



ISSN 1349-113X
JAXA-SP-14-006

宇宙航空研究開発機構特別資料

JAXA Special Publication

第6回EFD/CFD融合ワークショップ
The 6th Workshop on Integration of EFD and CFD

2015年1月

宇宙航空研究開発機構

Japan Aerospace Exploration Agency

目 次

第 6 回 EFD/CFD 融合ワークショップ 開催趣意書	1
第 6 回 EFD/CFD 融合ワークショップ 実行委員会 委員名簿	2
第 6 回 EFD/CFD 融合ワークショップ プログラム	3
概要	4
アンサンブル感度解析：アジョイントコード不要論	資料非掲載
上野 玄太（統計数理研究所）	
EFD/CFD 融合における 3D プリンタの可能性	7
松尾 裕一（JAXA）	
データ同化技術への期待～乱流制御の視点から～	33
長谷川 洋介（東大生産研）	
不確定性定量化のための効果的手法の確立に向けた基礎研究	59
下山 幸治（東北大流体研）	
スパースモデリングとデータ駆動科学	資料非掲載
岡田 真人（東大新領域）	
非線形領域における EFD と飛行シミュレーションの融合	83
浅井 圭介（東北大）	

6th Workshop on Integration of EFD and CFD

第 6 回 EFD/CFD 融合ワークショップ

開催趣意書

実験流体力学 (Experimental Fluid Dynamics, EFD) と数値流体力学 (Computational Fluid Dynamics, CFD) は言うまでもなく現代の流体力学における二大手法であり、従来それぞれが独自のアプローチにより発展を遂げてきました。しかしながら、CFD は物理現象をモデル化して数値的に解を求めている以上、結果の妥当性を実際の流れとの比較により検証する必要がある一方で EFD には EFD 固有の不確かさ要素が存在し、また得られる情報にも制限が生じます。すなわち、EFD/CFD いずれも単独では信頼性や有効性を完全に満足することはできないということが言えるでしょう。そこで我々としては EFD/CFD 両者の二元論的な考え方を改めるとともに、単純比較を超えたより深い洞察・知見を得られるようにするため、さらには双方の信頼性・有効性を向上させ真に実用に供する手法となすために、EFD/CFD の互いの問題点の補完や新たな融合の枠組みの構築によって得られるシナジー効果を見いだすことが重要と考えます。

本ワークショップはこのような EFD と CFD の融合をテーマとし、流体力学に携わる研究者や技術者が講演やディスカッションを通してその必要性・重要性について認識を深め、かつ知見を広げることが目的としています。平成 20 年以降、現在に至るまで毎年 1 回の開催が継続されていますが、平成 24 年秋にはワークショップ実行委員の尽力により国際シンポジウム (5th Symposium on Integrating CFD and Experiments in Aerodynamics, Integration2012) の日本開催が実現し、我が国における研究開発成果を広く海外にアピールすることができました。ワークショップ自体も回を重ねる毎に様々な学界・業界から参加者が集まるようになり、実験とシミュレーションの融合が分野を問わない共通の課題、関心事であるという思いを強くいたします。今回も EFD/CFD 融合をキーワードに、各分野における国内を代表する先生方に講演をお願いいたしましたので、ご期待下さい。

今回が第 6 回となるこのワークショップが、EFD/CFD 融合という古くて新しいテーマに関して情報交換を行うよい機会となり、新たな発想による研究開発活動が国内外でより一層展開されるようになれば、開催者として何よりの喜びです。また、本ワークショップは今後も継続させていく予定ですので、内容についてご意見やご提案等ございましたらぜひともお知らせいただきたく、宜しく願い申し上げます。

平成 26 年 1 月 30 日

第 6 回 EFD/CFD 融合ワークショップ実行委員会 委員長

東北大学 流体科学研究所 大林 茂

宇宙航空研究開発機構 (JAXA) 航空本部 松尾 裕一

第6回 EFD/CFD 融合ワークショップ 実行委員会 委員名簿

委員長	大林 茂	東北大学 流体科学研究所 融合研究クラスター
	松尾 裕一	JAXA 航空本部 数値解析技術研究グループ
委員	相曾 秀昭	JAXA 航空本部 数値解析技術研究グループ
	浅井 圭介	東北大学大学院 工学研究科 航空宇宙工学専攻
	伊藤 貴之	お茶の水女子大学大学院 理学部情報科学科
	伊藤 健	JAXA 航空本部 事業推進部 技術研究企画室
	金崎 雅博	首都大学東京 システムデザイン学部 航空宇宙システム工学コース
	川添 博光	鳥取大学 大学院工学研究科 機械宇宙工学専攻
	佐宗 章弘	名古屋大学大学院 工学研究科 航空宇宙工学専攻
	澤田 恵介	東北大学大学院 工学研究科 航空宇宙工学専攻
	鈴木 宏二郎	東京大学大学院 新領域創成科学研究科
	鈴木 俊之	JAXA 研究開発本部 未踏技術研究センター
	坪倉 誠	北海道大学工学部 機械知能工学科
	浜本 滋	JAXA 航空本部 風洞技術開発センター
	村上 桂一	JAXA 航空本部 数値解析技術研究グループ
	山本 一臣	JAXA 航空本部 機体システム研究グループ
	吉田 憲司	JAXA 航空本部 D-SEND プロジェクトチーム
	渡辺 重哉	JAXA 航空本部 参与
事務局	越智 康浩	JAXA 航空本部 風洞技術開発センター
	加藤 博司	JAXA 航空本部 風洞技術開発センター
	口石 茂	JAXA 航空本部 風洞技術開発センター
	保江 かな子	JAXA 航空本部 風洞技術開発センター



第6回EFD/CFD融合ワークショップ
The 6th Workshop on Integration of EFD and CFD

秋葉原コンベンションホール 5A 会議室
AKIHABARA Convention Hall: Room 5A

Program

Jan. 30 (Tue.), 2014		
10:00-10:10	大林 茂 (東北大流体研) Shigeru Obayashi (Tohoku Univ.)	Opening Address
Session 1 < 招待講演#1 >		司会: 口石 茂 (JAXA) Chairperson: Shigeru Kuchi-Ishi (JAXA)
10:10-10:55	上野 玄太 (統計数理研究所) Genta Ueno (Institute of Statistical Mathematics)	アンサンブル感度解析: アジョイントコード不要論 Ensemble-based sensitivity analysis: Adjoint codes are no longer necessary
11:05-11:50	松尾 裕一 (JAXA) Yuichi Matsuo (JAXA.)	EFD/CFD 融合における 3D プリンタの可能性 Feasibility Consideration on the Use of 3D Printer in Integration of EFD and CFD
Lunch		
Session 2 < 招待講演#2 >		司会: 坪倉 誠 (北大) Chairperson: Makoto Tsubokura (Hokkaido Univ.)
13:15-14:00	長谷川 洋介 (東大生産研) Yosuke Hasegawa (Univ. Tokyo)	データ同化技術への期待~乱流制御の視点から~ Prospect for a data assimilation technique from the perspective of turbulence control
14:10-14:55	下山 幸治 (東北大流体研) Koji Shimoyama (Tohoku Univ.)	不確定性定量化のための効果的手法の確立に向けた基礎研究 Fundamental Studies to Establish Effective Approaches for Uncertainty Quantification
Break		
Session 3 < 招待講演#3 >		司会: 川添 博光 (鳥取大) Chairperson: Hiromitsu Kawazoe (Tottori Univ.)
15:30-16:15	岡田 真人 (東大新領域) Masato Okada (Univ. Tokyo)	スパースモデリングとデータ駆動科学 Sparse modeling and data-driven science
16:25-17:10	浅井 圭介 (東北大) Keisuke Asai (Tohoku Univ.)	非線形領域における EFD と飛行シミュレーションの融合 Integration of EFD and Flight Simulation in Nonlinear Flight Regimes
17:20-17:30	松尾 裕一 (JAXA) Yuichi Matsuo (JAXA)	Closing Address

第6回 EFD/CFD 融合ワークショップ
平成26年1月30日 秋葉原コンベンションホール

概要

1. アンサンブル感度解析: アジョイントコード不要論

上野 玄太 (統計数理研究所)

データ同化が完了しても、具体的にどの変数がどのように機能しているかを見出す作業は依然として容易ではなく、専門家の知識が必要となるのが現実である。しかし、変数の関係はすべて既知であるのだから、原理的にはモデル内に解答があるはずである。そこで、データ同化による推定値に対するモデル変数の感度を得る方法を開発することとした。微分係数のアンサンブル近似の定式化を行い、各時間ステップでの微分係数値を求める方法を考案した。巨大次元の変数への対処が課題であったが、特異値分解等の線形計算を組み合わせることで、アンサンブルメンバー数だけの手間で済むことを示した。

2. EFD/CFD 融合における 3D プリンタの可能性

松尾 裕一 (JAXA 航空本部 数値解析技術研究グループ)

最近の3Dプリンタ技術の進展は目覚ましいものがある。我々も、3Dプリンタの可視化やプレゼンテーションへの利用を含めた新たな可能性について探り始めたところである。本講演では、3Dプリンタ技術の動向やEFD/CFD関連への適用の可能性について報告するとともに、デモ展示を交えた議論や情報交換の機会を提供する。

3. データ同化技術への期待 ~乱流制御の視点から~

長谷川 洋介 (東京大学 生産技術研究所)

乱流、及びそれに伴う輸送現象は、強非線形性、マルチスケール性を有しており、その自在な制御は依然として困難な課題である。乱流を能動的に制御する場合、2つの主要課題がある。一つは、解像度に限りがありノイズを含んだセンサー情報を用いた流れ場の推定であり、もう一つは、与えられた流れ場に対する制御入力の最適化である。これまで後者の研究例は多く存在する一方、前者は限られている。講演では、最適制御理論を用いた乱流制御の例を紹介すると共に、有限のセンサー情報に基づく乱流制御の試みを紹介する。

