

記 録

文書番号	S C J 第 25 期-050921-25550800-095
委員会等名	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
標題	音響を核とするバーチャルシミュレーションシステムの 開発に向けて
作成日	令和5年（2023年）9月21日

※ 本資料は、日本学術会議会則第二条に定める意思の表出ではない。掲載されたデータ等には、確認を要するものが含まれる可能性がある。

この記録は、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、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	越塚 誠一	(連携会員)	東京大学大学院工学系研究科システム創成学専攻教授
副委員長	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
幹事	高木 周	(連携会員)	東京大学大学院工学系研究科教授
幹事	松尾亜紀子	(連携会員)	慶應義塾大学理工学部教授
	大島 まり	(第三部会員)	東京大学大学院情報学環/生産技術研究所教授
	小山田耕二	(第三部会員)	大阪成蹊大学データサイエンス学部学科長・教授
	所 千晴	(第三部会員)	早稲田大学創造理工学研究科教授、東京大学大学院工学系研究科教授
	吉村 忍	(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
	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拠点設計・創造分野計算構造材料グループ主任研究員
	大林 茂	(連携会員)	東北大学流体科学研究所教授
	梶島 岳夫	(連携会員)	四国職業能力開発大学校校長
	加藤 信介	(連携会員)	工学院大学非常勤特任教授
	金子 成彦	(連携会員)	早稲田大学理工学術院国際理工学センター教授
	金田 行雄	(連携会員)	名古屋大学特任教授
	河合 宗司	(連携会員)	東北大学大学院工学研究科航空宇宙工学専攻教授
	岸本喜久雄	(連携会員)	東京工業大学名誉教授
	北村 隆行	(連携会員)	京都大学総長特別補佐
	小林 広明	(連携会員)	東北大学大学院情報科学研究科教授
	佐々木直哉	(連携会員)	山形大学工学部客員教授、立命館大学総

			合科学技術研究機構客員教授
渋谷	陽二	(連携会員)	大阪大学大学院工学研究科教授
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)	早稲田大学総合研究機構グローバル科学 知融合研究所上級研究員/研究院教授
萩原	一郎	(連携会員) *	明治大学研究・知財戦略機構研究特別教授、 東京工業大学名誉教授
橋口	公一	(連携会員)	エムエスシーソフトウェア株式会社技術 顧問、九州大学名誉教授
藤井	孝藏	(連携会員)	東京理科大学工学部情報工学科教授
藤代	一成	(連携会員)	慶應義塾大学工学部情報工学科教授
矢川	元基	(連携会員)	公益財団法人原子力安全研究協会会長、 東京大学名誉教授、東洋大学名誉教授
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総 合情報学専攻教授 副学長
平野	徹	(連携会員(特任))	ダイキン情報システム株式会社シニアス キルスペシャリスト
吉村	卓也	(連携会員(特任))	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	吉村	卓也	東京都立大学システムデザイン研究科機械シ ステム工学域教授
副委員長	萩原	一郎	明治大学研究・知財戦略機構研究特別教授、 東京工業大学名誉教授
幹事	谷口	隆晴	神戸大学大学院システム情報学研究科准教授
幹事	山本	崇史	工学院大学工学部機械工学科教授
	矢川	元基	(連携会員) 公益財団法人原子力安全研究協会会長、東京 大学名誉教授、東洋大学名誉教授
	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 報システム工学域准教授
	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
	篠崎	隆宏	東京工業大学工学院情報通信系准教授

施 勤忠	国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構特任 担当役
西口 磯春	神奈川工科大学創造工学部自動車システム開 発工学科教授
西村 直志	京都大学名誉教授
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
松本 敏郎	名古屋大学大学院工学研究科機械理工学専攻 教授
矢田部浩平	東京農工大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
若槻 尚斗	筑波大学システム情報系准教授

* 令和4年5月31日付連携会員任期満了となったが引き続きご協力いただいた。

本記録の作成にあたり、以下の職員が事務を担当した。

事務	佐々木 亨	参事官（審議第二担当）
	高橋 直也	参事官（審議第二担当）付参事官補佐（令和5年3月まで）
	柳原 情子	参事官（審議第二担当）付参事官補佐（令和5年4月から）
	影山 祥子	参事官（審議第二担当）付審議専門職付

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、空飛ぶクルマは数年以内の実現が見込まれるが、市街地上空の飛行のためには、騒音問題の解決は必須である。しかし、単なる騒音低減には限界があり、騒音をむしろ心地よい音に変えるような、従来技術の延長上にはない技術革新が必要となる。そのためには、音質評価や音響支援医療等、多様な分野との本質的な連携が不可欠である。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・心理学などを融合した、新たな音響学と、それを核とするバーチャルシミュレーション基盤技術の創出が急務である。

なお、本記録において用いる「バーチャルシミュレーション」という語は、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。

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、物理学・工学・心理学・感性工学・生理学など幅広い学際領域を扱う。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、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。これは、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期科学技術基本計画（FY2021-2025）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。上述のとおり、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、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、

残念ながら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バーチャルシミュレーションシステム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、以下の問題点が確認された。

- 1) High Performance Computing (HPC) 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バーチャル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は、互いに連携可能な程度に十分高度に発展し、連携の準備ができているか？
- 3) 如何にして、製品が希望するものとなるように、消費者自身がバーチャル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^[85, 86]？

