

課題番号 IS-02

スパコンとインタークラウドの連携による 大規模分散設計探索フレームワークの構築

棟朝 雅晴（北海道大学）

概要 本研究では、全国規模でスパコンとクラウドシステムを連携させた、最適設計のフレームワーク、システムを構築することを目的としている。各大学の情報基盤センターに設置されているスパコンを活用して、シミュレーションを分散して実行するとともに、クラウドシステムにおいて設計パラメータの最適化や可視化処理を分担することで、大規模な設計問題を解決するためのフレームワークを構築した。分散データベース技術の採用により、スケーラビリティを確保するだけでなく、全国規模のクラウドシステムを連携させたインタークラウドシステム上での、最適解の候補となる設計パラメータの蓄積、管理、共有を促すことを目的としたシステム設計を行った。さらに、対象とするシミュレーションについて、有翼式宇宙往還機最適設計に関する検討を行うとともに、最適化アルゴリズムとして、進化型多目的最適化アルゴリズムの開発および検証を実施した。

1. 共同研究に関する情報

(1) 共同研究を実施した拠点名

北海道大学，東北大学，大阪大学，九州大学

(2) 共同研究分野

□ 超大規模情報システム関連研究分野

(3) 参加研究者の役割分担

棟朝 雅晴（北海道大学）：研究統括及びシステムの全体設計

千葉 一永（北海道科学大学）：流体シミュレーション及び多目的最適化アルゴリズムに関する検討

大林 茂，竹島 由里子（東北大学）：可視化に関する検討

伊藤 貴之，桑名 杏奈（お茶の水女子大学）：可視化に関する検討

金崎 雅博，Atthaphon Ariyarit，大司 早織（首都大学東京）：流体シミュレーションに関する検討

渡邊 真也，長舟 和馬，佐藤 哲也，中平 顕士，奥寺 将至（室蘭工業大学）：多目的最適化アルゴリズムに関する検討

三浦 克宜（北見工業大学）：クラウドコンピューティング及び分散データベースに関する検討

阿部 友哉（北海道大学）：クラウドコンピューティング及び分散データベースに関する検討

2. 研究の目的と意義

本研究では、大規模かつ複雑な最適設計問題へのアプローチとして、スパコンとインタークラウドを連携させた全国規模のシステムを構築することで、多数の研究者や技術者が協力して設計作業をすすめることができるフレームワークの実現を目指す。各大学の情報基盤センターに設置されているスパコンを活用して、シミュレーションを分散して実行するとともに、クラウドシステムにおいて設計パラメータの最適化や可視化処理を分担することで、大規模な設計問題を解決するための広域分散システム基盤を構築する。

最適解の候補となる情報をクラウドシステム上に分散配置された NoSQL 型の分散データベースに蓄積することでデータ連携を行い、スパコンでのシミュレーション、クラウドシステムでの最適化

や可視化処理の連携を実現する。分散データベース技術の採用により、スケーラビリティを確保するだけでなく、全国規模のクラウドシステムを連携させたインタークラウドシステム上での、最適解の候補となる設計パラメータの蓄積、管理、共有を促すことを目的とした連携システム基盤を実現するものである。

