

事後評価に係る報告書

戦略分野名： HPCI 戦略プログラム
分野4
次世代ものづくり

平成28年2月1日

分野4 統括責任者

国立大学法人東京大学 生産技術研究所

加藤 千幸

目次

1. 戦略分野概要	1
2. 研究開発目標	1
3. 課題の達成状況等	5
(1) 研究開発目標の達成状況等について	5
①研究開発計画（平成28年2月1日時点）	5
②研究開発目標及び研究開発計画の変更理由と対応	14
③目標達成状況（平成28年2月1日時点）	15
④中間評価等指摘事項への対応	21
⑤研究開発成果（平成28年2月1日時点）	45
⑥独創性・優位性について	303
(2) 研究開発体制について	310
(3) 成果の利活用について	326
4. 今後の展望	329
5. その他	331

事後評価に係る報告書

課題名： HPCI 戦略プログラム 分野4 次世代ものづくり

1. 戦略分野概要

スパコン「京」によって大きなブレークスルーが期待されるとともに、その成果によるものづくり産業全体への波及効果が大きい課題を中心とし、次の3つのグループに分類した研究開発とその実証を産学連携体制により推進する。[Ⅰ]社会基盤・民生機器の抜本的効率化・小型化・静音化を実現する革新技術創出支援システムの研究開発、[Ⅱ]未来社会へ向けた価値の創造・製品化プロセスを抜本的に加速する次世代設計システムの研究開発、[Ⅲ]大規模プラントの信頼性を抜本的に向上させる次世代安全性・健全性評価システムの研究開発。一方、計算科学技術推進体制構築では、スパコン「京」を中核としたシームレスな HPC 計算機環境の形成、最適化されたスケラビリティの高いアプリケーションソフトウェアラインアップの整備を行う体制構築とともに、利用階層別 HPC 人材育成・普及プログラムを実践する仕組みの構築により、ものづくり分野におけるトップランナーの輩出と同時に中堅・中小企業層の HPC への参入を促進し、広範にわたる我が国ものづくり産業の抜本的な国際優位性強化に貢献する。

2. 研究開発目標

我が国は世界に類をみない高品質の製品を作り出すことによって高い評価を受け、それが国際競争力強化に大きな役割を果たしてきた。しかし、21 世紀においてもその特徴を生かしながら、更なる発展を遂げるためには、抜本的なものづくりの生産性向上とともに、革新的な技術開発による製品の変革（あるいは新製品の創出）の両面に対する効果的な施策を打つことが必要不可欠とされてきている。これらの課題に対して、ITの活用が極めて重要な役割を果たすことはすでに周知の事実であり、特に前者（生産性向上）をターゲットにおいた取り組みとして、1990 年代からいわゆるデジタルエンジニアリング化の急速な進展が図られ大きな効果を上げてきた。グローバルな協業が今後のものづくりの経済性、効率性の観点から避けられない状況にあつて、この傾向は今後も益々拡大することが予測される。一方、後者（製品の変革）については、地球環境改善に対する極めて高い目標の設定・遂行、自然災害やテロなどに屈しない安全・安心社会構造の構築などが我が国にとって国際的なリーダーシップを発揮するための重要な国策になってきている状況のなかで、極めて緊急性の高いテーマになってきた。これらの課題に対応するためには、その芽となる多分野にわたる先端的な技術手段の研究開発はもとより、それらを統合・最適化して実際の製品を設計するプロセスの質的・時間的な変革が不可欠である。前記のITを活用したものづくり全体の仕組みの中で、特に計算科学技術はそのための最も重要な手段であり、従来のイメージを大きく超えた役割を果たすことが必要である。具体的には、革新的製品設計において根幹をなすプロセスである、課題解決に有効なコンセプトの定量的評価・選定→全体組合せ最適化→形状最適化という概念設計から詳細設計に至る大量データの計算処理プロセスの飛躍的な高速化を図ることと、詳細設計完了後の製品全体の機能の確認・様々な稼動状態での動作予測を高精度に実施することが要求される。我が国を取り巻く国際環境の変化により、今後これらの課題に対する解決策の創出を従来の計算機環境では到底不可能なスピード感をもって総合的に実現する必要がある。それにはスパコン「京」なみの性能を有する計算機を駆使した戦略的な計算科学技術の推進が前提条件であり、それ以外には達成できる手段はない。

上記の戦略目標を達成するため 3 つのグループに分類した具体的研究課題を設ける。それらの課題は前述のように、設計プロセスの革新を図るものと製品そのものの革新を図るものに分けられ、それぞれ具体的な達成目標を掲げて実施する。各課題を解決するためにそれに特化したアプリケーションソフトウェアの機能増強に関する研究開発を実施するが、本事業終了後は実際の設計業務に適用することによって継続的なイノベーション創出に貢献する。またソフトウェアに関する成果については、汎用的に利用できるアプリケーションラインアップを整備するとともに、それを利用した具体的な課題対応の一連の計算プロセスをテンプレートとして蓄積することにより、再利用や応用利用面での抜本的効率向上に資する。研究開発するこれらのソフトウェアは関連するデータベースを含んだプラットフォームとして管理・運用する仕組みを構築することによって、ものづくり分野等における広範の将来課題に柔軟に応用することが可能になる。課題毎の目標を以下に記す。

(1) 輸送機器・流体機器の流体制御による革新的高効率化・低騒音化に関する研究開発

マイクロデバイスによる流体制御を新たな流体機器設計の概念として提案、その有効性を数値シミュレーションによって実証することで流体制御技術として確立し、その実用化に向けた道を示すことを具体的な目標としている。時系列的には、1)大規模流体制御解析用の解析ソフトウェア整備を行った上で、2)マイクロデバイスの作動原理の解明を進め、それに基づいて実用化課題の克服に向けた設計パラメータサーベイによるロバスト性の確認、最適パラメータの発見、そして主たる目標であるマイクロデバイスを用いた流体制御技術の有効性を実証する。後半では、3)産業界の実用に向けたフィードバック制御機構の組み込みとシミュレータ構築といった研究を一段ずつ進めていく。大きな目標である流体機器設計の革新は10年規模での将来成果になる。一方で、「ものづくり」という分野の特性を踏まえて、最終目的である産業界での実用に向けた取り組みも本研究段階からスタートし、「京」コンピュータを利用したシミュレーションを通じて実際の開発のための知識基盤とそれに基づく機器設計概念を提供するとともに、具体的な応用でその有効性を示していく。

(2) 次世代半導体集積素子におけるカーボン系ナノ構造プロセスシミュレーションに関する研究開発

次世代ナノデバイス開発では、従来の延長線上にない新規な材料・プロセスを用いたデバイス開発が必須であり、非シリコン系新規材料(炭素系材料、SiC 等)を用いた高機能デバイスの開発が産学官連携で大規模に実施されているが、これら新規材料に対するプロセス・デバイス構造の最適化技術の欠如が問題である。本研究課題では、カーボン系エレクトロニクスや SiC パワーデバイス等のナノスケール世代の半導体デバイスにおいて要求される非シリコン系材料に関して、ナノ構造プロセスの共通要素的な部分に関する知見基盤を構築し、“次世代ものづくり”における研究開発の高度化、高速化に貢献することを目指す。具体的には、非シリコン系新規材料の次世代ナノデバイス応用の計算科学的評価と最適化指針の構築、及び、ナノ材料探索に関するシミュレーション環境の構築と産業界が使える形での提供を目的とする。

(3) 乱流の直接計算に基づく次世代流体設計システムの研究開発

本研究開発課題においては、実用上の効果が実証されたターボ機械、自動車および燃焼・ガス化装置の空力・熱性能設計支援システムを構築することを目標とする。それぞれの設計システムの主要な目標スペックは以下に示すとおりである。

【自動車用次世代空力設計システム】

1) 設計システムの入力情報

- ・ 車体形状に関する CAD データ、構造物の材料特性、自動車の走行条件などが与えられれば、車体に作用する非定常空気力やそれによる車両の運動、車体の構造振動、エンジンルーム内部や排管系の温度分布、および、車室内の音場を計算するための計算格子などの入力データが半日以内に作成できるようにする。なお、計算格子は階層的細分化格子を利用する。

2) 設計システムの出力情報

- ・ 自動車に作用する定常空気力(抗力、揚力、横力、およびピッチング、ローリング、ヨーイングモーメント)を風洞実験と同等、あるいはそれ以上の精度で予測可能なものとする。
- ・ 路面凹凸や走行車線の変更時、大気乱流による突風を受けた場合、すれ違い走行時、隊列走行時等に車体に作用する非定常空気力やそれによる車両の運動を±10%以内の精度で予測可能なものとする。
- ・ 車体周りの流れに起因の車体の振動・車室内騒音を 3dB 以内の精度で予測可能にする。
- ・ エンジンルーム内の温度分布を±10%以内の精度で予測可能にする。

3) 計算時間等

- ・ 1ペタフロップスから数ペタフロップスの計算機リソースを用いて、一晚(12 時間)以内に流体・構造・音響・熱計算が完了し、上記②の出力情報が得られるものとする。

4) 設計システムのインターフェース

- ・ 設計者自身が現在の CAE システムと同程度の負荷により当該設計システムを利用することが可能となるようなインターフェースを完備する。
- ・ 上記のことを実現するために、使用マニュアル、チュートリアルデータなどに加えて、標準的な計算ケースを想定し、それぞれに関して、テンプレートを準備することなどにより、設計者でも比較的容易に使用できる設計システムとすることを目指す。

【ターボ機械用次世代設計システム】

1) 設計システムの入力情報

- ・ 設計者(あるいは、CAE 専任者)は対象とするターボ機械の CAD データから比較的中規模(数 1,000 万格子点から最大 1 億格子規模)の計算メッシュを外部のメッシュ作成ソフトを利用して作成し、設計システムに入力すれば、あとはメッシュの細分化は自動的に行えるようにする。
- ・ 流路形状以外で必要となる入力データとしては、作動流体の種類と物性値(粘性係数、飽和蒸気圧:キャビテーション解析を実施する場合)、ターボ機械の流量、回転数、基準点における圧力(キャビテーション解析を実施する場合)などのデータを専用インターフェースから入力する。

2) 設計システムの出力情報

- ・ ターボ機械の一般性能、キャビテーション性能(水力機械の場合)が現状のループ試験と同等、あるいはそれ以上の精度で予測可能であること。また、流体起因の振動・騒音に関して、3dB 以内の精度で予測可能とする。

3) 計算時間等

- ・ 1 ペタフロップスから数ペタフロップスの計算機リソースを用いて、一晚(12 時間)以内に1ケース(流量点)の計算が完了する。

4) 設計システムのインターフェース

- ・ 設計者自身が現在の CAE システムと同程度の負荷により当該設計システムを利用することが可能となるようなインターフェースを完備する。

【次世代燃焼・ガス化装置設計システム】

1) 設計システムの入力情報

- ・ バーナの旋回角度等を入力すれば自動的にその旋回角度をもつバーナおよび燃焼器の形状格子が作成できるようにする。
- ・ 燃焼・ガス化装置形状に関する CAD データ、燃料流量、および空気流量などの燃焼条件を入力する。

2) 設計システムの出力情報

- ・ 燃焼器出口における燃焼・ガス化効率、ガス温度、および NO_x やすすなどの様々な化学種濃度を予測可能とする。

3) 計算時間等

- ・ 1ペタフロップスから数ペタフロップスの計算機リソースを用いて、一晚(12 時間)以内に燃焼・ガス化計算が完了し、上記②の出力情報が得られるものとする。

4) 設計システムのインターフェース

- ・ 設計者自身が現在の CAE システムと同程度の負荷により当該設計システムを利用することが可能となるようなインターフェースを完備する。

(4) 多目的設計探査による設計手法の革新に関する研究開発

多目的設計探査は、多目的設計最適化などにより求められた多目的設計問題のパレート最適解から自己組織化マップや散布図行列などのデータマイニング手法を用いて設計に役立つ知見を抽出する日本発の革新的な設計支援フレームワークである。本研究開発課題では、多目的設計探査を構成する(1)多目的設計最適化手法、(2)応答曲面近似手法、(3)データマイニング手法、の研究開発に取り組み、実際の製品設計プロセスにおいて頻繁に直面する大規模多目的設計最適化問題まで効率的に解くことができる新しい多目的設計探査技術を開発する。また、研究機関や企業と研究開発を進めながら、京コンピュータを用いて、大規模多目的設計最適化問題に取り組み、多目的設計探査の有効性を実証する。これにより「京」クラスの計算機資源が企業でも利用可能になってくる 2020 年代に日本のものづくりを革新することを目指す。

(5) 原子力施設等の大型プラントの次世代耐震シミュレーションに関する研究開発

強固な産学官連携体制の下、大型プラントのものづくりで必要とされる、実験では不可能な詳細かつ一体的な耐震シミュレーション技術(丸ごとシミュレーション技術)を研究開発し、開発した技術の機能確認と動作検証及び具体事例への適用実験を行う。これにより、原子力施設などの大型プラントにおいて設計用基準地震動に対する安全余裕を一層合理的に設定する方法の確立に貢献していくとともに、安心・安全社会の構築に資することを目標とし、大型プラントの丸ごとシミュレーションを行い、プラント内における大きな応力が発生する箇所、及びその分布などに基づき、プラント全体での俯瞰的な耐震裕度評価とプラント各部ごとの詳細な評価を可能とする。

(6) 計算科学技術推進体制構築





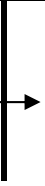
国プロ等で開発された(あるいは開発中の)アプリケーションを有効利用する方針のもとで、「HPC次世代ものづくりプラットフォーム」を構築し、これをHPCハードウェアインフラに最適化して移植することにより、高度で多様なニーズに柔軟に対応できる仕組みを構築することを基本的方策として掲げている。このプラットフォームにおけるアプリケーションの一部は、研究開発課題推進のためのベースアプリとして利用されるとともに、それによって得られる先端的研究成果はアプリケーションの機能強化へとフィードバックされる。また、本プラットフォームは計算科学技術推進体制構築において実施する人材育成や成果普及などの諸施策における標準的なソフトウェア資源として活用されることにより、それらの施策の継続的・効率的推進に極めて大きな貢献が期待できる。事業終了後における持続的な管理・保守体制の仕組みを構築することにより、研究開発・人材育成・ものづくり産業・情報産業などを中心とする幅広い用途への応用展開を可能とする。

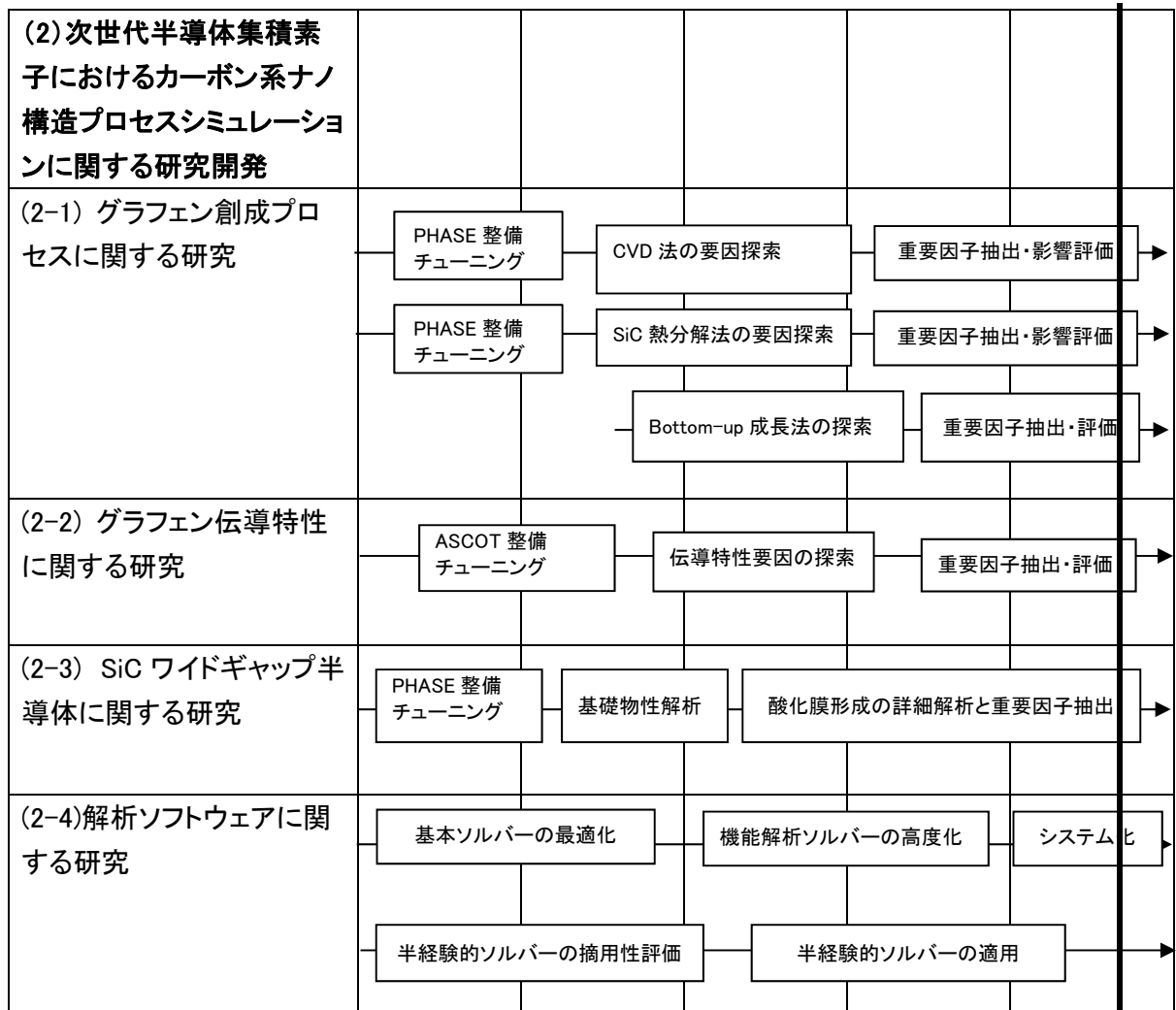
3. 課題の達成状況等

(1) 研究開発目標の達成状況等について

① 研究開発計画(平成28年2月1日時点)

研究開発項目及び小項目	平成23年度	平成24年度	平成25年度	平成26年度	平成27年度
(1) 輸送機器・流体機器の流体制御による革新的高効率化・低騒音化に関する研究開発					2月1日
(1-1) 大規模流体解析ソフトウェアの整備に関する研究					
(1-1-1) LANS3Dのチューニングに関する研究	LANS3Dのチューニング/大規模並列化	→			
(1-1-2) 複雑形状、制御/連成の対応に関する研究	前後処理ツールの拡充	→			
(1-2) 流体制御メカニズムの解明に関する研究					
(1-2-1) 低レイノルズ数での現象理解と知識基盤の構築	設計パラメータの知識基盤の構築	制御メカニズムの定量評価	→		
(1-2-2) 中レイノルズ数での現象理解と知識基盤の構築			中レイノルズ数における制御メカニズムの現象解明	→	

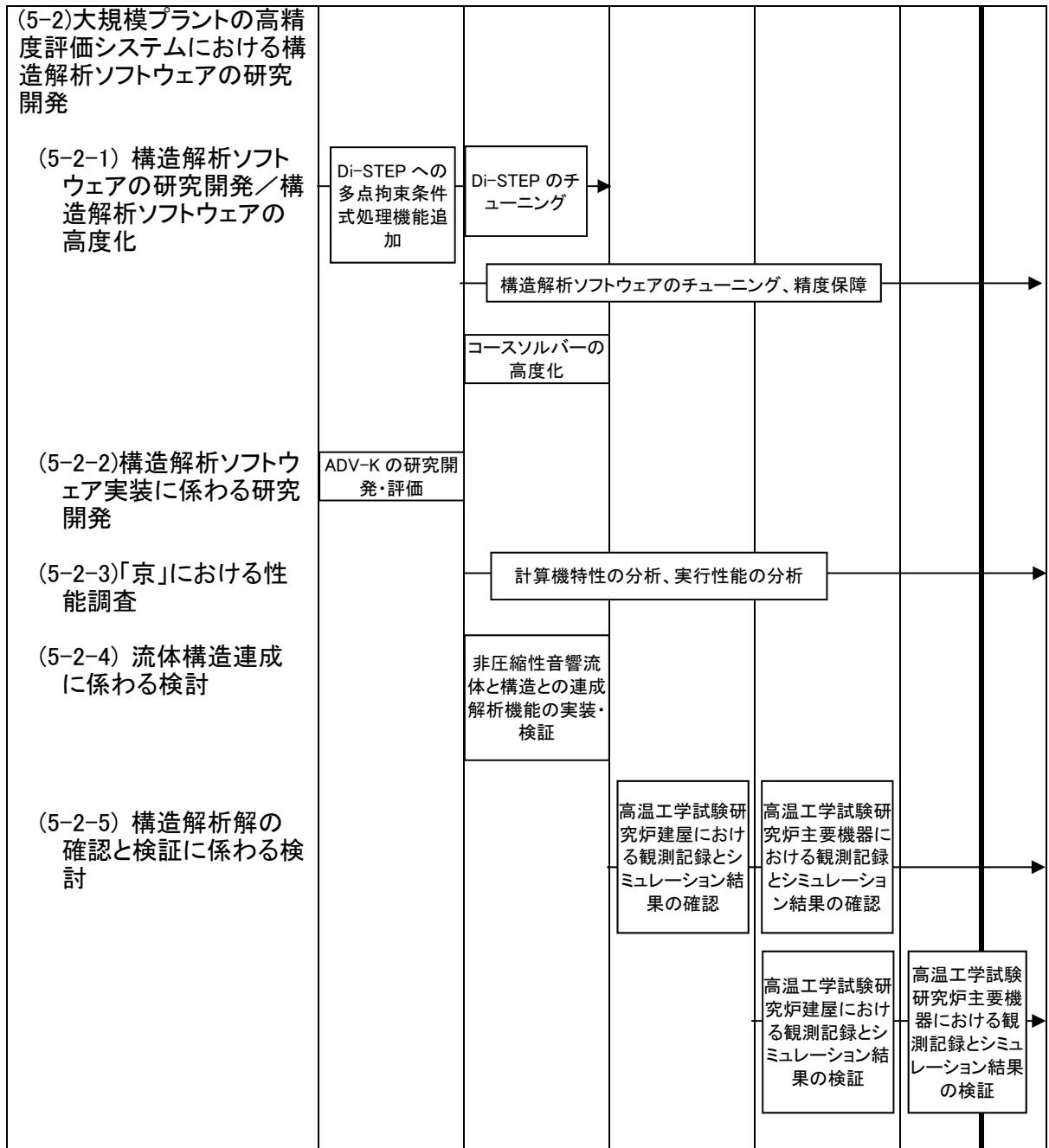
<p>(1-2-3)高レイノルズ数での現象理解と知識基盤の構築</p>		<p>高レイノルズ数における数値解析の準備</p>	<p>高レイノルズ数における制御メカニズムの現象解明</p>		
<p>(1-2-4)プラズマ現象の理解とモデル化に関する研究</p>		<p>プラズマアクチュエータの高精度モデリング</p>			
<p>(1-3)実用問題への適用に関する研究</p>					
<p>(1-3-1) 実用流体機器の革新的効率化・低騒音化に向けた研究</p>		<p>回転翼の流体制御シミュレーション</p>			
<p>(1-3-2)動的制御を含めた実用解析</p>		<p>フィードバック制御の流体制御シミュレーション準備</p>	<p>フィードバック制御の流体制御シミュレーション</p>		