4. 不確定性定量化のための効果的手法の確立に向けた基礎研究

下山 幸治 (東北大学 流体科学研究所)

様々な事象に含まれる不確定性の特徴を定量的に記述し、その影響を低減することによって、シミュレーションの検証および妥当性確認、物理現象の正しい理解、設計の信頼性向上などに繋がる。本発表では、不確定性定量化の学術的背景(理論、既存手法、現状の問題点など)を説明した後、当研究室でこれまでに取り組んできた不確定性定量化に関する研究(効果的手法の開発、応用事例など)を紹介し、最後に不確定性定量化の将来展望と課題を述べる。

第6回 EFD/CFD 融合ワークショップ
平成26年1月30日 秋葉原コンベンションホール

5. スパースモデリングとデータ駆動科学

岡田 真人(東京大学大学院 新領域創成科学研究科)

近年、統計学、機械学習、信号処理、通信工学、計測工学といった幅広い分野で、高次元データのスパース性に注目したスパースモデリング(SpM)の方法論が提案されている。本講演では SpM による、ブラックホールの可視化や MRI の高速計測を紹介し、データの背後にあるモデルの自動抽出の可能性について紹介する。次に、生命・脳科学、医工学、地球惑星科学・天文学などの幅広い分野に関して普遍的な、SpM によるデータ駆動型科学の創成について議論する。最後に、流体力学で用いられる POD (Proper Orthogonal Decomposition) によるモード抽出をとりあげ、SpM による、その新たな進展を探る。

6. 非線形領域における EFD と飛行シミュレーションの融合

浅井 圭介(東北大学大学院 工学研究科 航空宇宙工学専攻)

近年、航空機が飛行中に異常姿勢運動を引き起こし制御不能になる事故が頻発している。同様の事故は、過酷な環境で使用される UAV などの無人航空機の場合でも報告されている。従来、航空機の飛行シミュレーションには Bryan に始まる安定微係数に基づく線形理論が適用されてきたが、“Upset”すなわち離や渦崩壊を含む「非線形領域」への適用には限界がある。このような飛行領域において航空機の運動を支配するのは非線形かつ非定常の空気力であり。それらを考慮した新しい飛行力学の構築が必要とされる。本講演では、実験流体(EFD)と飛行力学(FD)の融合によって、非線形領域における航空機の運動をモデル化する新しい技術の現状と将来展望について述べる。



EFD/CFD融合における3Dプリンタ の可能性

松尾裕一^{*1}、藤野敦志^{*1}、保江かな子^{*2}

JAXA航空本部

^{*1} 数値解析技術研究グループ

^{*2} 風洞技術開発センター

2014年1月30日



1

内容



- 3Dプリンタへの着目
- 3Dプリンタの技術と現状
- 我々の経験
- EFD/CFD融合との連携
- まとめ、今後の課題

プレゼン・Q&Aは、やや早めに終了し、
展示と議論を13:00まで



2

私の3Dプリンタへの(再)着目



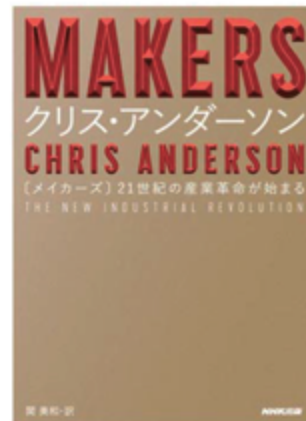
● 「MAKERS-21世紀の産業革命が始まる」、クリス・アンダーソン、2012年

製造業の未来を描いた本。これまでのものづくりは、**莫大な資本によって製造手段を持つことができる大企業と熟練工によって独占されていたのが、オープンソースと3Dプリンターによって、装置を持たない一般の人びとでもものづくりができるようになってきているのだ**、というのが本書の主旨。つまり、誰もが**「メイカーズ」**になれる。

その背景としては、ものづくりがデジタルになったということが挙げられる。個人がデスクトップや工房でデザインし、それがオンラインでシェアされる。オンライン上でシェアされたデザインはコミュニティで共有され、多くの人びとの叡智によって改良が加えられる。特許の保護を受けるよりも、イノベーションをシェアすることで、多くの人びとに手助けしてもらおうことが選ばれるようになる。かつてサン・マイクロシステムズの共同創業者であるビル・ジョイが、「いちばん優秀な奴らはたいていよそにいる」と言ったそうだが、オープンソースによって、企業外の優秀な人びととつながることができるようになる。

そして、そのデザインに基づいて生産してくれる設備は、ネットで探することができる。製造手段についての知識がなくても、3Dプリンターやレーザーカッターが自動的にやってくれる。しかも、規模がそれほど大きくなくても製造することができる。

従来、製造業に参入するためには、それなりの設備投資が必要だったが、今では、小さな企業にもサプライチェーンが開放されたため、**CADデータさえあれば、世界中のサプライチェーンを利用して、それを形にすることができる**。つまり、一般の人びとが**「ビット」**を作り出し、委託された工場が**「アトム」**を製造するというわけ。



関美和(翻訳)、NHK出版



3

3Dプリンタの歴史



● 技術としては結構古い

- 1980 小玉秀男氏(名古屋市工試)「立体図形作成装置」
- 1987 3Dシステムズ世界初の光造形実用機SLA-1製品化
- 1988 ストラタシス社、熱溶解積層技術(FDM)の特許

● 実は現在は3度目のブーム

- 2000年ブーム ⇒ ITバブル崩壊、Virtual Reality, Rapid Prototyping
- 2008年ブーム ⇒ リーマンショック

● 最近の重要な出来事

- 2006年 オープンソースの3Dプリンタ開発プロジェクト(RepRap)
- 2009年 ストラタシス社の特許失効
- 2012年 MAKERS出版



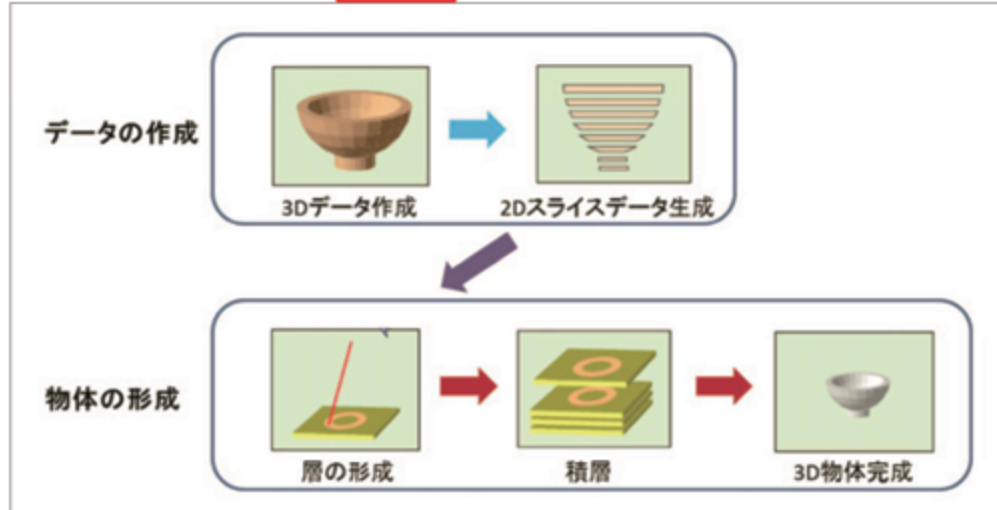
4

3Dプリンタの技術



● 付加製造 (Additive Manufacturing) の原理

図表1 付加製造の代表的な製法 **積層造形法** の概要



出典：参考文献2を基に科学技術動向研究センターにて作成

蒲生 秀典：デジタルファブリケーションの最近の動向
 —3Dプリンタを利用した新しいものづくりの可能性—
 科学技術動向、2013年8月号(137号)、19-26



3Dプリンタの技術



● 主な方法

インクジェット

図表2 付加製造の主な方法

Fused Deposition Modeling

名称	光造形	レーザー焼結	FDM (熱溶解積層)
製造方法	液槽光重合	粉末床熔融結合	材料押出堆積
概略図			
原理	液状の光硬化性樹脂を、光重合によって選択的に硬化	粉末材料を熱エネルギーによって選択的に熔融結合	液状の材料をノズルから押し出し堆積と同時に固化
基本特許	1984.8, Hull	1986.10, Deckard	1989.10, Crump
主なメーカー	3D System, CMET	EOS, 3D System, Arcam 他	Stratasys, 3D System 他

出典：参考文献2、4を基に科学技術動向研究センターにて作成

蒲生 秀典：デジタルファブリケーションの最近の動向
 —3Dプリンタを利用した新しいものづくりの可能性—
 科学技術動向、2013年8月号(137号)、19-26



3Dプリンタの現状



● 応用事例

- 移動体部品
- 医療機器
- 生体模型
- 三次元担体造形
- バイオフアブ
- オンライン3Dプリント (DMM.com)

図表3 付加製造の適用例

機能模型(エンジン) ¹⁰⁾	ラビッドツーリング	戦闘機用エアダクト ¹⁰⁾	航空機部品 ¹¹⁾
フォトニックデバイス	補聴器 ¹²⁾	入れ歯 ¹³⁾	歯科補綴物
義足 ⁴⁾	生体組織培養足場	人工皮膚 ¹⁴⁾	心臓弁用鋳型 ⁴⁾

出典：参考文献2を基に科学技術動向研究センターにて作成

蒲生 秀典：デジタルファブリケーションの最近の動向
 —3Dプリンタを利用した新しいものづくりの可能性—
 科学技術動向、2013年8月号(137号)、19-26



