

2026年度共同利用研究報告書

2026年08月19日

所属・職名 愛知県立大学・情報科学部・教授
代田 健二

		整理番号	2026a017	
1.研究計画題目	擬似層流化状態を誘導する最適設計基盤の構築			
2.新規・継続	新規			
3.種別	一般研究			
4.種目	短期共同研究			
5.開催方法	対面開催			
6.研究代表者	氏名	代田 健二		
	所属 部局名	愛知県立大学・情報科学部	職名	教授
7.研究実施期間	2026年05月13日(水曜日)～2026年05月14日(木曜日)			
8.キーワード	逆問題、数値解析、形状最適化問題、トポロジー最適化問題、非定常 Navier-Stokes方程式			
9.参加者人数	8人			

10.本研究で得られた成果の概要

本研究は、自然河川における非線形流体現象を対象に、CFD解析と形状最適化を中核とした新たな流路設計理論の構築を目指すプロジェクトです。乱流下でも安定した流場を創出する「擬似層流」と、幾何形状により秩序を誘導する「拡張工法」の統合的なモデリングを目的としています。

Navier-Stokes方程式の非線形性に起因する乱流制御は、解空間が多峯性であり、高レイノルズ数下では渦発生に伴う応力集中で形状感度評価が困難になるため、難易度の高い最適化問題とされています。また、形状最適化を領域変形を伴う「移動境界問題」と捉えた場合、有限要素法では変形後のメッシュ歪みによって計算精度が低下する点が大きな課題でした。

これに対し本研究では、Snapshot PODの導入による局所解の削減や、一般積分を用いた高精度な形状感度評価手法を適用するとともに、Adaptive Mesh Refinement（AMR）ソルバーであるMmgを活用した動的メッシュ再構成手法を提案しています。領域変形のたびに高品質な等方的メッシュを生成することで、メッシュの歪みを防止し、計算精度と目的関数の低減効果を大幅に改善します。さらに、このアプローチを3次元および超大規模計算（自由度 10^7 以上）へ展開するため、FreeFem、CUDA、PETSc、ParMmgを連携させた高度な並列計算基盤の構築を進めています。従来の直接法ソルバー（MUMPS）から、省メモリな反復法（GMRES、代数的多重格子法 AMG、fieldsplit前処理）と領域分割法（DDM）を組み合わせたマルチノード計算へと拡張することで、3次元キャビティ流れ問題等における有効性を検証し、将来的な超大規模流路最適設計基盤の確立を目指しています。

報告書：開催日：2026/05/13～2026/05/14
「擬似層流化状態を誘導する最適設計基盤の構築 | 2026a017」

.....

開催方法：対面開催
開催場所：九州大学 伊都キャンパス W1-D-414
後援：JSIAM 連続体力学の数理研究部会
種別・種目：一般研究-短期共同研究
研究計画題目：擬似層流化状態を誘導する最適設計基盤の構築
目的と期待される成果：本研究は、自然河川における非線形流体現象を対象に、CFD 解析と形状最適化を中核とした新たな流路設計理論の構築を目指す。乱流下でも安定した流場を作る「擬似層流」と、幾何形状により秩序を誘発する「拡縮工法」に着目し、これらを統一的にモデリングする。

研究代表者：代田 健二（愛知県立大学・情報科学部・教授）

組織委員：

- 代田健二（愛知県立大学情報科学部・教授）
- 中澤嵩（金沢大学学術メディア創成センター・准教授）
- 高石武史（武蔵野大学工学部数理工学科・教授）
- 内海晋弥（北海道大学電子科学研究所附属社会創造数学研究センター・特任准教授）
- 亀谷幸憲（明治大学理工学部機械情報工学科・専任講師）
- 中川貴司（津山工業高等専門学校・特命教授）
- 松井一徳（東京海洋大学学術研究院流通情報工学部門・助教）