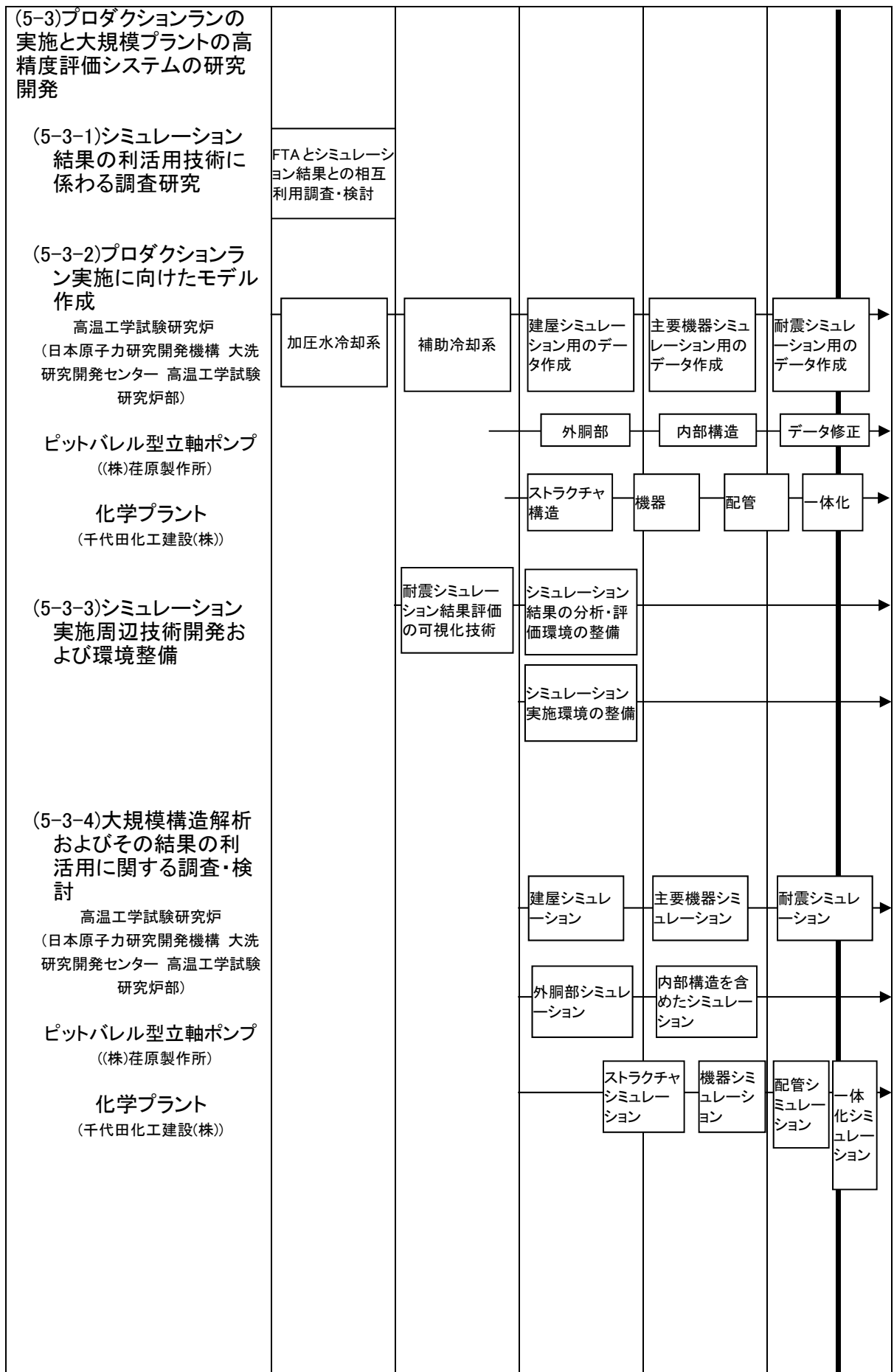




(4)多目的設計探査による設計手法の革新に関する研究開発					
(4-1)多目的設計探査のアルゴリズム・ソフトウェアの開発	アルゴリズムおよびソフトウェアの開発		アルゴリズムおよびソフトウェアの改良		▶
(4-2)JAXA 問題での実証	JAXA 問題での実証				▶
(4-3)分野4他課題の設計問題での実証	分野4他課題の設計問題での実証				▶
(4-4)企業の設計問題での実証	(4-4)が予定に対して約6ヶ月進んでいる。		企業の設計問題での実証		▶

(5)原子力施設等の大型プラントの次世代耐震シミュレーションに関する研究開発					
(5-1)プロジェクトの総合的推進施策 (5-1-1)高精度評価システムの研究開発、プロダクションラン、アウトリーチ活動等の総括		<p style="text-align: center;">▲ 研究体制見直し (H24/12)</p>			
研究開発進捗管理、成果の取りまとめ、産業界連携、成果の発信など					
技術調査					→
要素技術開発					→
プロダクションラン				→	
ソフトウェアの研究開発			→		
アウトリーチ			→		
普及課題選定		→			
(5-1-2)次年度以降の研究開発計画の詳細化	全体計画の精査および必要に応じ修正				
24年度計画詳細化					
25年度計画詳細化					
26年度計画詳細化					
27年度計画詳細化					
(5-1-3)成果物の利用促進 (利用促進の相手先) 日本原子力研究開発機構 大洗研究開発センター 高温工学試験研究炉部 (株)荏原製作所 千代田化工建設(株)	コンソーシアムの運営				
コンソーシアム設立					
産業界へのアウトリーチ展開				→	
耐震シミュレーション課題の共有			→		
解決策の検討		→			
課題解決のためのシミュレーション方法提示	→				





(6) 計算科学技術推進体制構築						
(6-1) 計算機資源の効率的なマネジメント	各研究開発課題に対する「京」の最適配分の策定	最適配分に基づいた「京」の本格運用				
	HPCIのシームレスな運用利用計画の策定	HPCIのシームレスな運用マネジメントと利用開始	HPCIのシームレスな運用マネジメントと利用			
(6-1-1) 研究支援協力	産業界ニーズを採り込んだ公募事業等の策定とHPCI利用支援体制の整備・実践開始	産業界ニーズを採り込んだ公募事業等の策定とHPCI利用支援体制の整備・本格実践				
(6-2) 研究成果の普及						
(6-2-1) HPC/PF 開発整備	HPC/PF システム検討とプロトタイプ開発	運用システムの試作	システムの評価			
(6-2-2) HPC/PF 向け圧縮性流体解析プログラム「UPACS」の開発	大規模解析への対応	プログラムの改良	試計算	実問題での技術実証	文書整備	
(6-2-3) 階層型直交格子を用いた実用複雑系流体解析システム「FFV」の整備	BCMTools 整備	FFV-BCM 整備チューニング	予備計算, ベンチマーク	実問題への適用性検証		
(6-2-4) 共通基盤技術 (核融合)	要素技術開発 (反復法ソルバー改良、大規模並列処理技術、大規模データ可視化技術)			大規模流体解析による機能評価、実証試験		
(6-2-5) 並列 FEM 構造解析ソフト「FrontISTR」高度化の検討	反復法ソルバーのハイブリッド並列化とその並列性能評価	多点拘束条件付き構造解析における反復法ソルバーの収束性評価		HPC/PF を利用した FrontISTR 解析セミナーの準備・開催		
(6-2-6) 「FrontCOMP」の高度化		予備計算, ベンチマーク		燃料電池自動車用高圧水素容器最適設計問題への適用性検証		
(6-2-7) バイオ分子シミュレータ「ABINIT-MP」高度化の検討	計算機能の強化と高速化 (コレスキー分解など)、「京」への対応 (ライブラリ化)			「京」での利用 (創薬コンソなど)、普及促進活動		

③目標達成状況(平成 28 年 2 月 1 日時点)

研究開発項目	達成状況
(1) 輸送機器・流体機器の流体制御による革新的高効率化・低騒音化に関する研究開発	○着実に達成。
(1-1)大規模流体解析ソフトウェアの整備に関する研究	○着実に達成。 本課題で用いるプログラムの高速化、周辺ツールの作成を予定通り行い、本課題で実施すべきシミュレーションを実施可能とした。本課題の利点でもある空間高分解能を有する解析手法の汎用化、および必要となる周辺ソフトウェアの整備を行った。
(1-2)流体制御メカニズムの解明に関する研究	◎大幅に達成。 京の利用により、これまで実現できなかったケース数のシミュレーション、より困難な条件でのシミュレーションを実施し、世界に先駆け、主たる 3 つの流体制御メカニズムの明らかにし、その結果を活かして、形状や流れ条件に応じた流体制御パラメータの設定指針を示した。この成果は学術面も含め、国際的にも高く評価されている。
(1-3)実用問題への適用に関する研究	○着実に達成。 京の利用により、小型から大型の回転機器をはじめとして、本デバイスによる流体制御が有効であることおよび各種パラメータの効果を明らかにした。成果は産業界との共同研究による実験や試験に活かされている。
(2)次世代半導体集積素子におけるカーボン系ナノ構造プロセスシミュレーションに関する研究開発	○着実に達成。
(2-1) グラフェン創成プロセスに関する研究	○着実に達成。 京の利用により、グラフェン創成プロセスの実成長温度でのダイナミクス解析を実施し、従来型の絶対零度での静的な解析結果と定性的に異なる有益な知見を得ることに成功し、有限温度での動的解析の重要性と解析ソフトウェア PHASE/0 の有効性を示した。
(2-2) グラフェン伝導特性に関する研究	○着実に達成。 グラフェンと金属電極、ゲート絶縁膜、基板との各種積層構造における伝導特性の解析を実施し、積層構造がグラフェンデバイス特性に及ぼす影響などに関する有益な知見を得ることに成功した。

(2-3) SiC ワイドギャップ半導体に関する研究	<p>◎大幅に達成。</p> <p>SiC 酸化プロセスの実プロセス温度でのダイナミクス解析を実施し、SiC 酸化膜の新規な界面構造、界面近傍の欠陥準位などに関する有益な知見を得ることに成功した。これら東芝との共同研究による成果は、日刊工業新聞 2015 年 4 月 20 日号にも掲載され、また SiC 酸化膜に関する特許の出願にも繋がった。</p>
(2-4)解析ソフトウェアに関する研究	<p>○着実に達成。</p> <p>京を利用した実証計算により解析ソフトウェア PHASE/0 の有効性を確認した。ソフトウェア公開、利用講習会開催、ワークショップ開催、ポータルサイト運営などの普及活動を通して、「京」産業利用枠での PHASE/0 利用をはじめ、産業界、大学、研究機関などへの普及が進んだ。</p>
(3)乱流の直接計算に基づく次世代流体設計システムの研究開発	<p>○着実に達成。</p>
(3-1)自動車用次世代空力設計システム	<p>○着実に達成。</p> <p>国内の主要自動車メーカー 10 社と自動車サプライヤー 4 社および研究機関で構成されるコンソーシアム(HPCによる自動車用次世代空力・熱設計システムの研究開発)において、開発したシステムの有用性を実証した。具体的には、階層的な手法を用いて、複雑自動車形状を対象として、数十億～300 億セル規模の超大規格子を半日～24 時間以内に作成できるシステムを実現した他、自動格子細分化機能を開発することで、数十億セル規模の完全非構造格子を用いて、実車体形状に対して風洞実験に対して 1～2%の誤差で定常空力予測を実現することで、実車デジタル風洞を京に構築、レーンチェンジ時の非定常空力予測と空力安定性メカニズムの解明、蛇行実走行試験の再現と非定常空力予測評価手法の構築、ドライバー反応を考慮した突風時自動車運動挙動の解明、高速走行時の操縦安定性解析、流体・振動・騒音連成解析システムの構築と実車体に対する車室内騒音予測、アイドリング時のエンジンルーム熱環境の予測解等を行い、成果を得た。</p>
(3-2) ターボ機械用次世代設計システム	<p>○着実に達成。</p> <p>国内の主要ターボ機械メーカーおよび研究機関で構成されるコンソーシアム(ターボ機械 HPC プロジェクト)において開発したシステムの有用性を実証した。実証テーマとしては、遠心圧縮機、多段遠心ポンプ、ファン、水車ドラフトチューブ、ポンプ吸込み水槽、蒸気タービンが選ばれ、これらの製品の内部流れの準直接計算を実施した。数億グリッド～数十億グリッド規模の計算をターボ機械内部流れに適用することにより、遠心圧</p>

	縮機のサージ点近傍不安定流れの高精度予測、ファン・送風機等から発生する空力騒音の高精度予測、ポンプ吸込水槽の吸込渦の発生メカニズムの解明等の成果を得た。
(3-3)船体に関する研究	◎大幅に達成。 300億グリッドを用いた準直接計算により、乱流をモデル化することなく、水槽試験と同等の精度(予測誤差1%以内)で船体抵抗を予測できることを実証した。また、要素技術として、船体とプロペラを同時計算する自航試験に対応した計算や、造波抵抗を計算するための自由表面計算機能と上記の大規模解析を併用する計算技術を確立した。
(3-4)次世代燃焼・ガス化設計システム	○着実に達成。 様々な実機の燃焼器・火炉を対象に数値シミュレーションを実施し、その精度検証を行った。本研究により、数値シミュレーションの燃焼器・火炉設計への有効性を証明した。また、燃焼・ガス化のメカニズムの一端を明らかにするとともに、乱流燃焼反応に関するモデリングも行った。これらの成果は学術面も含め、国際的にも高く評価されている。
(4)多目的設計探索による設計手法の革新に関する研究開発	○着実に達成。
(4-1)多目的設計探索のアルゴリズム・ソフトウェアの開発	○着実に達成。 MOEA/D(現在世界で最も性能が良いと言われている手法の1つ)よりも性能がよい多目的設計最適化アプリ Cheetahなどを開発。HPC/PFとして一般にも公開。本課題で開発した設計データ解析アプリiSPMは現在18社8大学で利用されている。また多数目的設計最適化問題を応答曲面法を用いて効率的に解くための新しい探索指標も開発。
(4-2)JAXA問題での実証	○着実に達成。 ロケット射点の火炎偏光板の空力音響多目的設計探索を実施し、有益な知見を得る。空力音響設計最適化問題を解いたのは世界初。この成果は後述する超電導リニアの空力音響設計に活かされた。また、これまでは設計目的が多すぎるために多目的設計探索をすることが難しかった深宇宙探査機DESTINYの軌道設計において多数の優れた軌道設計を得るとともに設計問題に関する有益な知見を得ることに成功。
(4-3)分野4他課題の設計問題での実証	○着実に達成。 課題1と連携し、高迎角の翼まわり流れの制御のためのプラズマアクチュエータの多目的設計探索を実施。低周波で制御することで入力電力が小さくても揚力を向上させることができることなどを明らかにした。

<p>(4-4) 企業の設計問題での実証</p>	<p>◎大幅に達成。</p> <p>(1) マツダとの共同研究として車両構造の多目的設計探査を実施。優れた設計が多数発見され、車両構造重量最小化と共通部品点数最大化の間のトレードオフ関係が初めて明らかにされた。得られた知見により、大幅な開発・製造コストの削減と、重量を削減したことによる燃費の向上及びCO2排出量の削減が見込まれる。これらの結果は日刊工業新聞 2015 年 2 月 16 日号にも掲載された。(2) 東海旅客鉄道との共同研究として現在開発中の超電導リニアの空力音響多目的設計探査を実施。得られた知見により、車内騒音を低減しつつ、0.1%程度の空気抵抗を削減できることが期待され、これにより超電導リニアの大幅な運航経費の削減が見込まれる。(3) 横浜ゴムとの共同研究として自動車用タイヤ空力形状の多目的設計探査を実施。その結果、抵抗と同時に揚力も低減できる形状に関する革新的な知見を得ることに成功。得られた成果は横浜ゴムからニュースリリースとして発信されると共に試作品が 2015 年の東京モーターショーにおいて公開された。</p>
<p>(5) 原子力施設等の大型プラントの次世代耐震シミュレーションに関する研究開発</p>	<p>○着実に達成。</p>
<p>(5-1) 大規模プラントの高精度評価システムの研究開発</p>	<p>○着実に達成。</p> <p>高温工学試験研究炉の安全審査申請に協力し、従来シミュレーションに加え、本技術を適用し、俯瞰的な耐震裕度計算とプラント各部ごとの詳細な計算結果を提示したことにより、事業的貢献も含めて、着実に達成できたと考える。</p>
<p>(5-2) 構造解析ソフトウェアの研究開発</p>	<p>○着実に達成。</p> <p>(株)荏原製作所殿が設計・製作する、一般社会インフラ・プラント向けターボポンプの一例であるピットバレル型立軸ポンプ(約 9 万解析部品)を対象に、</p> <p>(1) 「京」を使って、「組立構造解析」で「結合部を有する機械構造物」の振動解析/耐震性評価を実施し、解析結果を確認した。</p> <p>(2) ピットバレル型立軸ポンプの「あるがまま」状態を丸ごとシミュレーションで実現。従来の俯瞰的な分析に加えて、局所や詳細な部位の分析を同時に可能とした。</p>
<p>(5-3) プロダクションランと結果の分析</p>	<p>◎大幅に達成。</p> <p>千代田化工建設(株)殿が設計・施工する石油化学プラントのストラクチャと呼ばれるプラント機器を支える構造体(約 15 万解析部品)を対象に、</p> <p>(1) 「京」を使って、「組立構造解析」で耐震性評価に不可欠な数値分析計算結果の「確かさ」を大幅に向上する原理を確立</p>

	<p>した。</p> <p>(2) 組立品の「あるがまま」状態を丸ごとシミュレーションで実現。従来の俯瞰的な分析に加えて、局所や詳細な部位の分析を同時に可能とした。</p> <p>(3) 東北地方太平洋沖地震などの地震波を使って、機器の揺れをシミュレーションで再現し、機器や施設の開発・設計に生かし、国内外の耐震性の高いインフラ整備に貢献した。</p>
(6)計算科学技術推進体制構築	○着実に達成。
(6-1) 計算機資源の効率的なマネジメント	<p>○着実に達成。</p> <p>割り当てられた京の資源に関して各課題で計画的に利用ができるよう分配し、概ね計画通りに資源を消費した。また HPCI 資源に関して必要とする課題に適宜割り当てを行い、計画的に消費することができた。</p>
(6-1-1) 研究支援協力	<p>○着実に達成。</p> <p>平成 23、24 年度に産業界のニーズを採り込むべく公募事業を実施し、企業が HPCI 資源の利用を開始する取り掛かりを得る支援を行った。その後、公募事業で得られた状況を考慮し、企業向けに HPCI 資源を試用できる環境を整備し、講習会等を通じて実践的な利用を体験できる機会を提供することができた。</p>
(6-2) 研究成果の普及	
(6-2-1) HPC/PF 開発整備	<p>○着実に達成</p> <p>大規模並列シミュレーションの効率的な実行を支援する実行支援環境 HPC/PF システムを設計構築し、開発したシステムを国プロで開発した多数のシミュレータに適合させ、実証事例を示した。また、開発成果については、利用セミナーを開催し、参加者から好評を得ている。</p>
(6-2-2) HPC/PF 向け圧縮性流体解析プログラム「UPACS」の開発	<p>○着実に達成</p> <p>大規模並列解析向けにデータ通信部の効率化、領域分割手法の改良、大規模計算格子生成手法の開発、更には「京」向けチューニングを実施した。産業界での利用促進のため、ターボ機械要素の詳細流れ解析実現に向け移動境界接続への対応、蒸気タービン解析に必要な湿り蒸気解析への対応、内部流解析で必要となる流量指定垂音速流境界条件の導入を行った。ターボ機械要素の実問題(遠心圧縮機の非定常解析および蒸気タービンの多段解析)での検証を行った。また、利用者講習会など産業界での利用促進を行った。</p>
(6-2-3) 階層型直交格子を用いた実用複雑系流体解析システム「FFV」の整備	<p>○着実に達成</p> <p>計算空間内の解像度を自在に指定し、効率的に高精度解析を行える階層型直交格子の枠組みを確立した。前処理部を全</p>

	自動並列する技術の開発により、大規模計算のスループットを従来に比べ大幅に改善、300 億規模のシミュレーションを京コンピュータで 24 時間程度で計算できることを示した。応用事例として、自動車空力と熱性能のトレードオフ解析を実施し、定性的傾向を迅速に得られることを示し、設計上流での適用可能性を示した。
(6-2-4) 共通基盤技術(核融合)	◎ 大幅に達成 ・「京」における大規模流体計算技術を開発し、「京」全系に至る強スケーリングを達成した。開発技術を論文等(原著論文 4 編、解説 2 編)で公表し、SC13 Best Poster Award および学会賞等(3 件)を受賞した。 ・「京」における遠隔可視化システム PBVR を開発し、オープンソースソフトウェアとして公開した。開発技術を論文等(原著論文 3 件)で公表し、学会賞等(2 件)を受賞した。 ・開発技術を適用したプラズマ流体解析は高く評価され、学会賞等(6 件)を受賞した。また、その成果は Physical Review Letters 誌等の論文(原著論文 14 編)で公表された。
(6-2-8) 利用者層の拡大	
(1)アウトリーチ活動	◎大幅に達成 一般に興味をもって頂けるコンテンツ追加配信等の工夫で、当初予定していた2万名程度のアクセス数(作業部会でも公言)を大幅に上回る3.5万名を超えるアクセス数を得ている。
(2)HPC 利用者層の拡大	○着実に達成 分野 4 の成果活用のボリュームゾーンである産業界ユーザーのレベルに応じたHPCIの効率的利活用に着眼し、「京」利用に繋げるための FOCUS スパコンをベースとした下記施策を推進した。 ・トライアル利用推進/ハンズオンセミナー支援 ・HPC 産業利用スクール支援 ・需要開拓事業推進環境の構築
(6-3) 人材育成	
(6-3-1)開発者教育	○着実に達成。 実施項目を毎年度アップデートすることによって、本課題を計画通りに達成。 ・教科書として基礎編を出版(平成 26 年 4 月) ・参考書として応用編を上梓(平成 27 年 11 月) 大学や企業におけるシミュレーションソフトウェア開発者人材育成を目指した、全く新しい教育プログラム構築に成功した。
(6-3-2)利用者教育	△おおむね達成 産業界に「京」の共用が開始された平成 24 年 11 月からは、

	「京」に特化した入門コースとし、企業における担当者並びに関心をもっている方の疑問に応える形式で進め、受講者が社内でもって質問回収、社内へ持ち帰って伝承となれるようなグループ単位での積極的な討議を行えるコースを実行した。
(6-4) 人的ネットワークの形成	○着実に達成 成果公開の強化策として、シンポジウムの開催や平成 26 年 3 月からは、統合ワークショップと HPC ものづくりワークショップを開催し、アウトリーチセミナー（HPC/PFによるハンズオンセミナー）を適宜開催し、産業分野や技術分野を特定した議論の場を設け、その分野に直接関係する研究者・技術者間の相互理解の促進と連携を図った。 シンポジウム・統合ワークショップは、各1回/年開催。 ハンズオンセミナーは、FFB、FISTR、ABINIT-MP、PHASE/0 などの解析アプリの初学者を対象に、各アプリ各 1-3 回/年開催。
(6-5) 分野を超えた取組の推進	○着実に達成 課題5については、分野3と連携して地震対応解析の分担につき調整。また、共通基盤としての可視化技術開発・適用についてはAICSと連携して実施。
(6-6) プロジェクトの総合的推進	○着実に達成 3研究機関のネットワーク型推進体制を強力に進めるため、代表者による幹事会（運営会議）、実務部隊による拡大事務局会議等を開催して、効率的・効果的プロジェクトの推進を実現。

