隆生, 音場シミュレーションと音空間レンダリング, 電子情報通信学会 基礎・境界ソサイエティ Fundamentals Review, Vol.10, No.3, pp.206-218, 2017, https://doi.org/10.1587/essfr.10.3_206
[78] 鹿野 洋, 横山 栄, 坂本 慎一, 笹岡 岳陽, 波頭 伸哉, 3 次元 FDTD 法による車室内音場解析ー拡張作用境界モデルの適用, 生産研究, 63 巻 2 号, pp.235-240, 2011, https://doi.org/10.11188/seisankenkyu.63.235
[79] 千藤 雄樹, 工藤 祥典, 柏 達也, 大谷 忠生, 高精度３次元音場解析のための FDTD(2,4)法, 電子情報通信学会論文誌 A, J85-A, No. 8, pp. 833-839, 2002 https://cir.nii.ac.jp/crid/1050564288761702528
[80] 仁科 エミ, 大橋 力, ハイパーソニック・エフェクトを応用した市街地音環境の改善とその生理・心理的効果の検討, 都市計画論文集, No.42-3, pp.139-144, 2007, https://doi.org/10.11361/journalcpij.42.3.139
[81] T. Yoshida, T. Okuzono, K. Sakagami: A Parallel Dissipation-Free and Dispersion-Optimized Explicit Time-Domain FEM for Large-Scale Room Acoustics Simulation. Buildings, Vol. 12, 105 (2022). https://doi.org/10.3390/buildings12020105
[82] 金井 良太;身体的能力と知覚能力の拡張による身体の制約からの解放、実施状況報告書、2024 年度版、Moonshoot https://www.jst.go.jp/moonshot/program/goal1/files/12_kanai_report2024.pdf.

[83] S. Greydanus, M. Dzamba, J. Yosinski: Hamiltonian Neural Networks, In Advances in neural information processing systems (NeurIPS) (2019). https://doi.org/10.48550/arXiv.1906.01563
[84] M. Cranmer, S. Greydanus, S. Hoyer, P. Battaglia, D. Spergel, S. Ho: Lagrangian Neural Networks, ICLR 2020 Deep Differential Equations Workshop (2020). https://doi.org/10.48550/arXiv.2003.04630
[85] T. Matsubara, A. Ishikawa, T. Yaguchi: Deep Energy-Based Modeling of Discrete-Time Physics, In Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS) (2020). https://doi.org/10.48550/arXiv.1905.08604
[86] C. Legendre, Y. Kitano , Y. Nakashima, W. Kobayashi, G. Minorikawa, A machine learning-based methodology for computational aeroacoustics predictions of multi-propeller drones , inter-noise 2021 https://www.researchgate.net/publication/353771519_A_machine_learning-based_methodology_for_computational_aeroacoustics_predictions_of_multi-propeller_drones
[87] J. Li, Z. Pei, T. Zeng: From Beginner to Master: A Survey for Deep Learning-based Single-Image Super-Resolution, ArXiv abs/2109.14335 (2021). https://doi.org/10.48550/arXiv.2109.14335
[88] L. Lu, P. Jin, G. Pang, Z. Zhang, G.E. Karniadakis: Learning nonlinear operators via DeepONet based on the universal approximation theorem of operators, Nature Machine Intelligence. Vol. 3, pp. 218-229 (2021). https://doi.org/10.1038/s42256-021-00302-5
[89] Z. Li, N. B. Kovachki, K. Azizzadenesheli, B. Liu, K. Bhattacharya, A. Stuart, A. Anandkumar, Fourier Neural Operator for Parametric Partial Differential Equations, In The International Conference on Learning Representations (ICLR) (2021). https://doi.org/10.48550/arXiv.2010.08895
[90] Sakai KL, Oshiba Y, Horisawa R, Miyamae T, Hayano R. Music-experience-related and musical-error-dependent activations in the brain. Cereb Cortex. 2022 Sep 19;32(19):4229-4242. https://doi.org/10.1093/cercor/bhab478. PMID: 34937087; PMCID: PMC9528789.
[91] 田所 克俊, 鈴木 桂輔, 音楽の歌唱や聴取の繰り返しパターンが脳機能の活性に与える影響, ライフサポート, 26(3), pp. 89-99, 2014. https://doi.org/10.5136/lifesupport.26.89
[92] 佐藤 正之, 音楽の認知と情動の脳内機構, 神経心理学 34 巻 4 号, pp. 274-288, 2018. https://doi.org/10.20584/neuropsychology.17047
[93] 原 進, 林 裕介, 満倉 靖恵, 上出 寛子, 騒音に励起されるストレスの評価のための感性アナライザ適用可能性～空飛ぶクルマの社会受容性評価に向けて～, Technical Journal of Advanced Mobility, Vol. 2, No. 3, pp. 31-41, 2021. https://doi.org/10.34590/tjam.2.3_31
[94] 荻野 幹人, 満倉 靖恵, 半教師あり学習を用いた自然音に対する事象関連電位の分類, 電気学会 電子・情報・システム部門大会, pp. 611-616, 2021 https://ieej.bookpark.ne.jp/products/ieej-btc2021os05004?_pos=1&_sid=2a286492b&_ss=r
[95] 伊東 乾, 音楽の音響空間情報論, 東京大学大学院情報学環紀要 情報学研究, No.89, 2015 https://www.iii.u-tokyo.ac.jp/manage/wp-