プログラム：

- 5 月 13 日（水）【公開】
- 10:00-10:30 亀谷 幸憲（明治大学 理工学部）
講演タイトル：複雑乱流場における随伴解析に基づく多自由度形状最適化
 - 11:00-11:30 中川 貴司（津山工業高等専門学校 総合理工学科）
講演タイトル：PETSc を用いた流体ソルバーの GPU 適用の可能性について：並列スケラビリティと実用例について
 - 13:30-14:00 松井 一徳（東京海洋大学 学術研究院 流通情報工学部門）
講演タイトル：非圧縮性粘性流れに対する流出境界条件：概観と考察
 - 14:30-15:00 内海 晋弥（佐賀大学 教育研究院 自然科学域 理工学系）
講演タイトル：定常キャビティ流れの分岐図の三角形形状依存性
 - 15:00-17:00 フリーディスカッション

- 5 月 14 日（木）【非公開】
- 9:00-12:00 研究計画題目に関するフリーディスカッション

.....

報告書：開催日：2026/05/13～2026/05/14

「擬似層流化状態を誘導する最適設計基盤の構築 | 2026a017」

【採択から会合まで準備段階で行ったこと】本研究は2025年10月から、代表（代田氏）と中澤氏、高石氏の3名でスタートさせ、特に中澤氏が**3次元流体場の最適設計**を、高石氏が**流体場の大規模並列計算**を担当することとなった。そして、採択、会合までに下記の準備を行った。

3次元流体場の最適設計：乱流場の最適制御を効率的に行うために、トポロジー最適化問題と形状最適化問題を多段階に実施することにした。その理由は、トポロジー最適化問題の方が形状最適化と比較して、より広い解空間で最適解を探索することが可能である一方、固相と液相を密度関数で表現しているため境界層の取り扱いが困難となる。そこで、トポロジー最適化問題を行った後に、境界に沿ったメッシュを生成し、形状最適化問題を解くことで境界層乱流の制御が期待されたからである。トポロジー最適化問題には亀谷氏に協力を仰ぎ、形状最適化問題は中澤が担当することとなった。

流体場の大規模並列計算：乱流境界層が生成されるような流体場の数値実験を想定して、高精細な解像度での大規模並列計算を実施することになった。有限の計算領域での乱流を含む流体場の数値計算においては、特に流出側の境界条件を慎重に選ぶ必要があるため、圧力場を含んだ境界条件の数学的な取り扱いについての研究を行っている松井氏の協力を仰いだ。また、種々のパラメータにおける流れの様相の分岐を正確に捉えるために、流体方程式の有限要素解析を行っている内海氏の協力を仰いだ。

また、本研究では有限要素法を中心とした、様々な数値計算手法が重要な役割を果たしていることから松本氏にアドバイザーといった立場で参加して頂くこととなった。一方で、GPUによる高速化を見据えて、中川氏にも協力を仰いだ。

【非公開プログラムの参加者や日程】非公開プログラムには、代表の代田氏をはじめ中澤氏、高石氏、松井氏、内海氏、中川氏の6名が参加した。

【非公開プログラムでどのような議論や検討がなされ、誰がどのように作業を分担して研究成果が得られたか】特に、**3次元流体場の最適設計**について議論を展開した。形状最適化問題については中澤氏が、PETScをはじめとする領域分割ソルバーについては高石氏が、大規模問題に対する数値計算ソルバーの選定については中川氏が担当した。研究の進捗を下記に記述する。

非圧縮性流体の支配方程式である Navier-Stokes 方程式が有する非線形性によって、乱流は時空間に大小様々なスケールの渦が発生する。そのため、多峯性の解空間において局所解及び大域解を探索する乱流制御は、最適化問題の中でも特に難しい研究課題の一つと言える。このような科学的な課題に対して Nakazawa⁽¹⁾ は、有限要素法ソルバー FreeFEM^(2,3) を用いて、2次元領域において、主成分分析と同様のアルゴリズムで定式化される Snapshot POD を形状最適化問題に導入し、導入前と比べて局所解が少ない解空間で最適化問題を解くことが可能であることを示した。一方で、レイノルズ数を大きくしていくと、渦発生に伴う応力集中によって、形状感度を高精度に評価することが困難となることが乱流制御のもう一つの困難さと言える。そこで、我々は、約 10^4 程度のレイノルズ数を対象として、破壊力学において用いられる J 積分を2階微分として記述できるように拡張した一般 J 積分⁽⁴⁻⁷⁾を用いた形状感度手法を提案しており^{(8)~(10)}、更に非ニュートン流体へ拡張している^(11,12)。