3 計算音響学小委員会における議論のまとめ

本小委員会では、上記の問題点を踏まえた議論の結果、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) 国は、従来の視点にとらわれない芸術的思考・心理学・感性工学・生理学・社会学などと融合した新たな音響学と、それを核とするバーチャルシミュレーション基盤の創出に向けた研究環境の整備を進めるべきである。
- 2) 国は、この新たな音響学の創出における取組のアクション誘発のため、前項の多様な分野が連携した新しい科学技術領域で研究者が活躍できるような人材育成、支援体制を展開していくべきである。
- 3) 国は、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。

(2) 長期的研究体制と産官学連携による研究コミュニティの構築

- 1) 音響学の他、芸術・心理学・感性工学・生理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研究コミュニティを形成し、長期的な研究体制を構築すべきである。
- 2) 革新的 HPC・インフラ (High Performance Computing Infrastructure, HPCI) 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。

(3) 人材育成

- 1) 音響学を核として、芸術・心理学・感性工学・生理学などとの融合について学ぶカリキュラムを大学等の高等教育機関においてデザインすべきである。
- 2) 国民すべてにおいて、音響シミュレーションの基礎を含むバーチャルシミュレーション技術の基礎を義務教育において習得させるべきである。

目 次

1	はじめに	1
2	バーチャルシミュレーション技術を構成するテクノロジー	5
	(1) 高度波動解析技術（マイクロ組織・複合構造・混相・接触など）	5
	(2) HPC（High-Performance Computing）技術	6
	(3) 音響信号処理技術	6
	(4) ディープラーニングを中核とする AI 技術	7
	(5) 心理学、感性工学、生理学（脳科学）	8
	(6) 予防医学、音楽療法	8
	(7) 社会システム、環境、都市計画	9
3	音響学のバーチャルシミュレーションの目指すもの	10
	(1) 背景	10
	(2) 課題	10
	(3) 目指すもの	11
4	連携による実施内容	13
	(1) 交通騒音（心理と環境音）	13
	(2) 音楽（音響と生理、心理学）	13
	(3) well-being（QOL、予防医学）	14
5	まとめ	16
	(1) 明確な国家的政策立案と施策	16
	(2) 長期的研究体制と産官学連携による研究コミュニティの構築	17
	(3) 人材育成	17
	(4) 研究領域の創出	18
	(5) 研究所の創立と期待される成果	19
	<用語の説明>	20
	<参考文献>	21
	<参考資料 1> 審議経過	28
	<参考資料 2> シンポジウム開催	30

1 はじめに

計算力学を基盤とするコンピュータシミュレーション、すなわち計算機による物理シミュレーションは、1990年代、自動車業界においてそれまでの物理モデルを重視する開発スタイルからデータモデルを重視する開発スタイルへの変革をもたらし、開発期間の短縮、開発コストの削減に著しく貢献した^[1]。さらに近年、自動車の電動化、自動走行の実現や世界的な環境規制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。ドイツではこのような動きを第4次産業革命と位置づけ「インダストリー4.0」が精力的に進められている。また米国でも、IIoT（産業向けIoT）を推進するIIC（インダストリアル・インターネット・コンソーシアム）が設立され、デジタルデータを活用したデータ・アナリティクスが進んでいる^[2]。さらにまた中国では、2015年に中国製造2025（Made in China 2025）を打ち出しており、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^[3,4]。

インダストリー4.0では、サイバーフィジカルシステムやデジタルツインと呼ばれる仕組みによって、製造業の構造的な改革を目指している^[5,6,7]。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。これを実際に推進するには、製造技術と情報通信技術などの高度な連携が必要だが、それを実現するために、ドイツでは、産官学が連携してプラットフォーム・インダストリー4.0を組織している^[5,6,7]。また、人材育成についても、学校教育に企業が積極的に関わる体制が構築されている。ここで注意すべきは、コンピュータシミュレーションは、消費者にも、製造者への即時のフィードバックを与えることができ、製造者と消費者の一体化を加速することである。このような状況下ではこれまで以上に品質の確保は勿論、製品の魅力度が問われる時代となる。これを左右する上で最も重要なものの一つに音質の良さがある。

自動車業界では、騒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。実際、自動車などの機械騒音は環境問題にも関わる社会的課題である。我が国の自動車関連産業は年間出荷額約60兆円であり、機械工業全体に対して約4割を占めている。また、研究開発費は3.7兆円であるが、我が国の自動車産業では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と言われる程、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^[8,81]。また、我が国には世界的な楽器メーカーも数多く存在しており、音響に関する科学技術は我が国の一つの強みである。例えば、世界市場におけるピアノのシェアではヤマハは首位、河合楽器製作所も2番手グループに入る。また、ヤマハについては、電子ピアノやポータブルキーボードなどの電子楽器においても、世界シェアの約半分を占める報告されている^[82]。

一方、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、音の問題は大きく変わりつつある。例えば、電動化によって騒音は質的に変化しており、音質に関する新たな技術の研究開発が必要となる^[9]。また、空飛ぶクルマは数年以内の実現が見込まれるが、市街地

上空を飛行するには、騒音問題の解決は必須である。しかし、単純な騒音低減には限界があり、騒音をむしろ心地よい音に変えていくといった、従来技術の延長上にはない、新たなアプローチが求められつつある。

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、物理学・工学・心理学・感性工学・生理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、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。すなわち、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、それぞれに最先端な音響関連の現状と課題を議論している。これは、世界的に見てもユニークで学際的な取組である。