content/uploads/2018/04/89_2.pdf
[96] 岩宮 眞一郎; サイン音の科学：音声情報と非音声情報の役割と調和, コロナ社, 2012 https://www.coronasha.co.jp/np/isbn/9784339013252/
[97] Albert S. Bregman : Auditory Scene Analysis: The Perceptual Organization of Sound, Cambridge, MA, USA: MIT Press, 1990 https://doi.org/10.7551/mitpress/1486.001.0001
[98] 熊野 史朗, 寺田 和憲, 鈴木 健嗣: Affective Computing, 人工知能. 35 巻 6 号, pp. 819-823, 2020. https://www.jstage.jst.go.jp/article/jjsai/35/6/35_819/_pdf/-char/en
[99] Diago,L., Kitaoka, T., Hagiwara,I. and Kambayashi,T.,Neuro-fuzzy quantification of personal perceptions of facial images based ona limited data set, IEEE Transactions on Neural Networks, Vol.22,No.12(2011-12),pp.2422-2434. https://doi.org/10.1109/TNN.2011.2176349
[100] 若槻 尚斗, 西宮 康治朗, 音楽音響に用いられる楽器計測技術, 日本音響学会誌 74 巻 10 号, pp. 570-577, 2018. https://doi.org/10.20697/jasj.74.10_570
[101] 嵯峨山 茂樹, 自動作曲システム Orpheus, 電子情報通信学会誌, Vol.102 No.3, pp.214-220,2019 https://www.journal.ieice.org/summary.php?id=k102_3_214&year=2019&lang=J
[102] 横山 真男, ヴァイオリンの音色研究, 可視化情報, Vol.35, No.136,2015. https://doi.org/10.3154/jvs.35.17
[103] 金沢 純一, 長谷川 浩志, 岡村 宏, 田中 幸和, 菅原 淳一 :ギターの音質と表面板の力木配置の関係について、Dynamics & Design Conference,2007, https://doi.org/10.1299/jsmedmc.2007._324-1_
[104] 山崎 徹, 曽根 崇正, 橋本 崇史, 黒田 勝彦, 振動エネルギー伝搬解析によるヴァイオリン構造の考察, 日本機械学会論文集 B 編, 78 巻 789 号, pp. 988-992, 2012. https://doi.org/10.1299/kikaib.78.988
[105] 後藤 真孝 編, 北原 鉄朗, 深山 覚, 竹川 佳成, 吉井 和佳, 「音楽情報処理」, コロナ社, 2023. https://www.coronasha.co.jp/np/isbn/9784339013726/
[106] 浜中 雅俊, インタラクション可能な仮想演奏者, 情報処理学会研究報告 (MUS) , 2020. https://gttm.jp/hamanaka/wp-content/uploads/2023/05/IPSJ-MUS20127009.pdf
[107] 三浦 寛也, 浜中 雅俊, Deep Augmented Performers: メロディモーフィングと身体機能の融合によるアンサンブル演奏システム, 情報処理学会研究報告, Vol. 2021-MUS-132, No. 4, pp. 1-8, 2021 https://jglobal.jst.go.jp/detail?JGLOBAL_ID=202102275778751595
[108] 前川 純一, 森本 政之, 阪上 公博, 「建築・環境音響学」, 共立出版, 2011. https://www.kyoritsu-pub.co.jp/book/b10008031.html
[109] 山下 祐一, 計算論的精神医学: 脳の数理モデルを用いて精神疾患の病態に迫る, 日本生物学的精神医学会誌, 30 巻 3 号, pp. 114-116, 2019. https://doi.org/10.11249/jsbpjjpp.30.3_114
[110] Diago, L., Kitaoka, T. and Hagiwara,I., Development of a System for Automatic Facial Expression Analysis, Journal of Computational Science and Technology,Vol.2,No.4(2008-8),pp.401-412. https://doi.org/10.1299/jcst.2.401
[111] 北岡 哲子、田中 兼一、北崎 智之、萩原 一郎、癒し構造分析とグッズの分析・評価への応用：日本感性工学会論誌, Vol.9,No.1,pp.43-49(2009).

