

令和 4 年 6 月 24 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H04124

研究課題名(和文) エクサスケールを見据えた流体・構造双方向連成問題に対する統一解法の構築

研究課題名(英文) Development of the unified simulation framework for strongly coupled fluid motion and structural deformation for the EXA scale computing

研究代表者

坪倉 誠 (Tsubokura, Makoto)

神戸大学・システム情報学研究科・教授

研究者番号：40313366

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,400,000円

研究成果の概要(和文)：流体運動や構造変形さらには空力音を統一的に解析するシミュレーションフレームワークを構築し、土木・建築分野や生体力学分野の応用問題に適用することでその有用性を実証した。基盤となるデータ構造には階層直交格子に基づくBuilding Cube Methodを採用し、流体・構造解析に対して統一的な基礎方程式とオイラー解析を用いることで、強連成問題に対してもフラッグシップスパコン富岳において高い計算性能を発揮することを示し、既存のシミュレーションフレームワークでは困難であった産業界でみられる複雑連成問題に対して、活路を開くことができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ものづくりの現場で対象となる物理現象の多くは、熱流体運動や構造変形、さらには構造振動や音の発生、化学反応等が伴う複雑連成問題であることが多い。しかしながら既存にシミュレーション技術は要素現象に特化して進化してきており、連成問題に対しては個別のシミュレーション技術を連成させて解析を行うため、データの補間等により超並列環境では十分な並列性能を得ることが難しかった。ここで開発された手法は、この問題を抜本的に解決するものとして大きく期待できる。

研究成果の概要(英文)：A simulation framework for unified analysis of fluid motion, structural deformation, and aeroacoustics has been constructed and its validity was demonstrated on various applications in the field of mechanical engineering, civil engineering and biomechanics. By adopting the Building Cube Method based on the hierarchical orthogonal grid system for the base data structure and using unified governing equations for both fluid and structure on Eulerian treatment, very high performance for both single node and parallel efficiency could be achieved on the flagship supercomputer "Fugaku" for the applications of strongly coupled problems of fluid motion and structural deformation. These achievements clearly open the way to the complex coupling problem observed in industrial applications, which current existing simulation frameworks are difficult to treat.

研究分野：計算力学

キーワード：数値流体力学 連成解析 統一解法 産業応用

1. 研究開始当初の背景

我々の身近に見られる旗のはためきや舞い落ちる花びらのように、流体中に置かれた物体が流体力により変形を受けたり、逆に運動・変形する物体が流体運動に影響を与えたりするような現象は、流体・構造連成問題 (**Fluid-Structure Interaction**, 以下 **FSI**) として扱われる。一般に流体や構造の解析は、前者についてはオイラー的に、後者についてはラグランジュ的にその流動や変形を表記することで、独自の進化を遂げてきた。そこでこういった **FSI** 問題を解析する場合は、流体、構造、それぞれの解析手法をその界面でデータ補間することで解析する、弱連成分離型解法が汎用的に用いられている。この手法は、流体解析と構造解析のそれぞれのメリットを生かすことで高い精度が保証される反面、構造変形に伴う流体付加質量が大きくなるような強い非線形性と連成効果が伴う問題に対しては、本質的に不向きである。こういった問題に対する解決策として、オイラー流体解析とラグランジュ構造解析に対する方程式を一体化して離散化・連立させる強連成一体型解法が提案されており、強連成 **FSI** 問題に対して高い有用性を示している。

一方、**FSI** 問題はものづくりの現場でも数多く見られ(自動車車室内の空力音予測、翼のフラッタ、建物の空力加振等) その解析による現象予測は、製品や構造物の安全性や耐久性等に大きく関わってくる。この内、特に大規模解析が要求されるような実用問題の特徴は、構造部材の形状が格段に複雑かつシェル構造で構成されていることである。この結果、必然的に強連成問題への対応が求められることに加え、構造大変形や破断といった、ラグランジュ構造解析では本質的に対応が難しい問題も数多く見られる。さらに産業界独特の問題として、解析のターンアラウンドタイムに対する制約が強く、複雑形状に対して高速な計算モデル作成(メッシュ作成)が要求されることである。即ち、大規模な解析が要求される産業応用問題に対しては、弱連成、強連成を問わず、既存のラグランジュ構造解析を基盤とした連成解法の限界が懸念される。

