## 4.2.成果報告会

2012 年度より行われた成果報告会 (CCMR-HDDMPPS 合同シンポジウム)のプログラムを添付 する。

# 第2回CCMR-HDDMPPS(CRESTプロジェクト) 合同シンポジウム

平成25年3月28日(木) 13:00~16:30 東洋大学白山キャンパス2号館16階スカイホール

13:00-13:10 開会挨拶 未定(学術研究推進センター長または工学研究科委員長)

## 13:10-14:40 セッション1(CCMR)

文部科学省・私立大学戦略的研究基盤形成支援事業: 「大規模高精度流体—構造連成解析手法の開発と詳細実験による精度・妥当性検証」 プロジェクトリーダ:田村善昭(東洋大学・計算力学研究センター長)

- 田村善昭(東洋大学)「第2期プロジェクト~その狙いと展望」
- 藤松信義(東洋大学)「流体-構造連成に関する詳細実験のための風洞実験システムの構築」
- 長岡慎介(東洋大学)「流体-構造連成解析の為の並列EFMMについて」
- 横山真男(明星大学)「表面性状の違いを考慮にいれた流体構造連成シミュレーション」
- 江澤良孝(東洋大学)「効率的最適化技術と適用」
- 芦野俊宏(東洋大学)「材料データの活用における課題」

## 14:40-14:50 休憩

## 14:50-16:20 セッション2(HDDMPPS)

科学技術振興機構・戦略的創造研究推進事業(CREST): 「ポストペタスケールシミュレーションのための階層分割型数値解法ライブラリ開発」 プロジェクトリーダ:塩谷隆二(東洋大学)

- 塩谷隆二(東洋大学)「ポストペタスケールシミュレーションのためのライブラリ開発」
- 荻野正雄(名古屋大学)「超大規模解析に向けた数値計算ライブラリの開発」
- 河合浩志(諏訪東京理科大学)「連続体力学分野向けDSLにおけるコード最適化」

○ 室谷浩平(東京大学)「大規模粒子系シミュレーションライブラリの開発と津波による市街地 浸水解析」

○ 和田義孝(近畿大学)「超大規模データ可視化ライブラリの開発」

○ A.M.M. Mukaddes(東洋大学)「Study of Transient Heat Conduction Problems using HDDM」

16:20-16:30 閉会の辞 未定(学術研究推進センター長または工学研究科委員長)

※ シンポジウム終了後に東洋大学計算力学研究センター初代センター長の 矢川元基先生の最終講義を実施します。

## 17:00-18:00

## 矢川元基先生最終講義「応用力学と計算力学の半世紀」

## 18:00- 懇親会

参加は無料です.参加を希望される方は事前に ccmr-adm@gmail.com までご連絡下さい. ホームページはこちら http://www.ccmr.toyo.ac.jp/ 奮ってご参加下さい

〒112-8606 東京都文京区白山5-28-20 ●地下鉄三田線「白山」駅下車,徒歩5分 ●東京メトロ南北線「本駒込」駅下車,徒歩5分 ●東京メトロ千代田線「千駄木」駅下車,徒歩15分<sup>630</sup>



# 第3回CCMR-HDDMPPS(CRESTプロジェクト) 合同シンポジウム

平成26年3月10日(月)13:00~17:30 東洋大学白山キャンパス2号館16階スカイホール

13:00-13:10 開会挨拶 矢川元基(東京大学名誉教授·東洋大学名誉教授)

## 13:10-14:50 セッション1(CCMR)

文部科学省・私立大学戦略的研究基盤形成支援事業: 「大規模高精度流体−構造連成解析手法の開発と詳細実験による精度・妥当性検証」 プロジェクトリーダ:田村善昭(東洋大学・計算力学研究センター長)

- ○田村善昭(東洋大学)「大規模高精度流体→構造連成解析手法の開発と詳細実験による精度・妥当性検証」
- 長岡慎介(東洋大学)「並列流体−構造連成解析手法の開発」
- 増田正人(東洋大学)「流体-構造連成解析のSOMを用いた分類及び予測技術の開発」
- 富山潤(琉球大学)「合理的な維持管理を目指したコンクリート構造物の塩害環境評価に関する数値解析的検証」
- 松原仁(琉球大学)「ブロック構造を有する岩盤の3次元モデル生成および地すべり解析」

## 14:50-15:00 休憩

15:00-16:40 セッション2(HDDMPPS)

科学技術振興機構・戦略的創造研究推進事業(CREST): 「ポストペタスケールシミュレーションのための階層分割型数値解法ライブラリ開発」 プロジェクトリーダ:塩谷隆二(東洋大学)

- 塩谷隆二(東洋大学)「ポストペタスケールシミュレーションのためのライブラリ開発」
- 室谷浩平(東京大学)「大規模粒子系シミュレーションのメニーコア向け開発と多数の浮遊物が伴う市街地津波解析」
- 和田義孝(近畿大学)「超大規模データ可視化ライブラリの開発」
- 屋雄介(名古屋大学)「超大規模解析に向けた数値計算ライブラリの開発」
- 武居周(苫小牧工業高等専門学校)「高精度電磁界シミュレーション」

16:40-16:50 休憩

16:50-17:20 特別講演

○ 古川知成(Virginia Tech.)「タイヤ研究に見る計算・計測工学」

17:20-17:30 閉会の辞 田村善昭(東洋大学・計算力学研究センター長)

参加は無料です、人数を確認する関係で、 参加を希望される方は事前に nakabayashi@toyo.jp(東洋大学・中林)までご連絡下さい。

〒112-8606 東京都文京区白山5-28-20 ●地下鉄三田線「白山」駅下車, 徒歩5分 ●東京メトロ南北線「本駒込」駅下車, 徒歩5分 ●東京メトロ千代田線「千駄木」駅下車, 徒歩15分



Center for Computational Mechanics Research, Toyo University

631

# 第4回CCMR-HDDMPPS(CRESTプロジェクト) 合同シンポジウム

平成27年3月10日(火) 13:00~18:00 東洋大学白山キャンパス2号館16階スカイホール

13:00-13:10 開会挨拶 矢川元基 (東京大学名誉教授・東洋大学名誉教授)
13:10-14:50 セッション1(CCMR)
文部科学省・私立大学戦略的研究基盤形成支援事業: 「大規模高精度流体—構造連成解析手法の開発と詳細実験による精度・妥当性検証」 プロジェクトリーダ:田村善昭(東洋大学・計算力学研究センター長) ○田村善昭(東洋大学)「大規模高精度流体—構造連成解析手法の開発と 詳細実験による精度・妥当性検証」
<ul> <li>○ 横山真男(明星大学)「流れと物体と音。実験および数値シミュレーションの研究報告」</li> <li>○ 長岡慎介(東洋大学)「並列流体-構造連成解析システムの開発及び実験との比較検証」</li> <li>○ 増田正人(東洋大学)「人工知能技術を用いた解析結果予測」</li> <li>○ 谷村景貴(東洋大学)「RAPLを用いた粒子法シミュレーションの消費電力制御」</li> </ul>
14:50-15:00 休憩
15:00-16:40 セッション2(HDDMPPS)
科学技術振興機構・戦略的創造研究推進事業(CREST): 「ポストペタスケールシミュレーションのための階層分割型数値解法ライブラリ開発」 プロジェクトリーダ:塩谷隆二(東洋大学)
<ul> <li>○ 塩谷隆二(東洋大学)「ポストペタスケールシミュレーションのためのライブラリ開発」</li> <li>○ 三目直登(東京大学)「粒子法と有限要素法を用いた大規模流体構造連成解析システムの開発」</li> </ul>
<ul> <li>○ 淀薫(インサイト)「超大規模解析のための多階層型領域分割法ソルバーの開発」</li> <li>○ 田上大助(九州大学)「電磁場シミュレーションの大規模化・高効率化へ向けた理論的検討」</li> <li>○ 杉本振一郎(諏訪東京理科大学)「超大規模電磁場解析ライブラリ開発」</li> </ul>
16:40-16:50 閉会の辞 田村善昭(東洋大学・計算力学研究センター長)
16:50-17:00 休憩
17:00-18:00 江澤良孝教授最終講義 「研究を振り返って-構造解析と最適化」
参加は無料です.人数を確認する関係で, 参加を希望される方は事前に nakabayashi@toyo.jp(東洋大学・中林)までご連絡下 さい 〒112-8606東京都文京区白山5-28-20 ●地下鉄三田線「白山」駅下車,徒歩5分 ●東京メトロ南北線「本駒込」駅下車,徒歩5分 ●東京メトロ千代田線「千駄木」駅下車,徒歩15分
632

## 第5回CCMR-HDDMPPS(CRESTプロジェクト) 合同シンポジウム

日時:平成28年3月8日(水)

場所:東洋大学・白山キャンパス・2号館16階スカイホール

13:00-13:10 開会挨拶 田村善昭(東洋大学・計算力学研究センター長)

13:10-14:50 セッション (CCMR)

文部科学省·私立大学戦略的研究基盤形成支援事業:

「大規模高精度流体—構造連成解析手法の開発と詳細実験による精度・妥当性検証」 プロジェクトリーダ:田村善昭(東洋大学・計算力学研究センター長)

○ 東洋大学 田村善昭,大規模高精度流体—構造連成解析手法の開発と詳細実験による精度・妥 当性検証~連成解析標準問題の成果を中心に~

○ 琉球大学 富山 潤,損傷理論を導入したボクセルFEMによるアルカリシリカ反応の膨張挙動 解析

○ 東洋大学 藤岡照高,オープンCAE (固体の有限要素法)を用いた精度検証

○ 東洋大学 藤松信義,フラッタ予測のための流体-構造連成パラメータに関する検討

○ 琉球大学 松原 仁,反応拡散系理論に基づく石灰岩溶解シミュレーション

14:50-15:00 休憩

15:00-16:40 セッション2(HDDMPPS)

科学技術振興機構・戦略的創造研究推進事業(CREST):

「ポストペタスケールシミュレーションのための階層分割型数値解法ライブラリ開発」 プロジェクトリーダ:塩谷隆二(東洋大学)

〇 東洋大学 塩谷隆二, Development of a Numerical Library based on HDDM for Post Petascale Simulation

○ 東京理科大学 遊佐泰紀, Three-dimensional Analysis Using Coupling-matrix-free S-version FEM

シャージャラル科学技術大学(Shahjalal University of Science and Technology), A.M.M. Mukaddes, A study of Bio-heat Transfer Problem using Finite Element Approach

○ 東洋大学 鄭宏杰, Run faster and larger - ADVENTURE for K computer

 バージニア工科大学(Virginia Polytechnic Institute and State University) 古川知成, A Continuum Approach for Detection of Corrosion

16:40-16:50 閉会挨拶 矢川元基 (東京大学名誉教授・東洋大学名誉教授)

16:50-17:00 拡大運営委員会

17:00-19:00 懇親会

参加は無料です。人数を確認する関係で、参加を希望される方は事前に fujimatsu@toyo.jp(東洋大学・藤松まで)ご連絡下さい。

〒112-8606 東京都文京区白山5-28-20

● 地下鉄三田線「白山」駅下車,徒歩5分

● 東京メトロ南北線「本駒込」駅下車, 徒歩5分

● 東京メトロ千代田線「千駄木」駅下車, 徒歩15分



## 第6回CCMR-HDDMPPS(CRESTプロジェクト) 合同シンポジウム

日時:平成29年1月21日(土) 場所:東洋大学・白山キャンパス・6号館6203教室

13:00-13:10 開会挨拶 田村善昭(東洋大学・計算力学研究センター長)

13:10-14:50 セッション1(CCMR)

文部科学省·私立大学戦略的研究基盤形成支援事業:

「大規模高精度流体—構造連成解析手法の開発と詳細実験による精度・妥当性検証」 プロジェクトリーダ:田村善昭(東洋大学・計算力学研究センター長)

「プロジェクト総括と今後の展望」 登壇予定者(敬称略,50音順) 江澤良孝,塩谷隆二,田村善昭,中林靖,藤松信義

14:50-15:00 休憩

15:00-16:40 セッション2(HDDMPPS)

科学技術振興機構・戦略的創造研究推進事業(CREST):

「ポストペタスケールシミュレーションのための階層分割型数値解法ライブラリ開発」 プロジェクトリーダ:塩谷隆二(東洋大学)

• Prof. Gabriel Wittum, Goethe University Frankfurt, Parallel adaptive multigrid - an approach efficient large scale computing

 $\circ\,$  Dr. Sebastian Reiter, Goethe University Frankfurt, Geometric multigrid on massively parallel systems with UG4 - approach and applications

• Prof. A M M Mukaddes, Shahjalal University of Science and Technology, Analysis of Skin Burn Injuries Using Finite Element Method with Bio-heat equation

 $\circ\,$  Dr. Lijun LIU, Nagoya University, Development of A Distributed Parallel Explicit Moving Particle Simulation Method and Its Applications

16:40-16:50 閉会挨拶 矢川元基 (東京大学名誉教授・東洋大学名誉教授)

16:50-17:00 拡大運営委員会

17:00-19:00 懇親会(第1会議室・2号館3階)

参加は無料です。人数を確認する関係で,参加を希望される方は 事前にfujimatsu@toyo.jp (東洋大学・藤松) までご連絡下さい。

〒112-8606 東京都文京区白山5-28-20

- 地下鉄三田線「白山」駅下車, 徒歩5分
- 東京メトロ南北線「本駒込」駅下車, 徒歩5分
- 東京メトロ千代田線「千駄木」駅下車, 徒歩15分



### 4.3.シミュレーション学会誌特集記事

日本シミュレーション学会誌「シミュレーション」2017年3月号に掲載予定の東洋大学計 算力学研究センター小特集の入稿原稿を添付する。 シミュレーション学会誌「シミュレーション」

東洋大学計算力学研究センター小特集 原稿

#### 田村善昭

1

本小特集は、東洋大学に平成17年に設立された計算 力学研究センター(以下、本センター)の最近の研究を まとめたものである.まずはこのように本センターの活 動を紹介する機会を与えて下さった日本シミュレーショ ン学会にお礼を申し上げたい.個々の研究については、 学会発表や論文投稿等で公開できるが、まとめて紹介で きることは稀である.本稿では、本センターの成り立ち やこれまでの活動、今後の方針などを紹介したい.

本センターは、平成17年、文部科学省私立大学学術 研究高度化推進事業「学術フロンティア推進事業」の採 択を受け,東洋大学白山第2キャンパス(当時)に設置 された. 初代センター長は、東京大学および東洋大学名 誉教授である矢川元基先生で、平成24年3月まで務め られた.その間、「数値逆解析手法の開発とその構造健 全性向上のための応用」の研究題目の元,上記事業によ る5年間のプロジェクトを遂行した. その成果は毎年の 年次報告書<sup>1)</sup>に詳しいが,主な目的は,これまで当セン ターのメンバー(のベ東洋大学8名,学外25名;学生を 除く)が個別に行ってきた計算力学分野の研究をまとめ、 構造物の安全性評価に用いようとするものであった.次 に、平成 23 年には、科学技術振興機構戦略的研究推進 事業 (CREST) に東洋大学塩谷隆二教授の「ポストペタス ケールシミュレーションのための階層分割型数値解法ラ イブラリ開発」が採択され、今年度(平成28年度)まで 続いている. これは、ますます大規模化する計算機に対 応すべく,理化学研究所の京コンピュータや,さらには その先のポスト京コンピュータまで見据えて、大規模・ 超大規模な計算機でも性能の出るライブラリを開発しよ うとするものである.この詳細については、本小特集の 1つに記されている. さらに、平成 24 年に、文部科学 省私立大学戦略的研究基盤形成支援事業にも採択され、

今年度まで活動を続けてきている.研究題目を「大規模 高精度流体—構造連成解析手法の開発と詳細実験による 精度・妥当性検証」としており、このときから筆者がセ ンター長を務め、現在に至っている.本小特集はこのプ ロジェクトの内容が中心となっている.