④ 中間評価等指摘事項への対応

(1) 戦プロ推進委員会からの指摘事項

中間評価指摘事項	対応
各観点の再評価と今後の研究開発の方向性	
【必要性】	
統括責任者等の更なるリーダーシップの下に、分野内の連携はもちろんのこと、必要に応じて分野を越えた連携や他の研究開発プロジェクトの活用も図りながら、本質的に新しい現象の解明や真に革新的な技術開発等を通じて、戦略目標の達成や社会的・科学的課題の解決に資する、「京」や本プログラムならではの成果	対応案(H26.2 月時) 多目的設計探査の課題については、先進的な設計最適化の手法であることとその応用範囲が極めて広いことから、他の課題と連携した取組を実施することにより、より効果的に適用事例を増やすことを検討する。 フォローアップ状況(H27.2 月時点) (課題 4 と課題 1 との連携) 高迎角時の翼周り流れのプラズマアクチュエータによる制御

<p>を創出していく必要がある。その際、「京」でなければ成し得ない成果はどの部分か、どこまで超並列化を進めるとどの様な成果が期待できるのか、という視点をこれまで以上に強く意識する必要がある。</p>	<p>方法に関する設計探査を実施。有益な知見を得ること成功し、日本機械学会第11回最適化シンポジウム、アメリカ航空宇宙学会国際会議 Scitechなどで成果を発表済み。 (現在ジャーナル論文を準備中。) (課題4と課題3との連携) 自動車タイヤのフィン形状の空力多目的設計探査を実施中である。2015年度中に成果をあげ、横浜ゴムからプレスリリースを出すことが目標。</p> <p>H28.2月時点 (課題4と課題1との連携) 高迎角時の翼周り流れのプラズマアクチュエータによる制御方法に関する設計探査を実施。有益な知見を得ること成功し、日本機械学会第11回最適化シンポジウム、アメリカ航空宇宙学会国際会議 Scitechなどで成果を発表済み。 (現在ジャーナル論文を準備中。) また、課題1で開発された圧縮性流体ソルバーLANS3Dと課題4で開発した多目的設計最適化手法を用いて、東海旅客鉄道株式会社とともに、超電導リニアの空力音響設計を実施し、設計改善に役立つ知見を得ることに成功した(国際フロンティア産業メッセ2015で発表)。 (課題4と課題3との連携) 課題4と課題3が連携して、横浜ゴム(株)が開発中の自動車タイヤのフィン形状の空力設計探査を実施。結果が横浜ゴム(株)からプレスリリースされるとともに、東京モーターショーで試作品が展示された。</p>
<p>得られた成果の情報発信については、社会に分かりやすく伝えることはもちろんのこと、時には社会の期待や研究者の士気を高めるための大きな目標を示しながら、「京」や本プログラムが社会の「役に立つ」、「役に立った」という国民の実感が得られるようにしていく必要がある。その際、特に、国民の生命・健康や安全・安心に直結する分野については、反動を生みかねない過剰な期待を防ぐため、現在「京」を用いて到達可能な成果とその限界も正確に社会に伝える必要がある。</p>	<p>対応案(H26.2月時) 分野4の最新情報をタイムリーに分かりやすく広報する仕組み(アウトリーチ専用サイト:計算工学ナビ)を構築済みであり、今後は、PR効果の高い情報(「京」による先端的事例を含む具体的解析事例、ベンチマーク結果等)の蓄積を継続的に実施し発信して行く。</p> <p>フォローアップ状況(H27.2月時点) 解析結果については、すでに「京」を中核とするHPCI利用成果をわかりやすく解説した事例約200件をDB化し、順次アウトリーチサイトにて発信している。今までに、5000人程度のアクセス数があり、社会から大きな関心が寄せられている。また、広報活動については、上記以外に、比較的一般向けのシンポジウムと、技術分野別に分類した専門家向けワークショップの両方を開催するなど、研究者自</p>

	<p>らが社会の多様なレベルに対して理解が得られるように配慮した取り組みを実施している。</p> <p>H28.2 月時点 アウトリーチサイト(計算工学ナビ)では、HPC解析成果がどのような効果がありどのように役に立つかにつき解説記事や事例DBを通してPRを継続している。H28.2 月時点までに、約3万名の新規訪問者総数を得、理解が一層広がりがつつある。</p>
【効率性】	
<p>大学・研究機関のスーパーコンピュータ、さらには民間のクラウドサービス等のコンピュータの性能が向上していることも認識し、「京」や本プログラムならではのインパクトのある成果を迅速に創出する観点に立って、本プログラムに割り当てられた「京」の計算資源をこれまで以上に重点的に配分するとともに、「京」以外の計算資源の更なる有効活用を図る必要がある。</p>	<p>対応案(H26.2 月時) 各課題の準備状況や今までの解析の実績、更に今後の計画を踏まえて、計算機資源のより効果的な利用法について抜本的な見直しをしており、その結果を H26 年度からの計画に反映させる。各課題は独自の技術課題を有しており、基本的な研究開発体制そのものは維持するが、課題間のより効率的・効果的な連携(例えば課題4と課題1、課題3)については今後一層積極的に進める。</p> <p>フォローアップ状況(H27.2 月時点) 重点課題追加配分枠、加速枠を戦略的に活用したメリハリある取り組みを実施している。その成果も創出されつつあり、今後論文発表、プレス発表を強化するとともに、事例 DB を作成・公開して広く利活用の拡大にむけて貢献して行く。また、「京」以外の計算資源の活用については、特に FOCUS スパコンを利用して、HPC 対応人材の育成施策(トライアル利用、ハンズオンセミナー等)を精力的に実施している。</p> <p>H28.2 月時点 HPC利活用人材の更なる増強を狙い、HPC/PFに大量データ処理や解析プロセスの自動化機能を実装したアプリを整備している。その効果をFOCUSスパコンで実証するため、すでに6回のハンズオンセミナーを開催。好評であり、今後HPCの利用が進むことが期待できる。</p>
<p>分野によっては企業参加の状況は限定的であることから、実用化と応用へ向けた展開のために企業との更なる連携を深める必要があるが、その際、企業のHPC利用を促進する観点から、「京」や本プログラムが</p>	<p>対応案(H26.2 月時) 経営的な視点を考慮したPR活動の強化については、まずは実際の設計業務に活用した場合の具体的な効果を明確にすることが重要で、現在それを評価するための設計システムを検討中であり、これを構築する部品群の整備や機能評価の準備を実施している。今後、企業での利</p>

<p>企業活動をどの様に効率化したのか、あるいは今後効率化するのかを定量的に評価し、トップマネジメント層等に示していくことを心がけるべきである。</p>	<p>用シナリオを想定した設計システムを構築し、まずその利活用により得られるメリットなどをより明確にする。その上で、開発提供システムのメリットや展開シナリオの説明資料を整理し、企業の意思決定マネジメント層にフォーカスした効果的な情報発信を検討する。</p> <p>フォローアップ状況(H27.2月時点)</p> <p>「京」を利用した成果がどのように企業活動を変革するか等については、経営層等を意識し、成果を平易に解説したコンテンツや事例DBを多数作成して、専門のアウトリーチサイト(「計算工学ナビ」)より積極的に発信しており、すでに多数のアクセス数を得ている。例えば、自動車のエンジンルーム内熱設計システムにおいて時間短縮効果を実証するなど、具体的な事例を示しつつある。</p> <p>H28.2月時点</p> <p>特に「京」を利用した成果については、各技術分野(アプリ)ごとに代表2件程度の解析事例DBを作成して公開。具体的に従来の計算機インフラに対して、企業活動上の効果等についても具体的、定量的に示しており、アクセス数も増加している。</p>
--	--

(2)分野4 作業部会からの指摘事項

●分野全体

中間評価指摘事項	対応
<p>(1)課題の進捗状況</p> <p>(課題4、課題5)</p> <p>手法としての先進性や独創性は一部みられるものの、「京」の利用によりブレークスルーを創出し、それをものづくり産業へ波及させるという戦略目標を踏まえ、本分野の研究開発課題としての方向性について今一度検討する必要がある。</p>	<p>対応案(H26.2月時)</p> <p>①課題4について</p> <p>従来の最適化技術で対応できない大規模な設計最適化を実現するための先進的な手法を開発・提供するものであり、広範囲わたる製品設計に適用できる共通基盤の技術として産業界からの期待が極めて大きい。今までは特定の事例を対象とした手法の実証を行ってきたが、今後、ものづくり産業における適用事例を増やすことによって、「京」を利用したブレークスルーのエビデンスを多く創出するとともに波及効果を高めて行く。</p> <p>②課題5について</p> <p>大規模プラントに共通した、大規模アセンブリ構造体の耐震信頼性評価を高精度に行うという目標設定であり、極めてタイムリーで社会的ニーズの高いテーマである。この構造体の高精度評価には、多様な複数の締結部の正確なモデリング等の準備が不可欠である。今まで、このモデリ</p>

ング技術の開発等に相当な時間を費やした関係で、「京」による具体的事例の解析作業がやや遅れている。今後、開発したモデリング技術をベースに、「京」を活用したブレークスルー事例の創出を加速して進める。
(課題4、課題5の具体的対応は各課題の説明の中で補足して説明する)

フォローアップ状況(H27.2月時点)

①課題4について

自動車車両構造設計(マツダ(株)との共同研究)、自動車タイヤ空力形状設計(横浜ゴム(株)および課題3との共同研究)、高速鉄道車両の空力音響設計(東海旅客鉄道(株)および課題1との共同研究)について昨年度から検討を進めてきた。今年度はこれらについて「京」を用いた本格的な多目的設計最適化計算を開始した。これら実問題での検証計算は平成27年度まで継続の予定であるが、今年度から有益な知見が得られ始めており、マツダ(株)では次世代の自動車の車体開発への適用のフィージビリティスタディを開始している。

②課題5について

大規模アセンブリ構造体の耐震信頼性評価を高精度に行えることを実証するために、ものづくり産業界と協力し、実機問題で「京」による具体的事例の解析作業を遂行した。原子力機構では、高温工学試験研究炉の再稼働に向け、バックチェック対応に協力し、当該技術を活用して耐震評価解析を実施した。(株)荏原製作所とは、従来解析手法と大局的な挙動解析結果が一致することを確認し、詳細な挙動解析も同時に可能なことを確認した。これにより、高性能計算機を利用すれば、俯瞰的な耐震裕度評価と各部ごとの詳細な評価を可能であることを確認した。地震に対する信頼性を高めたインフラ整備貢献するために、結合部を有するターボ機械の解析の先駆的事例解析を継続し、評価していく。千代田化工建設(株)殿とは、石油化学プラントのストラクチャ構造の俯瞰的かつ詳細な耐震シミュレーションを完遂し、日刊工業(13面)と化学日報(1面)の二誌に掲載されるとともに、千代田化工建設(株)殿のホームページトップで報告された。

H28.2月時点

①課題4について

他課題や産業界との連携を強化し、下記の成果を挙げることができた。

(1) マツダ株式会社とともに自動車車両構造設計に多目的設計探査手法を適用してその有効性を実証した。この成果を受けて、マツダ(株)では次世代の自動車の車体開発への適用のフィージビリティスタディを開始している。こ

	<p>これらの結果は日刊工業新聞 2015 年 2 月 16 日号にも掲載された。</p> <p>(2) 課題1と連携し、高迎角時の翼周り流れのプラズマアクチュエータによる制御方法に関する設計探査を実施。有益な知見を得ること成功し、国際会議等で成果を発表した（現在ジャーナル論文を準備中）。</p> <p>(3) 東海旅客鉄道株式会社とともに、課題1で開発された圧縮性流体ソルバーLANS3D と課題4で開発した多目的設計最適化手法を用いて、超電導リニアの空力音響設計を実施し、設計改善に役立つ知見を得ることに成功した（国際フロンティア産業メッセ2015で発表）。</p> <p>(4) 横浜ゴム株式会社とともに、自動車タイヤのフィン形状の空力多目的設計探査を実施し、タイヤのエアロダイナミクス技術を進化させることに成功した。この結果は2015年10月15日に横浜ゴム(株)からプレスリリースされるとともに、東京モーターショーで試作品が展示された。</p> <p>②課題5について</p> <p>大規模アセンブリ構造体の耐震信頼性評価を高精度に行えることを実証するために、ものづくり産業界と協力し、実機問題で「京」による具体的事例の解析作業を遂行した。原子力機構では、高温工学試験研究炉の再稼働に向け、安全審査対応に協力し、当該技術を活用して耐震評価解析を実施した。(株)荏原製作所とは、詳細な挙動解析を更にすすめ、設計ポイントとなる数十箇所の挙動を確認した。これにより、高性能計算機を利用し、かつ流体解析との連携を進めれば、俯瞰的な裕度評価と各部ごとの詳細な評価とともに、製品の機能向上を一層合理的に進めることができることを確認した。千代田化工建設(株)殿とは、ストラクチャ、反応容器、配管から構成される化学プラントについて、3次元詳細モデルを構築し、入力地震波として代表的な 3 波 El Centro (1940)、Taft (1952)、八戸 (1968)を用いて弾性及び弾塑性の耐震シミュレーションを実施した。その結果、ストラクチャと反応容器、配管の相互影響についても定量的に把握することができるなど、プラント内の細部の挙動を把握することができ、耐震性能を向上させるための指針を得られるようになった。</p>
(2)各観点の差評価と今後の研究開発の方向性	
【必要性】	
一部の研究開発課題を融合することも視野に入れ、研究開発課題間の	<p>対応案(H26.2月時)</p> <p>①基本的な推進体制について</p>

<p>連携を強化して効果的に研究開発を進めることが必要である。</p>	<p>現在推進中の5つの研究課題は、当初応募のあった12課題から課題評価委員会を設置してより社会ニーズの高い、プロダクトイノベーション対応2課題、プロセスイノベーション対応2課題、安心・安全対応1課題を厳選した経緯があり、各課題ごとの成果に対する産業界等からの期待は依然として極めて大きい。また、各課題はそれぞれ独自の目標をもっているため、現在の基本的な推進体制は維持して、必要に応じて分野内のサポート体制を強化することによりそれぞれに期待されているインパクトのある成果創出を着実に実現することを優先したい。</p> <p>②課題間連携について</p> <p>特に課題4(多目的設計探査)については、先進的な設計最適化の手法であることとその応用範囲が極めて広いことから適用事例の増強に対する期待が大きい。そこで本分野では、課題1や多くのサブテーマを有する課題3と連携した取り組みを実施することによって、より効果的に適用事例を増やすことを検討する。</p> <p>(課題間連携強化については、体制構築の説明の中で補足して説明する)</p> <p>フォローアップ状況(H27.2月時点)</p> <p>課題4と課題1との連携では、高迎角時の翼周り流れのプラズマアクチュエータによる制御方法に関する設計探査を実施。有益な知見を得ることに成功し、日本機械学会第11回最適化シンポジウム、アメリカ航空宇宙学会国際会議 Scitech などで成果を発表済み。現在ジャーナル論文を準備中。また、課題4と課題3の連携では、自動車タイヤのフィン形状の空力多目的設計探査を実施中である。2015年度中に成果をあげ、横浜ゴムからプレスリリースを出すことが目標。</p> <p>H28.2月時点</p> <p>課題4と課題1との連携については、東海旅客鉄道(株)が開発中の超伝導リニアの空力音響設計探査を実施。また、課題4と課題3が連携して、横浜ゴム(株)が開発中の自動車タイヤのフィン形状の空力設計探査を実施。結果が横浜ゴム(株)からプレスリリースされるとともに、東京モーターショーで試作品が展示された。</p>
<p>【有効性】</p>	
<p>実証に基づく優位性の比較として、先進性が高いと評価されている他ソフトウェアのとのベンチマーク比較を進めることや、これらのベンチマーク比較結果や各課題の進捗状況を踏まえて重点的に開発すべき機能を絞り込み分野全体としての成果を最大</p>	<p>対応案(H26.2月時)</p> <p>①各課題で利用されている先端的な基盤アプリケーションについては、その機能の特徴を明確にするために、すでに今年度後半から研究機関や産業界で多用されているソフトウェア(オープンソース中心)とのベンチマーク比較する準備を進めている。今年度末から来年度にかけてそれらの結果をとりまとめて評価を行う。</p> <p>②本件については、ユーザーである産業界からの様々な</p>

<p>化する必要である。</p>	<p>角度からの評価を得るために、産応協(スーパーコンピューティング技術産業応用協議会)と連携した、「HPC次世代ものづくりワークショップ」を設置して情報の共有化を進めており(すでに1回実施済み)、ここでの評価も参考に重点的に開発すべき機能の確認を行う。</p> <p>なお、成果としての先端的基盤アプリケーション群は、分野4の統合情報基盤であるHPC/PFに実装して公開し、産業界等へ広く展開する。</p> <p>フォローアップ状況(H27.2月時点)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本分野の主要なソフトウェアである、FrontFlow/blue、FrontFlow/violet、OpenFORM、FrontISTR、FrontCOMP、PHASE等について、他流通ソフトウェアとのベンチマーク比較を進めている。その結果については、成果報告書に記載するとともに可能な情報に限りアウトリーチサイト等を通して公表をする。また、多目的設計最適化アルゴリズムCheetahに関しては現在最も普及しているNSGA-IIアルゴリズムや最新の設計最適化手法の1つであるMOEA/Dと比較し、優れていることを確認 ・また、結果については、産応協の「HPC次世代ものづくりワークショップ」で順次報告を行って(2回実施)、産業界ニーズサイドからみた評価を得、重点的に開発すべき機能の確認を行いながら進めている。 <p>H28.2月時点</p> <p>4回開催してきた「HPCものづくりWS」等で吸収した産業界のニーズに対して、アプリ機能の絞り込みと本事業内に実施すべき機能の実装をほぼ終了。</p>
<p>産業界の関心が高いプリ・ポスト開発の成果を活用する人材育成への取組が必要である</p>	<p>対応案(H26.2月時)</p> <p>①大規模格子生成のプリプロセスについては、現在、階層的直交格子の自動生成プログラムを整備中である。生成した階層直交格子を元に非構造格子へ変換するプログラム開発を進めている。これらのプログラム整備により、直交格子系、非構造格子系の流体シミュレータについては、計算準備が整う。</p> <p>②ポストプロセスについては、並列で計算・出力された多数の計算結果をハンドリングし、イメージ生成(可視化)、分析などの処理にデータを受け渡す仕組み(ライブラリ)を、AICSと協力してH25年度に開発予定である。このファイル入出力ライブラリを各アプリで共通に利用することによって、格子生成から可視化までのデータの一貫性が担保される。イメージ生成部である可視化システム開発は、プロジェクト当初からAICSで分担し(分野4の体制構築では人員・費用面などの点で賄えないため)、協力体制で進めている。H26上期にβ版をリリース予定で、これを受けてHPC/PFへと機能連携を実施する予定である。</p> <p>人材育成の観点では、HPC/PF利活用のセミナーの一</p>

	<p>環として実施を計画する。</p> <p>フォローアップ状況(H27.2月時点) 【課題間連携について】 プリプロセス:格子生成支援システムの整備はやや遅れているが、今年度中に非構造格子対応を実施予定。 ポストプロセス:AICSからリリースの大規模並列可視化システムをHPC/PFとシームレスに利用可能なように整備中で、利用者の利便性を向上させている。 【人材育成について】 HPC/PF利活用セミナー第1回を実施済(H25年12月)。ポスト機能(可視化)等について高評価を得ている。</p> <p>H28.2月時点 【課題間連携について】 プリプロセス:格子生成支援システムの整備は、FFB/FFRをターゲットに整備対応済み。 ポストプロセス:AICSからリリースの大規模並列可視化システムをHPC/PFとシームレスに利用可能なように整備し、利用者の利便性を向上させている。 【人材育成について】 HPC/PFと分野4関連解析アプリを連携させた解析実習セミナーを計6回開催済み。パラメータスタディー機能やポスト機能(可視化)等について高評価を得ている。</p>
<p>【効率性】</p>	
<p>より具体的な事例の情報発信、企業の経営的な視点(費用効果など)も考慮した広角的な説明会の実施、企業トップマネジメント層へのPR活動など、産業応用をより強く意識した取組が必要である。</p>	<p>対応案(H26.2月時)</p> <p>①情報発信活動については、昨年11月にアウトリーチ専用サイト(計算工学ナビ)を設けて、分野4の最新情報をタイムリーにわかりやすく広報して行く仕組みができています。今後は、PR効果の高い情報(「京」による先端的事例を含む具体的解析事例、ベンチマーク結果等)の蓄積を継続的に実施し発信して行く。</p> <p>②経営的な視点を考慮したPR活動の強化については、まずは実際の設計業務に活用した場合の具体的な効果を明確にすることが重要で、現在それを評価するための設計システムを検討中であり、これを構築する部品群の整備や機能評価の準備を実施中。今後、企業での利用シナリオを想定した設計システムを構築し、まずその利活用により得られるメリットなどをより明確にする。その上で、開発提供システムのメリットや展開シナリオの説明資料を整理し、企業意思決定マネジメント層にフォーカスした効果的な情報発信を検討する。</p> <p>フォローアップ状況(H27.2月時点) 【事例情報の拡充と効果的PR活動】 特に産業界等から大きな関心が寄せられている「京」の事</p>

	<p>例については、企業経営層等の専門家でない意思決定層の理解を得ることが先決であり、インパクトのある要点を平易に解説した事例DBを作成中。4件程度／アプリ目標。</p> <p>上記事例DBの他、HPC対応アプリやその活用例、普及行事、ニュースレター(3～4か月おき)を専用サイト(計算工学ナビ)にて配信中。新規アクセス数が増加中。(関連施策の中でも状況報告)</p> <p>H28.2月時点 企業経営上有用な情報の提供を狙った事例DBの蓄積と公開を継続的に実施し、一層興味をもたれている。事例DBの他、HPC対応アプリやその活用例、普及行事、ニュースレターを専用サイトにて配信続行中で、新規アクセス数が増加している。</p>
【その他】	
<p>分野全体としての「次世代ものづくり」の姿を示せていないことや各課題の成果を統合して分野としての成果を昇華させるに当たって一部課題の位置付けが見えにくい。</p>	<p>対応案(H26.2月時) 我が国の今後のものづくりの課題は、得意技の高品質・高信頼設計(プロセスイノベーション)に加えて、よりインパクトの大きい機能の開発(プロダクトイノベーション)であり、この両者をいかにスピーディーに実現する仕組みをつくるかが重要である。本分野では、まず各研究開発課題の推進でその先駆的事例を創出し、次いで、その共通基盤的成果を体制構築施策において推進するHPC/PFに実装して広く普及させるというシナリオになっている。一部課題でかなりの準備作業が必要な事情もあり(前記指摘事項で回答)、成果の足並みがやや不揃いで全体がまだ見えにくいことは否めないが、上記シナリオをベースとする成果は、HPCによる「次世代ものづくり」を牽引する仕掛けとして極めて効果的であり、産業界からの期待も大きい。</p> <p>フォローアップ状況(H27.2月時点) 「次世代ものづくり」の先導的事例として掲げてある5つの代表的課題については、その位置づけ／役割を一層明確にした上で、「京」で初めて達成できる成果を創出しつつある。また、ものづくり全体への成果普及については、技術分野別の代表的アプリケーション(約10本)と共通基盤技術(数件)をHPC/PFに実装する作業が進んでいるとともに、ハンズオンセミナー等を通してその利用効果についても産業界で実感しつつある。このように、既存のシミュレーション技術と計算機インフラの限界をブレークスルーできる、HPCシミュレーション主導型の「次世代ものづくり」の姿を実践を通して示している。</p> <p>H28.2月時点 インダストリー4.0などのICTを利用したものづくりの生産性の抜本的改革が世界的動向となっている。そこでは下流側(製造)のみならず、上流側(開発・設計)の改革、す</p>