前述のとおり、音響に関する科学技術は我が国の強みの一つであり、また、「令和4年版情報通信白書」^[10]にあるように、メタバースやテレワーク、オンライン授業の急速な普及、動画配信や音楽配信市場の拡大などを背景に、音声技術は成長分野としても大きく期待されている。例えば、メタバースの市場規模は2021年には4兆円ほどであるが、2030年には78兆円にまで拡大すると予想されている^[10]。この、音に関する科学技術を、物理的領域のみならず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、理工学が芸術・心理学・感性工学・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、他の理工学技術の学際研究にも大きな波及効果を持ち得る。音に関する科学技術のこのような拡張は、第6期科学技術基本計画（FY2021-2025）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日本独自の「人間中心設計」の推進のためにも、喫緊の課題である。インダストリー4.0や米国のIICでは、ソフトウェア技術、ネットワーク技術に代表される情報科学技術の急速な発展と製造業の融合を軸として製造業やサービス業の変革を促すものであり、その枠組みにおいて音のコンピュータシミュレーションを活かした設計や分析（例えば、音による機械の状態監視^[88]や対象物の自動認識^[89]など）が進められているが、上で述べた学際領域を含めた幅広い分析に基づく「人間中心設計」には残念ながら至っておらず^[87]、その点が異なるといえる。具体的には、音の物理的シミュレーションを行う点において両者は同様であるが、音が人にとってどのように知覚され心理的にどのような影響を与えるかといった人間視点での評価を重視することが「人間中心設計」であると言える。また、その他の関連機関として、フランス国立音楽音響研究所(CRCAM)がある。ここでは、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、音と人の関わりにおいては先駆的な研究機関^[11]である。さらに、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^[12]、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である。これらは、先に述べた音研究に関する学際領域に関わっている。

上で述べた「人間中心設計」を実現するには、音質評価や音響支援医療と称すべき、音楽・音響と医療を連携した新たな技術の開発等、多様な分野との本質的な連携が不可欠である。そのような連携の試みとしては1993年に発足した日本サウンドスケープ協会を中心とするサウンドスケープの研究や、情報処理学会音楽情報科学研究会、電子情報通信学会ヒューマ

ン情報処理研究会、日本感性工学会感性計測研究部会などにおける、音刺激の生体反応や「心地よい音」の研究等が進められている。これらをさらに発展させ、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」を明らかにする音楽などの芸術・心理学を融合した、新たな音響学と、それを核とするバーチャルシミュレーション基盤の創出が急務である。

ここで、本記録において用いる「バーチャルシミュレーション」という語を定義する。これは、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。なお、従来のコンピュータシミュレーションにおいても、その結果を音声を含む動画などで再生することは行われているが、単なる再生だけではなく、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ことを含意している。

以上を踏まえ、以下の各項目の実現が求められる。

(1) 国家的政策立案と施策

- 1) 国は、芸術・心理学・感性工学・生理学などと融合した新たな音響学と、それを核とするバーチャルシミュレーション基盤の創出に向けた環境の整備を進めるべきである。
- 2) 国は、この新たな音響学の創出における取組を、芸術・心理学・感性工学・生理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) 国は、オープン科学時代に入った今、製造者と消費者の距離がどんどん縮まって行くという認識に立ち、我が国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べきである。

(2) 長期的研究体制と産官学連携による研究コミュニティの構築

- 1) 音響学の他、芸術・心理学・感性工学・生理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研究コミュニティを形成し、長期的な研究体制を構築すべきである。
- 2) 革新的 HPC・インフラ (HPCI) 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。

(3) 人材育成

- 1) 音響学を核として、芸術・心理学・感性工学・生理学などとの融合について学ぶカリキュラムを大学等の高等教育機関においてデザインすべきである。
- 2) 国民すべてにおいて、音響シミュレーションの基礎を含むバーチャルシミュレーション技術の基礎を義務教育において習得させるべきである。

前述のように、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^[13]。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。そこで、以上の提案を実現するために、音響を核とするバーチャ

ルシミュレーションシステムの開発と、それを実現するための、音響環境に関する新たな研究所の創設を提案する。

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、新たな研究所では、これまでの縦系的研究組織に加えて横系的組織も加えた、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^[5,6,7]。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されており、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^[9,14,15]。自動車業界は我が国の産業を牽引してきた実績をもち、音響技術に関する研究開発への投資にも積極的である。そのため、自動車業界を核として共同研究を進めれば共同研究先の研究基盤も強化され、関連産業分野全体の強化につながると期待される。

また、本研究所の設立には、Society5.0の実現に向けた、well-beingの実現への貢献も期待できる。実際、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^[16,17,18]。

2 バーチャルシミュレーション技術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・身体の見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、新たな音響学のバーチャル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^[19]。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、本記録においては、後述するように人に与える影響を、音響計算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拓け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バーチャルシミュレーションに求められている。具体的には、「データサイエンスシミュレーションとして AI を活用する手法を用いて生体反応・感受性を含めたモデルやマイクロな振動エネルギー挙動を含める未知要素の多いモデルのシミュレーション」、「ナノ等のマイ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」、及びそれらのデジタルツイン手法を包含するものである^[20,21]。これらの手法を包括的に扱うことにより、音響に関連する複合的領域でのアプローチを試みる。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やデータベースのプラットフォームの構築・活用が欠かせない。