流体—構造連成問題は、空力弾性(フラッタ)などを 初めとして古くから知られており、コンピュータによる シミュレーションも 1990 年代から盛んに行われてきて いるが、未だに決定的な手法は見いだされていない. そ れには、いくつか理由があると思われるが、流体解析と 構造解析は同じような手法を用いながら、それぞれ独自 に進化してきたこと、特に解析精度を向上させようとす る場合に取るべき手法や方向性が異なること、空間や時 間の分割幅に対する要求が異なること、などなど、同じ ようでいて両者を同時に解くことは簡単ではなかった. さらに、別の問題として、もともと現象が単独のものよ りも複雑になっているため、解析手法や解析結果の妥当 性を示すのが難しいということも挙げられる.そこで、 このプロジェクトでは、以下の3つを大きな研究テーマ とした.

- (超) 大規模問題にも対応できる流体—構造連成解 析手法の開発
- 流体—構造連成解析の基準となる問題(ここでは標準問題と呼んでいる)の提案とその詳細な実験データの取得
- 3. 流体—構造連成解析の精度・妥当性を検証する方 法論の確立

この3つのテーマを5つのグループに分けて研究を行っ てきた.本小特集の以下の記事はこの5つのグループの 成果が中心となっている.その関係を図1に示す.



図1 研究テーマとグループの関係

この5つのグループについて、東洋大学のメンバーがの べ13名(博士研究員含む),学外のべ7名で研究を行っ てきた.CRESTのプロジェクトが同時進行しているため、 学外の協力者は前回よりも少なくなっている.記事では、 それぞれのグループの研究紹介が中心となるので、ここ では3つのテーマについて簡単に述べておきたい.まず、 解析手法の開発であるが、これは本稿の次の記事 「Enriched Free Mesh Method と SUPG/PSPG 安定化有限 要素を組み合わせた効率的な流体構造連成解析システム の構築」と4番目の「階層領域分割型数値解法ライブラ リによる大規模並列計算」を組み合わせたものとなって いる.解析手法のポイントは、流体・構造とも単純な要

シミュレーション 第〇〇巻第〇〇号

素形状で比較的精度の出る手法を組み合わせ,かつ,流 体と構造でデータのやりとりをする(流体が構造に圧力 を及ぼす,構造は変形・移動し,それにより流体の境界 面もまた移動する,などを表現するために物理量が両者 で交換される)際に,データの補間を必要としないよう, 要素や節点を完全に一致させて,境界面で解析精度を維 持していることが特徴である.これを,超大規模な解析 にも対応するよう,階層型領域分割を用いて,規模が大 きくなっても効率が出る手法を開発している.

次に、標準問題は、主に2番目の「流体構造連成コー ド検証のための標準問題の提案および実験」に詳しく記 載されている.また、「Enriched Free Mesh Method と SUPG/PSPG 安定化有限要素を組み合わせた効率的な流体 構造連成解析システムの構築」でも解析結果の例が示さ れる予定である.流体—構造連成問題では、床に固定さ れた弾性円柱に流れが当たる現象を標準問題として提案 した.その理由は、流れの速さや円柱の大きさ、弾性率 などによって、静的な変形をする場合、流れ方向に振動 する場合、流れと垂直な方向に振動する場合、それらが 組み合わさる場合など、1つの形状で様々な様相を示す ことから、精度や妥当性を検証するためのデータとして 有用なのではないかと考えたからである.ここで取得し たデータはなんらかの形で公開し、多くの方に使ってい ただければと思っている.

精度・妥当性検証,いわゆる V&V (Validation & Verification)は、残念ながら、こうすれば必ず精度が 分かる、妥当性が示せる、という統一的な方法を見いだ してはいないが、いくつかの手法や要素技術は提案でき ており、それらを使った研究が3番目の「データ信頼性 を考慮した実用的 CAE」に記されているが、ここではむ しろ本題の連成問題に対する精度・妥当性検証について 少し述べておく、本プロジェクトにおける考え方は、実 験もまたシミュレーションとは異なる意味で誤差を含ん でおり、実験結果が真の解とは限らない、そこで、1つ のアプローチとして、実験値とシミュレーション結果を 同時に扱い、ベイズ推定等を用いることで、結果の信頼 性を確率的に示そうとしている。また、本小特集には含 まれないが、人工知能技術(ニューラルネットワークや 自己組織化マップ)を用いて結果を分類し,解析の定量 的,あるいは定性的評価を試みている.著者の専門とい うこともあり,記事の5番目には可視化を利用した精 度・妥当性検証についても触れている.プロジェクト終 了まで入稿時点でまだ1月半ほどあるので,もう少しま とまった結果が示せればよいと思っている.さらに,学 外の協力者も含めてこれまでの成果をまとめた英文の本 も執筆中であり,これも年度内には発刊を予定してい る.

現在の文部科学省私立大学戦略的研究基盤形成支援事 業はこの3月末をもって終了となるが、CREST のプロジ ェクトは1年間の延長が決まっており、その他にもいく つかのプロジェクトが進行中で、センターとしての活動 はしばらく続いていくと思われる.そのとき、本センタ ーが何を目指すべきか、まだはっきりとした答えを得て いるわけではないが、本小特集やここで述べたような話 題の中にも、V&V、超大規模、人工知能、確立統計、デ ータベース/ビッグデータ、データ融合、可視化、等々 最近のキーワードが並んでおり、計算力学においてもこ のような理論や技術が重要となってくると思われる.計 算力学は、シミュレーションという大きな枠組みの中の 1つであり、本センターはさらにその一部を担っている に過ぎないが、今後ともこの分野でなにがしかの貢献が できればと考えている.

最後に、これまで本センターに関わって下さった多く の研究者、学生、大学・研究機関の職員、企業の方々に センターを代表してお礼申し上げると共に、本センター の活動が主に「文部科学省私立大学学術研究高度化推進 事業(平成17年度〜平成21年度)」、「文部科学省私立 大学戦略的研究基盤形成支援事業(平成24年度〜平成 28年度)」および「科学技術振興機構戦略的研究推進事 業(平成23年度〜平成28年度)」によるものであること をあらためて記し、謝意を表す.

#### 参考文献

1) CCMR 年次報告書, http://www.toyo.ac.jp/site/ccmr/report.html

## Enriched Free Mesh Method と SUPG/PSPG 安定化有限要素を 組み合わせた効率的な流体構造連成解析システムの構築

中 林 靖

#### 1. 緒言

東洋大学計算力学研究センターで取り組んでいる「私立 大学戦略的研究基盤形成支援事業」のプロジェクト「大 規模高精度流体-構造連成解析手法の開発と詳細実験に よる精度・妥当性検証」では、そのプロジェクト名が示 す通り計算と実験の両面から連成解析問題に取り組み精 度や妥当性を検証するものであるが、本稿ではそのうち 計算の部分、すなわち数値流体解析及び数値構造解析を 組み合わせた流体-構造連成解析手法について、新たに 提案する効率的なアプローチについて解説する.

#### 2. 連成解析手法

現在, 有限要素法(Finite Element Method : FEM)や, 境 界要素法(Boundary Element Method: BEM), 差分法 (Finite Difference Method : FDM)等を用いた数値計算技術 の分野において様々な連成現象解析のアルゴリズムが提 案されているが、アルゴリズムが複雑であること、対象 となる解析領域が複雑かつ大規模になる為、解析に用い る節点数、要素数等が増加し、使用メモリー等の計算機 リソースも大幅に増加し、それに伴い、計算量も増加し、 連成結果を得るまでに必要な計算時間が大幅に増加する 等の理由によって、まだまだ完全に効率的で標準的な手 法が確立しているとは言えない状況である.従って、現 状の多くは、この連成効果が非常に小さいとして、各々 の現象間で及ぼし合う影響を考慮せずに単一の現象とし て解析を行う、もしくは、一方の現象に対する解析を行 い,その結果を基に他方の現象に対する解析を行う等, 物理現象間の相互作用を考慮せずに解析を行うことが多 い.しかしながら、バイオ分野、ナノ分野、環境分野を はじめ、多くの分野においてこの連成効果を考慮した数 値解析の需要が今後ますます増加していく事が予想され る.

連成効果を考慮した解析を行なう為には、前述の様々 な問題に対処する必要がある.これらの問題が、連成効 果を考慮した数値解析を困難にする一因になっていると 考えられる.本研究では、これら連成効果を考慮した際 に生じる様々な問題の中で、特に解析領域の増加に伴う、 計算時間、使用メモリーの大幅な増加という問題に着目 した.一般的に、FEM による数値解析を行う際には、 中間節点を有する高次要素を用いて、その解析精度を向 上させる.しかしながら、高次要素を用いた数値解析は、 計算量と、使用メモリーが増加してしまうという短所も ある.高次要素を用いる事無く、解析精度を向上させる には、解析領域をより細かく要素分割する必要があるが、 領域全体の要素数を増加させると、結果的に、計算量、 使用メモリーは増加してしまう.FEM による構造解析 を行なう場合には、未だに優れた解析結果を得る為に、 高次要素を用いる事が、一般的であるが、流体解析を行 う際には、SUPG(Streamline Upwind / Petrov - Galerkin) 法、PSPG(Pressure - Stabilizing / Petrov - Galerkin) 法、PSPG(Pressure - Stabilizing / Petrov - Galerkin) 法を導 入することで、高次要素を用いる事無く、良好な解析結 果を得ることが可能である.

連成効果を考慮した解析を行う際には、図1に示すよ うに各解析領域の境界上の要素形状に整合性が取れてい る事が望ましいが、SUPG/PSPG安定化FEMを用いた流 体解析手法と、高次要素を用いた構造解析手法を用いる と、図2に示すように、各解析領域の境界上の要素形状 が一致しない.その結果、各解析場における影響を他方 の解析場に与える際に、その結果を捕間する作業が必要 になり、この要素形状の不一致による補間作業は、計算 過程を煩雑にするだけでなく、解析精度の低下の原因と なる.つまり、SUPG/PSPG安定化FEMの利点を生かし た、流体ー構造連成解析を行なう為には、構造解析手法 においても、高次要素を用いる事無く、解析精度を向上 させる手法を用いることが、前述の問題点を考慮した上 で、理想的な手段であると言える.

そこで、本研究では、構造解析手法に、矢川らにより提案されたメッシュレス法の一種である高精度フリー メッシュ法(Enriched Free Mesh Method: EFMM)を使用す る. この EFMM を使用した解析に用いる要素は、三角 形一次要素もしくは四面体一次要素であるが、従来の FEM と比較して静的解析において、解析精度を向上さ せる事が可能である事が報告されている. これらの手法 を組み合わせることで、図1に示すような構造場、流体 場の境界間の要素形状の整合性が得られた連成解析を行 うことが可能となる.

しかしながら、本研究で取り扱う流体-構造連成解析で

は、構造解析場に対しても、動的解析を行う必要がある が、EFMM の動的解析への適用とその有効性について の報告は未だにされていない.そこで、本論文では、 EFMM の動的解析における有効性について示し、この 動的解析へ適用した EFMM による構造解析手法と SUPG/PSPG 安定化 FEM を使用した流体解析手法を用い た流体-構造連成解析ついて述べる.

#### 3. 構造解析

#### 3.1. Free Mesh Method (FMM) <sup>1)</sup>

本研究で構造解析に使用する EFMM は, FEM を基本 概念に置く同じくメッシュレス法の一種である FMM を ベースとした手法である.本節では,この FMM の基本 的な考え方について述べる.FMM では,FEM と異なり, 入力情報として,基本的には,解析領域内の各節点の座 標データのみが求められる.この与えられた節点の座標 データを用いて,各節点毎に図3に示すような局所三角 形要素群を生成する.この局所三角形要素群の作成方法 として,対角線比較法,Voronoi多角形とDelaunay 三 角形を構築する方法,包装法など,様々な手法が提案さ れている.これらの手法を用いて生成される局所三角形 要素群の中心の節点を中心節点と呼び,その局所三角形 要素群を生成しているその他の節点を衛星節点と呼ぶ (図3).

この局所三角形要素群の剛性マトリックスを,従来 の FEM と同様の方法で算出し,局所三角形要素群の中 心節点の行成分のみを全体剛性マトリックスに足し合わ せる.この作業を解析領域中の全ての節点に対して行う ことで,解析領域全体の剛性マトリックスを得ることが 出来る.その結果,解析精度は FEM と等価になる.し かしながら,FMM は,その自動要素生成アルゴリズム の特徴から,中間節点の利用が非常に困難であるという 問題も含んでいる為,中間節点を有する FEM と比較す ると,解析精度が低下してしまう.解析精度を向上させ るには,節点数,要素数の増加が必要不可欠となる.

#### 3.2. Enriched Free Mesh Method (EFMM) <sup>2)</sup>

前節で述べた FMM の問題を解消する為に, EFMM で は, エラー! 参照元が見つかりません。に示した局 所三角形要素群内に FEM とは異なり,2種類の場を独立 に仮定する.具体的には,EFMM では,図4に示したよ うに,局所三角形要素群内に任意の応力場を,局所三角 形要素内に従来の FEM,FMM と同様に変位場をそれぞれ 独立に仮定する.このように,EFMM は従来の FEM で は,変位とひずみを各要素内に同一の領域で仮定してい たのに対して,変位とひずみをそれぞれ独立した領域で 仮定し,これら独立に仮定した2種類の場を Hellinger-Reissner の原理<sup>3)</sup>を使用して関連付ける手法で ある.

変位{u}, ひずみ{ε}を独立変数とした Hellinger – Reissner の原理は以下の式(1),(2)で表される.

$$\prod(\varepsilon, u) = \int_{\Omega} \{\varepsilon\}^{T} [D] \{\partial u\} d\Omega - \frac{1}{2} \int_{\Omega} \{\varepsilon\}^{T} [D] \{\varepsilon\} d\Omega$$
$$- \int_{\Omega} \{u\}^{T} \{b\} d\Omega - \int_{S_{\sigma}} \{u\}^{T} \{\tilde{t}\} dS$$
$$\{\partial u\} = [B] \{\overline{u}\}, \quad \{\varepsilon\} = [N^{\varepsilon}] \{\overline{\varepsilon}\} \qquad (2)$$

式中 $\{b\}, \{\tilde{t}\}, \Omega, \{\bar{u}\}, \{\bar{\varepsilon}\},$ はそれぞれ,体積力,境 界面 S  $\sigma$  に働く表面力,解析領域,節点変位,節点ひず みを表す.また, [N  $\varepsilon$ ]は,局所領域のひずみを決定す る任意関数であり,以下のように仮定する.

$$\begin{bmatrix} N^{\varepsilon} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p^{T} & 0 & 0 \\ 0 & p^{T} & 0 \\ 0 & 0 & p^{T} \end{bmatrix}$$
(3)  

$$\Box \subseteq \Box \heartsuit,$$
  

$$p^{T} = \begin{bmatrix} 1 & x & y \end{bmatrix}$$
(4)

である.

式(1)の停留条件は、以下の式(5)(6)のようになり、 式(7)の近似方程式を得る.

$$\int_{\Omega} \delta\{\varepsilon\}^{T} [D] (B] \{\overline{u}\} - [N^{\varepsilon}] \{\overline{\varepsilon}\}) d\Omega = 0$$
 (5)

$$\int_{\Omega} \delta\{u\}^{T} [B]^{T} [D] [N] \{\overline{u}\} d\Omega$$

$$- \int_{\Omega} \delta\{u\}^{T} \{b\} d\Omega - \int_{\Omega} \delta\{u\}^{T} \{\widetilde{t}\} dS = 0$$
(6)

$$-\int_{\Omega} O\{u\} \quad \{0\} u \le 2 - \int_{S_{\sigma}} O\{u\} \quad \{1\} u \le 0$$

$$\begin{bmatrix} -A & C \\ C^T & 0 \end{bmatrix} \left\{ \overline{\overline{u}} \right\} = \begin{cases} f_1 \\ f_2 \end{cases}$$
(7)

$$\begin{aligned} z = \overline{\zeta}, \\ \begin{cases} A = \int_{\Omega} [N^{\varepsilon}][D][N^{\varepsilon}] d\Omega \\ C = \int_{\Omega} [N^{\varepsilon}][D][B] d\Omega \\ f_{1} = 0 \\ f_{2} = \int_{\Omega} [N^{u}]^{T} \{b\} d\Omega + \int_{\Gamma} [N^{u}]^{T} \{\widetilde{t}\} d\Gamma \end{aligned}$$
(8)

次に,式(7)をローカル領域で縮約すると,式(9)を得る.この式(9)から,式(10)に示すローカル領域の剛性マトリックスを得る.

$$C^{T}(A^{-1}C\overline{u}) = f_{2} \tag{9}$$

$$[k_{HR}] = C^T A^{-1} C \tag{10}$$

以上のように、ローカル領域全体で仮定されたひず み場と、各要素で仮定された変位場を、一般的な混合形 式の有限要素法の定式化と異なる手法で定式化すること により、節点自由度を増加する事無く新たな場の追加が 可能となる.