提案するシステムの概要を以下の図 1 に示す。

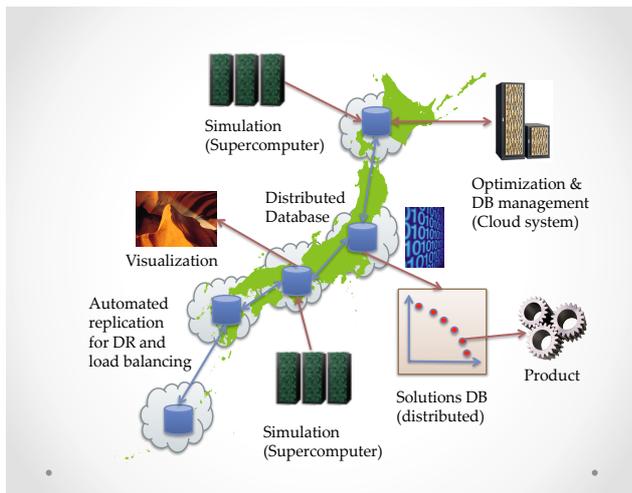


図 1 実現するシステムの概要

本フレームワークでは、多目的設計探索と呼ばれる多目的最適化アルゴリズムを中心とする設計フレームワークを前提に、流体科学の研究者との共同研究により、航空機やスペースプレーンなど現実の大規模設計最適化問題への適用を想定したシステム構築を行う。

新たな最適解の候補の探索にあたっては、多目的進化計算アルゴリズムをクラウドシステム上で実行し、候補となるパラメータ列の情報を分散データベースに反映する。その情報に基づいて、シミュレーションによる評価をそれぞれの拠点にあるスパコンで分散実行して評価する。

多目的最適化問題のパレート最適解集合に関する情報や、それぞれの解に関連する設計情報をクラウドシステム上の可視化処理プログラムにより変換し、設計者に示すことで、パレート最適解集合の有する情報を、それらの間でのトレードオフを考慮しつつ活用する効率的な設計作業を支援するものである。

システムの実現にあたって重要なのは、数多くの設計パラメータからなる最適候補解を共有しつつ、シミュレーションプログラムや多目的最適化エンジンと密に連携することである。1 台の PC やワークステーション上での設計支援ソフトウェアについては、商用のソフトウェアやライブラリ等を用いてある程度の設計作業を行うことができるが、スパコン上のシミュレーションや全国規模のインタークラウドシステムを活用した、大規模な最適設計インフラを実現することを通して、設計プロセス、開発プロセスのスピードアップをはかることができる。

さらに対象問題のモデル化から最適化、可視化による問題の理解へ至る設計開発サイクル全体をシステム化することで、日本における産業界の競争力の強化に貢献することが期待される。本研究においては、スペースプレーンの設計など現実に必要なとされる多目的最適化問題を対象として、東北大学流体科学研究所や関連する流体科学のシミュレーションや多目的設計探索を行っている研究者と協力して行うところに、その特徴的な意義が存在する。

3. 当拠点公募型共同研究として実施した意義

全国規模のインタークラウドシステムとスパコンとの連携を実現する必要性があるため、全国規模のネットワーク型拠点である JHPCN への応募が必須条件である。

特に、北海道大学で導入予定のデータサイエンスクラウドシステム等、最先端のクラウドインフラを活用しつつ研究を実施する必要性が有るため、本公募型共同研究課題として実施した。

4. 前年度までに得られた研究成果の概要

今年度開始の課題のため該当しない

5. 今年度の研究成果の詳細

5.1 システムアーキテクチャに関する検討

はじめに、システムの基本設計として、以下の方針に基づいて、設計を行った。

1) 分散データベース技術を活用することで、多数の問題に関する大量の設計パラメータに関する情報を蓄積、共有、活用する基盤システムを構築し、多数の研究者が協調して設計を行うとともに、最適化エンジンとの密な連携により最適解の探索を統一的な枠組みで実現するプラットフォームを実現する。その実現にあたっては、NoSQL 型の分散データベースとして Apache Cassandra を用いることで、スケーラビリティを確保する。

2) 各コンポーネントを汎用的な Web サービス API で連携させることで、データの送受信や制御コマンドの投入などにおいて、統一的なインターフェイスでの連携を可能とする。これにより、システムの拡張性や他のクラウドサービスとの連携が容易となる。

3) スパコンとの連携については、それぞれのスパコンへのアクセスが SSH に限定され、そのままでは Web サービス API による制御が困難である。さらに、スパコンでの解の評価にあたっては、長時間の計算シミュレーションを実行し、バッチジョブ処理に伴う待ち時間も考慮する必要があるため、非同期処理による制御方式の検討が必要となる。