2. 研究の目的

産業界の大規模 **FSI** 問題への適用を前提として、超大規模並列計算を実現することで、既存の連成解析にブレークスルーをもたらす新たな **FSI** 解析フレームワークを研究開発する。このために基礎方程式に流体・構造統一オイラー方程式を採用し、そのデータ構造として階層直交格子を適用することで、強連成問題に対して超並列計算環境でもスケーリングし、かつ複雑形状に対応できるアルゴリズムを研究開発する。流体と構造の界面捕捉にはラグランジュ粒子法を採用することで、既存のオイラー構造解析の欠点である数値拡散を回避し、膜やシェル構造への対応を可能とする。提案する解析手法は、大規模解析の利点を活かして、産業界でみられる複雑形状を有する連成問題に適用することで、その有用性を実証する。最終的には、次世代のデジタルエンジニアリング環境を支援する、流体・構造連成シミュレーションのフレームワーク構築を目指す。

3. 研究の方法

(1) 流体・構造統一オイラー解法のフレームワーク

オイラー型流体・構造統一連成解法においては、非圧縮性を仮定した流体運動の支配方程式と非圧縮性を仮定した固体(構造物)運動の支配方程式について、各物質間の境界条件を考慮したうえで検査領域において体積平均化を施すことで得られる支配方程式を用いる。なお、本研究においては、各物質間の境界条件としては固着条件を仮定している。

本研究においては、体積平均化を施した連続の式と運動方程式を用い、体積平均化された単一の速度 v_{mix} と圧力 p_{mix} を求める。その際、空間離散化手法としては有限体積法を用い、速度と圧力の解法として、フラクショナルステップ法を用いる。

(2) 圧縮性統一解法のフレームワーク

数値流体力学における解析アルゴリズムは、大きく二つのグループに分類することができる。即ち、密度ベースの圧縮流体解法と、圧力ベースの非圧縮流体解法である。計算負荷を低減するため、密度ベース圧縮ソルバーは、一般的には高速領域(マハ数 > 0.3)をターゲットとし、従来は粘性なしと近似して数値解析を行う。一方、非圧縮ソルバーは低速領域(マハ数 < 0.3)をターゲットとし、圧縮性無視して数値解析を行う。しかしながらこのような大胆な分類と近似方法は、実際応用に対しては適用できない場合も多い。このようなターゲットとして、例えば、燃焼、空力音響および大きな熱伝達現象などの工業応用問題が挙げられる。この課題を解決するため、本研究ではまず、圧縮性統一解法のフレームワークを作り、低速領域でも圧縮性を無視できない自然対流問題をターゲットに検証を行う。ここでは計算資源を節約するために、従来の解法と比べ大きな時間刻みでも安定性を確保できるアダプティブ時間ステップスキームを開発する。時間解法については陰的な lower-upper symmetric Gauss-Seidel (LUSGS)を用いる。流束には RoeLM と高精度 5th Monotonic Upstream-centered Scheme for Conservation Laws (MUSCL)を用いる。粘性項は二次精度の中心差分で離散化する。

(3) Building Cube Method (BCM) と複雑現象統一解法フレームワーク CUBE

本研究では、我々のグループが 2012 年より理化学研究所で開発している複雑現象統一解法フレームワーク CUBE を基盤技術として用いる。CUBE の特徴は、熱輸送や流体運動、構造変形、さらには化学反応や音等が連成するような複雑現象に対して、統一的な支配方程式とデータ構造を採用することで、「京」や「富岳」といったハイエンドスパコンの性能を有効に引き出し、連成問題に対してスケラブルに大規模解析が行えることである。離散化には有限体積法を採用し、Building Cube 法 (BCM) に基づく階層直交格子を統一データ構造として採用している。BCM では、三次元解析領域を八分木法に基づき立方体領域に分割(これをここでは Cube と呼ぶ)し、サイズの異なる全ての Cube に対して同数の等間隔直交格子 (Cell) を配置する。並列計算の際には、各ノードに対して同数の Cube を配することで、ノード間のロードバランスをとることができる他、データ構造が単純であるので、新たな計算機アーキテクチャに対しても、比較的容易にチューニングが可能である。超並列環境における CUBE の有用性は、自動車空力、自動車エンジン、高層建物の耐風設計等を対象として、スパコン「京」でその有用性が既実証されている。直交格子を用いていることから、物体表面は埋め込み境界法 (IBM) に基づき再現される。これまで CUBE は、産業界へのハイパフォーマンス (HPC) 技術の展開を目的として開発が進められてきたため、IBM を実装する際に、物体形状のデジタルデータ (CAD データ) に対して、修正を加えることなく高速な計算格子の作成が可能であるよう工夫がなされている。これにより、膨大な対象に対して短期間で対応することが可能となる。