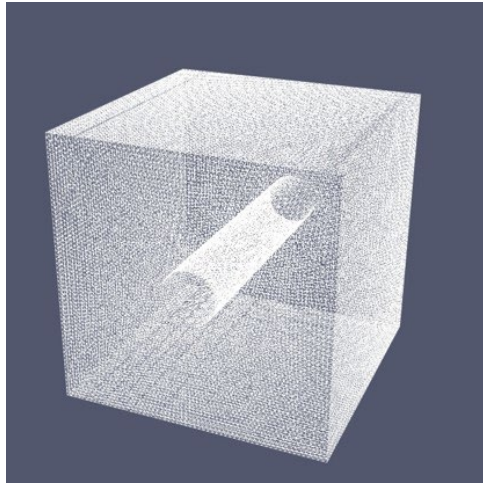
ところで、形状最適化問題は、Lagrange の未定乗数法と有限要素法をベースに目的汎関数を定義し、その物質微分を数学的に導出した後、主問題・随伴問題を解いて形状感度を数値評価し、 H^1 勾配法を用いて境界形状を変形させるという、一連のプロセスを目的汎関数が収束するまで逐次的に行う手法である。これまで多くの研究者によって、このような数学的・数値的な基盤が洗練されてきたが、この手続きをさらに一步引いた視点から眺めると、形状最適化問題は一種の「移動境界問題」として位置づけることができる。すなわち、一連の手続きは、領域変形を実行するための位置座標の形状感度としての変位ベクトルを求めているプロセスとして捉え直すことができる。

ここで有限要素法を用いることを前提とすると、領域の変形はメッシュの変形と同一視されるため、領域変形のたびに異なったメッシュ上で数値計算を行うこととなる。実際に数値計算を行うにあたり、初期メッシュについては、事前にメッシュの検証を行うことで計算精度を十分に担保することが可能である。しかし、領域変形後にメッシュや境界の形がどのようになるかを事前に把握することは不可能であるため、2 ステップ目以降の計算においては、計算精度が担保されたメッシュをあらかじめ用意できず、要素の歪みなどによる精度低下が課題となる。このような問題を解決するアプローチとして、Adaptive Mesh Refinement (AMR) の活用は極めて有効であると考えられる。領域変形に伴う形状の変化や誤差の進展に応じてメッシュを動的に再構成することで、形状更新のたびに一定の計算精度を維持し続けることが期待できるためである。

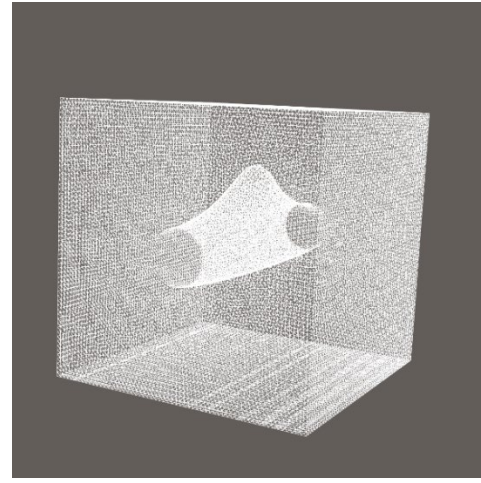
上記の問題意識のもとで、Nakazawa and Nakajima⁽¹³⁾ は 2 次元領域を対象に、代表的な AMR ソルバーである Mesh Modification Grid (Mmg)^(14,15) を活用することで、形状変形のたびに高品質なメッシュを再構成する手法を提案した。これにより、メッシュ細分化を行わない場合よりも目的汎関数をさらに低減できることが数値的に実証されている。このアプローチを 3 次元問題へと展開する際、大規模な偏微分方程式の並列計算と AMR をいかに密にカップリングさせるかが極めて重要な課題となる。特に、小規模（自由度が 10^3 程度）から中規模（自由度が 10^5 程度）の計算量の場合は、代表的な直接法ソルバーである MUMPS (MULTifrontal Massively Parallel sparse Direct Solver)⁽¹⁶⁾ を用いて、シングルノードで行列を数値的に解くことが有効である。しかし、大規模（自由度が 10^6 以上）な計算を対象とする場合には、メモリ消費と計算量の跳ね上がりがボトルネックとなるため、必然的に大規模計算機システムにおけるマルチノード計算を前提とした Domain Decomposition Method (DDM) を採用し、小メモリの反復法ソルバーを採用する必要性に迫られる。具体的には、FreeFEM⁽¹⁷⁾ と CUDA^(18,19) および Portable, Extensible Toolkit for Scientific Computation (PETSc)⁽²⁰⁾ を連携させた並列計算基盤を導入し、PETSc 環境下で Mmg を実行可能な ParMmg^(21,22) を用いた高並列環境への拡張を進めることが想定される。その際、MUMPS のような直接法ソルバーは小・中規模問題で極めて有効であるものの、メモリ消費量が莫大であり大規模計算には不向きであるという点を鑑みて、省メモリで実行可能な GMRES⁽²³⁾ と代数的多重格子法 (AMG)⁽²⁴⁾ の組み合わせや、速度と圧力を分離して解く fieldsplit 前処理⁽²⁵⁾ など、近年有効性が示されている多様な反復解法ソルバーの導入を図る。これらの高度な反復解法ソルバーと PETSc による ParMmg を密にカップリングさせることで、自由度 10^7 を超える超大規模問題に対する実用的な 3 次元形状最適化手法の確立を目指す。