提案するソフトウェアシステムのアーキテクチャを図 2 に示す。各コンポーネントの役割は以下の通りである。

・解情報データベース (DB+webAPI)

パラメータサーベイや、設計最適化問題を解く上で生成される設計パラメータとそれに対応する目的関数の評価値 (適応度)、その評価を行うための優先度等のに関する情報を管理する。格納したデータについては、シミュレータ、最適化エンジン、可視化装置からのリクエストで読み込み、書き込みが行われるが、それらのリクエストについ

ては、Web サービス API によるインターフェイスで制御される。

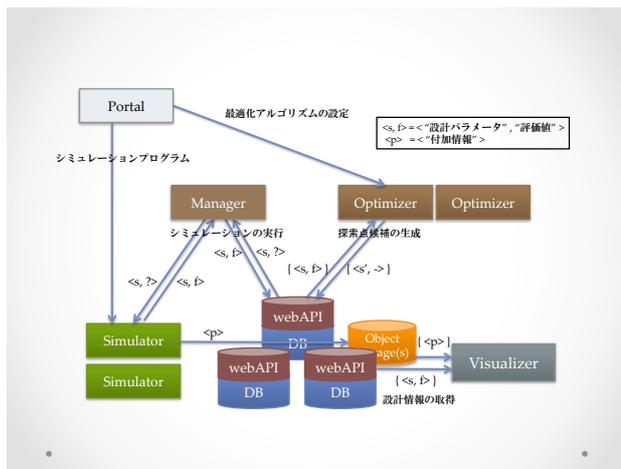


図 2 システムのアーキテクチャ

・シミュレータ (Simulator)

設計パラメータを入力とした、シミュレーションプログラムを実行し、解の評価値とそれに付随して生成される付随情報を出力する。スパコンを用いる場合は、SSH によりジョブを投入し、その結果については、ジョブの終了を定期的に観測し、終了後に得られたデータについてはファイル等に出力されたものを SCP 等により取得する。

・最適化エンジン (Optimizer)

解情報データベースから過去にシミュレーションを行った探索点に関する情報を取得し、それを元に最適化アルゴリズムによって新たな探索点を生成する。

生成した探索点については、評価値に関する情報が未定義の状態としてデータベースに登録する。また新たな探索点の生成に際して、その探索点が解空間においてどれだけ有望な探索領域を示すかの目安となる値を算出し、「優先度」として制御システムが計算シミュレーションを行う順番を決定するための基準として用いる。

・オブジェクトストレージ (Object Storage)

シミュレーションの結果として出力された付随情報をファイルオブジェクトとして蓄える。オブジェクトストレージを採用することでスケーラビ

リティを確保し、ファイルの数が増加した場合でも、ノードを追加することで容易に拡張できる。

・可視化装置 (Visualizer)

シミュレーションの結果生成された設計パラメータに関する情報、およびそれに付随して出力された情報を可視化する。可視化にあたっては、解情報データベース及びオブジェクトストレージへのアクセスによりデータを取得する。

・利用者ポータル (Portal)

システム全体の利用者のユーザインターフェイスを提供し、シミュレーションプログラム、最適化プログラムの選択、投入を行うとともに、設計パラメータや付随情報等、必要な情報を可視化システムとの連携により利用者に提示する。

・制御システム (Controller)

システム全体の制御を行う。基本的にはすべて Web サービス API による制御であるが、スパコンなど Web サービス API に対応していない計算機については、制御システム側でその代行制御を行う。

システムの制御にあたっては、図 3 に示すように、分散データベース上に必要な情報を統一的に管理することで非同期処理を制御し、必要な情報はすべてデータベースとのアクセスにより連携することで、データおよび制御の一貫性を確保する。