KINKI UNIVERSITY

<http://kuring.hiro.kindai.ac.jp/>

先進活用事例1

金属3Dプリンタ先進活用事例
 近畿大学 京極先生の資料より

■ 航空宇宙関連

- GE Aviation



LEAP engine

GE Aviation expects to chop off about 25 percent of the total 3D printing time of metallic production components for its LEAP (Leading Edge Aviation Propulsion) Turbofan engine, using in-process inspection. (Source: GE Aviation)



タービンブレード



一体化の例



燃料噴射装置 (CoCrMo)

- 航空機部品

Airbus A380エンジンカバー用ドアヒンジ

軽量化の例



Ti64(EOS)



試作品(ステンレス鋼)(EOS)



NASAロケットエンジンノズル

(<http://www.researchcareer.com.au/>)



3Dプリンタの現状



- NASA: 3Dプリンターで製作した**ロケットエンジンインジェクター**の燃焼試験に成功
<http://www.businessnewsline.com/biztech/201307161214000000.html>

NASAは7月11日、3Dプリンターで製作したRocket Engine Injectorを使った燃焼試験に成功したことを発表した。

NASA and Aerojet Rocketdyne recently finished testing a rocket engine injector made through additive manufacturing, or 3-D printing. This space technology demonstration may lead to more efficient manufacturing of rocket engines, saving American companies time and money. The tests were conducted at NASA's Glenn Research Center in Cleveland.
<http://www.nasa.gov/content/nasa-industry-test-3d-printed-rocket-engine-injector/>

このインジェクターは、高出力レーザーを使って金属の粉末を溶かしながら部品を整形するという Selective Laser Melting Manufacturing Technology という方式を用いて作られたもので、こうした3Dプリンターを使って部品を製造することにより、**コストは70%削減**となり、また、**納期はこれまで1年かかったものが4ヶ月未満で完了**するようになるだろうとしている。

3Dプリンターは量産品を製造するには向かない。しかし、ロケットエンジンは大量生産するという性格のものではないため、ある意味、**3Dプリンターの応用分野としては最適**な分野なのかもしれない

もっとも、Direct metal laser sintering方式の3Dプリンターは、数十万ドルもするもので専門業者であっても容易には導入することはできないのが難点なのだが。

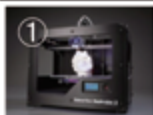


3Dプリンタの現状

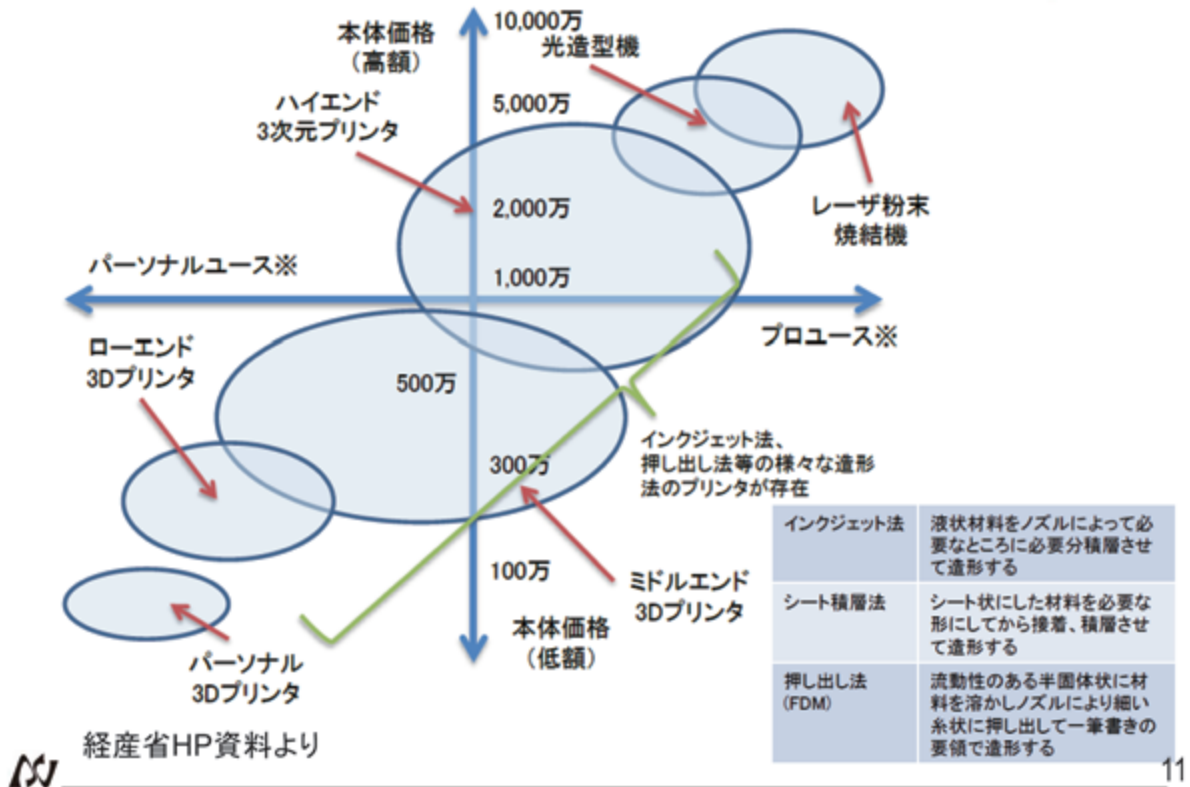


- 低価格、小型製品の出現 ⇒ 個人用、家庭用

メーカー	商品名	価格	造形方式	解像度	プリント面積
Makerbot社	replicator2X_①	2,799ドル	熱溶解積層法	0.1mm	25 × 15 × 15cm
Genkei	atom 3Dプリンタ	12万9800円	熱溶解積層法	0.025mm	13.5 × 14 × 14cm
Np-Mendel社	Np-Mendel	15万9,000円	熱溶解積層法	0.1mm	18 × 18 × 16cm
オープンキューブ	SCOOVO	18万9000円	熱溶解積層法	0.1mm	17.5 × 15 × 15cm
Solidoodle社	Solidoodle 3	799ドル	熱溶解積層法	0.35mm	20 × 20 × 20cm
Afinia社	Afinia H-Series_②	1,599ドル	熱溶解積層法	0.15mm	13.9 × 13.9 × 13.5cm
3Dシステムズ社	Cube_③	16万円	熱溶解積層法	0.2mm	14 × 14 × 14cm
3Dシステムズ社	CubeX	41万7900円	熱溶解積層法	0.1mm	27.5 × 26.5 × 24cm
MakerGear社	MakerGear M2	1,730ドル	熱溶解積層法	0.02mm	20.3 × 25 × 20.3cm
Printbot社	Printbot LC_④	627ドル	熱溶解積層法	不明	15.24 × 15.24 × 15.24cm
Type A Machines	Type A Machines_⑤	1,400ドル	熱溶解積層法	0.05mm	22.9 × 22.9 × 22.9cm
Hotproceed	Blade-1	13万円	熱溶解積層法	0.2mm	10 × 10 × 10cm
B9creator	B9creator	50万円	光学造形方式	0.05mm	10,2 × 7,6 × 20,3cm
formlabs社	Form1_⑥	3,299ドル	光学造形方式	0.025mm	12,5 × 12,5 × 16,5cm



3Dプリンタの現状



11

ブームの背景



- 3Dプリンタ自体
 - 基本特許の時効
 - 低価格化、素材の進歩
- 周辺・その他
 - 3D-CAD化の進展、無料3D-CAD
 - 3Dスキャナ、3Dデータ ⇒ データ連携

我々の経験



● 初め(2年前)は広報用のグッズ作成用としてレンタル

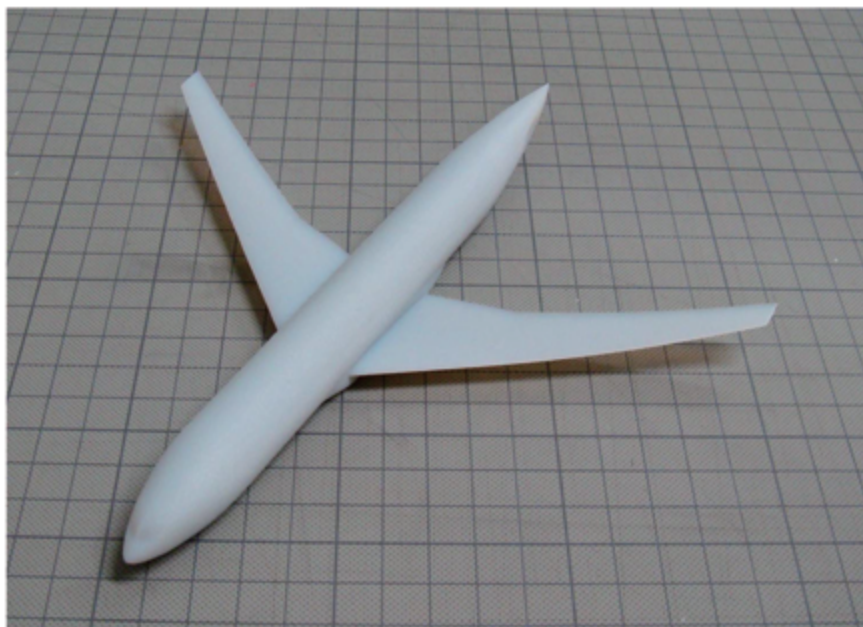
- 意外に安い(たまたま安くレンタルできた)
- 製品の高い工作精度、高い靱性に驚愕
 - ・ 16 μ m、透けていても折れない
- CAD(STL)データがあれば何でもできる
 - ⇒シミュレーションとの連携に使えないか
- 3D可視化より「モノ」がよくわかる
 - ⇒手に持って実感できる(可触化)
 - ⇒説明用に使える(コミュニケーションツール)