以上を踏まえ、将来的な PETSc および ParMmg を活用した大規模形状最適化手法の確立を見据え、Nakazawa and Nakajima⁽¹³⁾ による 2 次元の概念を 3 次元領域へと拡張し、シングルノード環境下において、MUMPS および Mmg を活用した 3 次元形状最適化フレームワークを構築し、その有効性を検証した⁽²⁶⁾。具体的には、提案手法を 3 次元キャビティ流れ問題へ適用し、得られた数値解析結果に基づき、本フレームワークの数値的效果および有効性について包括的な議論を行った。Fig.1 は初期形状と AMR を実装した際の最適形状における FEM メッシュを図示している。Fig.2 は AMR の有無による最適形状メッシュの鉛直断

面を比較しているが、AMRを実装していない Fig.2(b)は FEM メッシュが歪んでおり計算が途中で終了した一方、AMRを実装した Fig.2(a)は領域変形の度に等方的なメッシュ生成がされており、メッシュの歪みが発生していないことがわかる。

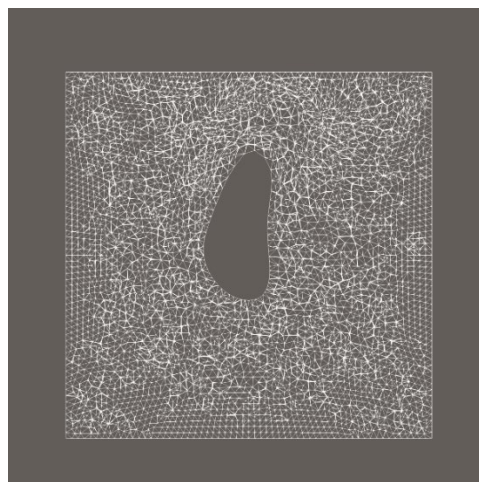


(a)初期形状における FEM メッシュ

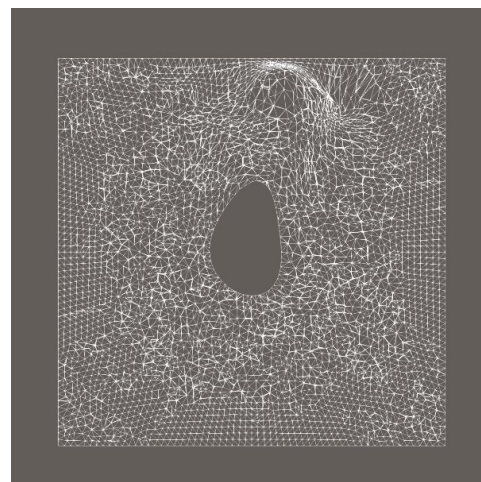


(b)最適形状における FEM メッシュ

Fig. 1 初期形状と最適形状における FEM メッシュ.