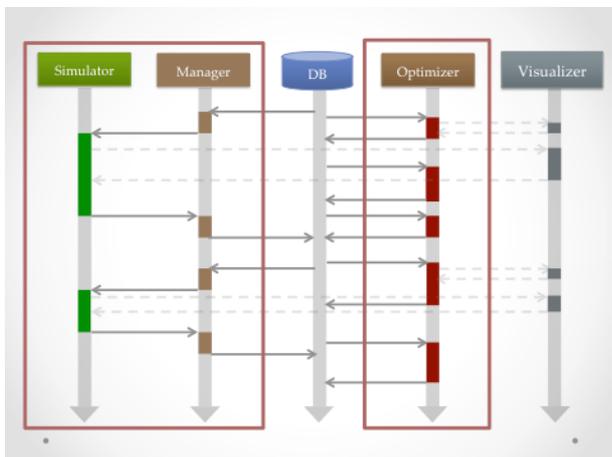


図 3 分散データベースを中心とした制御

コンポーネント間の連携については、すべて REST (Representational State Transfer) 形式による Web サービス API によるアクセスで行う。開発した Web サービス API の例として、以下があげられる。

getIndividual : 過去の探索点を取得

入力 : 探索点の設計パラメータ, 取得する探索点の個数, 取得方法 (探索点の選択方法)

出力 : 評価値が計算済みの設計パラメータの情報

用途 : 最適化エンジンが SSGA など元となる個体を取得

postIndividual : 新たな探索点候補の保存

入力 : 探索点の設計パラメータ, 優先度情報

出力 : 解情報データベースへの登録処理の実行ステータス

用途 : 最適化エンジンが生成した新たな探索点候補の保存

getTopPriority : 優先度の高い探索点を取得

入力 : N/A

出力 : 計算優先度が最も高く, 評価値が未計算の設計パラメータの情報

用途 : 制御システムがシミュレーションを行う探索点を取得

postFitnessValue : シミュレーションの結果を保存

入力 : 探索点の設計パラメータ, 評価値の計算結果

出力 : 解情報データベースへの登録処理の実行ステータス

用途 : 制御システムがシミュレーションの結果を保存

5.2 有翼式宇宙往還機最適設計シミュレーションに関する検討

対象とするシミュレーションの事例として、有翼式宇宙往還機の空力設計について検討した。設計対象は図 4 に示す形状とした。この形状はリフティングボディであり、胴体でも揚力を持ちつつ、後部の Vtail 翼により安定を取る。本年度の研究

においては、リフティングボディ機の着陸性能に着目し、マッハ数 0.3 において、①胴体ノーズ形状の再定義（図 5（上））、②胴体キャンバーの再定義（図 5（下））による、揚力改善の効果や安定性への影響を調査した。

空力計算には非構造格子に基づいて Euler 方程式を解いた。本研究では、Tohoku University Aerodynamics Simulation (TAS) コードを用いた。

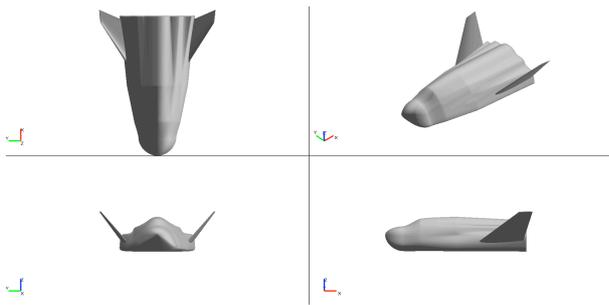


図 4 本研究で対象とした有翼式宇宙往還機

ノーズ再定義による揚力とピッチングモーメントの計算結果を図 6 に示す。この結果より、ノーズ形状は揚力への影響は小さい一方で、安定性能に大きく寄与することが分かった。図 7 にノーズ再定義に対する表面のマッハ数分布を示す。この図より、ノーズ近傍以外ではあまり分布の違いが見られず、ノーズ付近で流れの様相が異なるこ