下記の(1)、(2)は、マイ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、ここでは、交通騒音ロードノイズ、プロペラ等による乱流流体音等をファーストランナーとして取り上げている^[14,15]。その後、他の対象分野に展開する。(3)は、生理的だけでなく心理的反応も含めた生体の複雑な感受性に対応するため、データ処理の体系化を推進するものである。(4)はデータサイエンスに対する推進、(5)～(7)は、音響のかかわる複合領域におけるデジタルツインとしてのアプローチを推進するものである。

以下、このコンセプトを支える諸技術について、それぞれ述べる。

(1) 高度波動解析技術（マイクロ組織・複合構造・混相・接触など）

1) ランダム加振力解析：ロードノイズ評価言語である変動感の要因として、路面表面近

くの通気性の変動やタイヤ空洞内音響共鳴などがある。これら未解明の現象の解明が必要である^[22, 23]。

- 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^[24, 25, 26]。
- 3) 接触問題：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を構築する必要がある^[27]。
- 4) 張力構造・薄板構造問題：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が求められる^[28, 29]。
- 5) 分散系と群速度：ロードノイズ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^[30]。
- 6) 回転体特有の現象：コリオリ力による半径方向と周方向の振動連成を含めた解析が求められる^[31]。
- 7) 分子設計をも目指す高度材料技術の開発が必要である^[32]。
- 8) 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^[33]。
- 9) 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^[34, 35]。

(2) HPC (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^[36, 37]、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、理化学研究所が発刊しているスーパーコンピュータ「京」や「富岳」を利用した工学的な研究事例に、構造力学や音響に関するものはほとんど見当たらない^[38]。

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^[90]、車室内の音場解析^[91]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^[39]。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^[92]についての検討もなされている。

また、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^[40]、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。

(3) 音響信号処理技術

音響信号処理技術は、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^[41, 42, 43]。

- 1) 音源分離関連技術：適応型アレー等を用いたビームフォーマー、ICA 等によるブラインド信号処理、SAFIA 等信号のスパース性を用いた方法、CASA による情景分析等。
- 2) 音源定位関連技術：遅延時間推定法、ビームフォーミング法、サブスペース法等による音源定位と音源追跡等。
- 3) 雑音・残響抑制技術：ウィナーフィルタ、STFA によるサブバンド雑音抑制、ノイズキャンセラ技術、逆フィルタ、パワーエンベロープを用いた残響抑制。
- 4) 騒音の能動制御技術：フィードバック、フィードフォワードによるアクティブノイズコントロール。
- 5) 音場制御技術：頭部伝達関数、バイノーラルシステムを活用した音場制御法。境界音場制御、スピーカアレーによる制御等。
- 6) 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。

① 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^[44]。

② 高精度な音響領域分離制御^[45]

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。

③ 高精度の臨場感再生技術

視聴者の行動（頭部位置、耳の位置等を検知）に応じて再生音・映像を随時処理することで能動的に臨場感を与える技術。高精度の信号処理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^[46]。

(4) 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。

- 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^[47, 48, 49]。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、ロバストなコンピュータシミュレーションが可能となる。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^[50]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^[51, 52]。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。

(5) 心理学、感性工学、生理学（脳科学）

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^[53, 54]。これらは、音響心理学として包括される。さらに、脳の感性にかかわる音質評価も、音響心理学に含めると、対象者の各種脳波等の客観的な生理的計測と本人の主観的聴感評価の尺度構成との対比を利用している^[55, 56, 57]。

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、位相に関しては鼓膜のフィルタ・バンク処理により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^[58]。

また、音などの感性に関するバーチャル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^[59]。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^[60]。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^[61, 62, 63, 64, 65]。

(6) 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、最近では、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^[16, 17]。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態・

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^[66]。

音楽療法^[67,68]は、高齢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。現在では、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が提案されている^[18]。子供、特に乳幼児期では、聴覚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^[69,70]。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^[71]。

(7) 社会システム、環境、都市計画

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バーチャル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^[72,73,74]。

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^[75,76]。

日本における高齢社会での認知症は、世界の中で発生率が高く重要な課題である。認知症への音響の影響は大きく、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^[77,78,79]。

3 音響学のバーチャルシミュレーションの目指すもの

(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、私たちの身体は、臓器、筋肉、骨など、それぞれ振動や音を持っており、身体の不調は、振動や音の乱れからも由来する。それを、正しい振動や音を身体に聴かせることで、細胞が共振共鳴し、正しい振動や音に戻していく音楽療法などが知られており、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」を明らかにする音楽などの芸術・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られる。そのため、この問い自体も本記録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。このように本記録では「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、物理学・工学・心理学・感性工学・生理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。

これは、世界的に見ても時代を先取りする「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。

Society5.0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研究基盤的組織が必要である。特に、これは、従来のような、分野ごとの縦糸のマトリクス組織だけでなく、ダイバーシティに富んだ、分野融合の横糸的組織であるべきである。そのような組織として、音響環境に関する新たな研究所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の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の検討を行ってきた。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) 少子高齢化による幼児発育（脳の発達）・認知症対応等への、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）で暴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) 音響楽器に関する研究
- 8) 音響楽器による音響の場と癒し効果に関する研究
- 9) 楽器の音質の作り込みに関する研究
- 10) 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
- 11) 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
- 12) 生活環境で暴露される環境音響の生態（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バーチャル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。

(3) 目指すもの

上記の取組によって、以下の成果が見込まれる。

- 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ー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