(a) AMR あり



(b) AMR なし

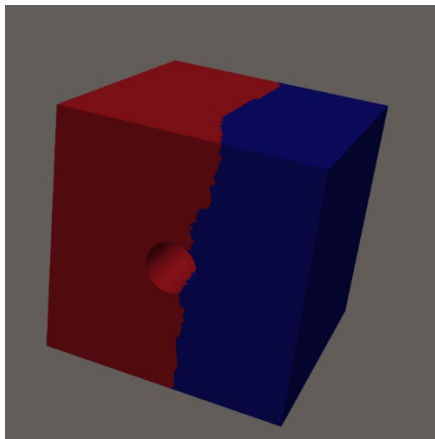
Fig.2. AMR の有無による最適形状メッシュの鉛直断面.

現在は,PETSc 連携環境下において Mmg を活用した 3 次元形状最適化フレームワークを構築し,その有効性を検証している. Fig. 3 に, 2 領域に分割した初期形状と FEM メッシュを図示している. なお,本報における数値解法ソルバーには,先行研究からの変更点は PETSc を導入するという点に限定するため,引き続き MUMPS を採用する. Fig. 4 に PETSC 実装における最適形状メッシュの鉛直断面を図示する. Fig. 2(a)とやや異なるものの, PETSc の導入に伴う様々な変更が影響していると考えられる. 将来的には本基盤を PETSc および ParMmg と統合したマルチノード並列計算環境へと発展させ,自由度 10^6 を超える超大規模問題における本アプローチの実用性を実証することを目指す.

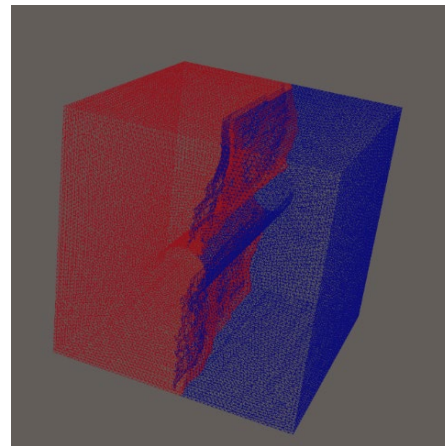
本研究基盤が完了した後は, 高石氏が中心となって松井氏, 内海氏らと開発中の 3 次元 Navier-Stokes 方程式の数値計算ソルバーを本手法に組み込むことで,「拡縮工法」の数理基盤を確立することとなると考えている.

報告書：開催日：2026/05/13～2026/05/14

「擬似層流化状態を誘導する最適設計基盤の構築 | 2026a017」



(a)初期形状



(b) FEM メッシュ

Fig. 3 2 領域に分割した初期形状と FEM メッシュ.

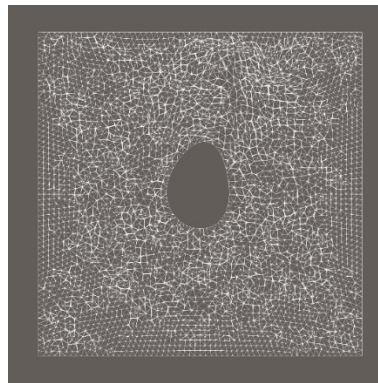


Fig. 4 PETSc 実装時の最適形状メッシュにおける鉛直断面.

参考文献：

- (1) T. Nakazawa: Shape Optimization of Flow Fields Considering Proper Orthogonal Decomposition, Mathematical Analysis of Continuum Mechanics and Industrial Applications III (Proceedings of CoMFoS18), Springer, (2020), pp. 125–145.
- (2) F. Hecht: New development in FreeFem++, Journal of Numerical Mathematics, **20**(2012), No. 3-4, pp. 251–265.
- (3) F. Hecht, O. Pironneau, A. Le Hyaric, and K. Ohtsuka: FreeFem++ Manual, Laboratoire Jacques-Louis Lions, Sorbonne Université, 2012.
- (4) H. Azegami, M. Shimoda, E. Katamine, and Z. Wu: A solution to domain optimization problems using generalized J-integral, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Series A, **63**(1997), No. 611, pp. 1473–1480.
- (5) K. Ohtsuka: Shape derivative of cost function for singular point: Evaluation by the generalized J integral, JSIAM Letters, **6**(2014), pp. 29–32.