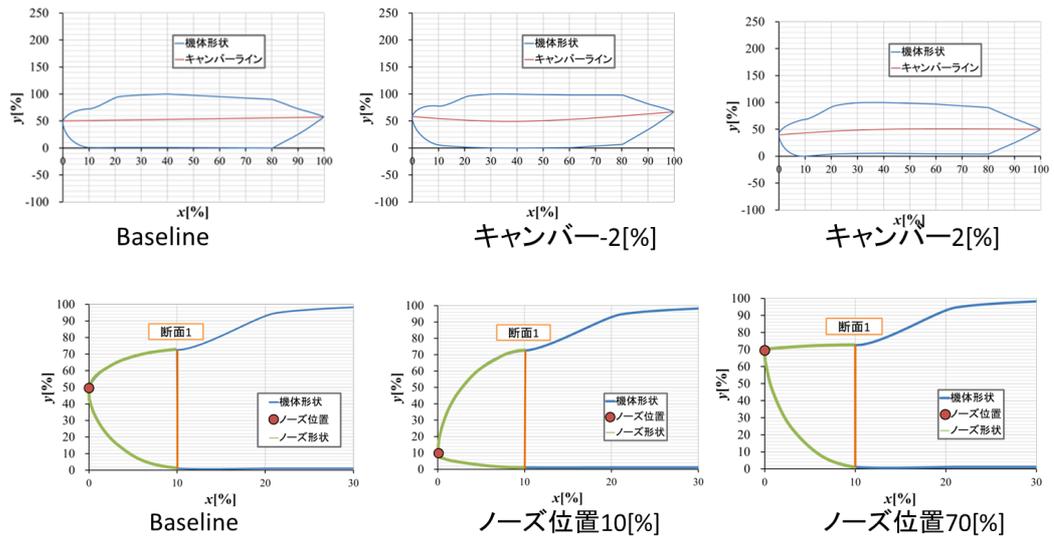


図 5 形状の再定義。(上)ノーズ形状の再定義,(下)胴体キャンバーの再定義。

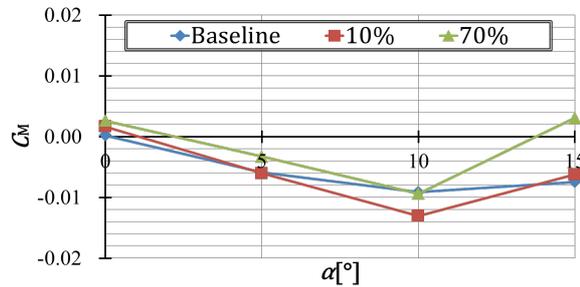
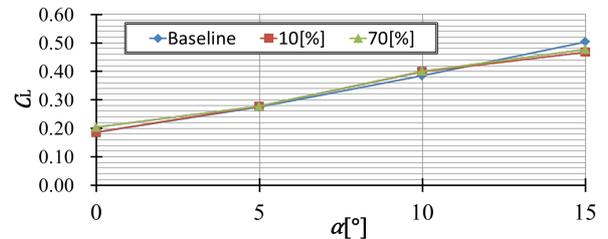


図 6 ノーズ再定義による揚力とピッチングモーメントの計算結果。(上)揚力係数,(下)ピッチングモーメント係数。

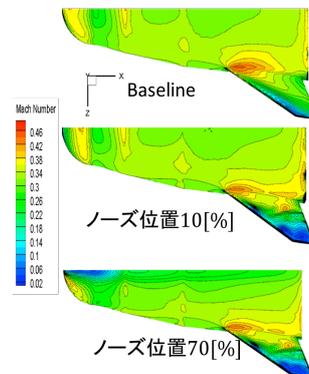


図 7 ノーズ再定義に対する表面のマッハ数分布。

とで、ピッチングモーメントの変化を示すものと考えられる。

胴体キャンバー再定義による揚力とピッチングモーメントの計算結果を図 8 に示す。この結果より、胴体キャンバーは揚力と安定性性能ともに影響が大きいことが分かった。図 9 に胴体キャンバー再定義に対する表面の圧力数分布を示す。この図より、胴体キャンバーの違いにより、Vtail 翼の圧力分布も異なることが分かり、これによって揚力と安定性性能の違いが生まれるものと考えられる。