これらの目標を達成するための、先述の課題の解決に向けたバーチャル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る。上述の分野融合的

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。そのためには、次のような設備の設計・製作も必要となる。

- 1) 世界に点在する大型実験設備、スーパーコンピュータやモデルベースサーバーなどのバーチャルシミュレーション系、ユーザーをネット上で結合する国際プラットフォーム
- 2) 流体騒音発生現象解明に向けた低速模型風洞と飛行中の回転翼まわりの流れと音場の可視化・計測設備
- 3) 固体伝播音を対象とした騒音評価用シミュレータ
- 4) 転動体騒音発生・伝搬解析設備。転動中の変形・波動計測装置装備（高速度ステレオカメラ、モアレ等）
- 5) 路面-タイヤ-車両骨格の試験模型・耳や発声器官模型・楽器発音機構模型などの試作設備
- 6) 体内の波動伝搬モデル。外界からの刺激による人体内の波動伝搬や体内の臓器・骨格運動による波動伝搬計測分析装置
- 7) 聴覚に関する Cyber-Physical シミュレータ。聴覚神経系の信号発生・伝達計測装置と数理モデル

4 連携による実施内容

製造業は我が国 GDP の 2 割弱を占めており^[83]、我が国の産業構造を支える業界である。製造業の基幹産業である自動車産業^[81]では、空飛ぶクルマや電動自動走行車の普及などにより、新たな音響学が必要となりつつある。これは、空飛ぶクルマのための新たな騒音除去技術や、生命科学による聴覚機能の解析や音楽などの芸術、心理学による「心地よい音」の研究を融合した、快適な音場設計を備えた自動車など、well-being に即したイノベーションに繋がる。

我が国の強みである自動車産業が、このような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させることができれば、Society5.0 を実現し、真に豊かな社会に向けた新時代の産業を、自動車産業のみならず、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。

以下に、そのような連携の例を挙げる。

(1) 交通騒音（心理と環境音）

自動車に代表される機械騒音は環境問題にも関わる社会的課題である。この問題の解決のためには、従来の騒音低減技術に加え、ロードノイズや風音を評価するヒトについて、聴覚という生理現象や、そこに影響を及ぼす音楽という文化的要素の解明が必要である。また、聴覚系及び発声系のサイバーフィジカルモデルを構築したり、楽器の発音機構解明などの研究を行うことも必要となる。

(2) 音楽（音響と生理、心理学）

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。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。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。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の手法で調査し、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。また、我が国でも 2022 年 3 月よりムーンショット目標 9「音楽の気づき科学で次世代の感性を育む」のプロジェクトが開始され、実験・臨床的なアプローチにより音楽・医学・心理学の分野融合による総合知研究開発に取り組まれている。本記録は、これに加えてサイバーフィジカルを取り入れたバーチャル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。

音響学に関する連携拠点を設置し、国内外の関連研究拠点と連携して多くの分野の研究者と協働する体制を構築できれば、世界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音楽療法等の研究を取り上げるべきである。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明らかにするために、総合的（生理的、心理的、社会的）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、特に知的障害者や痴呆高齢者に対する音楽療法は多くの取り組みがあるが、効果指標の確立、音楽方法の選択、療法最適化等を明確化し、医学と対等に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^[84]。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、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。

(3) well-being (QOL、予防医学)

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 としての音響の研究が注目を浴びている。さらに、高齢社会の課題である認知症についても、コミュニケーションについての音響効果というアプローチが考えられる。

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ために、音響に関する生体反応を知るためには、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、色々な進化過程における DNA の研究も重要になるものとする。

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、各種治療支援のミクロな面、社会学の領域から生活社会環境音としての生活知覚トータルからのマクロな面との複合領域での検討が求められる。

具体的なアプローチとしては、生体や社会構造に関しては、明解な演繹的機能は把握が難しいものが多く、これらを含む計算音響学においては、バーチャルシミュレーションとしてデジタルツインによる手法が有効である。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 によるリアルデータ群の AI 制御モデルによる診断、評価と従来の数理モデルシステムとの連携が重要となる。バーチャル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、柔軟性のある計算学を両者の接着材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、人間にかかわる分野では、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、代替えのできない効果も多く紹介されている^[84]。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 制御モデルで補う、あるいは、AI 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、独自に進められている。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。

以上に挙げたような連携を実現するためには、バーチャルシミュレーション構築に加え、

- 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)
 - 3) 人体に関しては、倫理上の課題のクリアとコンセンサス、データ保全
 - 4) AI 学習の演算速度の向上
- などが必要である。

また、バーチャルシミュレーションの構築に当たり、リアル社会データの採取による検証とともに、実際の環境をできる限り詳細にモデル化した（大規模な）実験フィールドモデルが必要となり、各分野の研究者がウォークインできる音響環境に関する研究所が必要である。

5 まとめ

計算音響学小委員会では、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) 国は、従来の視点にとらわれない芸術的思考・心理学・感性工学・生理学・社会学などと融合した新たな音響学と、それを核とするバーチャルシミュレーション基盤の創出に向けた研究環境の整備を進めるべきである。
- 2) 国は、この新たな音響学の創出における取組のアクション誘発のため、前項の多様な分野が連携した新しい科学技術領域で研究者が活躍できるような人材育成、支援体制を展開していくべきである。
- 3) 国は、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づ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^[80]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。本構想は、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。