https://doi.org/10.5057/jjske.ja080922-1
[112] Diago,L.,Abe,H.,Minamihata.A. and Hagiwara,I., Pattern Classification with Holographic Neural Networks: A New Tool for Feature Selection, Innovation in Machine and Deep Learning Case Studies and Applications,Book series :Studies in Big Data (Springer),2023-6. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-40688-1_3
[113] 嶋田 容子, 幼児の自由遊びにおける行動と音環境の関連, 日本心理学会大会発表論文集, 第85回 PT-008,2021 https://doi.org/10.4992/pacjpa.85.0_PT-008
[114] 野口 紗生, 船場 ひさお, 子ども施設の音環境向上のための教育的取り組みの必要性, 日本音響学会誌77巻11号, pp. 710-717, 2021. https://doi.org/10.20697/jasj.77.11_710
[115] 有馬 雄祐, 橋本 幸博, 背景音楽が創造性を高める可能性, 日本音響学会誌 77巻4号, pp. 256-261, 2021. https://doi.org/10.20697/jasj.77.4_256
[116] 井本 桂右, 環境音分析の研究動向, 日本音響学会誌75巻9号, pp.512-518,2019. https://doi.org/10.20697/jasj.75.9_512
[117] 田鎖 順太, 松井 利仁, 我が国における道路交通騒音による健康リスク, 日本衛生学雑誌, 76巻 論文ID:19014, 2021. https://doi.org/10.1265/jjh.19014
[118] 下山 晃司, WHO-EU 環境騒音ガイドラインと社会調査データからみる騒音施策展開への課題, 航空環境研究 No.24, pp.1-10,2020. https://aerc.jp/_public/202010/aerc-2020-3-06.pdf
[119] 天野 辰哉, 水本 旭洋, 山口 弘純, 松田 裕貴, 藤本 まなと, 諏訪 博彦, 安本 慶一, 中村 優吾, 田上 敦士, 新生活様式におけるコミュニティ形成のためのサイバーフィジカル空間共有基盤の設計開発, 第29回マルチメディア通信と分散処理ワークショップ論文集, 2021 https://yukimat.jp/data/pdf/paper/CPSpaceSharing_c_202110_amano_DPSWS.pdf
[120] OECD; Health at a Glance 2023: OECD Indicators, OECD Publishing, Paris, 2023.11 https://www.oecd.org/en/publications/health-at-a-glance-2023_7a7afb35-en.html
[121] 朝田 隆; 日本における認知症有病率の基礎となった大規模疫学調査, 「都市部における認知症有病率と認知症の生活機能障害への対応」総合研究報告書, 厚生労働省総合研究事業, 2013 https://www.tsukuba-psychiatry.com/wp-content/uploads/2013/06/H24Report_Part1.pdf
[122] Onishi T, Yamasaki M, Hara T, Hirotomi T, Miyazaki R. Esports for Seniors: Acute Effects of Esports Gaming in the Community on the Emotional State and Heart Rate among Japanese Older Adults. Int J Environ Res Public Health. 2022 Sep 16;19(18):11683. https://doi.org/10.3390/ijerph191811683. PMID: 36141954; PMCID: PMC9517021.
[123] 藤井 啓介, 北濃 成樹, 神藤 隆志, 佐藤 文音, 國香 想子, 藤井 悠也, 大藏 倫博, 独居高齢者における地域活動への参加と抑うつとの関連性, 理学療法科学, 32巻1号 pp. 105-110, 2017. https://doi.org/10.1589/rika.32.105
[124] 柴田 崇徳, メンタルコミットロボット「パロ」の開発と普及：認知症等の非薬物療法のイノベーション, 情報管理, 60巻 4号 pp. 217-228, 2017. https://doi.org/10.1241/johokanri.60.217
[125] 日本バーチャルリアリティ学会 編, 「バーチャルリアリティ学」, コロナ社, 2010. https://www.coronasha.co.jp/np/isbn/9784904490051/