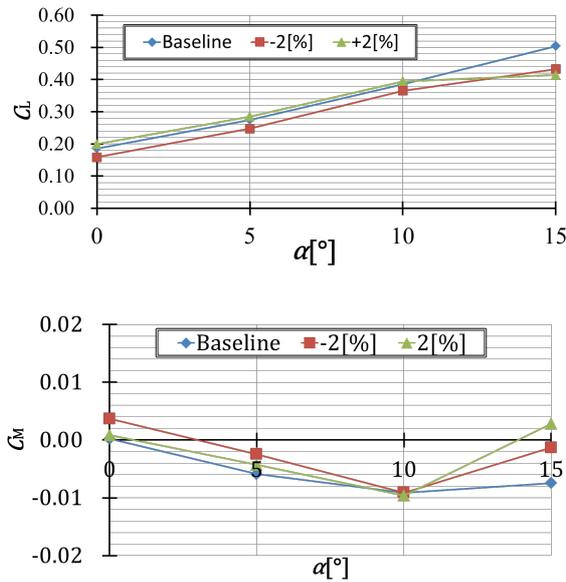


図 8 胴体キャンバー再定義による揚力とピッチングモーメントの計算結果。(上)揚力係数, (下)ピッチングモーメント係数。

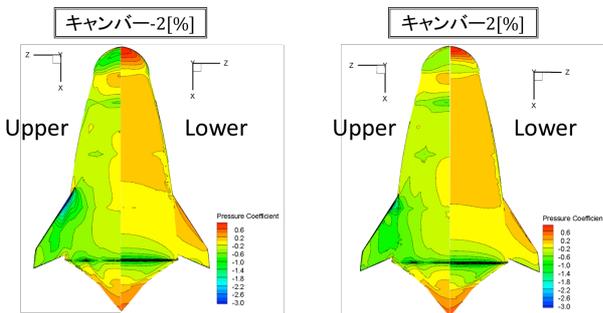


図 9 胴体キャンバー再定義に対する表面の圧力数分布。

5.3 進化型多目的最適化アルゴリズムの開発および検証

現実の問題において多く見られる多目的最適化問題へ対応するため、進化型多目的最適化手法に基づく新たなアルゴリズムを開発しクラウドシステム上において実装、実験を行った。

開発したアルゴリズムは、図 10 に示す GS アルゴリズム (Gerchberg-Saxton algorithm) と進化型多目的最適化手法 (Evolutionary Multi-criterion Optimization, EMO) を組み合わせた手法となっている。また、一般的な EMO で用いられる遺伝的操作ではなく、本問題の特徴を考慮した独自の遺伝的操作を考案、実装し、より高い探索性能の実現を試みた。

開発したアルゴリズムの性能検証を行うため、逆問題の 1 つである少数投影 CT に対して開発したアルゴリズムを適用し、数値実験を行った。実験の結果、図 11 に示すように代表的な従来手法 (FBP 法, RSAF) に対して明らかに優位な結果を示すことができ、提案手法の有効性を確認することができた。