国は、本構想を強力的に推進し、世界に先駆けて、我が国の学術・産業分野の競争力を大きく向上させる必要がある。本構想の推進に関する、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。本構想が目指す、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、本構想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、前述のとおり、新たな研究所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音のユニバーサル化につながり、言語による差別を排除する。脳の発達としての音楽脳では、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。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）。

(2) 長期的研究体制と産官学連携による研究コミュニティの構築

- 1) 音響学の他、芸術・心理学・感性工学・生理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研究コミュニティを形成し、長期的な研究体制を構築すべきである。
- 2) 革新的 HPC・インフラ（High Performance Computing Infrastructure, HPCI）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研究所の設立は、これらの課題を解決するものである。

まず、芸術・心理学・感性工学・生理学などを融合した音響学の研究を推進するためには、実際に、関連する研究者が一カ所に集まり、連携して研究開発を進める必要がある。この研究所は、そのための研究施設となる。また、研究所に国際アドバイザーボードを設ければ、海外とも連携しつつ、組織の壁を越えた人材の協力体制を構築することができる。ただし、海外連携においては、日本人の感性や文化様式の独自性を際立たせ、我が国独自の技術が構築されるように留意する必要がある。

また、複数の機関で重複設置することが難しいシミュレーターや最先端計測機器・環境をこの研究所に構築すれば、集中的かつ効率的に運用することができる。

(3) 人材育成

- 1) 音響学を核として、芸術・心理学・感性工学・生理学などとの融合について学ぶ機会をもつカリキュラムを大学等の高等教育機関においてデザインすべきである。
- 2) 国民すべてにおいて、音響シミュレーションの基礎を含むバーチャルシミュレーション技術の基礎を義務教育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、情報学・計測工学・芸術・心理学・感性工学・生理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、バーチャル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、バーチャル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バーチャルシミュレーション手法の教育も行われるべきである。

(4) 研究領域の創出

以下、上記の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バーチャル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、たくさんの新たな研究領域が創出されると期待される。具体的には、例えば、以下のような課題研究ユニットの構成が期待できる。

音楽脳・生体・医学研究ユニット：

- (1) 音楽演奏、ハイレゾ自然音など人体に影響する音響・振動
- (2) 脳・音響生理・DNA との関連
- (3) リハビリテーション、心療、回復期などの音響支援医療
- (4) 音響への音楽の芸術性の付与

音の場・社会空間研究ユニット：

- (1) 脳の発達、音楽教育などの幼児教育
- (2) 認知症対応、健康脳の維持などの高齢者音環境
- (3) 都市空間、オフィス空間、公共施設空間などの社会空間音
- (4) 音規制対応、車内音の付加価値などの移動体空間音

音響機器研究ユニット：

- (1) 音響の質、楽器、環境音制御などの音響機器
- (2) 音響デジタル・アナログ技術、情報伝達効率との両立
- (3) 音情報統合プラットフォーム構築

音響数理モデル研究ユニット：

- (1) 複合的音の場の再現に向けたデジタルツイン
- (2) 音響脳、心身統合数理モデル
- (3) 社会環境音モデル・サイバーフィジカルシステム

(4) 音響発生・拡散の統合社会システムの数理モデル

これらの研究ユニットは、各大学に加え、例えば、日本音響学会音楽音響研究委員会、制振工学研究会、自動車技術会部門委員会、国立長寿医療研究センターなどが連携することによって構成可能であると考えられる。

(5) 研究所の創立と期待される成果

研究所においては、まず、我が国の強みである自動車関係の音響技術を発展させ、他の研究を牽引しつつ、設備の導入やシミュレータ・基礎理論の構築など、研究所の共通利用基盤機能確立することが望ましい。また、各地の大型実験設備、計算資源、データベース等をウェブ上で統合する国際プラットフォームの開発も進められるべきである。さらに、前項で挙げた新たに創出される研究領域の課題研究ユニット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、音響環境に関する新たな研究所に担わせる。具体的には、成果をこの研究所にストックしてゆくとともに、実装のためのサイバーフィジカルシステムのプラットフォームとリンクさせるなど、社会に普及させる。また、本研究所でバーチャルシミュレーション・計測により得たデータは原則、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必要がある。

音響環境に関する新たな研究所においては、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からなる施設とすべきである。また、この研究所の研究者に対する独自の教育カリキュラムを構築し、国内外の研究機関や企業に、請われて転出できる力量を備えさせる。それによって、開発した技術を広く国内に普及させ、我が国の研究開発能力を向上させる。

＜用語の説明＞

1. バーチャルシミュレーション

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括的な意味合いを持つもの。なお、従来のコンピュータシミュレーションにおいてもその結果を音声を含む動画などで再生することは行われているが、再生だけではなく、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ことを含意している。

なお、一般的には、音や振動といった物理量で構築されるモデルを評価する従来のコンピュータシミュレーションに対して、これらの物理モデルを直接表す代わりに、形状を持たない機能モデルや仮想的デバイス（バーチャルリアリティ空間やデータサイエンスシステム等）モデルによるシミュレーションを示す場合もあるが、ここではそれとは異なる意味で用いている。

2. 音響支援医療

医療と音楽の結びつきは古くから行われており、音楽療法として知られていた。本記録では、それらを深化させ、効果指標の確立、音楽の選択、施法最適化等を科学的観点から明確化し、医療技術として活用されることを目指し提案している。本記録においては、この取り組みを「音響支援医療」と表している。