- (6) K. Ohtsuka: Shape Optimization by Generalized J-Integral in Poisson's Equation with a Mixed Boundary Condition, *Mathematical Analysis of Continuum Mechanics and Industrial Applications II*, Springer, (2018), pp. 73–83.
- (7) V. A. Kovtunencko and K. Ohtsuka: Shape differentiability of Lagrangians and application to Stokes problem, *SIAM Journal on Control and Optimization*, **56**(2018), No. 5, pp. 3668–3692.
- (8) T. Nakazawa: Shape optimization problem based on the generalized J integral considering RANS and Snapshot POD, *Journal of Fluid Science and Technology*, **14**(2019), 14_2019jfst0015.
- (9) T. Nakazawa, T. Misaka, and C. Poignard: Shape optimization for suppressing coherent structure of two-dimensional open cavity flow, *Journal of Fluid Science and Technology*, **16**(2021), 16_2021jfst0002.
- (10) T. Nakazawa, T. Misaka, and Y. Hasegawa: Optimal design for suppressing time fluctuation part of two-dimensional jet in crossflow, *International Journal of Computational Fluid Dynamics*, **36**(2022), pp. 112–124.
- (11) T. Nakazawa: Shape optimization problem for transient Non-Newtonian fluid in hybridized discontinuous Galerkin method, *Journal of Fluid Science and Technology*, **16**(2021), 16_2021jfst0019.
- (12) T. Nakazawa: Generalized Flow Field Shape Optimization with Snapshot Pod, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. A2 (Applied Mechanics (AM))*, **75**(2019), No. 2, pp. I_135–I_143.
- (13) T. Nakazawa and C. Nakajima: Optimal Design by Adaptive Mesh Refinement on Shape Optimization of Flow Fields Considering Proper Orthogonal Decomposition, *Interdisciplinary Information Sciences*, **25**(2019), pp. 111–117.
- (14) C. Dapogny, C. Dobrzynski, and P. Frey: Three-dimensional adaptive domain remeshing, implicit domain meshing, and applications to free and moving boundary problems, *Journal of Computational Physics*, **262**(2014), pp. 358–378.
- (15) C. Dobrzynski and P. Frey: Anisotropic Delaunay mesh adaptation for unsteady simulations, *Proceedings of the 17th International Meshing Roundtable*, (2008), pp. 177–194.
- (16) P. R. Amestoy, I. S. Duff, J.-Y. L'Excellent, and J. Koster: A fully asynchronous multifrontal solver using distributed dynamic scheduling, *SIAM Journal on Matrix Analysis and Applications*, **23**(2001), No. 1, pp. 15–41.
- (17) P. Pellegrini, V. Dolean, P. Jolivet, and F. Nataf: Parallel numerical simulations with FreeFem++, *Journal of Computational Physics*, **383**(2019), pp. 193–209.
- (18) J. Nickolls, I. Buck, M. Garland, and K. Skadron: Scalable parallel programming with CUDA, *ACM Queue*, **6**(2008), No. 2, pp. 40–53.
- (19) NVIDIA Corporation: CUDA C++ Programming Guide, Version 12.2, (2023).
- (20) S. Balay, S. Abhyankar, M. F. Adams, J. Brown, P. Brune, K. Buschelman, L. Dalcin, A. Dener, V. Eijkhout, W. D. Gropp, D. Karpeyev, D. Kaushik, M. G. Knepley, D. A. May, L. C. McInnes, R. T. Mills, T. Munson, K. Rupp, P. Sanan, B. F. Smith, S. Zampini, H. Zhang, and H. Zhang: PETSc Users Manual, Technical Report ANL-95/11 - Revision 3.15, Argonne National Laboratory, 2021.