サポート材



航空機NASA-CRM



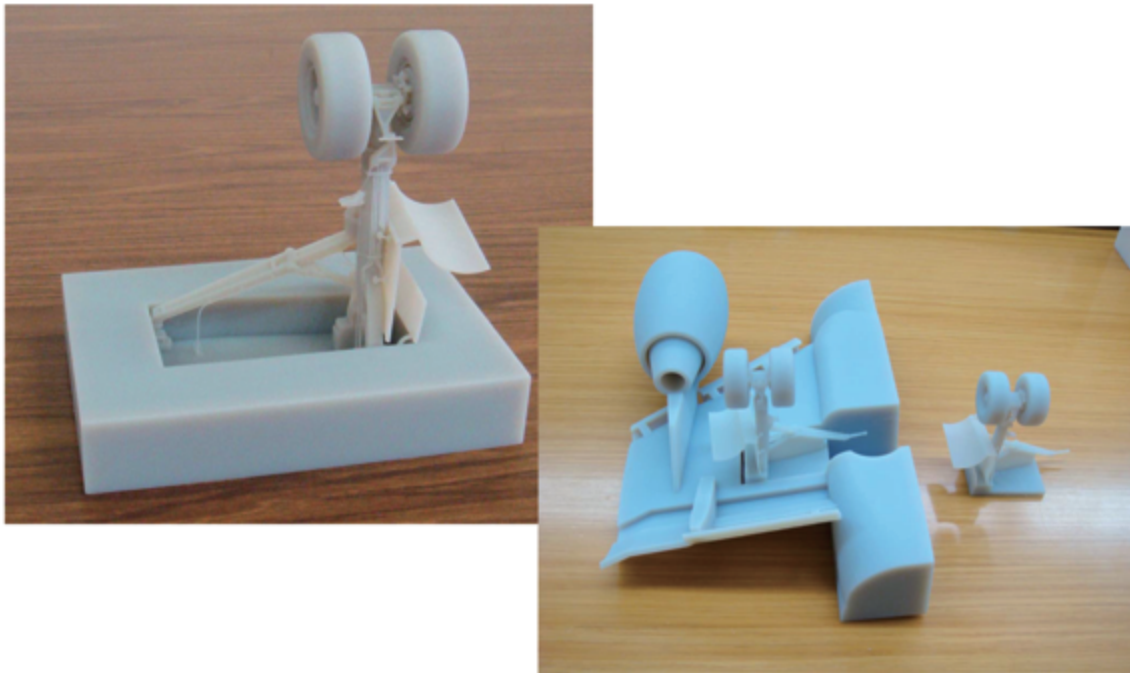
16

飛鳥



17

ランディングギア



W

18

高揚力装置



W

19

ロケットエンジン



W

20

我々の経験(2)

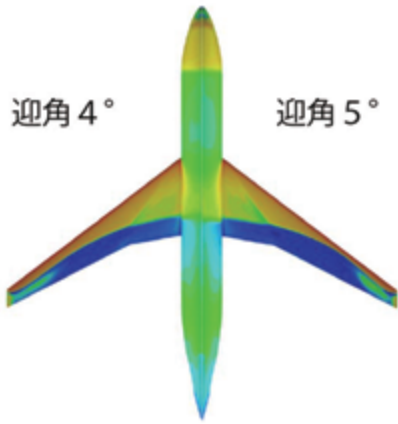


- 我々の課題
 - 解析(シミュレーション)結果のわかりやすい表示
 - ・ データ量の増大(ケースあたりの増大、ケース数の増大)
 - ・ 一方、人間の理解力は同じ
 - cf. 3D表示、ボリューム表示、自己組織化マップ(SOM)
 - 理解する・解釈する表示、人に見せる・説明する表示
 - ・ ディスプレイ型の限界
- 3Dプリンティングとの連携を模索
 - そうこうしているうちに色のつけられる機器が登場
 - 計算結果で色づけしたらどうなる?
 - 流れの空間構造の表現にも使えるか?