4. 研究成果

(1) マーカー粒子によるオイラー型統一解法とリファレンスマップ法

本研究においては、従来のオイラー型解法 が抱える移流方程式の計算に伴う固体界面と固体内部変数に関する数値拡散の問題を根本的に解決するため、固体領域を陽的に表現すると同時に、固体内部変数を保持・計算するためのマーカー粒子を導入した。マーカー粒子を用いた手法によって複数の問題に対する解析を行い、手法の妥当性・有効性の検証を行った。一方、固体のせん

断弾性係数を **100** 倍したうえで、マーカー粒子を用いた手法によって解析を行った場合、固体界面において非物理的な振動が発生することが確認された。この問題を解決するため、**Reference map** 法を新たに導入した。さらに本研究においては、**Reference map** と呼ばれる固体初期配置情報のメッシュ-マーカー粒子間の補間に関する新たな補間方法・補間関数を提案した。

(2) 統一オイラー解法における住宅を対象とした氾濫水・構造物 FSI 解析

洪水は、自然災害の中でも最も頻繁かつ多くの人々に影響を及ぼす災害であり、近年の気候変動により特に都市部での洪水リスクは深刻化している。都市部の洪水では、水が交差点・下水道・公園・建築物の周囲やその内部等を流動するため、田園地帯に比べてより複雑な流れを示す。既往の洪水解析では、**1**次元または**2**次元の洪水解析モデルが使用されることが一般的である。ただし、交差点・下水道・公園・建築物の周囲やその内部等の水の**3**次元流動および構造に作用する非定常流体力を評価するには、ナビエ・ストークス方程式に基づく**3**次元解析が必要であるが、膨大な計算コストを要する。そのため、詳細な構造物形状を再現した**3**次元洪水解析の研究例は極めて少ない。そこで本研究では、ビルディング・キューブ法に基づくセル中心有限体積法を用いた気液二相流解析法を提案し、洪水時の建物室内への浸水評価を試みた。建築物として、階段と地下空間を有する構造を仮定し、窓からの流入を想定する。なお、本研究では建築物を埋め込み境界法によりモデル化する。流体の物性は前節の問題と同一である。解析領域の上流面には流入境界条件、底面には滑り壁境界条件、その他の解析領域端面には対流境界条件を適用する。解析領域は直交メッシュにより階層的に分割し、最小セルサイズは **78.125mm**、総セル数は **14,876,672** である。数値計算では、**908** プロセス×**4** スレッドを用いた。解析結果を図1に示す。ダムブレイク流が建築物の周囲に流れ込み、構造と水流が衝突することで、複雑な水の流動が再現されていることがわかる。特に建築物の壁面に水流が衝突し跳ね上がり、窓から水が建物内に侵入する挙動が確認できる。また図2は圧力分布を示しており、非定常な水の流動によって、窓枠上部と下部にそれぞれ正圧と負圧が生じていることが確認できる。以上のような水の**3**次元流動および建物壁に生じる非定常な流体力は、**1**次元や**2**次元の洪水解析モデルでは評価が困難であり、**3**次元解析によってのみ評価することができるものである。