[126] 廣瀬 通孝, 「バーチャルリアリティ」, 産業図書, 1993. https://www.kinokuniya.co.jp/f/dsg-01-9784782851371
[127] Kubota, K., Katayama, T., Takamaru, K. et al. Immersive virtual reality for older adults with mild cognitive impairment, dementia, or cognitive frailty: a systematic review and narrative synthesis (2019-2025). BMC Geriatr 26, 189, 2026. https://doi.org/10.1186/s12877-025-06957-8
[128] 内閣府, 「スマートシティガイドブック」, 2021. https://www8.cao.go.jp/cstp/stmain/20210412scity.html
[129] 我が国の産業構造を支える製造業, 経産省, https://www.meti.go.jp/report/whitepaper/mono/2026/pdf/honbun_1_1_1.pdf
[130] T Zaatar M, Alhakim K, Enayeh M, Tamer R. The transformative power of music: Insights into neuroplasticity, health, and disease. Brain Behav Immun Health. 2023 Dec 12;35:100716. PMID: 38178844; PMCID: PMC10765015. https://doi.org/10.1016/j.bbih.2023.100716
[131] Ruokonen, I., Tervaniemi, M., & Reunamo, J. (2021). The significance of music in early childhood education and care of toddlers in Finland: an extensive observational study. Music Education Research, 23(5), 634-646. https://doi.org/10.1080/14613808.2021.1965564
[132] Agres, K. R., et al.; Music, Computing, and Health: A roadmap for the current and future roles of music technology for health care and well-being, Music & Science, Vol. 4, pp. 1-22, 2021. https://doi.org/10.1177/2059204321997709
[133] Williamon A, Aufegger L and Eiholzer H (2014) Simulating and stimulating performance: introducing distributed simulation to enhance musical learning and performance. Front. Psychol. 5:25. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.00025
[134] Ding, Y.; Biomechanical and machine learning approaches to automating the identification of musical styles and emotions through human motion analysis, Molecular & Cellular Biomechanics, Vol. 21, No. 2, 2024 https://doi.org/10.62617/mcb.v21i2.397
[135] Trost W, Trevor C, Fernandez N, Steiner F, Frühholz S. Live music stimulates the affective brain and emotionally entrains listeners in real time. Proc Natl Acad Sci U S A. 2024 Mar 5;121(10):e2316306121. https://doi.org/10.1073/pnas.2316306121. Epub 2024 Feb 26. PMID: 38408255; PMCID: PMC10927510.
[136] 山脇 成人ほか; 音楽の気づき科学で次世代の感性を育む, ムーンショット目標9, JST ムーンショット型研究開発事業, 2022 https://www.hiroshima-u.ac.jp/system/files/193164/0915.pdf
[137] Kanduri, C., Raijas, P., Ahvenainen, M., Philips, A. K., Ukkola-Vuoti, L., Lahdesmaki, H., & Järvelä, I. (2015). The effect of listening to music on human transcriptome. PeerJ, 3:e830. https://doi.org/10.7717/peerj.830. PMID: 25789207; PMCID: PMC4362302.
[138] 高橋 多喜子, 音楽療法概説, 日本補完代替医療学会誌, 1巻 1号, pp.77-88, 2004. https://doi.org/10.1625/jcam.1.77
[139] OECD, The Research Data Alliance (RDA)'s Data Fabric Initiative, 2019, https://www.oecd.org/en/publications/access-to-public-research-data-