3. 新たな音響学

音の発生と伝播を物理現象として扱う従来の音響学に対して、それが人間に対してどのような影響を与えるかを、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としての音や、環境などの社会的観点から影響を捉えるなど、音を核とする新たな学際研究として本記録において提案する音響学。

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、「持続可能性と強靱性を備え、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、本記録ではこれと同義で用いている。

5. 人間中心設計

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、一人ひとり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。

<参考文献>

- [1] 山本 透, 脇谷 伸, 原田 靖裕, 香川 直己, 足立 智彦, 沖 俊任, 原田 真, 悟演習で学ぶ 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
- [2] インダストリアル・インターネット・コンソーシアム技術白書 「インダストリアル・アナリティクス IIoT 革命を推進するエンジン」, Wael William Diab, K. Eric Harper, et al., Industrial Internet Consortium
- [3] 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>
- [4] 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
- [5] 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
- [6] 尾木 蔵人, 決定版 インダストリー4.0 -第4次産業革命の全貌人, 東洋経済新報社, 2015
- [7] 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
- [8] 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
- [9] 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
- [10] 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>. (令和5年3月21日閲覧)
- [11] 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
- [12] 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
- [13] 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
- [14] 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
- [15] <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
- [16] 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
- [17] 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
- [18] 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 卷 1 号, pp. 57-68, 2017. https://doi.org/10.32199/jsmpc.23.1_57
- [19] 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>)
(令和 5 年 5 月 25 日閲覧)
- [20] 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
- [21] 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 卷 1 号 pp. 89-109. 2022. https://doi.org/10.24798/jicp.6.1_89
- [22] 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)
- [23] 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)
- [24] W. Desmet, et. al.: CAE Methodologies for Mid-Frequency Analysis in Vibration and Acoustics, Katholieke Universiteit Leuven, ISBN 978-94-6018-523-6 (2012)
- [25] 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)
- [26] 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)
- [27] M. Ishihama: Trochoidal Curve Representation of Tire Rolling Motion as The Basis of Tire Vibration Analysis. Proceedings of JSAE 2022 Spring Congress, S221003 (2022)
- [28] Y. Nakajima: Advanced Tire Mechanics Vol.1, Springer ISBN 978-981-13-5798-5 (2019)
- [29] Y. Nakajima: Advanced Tire Mechanics Vol.2, Springer ISBN 978-981-13-5799-2 (2019)
- [30] J. F. Doyle: Wave Propagation in Structures, Chapter 8, Springer ISBN 0-387-94940-2 (1997)
- [31] M. Heckl: Tyre Noise Generation, Journal of Wear Vol. 113, pp 157-170 (1986). [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(86\)90065-7](https://doi.org/10.1016/0043-1648(86)90065-7)
- [32] 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>

- [33] 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>
- [34] 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
- [35] 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>
- [36] 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, pp. 89–98, 2018. <https://doi.org/10.11308/tjsst.10.89>
- [37] 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, pp. 701–706, 2008. <https://doi.org/10.3130/aije.73.701>
- [38] スパコン (HPCI) 利用事例の紹介, <https://fugaku100kei.jp/cases/>. (令和5年3月20日閲覧)
- [39] 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, pp. 833–839, 2002
- [40] 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>
- [41] 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 (令和5年3月22日閲覧)
- [42] 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, pp. 510–511, 2019. https://doi.org/10.20697/jasj.75.9_510
- [43] 澤田, 荒木, 牧野, 音源分離技術の最新動向, *電子情報通信学会誌*, 91, pp. 292–296, 2008
- [44] 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) , ワイヤレスネットワーク研究センター, NICT, 2023
- [45] S. Kikuchi et al., Region separation control for broadband sounds by multiple sources, *Proc. of the 24th ICA2022*, ABS-0133 (2022)
- [46] 大山 英明ほか, 体験共有における投射について, *知能学会全国大会論文集*, 第32回, 2018
- [47] 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>
- [48] 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>
- [49] 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>
- [50] 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>
- [51] 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>
- [52] 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>
- [53] K. L. Sakai, Y. Oshiba, R. Horisawa, T. Miyamae, R. Hayano: Music-experience-related and musical-error-dependent activations in the brain, Cerebral Cortex, Vol. 32, pp. 4229-4242 (2021). <https://doi.org/10.1093/cercor/bhab478>
- [54] 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, pp. 89-99, 2014.
<https://doi.org/10.5136/lifesupport.26.89>
- [55] 佐藤 正之, 音楽の認知と情動の脳内機構, 神経心理学 34 卷 4 号, pp. 274-288, 2018. <https://doi.org/10.20584/neuropsychology.17047>
- [56] 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～, TJAM, Vol. 2, No. 3, pp. 31-41, 2021. <https://doi.org/10.34590/tjam.2.3.31>
- [57] 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
- [58] 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 情報科学研究, No. 89
- [59] 熊野 史朗, 寺田和憲, 鈴木健嗣: Affective Computing, 人工知能. 35 卷 6 号, pp. 819-823, 2020. https://www.jstage.jst.go.jp/article/jjsai/36/1/36_2/_pdf
- [60] 萩原 一郎, 「人と機械の知的協調システム」ミニ特集を組むに当たって, 計測と制御, 38 卷 6 号, pp. 355-356, 1999.
https://www.jstage.jst.go.jp/article/sicej11962/38/6/38_6_355/_pdf/-char/ja
- [61] 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 卷 10 号, pp. 570-577, 2018. https://doi.org/10.20697/jasj.74.10_570
- [62] 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

[63] 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>

[64] 岡村 宏, 長谷川浩志, 金沢 純一, 田中 幸和, クラシックギターの動特性の予測技術について, 日本シミュレーション学会大会発表論文集 : シミュレーション・テクノロジー・コンファレンス・計算電気・電子工学シンポジウム No.26, pp. 131-134, 2007

[65] 山崎 徹, 曾根 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, 2012.