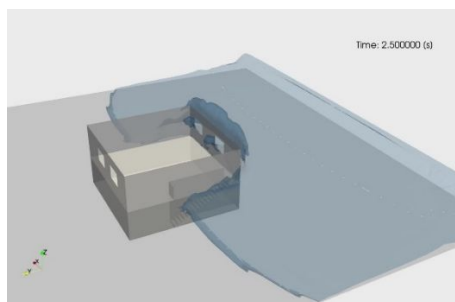


図1 数値解析結果（液相の自由表面）

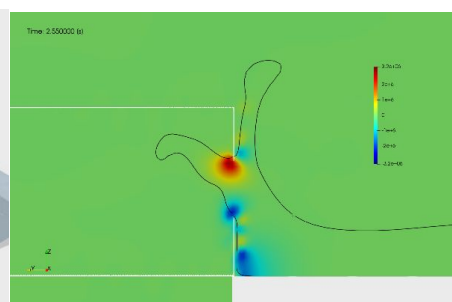


図2 圧力分布

(3) アダプティブ時間ステップスキームの開発

流体に対して圧縮性統一解法を用いた場合、 Δt の値によって計算の収束性と安定性が大きく変わる。計算資源を節約するため、音響クーラン数による制約に対して、実時間刻みはより大きくしなければならず、ここではアダプティブ時間ステップスキームを開発した

(4) 統一圧縮性解法による歯擦音発生メカニズムの解明

圧縮性統一流体解法とアダプティブ時間ステップスキームを用いた流体、構造、音の連成解析の応用として、歯擦空力音の発生メカニズムを解明した。歯擦空力音は、日本語では「さしすせそ」を発音した際に発生する音であり、舌と上あごの間に小さな隙間をつくり、そこに高速の息を流すことで空力音が発生する。感覚的には理解できる現象であるがそのメカニズムは繊細であり、口腔外科手術により発話に支障が発生するケースも見られる。解析では、日本語で「う、す、い」と発話した際の三次元 CT スキャンデータを用い、声帯からの音を省略して「う」から歯擦音「す」へと発話する際の口腔、鼻腔、喉頭の時間的形狀変化をシミュレーションで再現して、流れの変化と空力音の発生を観察した。図3に予測した空力音の実験値との比較を示す。/s/音の特徴は **2kHz** 近傍にみられる **SPL** の谷に現れることが知られており、シミュレーションは実験値の傾向を捕えていることがわかる。図4に/s/音の発話の際の音圧伝播の様子とその際の流れの様子を示す。舌と上あごの隙間から噴出したジェットが上前歯と下唇と干渉し、乱流渦が発生することで空力音が発生する様子が示されている。

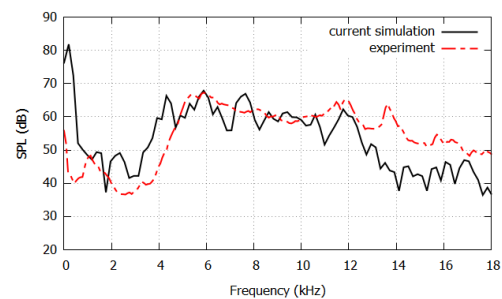


図3 実験データとの比較

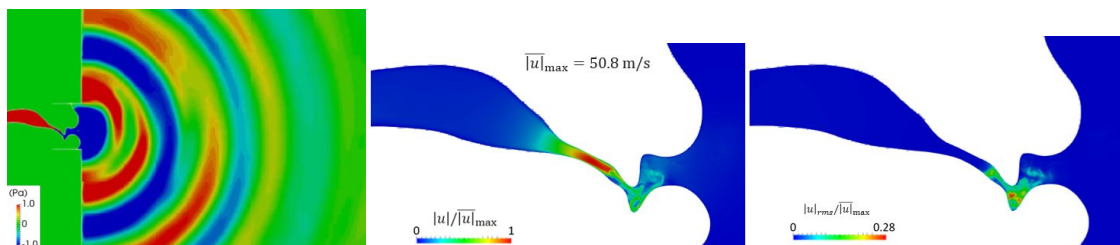


図4 歯擦空力音の可視化(上)と瞬時速度分布(左下)及び流れ場のRMS(右下)