W

21

航空機NASA-CRM



W

22

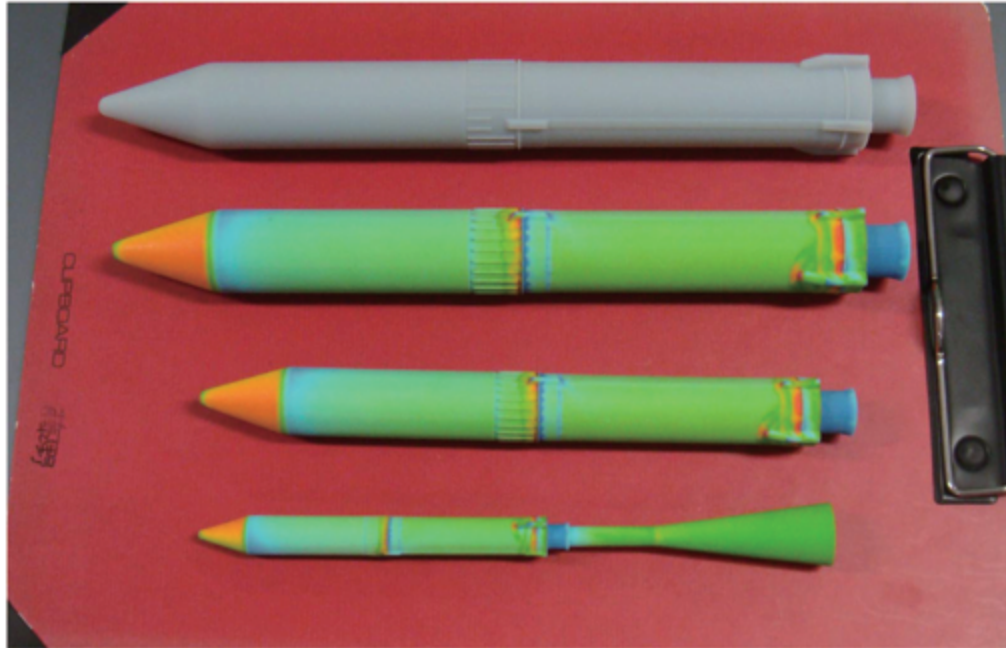
飛鳥



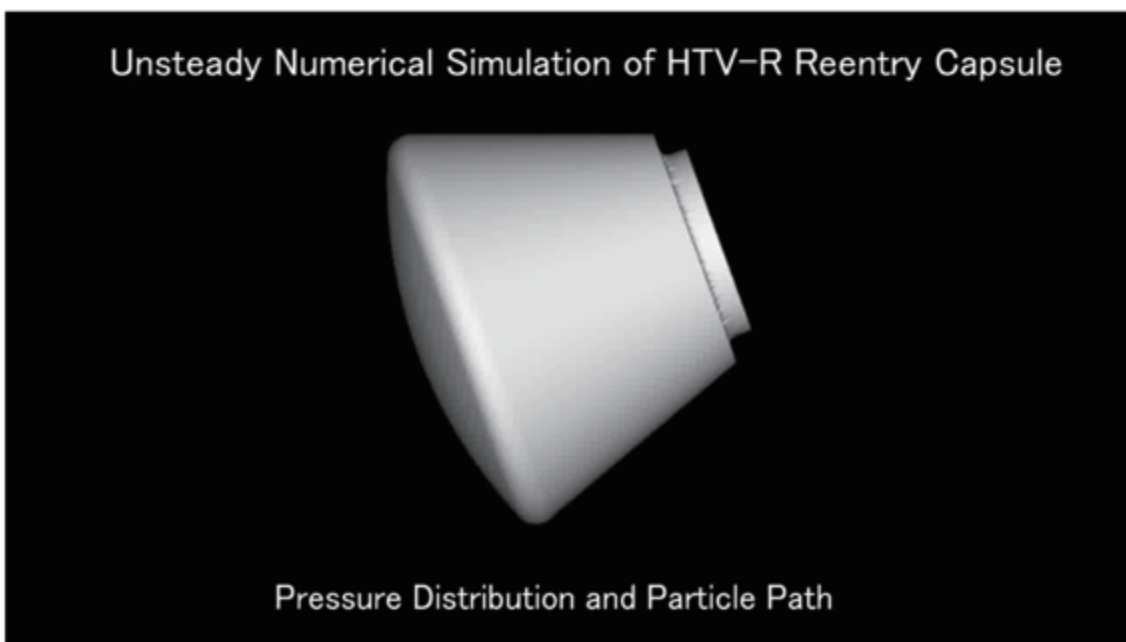
W

23

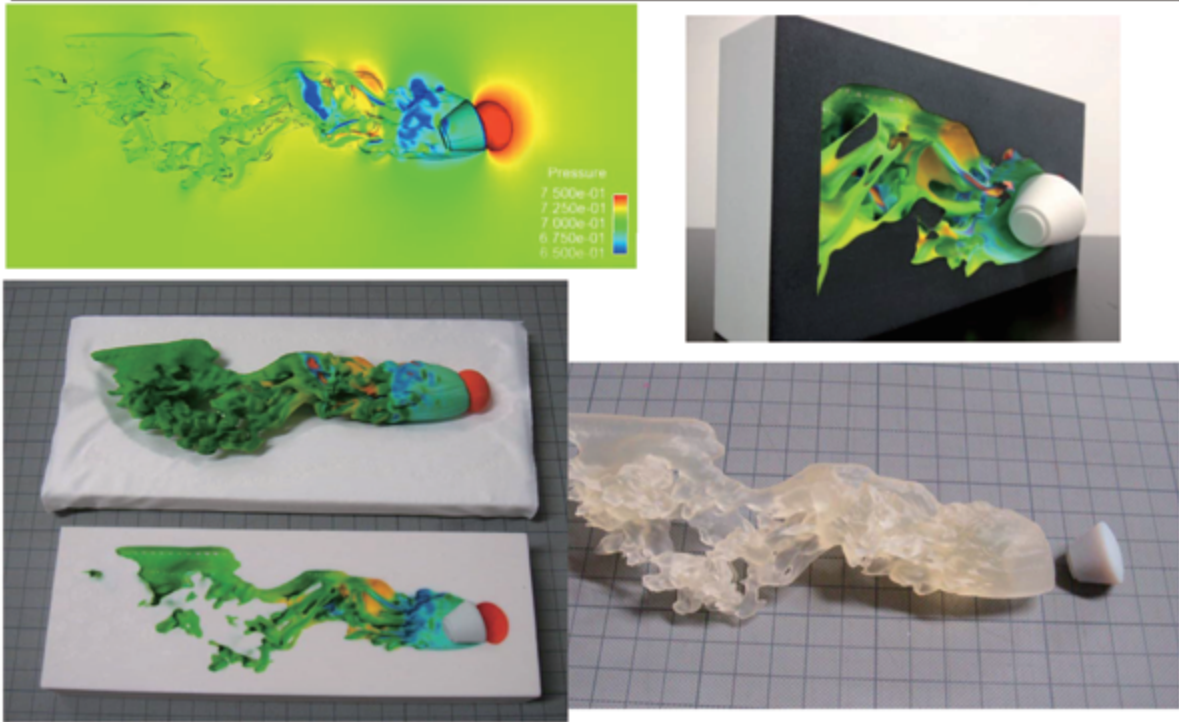
イプシロンロケット



HRV (HTV-R Return Vehicle)



HRV



読売新聞 2013.12.21夕刊



The newspaper clipping features an article about 3D printing. The main title is "立体を作る3Dプリンター" (3D Printer that creates 3D objects). A sub-headline reads "形読み取り 樹脂で再現" (Shape reading and reproduction with resin). The article includes a detailed diagram of the 3D printing process, showing a computer monitor, a 3D printer, and a finished 3D printed object. The diagram is titled "立体を作る3Dプリンター" and "立体の作り方" (How to create 3D objects). The article also includes a section titled "パソコンにデータ 手元に万物は不要" (Data on PC, no need for everything in hand).



形読み取り 樹脂で再現

立体を作る 3Dプリンター

立体的作り方

- ①センサーで形を読み取る
- ②パソコンで修正する
- ③樹脂で形を作る

特徴

- 立体を作る(複製)が早い
- 作る量が多い
- 次々の変更や細かい修正が簡単にできる
- 多くの種類の物を同時に作るのに向いている

3Dプリンター

3Dプリンターは、コンピュータで設計された立体のデータを元に、樹脂などの材料を積み重ねて立体を作ります。従来の製造方法では、型を準備する必要があるため、少量の生産には向いていません。一方、3Dプリンターは、少量から大量まで、柔軟に対応できるため、プロトタイプ制作や小規模生産に非常に有効です。

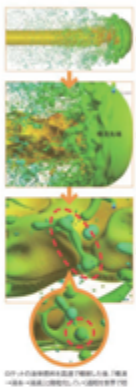
3Dプリンターで再現

3Dプリンターは、コンピュータで設計された立体のデータを元に、樹脂などの材料を積み重ねて立体を作ります。従来の製造方法では、型を準備する必要があるため、少量の生産には向いていません。一方、3Dプリンターは、少量から大量まで、柔軟に対応できるため、プロトタイプ制作や小規模生産に非常に有効です。

パソコンにデータ 手元に実物は不要

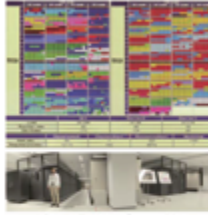
3Dプリンターは、コンピュータで設計された立体のデータを元に、樹脂などの材料を積み重ねて立体を作ります。従来の製造方法では、型を準備する必要があるため、少量の生産には向いていません。一方、3Dプリンターは、少量から大量まで、柔軟に対応できるため、プロトタイプ制作や小規模生産に非常に有効です。

JAXA's 053号 2013年12月



数

3Dプリンターは、コンピュータで設計された立体のデータを元に、樹脂などの材料を積み重ねて立体を作ります。従来の製造方法では、型を準備する必要があるため、少量の生産には向いていません。一方、3Dプリンターは、少量から大量まで、柔軟に対応できるため、プロトタイプ制作や小規模生産に非常に有効です。



数

3Dプリンターは、コンピュータで設計された立体のデータを元に、樹脂などの材料を積み重ねて立体を作ります。従来の製造方法では、型を準備する必要があるため、少量の生産には向いていません。一方、3Dプリンターは、少量から大量まで、柔軟に対応できるため、プロトタイプ制作や小規模生産に非常に有効です。



で挑む スパコン解析 フロンティア

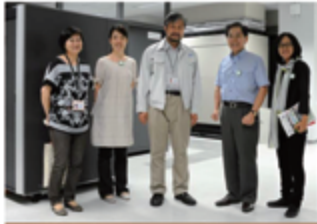
ロケット・航空機の開発から航空機まで

船尾 一

船尾 一

船尾 一





松尾グループ長が見せてくれた、ロケット本体やエンジン周囲を色で塗り分けたイブシロンロケット、航空機、大気圏に再突入するカプセルの樹脂模型。これらは、スパコンで解析したデータをもとに3Dプリンタで作成した。「三次元のモデルを作ることで計算結果を実感をもって理解できます」

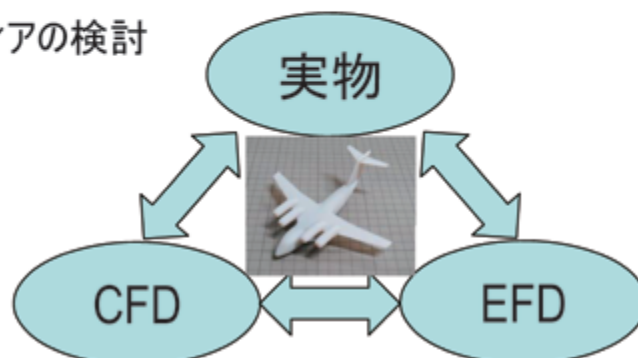


EFD/CFD融合との連携

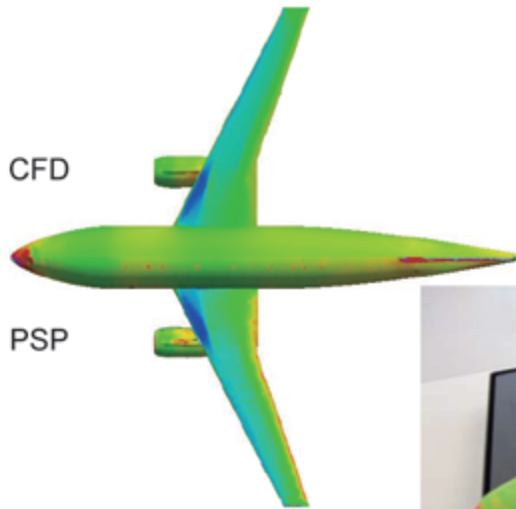


- PSP (Pressure Sensitive Paint) 試験結果の可視化
 - VRMLデータ (Paraview) を取得⇒専用ソフトで修正 (業者)

- その他の利用可能性
 - 情報共有・情報交換の仲介 = コミュニケーションツール
 - 風洞試験模型の事前確認
 - コンセプト・アイデアの検討
 - EFD/CFD⇒実物