<https://doi.org/10.1299/kikaib.78.988>

[66] 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, pp. 114-116, 2019.

https://doi.org/10.11249/jsbpjpp.30.3_114

[67] 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, pp. 468-474, 2008. https://doi.org/10.20697/jasj.64.8_468

[68] 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, pp. 19-25, 2013. <https://doi.org/10.4189/shes.11.19>

[69] 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

[70] 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

[71] 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

[72] 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

[73] 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, 日本衛星楽雑誌, 76 巻 論文 ID:19014, 2021. <https://doi.org/10.1265/jjh.19014>

[74] 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

[75] 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」 令和3年

[76] 清水 祐一郎, 土斐崎 龍一, 坂本真樹, オノマトペごとの微細な印象を推定するシステム, 人工知能学会論文誌, 巻 29 号, pp. 41-52, 2014.

<https://doi.org/10.1527/tjsai.29.41>

- [77] T. Onishi, M. Yamasaki, T. Hara, T. Hiroto, R. Miyazaki: 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*, Vol 19, 11683 (2022). <https://doi.org/10.3390/ijerph191811683>
- [78] 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>
- [79] 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>
- [80] 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 (令和5年5月22日閲覧)
- [81] 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/> (令和5年6月20日閲覧)
- [82] 日経業界分析レポート 楽器・周辺機器, 日本経済新聞社, 2022
- [83] 我が国の産業構造を支える製造業, 経済産業省, https://www.meti.go.jp/report/whitepaper/mono/2015/honbun_pdf/pdf/honbun01_02_01.pdf (令和5年6月20日閲覧)
- [84] 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>
- [85] 萩原 一郎, 計算科学における夢・ロードマップ, *学術の動向*, 619 巻 10 号, pp. 12-17, 2014. https://doi.org/10.5363/tits.19.10_12
- [86] 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
- [87] 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>
- [88] S. Grollmisch, J. Abeßer, 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>
- [89] 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://doi.org/10.56042/jsir.v82i1.70251>
- [90] 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

[91] 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—拡張作用境界モデルの適用, 生産研究, 63 卷, 2 号, pp. 235-240, 2011,

<https://doi.org/10.11188/seisankenkyu.63.235>

[92] 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/journalcpj.42.3.139>

＜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。

＜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

公開シンポジウム
計算音響学の目指すもの

日 時：令和5年3月27日（月）11：00～17：20
場 所：日本学術会議講堂（ハイブリッド開催）

司会 山本崇史（工学院大学工学部機械工学科教授）

11：00 挨拶：越塚 誠一
（日本学術会議連携会員、東京大学工学系研究科システム創生学専攻教授）

11：05 開催の趣旨：吉村 卓也
（日本学術会議特任連携会員、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教授）

11：10 「アンティーク・ヴァイオリンの振動と音場に関する数値解析」
横山 真男（明星大学情報学部情報学科教授）

11：40 「楽器の研究における計測とシミュレーションについて」
若槻 尚斗（筑波大学システム情報系教授）

12：10 ～ 休憩 ～

13：20 「自動作曲の可能性と限界」
嵯峨山 茂樹（東京大学名誉教授）

13：50 「観察と対話に基づく自律エージェントの音声言語獲得」
篠崎 隆宏（東京工業大学工学院情報通信系准教授）

14：20 「音を直感的に表現するオノマトペの数値化」
坂本 真樹（電気通信大学 副学長）

14：50 ～ 休憩 ～

司会 谷口 隆晴（神戸大学大学院システム情報学研究科准教授）

15：00 「音響楽器シンギング・リンの振動音響解析」
黒沢 良夫（帝京大学 理工学部 機械・精密システム工学科 教授）

「音の脳への影響」
満倉 靖恵（慶應大学システム・デザイン工学科教授）

15：40 「計算音響学と自動車」
石濱 正男（明治大学客員研究員）

16：10 総合討論「計算音響学の今後へ向けて（夢が広がる計算音響学）」
（司会）雉本 信哉（九州大学 大学院工学研究院機械工学部門 教授）
（コメンテーター）岡村 宏（芝浦工業大学名誉教授）
（コメンテーター）坂本 慎一（東京大学生産技術研究所教授）
（コメンテーター）満倉 靖恵（慶應大学システム・デザイン工学科教授）

17：10 閉会の挨拶
萩原 一郎（日本学術会議特任連携会員、明治大学研究特別教授）

主催：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
共催：可視化情報学会、CAE懇話会、日本応用数学会、日本音響学会、日本機械学会、
日本計算工学会、日本計算数理工学会日本計算力学連合、
日本シミュレーション学会、アジア太平洋計算力学連合、国際計算力学連合
後援：自動車技術会、騒音制御工学会

申し込み方法・連絡先
<https://forms.gle/y52sctPivoovvcw27>
（Google Formによる回答、3/22まで、定員になり次第締切）