(5) スーパーコンピュータ「富岳」への実装

以上、開発したシミュレーションフレームワークを「富岳」に実装し、チューニングと性能評価を行った。ノード単体性能については、開発した圧縮性統一流体アルゴリズムに対し、ベンチマーク問題としてキャピティ計算を行った。**1** コアメモリグループ (**CMG**) に対して **1MPI** プロセスを割り当て、**1** ノード **4CMG** (**4MPI** プロセス) での性能を計測した結果、最大 **3.59** 倍の加速性能を得た。この時、ピーク性能に対して **1CMG** で **7.09%**、**1** ノードで **6.38%** の性能を得た。並列性能に対しては、**1** 次元方向に領域を拡張した問題に対して、ウィークスケーリングを実施し、**1** ノードから **27,648** ノードまで解析を行った。この時、**1** ノードに対する **27,648** ノードのスケーリングは **91.07%** と良好な結果が得られた。これは単体性能、並列性能とも、この研究で提案している階層直交格子に基づくデータ構造とアルゴリズムの有効性を示すものである。尚、計算規模としては最大 **217** 億セル、**4.5PFLOPS** まで対応可能であることも確認できた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計13件（うち査読付論文 13件 / うち国際共著 2件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Deboprasad Talukdar, Chung-Gang Li, Makoto Tsubokura	4. 巻 142
2. 論文標題 Numerical investigation of transitional characteristics for natural-convection flow in open-ended inclined channel with hot surface facing upwards	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ASME Journal of Heat Transfer	6. 最初と最後の頁 112601
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1115/1.4047741	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Rahul Bale, Neelesh A Patankar, Niclas Jansson, Keiji Onishi, Makoto Tsubokura	4. 巻 200
2. 論文標題 Stencil Penalty approach based constraint immersed boundary method	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Computers & Fluids	6. 最初と最後の頁 104457
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.compfluid.2020.104457	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Touichirou Shiozawa, ChungGang Li, Takuji Nakashima, YUkinomu Hiranaka, Makoto Tsubokura	4. 巻 SAE Technical Paper
2. 論文標題 Unsteady Flow Analysis Method for Automotile LED Headlamp based on Massively Parallel CFD considering the External Environment	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 SAE World Congress Experience (WCX20)	6. 最初と最後の頁 2020-01-0636
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4271/2019-01-0660	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 西口浩司, 嶋田宗将, 大高雅史, 岡澤重信, 坪倉誠	4. 巻 75
2. 論文標題 ラグランジュマーカー粒子を用いたオイラー型有限体積法による圧縮性固体解析	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 土木学会論文集A2(応用力学)	6. 最初と最後の頁 237-248
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejam.75.2_1_237	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Koji Nishiguchi, Tokimasa Shimada, Masafumi Otaka, Shigenobu Okazawa, Makoto Tsubokura	4. 巻 1
2. 論文標題 Eulerian finite volume formulation using particle-in-cell method for large-scale parallel simulation of complex structures	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of 4th International Conference on Multi-scale Computational Methods for Solids and Fluids	6. 最初と最後の頁 223-226
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Talukdar D., Tsubokura M.	4. 巻 58
2. 論文標題 Numerical study of natural-convection from horizontal cylinder at eccentric positions with change in aspect ratio of a cooled square enclosure	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Heat and Mass Transfer	6. 最初と最後の頁 849 ~ 871
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00231-021-03145-3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Lu HsuehJui, Li ChungGang, Tsubokura Makoto	4. 巻 12
2. 論文標題 Adaptively switched time stepping scheme for direct aeroacoustic computations	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 035340 ~ 035340
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0076657	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 嶋田 宗将、西口 浩司、Peco Christian、岡澤 重信、坪倉 誠	4. 巻 2022
2. 論文標題 Reference map 法を用いたマーカー粒子によるオイラー型流体-構造連成解析	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本計算工学会論文集	6. 最初と最後の頁 20220002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11421/jsces.2022.20220002	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 和田 有司、嶋田 宗将、西口 浩司、岡澤 重信、坪倉 誠	4. 巻 2021
2. 論文標題 Building Cube Method を利用した車体フレームのボクセルトポロジー最適化	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本計算工学会論文集	6. 最初と最後の頁 20210019
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11421/jsces.2021.20210019	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Talukdar D.、Tsubokura M.	4. 巻 58
2. 論文標題 Numerical study of natural-convection from horizontal cylinder at eccentric positions with change in aspect ratio of a cooled square enclosure	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Heat and Mass Transfer	6. 最初と最後の頁 849 ~ 871
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00231-021-03145-3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Shimada Tokimasa、Nishiguchi Koji、Bale Rahul、Okazawa Shigenobu、Tsubokura Makoto	4. 巻 123
2. 論文標題 Eulerian finite volume formulation using Lagrangian marker particles for incompressible fluid?structure interaction problems	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal for Numerical Methods in Engineering	6. 最初と最後の頁 1294 ~ 1328
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/nme.6896	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Lu HsuehJui、Yoshinaga Tsukasa、Li ChungGang、Nozaki Kazunori、Iida Akiyoshi、Tsubokura Makoto	4. 巻 11
2. 論文標題 Numerical investigation of effects of incisor angle on production of sibilant /s/	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 16720
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-021-96173-2	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Bale Rahul, Bhalla Amneet Pal Singh, Griffith Boyce E., Tsubokura Makoto	4. 巻 440
2. 論文標題 A one-sided direct forcing immersed boundary method using moving least squares	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Computational Physics	6. 最初と最後の頁 110359 ~ 110359
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jcp.2021.110359	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計41件 (うち招待講演 5件 / うち国際学会 17件)