このように, EFMM はFMM の局所三角形要素群を使 用する手法であることから,使用する要素はFMM と同 様,三角形もしくは四面体一次要素等の中間節点を持た ない一次要素である.

#### 4. 流体解析

本研究では、非圧縮性粘性流体の基礎方程式である Navier-Stokes 方程式と連続の式に対して、SUPG/PSPG 法に基づき離散化を行った安定化有限要素法を流体解析 に用いる.非圧縮性粘性流体の基礎方程式として、無次 元化された Navier-Stokes の運動方程式と、連続の式は (11),(12)で表される.

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial p}{\partial x_i}$$

$$-\frac{1}{\operatorname{Re}} \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) = 0 \quad in \quad \Omega$$
(11)

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \qquad in \quad \Omega \tag{12}$$

ここで,ui,p はそれぞれ無次元化された各方向の流 速成分, 圧力を表す.Re は無次元化パラメータの Reynolds 数であり,またΩは流体の占める解析領域であ る. 基礎方程式(11),(12)に対して安定化有限要素法 (SUPG/PSPG 法)<sup>45)</sup>を適用すると以下の弱形式が導かれ る.

$$\int_{\Omega} w_{i} \left( \frac{\partial u_{i}}{\partial t} + \overline{u}_{j} \frac{\partial u_{i}}{\partial x_{j}} \right) d\Omega - \int_{\Omega} \frac{\partial w_{i}}{\partial x_{i}} p d\Omega$$

$$+ \int_{\Omega} \frac{1}{\operatorname{Re}} \frac{\partial w_{i}}{\partial x_{j}} \left( \frac{\partial u_{i}}{\partial x_{j}} + \frac{\partial u_{j}}{\partial x_{i}} \right) d\Omega \qquad (13)$$

$$+ \sum_{e=1}^{n_{el}} \int_{\Omega} \left( \tau_{s} \overline{u}_{k} \frac{\partial w_{i}}{\partial x_{k}} \right) \left( \frac{\partial u_{i}}{\partial t} + \overline{u}_{j} \frac{\partial u_{i}}{\partial x_{j}} + \frac{\partial p}{\partial x_{i}} \right) d\Omega$$

$$= \int_{\Gamma_{h}} w_{i} h_{i} d\Gamma$$

$$= \partial u \qquad \partial u \qquad \partial u$$

$$\int_{\Omega} q \frac{\partial u_i}{\partial x_i} d\Omega + \sum_{e=1}^{n} \int_{\Omega_e} \left( \tau_p \frac{\partial q}{\partial x_i} + \overline{u}_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial p}{\partial x_i} \right) d\Omega = 0$$
(14)

ここで、wi, q はそれぞれ式(11)(12)に対する Galerkin 項の重み関数であり、 $\Gamma$ は、解析領域 $\Omega$ の境界を表す. なお、 $\overline{u}$ i は移流速度を表す.式(13)(14)中の $\tau$ s、 $\tau$ p はそ れぞれ, SUPG 法, PSPG 法に起因する安定化パラメー タである.

式(13)(14)の未知変数である流速と圧力に対して,三 角形一次要素による捕間を行う.この組み合わせは,安 定化有限要素法に基づく定式化を行っている為に可能で ある.更に,時間方向の離散化を行うと, Un+1,Vn+1,Pn+1を未知変数とする連立一次方程式を得 る.この連立一次方程式は非対称行列であるので,解法 には,非対称行列に適用可能な反復解法の一つである GPBi-CG (Generalized Product-type method based on Bi-CG) 法を用いる.

#### 5. 数值計算例

この章では、3章及び4章で説明した構造解析手法及 び流体解析手法を組み合わせて行った流体-構造連成解 析結果をいくつか紹介する.既に説明している通り、3 章及び4章で説明した手法を組み合わせることにより、 流体-構造界面での物理量の補間が必要のない極めて単 純なアルゴリズムで連成解析を行うことが出来る.また、 ここでは最も単純な弱連成解放を用いて、1時間ステッ プ毎に構造解析と流体解析を1度ずつ繰り返す単純互い 違い法を用いた結果を示す.

5.1. バネ支持された円柱のロッキング現象 677

連成解析の例として、まず、バネ支持された円柱のロ ッキング現象のシミュレーションした結果を示す. 但し、 この計算は構造物の変形がないために、正確に言うと流 体-構造連成解析ではなく、流体-剛体連成解析になる が、連成解析手法の検証にしばしば用いられる.

図5に解析のモデルと各種パラメータを示す.モデル の左側から流入する流速Uを変化させることによりレイ ノルズ数を変化させると,通常は流速Uの増大に伴って 円柱から放出される渦の放出頻度も増大するが,ある一 定のレイノルズ数領域ではバネの固有振動数に引っ張ら れる形で渦の放出頻度が一定となる.この現象を数値解 析して実験結果と比較したものが図6である.実験で報 告されているレイノルズ数105から125の領域において, 周波数が一定になっていることが分かる.

5.2. 血管を流れる赤血球の変形

次に、血管中を流れる赤血球の変形シミュレーション の結果を示す.図7に解析モデルと有限要素モデルを示 す.赤血球は手足の先端などの毛細血管の太さに比べて 非常に大きく、時にはパラシュート状に変形して流れる ことが知られている.この解析では血管部分を流体領域、 赤血球の表面部分を薄肉の構造領域としてモデル化し、 また赤血球内の体積一定条件を満たすために赤血球内部 もまた別の流体領域としてモデル化して解析を行った. 図8に示された通り、流れが一番強い血管中心部が赤 血球に当たる部分を中心として、もともと回転楕円体を していた赤血球の変形が始まっていることが分かる.ま た、同時に血液の流れに押し出されるように右側に流さ れていることも分かる.最終的にはパラシュート状に広 がった赤血球が折り畳まるように潰れて毛細血管の細い 部分を流れて行くことが実験的に確認されているが、本 解析ではそのような大変形まで追いかけて連成解析する ことは出来なかった.

#### 6. 結言

本稿では、流体-構造連成解析を行う際の高精度で高 効率方法として、 EFMM を用いた構造解析手法と、 SUPG/PSPG 安定化有限要素法を用いた流体解析手法 とを組み合わせる手法を提案した. この組み合わせに より高次要素を使用せず、また、流体構造界面での物 理量の補間が必要のない流体-構造連成解析手法を構築 することが出来る. 具体的には、以下のような結論が 得られた.

- 1) 構造解析に EFMM を用いることにより,従来 の四面体一次要素を用いた構造解析よりも精 度の高い解析が行えることがわかった.
- 2) 流体解析において、高次要素を使用する事無 く、高精度な解析を行う事が可能である SUPG/PSPG 安定化 FEM と EFMM を組み合 わせる事で、各解析境界間で整合性の得られ た連成解析システムが構築出来た.
- 3) バネ支持された円柱のロックイン現象を実験 と比較することにより、上記で示した連成解 析システムの精度について検証を行った。
- 4) 流体・構造連成解析の例題として、毛細血管内の赤血球の血流による形状変形についての数値シミュレーションを行った.この解析は、実際の赤血球の両凹円板状形態と若干異なる中央部付近の凹みを無視した形状で行ったが、その結果は、毛細血管内で実際に観測される赤血球のパラシュート型への形状変形を定性的に見て、計算できていると考えられる.

#### 参考文献

- Yagawa, G. and Yamada, T., Free Mesh Method A New Meshless Finite Element Method, Computational Mechanics, 18, (1996), pp. 383-386.
- Yagawa, G. and Matsubara, H., Enriched Free Mesh Method: An Accuracy Improvement for Node-based FEM, Computational Plasticity, Computational Methods in Applied Sciences, Springer, 7, (2007), pp.207-219.
- O.C.Zienkiewicz & R.L.Taylor., Matrix Finite Element Method I [Recision new publication](in Japanese), Kagaku Gijutsu Shuppan, Inc., (1996)
- Tezduyar, T.E., Stabilized finite element formulations for incompressible flow computations, Advanced in Applied Mechanics, 28, (1992), pp.1-44.
- Tezduyar, T.E., Mittal, S., Ray, S.E. and Shih, R., Incompressible flow computations with stabilized bilinear and linear equal-order-interpolation velocity-pressure elements, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 95, (1992), pp.221-242.
- P. Anagnostopoulos., P. W. Bearman., Response characteristics of vortex-exited cylinder at low Reynolds numbers, J. Fluids and Struct., (1967)., 6 501-502
- G. H. Koopman : The vortex wakes of vibrating cylinders at low Reynolds numbers, J. Fluid Mech., (1967)28 501-502

#### 謝辞

本研究の一部は「文部科学省私立大学戦略的研究基盤形 成支援事業(平成 24 年度~平成 28 年度)」および JST-CREST の研究課題「ポストペタスケールシミュレー ションのための階層分割型数値解法ライブラリ開発」に よる. あらためてここに記し, 謝意を表す.





図4 変位場と応力場の計算領域





- Amplitude(Analysis Result)
- - Amplitude(Experiment)





## 流体構造連成コード検証のための 標準問題の提案および実験

#### 藤松信義

#### 1 研究背景

流体構造連成問題の一つであるフラッタ現象は, 旗のは ためきの様に物体が空気力により振動する現象であり、構 造物を破壊に至らせる場合がある1)。フラッタ現象の発生は、 空気力(物体に作用する空気の力),弾性力(材料の剛性に より元の形に戻ろうとする力),慣性力(慣性による見かけの 力)が連成する現象であり、それぞれの力が作用して動的 不安定を引き起こす. そのため航空機を代表とする機器の 設計開発において、製造コストと運用費を削減するために は構造重量を軽量化することが必須となっている。この軽量 化において、材料の剛性が低下することからフラッタが発生 しやすくなり、機器を安全に使用するためにはフラッタ現象 の発生を精度よく予測することが重要課題である<sup>2,3)</sup>。一方, フラッタ現象を積極的に利用する研究も行われており、物 体の振動を利用して流体の混合促進や, 翼フラッタを軸の 回転振動に変えて発電するシステムにも応用されている 4.5% フラッタ現象を防止することや, 積極的に利用をするために は、フラッタ現象の発生を予測する必要がある.機器の設 計開発において実機で実験することが困難である一方で、 計算機性能の向上により、フラッタ解析に利用する数値解 析ツールは高精度かつ高効率であることが強く要求されて いる.

このような背景から、東洋大学計算力学研究センターの プロジェクト名である「大規模高精度流体-構造連成解 析手法の開発と詳細実験による精度・妥当性検証」の中 では、新規実験計測グループという名称で流体-構造連 成解析のための「標準問題実験の検討」に焦点を当てた 活動を行ってきた. 流体-構造連成問題に関する数値計 算と実験は多数行われているが、その多くが単独に行われ たものであり、文献にはいずれかの結果が引用されている 場合が殆どである.

本研究では、数値計算結果の妥当性を検証するための データを提供することを主眼として実験に取り組んできた. 数値解析のモデル化がしやすい問題を選定すること、解析 結果が実験結果と比較しやすい様に実験条件を詳細に記 述すること、参照しやすい実験結果を提供することを目的と している.そこで流体-構造連成解析手法を検証するため の標準問題として、低速風洞を用いて下記の二種類の実験 を行った.

(1) 弾性円柱の空力振動

(2) シート材のフラッタ特性

円形,矩形は基本形状の一つであり,数値解析において も計算条件の設定が容易である.超音速風洞装置による試 験も可能であったが,航空機産業に限られることから低速 風洞装置を用いた試験のみ行った.

フラッタ現象に関する理論的・実験的研究は、これまで多く 行われているが<sup>67,8,9</sup>、系統的にデータを整理できる例は数 少ない<sup>10,11</sup>. プロジェクト内における本グループの目標とし て、材料と流体力学の物理量を関連付けて、シートフラッタ 特性の実験結果を系統的に整理できる無次元パラメータの 提案を試みた.

#### 2 実験装置および計測方法

図 1 は弾性円柱の空力振動試験の概要図である. 風洞の出口面積は A=0.3×0.3 m<sup>2</sup>であり,最大 40m/s まで風速を上げることができる. 風洞出口の直下にはシリコーンゴム製の円柱が設置されており,サポート材で円柱の片端が固定されている. これは円柱の上端が固定端となっており,下端は自由であることを意味する. 風路から放出される気流により,円柱が振動する様子を高速度カメラ(HAS-L1,(株)ディテクト)を用いて,円柱の側面と下面から撮影を行った. 動画は VGA 形式であり, 500fps で記録される. 円柱の運動を解析するために,運動解析ソフトウェアであるDIPP-Motion-Pro-N((株)ディテクト)を用いた.



図1 低速風洞装置と弾性円柱の空力振動試験 図2はシートフラッタ試験の概要図である.弾性円柱の空 力振動試験と同様に,風洞出口の直下にシートフラッタ装 置を設置して実験を行った.試験片は金属製とゴム製のシ ート材を用いた.金属シート材は水平支持(図 3(a)),ゴムシ ート材は鉛直支持(図 3(b))されている.シート材は2枚のア

シミュレーション 第〇〇巻第〇〇号

ルミフレームで挟まれた後、ボルト締めしており、実験中に 外れない様に固定されている。またシート材に捩れが発生 しないようにしている。シート材は片端固定、他端自由の状 態である。金属シートの自由端は自重でたわむことに注意 して頂きたい。金属シート材を鉛直に設置したときは、本実 験設備ではフラッタ現象が発生しなかった。



表1 弾性円柱の仕様

直径 d <sub>c</sub> [mm]	20			
長さ $L_c$ [mm]	160			
マング率 E [MPa]	2.9 (A50)			
	4.9 (A60)			
	6.8 (A70)			

	111 2 1 2 2
金属シート材	ヤング率 [GPa]
アルミニウム(アルミ)	70.6
ステンレス(ステン)	205
黄銅	105
ゴムシート材	ヤング率 [MPa]
ウレタンゴム (UT)	46.2
塩化ポリビニル (EV)	31.6
黒天然ゴム (BN)	9.90
フッ素ゴム (FS)	8.30
ニトリルゴム (NBR)	7.60
エチレンポリプロピレン (EPT)	7.10
クロロプレン (CR)	5.60

表2 金属・ゴムシート材のヤング率

表3金属・ゴムシート材のサイズ

金属シート材				
長さ <i>L</i> [mm]	100, 110, 120, 130, 150			
幅 w [mm]	40			
厚さ t [mm]	0.3, 0.4, 0.5			
ゴムシート材				
長さ <i>L</i> [mm]	100, 110, 120, 130, 150			
幅 w [mm]	40, 50, 60, 70, 80, 90			
厚さ <i>t</i> [mm]	0.5, 1.0			

設置したシート材の変位を測定するために、レーザ変位 計(LK-G500, KEYENCE Corp.)を用いた.風速を変化させ て実験を行い、フラッタ開始時の風速を調べた.フラッタ時 のシート材の変位はサンプリング周波数 5kHz で約13 秒間 測定し、65536点のデータを収録して周波数解析を行った.