	<p>なわちHPCを利用したフロントローディングの強化が益々重要になる。本分野では、「京」でなければ達成できないプロダクト／プロセスイノベーションの先導事例の増強とともに、それらを広く普及させるための統合アプリケーション基盤(HPC／PF中心)を構築して公開し、上記次世代のニーズに対応しつつある。</p>
<p>「京」以外の計算機の活用も進めるとともに、戦略目標を達成するという観点で全体を見直し、トップダウンで、課題間連携を重点的取組とすること、課題の統合も含めて計算資源を大胆に傾斜配分することなど検討する必要がある。</p>	<p>対応案(H26.2月時)</p> <p>各課題の準備状況や今までの解析の実績、更に今後の計画を踏まえて、計算機資源のより効果的な利用法について抜本的な見直しをしており、その結果をH26年度からの計画に反映させる。前述の通り、各課題は独自の技術課題を有しており、基本的な研究開発体制そのものは維持するが、課題間のより効率的・効果的な連携(例えば課題4と課題1、課題3)については今後一層積極的に進めていく。</p> <p>フォローアップ状況(H27.2月時点)</p> <p>「京」ならではのインパクトのある成果創出のため、すでに重点枠、加速枠を戦略的に活用したメリハリある取り組みを実施している。その成果も創出されつつあり、今後論文発表、プレス発表を強化するとともに、事例DBを作成・公開して広く利活用の拡大にむけて貢献して行く。また、「京」以外の計算資源の活用については、特にFOCUSスパコンを利用して、HPC対応人材の育成施策(トライヤル利用、ハンズオンセミナー等)を精力的に実施している。</p> <p>H28.2月時点</p> <p>課題間連携、計算資源の有効利用に関しては、上段指摘回答にて、具体的に状況報告済み。</p>

●研究開発課題

中間評価指摘事項	対応
<p>(1)輸送機器・流体機器の流体制御による革新的高効率化・低騒音化に関する研究開発</p>	
<p>ロバスト性を評価対象に加えるとともに、産業界への発信と対話を含めて実用化を見据えた展開を期待したい。</p>	<p>平成25年12月に日本機械学会流体力学部門に「プラズマアクチュエータ研究会」を立ち上げた。現在までに3回の研究会を実施するとともに、同研究会を母体としてシンポジウム等でプラズマアクチュエータや流体制御のセッションを企画してきた。研究会には毎回50名以上、うち10名を超える企業研究者が参加している。この研究会を利用して、これまでの成果を産業界へ展開するとともに、この場を利用した集中的な議論から新たな応用先などが生まれはじめている。研究会の情報はホームページで公開されている。</p> <p>流体制御の現象理解は、対象とする物体形状と流れ条件に対して設定すべきデバイスパラメータを明確にした</p>

	<p>(デザインガイダンスの明確化)。TBS 番組「夢の扉」で本研究内容と課題代表者の研究活動が取り上げられたこともあって、多数の問い合わせがある。実施中であった風力発電装置への利用に加え、地上輸送機器メーカーとの共同研究が立ち上がった。小型ファンメーカーから形状データの提供を受けることができた。さらに航空関係企業との共同研究が準備段階にある。</p> <p>回転機器の流体制御については、小型・中型に機器におけるシミュレーション結果が検証されるとともに、一定レベルの性能向上が解析結果から見られ、実用化の可能性をより広く認知していただくことができた。本研究で得られた知見は大型実用風車での試験にも活かされている。さらに、企業の実形状を利用した小型ファンや流路の損失低減といった新しい応用もテーマとしてとりあげた。研究の大きな目標は新しい考え方を産業界に導入することにあるが、研究期間後半では、実用化展開における空力性能向上という直近の応用を進めた。</p>
<p>ロバスト性を評価対象に加えるとともに、産業界への発信と対話を含めて実用化を見据えた展開を期待したい。</p>	<p>2つの観点で”ロバスト性”の議論を進めた。</p> <p>1つ目として、失速など厳しい条件下の性能向上に加えて、巡航・定格状態で現在利用されている形状を越える可能性を示した。失速状態では揚力向上を目指したデバイス利用が重要であるのに対して、巡航・定格状態ではむしろこのデバイスを抵抗低減に利用することが重要であることを指摘した。</p> <p>2つ目は制御困難な条件下での利用である。動的なフィードバック制御と複数アクチュエータの利用という形で研究を進めた。また、シミュレーションで得られた知見に基づき、条件に応じて、どのようなパラメータを利用すべきかを明確に示すことができた。以下が概要であるが、詳細は報告書本文を参照されたい。</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 翼面圧力のセンシングによるフィードバック制御解析を実施、よりロバストなプラズマアクチュエータの駆動方法を見出した。 ● 複数のプラズマアクチュエータを利用することで、制御が難しい条件での制御可能性を高めた。
<p>(2)次世代半導体集積素子におけるカーボン系ナノ構造プロセスシミュレーションに関する研究開発</p>	
<p>企業、大学等との連携による早期の成果普及や計算結果の定量的検証方法の検討が期待される。</p>	<ol style="list-style-type: none"> ① 東芝から SiC 酸化膜構造に関する特許出願(平成 27 年 7 月)。現在、東芝と NIMS との共同で SiC 酸化膜構造に関する別件の特許を出願予定(社内手続き中)。 ② 実験グループと連携しナノ界面構造に関する解析結果と実験結果との対比を通じた計算結果の検証を続行中。 ③ 有効性を示したマルチスケールのシミュレーション(古典 MD 解析を援用した第一原理解析)の高度化を実施。

	<p>④ プログラム公開(H27/10/27)、WS 開催(H27/11/27、80名程度の参加者)、利用講習会開催(H27年度3回開催:毎回20名程度の参加者)、ポータルサイト運営など、普及活動を引き続き実施。</p>
<p>(3)乱流の直接計算に基づく次世代流体設計システムの研究開発</p>	
<p>他のアプリケーションに対する優位性や解析事例を企業トップマネジメント層等に分かり易く伝え、産業界等への成果の展開を加速することが期待される。</p>	<p>本PJで開発を進めているアプリの優位な点は、先進的な計算技術を導入し、大規模な計算機の性能を引き出せる高性能なソフトウェアであること、その結果高い信頼性をもつ計算結果が得られる点である。加えて、大規模シミュレーションを企業の設計業務に容易に導入できるような技術も同時に提供する点が挙げられる。これらの枠組みにより、大規模並列シミュレータ導入のハードルが下がり、技術者は少ない工数でシミュレーションを活用できる。これは、技術者が本来の業務に専念でき、生産性の向上につながることを意味する。これまでは、システム開発や整備を中心にプロジェクトを推進してきた。現在、設計システムを構築する部品群が揃いつつあり、機能評価も進みつつある。今後、企業での利用シナリオを想定して設計システムを構築・評価するとともに、その利活用により得られるメリットなどをより明確にしていいく。また、開発提供システムのメリットや展開シナリオの説明資料を作成し、企業の意思決定マネジメント層にフォーカスした情報発信を検討する。成果の展開については、各種コンソーシアム、共同研究、各種発表・セミナーなどのチャネルを通じて実施する。加えて、本PJで保有するクラスタシステム、およびFOCUSシステムに対して、開発したHPC/PFシステムおよび派生設計システムをインストールし、テストベッドとして活用する。具体的な対応策を以下に示す。</p> <p>① 情報発信</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 企業の意思決定マネジメント層への情報発信として計算工学ナビを発行し、先端的な成果をアピールした。 <p>② 成果の展開</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ ターボ機械 HPC コンソーシアムで使用するクラスタシステムに解析システムをインストールし、コンソーシアム参加企業がシステムを簡易に利用できる環境を整備した。 <p>本プロジェクトで開発した船体抵抗予測技術の実用化のため、日本造船技術センターが中心となり実証計算を実施した。(平成27年度HPCIシステム利用研究課題、乱流の直接シミュレーションによる曳航水槽代替技術の実用</p>

	化)
<p>実証に基づく優位性の比較として、先進性が高いと評価されている他ソフトウェアのとのベンチマーク比較を進めることや、これらのベンチマーク比較結果や各課題の進捗状況を踏まえて重点的に開発すべき機能を絞り込み分野全体としての成果を最大化する必要である。</p>	<p>本 PJ での開発ソフトと市販ソフトとの関連性については、シミュレーション対象や機能の点から得意分野が異なる。この観点からは、市販ソフトと本 PJ 開発ソフトは棲み分けになると思われる。したがって、競合するという観点よりも、相補的に使えるようにインターフェイスを整備するなど協力関係を模索していきたい。</p> <p>大規模計算を考えた場合、他の競合と比較してプリポストを含めたスループット、また高解像度計算による高い信頼性の点では優位である。ご指摘のように他ソフトとのベンチマークによる定量的評価は必要である。今後、順次ベンチマークを行い、検証結果を検証データベースで公開していくことを計画している。また、具体的な事例の実証を行いながら、エビデンスとなるデータを示していく。得られたデータは、利用ガイドラインとして活用できるように、本 PJ で推進している HPC/PF のコンポーネントである知識データベースへ登録し、広く活用できるようにする。また、このデータベースは、開発するシミュレータの性能や機能を示すものであると同時に、そのパラメータは類似計算の雛形としての役割も果たす。このデータベースを充実させること自体がシステムとしての価値を高めていくことに繋がる。</p> <p>開発ソフトの維持管理については、基本的には、開発者側の主体性が第一に必要と考えている。継続的な開発が可能なように、外部資金あるいは企業ユーザからの収入などでの運用を考慮していく。ものづくりアプリは継続的なユーザサポートがないと利用が難しいので、サポートのためにはベンダーとの協力体制を構築するスキームを検討する。</p> <p>機能の開発項目については、コンソーシアムなどのから意見を吸い上げて順次実施を予定している。</p> <p>具体的な対応策を以下に示す。</p> <p>① ベンチマークテスト</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ ターボ HPC コンソーシアムの一部の実証テーマにおいて市販ソフトとの定量比較を実施した。本 PJ では非定常特性の予測精度に優位性があるが、乱流モデルをベースとする市販ソフトのほうが有利である側面も確認し、各ソフトの棲み分けを明確にした。 ・ 船体抵抗予測に関するワークショップ等で公開されている市販ソフトによる計算結果と比較し、本 PJ のソフトの優位性を確認した。

	<p>② ソフトウェアの開発維持</p> <p>ターボ機械コンソーシアムの分野毎(圧縮機、ポンプ、ファン等)にわかれている各WGにおいて、今後のソフトウェア利用について検討した。この結果、ターボ機械協会における分科会の設置やベンダーによるサポートサービスの提供により、ソフトウェアの開発維持を進める予定となっている。</p>
<p>(4)多目的設計探査による設計手法の革新に関する研究開発</p>	
<p>手法としての先進性や独創性は一部みられるものの、「京」の利用によりブレークスルーを創出し、それをものづくり産業へ波及させるという戦略目標を踏まえ、本分野の研究開発課題としての方向性について今一度検討する必要がある。</p>	<p>他課題や産業界との連携を強化し、下記の成果を挙げることができた。</p> <p>(1) マツダ株式会社とともに自動車車両構造設計に多目的設計探査手法を適用してその有効性を実証した。</p> <p>(2) 東海旅客鉄道株式会社とともに、課題1で開発された圧縮性流体ソルバーLANS3D と課題4で開発した多目的設計最適化手法を用いて、超電導リニアの空力音響設計を実施し、設計改善に役立つ知見を得ることに成功した。</p> <p>(3) 横浜ゴム株式会社とともに、自動車タイヤのフィン形状の空力多目的設計探査を実施し、タイヤのエアロダイナミクス技術を進化させることに成功した。</p> <p>(4) 産業界への成果普及のため、講演や解説記事等の執筆を積極的に行った。</p>
<p>一部の研究開発課題を融合することも視野に入れ、研究開発課題間の連携を強化して効果的に研究開発を進めることが必要である。</p>	<p>他課題との連携を強化し、下記の成果を挙げることができた。</p> <p>課題4と課題1との連携:課題1と連携し、高迎角時の翼周り流れのプラズマアクチュエータによる制御方法に関する設計探査を実施。有益な知見を得ること成功し、国際会議等で成果を発表した(現在ジャーナル論文を準備中)。</p> <p>課題1で開発された圧縮性流体ソルバーLANS3Dと課題4で開発した多目的最適化手法を用いて、東海旅客鉄道とともに超電導リニアの空力音響設計を実施し設計改善に役立つ知見を得ることに成功した。</p> <p>課題4と課題3との連携:課題3で開発された流体ソルバーFrontFlow/redを用いて、横浜ゴムとともに自動車タイヤのフィン形状の空力設計探査を実施し、タイヤのエアロダイナミクス技術を進化させることに成功した。</p>
<p>(5)原子力施設等の大型プラントの次世代耐震シミュレーションに関する研究開発</p>	

<p>「原子力施設等の大型プラントの次世代耐震シミュレーションに関する研究開発」は、手法としての先進性や独創性は一部見られるものの、「京」の利用によりブレークスルーを創出し、それをものづくり産業へ波及させるという戦略目標を踏まえ、本分野の研究開発課題としての方向性について今一度検討する必要がある。</p>	<p>①手法としての先進性や独創性(従来の MPC との比較において)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・第一の使用法であるメッシュ不整合(細分化)結合に対し、精度問題解決の為、汎用的なメッシュ整合技術を確立 ・第二の使用法である節点間の結合とジョイントを経験的に条件入力するのに対して、部品間接続技術を提案 ・計算量が膨大となるために、従来法で多用されるものの、その計算量がため実装は不適切とされた「ひずみエネルギー減衰法」を実装し、部品ごとの減衰を扱えるようにするとともに、有限要素解析における課題の一つをブレークスルーできた。 <p>②「京」の利用によりブレークスルーを創出するため組立構造解析による動的解析等を実施。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・HTTR の安全審査等の手続きに貢献する計算結果を「京」により創出。 <p>③ものづくり産業へ波及させるという戦略目標を踏まえ、荏原製作所殿/千代田化工建設殿の設計課題に取り組んだ。</p> <p>④本分野の研究開発課題としての方向性について。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・原子力プラント:時刻歴応答解析を継続的に実施。 ・化学プラントへの応用展開。
---	---

●計算科学技術推進体制構築

中間評価指摘事項	対応
(1)課題の進捗状況	
<p>一部研究開発課題については、研究開発課題間の更なる積極的な連携が図れる体制作りが望まれる。</p>	<p>対応案(H26.2月時)</p> <p>特に課題4(多目的設計探査)については、先進的な設計最適化の手法であることとその応用範囲が極めて広いことから適用事例の増強に対する期待が大きい。そこで本分野では多くのサブテーマを有する課題3と連携した取り組みを実施することによって、より効果的に適用事例を増やすことを検討する。</p> <p>また、課題4の研究成果を体制構築で整備しているHPC/PFへ機能移植し、パラメータを変えて計算した多くのケースから最適値パラメータを得る検証事例を創出して検証データベースへコンテンツ登録を行う。一方、高度なチューニング技術(JAEAで共通基盤技術として実施中)等の知見については、論文や説明資料とともに、サンプルコードの共有を行うことにより、分野内での成果の共有を図る。また、共通的に利用できるライブラリーなどは、マニ</p>

	<p>ュアルなどを整備し、ダウンロード可能にする。必要に応じて、利用説明会やHand Onセミナーを実施する(AICSや他分野とも協力)。</p> <p>フォローアップ状況(H27.2月時点)</p> <p>【課題間連携について】</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ 課題4と課題1との連携では、高迎角時の翼周り流れのプラズマアクチュエータによる制御方法に関する設計探査を実施。有益な知見を得ることに成功し、日本機械学会第11回最適化シンポジウム、アメリカ航空宇宙学会国際会議 Scitechなどで成果を発表済み。現在ジャーナル論文を準備中。また、課題4と課題3の連携では、自動車タイヤのフィン形状の空力多目的設計探査を実施中である、2015年度中に成果をあげ、横浜ゴムからプレスリリースを出すことが目標。 ◆ 課題4の多目的設計探査技術については HPC/PFへの導入テストを実施中。 <p>【課題間の情報共有について】</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ 高度なチューニング技術(共通基盤)については、HPC/PFに事例を実装して成果の共有を図っている。さらに、共通の利用が可能な遠隔可視化システムは、平成27年度にオープンソース化の予定。 <p>H28.2月時点</p> <p>課題4と課題1との連携については、東海旅客鉄道(株)が開発中の超伝導リニアの空力音響設計探査を実施。また、課題4と課題3が連携して、横浜ゴム(株)が開発中の自動車タイヤのフィン形状の空力設計探査を実施。結果が横浜ゴム(株)からプレスリリースされるとともに、東京モーターショーで試作品が展示された。</p>
<p>(2)各観点の差評価と今後の研究開発の方向性</p>	
<p>産業界の関心が高いプリ・ポスト開発の成果を活用する人材育成への取組が必要である</p>	<p>対応案(H26.2月時)</p> <p>①大規模格子生成のプリプロセスについては、現在、階層的直交格子の自動生成プログラムを整備中である。生成した階層直交格子を元に非構造格子へ変換するプログラム開発を進めている。これらのプログラム整備により、直交格子系、非構造格子系の流体シミュレータについては、計算準備が整う。</p> <p>②ポストプロセスについては、並列で計算・出力された多数の計算結果をハンドリングし、イメージ生成(可視化)、</p>

	<p>分析などの処理にデータを受け渡す仕組み(ライブラリ)をAICSと協力してH25年度に開発予定である。このファイル入出力ライブラリを各アプリで共通に利用することによって、格子生成から可視化までのデータの一貫性が担保される。イメージ生成部である可視化システム開発は、プロジェクト当初からAICSで分担し(分野4の体制構築では人員・費用面などの点で賄えないため)、協力体制で進めている。H26上期にβ版をリリース予定で、これを受けてHPC/PFへと機能連携を実施する予定である。</p> <p>人材育成の観点では、HPC/PF利活用のセミナーの一環として実施を計画する。</p> <p>フォローアップ状況(H27.2月時点) 【課題間連携について】 プリプロセス:格子生成支援システムの整備はやや遅れているが、今年度中に非構造格子対応を実施予定。 ポストプロセス:AICSからリリースの大規模並列可視化システムをHPC/PFとシームレスに利用可能なように整備中で、利用者の利便性を向上させている。 【人材育成について】 HPC/PF利活用セミナー第1回を実施済(H25年12月)。ポスト機能(可視化)等について高評価を得ている。</p> <p>H28.2月時点 【課題間連携について】 プリプロセス:格子生成支援システムの整備は、FFB/FFRをターゲットに整備対応済み。 ポストプロセス:AICSからリリースの大規模並列可視化システムをHPC/PFとシームレスに利用可能なように整備し、利用者の利便性を向上させている。 【人材育成について】 HPC/PFと分野4関連解析アプリを連携させた解析実習セミナーを計6回開催済み。パラメータスタディー機能やポスト機能(可視化)等について高評価を得ている。</p>
【効率性】	
<p>より具体的な事例の情報発信、企業の経営的な視点(費用効果など)も考慮した広角的な説明会の実施、企業トップマネジメント層へのPR活動など、産業応用をより強く意識した取</p>	<p>対応案(H26.2月時) ①情報発信活動については、昨年11月にアウトリーチ専用サイト(計算工学ナビ)を設けて、分野4の最新情報をタイムリーにわかりやすく広報して行く仕組みができています。今後は、PR効果の高い情報(「京」による先端的事例を含</p>

<p>組が必要である。</p>	<p>む具体的解析事例、ベンチマーク結果等)の蓄積を継続的に実施し発信して行く。</p> <p>②経営的な視点を考慮したPR活動の強化については、まずは実際の設計業務に活用した場合の具体的な効果を明確にすることが重要で、現在それを評価するための設計システムを検討中であり、これを構築する部品群の整備や機能評価の準備を実施中。今後、企業での利用シナリオを想定した設計システムを構築し、まずその利活用により得られるメリットなどをより明確にする。その上で、開発提供システムのメリットや展開シナリオの説明資料を整理し、企業の意思決定マネジメント層にフォーカスした効果的な情報発信を検討する。</p> <p>フォローアップ状況(H27.2月時点) 【事例情報の拡充と効果的PR活動】 特に産業界等から大きな関心が寄せられている「京」の事例については、企業経営層等の専門家でない意思決定層の理解を得ることが先決であり、インパクトのある要点を平易に解説した事例DBを作成中。4件程度／アプリ目標。前記事例DBの他、HPC対応アプリやその活用例、普及行事、ニュースレター(3～4か月おき)を専用サイト(計算工学ナビ)にて配信中。新規アクセス数が増加中。(関連施策の中でも状況報告)</p> <p>H28.2月時点 企業経営上有用な情報の提供を狙った事例DBの蓄積と公開を継続的に実施し、一層興味をもたれている。事例DBの他、HPC対応アプリやその活用例、普及行事、ニュースレターを専用サイトにて配信続行中で、新規アクセス数が増加している。</p>
<p>一部研究開発課題については、研究開発課題間の更なる積極的な連携が図れる体制作りが望まれる。</p>	<p>高度なチューニング技術(JAEAで共通基盤技術として実施中)等の知見については、論文や説明資料とともに、サンプルコードの共有を行うことにより、分野内での成果の共有を図った。共通利用が可能な遠隔可視化システムについてはオープンソースソフトウェアとして公開し、マニュアルや利用事例の説明資料を整備した。</p>

(3)201506 行政事業レビュー「公開プロセス」コメント

中間評価指摘事項	対応
<p>成果指標の達成度合が不明瞭なため、個々の研究開発目標の評価・</p>	<p>成果指標設定の際、その根拠(学術的意味合いや産業利用上の効果)を一層明確にしておく。</p>

<p>分析において工夫すべき。</p>	<p>アプリ性能や普及度、ものづくり現場での評価などを重要な指標とする。</p> <p>学術的な成果については分野で高い評価を受けている学術誌に多数の論文を投稿していること、また当該分野で世界的に著名な研究者による個別の評価文書を受けている。世界に先駆けた成果があることは、これらが示している。各産業界から共同研究の申し込みが多数あったことが産業実利用の証明である。</p> <p>実問題に有効な多目的設計探査手法を開発し、その有効性を実証することを目標としたが、自動車車両構造設計、超電導リニアの空力音響設計、タイヤの空力設計などにおいてその有効性を実証することに成功した。</p> <p>事業貢献という観点から評価分析した(安全審査等の耐震性解析結果のデータを京を用いて提出できた)。</p>
<p>国民に対し、コストパフォーマンスを含めた事業成果についてわかりやすく表示すること</p>	<p>一般論ではなく、対応事例((例)自動車)を採りあげて、費用対効果を具体的に示す。</p> <p>ものづくり現場で役立つアプリの開発・普及による民の研究開発の高度化とコスト削減に貢献した。</p> <p>課題1はプロダクトイノベーションを目指すもので、直近の直接的な効果ではなく、この概念が新たな空気力学設計に活かされはじめたときに、産業競争力と高める意味で大きな成果となる。</p> <p>自動車車両構造設計、超電導リニアの空力音響設計、タイヤの空力設計などに取り組んだ。これらの成果によりラフな見積もりではあるが十分国費に見合う経済効果が見込まれる。また今後京コンピュータクラスの計算機が企業で利用になれば、さらに大きな経済効果が見込まれる。</p> <p>原子力施設の耐震性解析に、従来解析に加えて分析結果を提出したことは、安全性を高める努力に貢献できた。</p>
<p>官と民の適切な役割分担により、民の活力を活用すべき</p>	<p>民はニーズの提供(人材派遣も含む)、官はシーズの発掘・研究開発と提供という役割分担で連携している。</p> <p>課題1は学術成果をデバイスの設計指針に活かしているところに特徴がある。産業界へはその設計指針を提供した。具体的な利用は、実験なども含めて別途立ち上がっている企業との共同研究を通じて、展開され、民の活力を増強している。</p> <p>官民の共同研究を実施し民の活力の活用を促進する(官での解析・予測と民での実証とフィードバック)</p> <p>企業には主に得られた計算結果の分析を担当いただいた。また、計算結果の後処理用ソフトウェアの開発も分担</p>