1. 発表者名 Makoto Tsubokura
2. 発表標題 Droplet/Aerosol Dispersion Simulation on the Supercomputer Fugaku for the Fight against COVID-19
3. 学会等名 IEEE In Tech: A Forum on Response and Resiliency for COVID-19 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 坪倉 誠 (特別講演)
2. 発表標題 「富岳」を用いた室内環境におけるウイルス飛沫感染の予測とその対策提案
3. 学会等名 日本学術会議公開シンポジウム「第10回計算力学シンポジウム」(招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Makoto Tsubokura (Plenary lecture)
2. 発表標題 Prediction and Countermeasure for Droplet/Aerosol Infection under the Indoor Environment for the Fight against COVID-19
3. 学会等名 The 3rd International Conference on Computational Engineering and Science for Safety and Environmental Problems (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 坪倉 誠 (特別講演)
2. 発表標題 富岳による新型コロナ飛沫・エアロゾル感染シミュレーション
3. 学会等名 第34回数値流体力学シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Keiji Onishi, Rahul Bale, Akiyoshi Iida, Masashi Yamakawa and Makoto Tsubokura
2. 発表標題 Fluid dynamic simulation of face mask for evaluating droplet infection of COVID-19
3. 学会等名 3rd International Conference on Computational Engineering and Science for Safety and Environmental Problems (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Bale Rahu, Desai Siddesh, Li Chung-Gang, Iida Akiyoshi, Yamakawa Masahashi, Kurose Ryoichi, Makoto Tsubokura
2. 発表標題 Numerical Simulation of Airborne cough droplets
3. 学会等名 3rd International Conference on Computational Engineering and Science for Safety and Environmental Problems (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 ChugGang Li, Makoto Tsubokura, Rahul Bale
2. 発表標題 A Numerical Framework to Estimate the Indoor Air Quality with the Consideration of Ventilation System, Air-Conditioner and Human Body Heat
3. 学会等名 3rd International Conference on Computational Engineering and Science for Safety and Environmental Problems (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tokimasa Shimada, Koji Nishiguchi, Shigenobu Okazawa, Makoto Tsubokura
2. 発表標題 Full Eulerian Formulation Using Lagrangian Marker Particles for Fluid-Structure Interaction Problem
3. 学会等名 3rd International Conference on Computational Engineering and Science for Safety and Environmental Problems (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Masafumi Otaka, Koji Nishiguchi, Tokimasa Shimada, Makoto Tsubokura, Hirofumi Sugiyama, Shigenobu Okazawa
2. 発表標題 Large Deformation Solid Dynamics Using Marker Particles Based on Eulerian Formulation
3. 学会等名 3rd International Conference on Computational Engineering and Science for Safety and Environmental Problems (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yuji Wada, Tokimasa Shimada, Koji Nishiguchi, Masafumi Otaka, Shigenobu Okazawa, Makoto Tsubokura
2. 発表標題 Topology Optimization under Structural Lagrangian Marker Particle Method Using Hierarchical Cartesian Mesh
3. 学会等名 3rd International Conference on Computational Engineering and Science for Safety and Environmental Problems (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Koji Nishiguchi, Tokimasa Shimada, Masafumi Otaka, Shigenobu Okazawa, Makoto Tsubokura
2. 発表標題 Eulerian Finite Volume Formulation Using Hierarchical Cartesian Mesh for Multi-Material Vehicle Structures