表1は弾性円柱の空力振動試験に使用した円柱の大きさ とヤング率を示している. 直径と長さは1種類, 硬さは3種 類で実験を行った. ヤング率の右側に括弧書きした数値は ゴムの硬さ試験法の一つであるデュロメータ硬さを意味して いる. 表2は金属シート材とゴムシート材の種類とヤング率 を示している. 金属材料は3種類, ゴム材料は7種類使用し ており, それぞれ大きさを変えて実験した. 名称の横には, 図の凡例に表記する略称を示している. 表3 に金属シート 材とゴムシート材の長さ, 幅, 厚さを示している. 実験に使 用する弾性円柱, シート材は商用の材料を使用しており, 容易に入手できるものとした.

#### 3 実験結果および考察

#### 3.1 弾性円柱の空力振動試験

本節では,弾性円柱の空力振動特性を調べるために,円 柱の材質に着目して空力振動する際の振幅と振動周波数 を調べて整理した結果を示す.

図3は空力振動している弾性円柱を側面と下面から撮影 した画像を示している.材質はA50であり、U=25m/sのとき の結果である.円柱の側面と下方から高速度カメラで振動 する円柱を撮影する.実験で動画を取得した後,連続画像 に分割して2値化処理を行い,円柱領域の中心座標を円柱 部分のピクセルの平均値として算出した.その後,中心座 標の時間履歴を取得し,円柱の変位と周波数特性につい て調べた.図の添え字はx,y方向を表しており,実線と破線 を用いてそれぞれ示した.またxは流れに平行な成分,yは 垂直な成分を意味している.



(a) 円柱側面

(b) 円柱下面

図3 空力振動する弾性円柱の瞬間写真 (A50, U=25.2m/s)

流体力学に関連する現象は無次元数で記述すると系統的に整理できることが多い。ここではレイノルズ数 Re=Ud\_v で整理する. v は流体の動粘性係数を表している。図 4 は時間平均した変位 D の Re 数に対する変化を示している. レイノルズ数の代表長さは円柱の直径  $d_c$ である. Re 数と共に  $D_x$ は増加する傾向にある. A50 は最も柔らかい材質であり, Re 数に対する  $D_y$ の増加は明らかである. ただし,  $D_x$ の 1/10 程度である. 円柱の材質が A60, A70 のとき, 変位 D<sub>x</sub> は概ね一定である. このときの y 方向の変位 D<sub>y</sub> は円柱の固 定方法の影響などによる中心座標のずれであるが, 直径の 3%未満であり大きくない.

図5は変位のRMS値aを円柱の直径で無次元化した値 を示している.Re数が増すと共にax,ayは増加している.円 柱後流に発生する渦による影響を受けており、流れに垂直 方向に振動することからaxよりもayの増加率が大きいことが 確認できる.また円柱の硬度が増すと、勾配は緩やかにな る傾向が確認できており、材料の性質が現れていることが 分かる.



図4 空力振動する弾性円柱の時間平均変位



図5 空力振動する弾性円柱の変位の RMS 値



図6はシリコーンゴム円柱の周波数特性を示している. 測

定結果から周波数スペクトルに明確なピークを確認できな かった場合は、実験結果から除外している.ストローハル数 St=dfU は Re と共に減少しており、その傾きは材質に依ら ず概ね一定の値を示している.また振動の方向による影響 も小さいことが分かる.

表4 は図4から図6に示した時間平均した変位D,変位のRMS値a,St数のRe数に対する勾配を一覧表にして示している.硬さが増すとD,aの値が減少していること,また図6に示したように周波数特性の傾きは概ね一定であることを確認できる.数値解析の検証のために,これらの結果と比較することができる.

云·汗压的压沙土/7派到的压						
	$D_x$	$D_y$	$a_x$	$a_y$	St(x)	St(y)
A50	2.442	-	1.626	1.988	-1.017	-0.985
A60	2.260	-	1.090	1.504	-1.005	-1.046
A70	2.164	-	1.052	1.125	-0.912	-1.042

表4 弾性円柱の空力振動特性

#### 3.2 シートフラッタ試験

本節では、シートフラッタ特性を調べるために、風洞試 験で風速を徐々に上げていき、シート材が振動し始める速 さを調べた.またこのときのシート材の変位をレーザ変位計 で測定し、周波数特性を調べた.表2、3に示したように、シ ート材の材質、その大きさを変えて実験を行った.



図7は金属シート材とゴムシート材のフラッタ開始速 度を示している.横軸はシート材の長さであり,厚さ *t* を変化させた場合の結果である。厚みが 0.5mm から 0.3mmに薄くなると剛性が低下するためフラッタしやす くなり,フラッタ開始速度が低下している.また長さが 4

#### 増すとフラッタ現象が発生しやすくなる.

図8は材質に着目して =0.3mm, L=40mm の金属シート材について材質(ヤング率)を変えた実験を行い,長さLについてフラッタ開始速度を整理した結果である. 黄銅は105 GPa, アルミニウムは70.6 GPa, ステンレスは205 GPaである. ヤング率 Eが増すと剛性が高くなるため,フラッタ開始速度が大きくなる. これらの傾向は,既往研究でも確認されている.

3.1 節で述べたように、シートフラッタの周波数特性 を無次元数により整理する. 図9はアルミニウム材の周 波数特性を示している. レイノルズ数によらず周波数は 一定の値を示していることを確認できる. 一方,材質は 同一であるが大きさが異なると実験結果が点在しており, 系統的に整理できていない。







図10片持ち梁に作用する空気力

そこで本研究では、材料力学に基づく類推と次元解析 (10)から考察を試みる.材料に作用する空気力は流体の動 圧が板に作用する.このとき材料力学の様に梁のたわみと の関係を考える.材料の曲げモーメントと流体力によるモー メントの比を表す無次元数を導出した.この考え方の概要 は以下の通りである.梁のたわみの式は等分布加重wpと梁 の長さ L,梁の曲げ剛性 EI について、wpL<sup>4</sup>/EI という係数を 持つ.ここでフラッタ現象を考えるとき、L<sup>4</sup>ではなく、長さ L, 厚さ t,幅 w について 24 通りある中から幾つかの物理的意 味を持つ値を導出できる.フラッタ現象はシート材に作用す る空気力と関係する(図 10)ことから wpを流体の動圧に置き 換えて、実際の現象に即して考えると無次元数は次の様に 表すことができた.

$$\frac{EI}{\rho U^2 L^2 wt}$$

(1)

(2)

フラッタ周波数は既往研究の様に,固有振動数を用いて 無次元化することとした.材料の固有振動数fは以下の様に 表すことができる.

$$f' = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \frac{\lambda^2}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}}$$

式(2)の $\lambda$ は振動モード, $\rho$ はシート材の密度,Aはシート材の断面積である.

図11はゴムシート材のフラッタ開始速度とフラッタ周波数 を系統的に整理した結果である.縦軸はフラッタ周波数fを 式(2)の固有振動数で,横軸は式(1)の無次元数で整理した 結果である.金属シート材のフラッタ周波数は材質によらず 概ね2次の固有振動数で振動することが確認できる.図12 はゴムシート材に対して周波数特性を整理した結果である. ゴムシート材は材質,大きさが変化しても1本の線で結ばれ ていることが判る.金属シート材に比べて曲げ剛性 EI が小 さいことから,横軸の無次元数に対して概ね1未満でフラッ タ現象が開始することが分かる.

金属材, ゴムシート材を用いてフラッタ実験を行った結果, 大きさ, 材質によらず, フラッタ開始速度を分類, 整理できる ことが確認できた. 式(1)で表される無次元数は材料の曲げ モーメントと流体力によるモーメントの比を意味している. こ の無次元数は数値計算コードの検証結果を整理する上で, 活用することができると考えている.



図 12 ゴムシート材のフラッタ周波数特性

#### 4 まとめ

流体構造連成解析のための標準問題として2種類の実 験を検討した.標準問題として弾性円柱の空力振動実験, シートフラッタ実験を行った.実験結果を整理して,数 値解析コードの検証に利用しやすい表記とした.新規実 験計測グループの目標として,流体構造連成問題の指標 を提案することがあった.シートフラッタ試験からフラッ タ開始速度を調べた結果,材料の材質,大きさによらず,フ ラッタ周波数を整理できる無次元数を提示した.円形と矩形 の形状は検証計算に適用しやすい形の一つであり,本実 験結果は数値解析コードとの比較に利用できるものと考え る.

謝辞:本研究の一部は「文部科学省私立大学戦略的研究 基盤形成支援事業(平成24年度~平成28年度)」による。 実験装置の製作,および,実験データの取得は,東洋大 学大学院修士課程機能システム専攻の篠崎眞大君,東洋 大学理工学部機械工学科の風巻勇君,石坂充君,坂本青 葉君の協力によるものである.あらためてここに記し, 謝意を表す。

#### 引用文献

1) J. W. Duncan : The fundamentals of flutter, R&M, **2417**, 1/36 (1948)

2) J. Dugundji : Personal Perspective of Aeroelasticity During the Years 1953-1993, Journal of Aircraft, **40**, 809/812 (2003)

3) R. Yurkovich : Status of Unsteady Aerodynamic Prediction

for Flutter of High-Performance Aircraft, Journal of Aircraft, **40**, 832/842 (2003)

4) W. McKinney and J. DeLaurier : The Wingmill: An Oscillating-Wing Windmill, Journal of Energy, **5**-2, 109/115 (1981)

5) K. Isogai, M. Yamasaki, M. Matsubara and T. Asaoka : Design study of Elastically Supported Flapping Wing Power generator, International forum on Aeroelasticity and Structural Dynamics, 4/6 (2003)

6) 黒川:フラッタを生じる旗に作用する風荷重測定:
 その2重量比およびアスペクト比が風荷重に与える影響(膜構造:風洞,構造 I),日本建築学会学術講演梗概集,
 B-1, (2007).

7)山口,伊藤,緒方:柔軟ウェブ基礎形態のフラッタ 限界とその挙動に関する研究(第1報,フラッタ限界の 予測と風洞試験結果),日本機械学会論文集(B編), 67-663,2738/2745(2001)

8) R. D. Blevins : Flow-induced vibration, Krieger publishing company (1990)

9) R. King, M. J. Prosser and D. J. Johns : On Vortex Excitation of Model Piles in Water, Journal of Sound and Vibration, **29**-2, 169/188 (1973)

10) N, Kondo : Three-dimensional computation for flow-induced vibrations in in-line and cross-flow directions of a circular cylinder, International Journal for Numerical Methods in Fluids, 70, 158/185 (2012).

11) C. Eloy, C. Souilliez and L. Schouveiler : Flutter of a rectangular plate, Journal of Fluids Structure, **23**, 904/919 (2007)

12) 五十嵐保,杉山均,流体工学と伝熱工学のための次 元解析活用法,6-17,共立出版,(2013).

## データ信頼性を考慮した実用的CAE

江澤良孝, 芦野俊宏, 藤岡照高

#### 1 はじめに

構造のシミュレーションを行う場合,まず材料定数な どの実験データが必要となる.その実験データは常にな んらかのばらつきを有している.したがって,その実験 データを用いたシミュレーションもそのばらつきの影響 を受けることになる.したがってそのばらつきを考慮し たシミュレーションが必要になる.そこで,そのデータ の信頼性を考慮した実用的 CAE を構築するための各種 要素技術を検討した.まず第1は、データ信頼性を考慮 してシミュレーションに必要な定数を算出するための技 術,第2は、実用的な CAE に不可欠な、物性データ・ 数学的知見交換のためのデータ表現形式の開発,第3は 実用的 CAE として近年注目されているオープンソース CAE 技術を用いた V&V (Verification and Validation).こ の3つにポイントを絞って紹介する.

 データ信頼性を考慮してシミュレーションのための 定数を算出する技術<sup>1)</sup>

#### 2.1 段ボールとシミュレーション

ここでは段ボールを例にとって検討を行った. 段ボール は中芯形状が複雑であり,抄造機によって抄造された板 紙は抄造方向に紙を構成する繊維が配列するため抄造方 向と垂直方向で弾性率が異なる異方性材料であり,かつ 形状が複雑であるため通常の数値シミュレーション解析 は困難である.したがって設計段階での数値シミュレー ション解析は普及していない.本研究ではこのような問 題点に対し段ボール構造の周期性に着目し数値シミュレ ーション解析の一手法である均質化法<sup>23)</sup>を用いた効率 的な数値シミュレーション解析から効率的に弾性率を算出する手法 を提案する.

まず、両面段ボールについて曲げ試験を行った. さらに均質化法を適用するため、本研究では、図 1(a)に示す段ボールの一つの段をモデル化したミクロモデルと、図 1(b)に示す等価なマクロモデルを用いた.



#### (a) Micro model

(b) Macro model

図1 均質化モデル

#### 2.2 材料定数の導出と検証

この均質化解析を行うためには均質モデルに割り当てる 材料定数を計算する必要がある.しかしながら,実験デ ータは各種の誤差を含んでいる.例えば,中芯部分形状 もばらつきがあり,実験の時に荷重を付加する位置も厳 密に指定するのは困難である.このような誤差を含んだ 実験データから算出した材料定数は当然誤差を含んでお り,そのデータを使ったシミュレーションも誤差の影響 をうける.そこで,ここでベイズ推定に着目し,確率論 的に材料定数を推定することを行った.このようにする と推定値の信頼性を評価することができる.ベイズ推定 は次式のように表現できる.

#### $p(\theta|D) \propto f(D|\theta)p(\theta) \tag{1}$

ここで原因をデータD,結果をパラメータ $\theta$ とすると  $p(\theta|D)$ は事後確率であり、データDのもとでパラメー タ $\theta$ が得られる確率である.事後確率はパラメータに対

シミュレーション 第〇〇巻第〇〇号

2

する尤もらしさを示す尤度関数 $f(D|\theta)$ と文献,過去の 知見やデータといった解析者の有する主観的な情報を反 映させた事前確率 $p(\theta)$ を乗ずることで導き出している.

本研究では下記に示す確率モデルについて議論を行 うため Case A では明瞭な因子を考慮しない従来型ベイ ズモデル, Case B, C では解析者が最低限把握している 不確定性(Case B は明瞭な情報を把握していないと仮 定した予測情報, Case C は解析者が不確定性に対する 正確な値を把握している予測情報)を考慮しパラメータ の異なる階層ベイズモデルを作成した.

Case A: 従来型ベイズモデル

荷重条件 F, 段ボールの各方向における拘束条件のもと で得られた解析結果より作成した応答曲面の変位uから 弾性率  $E(ライナ: E_{Liner}, 中芯: E_{CM})$ の弾性率を推定す る.

Case B, C: 階層ベイズモデル (階層は1層のみに単純化 した)

実験値の観測誤差の因子を加えた応答曲面の変位uから 弾性率を推定する.

図2に、実験値に対して前処理を施した 20 の観測デー タデータ(D<sub>i</sub><sup>CD</sup>, D<sub>i</sub><sup>MD</sup>) (D<sub>i</sub><sup>CD</sup>は、中芯にそった方向に荷重 をかけた場合の変位で、D<sub>i</sub><sup>MD</sup>は、中芯にクロスする方向 に荷重をかけた場合の変位)を用いてそれぞれの確率モ デルに対してベイズ推定を行なった結果の事後分布を示 し、表1に平均と分散の定量値を示す.表1において Parameter とはライナと中芯を指す.図2において、黒 点は実験値の応答曲面から算出した中芯とライナの弾性 率の値、青点はベイズ推定による事後確率の平均値であ る.



(a) Case A







(c) Case C 図 2 事後分布

表1 予測された平均値と分散

Doromotor	Case A		Case B		Case C	
Falametei	Ave	Var	Ave	Var	Ave	Var
Liner	5494	6892.2	5305	6825.8	5319	3673.7
Corrugated	2211	16070	3389	27392	2774	13396
medium						

#### 2.3 結果と考察

通常の有限要素解析は段ボール構造が複雑であるためモ デル化や境界条件の設定に手間がかかり非効率であるが, 段ボールの周期性構造に着目した均質化法を適用するこ とで詳細なモデルによる解析を必要とすることなく全体 構造解析が可能となり,効率的に解析を行える. Case A, B, Cを比較するとCaseA(従来型ベイズモデル)が 総合的に良い推定結果となっているが,用いた確率モデ ル(従来型ベイズモデル)は明瞭な不確定因子をモデルに 反映しておらず事後分布に与える不確定因子の影響を表 現できていない推定結果となっている. 一方, Case B, C の推定結果は Case A に劣るが確率モデル(階層ベイズ モデル)に明瞭な不確定因子を考慮したため,より真の 現象を捉えており不確定因子のパラメータを設けること で推定の自由度が増すため少数のデータを活用する場合 においてもロバスト性を有する実用性のあるベイズモデ ルといえる.