	<p>していただいた。</p> <p>本プログラム終了後も、共同研究の継続を図ることで、官主導の協力から民主導へと移行していく。</p>
<p>ポスト京に向け、これまでの課題分析、官民の役割分担、成果を見えるようにして、次の事業展開につなげるべき</p>	<p>一般論ではなく、対応事例((例)自動車)を採りあげて、費用対効果を具体的に示す。</p> <p>民はニーズの提供(人材派遣も含む)、官はシーズの発掘・研究開発と提供という役割分担で連携している。</p> <p>これまでの課題成果は、論文発表や共同研究を通じて広く世間に公表している。加えて、データやプロットを新規作成のウェブサイトを通じて公開することで、本技術の新たな利用を進めている。</p> <p>WS、シンポジウム、プレス発表などを通じた広報、企業コンソーシアムなどでのコミュニティーの醸成などで見える化を図る。</p> <p>ポスト京に向けた技術的な課題についてはポスト京重点課題の提案書に記載したとおりである。ポスト京でも企業には主に得られた計算結果の分析を担当いただくとともに、計算結果の後処理用ソフトウェアの開発も一部分担していただきたいと考えている。</p>
<p>25 の研究開発目標について、目標を達成したという評価になっているが、具体的にどのような評価指標のもと、どのような評価基準に基づいてそのような評価になったかわかりづらい。</p>	<p>成果指標設定の際、その根拠(学術的意味合いや産業利用上の効果)を一層明確にしておく。理解をより深めるためには、設定目標自体の意義についてさらに掘り下げておくことが必要。</p> <p>著名な研究者による国際評価を実施した。多数の国際会議における基調講演、複数の国際誌へのレビュー記事依頼などが客観的な判断基準である。</p> <p>ナノ構造プロセスの新規な知見の獲得と、ものづくり現場でのデバイス開発の加速への貢献、ものづくり現場で役立つアプリの開発・普及を指標とする。</p> <p>実問題に有効な多目的設計探査手法を開発し、その有効性を実証することを目標としたが、自動車車両構造設計、超電導リニアの空力音響設計、タイヤの空力設計などにおいてその有効性を実証することに成功した。</p> <p>事業的な評価基準として、安全審査等への貢献を掲げ、耐震性解析結果のデータを京を用いて提出できた。</p>
<p>本事業の成果(コストパフォーマンス)をより理解できるようにする一層の工夫が必要。</p>	<p>一般論ではなく、対応事例((例)自動車)を採りあげて、費用対効果を具体的に示す。</p> <p>広報、コミュニティー醸成を強化する。</p> <p>横浜ゴム(株)にご協力いただいて、東京モーターショーに開発されたタイヤの試作品を展示していただいた。また、2015年10月15日に横浜ゴムからニュースリリースされて</p>

	<p>いる。東海旅客鉄道(株)にご協力いただいて、国際フロンティア産業メッセ2015で超電導リニア設計の成果を発表した。新聞広報するとともに、担当企業も技術の有用性を認めてもらえ、ホームページの第一ページに成果が掲載された。</p>
<p>成果、効果、社会的インパクトに関する一般的認知が低い。</p>	<p>一般にわかりやすい形での成果や効果(具体的事例ベース)にまとめて公表する。蓄積されたそれらの情報が随時閲覧できるサイトを設ける。</p> <p>プレス発表などによる広報活動を強化する。</p> <p>TBS「夢の扉」、企業の内部報や解説記事、一般向けの講演、機械学会の研究会を通じて公表している。</p> <p>横浜ゴム(株)にご協力いただいて、東京モーターショーに開発されたタイヤの試作品を展示していただいた。また、2015年10月15日に横浜ゴムからニュースリリースされている。東海旅客鉄道(株)にご協力いただいて、国際フロンティア産業メッセ2015で超電導リニア設計の成果を発表した。新聞広報するとともに、担当企業のホームページの第一ページに成果が掲載された。</p>
<p>官と民との役割・負担の分担がいささか不明瞭なところがある。</p>	<p>民はニーズの提供(人材派遣も含む)、官はシーズの発掘・研究開発と提供という役割分担で連携している。</p> <p>課題5では、解析技術というシーズに対して、民は解析対象というニーズを提供するという分担をした。</p> <p>民でのアプリ開発は困難、官でのアプリ開発と民での実証の役割分担を実施した。</p> <p>企業には主に得られた計算結果の分析を担当いただいた。また、計算結果の後処理用ソフトウェアの開発も分担していただいた。</p>
<p>より多くの国民に HPCI の効果を知ってもらうために、より平易かつ統合されたかたちでその社会における重要性を示す努力が必要。</p>	<p>一般にわかりやすい形での成果や効果(具体的事例ベース)にまとめて公表する。蓄積されたそれらの情報が随時閲覧できるサイトを設ける。</p> <p>横浜ゴム(株)にご協力いただいて、東京モーターショーに開発されたタイヤの試作品を展示していただいた。また、2015年10月15日に横浜ゴムからニュースリリースされている。東海旅客鉄道(株)にご協力いただいて、国際フロンティア産業メッセ2015で超電導リニア設計の成果を発表した。新聞広報するとともに、担当企業のホームページの第一ページに成果が掲載されとともに、自機関のホームページの第一ページにも成果を掲載した。</p> <p>分野全体としての努力が必要である。</p>
<p>その際、官と民との役割、負担の分担を明瞭に説明すべき。</p>	<p>民はニーズの提供(人材派遣も含む)、官はシーズの発掘・研究開発と提供という役割分担で連携している。</p>

	<p>民にはニュースリリースや展示でご協力いただく。 解析技術というシーズに対して、民は解析対象というニーズを提供するという分担をした。</p>
<p>ポスト京においては、この事業における課題分析をきっちり行い、それを活かすべき。</p>	<p>特にものづくり分野は、「京」での実績と世界的な動向を照らし合わせ、今後の我が国のものづくりに対して重要な課題設定を行う。課題分析により民の活力の活用、官民の明確な役割分担、成果の見える化に活かす。 ポスト京に向けた技術的な課題についてはポスト京重点課題の提案書に記載したとおりである。</p>
<p>ここで生じた成果を民間が活用する場合、公的な投資を回収する仕組みを構築すべき。</p>	<p>国家事業では、広範の産業分野で活用できる先端基盤技術開発が中心。それを民間が活用する場合は対象に特化したカスタマイズが必要になるので、その際における受益者負担の仕組み(共同研究等)が適当。 アプリは公開を原則としており、民でのアプリ活用による研究開発の迅速化・コスト削減によって産業界が活性化することが投資回収に繋がる。 自機関のスパコン上で公開利用できるように計画するとともに、本プログラム終了後も、共同研究の継続を図ることで、民利用へと移行していく。</p>
<p>これまでに用いた税に対する説明責任として、国が税を投入してリスクをとった意義の説明が不十分。</p>	<p>ものづくりの復権を目指すにはイノベーションの抜本的加速が必要。その先鞭をつける手段としてスパコンは重要。国際競争力に不可欠な HPCI の構築と最適化したアプリ開発とその実証により十分な意義を果たしており、その見える化を強化する。企業では、現時点で京コンピュータクラスのマシンを導入することはリスクが高い。しかしながら、今回の成果をうけて、スーパーコンピュータの導入を検討している企業もあると聞いている。技術は国家の体力指標の一つであり、国際的な技術競争の中で先駆的なスーパーコンピュータの利用技術を育成した意義は、少なくとも IT 先進国の末席は維持できた。</p>

(4)201511 行政事業レビューからの指摘

中間評価指摘事項	対応
<p>スーパーコンピュータ「京」の開発・整備に 1,000 億円を超える国費が投入されていることに鑑み、投入予算に見合った成果が得られているか、成果を基礎研究面での科学的な成果と、実用的成果とに分けて、国民に分かりやすく説明すべきであ</p>	<p>特にものづくり分野は実用的成果の分かりやすい説明が必要。そこで、製品(技術)別に具体的・定量的に経営面への効果(製品戦略、生産性向上等)を説明すべく工夫している。PRの方法については、タイムリーなトピックス紹介行事と並行して、蓄積した成果をDB化して随時公開する手段(専用サイト)も用い、広く国民の理解を得るよう努力している。</p>

<p>る。</p>	<p>分野あたり 25 億円、一課題あたりにすれば 1 億～3 億程度の投資であるが、固体力学分野の有限要素解析の技術向上を図れた。実用的な観点では安全審査等へのデータ提供を図れた。</p> <p>課題 1 の研究計画自体が、学術部分と産業界への展開という項目から構成されているため、成果は自動的に切り分けられている。成果の意義は、国際評価、各種国際会議における基調講演の依頼、国際誌へのレビュー記事の依頼、海外の大学からの共同研究の依頼などが客観的な事実である。工学研究なので、これらの依頼が多数あったのは実用的成果であるからこそである。</p> <p>実用的成果については、これまで開発した国プロアプリ(シミュレータ)毎に具体的事例を計算し、その結果を知識データベースとして整備、ウェブからダウンロードするしくみを構築し、かつデータベースを整備している。この知識データベースは単に結果を閲覧するだけでなく、ユーザが追試できるようなコンテンツとなっており、再利用性・波及性も考慮している。今後も継続的にデータを蓄積するとともに、レビューにより一定の品質を担保する検討も行っている。「次世代ものづくり」分野としては、科学面・実用面の双方に貢献するアプリ開発・普及と、実用面でのアプリ実証を実施し、成果を挙げた。</p> <p>自動車車両構造設計、超電導リニアの空力音響設計、タイヤの空力設計などに取り組んだ。これらの成果によりラフな見積もりではあるが十分国費に見合う経済効果が見込まれる。また今後京コンピュータクラス of 計算機が企業で利用になれば、さらに大きな経済効果が見込まれる。学術面での成果は成果発表リストにあるとおりである。</p>
-----------	--

⑤研究開発成果(平成 28 年 2 月 1 日時点)

(1) 輸送機器・流体機器の流体制御による革新的高効率化・低騒音化に関する研究開発

本研究課題では、(1)大規模流体解析ソフトウェアの整備に関する研究、(2) 流体制御メカニズムの解明に関する研究、(3) 実用問題への適用に関する研究の 3 つに項目を分け、(1)から(3)へと段階的にそれぞれの研究開発を進めてきた。(2)が主として科学的成果に、(3)が主として実用的成果に対応している。以下、各項目の成果を示す。

(1-1) 大規模流体解析ソフトウェアの整備に関する研究

本課題で利用する圧縮性ナビエ・ストークス方程式解法プログラムのチューニング、周辺ツールの作成を行った。チューニングは、単ノードではアルゴリズムの限界に近い性能値が得られており、ノード間並列性能も実利用に対して十分な値を得て、「京」での解析の効率化につなげた。また周辺ツールに関しては、アルゴリズムの開発から始め、プログラムを使える形にして本課題の解析に必須となるものを作成し、本課題後半での複雑形状の解析を実現させた。チューニング、アルゴリズムの開発では、世界に先駆けた科学的成果も同時に得られており、国際学会誌に投稿してその成果を広く公表している。

以下に小項目ごとに成果を示す。

(1-1-1) LANS3D のチューニングに関する研究

本研究は本課題全体で基本となる圧縮性ナビエ・ストークス方程式解法プログラム LANS3D の単ノードのチューニング(スカラーチューニング)からスタートした。Fig. 1-1 にスカラーチューニング前後の計算時間の計算処理割合を示す。スカラーチューニングとノード内並列の改善を行い、Fig. 1-1 の左図上紫色で表示されるスレッド間の同期待ち時間を減少させ、プログラムの高速化につなげた。チューニングは有効に働いており、最終的にチューニング後の単ノード性能として、アルゴリズムの限界に近い、理論性能の 10%程度の計算効率を得られた。手法の性質を考えると、非常に高い効率である。

また、ノード間並列性能についても当初性能の改善を行った。改善後 LANS3D による 24,576 ノードまでの並列性能を調査したところ、ウィークスケーリングの性能値が 95%程度となることを確認した(Fig. 1-2)。実利用に対して十分な数字と考えている。成果は論文発表(成果論文 1-36)しており、また他項目の解析効率化に貢献している。

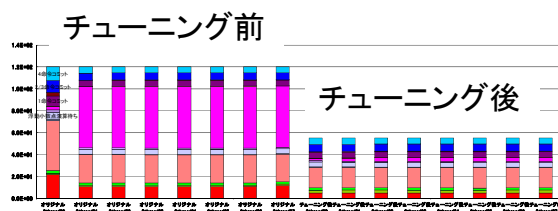


Fig. 1-1 Scalar tuning of LANS3D (computer time).

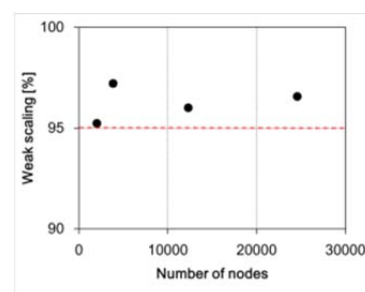


Fig. 1-2 Weak scaling parallel efficiency

(1-1-2) 複雑形状、制御/連成の対応に関する研究

実問題を対象とした流体制御シミュレーション実施のために、LANS3D の機能拡張に取り組んだ。本流体制御シミュレーションでは、スペクトル的解像度をもつ高解像度差分法が不可欠である。この手法は滑らかな格子／高精度な境界条件／高精度な物理量の補間を利用しており、周辺システムも従来のそれらと一線を画す必要があるため、独自の開発を行った。これらの開発は、アルゴリズムの開発から始めており、その学術成果は複数の論文にまとめている。(成果論文 1-32 など)

1. 移動物体と非移動物体が計算空間に混在する場合(例:プロペラ、車のタイヤ周りなど)、境界を空間格子に直接埋め込む手法がシミュレーション全体の時間を大きく軽減する。実問題への利用を考え、このような機能を基盤ソフトウェアに実装した。
2. 乱流域が境界に存在する場合等、境界埋め込みだけでは不十分な場合への対応として、相互領域間のデータのやりとりを行う手法を構築した。
3. ターボ機械などへの対応として、物体変形時でも流量等を保存できる高次精度メトリックの定式化を行い、提案する手法の優位性を確認した後、これを基盤ソフトウェアに実装した。(成果論文 1-32,43 など)
4. 将来想定される形状変更要求に迅速に対応するため、回転系の格子生成を効率的に行うシステムの構築を行った。

(1-2) 流体制御メカニズムの解明

翼を過ぎる剥離流れに対してそれぞれの流体制御に関する研究を行い、その流体制御のメカニズムを明らかにした。間欠的なプラズマアクチュエータ利用がより効果的である理由が乱流遷移現象にあることを明らかにし、その上で、直接運動量の投入、乱流遷移の利用、大規模渦構造の利用、といったメカニズムを大規模なパラメトリックスタディで世界に先駆けて明らかにした。さらなる性能向上方法を明らかにしながら、「京」ではじめて可能となるさらに大スケールの機器の解析を行うことでそれぞれのメカニズムの適用範囲・効果を明らかにした。特に、低/中レイノルズ数においては、上記3つのメカニズムが混在していることを明らかにし、シミュレーション上ではあるが、失速直後のケースでは、小さな運動量の投入によって、プラズマアクチュエータなしの場合に比して5倍以上の揚抗比(翼の性能)向上が実現することを示した。また、世界中の研究者が失速状態の制御のみに着目しているのに対して、本プラズマアクチュエータが巡航(定格)条件での性能向上にも効果を発揮すること、そこでは揚力増加よりも抵抗低減の効果を利用すべきことを世界ではじめて示した。これらの科学的知見は世界に先駆けて得られたものであり、後述する国際評価においても、研究の独自性や先進性、そして特に流体制御メカニズムの知見からデバイス設定の考え方につなげ、「科学的知見をデザインガイダンスに活かした点」が高く評価されている。知見は次項目の実用問題での解析においても役に立っており、産業界が本技術を利用する際の指針として、間接的とはいえ産業界への少なからぬ貢献となった。

予備的検討および初期のシミュレーションから、スケール(速度および規模)によって流体制御の考え方やその効果が大きく異なることがわかっている。本研究では高い優位性を有し、最も期待されているプラズマアクチュエータを中心に据え研究を進めているが、流体制御のメカニズムをよりよく理解するためにも、シンセティックジェットや定常ジェットによる制御も同時に行い、幅広い知見を獲得している(成果論文 1-11,39,47 など)。本研究は上述のように様々なスケールそれぞれで知見を得る必要があり、小スケール～大スケールに分け、翼を過ぎる剥離流れに対してそれぞれの流

体制御に関する研究を行った。本項目では(2-1)で小スケール(低レイノルズ数)の制御メカニズムおよび、小スケールにおけるさらなる高効率化、(2-2)で中スケール(中レイノルズ数)、(2-3)で大スケール(高レイノルズ数)の制御メカニズム解明に向けた研究成果をそれぞれ説明する。また(2-4)でこれらの解析で用いているプラズマアクチュエータの簡易モデルの信頼性確認に関する研究成果を説明する。

(1-2-1) 低レイノルズ数(=10⁵弱)での現象理解と知識基盤の構築

低いレイノルズ数を対象として、DBD プラズマアクチュエータを用いた流体制御に関する 200 ケースを超える大規模パラメトリックスタディを行った。個別ケースは第二階層の先端スーパーコンピュータでも実施可能であるが、本研究で行った 200 ケースを超えるパラメトリックスタディ(Fig. 1-3)は、実質的な意味で言えば、京を用いることで初めて実現可能となる成果である。以下に主な成果を示す。

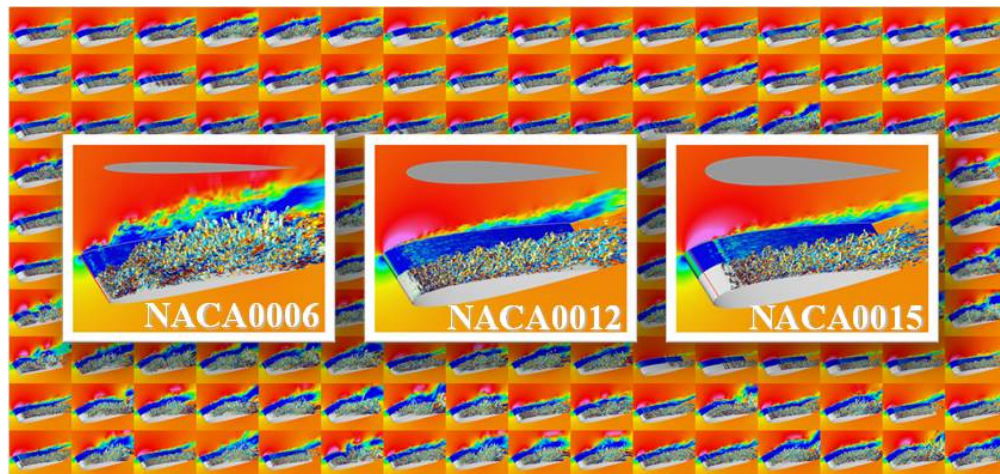


Fig. 1-3 Overview of the flow control simulations at the Reynolds number of 63,000. Iso-surface shows the second invariant of velocity gradient tensor with chord-wise vorticity contours.

効果的なデバイス設定パラメータの策定

まずデバイス設計の観点から、DBD プラズマアクチュエータの設置位置や駆動方法等の設計パラメータが制御効果に与える影響を調べ、このレイノルズ数領域での効率的な制御のためのパラメータの設定を明らかにした。結果の汎用性確認には、異なる翼型、異なる流れ条件でも同様の結果が得られることを確認する必要がある、キャパシティコンピューティングによる大規模パラメトリックスタディの価値を示す成果である。この成果は、プラズマアクチュエータの実応用、および流体制御を利用した「新たな流体機器設計の概念」構築の基盤となっている(成果論文 1-30 など)。

具体的には、以下の様な知見を得ている:

1. 流れの剥離点と効率的なアクチュエータ設置位置(Fig. 1-4)には強い相関がある。過去の実験研究等において推測的に示唆されていた事実を信頼出来る広範なデータから定量的に示したのは本研究が初めてであり、京を用いた詳細なグリッドサーチが示した大きな成果の一つである。
2. このスケール(低レイノルズ数)では、アクチュエータの連続駆動よりも間欠駆動(パースト波)が効果的である(Fig. 1-4 および Fig. 1-5 左図)。より大きな投入運動量となる連続的なアクチュエ

ーションよりも間欠的なアクチュエーションが効果的であることを確認した。

3. 適切なパラメータで制御した場合非常に小さい投入運動量(他のケースに比べ 1/1000 以下)でも制御可能(Fig. 1-5 右図)であることを明らかにした。

加えて、Fig. 1-4 などからもわかるように、適切なパラメータを選ぶことでアクチュエータオフに比して 5 倍以上の揚抗比(翼の性能)の向上が得られることを示した。

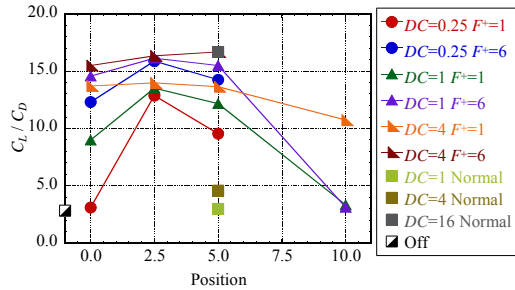


Fig. 1-4 Effects of position of the DBD plasma actuator on lift-to-drag ratio.

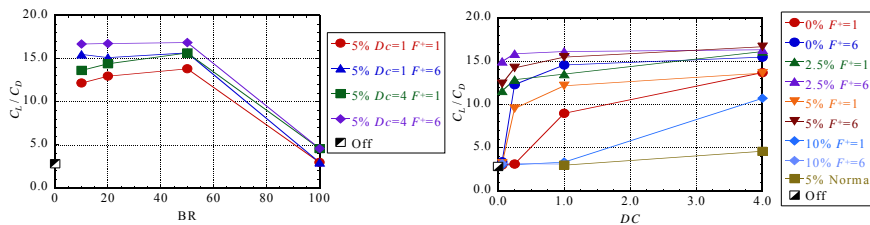


Fig. 1-5 Effects of the burst ratio (left) and input energy (right) of DBD plasma actuator on the lift-to-drag ratio.

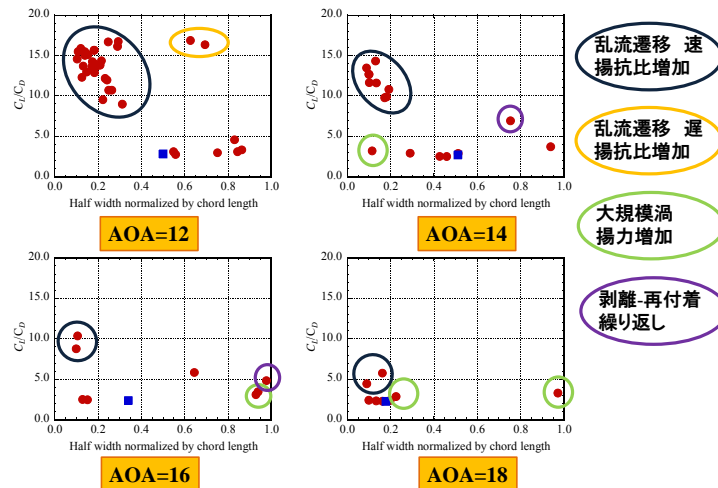


Fig. 1-6 Lift-to-drag ratio as a function of half width normalized by chord length. AOA indicates the angle of attack.