3. 学会等名 3rd International Conference on Computational Engineering and Science for Safety and Environmental Problems (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Bale Rahul, Desai Siddesh, Chung-Gang Li, Akiyoshi Iida, Yamakawa Masashi, Kurose Ryoichi, Makoto Tsubokura
2. 発表標題 空中の咳飛沫の蒸発と分散の数値シミュレーション
3. 学会等名 第34回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 安藤和人, 熊畑清, 南一生, 大西慶治, Chung-Gang Li, 坪倉誠, 池田隼
2. 発表標題 富岳におけるCUBE圧縮性ソルバーの性能評価とチューニング
3. 学会等名 第34回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 李崇綱, Bale Rahul, 弓野沙織, 近藤宏二, 坪倉誠
2. 発表標題 The numerical prediction of the indoor air quality with the consideration of ventilation system, air-conditioner and human body heat
3. 学会等名 第34回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大西慶治, 飯田明由, 狭間貴雅, 坪倉誠
2. 発表標題 階層型直交格子を用いた走行列車内の窓開け換気シミュレーション
3. 学会等名 第34回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 安藤和人, 大西慶治, Bale Rahul, 坪倉誠, 黒田明義, 南一生
2. 発表標題 富岳における3次元流れ場のモード分割のための分散学習
3. 学会等名 第34回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Makoto Tsubokura (Plenary talk)
2. 発表標題 Next-Generation Vehicle Aerodynamics Simulation Based on High-Performance Computing
3. 学会等名 2019 Academic Annual Conference of Automotive Aerodynamics Committee of SAE-China (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 坪倉誠 (基調ポスター講演)
2. 発表標題 コンピュータの高度利用による革新的な自動車空力開発技術
3. 学会等名 日本機械学会第97期流体工学部門講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazuto Ando, Rahul Bale, Keiji Onishi, Kiyoshi Kumahata, Kazuo Minami, Makoto Tsubokura (poster)
2. 発表標題 Optimizing Multigrid Poisson Solver of Cartesian CFD code CUBE
3. 学会等名 SC19: International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Rahul Bale, Amneet PS Bhalla, Keiji Onishi, Makoto Tsubokura
2. 発表標題 Moving Least Squares Method for Constraint Immersed Boundary Method
3. 学会等名 VIII International Conference on Coupled Problems in Science and Engineering (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Koji Nishiguchi, Tokimasa Shimada, Rahul Bale, Shigenobu Okazawa, Makoto Tsubokura
2. 発表標題 Particle-In-Cell Method using Hierarchical Cartesian Mesh for Deformable Solid-Fluid Interaction Problems
3. 学会等名 VIII International Conference on Coupled Problems in Science and Engineering (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Chung-Gang Li, Makoto Tsubokura, Keiji Onishi
2. 発表標題 An adaptive time scheme for aeroacoustic computations
3. 学会等名 ASME-JSME-KSME Joint fluids engineering conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Keiji Onishi, Makoto Tsubokura
2. 発表標題 Toward realization of real-time vehicle aerodynamics simulation
3. 学会等名 ASME-JSME-KSME Joint fluids engineering conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Jun Ikeda, Javier S. Rios, Naoshi Kuratani, Kenta Ogawa, Makoto Tsubokura
2. 発表標題 Numerical investigation of fluctuating aerodynamic lift acting on the road vehicle which affects drivability
3. 学会等名 ASME-JSME-KSME Joint fluids engineering conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Makoto Tsubokura, Koji Nishiguchi, Keiji Onishi, Shigenobu Okazawa
2. 発表標題 Unified Fluid/Structure Simulation for Industrial Applications Based on High-Performance Computing