#### 3. 物性データ・数学的知見交換のためのデータ表現形 式開発

シミュレーション学会誌では、2000年に「シミュレー ションは何処まで実験を補完できるか一仮想実験による 物質材料設計の試み」として小特集が組まれた<sup>4)</sup>.この仮 想実験プロジェクトは材料に関わるミクロからマクロの 数値シミュレーションプログラムをモジュールとして組 み込んだワークベンチを開発し、ワークフローによって 結合して材料に関わる統合化された計算環境を構築しよ うという試みであった.わが国ではこの方面でその後大 きな動きはなかったが、シミュレーションやデータを用 いた材料設計についての研究は各国で継続されてきた.

研究の方向性は二つに大別されており,一方は結晶構 造などのデータベース,第一原理計算などの結果から, これまで作られたことのない組成,結晶構造の物質の特 性を予測しようとするもので,所謂マテリアルズ・イン フォマティクス,と呼ぶ場合こちらをさす場合が多い<sup>5)</sup>. この手法は実際には製造されていない物質系を探し出す ことが可能である一方,予測可能な物性はミクロ構造が 直接反映されるもの,電磁気的特性や熱物性などに限ら れる.

これに対して構造材料の強度や、特に長期的な性能に 関わるクリープや疲労などの特性は結晶粒、粒界、転位 などミクローマクロに至る実体、メカニズムが関わって いる.このため単一の物理モデルによって計算・予測す ることが困難であり、熱力学計算による組織予測、亀裂 進展などのモデル計算、有限要素法など複数のモデルを 組み合わせてマクロな物性を予測しようとする ICME(Integrated Computational Materials Engineering)のア プローチが研究・開発されてきた<sup>9</sup>.

2011年に米国ホワイトハウスがこれらの動きを取り 上げ, Materials Genome Initiative (MGI),として計算機支援 による新材料設計・材料開発を国家戦略として推進する ことを発表し、国際的に注目を浴びることとなった <sup>7)</sup>. これを受けて、わが国でも戦略イノベーション創造プロ グラムの一つのテーマとして ICME のアプローチを取る 革新的構造材料、マテリアルズ・インフォマティクスの アプローチを取る情報統合型物質・材料開発イニシアテ ィブなどのプロジェクトが相次いで立ち上がった.中国 においては、China MGI と称して材料研究者と情報科学 者が共同する体制作りが進められており、ヨーロッパに おいても ICMEg (ICME Expert Group), MARVEL (Materials' Revolution), NoMaD (Novel Materials Discovery)などのプロ

#### ジェクトが開始されている.

材料の物性や性能に関わるデータは人工物の設計・ 評価に関わる基本的な情報であり、古くは印刷されたデ ータシートの形で、その後は計算機可読なデータベース として各所において整備が進められてきた。しかしなが ら、独立に開発されてきたために互いに異なったデータ 構造を持ち、加えて材料の種類、関係する物性値、測定 方法、プロセスに関する記述などの多様さからデータ構 造の標準化は困難であり、いくつかの試みはあったもの の 8データの相互交換は困難であった.しかしながら, マテリアルズ・インフォマティクスにおいてもICMEに おいても、データ処理やシミュレーションのためのツー ル、データベースを連携させるためのデータ交換が必須 であり,データ交換のための共通スキーマ,材料分野の概 念とその関係をネットワーク構造として記述し、 共通の 辞書となるドメイン・オントロジーの研究も MGI 以降 活発化している.

筆者らは、計算力学を含む数値シミュレーションとの 材料データの入出力や、各所で開発されている異なった 構造を持つ材料データ資源の連携のためのデータ交換フ オーマットの必要性に早くから着目し、2006-2007年に NEDO 知的基盤創成・利用促進研究開発事業「材料デー タベースのための共通プラットフォームの研究開発」の 採択を得て材料オントロジーに材料データベースの統合 利用について研究開発を行った 9. その後本センターに おいても、リンクト・データなどインターネット上での データ共有のための共通基盤となっているセマンティッ ク・ウェブのフレームワークを用いた材料データフォー マットに関わる研究を行っている. 2011-2013 年には科研 費「材料オントロジーの拡張と国際化による材料データ 交換手法の確立」も得てオントロジーの拡張に加えて、 経験式など数式として表される材料の特性記述に関する 研究10,2014年からは戦略イノベーション創造プログラ ム・革新的構造材料の中の中心的な課題であるマテリア ルズ・インテグレーション(MI)に参画して複数の計算モ ジュール, データベースの連携のためのデータ・知識構 造の研究とプロトタイプ開発を行っている.

筆者らが開発している MI のためのデータ構造を図3 に示す.物性値や実験データ,シミュレーションモジュ ールの入出力データの記述には RDF (Resource Description Framework)や XML Schema を用い,そこに用 いる語彙を OWL (Web Ontology Language)によって定義 する. これらを XML で記述し, RDF データを検索するた めのデータベースサーバである SPARQL (SPARQL Protocol and RDF Query Language) Endpoint に格納して検 索する.



図3 セマンティック・ウェブのフレームワークを 用いた MI システムのためのデータ・知識表現

また,構造材料の弾塑性モデルなどマクロな特性については、構成方程式などが従来から多く提案されている. このような数式は Fortran の関数などの形でシステムに組み込まれるのが一般的であったが、このような表現では数式としての意味が失われるため、メンテナンス、数式処理システムの入力への変換、数式としてのレンダリングなどが困難である.ここでは、数式の意味内容を計算機処理可能な形式で記述するための規格である OpenMath を用いることで、数式処理システム入力形式への変換、W3C による数式記述のための規格である MathML へ変換することでWebブラウザでのレンダリングを可能としている.



図4 クリープ構成方程式 Norton 則の数式

 $\dot{\varepsilon}_{c} = A\sigma^{n}$  とそのパラメータの OpenMath と RDF による記述

図4には、クリープ挙動の構成方程式の一つである Norton 則について式に関するメタデータ、式、実験デー タからアセスメントされたパラメータの記述を示す.パ ラメータはOpenMathによる数式とは別にRDF形式によ って保存し、同じ数式に対して異なる実験データセット や文献から導かれたパラメータセットを個別に管理し、 SPARQLを用いて検索することができる.

このように材料に関わる異種の情報を共通の基盤を 用いて記述し、更に、用いられる語彙を共通の材料オン トロジーから選ぶことで、データ資源を連携させ、統一 的な検索を行うことが可能である.現在、数式などの連 携に必要とされる材料オントロジーの拡張とともに、MI プロジェクトにおいて共通の試料として用いられている 鋼材について、機械試験の結果などのRDF記述を開発し、 SPARQL Endpoint の1つである Apache Jena/Fuseki を用 いてプロトタイプのデータベースを開発している.これ を用いて OpenMath を用いて記述した弾塑性モデル式か ら計算モジュールへの入力パラメータを算出するなどの 実証を行い、MI プロジェクトの統合システム開発グルー プに対して技術的なフィードバックを行っている.

# オープンソース有限要素解析ソルバの V&V オープンソース CAE の意義

有限要素解析 (FEA) を核とする CAE 技術は,設計・製造をはじめとする技術分野で多大な貢献をしてきている. 多くの市販 CAE システム (商用 CAE) では,開発元が提供する手厚いユーザサポートによってある程度のブラックボックス的利用が可能になっており,設計業務などルーチン的で迅速性を要する業務にあたっては商用 CAE の優位性は続くと見込まれる.

しかし, 商用 CAE にはライセンス料の観点から超並 列計算や新興国での利用に障壁があること,研究目的な どソースコードに触れる必要がある場合などの点で制約 がある.近年,各国で開発・実用が進められているオー プンソース CAE はこうした点を補うとともに,ユーザ 自身が検証に参加することでより幅広い視点からの品質 向上が期待されている.数値流体解析の分野におけるオ ープンソースの代表格 OpenFOAM<sup>III</sup>はこのようなスキ ームで成功を収めている.

オープンソース CAE の普及を図る上では精度・妥当 性検証をユーザ自身が行い,ユーザコミュニティでの情 報共有が必要になる.概して,オープンソースの利用は 商用ソフトウエアよりユーザに対して高度な技術力・知 識を求めるため,技術力が高いユーザが企業の垣根を超 えたコミュニティで情報共有を図りつつ,所属組織内で の主な業務には商用 CAE を使用するような図式であれば、相互に利するように思われる.

本研究ではこうした事情を踏まえ,商用 CAE に匹敵 する豊富な機能とコミュニティを有するオープンソース のフランス製 FEA 統合環境, Salome\_Meca (ソルバは Code\_Aster)<sup>12)</sup>を取り上げ,精度・妥当性検証と結果の 公開を進めている.

#### 4.2 固体の有限要素解析における V&V

#### 4.2.1 安価な実験に基づく V&V

固体の FEA に対する V&V は、① 理論解との比較、② 実機計測や実験との比較、③ 異なるソルバ間の解析結 果の比較、などの方法で行われる.理論解は線形弾性な どの限定的な条件に対して得られており、非線形解析に 対しては実験的 V&V が主となる.実験データとしては 公開文献を利用する方法も考えられるが、公開データ自 体の精度が不明なことも多く、検証項目によっては、自 前で実施可能な安価な実験が望ましい.引張試験は固体 の変形特性を計測するもっとも基本的な方法で、全国各 地の公設試験場で利用貸出しがなされているため、誰で も実施できる安価な実験と言える.

引張試験を題材に Code\_Aster (ver. 11.7) を検証した結 果<sup>13)</sup>を図5に示す.引張試験には塑性による材料非線形 性のほか,大変形による幾何学的非線形性が含まれる. このため高精度に解析を行うためには,真応力-真ひず み曲線を用いた大変形解析が望ましく,本研究の解析で も真応力-真ひずみ曲線を用いた大変形解析によって, 図5のように最大荷重を超えた後を含めて試験片の変形 挙動を良好に再現できた.



図5 低合金鋼引張試験の再現解析結果と試験デー タの比較<sup>13)</sup>

一方では、理由があって微小変形解析を行う場合がある。塑性やクリープを伴う非弾性変形に関する理論解の ほとんどが微小変形を仮定しており、理論解に基づく V&V にあたっては、変形前の寸法を不変と仮定する公 称応力-公称ひずみ曲線を用い、微小変形解析を行う必要がある.図5中にはこの組合せによる解析結果が試験 と比較され、最大荷重到達前の挙動が良好に再現されていることがわかる.これらの2つの組合せ以外は試験デ ータと整合しない.弾塑性解析であれば常に真応力-真 ひずみ曲線を用いるという訳ではないので注意が必要である.

5

#### 4.2.2 文献データに基づく V&V

実験の難易度が高い現象を取扱う場合は信頼のおける文 献データを参照することになる.実用上の価値が高い熱 疲労問題などは、高い熱応力を発生させるためには試験 体や装置が大型化、高コスト化するため、誰しも簡単に 実験を実施できない.日本原子力研究開発機構が過去に 実施した熱疲労試験<sup>14</sup>では、図6に示すテーパ付き円筒 試験片の内面に対して高温ナトリウムによる加熱・冷却 が繰り返し行われ、実際に疲労き裂を発生させた試験に 関する貴重な情報が詳細に公開されている.



#### 図6 熱疲労試験体の形状・寸法と試験中温度計測点<sup>14</sup> 15)

本研究では Code\_Aster (ver. 11.7) を用いて非定常熱伝 導解析と引き続き弾性熱応力解析を行っている<sup>15)</sup>. 非定 常熱伝導解析の結果と,試験における代表点温度の計測 結果の比較を図7に示す.



図7 非定常熱伝導解析結果と試験中温度計測データの 比較<sup>15)</sup>

良好な一致が認められる.弾性熱応力解析の結果は、疲 労評価に用いる von Mises 相当応力範囲で整理し、試験 におけるき裂発生状況のスケッチと比較して図8に示す.



図8 弾性応力範囲の解析結果と試験終了後き裂発生状 況の比較<sup>1415)</sup>

応力範囲が大きい厚肉部ほど深いき裂が観察されており, 定性的な比較であるものの傾向の一致が読み取れる.

#### 5 まとめと今後の展望

データ信頼性を考慮してシミュレーションに必要な定 数を算出するための技術に関しては、実験データから算 出したシミュレーション用の定数をベイズ推定を用いて 算出した. ベイズ推定を用いることにより, 算出したデ ータの信頼性を評価することができることがあきらかに なった.物性データ・数学的知見交換のためのデータ表 現形式の開発に関しては、材料に関わる異種の情報を共 通の基盤を用いて記述し, 更に, 用いられる語彙を共通 の材料オントロジーから選ぶことで、データ資源を連携 させ、統一的な検索を行うことが可能となった. さらに オープンソース CAE を用いた V&V に関しては, FEA ソルバの V&V を行う場合には適切な理論解,実験デー タを参照する必要がある. オープンソース CAE は、ソ ースコードが公開されている上,価格の制約が低く,誰 しも解析を再現できるため客観性の高い検証ができる見 通しがある. 今後, 典型的な実験検証を商用 CAE とオ ープンソース CAE とを併用して行い、検証の再現に必 要な情報を公開して行くことで計算力学技術の透明性を 高め、社会的受容性の向上を図ることができると期待し ている.

#### 引用文献

 Masahiko Shimamura, Yoshitaka Ezawa, Yoshiaki Tamura, Satoru Takashimizu, Daisuke Satou : High Accurate Analysis by Experiment and Simulation Using Bayesian Inference, Mechanical Engineering Journal, **3**-4, 16/27 (2016)

 (2) 寺田賢二郎,弓削康平,菊池昇,均質化法を用いた 複合材料の弾塑性解析 (第1報 定式化),日本機械学 会論文集A編, 61-590,2199/2205 (1995)

3) 寺田賢二郎, 菊池昇, 均質化法入門, 丸善出版 (2003).

4) 岩田修一編:小特集「シミュレーションは何処まで実験を補完できるか 一仮想実験による物質材料設計の試み」、シミュレーション、19-1、2/38 (2000)

5) K. Rajan: Materials Informatics, materialstoday, 8-10, 38/45 (2005)

6) National Research Council: Integrated Computational Materials Engineering, The National Academies Press (2008)

7) Materials Genome Initiative, https://www.mgi.gov/ (2017 年2月13日参照)

8) C. P. Sturrok, E. F. Begley and J. G. Kaufman: MatML, Materials Markup Language Workshop Report, National Institute of Technology (2001)

9) T. Ashino: Materials Ontology: An Infrastructure for Exchanging Materials Information and Knowledge, Data Science Journal, 9, 54/61 (2010)

 T. Ashino and Y. Yamashita: Development of Openmath Content Dictionary for Mathematical Knowledge of Materials Science and Engineering, Data Science Journal, 11, ASMD17-ASMD21 (2012)

- 11) http://www.openfoam.com/. (2016年2月8日閲覧)
- 12) http://code-aster.org/. (2016年2月8日閲覧)
- 藤岡照高,構造解析ソルバ検証用参照解の整備(低 合金鋼引張試験の Code-Aster による再現),オープン CAEシンポジウム2015@富山,オープンCAE学会, 富山市,(2015).
- 石崎公人,他3名,SUS304 鋼の熱疲労試験,PNC-TN9410 89/101,JAEA, (1989).
- 15) 三浦純哉,藤岡照高, Salome-Meca を用いた熱疲労 試験の再現解析,オープンCAE シンポジウム 2016@ 東京,オープンCAE 学会,東京,(2016).