効果的デバイスパラメータの背景となる剥離制御の流体现象の明確化

低レイノルズ数での剥離制御における流体现象の理解を行うため、代表的なケースに対する詳細解析を行った。結果は、更なる高効率化を実現させる上で重要な知見となっている。以下に代表例を示す。詳細は成果論文 1-13 などを参考にされたい。Fig. 1-6 左上図の黄色で囲んだ領域に優れた性能を発揮するものが存在することは、限られたケースのシミュレーションでは見逃されてしま

う可能性が高い。実際に、これらのケースの存在が複数のメカニズム存在を知るきっかけになった。幅広い解析空間で多数のシミュレーションを実施することが工学分野では必要であること、高い性能のスーパーコンピュータ利用の意義をこのことが示している。

1. このレイノルズ数では、揚抗比が増加多くのケースにおいて早期の乱流遷移が観測された。すなわち、流れの剥離制御に乱流遷移が利用されていることを明らかにした(Fig. 1-6)。プラズマアクチュエータが2次元的な渦構造を発生させ、この渦構造および周辺の流れの乱流遷移による混合が、剥離を抑制することを明らかにした (Fig. 1-7 の右図)。
2. 推測的な部分が残るが、乱流遷移を利用するケースでは剥離せん断層の線形不安定周波数の1/2から1/3倍程度のバースト周波数を用い、1)ハーモニクス周波数によって不安定周波数を励起、2)遷移位置付近で渦のペアリングを促進していることを明らかにした。
3. 一方で、乱流遷移させて付着を促進させるだけではなく、設計パラメータに依存した3つの剥離制御メカニズムがあることを明らかにした。

項目別に示すと以下のようになる：

- 乱流遷移の利用(作用1)
 - 大規模渦構造の利用(作用2)
 - 直接運動量の供給(作用3)
4. 流れ場の観測と得られる性能の関係を分析した結果、失速直後の迎角や厚い前縁を持つ形状の場合など剥離剪断層が物体面に近い場合には作用1を利用する高い周波数のデバイス設定が、失速迎角を大きく越える迎角や薄い前縁形状などの場合は作用2を利用する低い周波数のデバイス設定が、そして、いずれの場合も高い電圧などで作用3を高めることが効果的であることを明確に示した。単一ではなく、複数の作用が存在する点がプラズマアクチュエータの特徴であり、それが優れた剥離制御性能の背景にある点を明らかにした。(成果論文 1-13,30) これまで、研究者によって最適な稼働条件が異なるという報告が存在したが、複数のメカニズムが存在し、流れや形状によって異なるメカニズムが有意であることがその原因であることを明らかにすることができた。具体的には、

(1)失速後大きく剥がれた流れや車など剥離剪断層が物体から大きく離れている場合、高いレイノルズ数(大きなスケール)の場合は、強い2次元渦構造を作ることで付着を促すストローハル数1.0前後のバースト電圧印加が効果的。なお、さらなる確認が残るが、バースト比(電圧オンの割合)80%程度(通常は10%でOK)がさらに高い効果を生む可能性を有する。

(2)比較的低いレイノルズ数(小から中スケール)で、失速直後、厚翼や前縁付近の曲率半径が大きいものなど剥離剪断層が物体面近傍にある場合は、乱流遷移や乱れ導入の効果を使うストローハル数6.0-10.0のバースト電圧印加が効果的。この数字は剥離剪断層のK-H不安定と強い関係がある。

(3)いずれの場合も高い電圧利用でより強い誘起流れを作ることは望ましい。

なお、これらの成果は別途科学研究費補助金で実施した小型風洞による試験においても確認されている。(成果論文 2-5)

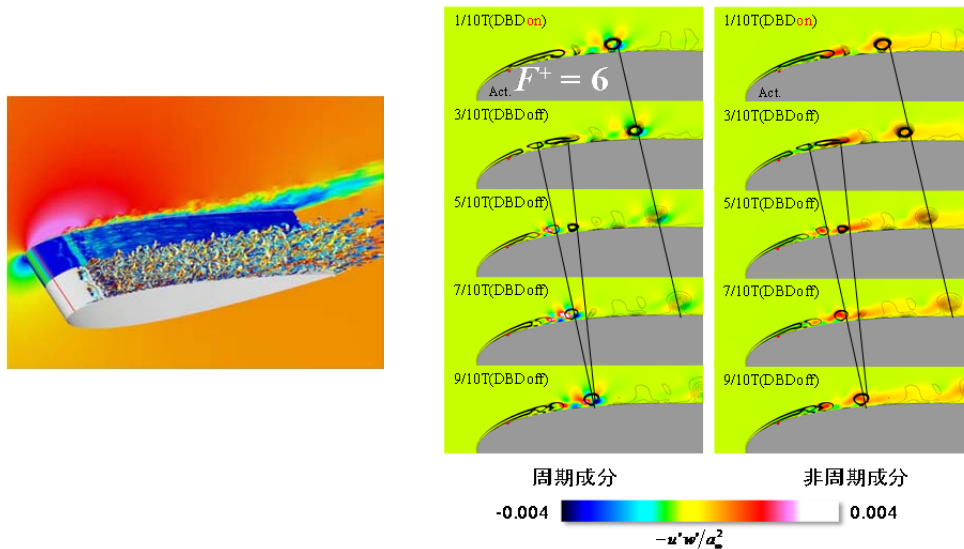


Fig. 1-7 Example snapshot of instantaneous three-dimensional flow structures (left) and phase-averaged flow field (right) around NACA0015 controlled by the DBD plasma actuator.

更なる効率化への試み

以下では、プラズマアクチュエータの更なる効率化に関する研究成果を示す。翼上面にプラズマアクチュエータを複数個配置し、これらを適切に駆動させることにより、1つのアクチュエータでは剥離抑制が困難な高迎角における剥離流れの制御効果について検討した。本項目の詳細は成果論文 2-19などを参照されたい。Fig. 1-8に示すようにアクチュエータはそれぞれ、前縁(コード長の0%)、20%、40%、60%、80%の5箇所に設置した。前縁のアクチュエータ(act 1)の駆動条件はフィードバック制御を用いた解析から導出した最適値に基づく(項目 3-2 参照)。その他のアクチュエータの駆動条件は単体の解析で有効なものを選んだ。Fig. 1-9に駆動するアクチュエータの個数に対する揚力および抗力係数の変化を示す。本結果より、抗力改善への寄与は小さいが、駆動するアクチュエータの個数を増やすほど揚力が増加できる。

Fig. 1-10はSingleとMultiの平均場を示している。Singleでは前縁のアクチュエータによって前縁剥離が抑制されているが、より後縁において再剥離する。これに対して、Multiのケースでは後縁における再剥離が抑制、より長い区間付着が維持される。Multiのケースでも前縁に設置したアクチュエータは乱流遷移を利用する一方、前縁以外に置いたアクチュエータの再剥離抑制のメカニズムはこれとは異なり、前縁のアクチュエータによって生成された2次元的な渦構造の促進や、直接的な運動量付加の効果を利用する。すなわち当初、明らかにした複数のメカニズムを同時に利用することでさらなる高効率化ができる可能性を示すことができた。

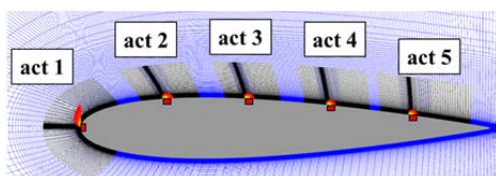


Fig. 1-8 Computational grid and actuator position.

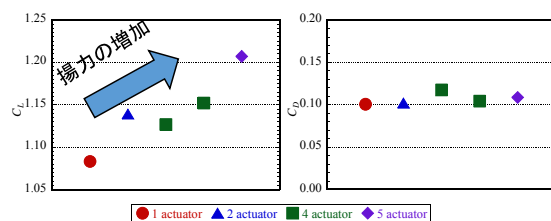


Fig. 1-9 Lift and drag coefficients for each actuator case.

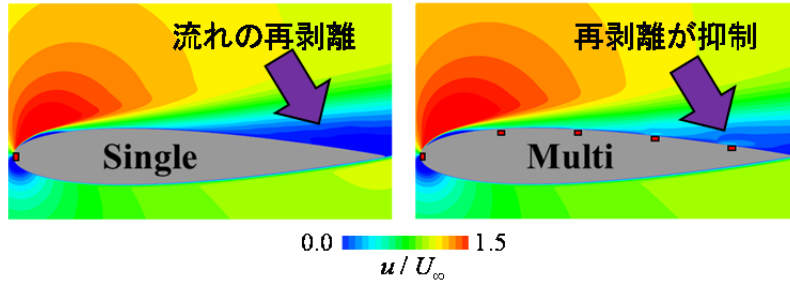


Fig. 1-10 Averaged flow fields for the single and multiple actuator cases.

(中間評価でも指摘されたロバスト性向上の観点から)失速後迎角に加え、航空機の運用の大部分を占める巡航状態の比較的低い迎角を対象とした解析を行い、NACA0015 翼周りの流れに対するプラズマアクチュエータによる剥離制御の効果を調査した。また、その条件下での空力特性を、模型飛行機などで利用され高い空力性能を示すと言われる石井翼と比較することで、プラズマアクチュエータによる剥離制御の有用性を実証した。ここで、巡航迎角とは揚抗比が最大となる迎角であり、NACA0015 翼では 6° 、石井翼では 4° である。また、本報告における剥離制御のケースとして、無次元周波数 $F^+=6$ の結果を示す。

Fig. 1-11 にあるように制御なしの NACA0015 翼では、早い段階で乱れの成長が見え、乱流遷移が起きていることがわかる。一方、石井翼においてはスパン方向に軸を持った渦が後縁付近まで乱流遷移することなく移流する。制御された NACA0015 を見ると、制御なしの場合に比べてスパン方向に軸を持った渦が後縁付近まで移流しており、石井翼と似た流れ場となっている。優れた翼、もしくはそれを越える性能の翼をバーチャルに実現することは本研究の大きな目標であるが、ある意味、アクチュエータ利用がそのように作用していることが確認できた。

Fig. 1-12 に空力特性の比較を示す。非制御のケースでは、NACA0015 の方が揚力は大きいものの、揚抗比では石井翼の方が優れた値を示す。一方、制御された NACA0015 翼では、若干ではあるが非制御時の石井翼を越える揚抗比を実現している。実は、制御されたケースでは、前縁付近の逆流領域が非制御時と比較して小さくなり、このことが性能向上に寄与している。

以上、プラズマアクチュエータは、巡航条件下においても空力特性の向上に貢献でき、最終目標であるデバイス利用を前提とした単純形状による空力設計の可能性を有することが示唆される。

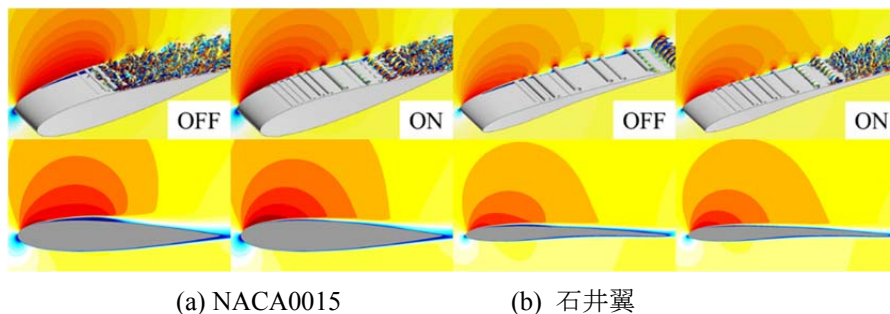


Fig. 1-11 Instantaneous flow fields (upper) and time-averaged flow fields (lower)

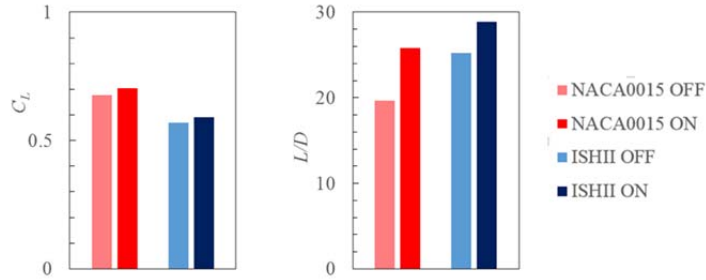


Fig. 1-12 Lift coefficient (left) and lift-to-drag ratio (right)

(1-2-2) 中レイノルズ数(=10⁵を越える)での現象理解と知識基盤の構築

NEDO プロジェクトにおける小型の回転機器への適用例や風洞試験結果があることなどから、このレベルのレイノルズ数でのプラズマアクチュエータ性能を確認することとした。以下に得られた成果を示す。レイノルズ数が1桁上がると必要計算時間は100倍近く増加する。結果、一定数以上のケーススタディには京のようなスーパーコンピュータが不可欠である。Fig. 1-13 に計算結果の一例を示す。得られたデータを解析した結果、このレイノルズ数域で起きている現象は低レイノルズ数条件下のそれとほぼ同じであり、結果としても実用的な大きさの投入エネルギー量でプラズマアクチュエータによる剥離抑制が実現可能であると確認した。(Fig.1-13)。(成果論文 2-81 など)。

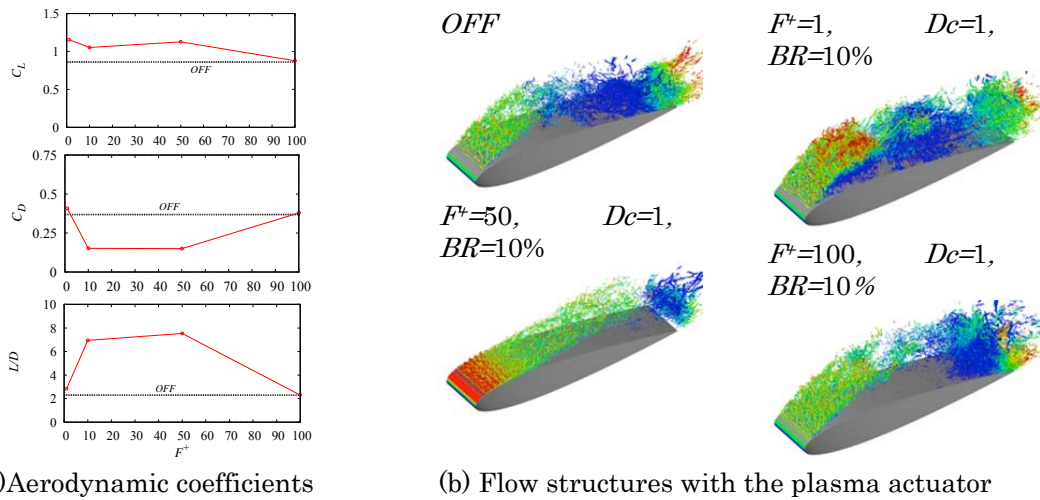


Fig. 1-13 Highlight of computed results at the Reynolds number 260,000.

(1-2-3) 高レイノルズ数での現象理解と知識基盤の構築

本項目は主にH24-H26年度に行った。特に25年度には重点課題枠として、より大きな計算資源を使わせて頂いた。本レイノルズ数に対しては、私たちの持つ高い空間格子解像度手法を用いても10億点規模の格子による解析が必要であり、計算対象のスパン幅を縮めるなどの工夫により、約2000ノードを用いたシミュレーションを10ケース程度行うことができた。言うまでもなく、このような大規模解析は「京」以外では実施不可能である。研究成果の詳細は論文 B46 および B47などを参照されたい。

Fig. 1-14 左図は無制御時の翼周り流れの渦構造であり、等値面は主流方向の速度で色付けされている。これより、本レイノルズ数域での制御対象が前縁付近ではなく、流れが乱流状態で剥離する乱流剥離であることがわかる。なお、このシミュレーション自体世界でも類を見ない高レイノルズ

ズ数における翼流れの詳細解析である。剥離点付近の流れ状態が層流状態での剥離が制御対象であった低・中レイノルズ数域と大きく異なることが本レイノルズ数域における剥離制御の特徴である。Fig. 1-15 に各ケースの揚力、抗力(左図)と制御時の流れ場の一例(右図)を示す。流れが乱流状態で剥離することから、低・中レイノルズ数域で効果的であった剥離せん断層の乱流遷移を促進するというメカニズム($F^+=100$ がそれに該当)はあまり効果的でない、一方アクチュエータを乱流剥離位置(14.5%)に設置し、バースト周波数を $F^+=1$ または Normal にしたケースで空力係数の改善が顕著である。以上より、本レイノルズ数域における効果的な乱流剥離制御には大規模な渦構造の利用が極めて有効であることを明らかにした(Fig. 1-16 参照)。また、前縁付近の層流剥離泡における乱流遷移を促進することで抗力が低減できることも明らかにした。

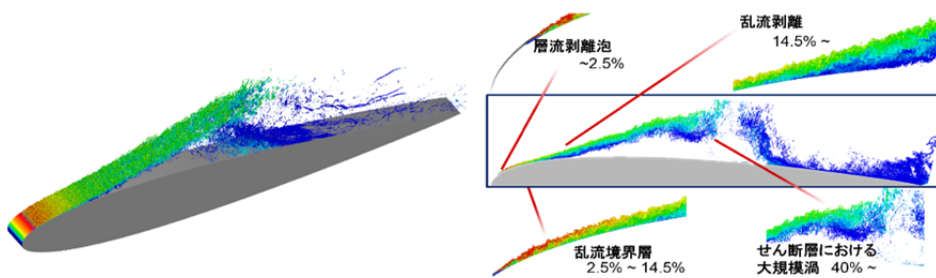


Fig. 1-14 Iso-surfaces of the second invariant of the velocity gradient tensors colored with chord-wise velocity (left), flow characteristics in each region (right).

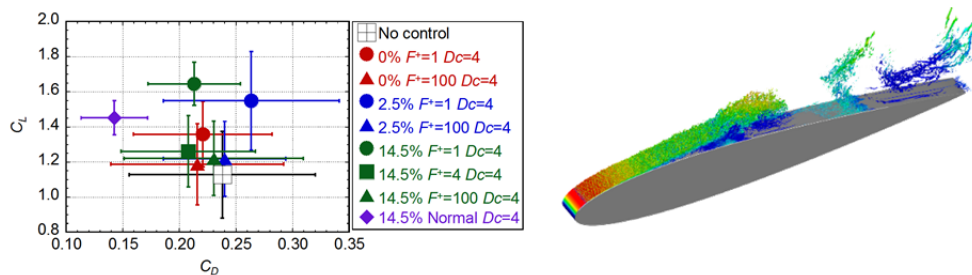


Fig. 1-15 Lift and drag coefficients for each case (left). Flow field of 14.5% $F^+=1$ $D_c=4$ case (right).

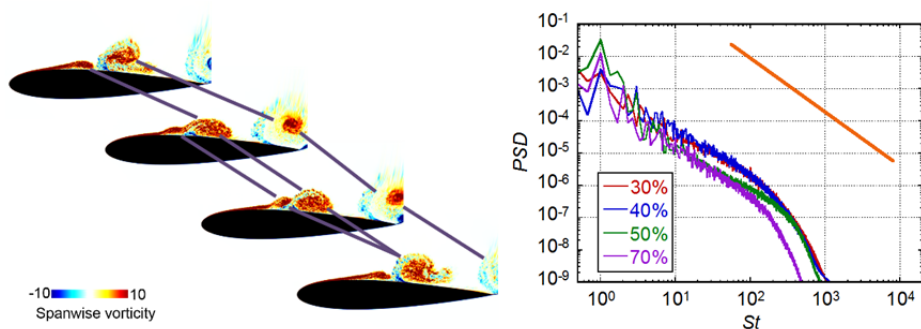


Fig. 1-16 Time development of the spanwise vorticity (left) and power spectra of the chord-wise velocity (right) for 14.5% $F^+=1$ $D_c=4$ case.

低レイノルズ数域($Re=10^4$)、中レイノルズ数域($Re=10^5$)および高レイノルズ数域($Re=10^6$)における翼周り剥離流れ制御についての研究成果を踏まえ、翼周り剥離制御におけるスケール効果(レイノルズ数効果)を調べた。詳細は成果論文 2-41 および 2-47 を参照されたい。Fig. 1-17 に各レイノルズ数における流れの瞬間場を示す。上段は無制御時の流れ、下段は制御時の流れである。無制御

時の流れの比較より、流れの渦スケールはレイノルズ数が高いほど細くなる。 $Re=10^4$ と $Re=10^5$ では前縁付近の層流境界層から流れが大規模に剥離するが、 $Re=10^6$ ではより後方において乱流境界層から乱流剥離が起こる。この違いにより、効果的な剥離制御メカニズムが $Re=10^4$ と $Re=10^5$ では乱流遷移による流れの再付着であるのに対し、 $Re=10^6$ では二次元的な大規模渦構造の誘起とその移流になる。

プラズマアクチュエータに関する研究で世界的にこれまで用いられてきた翼コード長と一様流速に基づく無次元バースト周波数(F^+)を用いた場合、レイノルズ数によって効果的な周波数の値が異なってくる。現象に基づいた定義を利用すれば統一的な議論が可能ならずである。そこで、剥離せん断層の特性に基づいた無次元バースト周波数を用いた定義を利用し、バースト周波数と制御効果について検討した。揚抗比に対するこのバースト周波数の影響を Fig. 1-18 に示す。図より、揚抗比増加の観点での効果的なバースト周波数の条件はレイノルズ数によらず $F_{\alpha} \approx 0.01$ となる。過去の剪断層不安定化の研究より、変曲点速度分布を有する層流せん断層での不安点周波数は $0.005 < St_{\alpha} < 0.016$ と報告されており、本研究における効果的なバースト周波数と同程度の値である。さらなる検討を要するが、この結果は、レイノルズ数によらず効果的なバースト周波数が剥離せん断層の不安定性、特にスパン方向渦の放出周波数と密接に関係することを示唆している(現在、ジャーナル論文を準備中)。

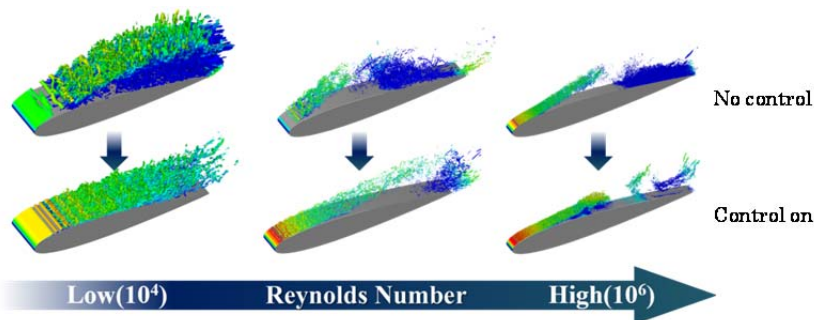


Fig. 1-17 Instantaneous flow-fields for no control and controlled cases at each Reynolds number.

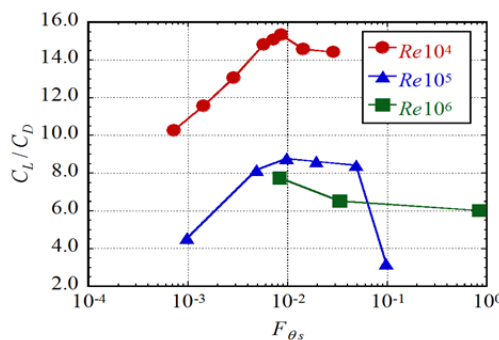


Fig. 1-18 Effect of the burst frequency non-dimensionalized by the characteristics of the separation shear-layer in each Reynolds number region.