toolkit_a12e8998-en/the-research-data-alliance-rda-s-data-fabric-initiative_6bf9b1f9-en.html,
[140] Ates, H.C., Nguyen, P.Q., Gonzalez-Macia, L. et al. End-to-end design of wearable sensors. Nat Rev Mater 7, 887-907 (2022). https://doi.org/10.1038/s41578-022-00460-x
[141] Wang, M., Yang, Y., Min, J. et al. A wearable electrochemical biosensor for the monitoring of metabolites and nutrients. Nat. Biomed. Eng 6, 1225-1235 (2022). https://doi.org/10.1038/s41551-022-00916-z
[142] Department of Health, Education, and Welfare; National Commission for the Protection of Human Subjects of Biomedical and Behavioral Research. The Belmont Report. Ethical principles and guidelines for the protection of human subjects of research. J Am Coll Dent. 2014 Summer;81(3):4-13. PMID: 25951677 https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25951677/
[143] OECD, Recommendation of the Council on Health Data Governance, OECD/LEGAL/0433 https://legalinstruments.oecd.org/public/doc/348/348.en.pdf
[144] Zixuan Zhou et al. , A Survey on Efficient Inference for Large Language Models, ArXiv, 2404.14294, https://arxiv.org/abs/2404.14294
[145] 科学技術・学術政策研究所, 科学技術指標 2022, https://www.nistep.go.jp/sti_indicator/2022/RM318_00.html
[146] スティーヴン・ミズン; 歌うネアンデルタール：音楽と言語の進化, 早川書房, 熊谷 淳子 訳, 2006. https://www.kinokuniya.co.jp/f/dsg-01-9784152087393
[147] Stefan Koelsch: From Social Contact to Social Cohesion-The 7 Cs、Music and Medicine、2013, Vol. 5, No. 4, pp. 204-209, DOI: 10.1177/1943862113508588.
[148] Patrick E. Savage, Psyche Loui, Bronwyn Tarr, Adena Schachner, Luke Glowacki, Steven Mithen, & W. Tecumseh Fitch: Music as a coevolved system for social bonding, Behavioral and Brain Sciences, 2021, Vol. 44, e59, DOI: 10.1017/S0140525X20000333
[149] Fancourt, D., & Finn, S. ; What is the evidence on the role of the arts in improving health and well-being? , Arts and Well-being 報告書, A scoping review, WHO Regional Office for Europe, 2019 https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK553773/
[150] Wang, Haitao, Zeng, Xiangyang, Lei, Ye;4Ren, Shuwei, Reform and Practice on the Acoustics Simulation Education, Proceedings of the 2023 International Conference on10Education, Management, Economics and Electronics Engineering (ICEMEE 2023). http://dx.doi.org/10.4108/eai.24-11-2023.2343538
[151] Moheit L, Schmid JD, Schmid JM, Eser M, Marburg S. Acoustics Apps: Interactive simulations for digital teaching and learning of acoustics. J Acoust Soc Am. 2021 Feb;149(2):1175. https://doi.org/10.1121/10.0003438. PMID: 33639808.
[152] ISO 9241-210, Ergonomics of human-system interaction -- Part 210: Human-centred design for interactive systems, 2019 https://www.iso.org/standard/77520.html
[153] 文部科学省: 次世代HPC・AI研究開発支援センター「設立経緯」, HAIRDESC, HPCI公式解説ページ, 2025 https://hairdesc.jp/establishment/
[154] 文部科学省: 「革新的ハイパフォーマンス・コンピューティング・インフラ

（HPCI）について」，文部科学省ホームページ.
https://www.mext.go.jp/a_menu/kaihatu/jouhou/hpci/1307375.html
[155] 平成 28 年 情報通信白書（資料編　用語解説），総務省
https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h28/html/nd300000.html
[156] S. Grollmisch, J. Abeser, J. Liebetrau and H. Lukashevich, Sounding Industry: Challenges and Datasets for Industrial Sound Analysis, 2019 27th European Signal Processing Conference (EUSIPCO), A Coruna, Spain, 2019, pp. 1-5. https://doi.org/10.23919/EUSIPCO.2019.8902941
[157] Sukanta Kumar Dash, et al., A Comprehensive Review on Audio based Musical Instrument Recognition: Human-Machine Interaction towards Industry 4.0, Journal of Scientific & Industrial Research Vol. 82, Jan 2023, pp. 26-37.
https://nopr.niscpr.res.in/handle/123456789/61207
[158] 内閣府: 「第 6 期科学技術・イノベーション基本計画」，内閣府ホームページ. 2021, https://www8.cao.go.jp/cstp/kihonkeikaku/6honbun.pdf
[159] E. A. Lee, "Cyber Physical Systems: Design Challenges," 2008 11th IEEE International Symposium on Object and Component-Oriented Real-Time Distributed Computing (ISORC), Orlando, FL, USA, 2008, pp. 363-369,
https://doi.org/10.1109/ISORC.2008.25.
[160] 内閣府: 「10. デジタルツイン．スマートシティのリファレンス・アーキテクチャ」，2025,
https://www8.cao.go.jp/cstp/society5_0/smartcity/scra4_2025_0523_10.pdf
[161] 吉野晃生（総務省 先端技術 WG 資料）:「Industrial Internet Consortium の最新状況と日本への対応」， 2016,
https://www.soumu.go.jp/main_content/000415662.pdf
[162] 佐藤 一郎, メタバースのシステム構成論的な考察―プラットフォーム化が進むメタバースの特性と課題, 総務省 学術雑誌「情報通信政策研究」 第６巻第１号, 2022
https://www.soumu.go.jp/main_content/000851756.pdf