3. 学会等名 5th German-Japanese Workshop on Computational Mechanics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 HsuehJui Lu, ChungGang Li, Akiyoshi Iida, Tsukasa Yoshinaga, Kazunori Nozaki, Makoto Tsubokura
2. 発表標題 A framework for simulation of sibilant fricatives using implicit compressible flow solver
3. 学会等名 72th Annual Meeting of the American Physical Society Division of Fluid Dynamics
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Koji Nishiguchi, Rahul Bale, Tokimasa Shimada, Masafumi Otaka, Shigenobu Okazawa and Makoto Tsubokura
2. 発表標題 Eulerian Finite Volume Formulation using Lagrangian Marker Particles for Deformable Solid-Fluid Interaction Problems
3. 学会等名 7th Asia-Pacific Congress on Computational Mechanics (APCOM) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 塩澤 藤一郎, 李 崇綱, 中島 卓司, 平中 行伸, 永縄 裕仁, 米山 正敏, 坪倉 誠
2. 発表標題 HPC環境を活用したLEDヘッドランプ内部の冷却FAN流れの解析 (第2報)
3. 学会等名 自動車技術会2019年春季大会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大西慶治, ヤンソン ニクラス, 坪倉誠
2. 発表標題 大規模自動車空力解析におけるIn-situ可視化
3. 学会等名 第24回計算工学講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 西口浩司, 嶋田宗将, 大高雅史, 岡澤重信, 坪倉誠
2. 発表標題 階層型直交メッシュを用いたParticle-in-cell法による構造解析
3. 学会等名 第24回計算工学講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 バレラフル, 安藤和人, 林勇樹, 大西慶治, 坪倉誠
2. 発表標題 Analysis of underwater undulatory swimming using self-propulsion simulations
3. 学会等名 第24回計算工学講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 西口浩司, Rahul Bale, 嶋田宗将, 大高雅史, 杉山裕文, 岡澤 重信, 坪倉誠
2. 発表標題 ラグランジュマーカー粒子を用いたオイラー型有限体積法による圧縮性固体解析
3. 学会等名 第22回応用力学シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 塩澤 藤一郎, 李 崇綱, 中島 卓司, 平中 行伸, 坪倉 誠
2. 発表標題 HPC環境を活用したLEDヘッドランプ内部の冷却FAN流れの解析 (第3報)
3. 学会等名 自動車技術会2019年秋季大会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 池田隼, 中野樹, 犬井太一, 福本浩章, 大山聖, 平岡武宜, 清水圭吾, 中島卓司, 坪倉誠
2. 発表標題 自動車空力特性に関する多目的形状最適化フレームワークの構築
3. 学会等名 自動車技術会2019年秋季大会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 池田隼, 中野樹, 福本浩章, 大山聖, 平岡武宜, 清水圭吾, 中島卓司, 坪倉誠 (ポスター)
2. 発表標題 空気抵抗および揚力の低減を目的としたセダン型簡易車両の多目的形状最適化
3. 学会等名 日本機械学会第97期流体工学部門講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 塩澤藤一郎, 李崇綱, 中島卓司, 平中行伸, 坪倉誠
2. 発表標題 階層型直交格子を用いた自動車ヘッドランプの大規模非定常流れ計算手法の構築
3. 学会等名 日本機械学会第97期流体工学部門講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大西 慶治, バレ ラフル, 坪倉 誠
2. 発表標題 WLTP認証に向けた自動車空力シミュレーション手法の研究開発
3. 学会等名 日本機械学会第97期流体工学部門講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 安藤裕啓, 李崇綱, 坪倉誠, 大西慶治
2. 発表標題 自動車の狭帯域騒音の予測
3. 学会等名 日本機械学会第97期流体工学部門講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 野本庸太郎, Rahul Bale, 大西慶治, 坪倉誠
2. 発表標題 階層直交格子を用いた自動車の空力 運動連成解析フレームワークの構築
3. 学会等名 第33回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 犬井太一, 池田準, 中野樹, 福本浩章, 大山聖, 平岡武宣, 清水圭吾, 中島卓司, 坪倉誠
2. 発表標題 自動車空力特性に関する多目的形状最適化フレームワークの構築
3. 学会等名 第33回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 嶋田宗将, 西口浩司, 岡澤重信, 坪倉誠
2. 発表標題 ラグランジュマーカー粒子を用いたオイラー型流体・構造統一解法
3. 学会等名 第33回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	岡澤 重信 (Okazawa Shigenobu) (10312620)	山梨大学・大学院総合研究部・教授 (13501)	
研究分担者	西口 浩司 (Nishiguchi Koji) (10784423)	名古屋大学・工学研究科・講師 (13901)	
研究分担者	L I C H U N G G A N G (Li ChungGang) (70650638)	神戸大学・システム情報学研究科・講師 (14501)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------