PSP可視化 -航空機DLR-F6-



32

印刷風景 印刷工房の様子



Project 660Pro

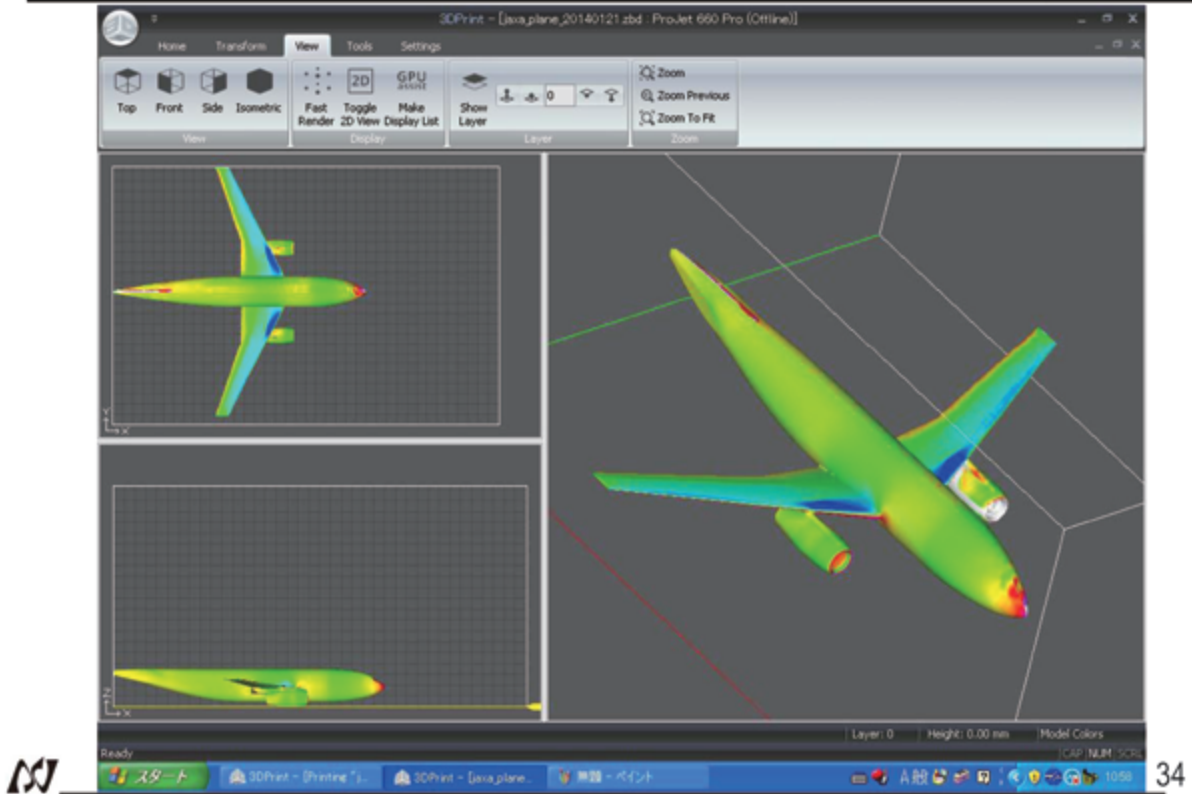
- フルカラー3D印刷
- 早いプリント速度



33

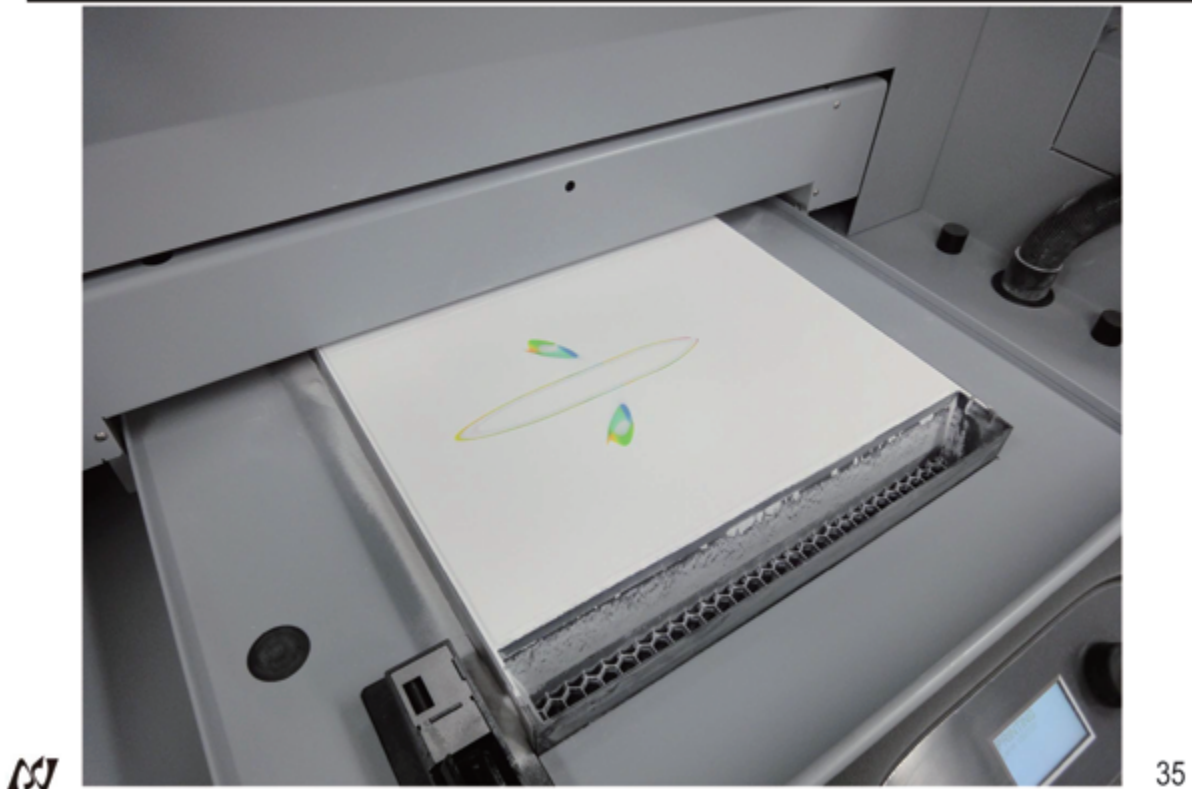
印刷風景

①専用のソフトで印刷位置等を設定



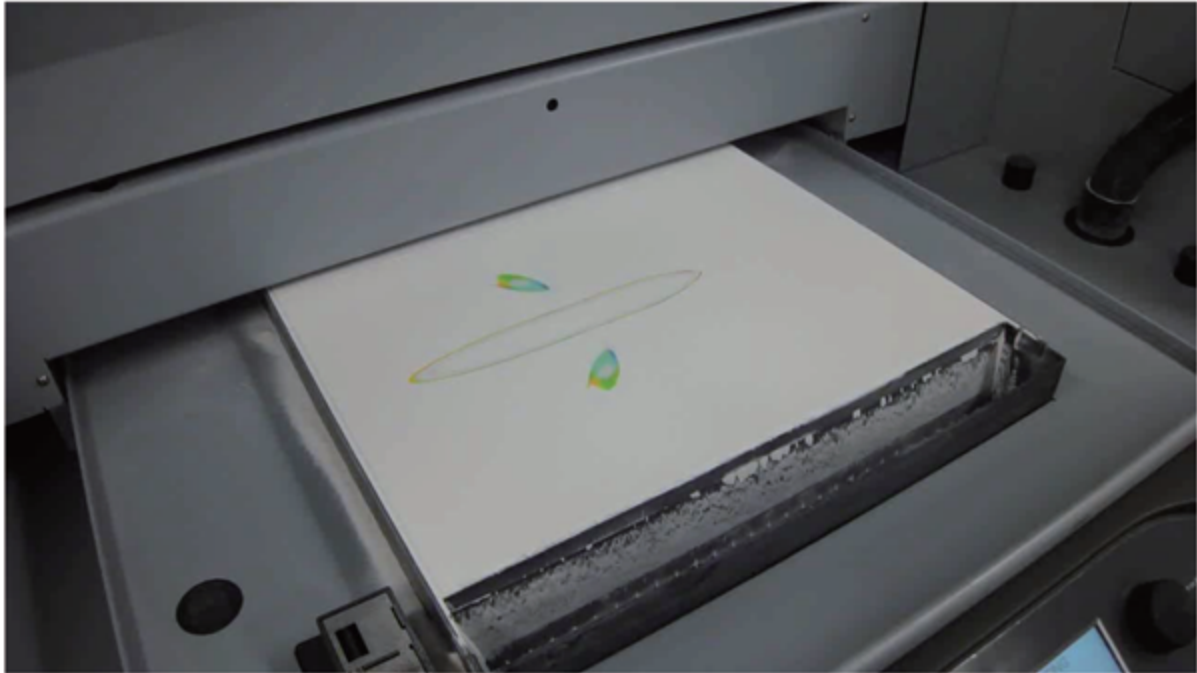
印刷風景

②石灰粉→接着剤・カラーインク



印刷風景

②石灰粉→接着剤・カラーインク



印刷風景

③印刷された模型を取り出す



印刷風景

③印刷された模型を取り出す



W

38

印刷風景

④ブロワーで表面についた粉を吹き飛ばす



W

39

印刷風景

④ブロワーで表面についた粉を吹き飛ばす



W

40

印刷風景

⑤瞬間接着剤を表面にかける



W

41

印刷風景

⑥溶かしたロウの中につけて仕上げる

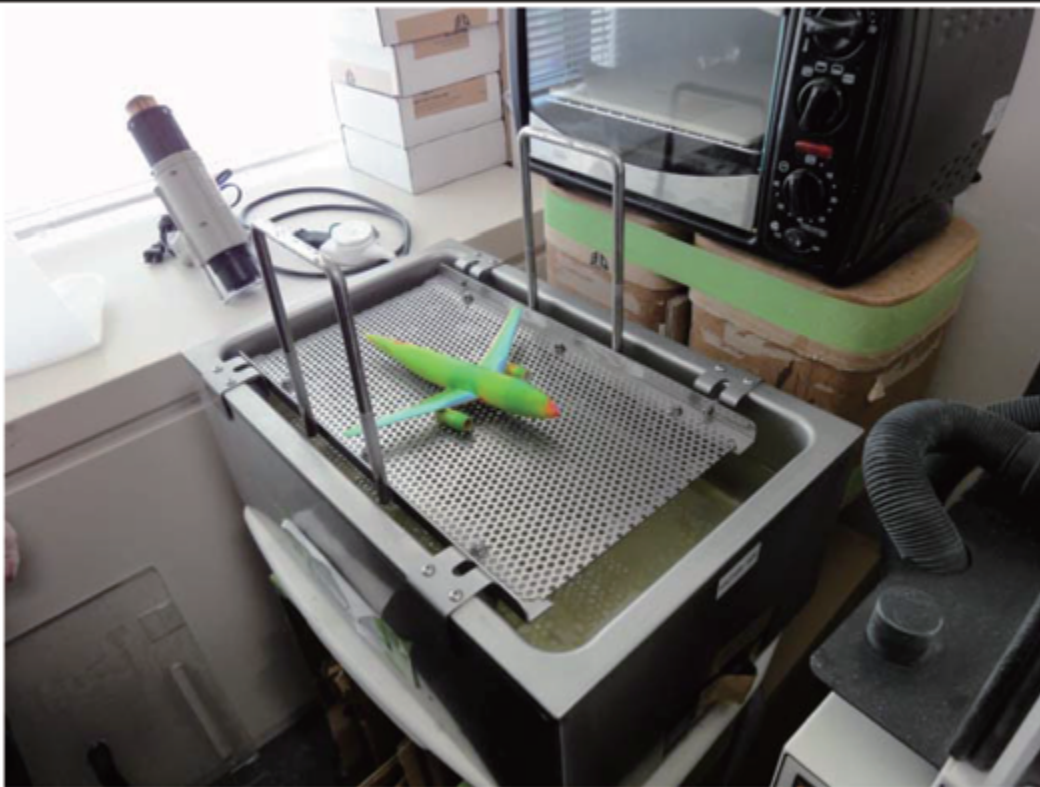


W

42

印刷風景

⑦できあがり



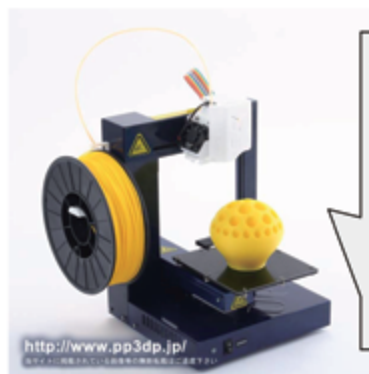
W

43

まとめ、今後の課題



- 3Dプリンタの概要・現状とEFD/CFD融合への我々の取り組みについて紹介
- 今後、課題
 - 単なる「もの珍しさ」「思い付き」以上のレベルに進めるか
 - しかし、試行錯誤も重要⇒思わぬ発見・利用法
 - 技術的には、データ連携の容易化、空間構造・非定常の表現
- 展示・デモ



UP!Plus2 3Dプリンタ

1. 定価20万円を切る、ABS樹脂を溶かしながら積層していく3Dプリンタ
2. 積層ピッチは0.15mm
3. 積層時間は他の3Dプリンタと遜色なし
4. 材料単価が1/4から1/10(色々な方式との比較)
5. ヘッドを260度に加熱して材料を溶かしながら積層するので、室温が低いと上手く積層できない
6. 本体単価、材料単価を考えると非常に優れた3Dプリンタである

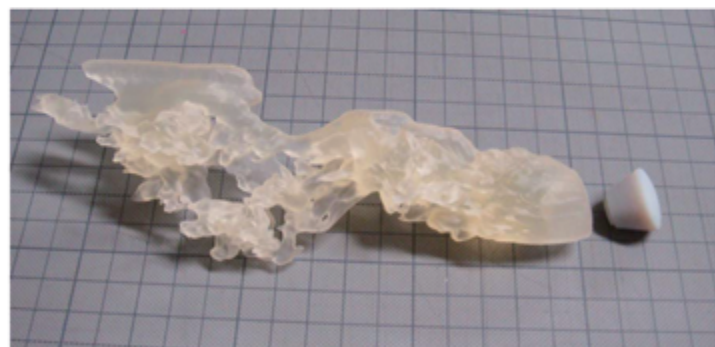


44

参考) 単色3Dプリンタ