報告書：開催日：2026/05/13～2026/05/14

「擬似層流化状態を誘導する最適設計基盤の構築 | 2026a017」

- (21)G. Balarac, F. Basile, P. Bénard, F. Bordeu, J.-B. Chapelier, L. Cirrottola, G. Caumon, C. Dapogny, P. Frey, A. Froehly, et al.: Tetrahedral remeshing in the context of large-scale numerical simulation and high performance computing, *Journal of Computational Physics*, **428**(2021), 109986.
- (22)L. Cirrottola, A. Froehly, G. Balarac, C. Dapogny, and P. Frey: ParMmg: A parallel software for 3D volume and surface mesh adaptation, *Journal of Computational Physics*, **438**(2021), 110363.
- (23)Y. Saad and M. H. Schultz: GMRES: A generalized minimal residual algorithm for solving nonsymmetric linear systems, *SIAM Journal on Scientific and Statistical Computing*, **7**(1986), No. 3, pp. 856–869.
- (24)K. Stüben: A review of algebraic multigrid, *Journal of Computational and Applied Mathematics*, **128**(2001), No. 1-2, pp. 281–309.
- (25)J. Brown, M. G. Knepley, and B. F. Smith: Composable linear solvers for multiphysics, *Software: Practice and Experience*, **42**(2012), No. 11, pp. 1351–1368.
- (26)T. NAKAZAWA, 3D Shape Optimization Problem using AMR, *Transaction of JASCOME*, submitted.
- (27)T. NAKAZAWA, 3D Shape Optimization Problem using AMR, *Transaction of JSCES*, preparing.

【成果はどのような形で公表予定か（既に公表済みの成果は書誌データも記載）】下記の国内学会年会や国際会議で代田氏，高石氏，松井氏，中川氏，中澤氏が当該短期共同研究で得られた成果について発表を行う。

- 計算工学講演会「最適設計と積層構造」
- ANSS「航空流体データ科学の新展開」
- JSIAM 年会「正会員主催 OS：FreeFEM の開発と利用」
- JSIAM 年会「数理設計研究部会セッション」
- ICFD Sendai「Vortex Motion」
- JASCOME シンポジウム
- JSIAM 連合研究部会「数理設計研究部会セッション」
- CFC2027「MS038 – Related topics on Shape Optimization for river improvement」

開催日: 2026/05/13~2026/05/14

◆ 擬似層流化状態を誘導する最適設計基盤の構築 | 2026a017

カテゴリ: イベント

タグ:

一般研究

短期共同研究

開催概要

- 開催方法: 対面開催
- 開催場所: 九州大学 伊都キャンパス ウェスト1号館 D棟 4階 IMIカンファレンスルーム (W1-D-414)
- 主要言語: 日本語
- 主催: 九州大学マス・フォア・インダストリ研究所
- 後援: JSIAM連続体力学の数理研究会
- 種別・種目: 一般研究-短期共同研究
- 研究計画題目: 擬似層流化状態を誘導する最適設計基盤の構築
- 研究代表者: 代田 健二 (愛知県立大学・情報科学部・教授)
- 研究実施期間: 2026年5月13日(水)~2026年5月14日(木)
- 公開期間: 2026年5月13日(水)
- 研究計画詳細: https://joint2.imi.kyushu-u.ac.jp/research_chooses/view/2026a017

プログラム

5月13日(水)【公開】

● 10:00-10:30

講演者: 亀谷 幸憲 (明治大学 理工学部)

講演タイトル: 複雑乱流場における随伴解析に基づく多自由度形状最適化

● 11:00-11:30

講演者: 中川 貴司 (津山工業高等専門学校 総合理工学科)

講演タイトル: PETScを用いた流体ソルバーのGPU適用の可能性について: 並列スケーラビリティと実用例について

● 13:30-14:00

講演者: 松井 一徳 (東京海洋大学 学術研究院 流通情報工学部門)

講演タイトル: 非圧縮性粘性流れに対する流出境界条件: 概観と考察

● 14:30-15:00

講演者: 内海 晋弥 (佐賀大学 教育研究院 自然科学域 理工学系)

講演タイトル: 定常キャビティ流れの分岐図の三角形形状依存性

● 15:00-17:00

フリーディスカッション

5月14日(木)【非公開】

● 9:00-12:00

研究計画題目に関するフリーディスカッション