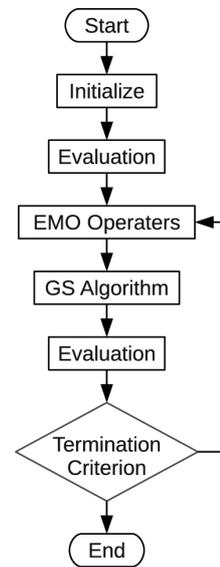


図 10 少数投影 CT 問題に対して開発したアルゴリズムのフロー



(a) FBP method (b) RSAF method (c) Proposed method

図 11 Watch 画像に対する回復画像

さらに、大規模な組み合わせ多目的最適化問題へ対応するための、進化型多目的最適化アルゴリズムについても開発をすすめる、その性能について検証を行った。

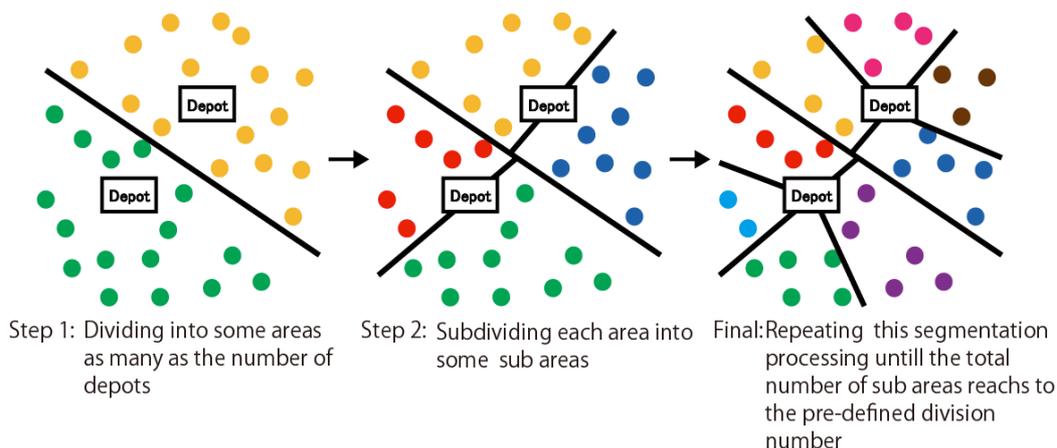


図 1 2 大規模 VRPs に対する領域分割と統合に基づく新たなアプローチ

開発したアルゴリズムは、大規模問題を複数の図 1 2 に示すように、大規模問題を複数の小規模問題に部分問題化した上で適応的に統合するアプローチに基づいており、探索の効率化を実現するメカニズムと元の問題空間との差異を抑制するメカニズムの 2 つが共存しているという特徴を持つ。

カスタマー数がある一定数を超える大規模 Vehicle Routing Problems (VRPs) に開発したアルゴリズムを適用し、クラウドシステム上において実装、実験を行った。

カスタマー数 200 を超える代表的な幾つかのテスト問題に対する数値実験の結果、図 1 3 に示すように明らかに優位な結果を得ることができた。

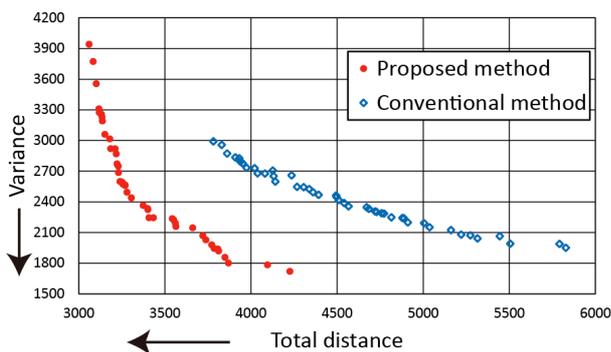


図 1 3 カスタマー数 288 の問題(pr10)に対する数値実験の結果

6. 今年度の進捗状況と今後の展望

今年度においては、システムアーキテクチャに

関する基本設計の検討、想定するシミュレーションの事例として有翼式宇宙往還機最適設計に関する検討、および最適化エンジンを実現するための進化型多目的最適化アルゴリズムの開発について共同研究を実施した。当初計画していた可視化については、一部実施した部分もあるが、大規模な可視化システムの活用については、今後の課題となった。