## 階層領域分割型数値解法ライブラリによる大規模並列計算

#### 塩谷隆二

#### 1 はじめに

ポストペタスケールシステムなど次世代の並列計算機 アーキテクチャにおいて、大規模な数値計算データ処理 を必要とする実アプリケーション・ソフトウェアが高い 演算効率を得るためには、マイクロプロセッサやメモリ などハードウェアが持つ階層構造を考慮したプログラミ ングモデルを採用することが必要である。特に、入力デ ータ生成や可視化などのプレ・ポスト処理から数値解析 手法などのソルバー処理に至るまで、全ての処理がスパ コン上で行われることを想定する必要がある. そこで本 プロジェクトでは、次世代並列計算機上における大規模 数値計算データ処理システムに関する基盤技術として、 これまで主に数値解析手法向けに研究開発してきた階層 型領域分割法(HDDM)の技術を応用した、HDDM によ る大規模数値計算データ処理システムの開発を行った. 特に、学術研究・産業界で需要が高い有限要素法(FEM) と粒子法による連続体力学のシミュレーションに対象を 絞ることで高性能が得られるアプリケーション特化型シ ステムソフトウェア開発を行った. ターゲットとするア プリケーション・ソフトウェアは、著者らがこれまで開 発に携わってきている、HDDM による大規模計算・超 並列計算で実績があり、HPCI 戦略プログラムやポスト 「京」重点課題でも利用されているオープンソース CAE ソフトウェア ADVENTURE[1]とした.

本研究は、「DDM 入出力ライブラリ」、「DDM ソル バーライブラリ」、「連続体力学向け DSL」、「連続体 力学系シミュレータ」の4つの研究項目に分類して研究 開発を行った.本研究の成果物であるソフトウェアは、 ADVENTURE プロジェクトホームページ内のサブプロ ジェクトページ[2]にて一般に公開している.

#### 2 DDM 入出カライブラリ

本研究項目は、領域分割法(DDM)に基づく多階層計算 格子データの生成、操作および I/O ライブラリ開発を行 うものである.一般的なアプリケーションシステムは、 プレ・ソルバー・ポスト処理に分けられるが、これまで は最も高負荷であるソルバー部のみがスパコン上に実装 されてきた.ポストペタスケールシステムでは、全ての 処理をスパコン上に実装し、並列化することが当然求められてくる.しかし、従来の枠組みで並列化したのみでは、それに伴い生成される大規模な数値計算データ処理に多くの時間が割かれてしまうことが予想される.そこで、これまでソルバー部の並列化手法として圧倒的な高い並列効率を示してきた階層型領域分割法(HDDM)の技術を応用したデータ処理システムの開発を行った.

#### 2.1 多階層領域分割

演算処理装置や記憶装置の階層構造に適した負荷分散 機能として、非構造格子向けの多階層領域分割アルゴリ ズムを開発した.特に、MPI-OpenMP ハイブリッド並列 化, CAD データへの形状適合を伴った4 面体・6 面体ソ リッド要素の一様メッシュ細分割機能(図 1)、リスター ト機能,「京」や PRIMEHPC FX10 等が持つ Tofu 向け にネットワークトポロジーを意識したデータ配分の自動 調整アルゴリズムの開発を行った.これにより、「京」 の 8.196 計算ノードを用いて 258 億要素の非構造 4 面体 メッシュ生成にを約94分で成功するなど、ポストペタ スケールシステムで想定される超大規模シミュレーショ ンのプレ処理に有効であることが示された.また、世界 トップクラスとなる 2.260 億要素(構造解析では 0.9 兆自 由度)の非構造4面体メッシュ生成に名大FX100の128 ノードを 16 時間用いることで成功した. これらの成果 は、多階層領域分割ソフトウェア ADVENTURE Metis2 として整備した.

また,粒子法向け階層型領域分割アルゴリズムを開発 した.特に,粒子法シミュレーションにおける MPI-OpenMP ハイブリッド並列計算向けのバケットベー ス2階層領域分割,分散メモリ並列計算向けのHalo通信 パターン生成を開発した.本アルゴリズムを粒子法向け 連続体力学系シミュレータに組み込んだ結果,東大 FX10 において理想的な解析条件の下で12 ノードから 4,800 ノードまでのストロングスケーリング 93%,ウィ ークスケーリング 99%の並列化効率を達成できた.これ らの成果は,分散メモリ並列向け陽的 MPS 法ソルバー ライブラリ LexADV EMPS として整備した.

#### 2.2 DDM 圧縮技術

非構造格子向け DDM 圧縮技術の開発を行った.

シミュレーション 第〇〇巻第〇〇号

DDM 圧縮は、DDM における部分領域の境界上情報の みをファイル出力する対象とするものである(図 2). 復 元は部分領域ごとの境界値問題を有限要素解析すること によって行う.一般的な CG 法の演算量(O(n3+n2))を 基準に試算を行った結果、全体剛性行列を解く計算量と 領域ごとの小さな剛性行列を解く計算量の比が極めて大 きくなり、例えば 100 億自由度有限要素解析モデルの計 算量の比は 1010 以上の計算量比が生じることから、袖 領域の変位量をもとに内部の変位、ひずみ、応力を再度 計算することは現実的であることが分かった.

また,新たに多階層精度圧縮数値記録技術 (JHPCN-DF)に基づくデータ圧縮ライブラリを開発した [3]. JHPCN-DFは,汎用の圧縮アルゴリズムでは圧縮し づらい科学技術計算の浮動小数点数データに対し,下位 ビットをゼロパディングし,ハフマン符号化などの圧縮 効率を高める技術である.ゼロパディングは指定する許 容誤差内で行い,許容誤差は可視化や分析など目的にあ わせて指定する.図3に,1億自由度規模構造解析結果 について,圧縮無し(RAW データ),許容誤差  $\varepsilon$  2 10-1 と 10-3 の値で圧縮したデータの可視化の様子を示す.

ε =10-3 のケースでは RAW データとの差異が見られな いためこれにより、1 億自由度規模構造解析データを可 視化や分析に有用な情報を保持したままでデータ量を 1/3 以下に圧縮することに成功し(図 3)し、ポスト京時代 におけるデータ保存に有効な技術であることが示された. JHPCN-DF に基づいた粒子データ圧縮ライブラリも開発 し、大規模解析において約5割の圧縮率を得ることに成 功した. これらの成果は、有限要素解析ソフトウェア AdvSolid や粒子法シミュレーションソフトウェア LexADV EMPS に組み込んだ.

#### 3 DDM ソルバーライブラリ

本研究項目は、DDM に基づく連続体力学向け線形代 数ソルバーの分散メモリ並列ライブラリ開発を行うもの である.一般的な線形代数ソルバーは、アセンブリされ た連立一次方程式を入力とするため、FEM におけるメ ッシュ情報など本来解析手法が持つ特徴を利用せずに実 装されてきた.それらは共有メモリ環境及びその中で解 くことができる解析規模では問題となりにくいが、ポス トペタスケールシステムで対象とする解析規模では入力 データから解析手法まで含めた分散メモリ環境向け並列 化技術が必要となることが予想される.そこで、DDM による多階層型データ構造を活用した、大規模な線形代 数ソルバーの分散メモリ環境に適したライブラリの開発 を行った[4].

#### 3.1 DDM 反復法

有限要素法向けに、多階層領域分割情報を利用した DDM 反復ライブラリの開発を行った. DDM の静的縮約 によって得られる Schur 補元方程式を反復法で解くアル ゴリズムとなっており、反復法としては実対称向けに共 役勾配(CG)法,共役残差(CR)法,準最小残差(QMR)法, 最小残差(MINRES)法, 複素対称向けに共役直交共役勾配 (COCG)法,共役直交共役残差(COCR)法,対称版 QMR(QMR\_SYM)法を実装した. さらに, 複素対称向け には MINRES-like CS 法を新たに開発した. また, MPI-OpenMP ハイブリッド処理に適した2階層領域分割 に基づく実装、線形代数演算のアプリケーション特化型 最適化として節点自由度数に応じた手動ループ展開や SIMD 向け最適化を行った. さらに、メニーコア化など に伴う B/F 値低下に対応するため、DDM 反復法の部分 領域問題ソルバーとして Eisenstat 技法に基づく CG 法 +SSOR 前処理を実装した. これにより,「京」の 8,196 計算ノードを用いて1.040億自由度規模有限要素解析(古 代建築物パンテオンモデルの自重解析)に81.8時間で成 功した(図 4). 本手法は、「京」で強スケーリング性能と して 85%以上の高い並列効率を示しており(図 5), ポスト ペタスケールシステムでは1千億自由度超の超大規模有 限要素解析を実用化できる可能性が示された.

#### 3.2 多階層前処理技術

多階層前処理技術として,有限要素法向け BDD 法の 開発を行った.既に実績がある構造解析向け BDD 法に ついては超並列計算環境向け実装技術の開発を行い,「京」 の 256 計算ノードで弱スケーリング 89%,強スケーリン グ 92%の並列効率が得られた.また,世界トップレベル の 112 億自由度有限要素解析への BDD 法適用実験を行 い,53 反復(収束判定値は相対残差が3桁小さくなった 時点)で収束解を得ることに成功した.

また, 異種材料混在モデルにおける BDD 法の収束性 を改善するために, DDM 反復法に対する簡易対角スケ ーリング処理法の新解釈を提案した. それに基づき, Scaled-BDD 法を新たに開発し, ヤング率の比が 100 倍以 上となる複数部材で構成された構造物のシミュレーショ ンにおいて, オリジナルの BDD 法に比べて反復回数・ 計算時間を 1/2 以下にすることに成功した(図 6)[5].

#### 3.3 DDM 数值解析技術

有限要素法向けに DDM 数値解析技術として、ヘテロ ジニアスコンピューティング向け負荷分散アルゴリズム の開発を行った. CPU と GPU のヘテロジニアス環境に おいて、計算ノードに割り当てられた部分領域群を OpenMP の動的スケジューリング機能を用いて CPU コ

3

アやGPUに動的負荷分散を行う機能を開発した.また, DDM 反復法の主要な演算を含むミニコードを開発し, DDM 反復法の実装最適化に向けた研究開発環境として 利用可能とした.さらに,領域分割メッシュ並びに関連 する疎行列データのデータベース構築ソフトウェアを開 発し,構造・熱の DDM 行列データベースを構築した. これら DDM のミニコードと DDM 行列データベースを 相いて性能評価を行った.これより,CPU と GPU では 最適な領域分割数が異なることが分かり,CPU-GPU へ テロ計算によって領域分割数に対してロバストな性能を 得ることに成功した(図 7).また,メニーコアを用いて, 領域分割数によって適切な並列化方法が異なることが分 かった(図 8).これらは、ベンチマークテストとして整備 しており,新しい計算機アーキテクチャに適用する際に, 性能評価試験を低コストに実施可能となった.

MPS 陽解法(粒子法)向け数値解析技術としては,東 京大学 FX10 の 4,800 計算ノード上において 200 億粒子 のベンチマーク計算に成功した. 並列性能では、25 億粒 子の60計算ノードから4.800計算ノードのストロングス ケーリングで 99.33 %を達成した.実証例題として,石 巻市街地に津波が侵入して、直径9mの2つのタンクが 地上構造物に衝突しながら漂流する解析に成功した.本 解析は、東京大学 FX10 の 600 計算ノードや九州大学 CX400の32計算ノードを用いた最大3.8億粒子の解析で ある.「京」を用いて, RIST の協力により LexADV EMPS のノード内とノード間のチューニングを行った. ノード 内のチューニングでは、キャッシュスラッシングが低い 確率ではあるが発生することが判明したため、データを 格納している配列をマージしたりパディングしたりする ことで、キャッシュスラッシングが発生する確率を大幅 に低下させることに成功した. ノード間のチューニング では、隣接間通信にノンブロッキング型の1対1通信 Isend-Irecv を用いると 24,576 ノード以上では"Unexpected Message" が多発してメモリを消費しすぎてデッドロッ クが発生する問題があったが、集団通信 Alltoally を用い ることで回避できることが分かり、72,000 ノードまでの 高並列計算が可能となった. さらに、粒子探索の高効率 化として,バケット内でソートした粒子を配列に格納す る方法を開発し、一般的なリンクリストを用いる場合と 比べて,キャッシュ再利用が改善し,高速化に成功した. また、粒子型解法の基礎となる近似作用素に関して、数 学的な打切り誤差評価や、より高精度な近似手法の提案 を行った.

#### 4 連続体力学向け DSL

本研究項目は,連続体力学向け DSL の開発と,それに

対応した多様なアクセラレータ向け最適化コード自動生 成の開発を行うものである. ポストペタスケールシステ ムのアーキテクチャでは、計算ノード間の並列性だけで なく計算ノード内での効率も重視される. 各計算ノード はメニーコアや GPU, SIMD 拡張命令といった多種多様 なアクセラレータを有し、これらを有効利用することが 望まれる. 従来のプログラミング言語やコンパイラ最適 化技術での対処は不十分であり,現状ではそれぞれのア クセラレータごとに人手で最適化された個別の実装が必 要とされている.一方,数値シミュレーションコードの 場合、特に連続体力学分野においては、そのアプリケー ションロジックは物理現象や数値解析スキームであり、 これは数学表現、特に行列やテンソルで表記されること が多い.よって,連続体物理モデルを DSL 化して,数学 記述(例えば、行列、テンソルの式を tex 形式で記述) から各アクセラレータタイプ向けに最適化されたライブ ラリを call するコードを生成するコードジェネレータあ るいはトランスレータアプローチが有効であると考えら れ、これを実現するシステムの開発を行った.

#### 4.1 DSL 基本機能

連続体力学向け DSL である LexADV\_AutoMT, および その C 言語および Fortran へのトランスレータ開発を行 った. DSL の文法構造としては、基本的に科学技術分野、 特に数学分野で広く使われている TeX/LaTeX を参考と した.本研究が主な対象とする連続体力学分野,特に非 線形固体・構造力学分野においては、その物理現象や材 料構成則を記述するために、テンソルあるいは行列・ベ クトル演算に基づく数式が多用されている.特にテンソ ル演算として、連続体力学分野への応用を念頭に、3次 元空間におけるスカラー,ベクトル,2 階テンソルおよ び4階テンソルに関する加減算および積演算などの各種 演算子群に対応させる必要がある. ここではまず, こう いった数式を記述可能な LaTeX のサブセットを設定し、 またコード生成に必要な変数の型情報など補助的なデー タをアノーテーションとして追加する構造を採用した. なお言語仕様や文法などの詳細については、開発初期段 階から研究グループ外のβテスターを獲得し、グループ 内外のユーザーからのフィードバック情報を元にさまざ まな検討を行った.

DSL としての AutoMT をユーザーが利用する際には, 前述の LaTeX サブセットのコードがコメントとして C または Fortran のソースコード内に挿入される形式をと る. そして, トランスレータによってそのコメント部分 が,対応する C あるいは Fortran のコードに置き換えら れる. このとき自動生成されるコード内において, 同名 のテンソルおよび小規模行列・ベクトル演算向けライブ 4

ラリ AutoMT が備える各種ライブラリ関数がコールされる. さらに、ライブラリ実装内部について、各種 HPC プラットフォームごとに、特に CPU ベンダーごとの特殊 命令や GPU、メニーコア等アクセラレータ向けに最適化 することが可能である. DSL 利用の流れを図9に示す.

#### 4.2 アクセラレータ対応コード自動生成

前述のように連続体力学分野向け DSL, LexADV AutoMT では、その低レベル層に行列・テンソ ル演算向けライブラリ(同名の AutoMT)を配置してい る. この LaTeX をベースとする DSL は前記のトランス レータにより C や Fortran コードに変換されるが、この ときトランスレータにより自動生成されたコード部分は 主にこの AutoMT ライブラリ関数・サブルーチンをコー ルする. よって, ここの部分を各種 HPC プラットフォー ムや特にアクセラレータ向けに最適化することで、結果 としてユーザープログラムが高速に動作することになる. ここでは、アクセラレータ対応コード自動生成として、 近年のスカラーCPUの多くが装備するSIMD命令セット および GPU 向けに性能最適化された AutoMT ライブラ リの高速バージョンを開発した. Intel および富士通 CPU のマルチコア及び SIMD 命令セット向け実装, CUDA に よる GPU 向け実装,メニーコア Xeon Phi 向け実装など を行った.