ものづくりの観点では実際にどの程度の性能向上が得られるかが重要である。そこで、検討した3つのレイノルズ数域において、翼の性能(空力特性)という観点で揚力と抗力がどの程度向上するのかを整理した。結果を Fig. 1-19 に示す。制御なしのケースと制御ありのケースを比較すると、3つすべてのレイノルズ数において明確な揚力増加がみられる。抗力についても全体に同様であるが、

高いレイノルズ数に限りその効果が小さい。2つの図を比較するとわかるように、 $Re=10^5$ 前後のレイノルズ数では(すでに述べた通り)5 倍以上の揚抗比(性能)の向上が、 $Re=2\sim 3\times 10^5$ のレイノルズ数ではおよそ 3 倍程度の揚抗比の向上が、そして $Re=10^6$ を越える高いレイノルズ数においては 2 倍弱の揚抗比の向上が見込まれることが示された。

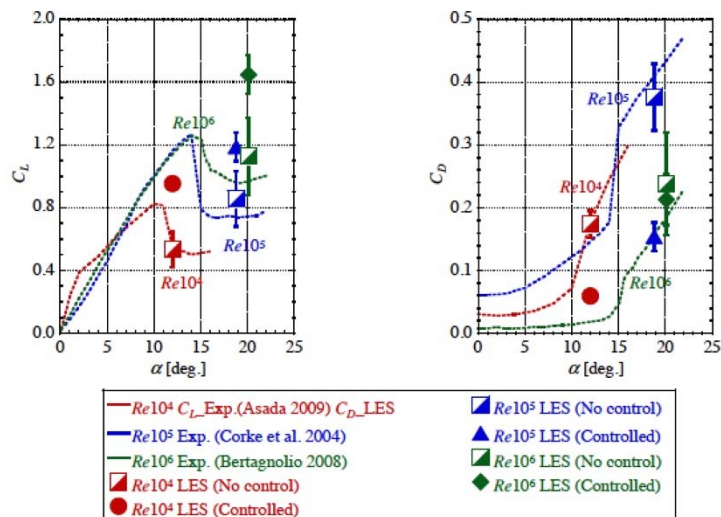


Fig. 1-19 Lift and drag coefficients.
-effect of plasma actuator at three different Reynolds number-

(1-2-4) プラズマ現象の理解とモデル化に関する研究

本項目は期間全体を通して行った。知見は得られ次第、他の項目の解析に活かしている。研究の詳細は成果論文 1-31 などを参考にされたい。本研究課題では、プラズマアクチュエータの作る体積力については既存のモデルを採用している。誘起流れ場や得られる翼面上圧力分布の実験との比較などで流体側からのモデル信頼性(成果論文 1-7, 9, 13)は確認済みであるが、詳細を記述するプラズマモデルを開発し、シミュレーションを進めることで、利用モデルの信頼性の検証、精度向上を議論した。

まず 2 次元シミュレーションによって体積力、電流等の実験との定性的な一致、正の電圧負荷時と負の電圧負荷時でそれぞれ放電の形態を明らかにした。また流体シミュレーションとのカップリングにより流体場の影響を評価した。続いて 3 次元シミュレーションを行うことで、放電のあとの枝分かれ「ブランピング」が数値シミュレーションでも再現できることを示し(Fig. 1-20)、より高精度の予測手法を開発した。この手法による解析では、プラズマアクチュエータの生み出す流体力の予測精度は格段に向上した。平均場は 2 次元解析で定性的に妥当な結果が得られるが、スパン方向の変動が存在することを示した。この手法による流体力の結果を 2 次元分布にして与えたものと本課題で用いている従来手法による流体力を比較し、運動量係数を合わせることでおおよそ同じ流れが実現できることを明らかにした。これにより本課題で用いた体積力モデルの妥当性を明らかにしており、流体シミュレーション側での検証と合わせて、シミュレーションの十分な精度をサポートする結果を得た。

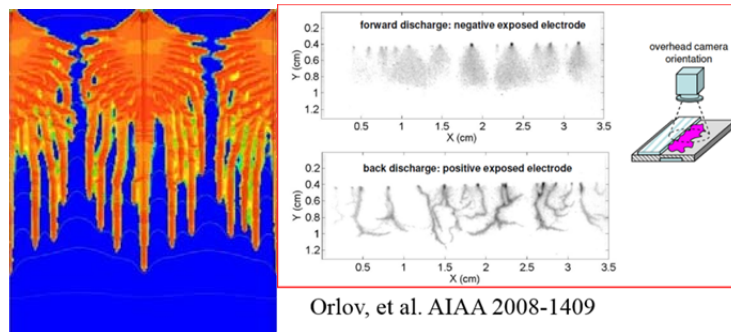


Fig. 1-20 Three-dimensional plasma simulation results compared with experiments.

(1-3) 実用問題への適用に関する研究

前項目で明らかにした翼を過ぎる剥離流れに対する効率的な剥離制御方法を基に、小型ファン、小型風車、大型風車、自動車などの一般形状を模した 2 次元ハンプ流れ、分岐を有する流路の解析を実施した。あわせてプラズマアクチュエータの実利用における汎用性を高めるに、翼型の制御効率を大幅に上げるための翼型周り剥離流れの動的制御を実施した。

小型ファン(回転直径 35cm)、小型風車(回転直径 2m)、大型風車(回転直径 60m)の回転機器では、固定翼型での成果と同様に、間欠的な駆動(バースト駆動)が有効であることを示し、そのメカニズムは大規模渦による混合の促進であることを示した。小型風車の解析で最大 20%の軸トルクの増加、大型風車を模した解析で最大約 16%の揚力の増加が実現可能であることを示した。また、ハンプ流れにおいても同様の制御方法が有効であることを示した。分岐を有する流路では、損失を増やさないために渦を作らないような制御方法が有効であることを示した。最後に翼型周りの動的制御では、動的な制御をすることでロバストにかつ大幅に流体機器の性能を向上できることを示した。加えて、動的な制御の結果を整理する過程で、静的な制御においても性能をさらに向上できるアクチュエータの駆動方法も明らかにできた。以上より、実用問題への適用に対してもシミュレーションを通じて、その可能性を示すことができた。

(1-3-1) 実用流体機器の革新的効率化・低騒音化に向けた研究

以下に小項目ごとに得られた成果を示す。

小型冷却用ファン(直径 35cm, 回転速度 2000rpm 程度)

まず、プラズマアクチュエータを用いた流体制御の実問題への適用例の 1 つとして、小型冷却用ファンに対して流体制御解析を行った。産業界では冷却用ファンなど、回転翼機器の小型化が強く求められている。しかし、小型化に伴う性能の低減や騒音発生が問題となっており、特に、流れの剥離に起因する性能低下の可能性が指摘されている。本項目では、小型冷却用ファンにおける剥離制御効果を検討した。

制御対象とするファンは直径が約 35cm、回転速度が約 2000[rpm]の冷却用ファンで、Root レイノルズ数が約 30000、Tip レイノルズ数が約 300000 となる。また、一様流速度は約 4[m/s]である。Fig. 1-21 は無制御時の瞬間場を示している。可視化は速度勾配テンソルの第二不変量の等値面であり、面は圧力で色付けされている。ただし解析は全領域の 1/5 を対象として行った。ファンの回転による送風が Fig. 1-22 に示す断面速度分布より確認できる。

本流れ場の翼面付近の平均周方向速度(翼静止座標系)を Fig. 1-23 に示す。本結果より、圧力面側で翼の前縁付近から流れの剥離が確認できる。この剥離流れに対して、翼前縁付近にプラズマアクチュエータを設置し、剥離制御を行った。Fig. 1-24 にバースト駆動およびノーマル駆動のケースにおける翼面付近の平均周方向速度を示す。図より、剥離領域(橙色丸)の低減がバースト駆動による剥離制御のケースで顕著である。本研究成果は最終年度後半のものであり、議論は現時点で議論はまだ不十分である。今後の議論で制御された流れの詳細が明らかになり、更なる性能向上が期待できると考えている。本結果より、冷却用ファンにおけるプラズマアクチュエータを用いた剥離制御の有効性が示された。

なお、本研究は実際の小型ファンメーカーの協力でモデル形状を作成し、シミュレーションを実施したものである。

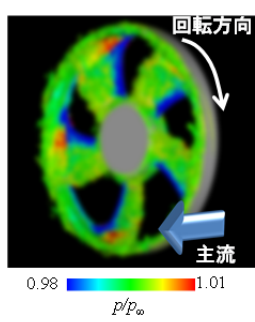


Fig. 1-21 Instantaneous flow field of the uncontrolled case.

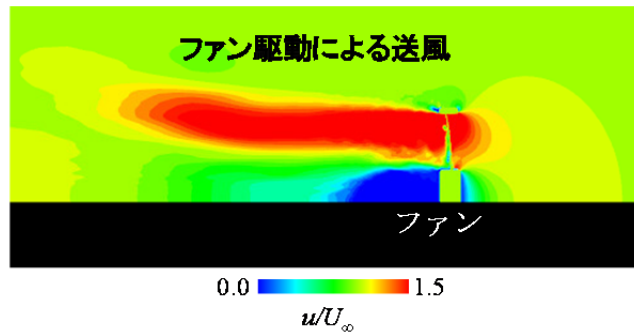


Fig. 1-22 Averaged distribution of the velocity in the freestream direction

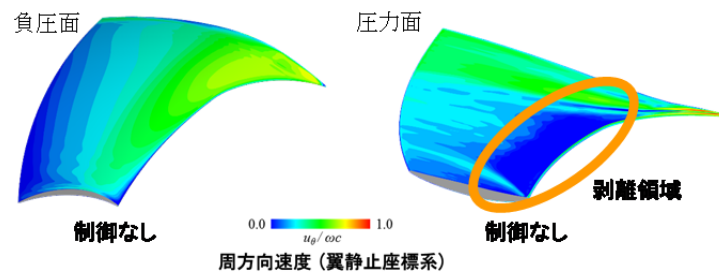


Fig. 1-23 Averaged distribution of the azimuthal velocity.

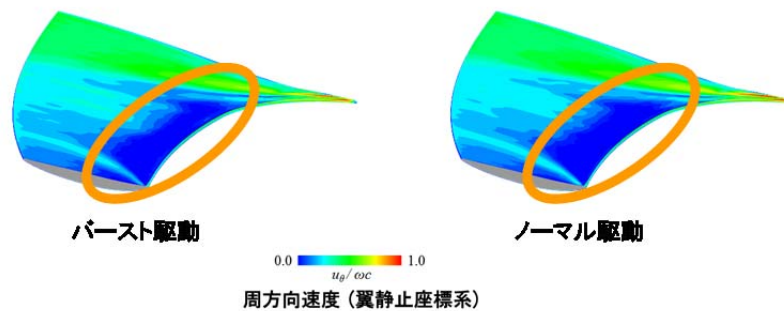


Fig. 1-24 Averaged distribution of the azimuthal velocity.

風車翼設計への適用

風車への適用は本研究課題開始当初からの重要な応用例である。特に、並行して企業を中心とした NEDO プロジェクトが進行中で、それらの試験データの提供を受け、一方で、本研究課題で得られた成果を展開することで研究の相乗効果を狙った。まず、JAXA 調布で行われた小型風車に関するプラズマ気流制御の実験(Fig. 1-25)に注目し、単純断面形状の三次元風車ブレード(回転直径 2m, 回転速度 174rpm)の大規模流体制御シミュレーションを行った。本解析の対象は三次元回転物体の周りの剥離現象であるため計算規模と計算時間ともに大規模であり、「京」を利用することで初めて実現可能である。

対象の流れ条件は、風洞試験にあわせたもので、ブレードの三次元形状はアスペクト比 5 の矩形、断面は NACA0012、スパン方向へのねじり角が 0 度の単純な三次元風車モデルである(Fig. 1-25)。ブレード端の周速比は 2 程度、さらに主流がヨー角を有するため、無制御時にはブレード周りの流れは失速状態である。

プラズマアクチュエータは参考実験と同様に各ブレード前縁部に取り付け、バースト波駆動と連続波駆動を作動条件として用い、バースト波駆動についても実験と同じ条件範囲を用いて数値シミュレーションを実施した [成果論文 2-56,71 など]。さらに、アクチュエータの投入運動量を変化させ制御効果への影響も調べた。

Fig. 1-26 に計算結果と参考にした実験結果の周期平均軸トルクの増加率とプラズマアクチュエータの作動条件の関係を示す。この図は、プラズマアクチュエータオンによる周期平均軸トルク増分を示したものである。この図からシミュレーションが実験結果をよく再現していること、また、風車ブレードのプラズマアクチュエータによる流体制御は、剥離により低下した周期平均軸トルクを 10% から最大 20% 程度増加できていることが確認できる。加えて、本プロジェクトで得た知識基盤(バースト駆動や投入運動量増加)を基に設計条件を工夫することで更なる性能向上の可能性も示すことができた。Fig. 1-27 は位相平均流れ場である。流れ場から 50% スパン位置よりブレード先端部で後流の減少も確認でき、これが制御効果によるトルク増加と対応するものである。

以上のように、流体制御により失速状態における風車の性能(トルク増加すなわち発電量の増加)を向上させられることが明らかとなり、効率的な制御パラメータが明らかとなった。産業界での本技術の促進に貢献できたと考えている。

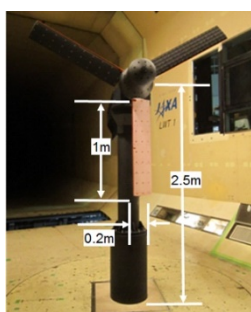


Fig. 1-25 Configuration of the experimental wind turbine model

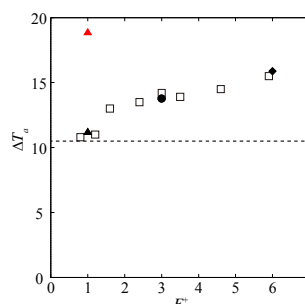


Fig. 1- 26 Effects of the plasma actuator parameter on the ratio of the cycle-averaged axial torque generation. (Filled mark symbols : simulation results, Open square symbols: experiment).

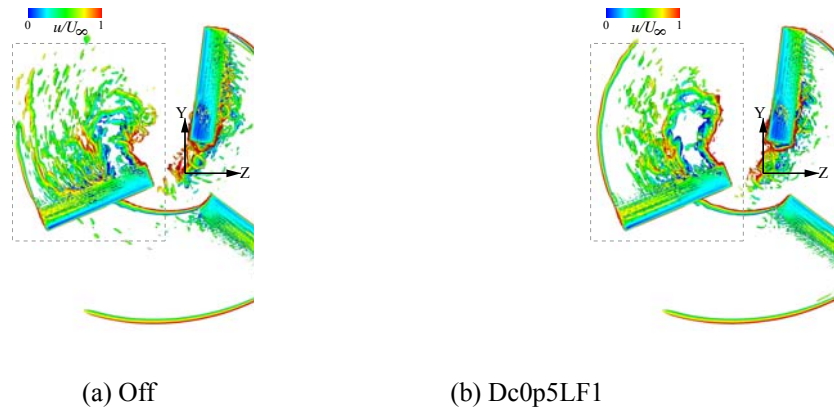


Fig. 1-27 Overall flow structures around the wind turbine blades. Iso-surface indicates second invariant of velocity gradient tensor. Color of iso- Q surface indicates the velocity component in the rotational plane.

本項目では実問題の1つとして実機スケール(回転直径 60m, 回転速度数 rpm)の風車周りの非定常流れ場を意識し、ブレード断面を取り出し、その断面翼型の動的失速時のシミュレーションを行った。初めに、必要な計算領域の検討を行った上で、流体数値解析プログラム LANS3D の動的失速流れ場解析における妥当性検証、及び低次元化したモデルを利用したブレード周りの動的失速非定常流れについて制御シミュレーションを行った。動的な流れ場の LES は時間スケールが大きく異なる乱流現象と動的失速現象の両方を解くために長時間の計算が要求されるため、適切なモデル化と「京」の利用で可能となったものである。本項目の詳細は成果論文 2 等にて公表予定である。

まず、ピッチング翼周り動的失速流れ場の解析結果の妥当性を JAXA 調布で行われた NACA0012 ピッチング翼に関するプラズマ気流制御の実験結果との比較により検証した。妥当性検証に先立ち、動的失速時には固定迎角の流れ場には見られない大規模な渦構造の生成が見られ、この大規模渦の挙動を解像するためより広い計算領域が要求される。この観点での必要計算領域を調べた研究は存在せず、大規模渦の有無及び解析目的に応じて必要となる計算領域が変わることを世界に先駆けて明らかにした(成果論文 2-4)。この検証結果を踏まえ、制御効果について解析を行い、実験との結果の比較から妥当性検証を行った。Fig. 1-28 に示す制御時の揚力係数(赤)と非制御時の揚力係数(青)を比較すると、動的失速後(迎角 $20^\circ \sim$) とピッチングダウン時に大きな改善が見られ、ピッチング周期全体で約 16%の揚力係数の増加が流体制御により実現できることが示された。これは、プラズマアクチュエータにより大規模な渦構造を利用し、剥離せん断層を翼近くに引きつけることで揚力が向上し、付着の促進に成功している。

続いて、実機に用いられる風車用として設計された翼型の動的失速の流体制御効果を調べた。ここで、本翼型は動的流れの条件でもその翼形状から明確な動的失速を伴わない特徴的な流れ場が見られ、明確な制御効果を得るのが挑戦的であった。このような翼周りの流れ場に対し、これまでの知見(無制御時の剥離点近傍への設置の指針)を考慮し、翼上面側 60%位置にプラズマアクチュエータを設置し解析を行った。Fig. 1-29 に示す制御効果が最も現れた迎角での位相平均から、プラズマアクチュエータが後縁付近の大規模渦の形成タイミングを制御できること、及びそれにより抗力の低減が可能であることが分かった。ピッチング周期平均では、約 4%程度の揚力係数の向上ができた。本解析により、失速を伴わない動的流れ場においても、また、前縁以外の設置位置においてもプラズマアクチュエータの流体制御可能性を示すことができた。

以上のように、本項目では実スケール(回転直径 60m の風車を想定)の流体機器周り流れにおいて一般的に見られる動的な流れ場におけるプラズマアクチュエータの有用性を示し、また、流れ場の解析により動的失速流れ場における制御メカニズムについても明らかにした。

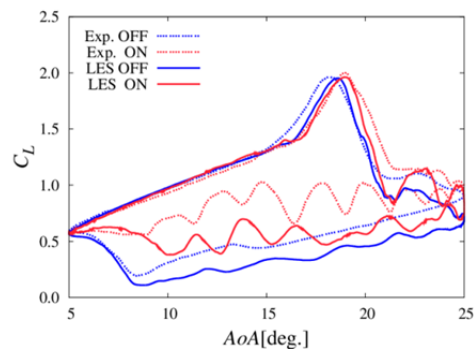


Fig. 1-28 Lift coefficient C_L against pitching angle of attack, comparing the results with experiment and LES for uncontrolled and controlled flow.

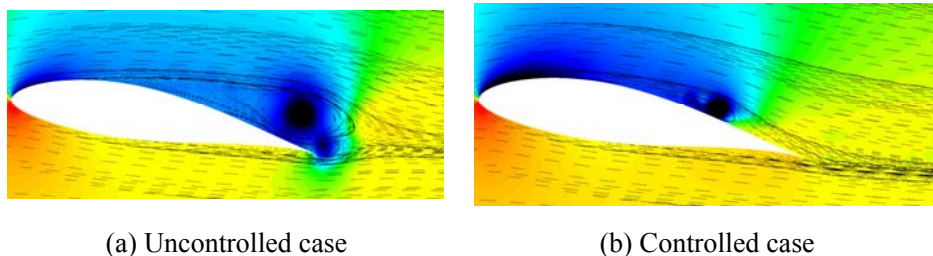


Fig. 1-29 Phase- and span-averaged distribution of pressure.

ハンブ形状を用いた車など輸送機器を考慮した一般物体形状への適用検討

上述の解析にあるような翼周りにとどまらず、自動車などの形状での流体制御も産業界でもとめられる。そこで、本報告では曲率のある壁面を有する典型的な流れ場として二次元ハンブ周りを対象に、局所体積力の時間周期駆動、ならびに空間分布している場合について、制御により生成する二次元的渦運動と、三次元的リブ構造による乱れの増加を解析し、制御によって剥離を抑制する機構と、周期的振動を付与する制御の最適な周波数もしくは波長を調べた。これらの成果は成果論文 1-1,10,44などを参照されたい。

時間周期駆動による流体制御の結果(Fig. 1-30)を示す。時間周期駆動の周波数によって、後流に生じる二次元渦の大きさが変化する。Fig. 1-31 に示す剥離領域長さを最も低減する時間周期駆動の周波数は、およそ 0.2 となり、これはレイノルズ数に依存しない。この値は、移流速度によってハンブ高さを直径とする渦を生成するに十分な時間周期を与える周波数 0.16 に近い値となっており、翼型でも有効なメカニズムの一つであった大規模渦の利用が一般的な応用においても効果的であることが明らかにされ、今後の一般的な形状での制御に役立つ知見となった。

空間分布している局所体積力の制御性能には波長依存性がある。剥離領域長さを最も低減する波長はハンブ周りの壁付近で生成するストリーク構造のものと同様である。時間駆動を利用しなくても、十分な制御効果が得られる可能性を示し、実用化の際に有用な知見が得られた。

現在、これまでの知見を生かして自動車会社との共同研究のもとで、車形状に対するシミュレーションを実施中であり、対応する風洞試験も進んでいる。また、神戸大学の坪倉教授の協力によって、課題間の連携として課題3で開発した自動車向けのソフトウェアに本デバイスの効果を入れ込んだシミュレーションを行う研究が進行中である。

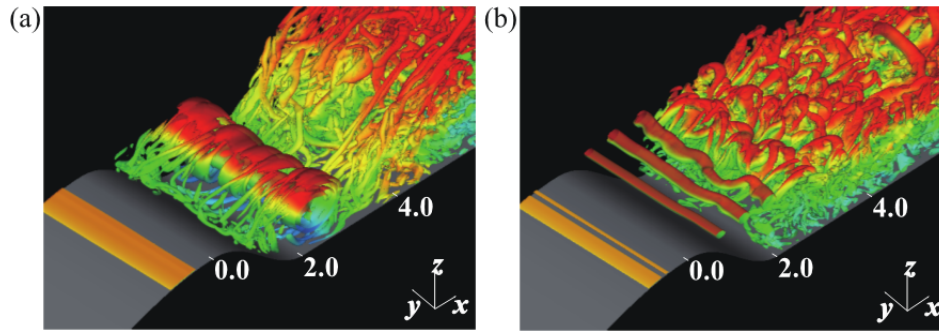


Fig. 1-30 Instantaneous flow fields controlled by burst mode actuation. Isosurfaces show the vortex structures. (a) $f_h = 0.10$, (b) $f_h = 1.0$

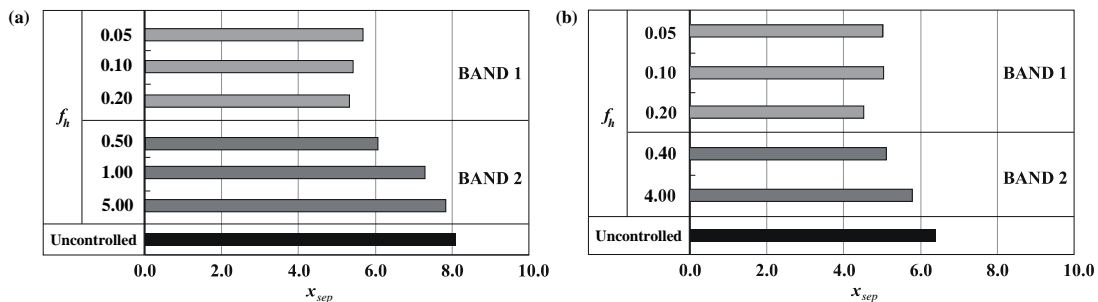


Fig. 1-31 Comparison of separation length for flow controls of different frequency. (a) $Re_h = 4,000$, (b) $Re_h = 16,000$

流路の損失低減化問題の適用

エネルギー有効利用のため、熱交換器性能の向上が求められている。空調機やカーエアコンなどに用いられる熱交換器内部の流れは複数の分岐・合流部を有するチャンネル流れと考えられ、レイノルズ数が 100 程度の層流状態である。この流体機器の伝熱性能向上のため、プラズマアクチュエータを用いた流体制御解析を実施した。低レイノルズ数域でのマイクロ熱交換器性能の向上を目的として、プラズマアクチュエータを用いたチャンネル流の制御効果は参考にした実験により実証しており、それらと同じ条件下でシミュレーションを実施した。複数の分岐、合流部を有するチャンネル流れでは、流路での圧力損失を低減し、各流路に流量を等分配させることが、制御性能の指標となる。ここではシミュレーションを用いてチャンネル内部流れ(Fig. 1-32)での制御効果を再現、解析するとともに、より高い効果をもたらすアクチュエータ配置位置を見出すことを狙った。成果の詳細は、成果論文 2-11 を参照のこと。

結果、体積力の相対的な空間サイズや強度によって、効果的なアクチュエータ設置位置が異なることがわかった。体積力が相対的に小さい場合は、上流の分岐部の入り口に最も近い位置に設置すると、非制御時の流量分配性能をおよそ維持したまま流量を最も増加できる。この結果は、参考にした実験結果と定性的に一致する。一方、体積力が相対的に大きく、主流速度に比べて誘起流速が大きい場合は、下流の合流部に設置すると非制御時の流量分配性能を向上または維持したまま全体としての流量を増加させることができる。以上のように制御入力の大さに応じた熱交換器性能のための制御指針が得られた。

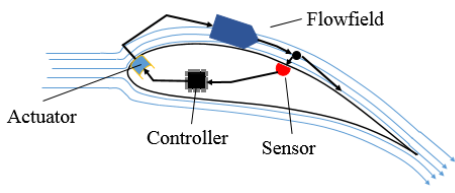


Fig. 1-33 Feedback System.