- 色情報のないCADデータを出力可能
 - レジンなどの素材のプリンタに出力
 - 素材の色が出力した模型の色となる(透明素材なども)
 - STLデータ(表面格子などにも用いられている)
 - その他のCADデータも出力可能(STLにコンバート)



45

STLデータの問題



- 立体として閉じていない形状はプリント不可
 - 厚みのないパネルはプリント出来ない
 - 穴のあいている立体はプリント出来ない

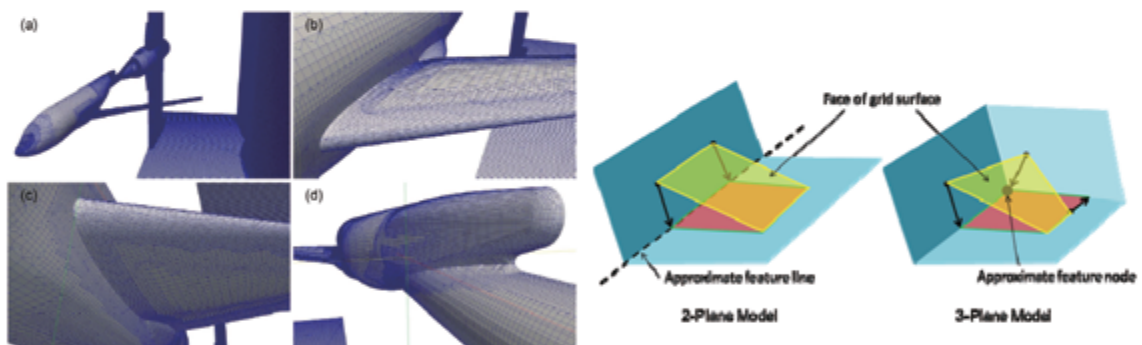


46

STLデータの問題



- 同一平面上に4点のない四角形はプリント不可
 - 機体表面格子の翼の根元付近に存在
 - 3Dプリンタが積層する時に、平面を認識出来ない



47

解決法



- 閉じた形状を作る
 - 半身の場合には切断面を閉じるか、反対側のコピーを作り閉じた形状とする



- 三角形分割に変更
 - CADソフトにより、四角形から三角形に分割を変更
- 強力なソフトによる修正



48

参考) カラー3Dプリンタ



- 色情報のあるCADデータを出力可能
 - 石膏パウダーによる造形
 - 固定させる接着剤に色がついている
 - データはVRMLを使用(ネットでの3次元可視化データ)

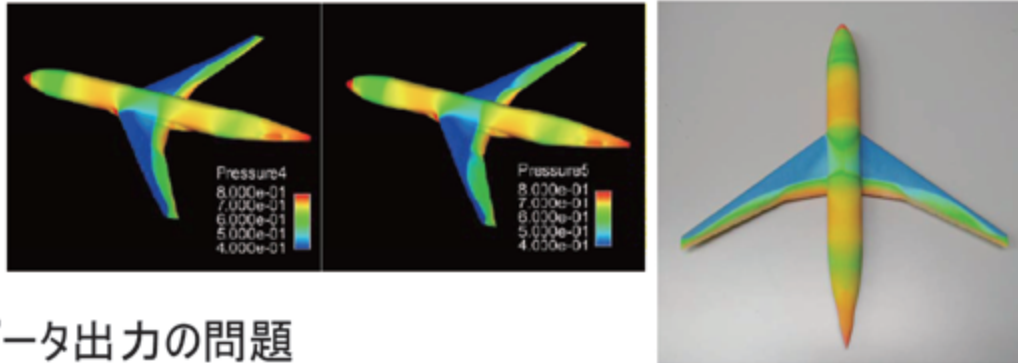


49

VRMLデータの問題



- 立体の問題はSTLデータと同様に存在
- 色ずれ問題
 - シミュレーション結果と出力した色の違いの問題



- データ出力の問題
 - VRMLデータ出力可 Paraview, Ensight
 - VRMLデータ出力不可 Fieldview

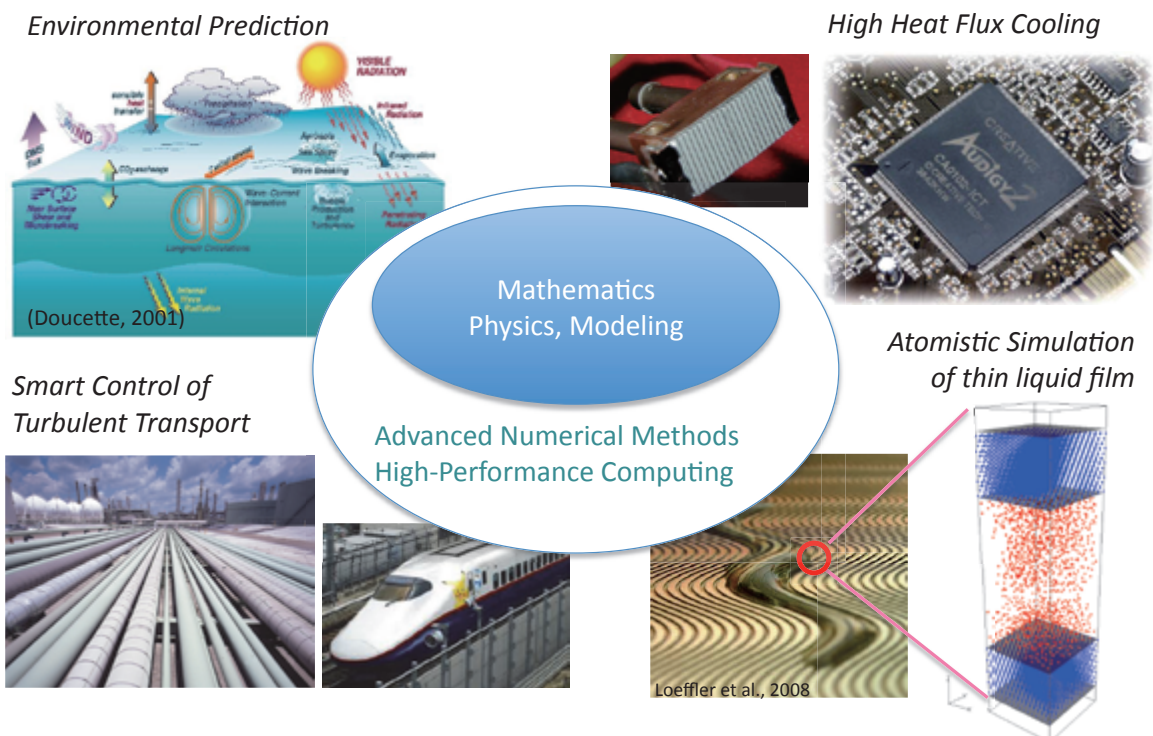
2014年1月30日
第6回EFD/CFD融合ワークショップ

データ同化技術への期待

～乱流工学の観点から～

東京大学 生産技術研究所
講師 長谷川 洋介

Overview of Research Activities

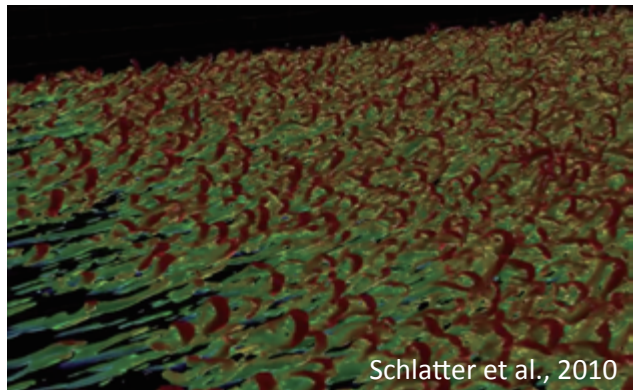
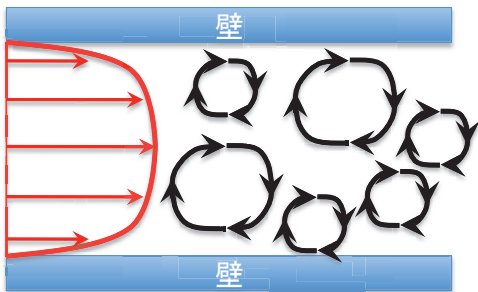