現時点では、それぞれ基礎的な要素技術についての設計、開発、検討を終えることができたが、全体システムとしての構築、実装については、開発経費なども必要となるため、別の枠組みによる競争的経費の獲得などを目指して研究を引き続き実施する予定である。

7. 研究成果リスト

(1) 学術論文

- (1) 長舟 和馬, 渡邊 真也, 塩谷 浩之, "フーリエスペクトル特性を考慮した進化型多目的最適化による少数投影 CT の再構成", 情報処理学会論文誌数理モデル化と応用 (TOM), Vol.8, No.1, pp.45-61, 2015
- (2) 渡邊 真也, 奥寺 将至, "看護師勤務表作成問題に対する進化型多目的最適化に基づくアプローチの提案", 進化計算学会論文誌, Vol.5 No.3 pp.32-44, 2014

(2) 国際会議プロシーディングス

(1) Masaharu Munetomo, Tomoya Abe, Designing a Distributed Design Exploration Framework in the Inter-Cloud Environment, Proceedings of the 8th IEEE International Conference on Cloud Computing (IEEE CLOUD 2015) (2015) (Accepted)

(2) Shinya Watanabe, Yuta Chiba and Masahiro Kanazaki, A Proposal on Analysis Support System Based on Association Rule Analysis for Non-Dominated Solutions, 2014 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC2014), CDR0M-paper (E-14855) (2014)

(3) Kazuma Nagafune, Shinya Watanabe and Hiroyuki Shioya, An Evolutionary Multi-criterion Optimization Approach Utilizing the Characteristics of Strength Distribution for Sparse CT Image Reconstruction, Proc. of SCIS&ISIS 2014, pp. 353-358 (2014)

(4) Shinya Watanabe, Masashi Ito and Kazutoshi Sakakibara, A Proposal on a Decomposition-Based Evolutionary Multiobjective Optimization for Large Scale Vehicle Routing Problems, 2015 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC2015), (2015) (Accepted)

(3) 国際会議発表

(1) Masaharu Munetomo: Building High-Performance Inter-Cloud Infrastructure in Japan, APAN Cloud-WG, Fukuoka International Congress Center (2015)

(2) Saori Taishi: DEVELOPMENT OF AERODYNAMIC DESIGN PROCESS FOR REUSABLE WINGED SPACE VEHICLE USING OPENVSP, ICAS2014-0939, St. Petersburg, Russia, (2014).

(3) Ariyarit, A., and Kanazaki, M.,

Multi-Segment lass-Shape-Transformation (CST) for Global Design Exploration, Mechanics, (2014)

(4) 国内会議発表

(1) 阿部友哉, 棟朝雅晴: インタークラウド環境下での大規模分散設計最適化のための連携システムの設計, 情報処理学会研究報告, Vol. 2014-MPS-100, No. 18, pp. 102 (2014)

(2) 棟朝雅晴: インタークラウド環境における大規模分散設計最適化フレームワークに関する検討, 情報処理学会研究報告, Vol. 2014-MPS-98, No. 28, pp. 1-2 (2014)

(3) 棟朝雅晴: スパコンとインタークラウドの連携による大規模分散設計探索フレームワークの構築に向けて, 日本機械学会計算力学部門設計情報学研究会 DI Lecture Series 6, 東北大学流体科学研究所 (2014) (Invited)

(4) 棟朝雅晴: スパコンとインタークラウドの連携による大規模分散設計探索フレームワークの構築, Annual Meeting on Advanced Computing System and Infrastructure (ACSI) 2015, つくば国際会議場 (2015) (Invited)

(5) 棟朝雅晴: 北海道大学ハイパフォーマンスインタークラウドの実現に向けて, 東北学術研究インターネットコミュニティ(TOPIC)講演会, 仙台国際センター (2015) (Invited)

(5) その他 (特許, プレス発表, 著書等)