これらの実装に関して特に,主要な各種 HPC プラット フォームにおけるベンチマークテストを通して, SIMD 機構を用いたコードはこれに対応しないコードに比べ実 効性能で数倍程度の違いを有することがわかったため, SIMD命令およびGPU向け最適化としてSIMD機構に対 応する AutoMT ライブラリ実装を用意した. これは、あ るテンソル式または小規模な行列・ベクトル式に対し、 コンパイラによるベクトル化やGPUのスレッドを介し, 同時に複数のデータを作用させるものである. 通常これ は連続体力学ベースの数値解析コードにおいて、複数の 要素やセル、粒子データなどについて同じ一連の数式群 を評価していくことに対応する. 例えば, 有限要素解析 においてそのモデルデータは大量の有限要素から構成さ れるが、これら要素単位の演算は element-by-element (EBE) 演算と呼ばれる. シミュレーションプログラム のEBE 演算を行うコード部分のループ構成に関して、必 ず要素ごとループをある多重ループの最内側に配置する ようにしておく. その最内側ループボディにおいて、テ ンソルや小規模行列演算ごとに AutoMT ライブラリコー ルがなされる. このとき、これらのライブラリコールが 実際にはプリプロセッサマクロで実装されている、ある いはコンパイラによって確実にインライン展開されるこ とが保障されることにより、最終的にこの要素ループに 関してコンパイラを通したベクトル化がなされることに なる. さらに、こういった最適コードが共通に有する特 徴やパターンをまとめ、これをハイパフォーマンス・デ ザインパターンとして提案した. ハイパフォーマンス・ デザインパターンでは、まずテンソルや小規模行列、ベ クトルなどの数値計算分野向け抽象データ型について、 それぞれの変数を1つの配列や構造体ではなく、複数の スカラー変数の束として表現する.また、抽象データ型 が備える各種演算・操作について、これらを関数やサブ ルーチンの代わりにプリプロセッサマクロで実装する. このとき、Cプリプロセッサマクロのシンボル連結演算 子##を利用している.

これらの成果をまとめ、行列およびテンソル演算ライ ブラリ LexADV\_AutoMT として整備した.開発ライブラ リを用いた有限要素解析で現れる特徴的な計算パターン に対する、計算機の対ピーク性能値の評価結果を表1に 示す.当ライブラリを用いないオリジナルコードと当ラ イブラリを用いたチューニングコードの対ピーク性能値 をそれぞれ示している.いずれのケースでも高い性能向 上が得られていることがわかる.

#### 5 連続体力学系シミュレータ

本研究項目は、2 章から4 章で開発された基盤技術の 性能評価を行うために、連続体力学系シミュレータの開 発[6-10]を行うものである.

#### 5.1 シミュレータ実装

DDM 反復法ライブラリの応用例として、構造 FEM ソ フトウェア AdvSolid への組み込みを行った.「京」,名大 FX10・FX100,名大 CX400,名大 UV 2000,Xeon Phiマ シン、GPU マシンなど様々なアーキテクチャにおいて性 能評価を行った.特に、メニーコア環境においてスレッ ド並列効率が低下する傾向が観察され、 DDM アルゴリ ズム見直しについて DDM 反復法ライブラリ開発側にフ ィードバックした. また, 電磁場解析を重要アプリケー ションの1つと位置づけ、計画を一部前倒しして、電磁 場シミュレータの実装を行った.また、実証問題例であ る数値人体モデルによる医療向け電磁場解析において、 メッシュ形状が解析精度に与える影響について調査し, その結果を DDM 入出力ライブラリ側へフィードバック した. さらに,移動体を含む対象の並列計算を効率的に 行うため、階層型領域分割法をベースに新たなアルゴリ ズムを開発した.移動体を含む対象の解析ではタイムス テップごとに移動体の位置が変化し、移動体とそれ以外 の固定部との間でメッシュの接続関係が変化する. その ため固定部と移動体の接合部が1タイムステップ分ずれ

ても要素面が一致するようにメッシュを生成することで これに対応するといったことが広く行われている.本研 究でもこの手法を踏襲するとともに、領域分割後の小領 域表面に接合部の自由度が位置するよう固定部と移動体 のメッシュを個別に領域分割することとした. 個別に領 域分割することで小領域表面に位置した接合部の自由度 を part 間で共有されるインターフェース自由度として扱 うことで、移動体の移動に伴うメッシュの接続関係の変 化は、固定部側の part と移動体側の part の通信関係の変 化へと置き換えられる. これにより,時間発展とともに 変化する接合部の通信テーブルを事前に用意し、それぞ れの時間ステップで使用する通信テーブルを替えること で効率的な手法を構築できた. この手法の利点は,時間 ステップごとに異なる通信テーブルを使用する以外には 従来の階層型領域分割法とアルゴリズムとして差異がな いことである. そのため実装が非常に簡便であるととも に、これまで階層型領域分割法で積み上げられてきた効 率化・高速化の成果がそのまま適用できる. さらに階層 型領域分割法が適用できればこの手法も適用可能であり, 高い汎用性を有する手法となっている.

粒子法向けライブラリは実問題解析に適用可能かが重 要な評価指針であるため、当初計画を前倒しして、開発 中の粒子法向けライブラリを用いたシミュレータ実装並 び評価を並行して実施することとした. 粒子法向けライ ブラリでは、関数ポインタを用いて利用者が粒子の物理 量計算の関数を定義することができるので、解きたい物 理モデルを自由に組み込むことができる仕様となってい る. 粒子の動的負荷分散機能や大規模流体剛体連成解析 機能の実装を行った.これにより、多数の浮遊物(剛体) が津波で流される様子を計算することが可能となった (図 10). また, 直ぐに社会に役立つアプリケーションの 構築を目指すために、3 段階の津波計算を行える機能を 開発した. 第1の解析では震源で発生する波源から沿岸 部までの津波伝播計算(数十〜数百キロ四方程度),第2 の解析では沿岸部に押し寄せた津波が地上へ遡上する解 析(数 km~10km 四方程度),第3の解析では、市街地に 浮遊物が衝突しながら浮遊する市街地浸水解析(500m 四 方程度)である.この3段階の津波解析機能により、従来 からある波源から沿岸部までの津波伝播計算を利用して 津波の市街地解析を行うことが可能となった.

#### 5.2 シミュレータ評価

有限要素法によるシミュレータとして,構造 FEM ソフトウェア AdvSolid に DDM 反復法ライブラリを組み込み,400 万自由度から 1,134 億自由度規模までのサイズの問題に対し,「京」の 12 ノードから 24,578 ノードを用いて,強スケーリングと弱スケーリングによる並列効率評

価を行った.両指標において高い並列効率が示されたが, 2 万ノード規模では効率の低下がみられ、ポストペタス ケールシステムに向けての課題を見つけることができた. また、電磁場 FEM ソフトウェア AdvMagnetic にライブ ラリを組み込んだ、時間調和渦電流問題において反復解 法の収束性を大幅に改善し、東京大学 FX10の 720 ノー ドで35億自由度の渦電流解析精度検証問題を9時間弱で 求解することに成功した.また、移動体を含む対象の階 層型領域分割法による並列計算手法を回転機の電磁界解 析に適用し, FX10 上でストロングスケーリング評価を 行った. 6ノードから最大 384 ノードまで使用し, 96ノ ードまで並列化効率 90%以上という良好な結果を得た. 96 ノードを超えるとノードあたりの割り当て演算量が 著しく低下するため並列化効率が低下するが、それでも 384 ノードで 60%程度であった. また, 従来の有限要素 法による逐次計算で1ヶ月以上かかっていた計算が、48 ノードで8.39時間,384ノードで1.60時間と,大幅な高 速化を達成した. さらに, 高周波電磁波問題において境 界平滑化による計算精度の向上に取り組み,2億自由度 の人体モデルにおいて電界の精度を大幅に向上させるこ とに成功した(図11).

さらに、開発ライブラリを用いた粒子法シミュレーシ ョンソフトウェアの評価を行った.評価環境として「京」, 東京大学 FX10, 東京工業大学 TSUBAME2.5 (GPU), 名 古屋大学 FX100,名古屋大学 CX400 (MIC)を主な開発 計算機としてそれぞれのソルバーの性能向上をおこなっ た. 東大 T2K では, 64 計算ノード 1,800 万粒子から 1,024 計算ノード 2.6 億粒子へのウィークスケーリング性能評 価で94%の並列効率が得られ, 6,900 万粒子の64 計算ノ ードから 1,024 計算ノードの強スケーリング性能評価に おいて 93%の並列効率が得られた. 10 億粒子モデルを用 いて、「京」の48ノードから12,288ノードのスピードア ップ値 225.8 (理想値 256) を達成することができた. FX100では、12ノードから864ノードのスピードアップ 値 65 (理想値 72)を達成することができた. LexADV EMPS を用いて、3 段階の津波解析をシステム 化した. その結果、福島第一原子力発電所1号機タービ ン建屋内浸水解析と気仙沼での第18 共徳丸の遡上解析 を行うことができた. 昨年度までは1ヶ月程度掛かって いた解析を、「京」を用いることで3日程度に短縮するこ とができた. 観測データ等を用いて津波遡上シミュレー ション結果の妥当性確認を行い、十分な精度で現象を再 現できていることが示された(図 12).

#### 6 おわりに

ポストペタスケールシステムにおける超大規模な連続

体力学系シミュレーションを実用化するために、1 兆自 由度メッシュを並列生成可能な AdvMetis2, FEM や粒子 法シミュレーションに対して 10 万×10 万ピクセルの超 高精細な First Detail Image を描画可能な LexADV VSCG, 1千億自由度 FEM 解析に成功した LexADV IsDDM,数 億粒子の分散メモリ並列計算を可能にする LexADV EMPS, LaTeX 記述のテンソル表記構成式から 高性能なコードを生成する連続体力学向け DSL を含ん だLexADV\_AutoMT など、多くのソフトウェアを開発・ 公開することに成功した. これらのソフトウェアは, HPCI 戦略プログラムでの利用からポスト京重点課題で の採用と、ペタスケールからポストペタスケールへの橋 渡しを行っているシステムソフトウェアとしてその意義 は大きいと言える.本研究では有限要素法と粒子法に特 化して開発したが、得られた成果は連続体力学向けの他 の数値解析方法にも応用できるものであり、計算科学全 般での活用が期待できるものである.また,開発ソフト ウェアを用いて実施した津波遡上・浸水シミュレーショ ン結果の妥当性確認や写実的描画は、水害の予測や被害 の低減のために有用であることを示しており、安全・安 心社会基盤構築に貢献するものと言える. 今後は、本研 究成果を元に採択されプロジェクトを通じてポストペタ スケールシステムへの展開を進めていくとともに、ポス トペタ後も見据えた研究へと発展させていく予定である.

謝辞:本研究の一部は JST-CREST の研究課題「ポスト ペタスケールシミュレーションのための階層分割型数値 解法ライブラリ開発」および「文部科学省私立大学戦略 的研究基盤形成支援事業(平成24年度~平成28年度)」 による.あらためてここに記し,謝意を表す.

#### 引用文献

1) ADVENTURE システム: http://adventure.sys.t.u-tokyo.ac.jp/

- 2) LexADV システム: http://adventure.sys.t.u-tokyo.ac.jp/lexadv/
- Lijun Liu, Masao Ogino : Performance evaluation of efficient data compression JHPCN-DF for large-scale structural analysis, Mechanical Engineering Letters, Vol.2, p.16-00119 (2016)
- 河合浩志, 荻野正雄, 塩谷隆二, 山田知典, 吉村忍: 領域分割法におけるローカル Schur 補元アプローチ の性能評価, Transaction of JSCES, Vol.2016, 20160006 (2016)
- 5) 荻野正雄:対角スケーリング前処理を伴ったバラン シング領域分割法による複数材料モデルの有限要素 解析,日本機械学会論文集,Vol.82, No.833, p.15-00325 (2016)
- Y. Wada, K. Murotani, M. Ogino, H. Kawai, R. Shioya : High resolution visualization library for exa-scale supercomputer, Mathe. Prog. Expressive Image Synth. III, Springer, 83/94 (2016)
- Y. Imoto and D. Tagami : A truncation error estimate of the interpolant of a particle method based on the Voronoi decomposition, JSIAM Letters, 8, 29/32 (2016)
- 8) Masao Ogino, Hongjie Zheng, Kohei Murotani, Seiichi Koshizuka, Ryuji Shioya, Liu Lijun : Tsunami Run-Up and Inundation Simulations Using LexADV\_EMPS Solver Framework on Fujitsu FX100, SC16 Research Poster (Peer-reviewed International Conference) (2016)
- 室谷浩平,玉井佑,越塚誠一:流体シミュレーション における粒子法: MPS 法と LSMPS 法の数値解析精 度の比較,応用数理 26,50/61 (2016)
- Amane Takei, Kohei Murotani, Shin-ichiro Sugimoto, Masao Ogino, and Hiroshi Kawai : High-accuracy electromagnetic field simulation using numerical human body models, IEEE Transactions on Magnetics, Vol.52, No.3 (2016).



図1 CAD データへの形状適合を伴った細分割による超大規模メッシュの並列生成



図2 領域内部自由度削除による DDM 圧縮



図3 JHPCN-DFの許容誤差が可視化結果に与える影響



1.E+05 1.E+04 Speed-up ratio 1.E+03 Pantheon 4M dofs ver 2.0 1.E+02 Pantheon 29M dofs ver 2.0 Pantheon 228M dofs ver 2.0 1.E+01 -Pantheon 14b dofs ver 2.0 Pantheon 113b dofs ver 2.0 1.E+00 1.E+02 1.E+03 Number of MPI processes 1.E+00 1.E+01 1.E+04 1.E+05 図 51 DDM 反復法の京における強スケーリング



図6 Scaled-BDD 法を用いた複数材料モデル(Emax/Emin>102)における収束性改善

600 Number of iterations

500

700 800 900 1000

100 200 300 400

0

図4 1,000 億自由度有限要素解析における反復法の収束履歴



図7 CPU(Core i7-2700K)と GPU(GeForce GTX 980)併用における DDM 性能評価



図 8 メニーコア(Xeon Phi 5110P)における DDM 性能評価



図9 連続体力学向け DSL 利用の流れ



図 10 LexADV\_EMPS を用いた多数の剛体を含む計算の様子



図 11 AdvMetis2とAdvMagneticHF による高精度な温熱療法シミュレーション



図 12 LexADV\_EMPS を用いた津波遡上解析結果の妥当性確認

計算機	Intel x86 (Sandy Bridge) +		Fujitsu SPARC64 IXfx +		
	Intel コンパー	イラ	富士通コンパイラ		
コンパイラ					
コード	オリジナル	チューニング	オリジナル	チューニング	
構造解析·要素剛性	21~%	70 %	8 %	44 %	
非線形材料構成則	16 %	31 %	6 %	40 %	
熱伝導解析·要素剛性	24~%	50 %	12~%	38 %	

### 表1 有限要素解析向けベンチマーク結果

#### 田村善昭

#### 1 はじめに

コンピュータグラフィックス(CG)を用いた可視化は, 計算力学においてはその当初から重要な要素であり、例 えば1963年にはE. E. Zajacが人工衛星の運動を可視化 する動画を作成している <sup>1)</sup>ように、解析結果の数値では 分からなくても、映像化することでその理解が進むこと はよく知られている.計算機が進歩し、解析規模が大き くかつ複雑になってくると、一段と可視化の重要性は増 してくる.かつては、研究者がそれぞれで書いたグラフ イックスのプログラムを用いたりしていた<sup>1</sup>が,今日で は、使い勝手にも優れ、機能豊富な市販ソフトウェアや 無償ソフトウェアが多く流通している.しかし、それら の多くは例えば流体解析や構造解析などに特化したもの であり(逆にそのために使い勝手が良い)、本稿で扱お うとしている流体―構造連成解析に対応するものは余り ない. そこで, ここでは流体―構造連成解析の結果を可 視化表示するシステムを新たに開発する. さらに, 解析 の妥当性を視覚的に検討するため、対応する実験結果を 同時に表示する. 解析も実験も表示すると, 映像が煩雑 になり、逆に理解をしづらくする可能性があるので、こ こでは立体視、特にバーチャルリアリティ(VR)の装置 を用いることを考える. VR を用いた可視化は過去にい くつか例がある<sup>3),4)</sup>が、実験との比較や妥当性の検証の ためには用いられてきていない. 以下の章では, 東洋大 学計算力学研究センター(以下,本センター)で開発し た流体--構造連成実験・解析同時可視化システムの詳細 とその利用例を紹介するとともに、今後の展望について も簡単に触れておきたい.