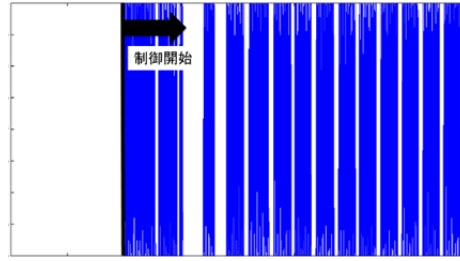


Fig. 1-34 Waveform obtained from feedback control.

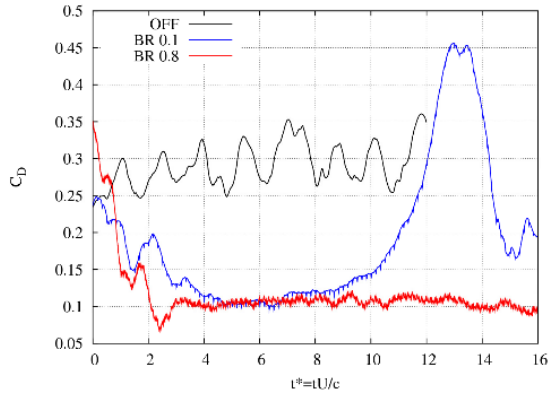


Fig. 1-35 Time developments of drag coefficients.

(2) 次世代半導体集積素子におけるカーボン系ナノ構造プロセスシミュレーションに関する研究開発

本研究課題では、次世代半導体集積素子における非シリコン系ナノ構造の特性・プロセスに関する第一原理シミュレーションによる研究を実施した。具体的には、(2-1) グラフェン創成プロセスに関する研究、(2-2) シリコンカーバイド酸化膜形成プロセスに関する研究、(2-3) 解析ソフトウェアに関する研究を進めた。具体的な成果を以下に示す。

(2-1) グラフェン創成プロセスに関する研究

グラフェン創成プロセスの基礎反応過程に対する実成長温度における第一原理分子動力学解析を実施した。非シリコン系材料の代表であるグラフェンは、その優れた特性のため次世代デバイス材料として期待されているが、高品質・大面積なグラフェンの作成が大きな課題となっている。有望なグラフェン成長法である、Cu や Ni 等の触媒金属表面 CVD 成長法、SiC 基板の熱分解法等のグラフェン成長過程に関して、絶対零度ではなく、従来実施が困難であった実成長温度における長時間の第一原理ダイナミクス・シミュレーションを実施し、グラフェン成長初期素過程の原子レベルでの解析に成功した。その結果、融点に近い実成長温度では、遷移金属の表面構造が乱雑化するため、成長グラフェンの平坦化とエッジの終端化が起こり、炭素原子-金属の相互作用や C-C 結合反応の energetics が強く影響を受け、絶対零度からのモデル描像・計算結果と定性的に異なる特性を示すこと等、実成長温度での創成プロセスに関する重要な知見を得た。

(2-1-1) 遷移金属 CVD 法によるグラフェン創成プロセスに関する研究

基本的な反応ステップとして、a) C-C ダイマ-の形成のプロセスと b) グラフェンエッジへの炭素原子取り込みの過程に着目し、energetics や原子間の相互作用を検討した。代表的な CVD 反応系である Cu(111)面と、その比較対象としてしばしば実験的に検討される Cu(001)面の反応を解析した。通常、このような反応過程を検討する場合は、静的な第一原理計算で平衡構造・遷移状態構造を求めるが、Cu-CVD 反応系は高温過程(銅の融点 1084°C に対し、典型的な反応系は $\sim 1000^{\circ}\text{C}$)のため、静的計算で得た構造が現実を反映しないことが予備計算で分かったため、第一原理 MD 計算による検討を行った。また予備計算の結果、C-C 結合の過程は遅く、通常の MD 計算では稀事象であることが判明した。このため、適当な反応座標を設けた拘束 MD 計算から blue moon 法で平均力ポテンシャルを求め、そこから反応エネルギーや活性化障壁のデータを抽出した。ここで実施した計算は、MD 法を用いた大規模計算(数百原子、数万タイムステップ)であり、京計算機を用いることで可能になったことに注意されたい。

a) C-C ダイマ-の形成プロセスに関する検討

はじめに Cu(111)面上の反応を検討した。過程 a) に対して得られた平均力とこれを積分して求めた平均力ポテンシャルを Fig.2-1 に示す。平均力は概ね連続であり、データサンプリングが十分であることを示している。平均力ポテンシャルを解析した結果、モノマー \rightarrow ダイマ-反応の活性化障壁と反応エネルギーはそれぞれ 0.77eV と -1.79eV という値になった。この数値から判断すると、反応はダイマ-形成に傾いていて 1000°C では十分速やかであることが示唆される。反応エネルギーについては、比較のために平坦表面モデルを用いた静的な構造最適化計算も行ってみた。静的な計算では、炭素原子モノマーは Cu の subsurface に結合すると最も安定で、炭素原子ダイマ-は表面上の hollow サイトに結合すると最も安定であるが、これらの構造を基にモノマー \rightarrow ダイマ-の反応エネルギーを求めると-2.32eV であった。この数値は MD 計算による-1.79eV とは有意に異なっており、静的

計算では C-Cu の相互作用が適切に計算されないことを意味している。Fig.2-2 に MD 計算におけるスナップショットを示した。1000°Cでは Cu 表面の層構造・表面格子は乱雑化する。炭素原子は C...C 間距離が長い間は Cu 表面の下に埋没して(c)、C-C 結合が出来ると Cu 最表面のレベルで運動する(b)。炭素原子とそれを取り巻く Cu の位置関係は静的計算のものとは明らかに異なっている。

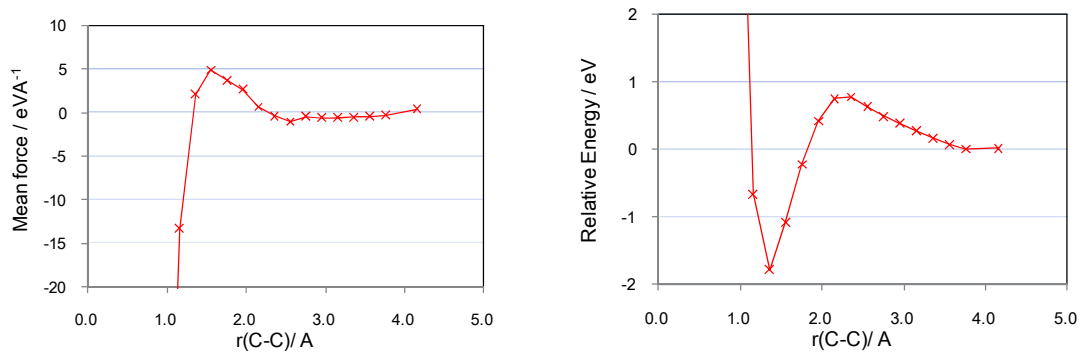


Fig.2-1 (a) mean force for the carbon atom dimerization process and (b) its integral (potential of mean force). Energy in b) is relative to the data point at $r(\text{C-C}) = \sim 3.76 \text{ \AA}$

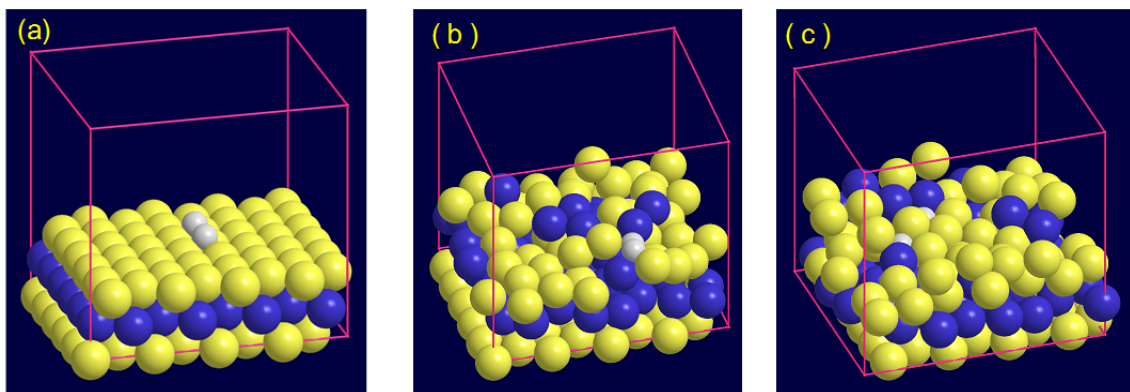


Fig.2-2 Snapshots from the MD simulations for carbon atom dimerization. (a): initial structure, (b) and (c): final step of simulations for $r(\text{C-C}) = 1.355 \text{ \AA}$ and $r(\text{C-C}) = 3.755 \text{ \AA}$, respectively. Copper atoms originally in the second layer are colored differently from the other copper atoms.

b) グラフェンエッジでの C-C 結合過程に関する検討

過程 a) と同様に、Cu(111)面上の過程 b) の活性化障壁および反応エネルギーを blue moon 計算により求めた。得られたデータを Fig.2-3 に整理した。Zigzag (ZZ)端の反応 0→1 及び ArmChair (AC) 端の反応 0→2 はグラフェン端へ1個の炭素原子が結合する過程である。これ以降のステップは第 2、第 3 の炭素原子がこの部位に取り込まれる過程で、反応全体で新たな六員環を生成する経路を構成している。この反応経路でグラフェンが成長するかどうかは十分に検証はされていないが、ここではグラフェンエッジへの炭素原子取り込みのパターンをいくつか調べ、グラフェン成長に必要なエネルギーについて大雑把な見当をつけることを狙いにしている。

Fig.2-3 の個々の素反応は3タイプに分類できる: 即ち 1) 炭素原子が単純にグラフェンエッジと結合する C-C 結合反応(赤色矢印)、2) 5 員環を形成する C-C 結合反応(青色矢印)、3) 5 員環から 6 員環への C-C 結合の組み換え反応(緑色矢印)である。反応エネルギーは 1)-3)のいずれでも負(発熱反応を意味する)だが、1)と2)のように新たに C-C 結合が出来る反応については、その大小は気相の

(Cu 表面のない計算での) 反応エネルギーの大きさを反映している。1)と2)反応はいずれも、グラフェンエッジのダングリングボンドを終端している C-Cu 結合を C-C 結合に置き換えるものであるため、このような対応があるものと考えられる。3)はこの系統から外れるため気相反応の数値は反映しない。3)は気相では比較的発熱が小さいにもかかわらず(反応エネルギーは 1)と 2)の-5 eV から-6 eV に対して、3)の~-2eV)、Cu 上での反応エネルギーが比較的大きいのが特徴である。3)がしっかりとした発熱反応になっていることは、成長途上でも 6 員環が安定な形態であることを示しており、グラフェンの成長モードを考える上では注目すべきことかもしれない。

図にはダイマー形成の数値も掲載した。上記の 1)の反応の活性化障壁は、ダイマー形成のものより若干大きい。従って、反応系の炭素原子モノマーの立場からすると、グラフェンエッジに結合するよりは、別のモノマーと結合する方がエネルギー的には優位ということである。このことは、グラフェンクラスターが十分に大きくなるか増えるかして、大半の炭素モノマーがグラフェンエッジにトラップされるようになるまで、炭素原子モノマーはダイマー形成(核形成)に使われるということの意味する。実際に反応系がこのような状況になっているとすれば、核生成の頻度を減らす方法として、ア)プリカーサの流量をコントロールし反応系の炭素モノマーの濃度を低く保つ、イ)エネルギー的な優位性が反応速度に強く反映されないように反応系の温度を高くする、等の工夫が考えられる。

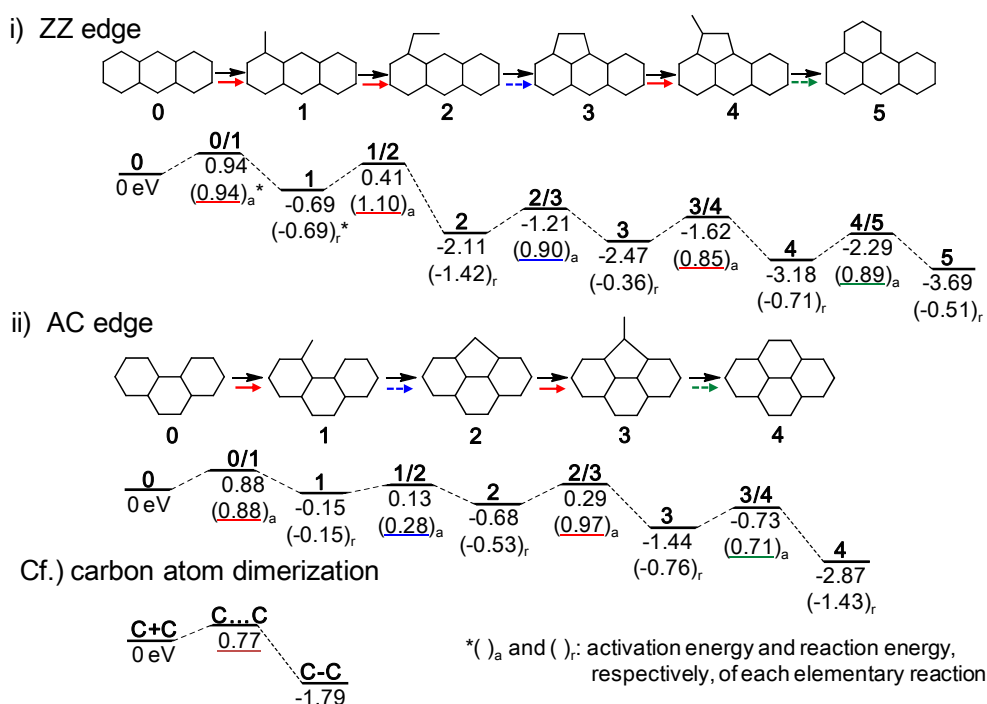


Fig. 2-3 Energy diagram for the carbon atom incorporation to ZZ and AC graphene edges (reaction energies and activation energies denoted with subscript r and a, respectively, and energies relative to the initial states (0) denoted without parentheses). Interatomic distances between bonding atom pairs are employed as reaction coordinates in the blue moon analyses.

過程 a) に対する結果と同様、MD 計算と静的計算では銅表面と炭素原子の相互作用が大きく違っている。一例として、Fig.2-3 の構造 2 に対する MD 計算のスナップショットと、対応する静的計算での最適化構造を Fig.2-4 に示す。最適化構造ではグラフェンリボンは平坦な Cu 表面上でアーチ型に湾曲してエッジのダングリングボンドが終端される格好になる。一方、MD 計算による構造では、グラフェンリボンはかなり平坦で、エッジ部分で Cu 表面が盛り上りステップ様の段差を作ってダングリン

グボンドを終端している。グラフェンリボンの平坦化とエッジの終端化の特徴は MD 計算に現れる構造全般に見られるものである。高温でのグラフェン成長の挙動を適切に解析するためには、実成長温度での大規模な MD 計算が必要であることが改めて確認できた。

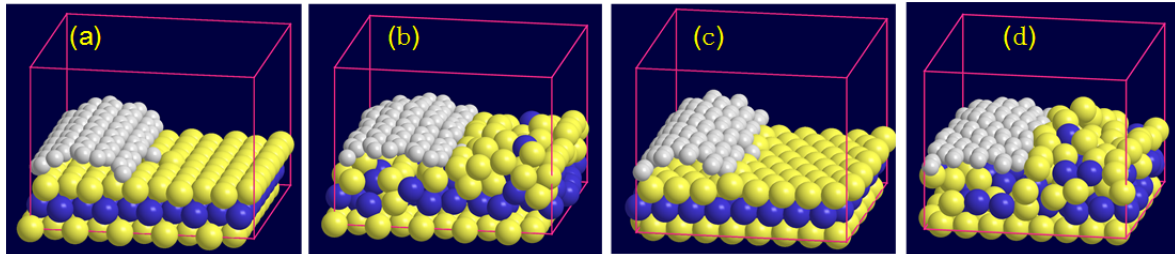
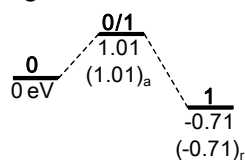


Fig.2-4 (a), (b), and (c), (d): optimized structures and snapshots of MD simulations, respectively, for 1 (ZZ) and 1(AC) in Fig.16. Copper atoms originally in the second layer are colored differently from the other copper atoms.

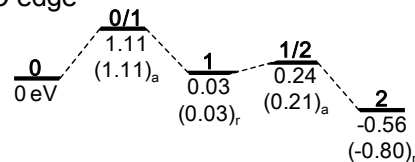
c) Cu(001)面上での反応に関する検討

Cu(111)面上の反応に加え、Cu(001)面上の反応(温度は同じく 1000 °C)を解析し、面方位によって反応挙動が原子レベルではどのように違うかを検討した。C-C ダイマーの形成プロセスに関しては、Cu(111)面の場合と同様に計算した。グラフェンエッジと炭素原子の反応については、Fig.2-3 の反応全体ではなく 0→1 (ZZ)と 0→2(AC)のプロセスについてのみ計算を行った。

i) ZZ edge



ii) AC edge



Cf.) carbon atom dimerization

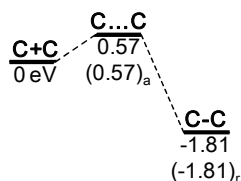


Fig.2-5 Reaction energies and activation energies (denoted with subscript r and a, respectively) calculated for the reactions on the models of Cu(001) surface (see Fig.2-3 for the structures of reaction steps 1 and 2). Energies without parentheses are relative to the initial states (0) for the respective series of reactions.

計算の結果(Fig.2-5)、反応エネルギー・活性化エネルギーともに Cu(111)面上の反応のものと比較的に近い数値が得られた。Cu(001)面上でも C-C ダイマー形成の反応の方がグラフェンエッジと炭素原子の反応よりエネルギー的に優位である。Cu(001)面上では Cu(111)面上に比べて、C-C ダイマー形成の反応の活性化障壁は低いため、この優位性はより顕著である。ここで得られた結果は Cu(001)面の CVD ではグラフェンのドメインが小さくなりやすいことを示唆しているかもしれない。

MD 計算のスナップショットを見ると、Cu(111)の場合と同様で、表面の格子が崩れることが分かった。また、炭素周りの構造に関しても、炭素原子モノマーは銅の中に埋没していること、ダイマーにな

ると銅表面上に浮上すること、グラフェンリボンのまわりでは Cu 表面が盛り上りステップ様の段差を作ってエッジのダングリグボンドを終端することなど、Cu(111)の場合と同様の特徴が見られた。一見、Cu(001)面と Cu(111)面の反応には構造的な違いがないように見えるが、実際には銅表面の乱雑化の仕方が多少違っていることが分かった：Cu(111)面モデルでは表面第2層の銅原子は最表面層銅原子と激しく入り混じるのに対して、Cu(001)面モデルでは表面第2層の銅原子が第3層原子の上にとどまるために、この入り混じりが比較的に抑えられている。炭素原子のないスラブモデルではこの乱雑化の違いが顕著に観察される：Fig.2-6 に示したようにCu(001)面モデルでは層構造が残っているのに対して Cu(111)面では層が崩れている。Cu(001)面と Cu(111)面では単位面積当たりの銅原子の個数が違っており(1 nm²にそれぞれ 15.3 個と 17.7 個)、密度の高い Cu(111)面で原子が層から飛び出しやすいためこのような違いが生じたようである。Cu(001)と Cu(111)の反応に対する計算結果の違いはこのことに関係したものである。

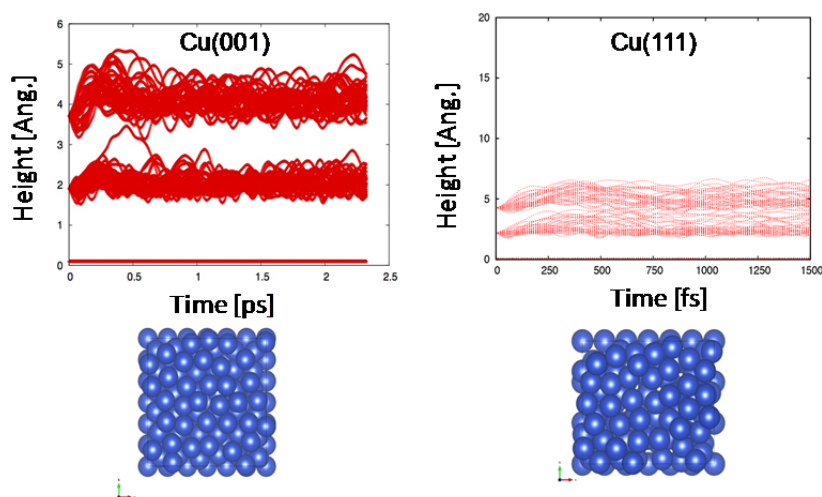


Fig.2-6 Plots of Cu atom height and MD snapshots for the simulations of Cu(001) and Cu(111) surfaces. Three layer slab models Cu₁₀₈ were employed in the calculations for both Cu(001) and Cu(111) surfaces.

d)まとめ

CVD 法による銅表面上のグラフェン成長に関して第一原理分子動力学計算に基づく解析を実施した。成長のキープロセスである C-C 対の生成とグラフェン核への C 原子取り込みの過程に着目し、その energetics を blue moon 法により解析した。この解析は、絶対零度ではなく、従来実施が困難であった実成長温度における長時間の第一原理ダイナミクス・シミュレーションに基づいていることが重要である。融点に近い実成長温度では、遷移金属の表面構造が乱雑化するため、成長グラフェンの平坦化とエッジの終端化が起こり、炭素原子-金属の相互作用や C-C 結合反応の energetics が強く影響を受け、絶対零度からのモデル描像・計算結果と定性的に異なる特性を示すことがわかった。検討の結果、反応系の原子様炭素は、グラフェン核と結合するより別の炭素原子と C-C 対を生成する方がエネルギー的には優位である、即ち、炭素原子はグラフェンを成長させるより新たな核を生成しやすいとの結果を得た。Cu-CVDにおいてグラフェンの単結晶化の妨げになっている核生成密度を制御するためには、炭素原料の供給速度を制限すること、反応温度を下げ過ぎないことが必要であることを明らかにした。