＜参考資料１＞審議経過

平成 26 年

12 月１日　計算科学シミュレーションと工学設計分科会（第 23 期・第１回）
第 23 期計算音響学小委員会の設置承認

平成 27 年

３月９日　計算音響学小委員会（第 23 期・第１回）
委員長、副委員長、幹事の選出　話題提供

７月 31 日　計算音響学小委員会（第 23 期・第２回）
話題提供

12 月２日　計算音響学小委員会（第 23 期・第３回）
話題提供

平成 28 年

３月 23 日　計算音響学小委員会（第 23 期・第４回）
話題提供

７月９日　計算音響学小委員会（第 23 期・第５回）
話題提供　ヴァイオリン工房についての情報収集

平成 29 年

９月４日　計算音響学小委員会（第 23 期・第６回）
話題提供

12 月７日　計算科学シミュレーションと工学設計分科会（第 24 期・第１回）
第 24 期 計算音響学小委員会の設置承認

平成 30 年

８月 21 日　計算音響学小委員会（第 24 期・第１回）
提言案“次世代計算音響学に向けて”の検討

11 月５日　計算音響学小委員会（第 24 期・第２回）
話題提供　提言案についての討論

令和元年

７月４日　計算音響学小委員会（第 24 期・第３回）
話題提供　提言案についての討論

令和２年

12 月７日　計算科学シミュレーションと工学設計分科会（第 25 期・第１回）
第 25 期 計算音響学小委員会の設置承認

令和３年

６月 28 日　計算音響学小委員会（第 25 期・第１回）
役員の選出　話題提供

12 月１日　計算音響学小委員会（第 25 期・第２回）
話題提供　今後の方針についての自由討議

令和４年

３月４日　計算音響学小委員会（第 25 期・第３回）
話題提供　今後の方針についての自由討議
８月 12 日　計算音響学小委員会（第 25 期・第４回）
話題提供　シンポジウムの開催　見解案の提出
「未来の学術振興構想」の策定に向けた「学術の中長期研究戦略」についての議論
12 月 15 日　計算音響学小委員会（第 25 期・第５回）
シンポジウムの開催　見解案の提出
「未来の学術振興構想」の策定に向けた「学術の中長期研究戦略」についての議論

令和５年
３月 22 日～30 日　計算科学シミュレーションと工学設計分科会（第 25 期・第７回）
メール審議　見解案「音響を核とするバーチャルシミュレーションの開発に向けて」承認
３月 27 日　計算音響学小委員会（第 25 期・第６回）
意思の表出についての議論。シンポジウムの議論を受け、多様な視点からの記述を加えた。心理学・教育学委員会との連携や産業界との意見交換は今後の課題とする。

令和６年
３月 29 日　計算科学シミュレーションと工学設計分科会（第 26 期・第１回）
第 26 期 計算音響学小委員会の設置承認
９月 19 日　計算音響学小委員会（第 26 期・第１回）
役員の選出今後の方針についての自由討議
９月 20 日～30 日　計算科学シミュレーションと工学設計分科会（第 26 期・第５回）
メール審議　計算音響学小委員会の委員の追加について承認
12 月２日　計算音響学小委員会（第 26 期・第２回）
話題提供見解とする方策
12 月 10 日　計算科学シミュレーションと工学設計分科会（第 26 期・第６回）
(計算力学小委員会（第 26 期・第３回）との合同会議)
計算音響学小委員会より、小委員会の活動と意思の表出に向けた進捗状況を報告し分科会と共有。見解の発出までの流れに関する確認が行われた。
12 月 20 日～27 日(意見交換)、令和７年１月６日～８日（審議）
計算科学シミュレーションと工学設計分科会（第 26 期・第７回）
メール審議　申出書案（見解「新たな音響学を構築するバーチャル音響環境研究所の創設に向けて」）を承認

令和７年
７月 10 日～18 日　計算科学シミュレーションと工学設計分科会（第 26 期・第８回）
メール審議　見解案「新たな音響学の学術領域の創成とそれを推進するコ

ンソーシアムの創設に向けて」を承認
その後、総合工学委員会の査読結果を受け「見解」から「報告」への区分変更を決定。

＜参考資料２＞シンポジウム開催

令和５年３月 27 日　公開シンポジウム「計算音響学の目指すもの」を開催