#### 2 流体—構造連成実験・解析同時可視化システム

#### 2.1 VR の必要性

本題に入る前に,まず VR がなぜ必要かについて述べ ておきたい.先に挙げた<sup>3,4</sup>ように,VRを用いた可視化 はいくつか例があり,それぞれ効果があると結論づけて いるが,一般的には「VR でなくともよい」「立体視をす る必要はない」と考えられていることが多いと思われ る.

1 良く知られたものとして, NASA エイムス研究所の PLOT3D<sup>2)</sup>がある.

理論上, 3次元のものは3次元で見るべきであり, 立体 的に見えればそれに越したことはないのだが、一方で、 見る側の理解力にも限界があり、同時に多くのものを提 示されても結局はその一部しか注目しないので、そうで あれば3次元的に見る必要はない、コンピュータの画面 (モニタ)で十分、という結論になっているのではない かというのが著者の現在の理解である. それでは、なぜ ここであえて VR を利用するのかには、いくつか理由が ある. ここでは実験の画像(動画)と可視化結果を同時 に動かして比較したいのだが、2つを横に並べただけで は、その微妙な違いは分かりづらい. そこで、ここでは 両者の位置を合わせ、重ねて表示する. これをモニタで 行ったのではあきらかに見づらいが, 立体視をすると, 位置が重なっていても両者は区別できると考える. さら に、単なる立体視ではなく、VR であると、観察者が位 置を移動することで、自由な角度から観察できるため、 より分かり易くなるはずである. もう1つの理由は, VR では可視化したいモノを目の前に適当な大きさで表示で きることである. モニタでは映像の大きさはモニタの大 きさによるが、VR では自分が見たい、あるいは実際に そうであるような大きさに見せることが可能である.こ れは見逃されがちであるが、ヒトが現象を理解するには 重要であると考える. 図1は著者が以前に作成した傾斜 型1面大型スクリーンによる VR 装置による可視化の例 5) であるが、スクリーンに映っている機体が、観察者に



図1 傾斜型1面大型スクリーン VR 装置 (CANVAS) による可視 化例. 観察者からは図のように機体が飛び出して見えている.

2

は図のように眼前にあるかのごとく見えている(もちろん図1はイメージ図であるが).以上の考察から、流体 一構造連成実験・解析同時可視化システムは VR を用い るのがよいと考え、システム開発を行った.

#### 2.2 VR 装置について

ここでは、VR 装置として、没入型ディスプレイ (Immersive Projection Technology; IPT) に分類され る装置を用いている. IPT は大型のスクリーンで視野を 覆い、その前に立つ観察者の視点位置をなんらかの方法 で計測し、その視点位置に応じた立体映像をスクリーン に投影する仕組みを指す.後で述べるゴーグル型ディス プレイ (Head Mounted Display; HMD) とは異なり、3D 映画を見るときのような立体眼鏡をかける.本センター では、クリスティ・デジタル社製の IPT 型 VR 装置 HoloStage®-Mini<sup>6</sup> (以下, HoloStage) を所有しており、 これを使用する. HoloStage を図2に、HoloStage で用 いるコントローラと立体眼鏡を図3に示す.



図2 HoloStage®-Miniの全景



図3 HoloStage®-Mini で用いるコントローラと立体眼鏡. グ レーのボールは位置と向きを赤外線カメラで計測するためのマ ーカである.

立体視は時分割方式を用いている. これは、立体眼鏡が

液晶シャッターになっており,右目,左目それぞれに対応する映像が交互に(例えば1秒間に60回ずつなど)表示されるのに同期して,反対のレンズを閉じる仕組みである.また,視点位置は眼鏡に付けられた4つのマーカを,HoloStage上部に付けられた4つの赤外線カメラで撮影し,リアルタイムにその位置と向きを計測するようになっている.図2から分かるように,スクリーンは正面と床面の2面で,正面は背面投影となっている.床面は上から直接投影するので,観察者の影になるところは映像が映らないことになるが,実際には気にならない程度である.

#### 2.3 システム構成

HoloStage を用いた流体―構造連成実験・解析同時可 視化システムの構成を図4に示す.



図4 流体―構造連成実験・解析同時可視化システム構成図

現状では、本センターにおいて、HoloStage にVR映像を 表示するソフトウェアは, AVS/Express MPE<sup>7)</sup>(以下 AVS-MPE)とVR4MAX<sup>8)</sup>の2種類であり、これに各種データ を渡すシステムを構築している.現在,主な経路の1つ はAVS-MPE を経由するもので、本センターの研究員が多 く使用する ADVENTURE システム <sup>9</sup>のデータはそのまま AVS-MPE に取り込むことができる. AVS-MPE のベースに なっている AVS/Express (以下 AVS) は汎用の可視化ソフ トウェアであり、流体解析結果も構造解析結果も表示す ることができるので、今回の用途には適している.他の シミュレーションソフトウェアの結果についても、変換 ツールがあるものは、表示が可能である.実験の画像に ついては,静止画,動画とも特定の形式に変換して AVS-MPE に取り込む.上記の解析,実験画像は共に, AVS の機能である、ネットワークエディタによる. その 一部を図5に示す. 左はUCDと呼ばれる有限要素法に基 づくデータ形式のファイルを読み込むもので、右はこれ に連番の画像(動画を1枚ずつの静止画にバラしたもの)

を同期させて表示する機能を追加した様子である.



図5 AVS-MPE のネットワークエディタの一部. 左は解析デー タを読み込む部分,右はそれに連番の画像を同期させて表示す る部分を追加したものである.



図6 AVS-MPE のネットワークエディタ画面

全体のイメージは図6のようになっている. もう1つの 経路は、VR4MAX を用いるものである. AVS-MPE が可視化 ソフトウェアの拡張として VR 装置に対応しているのに 対し、VR4MAX は元々VR のための CG ソフトウェアである. ただし、VR4MAX にはモデリング機能がないので、ここ では 3ds Max<sup>10</sup> で CG モデルを作っている. シミュレーシ ョンのソフトウェアから直接 3ds Max 用のデータを出力 することはできないので、ここでは自作の可視化ソフト ウェアで可視化データを作り、これを VRML(Virtual Reality Modeling Language)形式にして 3ds Maxに渡す ようにしている. VRML はテキスト形式なので、データ 容量は大きくなるが、変換は難しくない. 実験の画像に ついては、3ds Max 内で定義したオブジェクトにテクス チャとして貼ることで表示を可能にしている.

#### 3 表示例

ここでは、流体一構造連成実験・解析同時可視化シス テムによる流体一構造連成問題の表示例を紹介する.対 象は、他の記事「流体構造連成コード検証のための標準 問題の提案および実験」の標準問題である.重複を避け るため、詳しくは述べないが、図7のように、風洞の出 口に上部から円柱を吊るし、レーザー変位計で変位を、 また高速度カメラで動画像を撮影している. 図8にその 動画像の1コマを示す. 左は横からの画像で,流れは左 から右で,わずかに流れ方向に変形していることが分か る. 右は円柱を下から撮影したものである. これらの画 像は, 1コマずつの連番画像にし, AVS-MPE に渡す.



図8 実験の動画像の1コマ. 左は横から見た映像で,流れは 左から右. 右は下からの映像である.

一方,解析はこれも他の記事「Enriched Free Mesh MethodとSUPG/PSPG安定化有限要素を組み合わせた効率的な流体構造連成解析システムの構築」で紹介されている手法を用いて行った.図4では「その他解析ソフト」になるが,ADVENTUREの入出力を模してデータを出力しているため,これもそのままAVS-MPEで可視化が可能である.

2章の説明では、データさえ揃えば、すぐにも HoloStage で表示ができるように書いているが、実際は その前にもう少し作業が必要である. AVS は汎用の可視 化ソフトウェアであるため、何をどう可視化するかは事 前に用意されていない. そこで, 解析結果に関しては, 図5および図6のネットワークエディタを編集し(だか らエディタ),自分が見たい可視化手法で可視化された 画像を表示する必要がある. そこでまず, HoloStage は 使わず, PCのAVSにより, 見たい画像が出るようネット ワークを構築する. 更に、 ネットワークのモジュール (図5および図6の文字が書かれた箱)の詳細設定によ り、実験画像と解析結果の位置合わせなどを行う.結果 として、空間も時間も重なって表示されるので、これを ここでは時空間同時可視化 (space-time simultaneous visualization) と名付けている. 図9にPCモニタのイ メージを示す. 2つの実験映像に加え, 解析結果が重な って表示されている.もし、この状態で実験と解析の比 較を行うのだとすれば、位置合わせをして重ねて表示す

#### るよりも、横に並べる方がむしろ分かり易い.



図 9 PC上でAVS/Express により表示した実験の動画像と解析 結果の同時表示



図 10 HoloStage での流体 構造連成実験・解析同時可視化の 様子.像が二重になっているのは立体視で右目と左目の映像を 交互に投影しているため.上部の円環上の光は位置計測のため の赤外線カメラの光源である.

次にこれをそのまま HoloStage に移動し、表示をする. 図 10 に少し離れたところから撮った写真を示す. 誌面 では図9とさして変わらないが、実際にはいくつかの点 で大きく異なる.まず、立体視をしているので、右目と 左目のそれぞれの映像が交互に投影されている.図 10 では露光時間の関係でその両方が写っており、例えば下 から見た円柱が二重に表示されているのが分かる.また、 図9がモニタサイズであるのに対し、図10はHoloStage に表示している画像は十分に大きい.さらに、実際には VR であるため,左右に回り込んだり,上や下から眺める(スクリーンからはみださなければ)ことも可能である.



(a) 実験映像と解析結果の位置をずらして表示したところ. 一般的な比較の際の配置



(b) 円柱の底面の実験映像と解析結果の円柱の底面の位置を合わせて表示している.ここで提案している時空間同時可視化の一例である.

図 11 HoloStage での流体一構造連成実験・解析同時可視化の 観察者から見たイメージ

図 11 に観察者の視点から見た映像を2つ示す.図 11(a)は、敢えて実験映像と解析結果の位置をずらして 表示している.奥に実験画像、手前に解析結果が表示さ れている.これはこれでそれぞれを詳細に観察すること ができるが、より比較に適しているのは図 11(b)で、こ ちらは円柱を下から撮った映像と解析結果の位置を合わ せているので、円柱の底面の動きを容易に見比べること ができる.

#### 4 考察と今後の展開

今回開発したシステムの最大の利点は,実験と解析を 同時に VR 空間内に表示できることであり,これにより

従来以上に分かり易い比較ができると共に、VR を用い ることの意義も示すことができたと考えている.ただし、 本システムにはまだまだ不十分な点が多い.時空間同時 可視化を謳ってはいるが、時間合わせ、位置合わせは完 全に手作業で、時間合わせに関しては、解析と同じタイ ミングの実験映像を並べる必要があり、 位置合わせに関 しては基準時刻で両者が一致するように手で微調整して いるのが現状である.また、実験映像はその撮影距離等 により特に映像の周辺で歪みが避けられないが、その補 正は今のところ何もしていない. より厳密な比較をする ときには問題になるかもしれない. さらに、今回の標準 間題のケースでも、円柱の弾性率によっては変形がわず かで,直接見たのでは分からないこともあった.解析の みであれば、変形を誇張して描くことも可能であるが、 実験と比較するとなると、実験画像でそのような変形を 行うのは容易でない. ここでは示していないが, 流体で あれば、圧力や速度などは間に画像処理をはさむのでど のようにでも処理が可能であるが、連成問題であるが故 の困難さとも言える.

今回は、AVS-MPE を中心とした可視化を行ったが、 3ds Max→VR4MAX の可視化には別の可能性がある.3ds Max も VR4MAX も CG のためのソフトウェアなので、表示 に関しては AVS-MPE 以上に様々な工夫ができる.写実的 な CG を駆使して VR 空間をよりリアルなものにし、あた かも実験室で、あるいは現場で可視化を行っているよう に見せることもできよう.

最後に、HMD の可能性についても述べておきたい. 平 成28年はVR元年などとも呼ばれ、民生用のHMDがこれ までになく数多く発売された. 著者はそのうちの1つで ある Oculus Rift<sup>11)</sup>(以下 Oculus)を購入し、使用し始 めたところであるが、アプリケーション開発に関しては 既に環境が整っており、Unity<sup>12)</sup>を使えば、学部生レベ ルでも簡単に Oculus のアプリケーションを作ることが できる.以前から指摘されていた、HMDではCGの描画が 視点の動きに追従できないという問題は、近年の PC (特 にグラフィックスボード)の性能向上により、ほぼ解決 している. ただし、HoloStage 等の立体眼鏡と比べると ゴーグル型ディスプレイは物理的にも装着感があり、ま た,視野も IPT よりは狭く, VR 酔い(VR を体験中に気分 が悪くなること)も起こり易い気がする.ただし、HMD は IPT より2桁程度も安価であるので、アプリケーショ ンや使い方を工夫すれば、新しい可視化装置として役立 つものになるのではないかと思う.

#### 5 おわりに

本センターで開発した流体—構造連成実験・解析同時 可視化システムを中心に VR 装置を利用した可視化につ いて述べた. 図1に示した IPT 方式の VR 装置である CANVAS を開発した 2002 年当時は立体視や視点位置計測 のためのライブラリなども自作に近く,多くのプログラ ミングが必要であったが,ここで紹介した HoloStage の 場合は,AVS-MPE や VR4MAX,3ds Max などの商用ソフト ウェアを利用しており,さらに Oculus ではより簡便に アプリケーションが開発できるなど,VR を取り巻く環 境は大きく変化しつつあり,工夫次第で解析結果の可視 化表示やあるいはその妥当性を検証するような仕組みが 可能であると思っている.

5

#### 謝 辞

本研究の一部は「文部科学省私立大学戦略的研究基盤 形成支援事業(平成24年度〜平成28年度)」による。あ らためてここに記し、謝意を表す.

#### 引用文献

- E. E. Zajac: Computer-made perspective movies as a scientific and communication tool, Communications of the ACM, 7, 169/170 (1964)
- P. G. Buning and J. L. Steger: Graphics and flow visualization in computational fluid dynamics, AIAA Paper 85-1507-CP (1985)
- Kageyama et al.: Visualization of vector field by virtual reality, Progress of Theoretical Physics Supplement, 138, 665/673 (2000)
- 4) 矢野ほか:振動触覚グローブを用いた流れ場表現,情報処 理学会論文誌,40-2,414/421 (1999)
- Y. Tamura: Development of an immersive display system for flow visualization, Japan Korea Computer Graphics Conference 2002, 7 (2002)
- 6) Christie HoloStage ® Mini spatially immersive environment: https://www.christiedigital.com/en-us/3d/products-an d\_solutions(stepderd\_projection\_solutions(shpistic))

d-solutions/standard-projection-solutions/christie-h olostage-mini

7) AVS/Express MPE:

http://www.cybernet.co.jp/avs/products/mpe/

- 8) VR4MAX: http://www.tree-c.nl/products/vr4max/
- 9) S. Yoshimura et al.: Advanced general -purpose computational mechanics system for large-scale analysis and design, Journal of Computational and Applied Mathematics, 149, 279/296 (2002)
- 10) 3ds Max:

http://www.autodesk.co.jp/products/3ds-max/overview
11) Oculus Rift | Oculus:

http://www.oculus.com/en-us/rift/

12) Unity: http://unity3d.com/jp/unity