壁乱流摩擦抵抗低減に関する研究

□ 高速輸送機器の抵抗低減



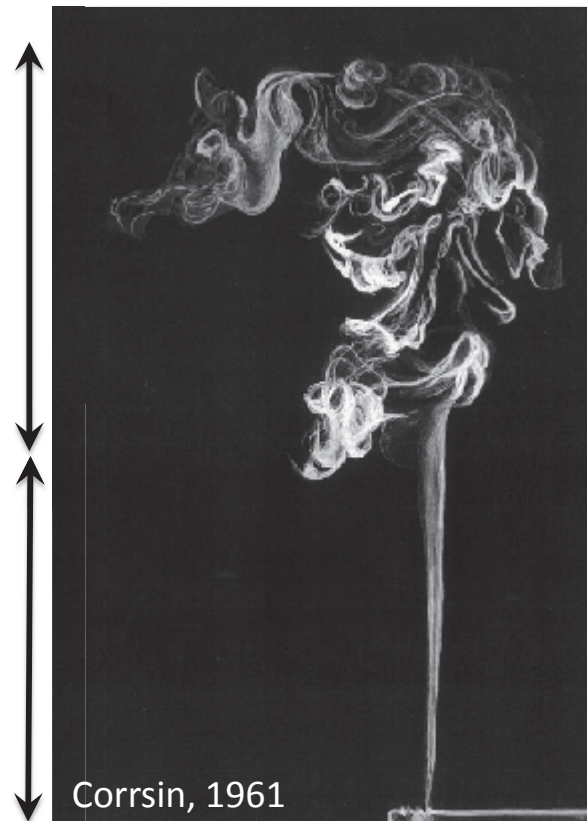
□ 平行平板間完全発達乱流場



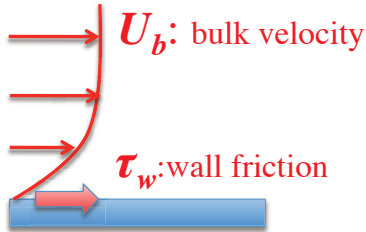
Two Flow States

turbulence

laminar

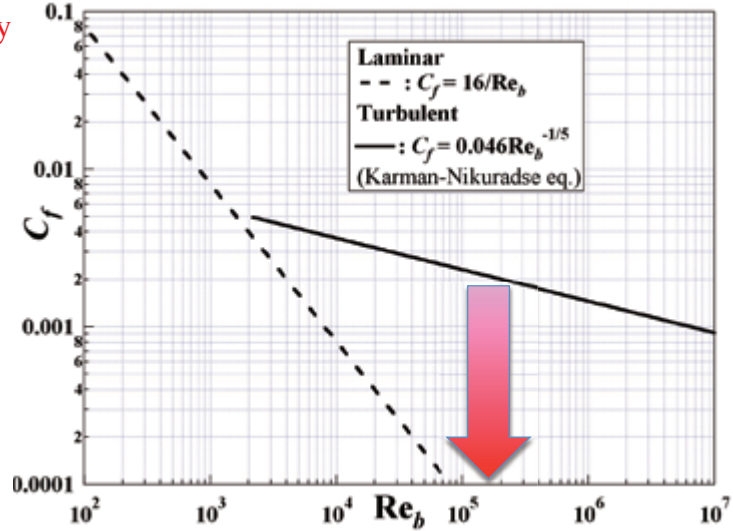


C_f -Re Plot



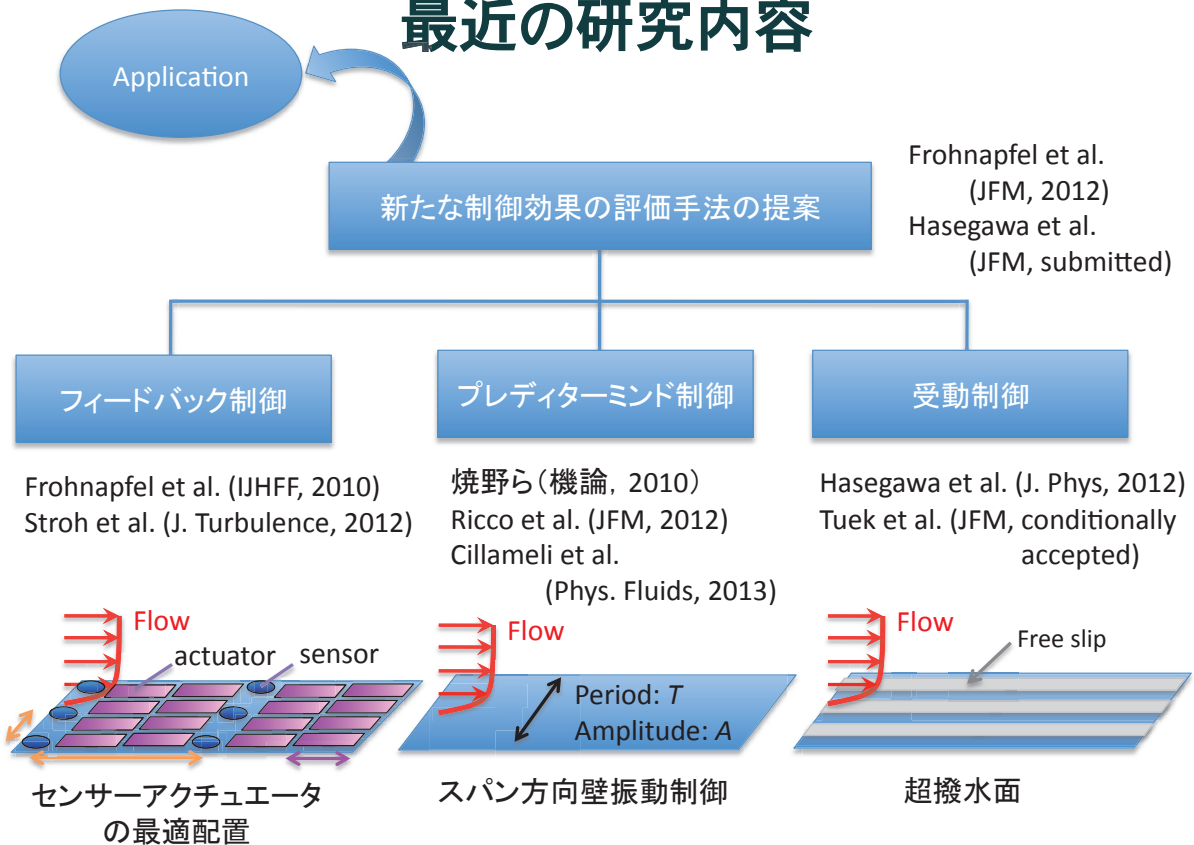
Friction coefficient

$$C_f = \frac{\tau_w}{\frac{1}{2} \rho U_b^2}$$



もし高レイノルズ数乱流を層流化できれば大きな省エネ効果！

最近の研究内容



低中温熱源の有効利用

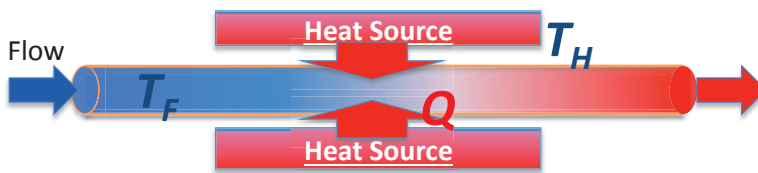


内燃機関, 化学プラントからの排熱



地熱

低い温度差, 小体積における伝熱促進



$$Q = hA(T_H - T_F)$$

h : 熱交換係数

A : 伝熱面面積

運動量輸送と熱輸送の非相似制御



準最適制御理論

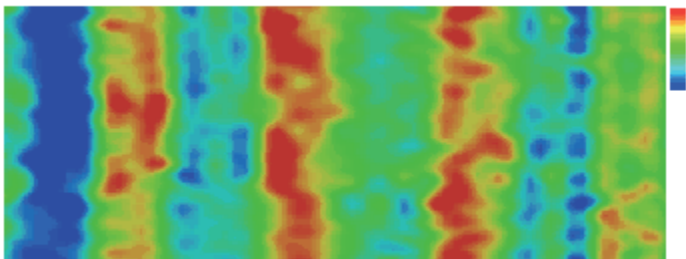
Hasegawa & Kasagi (JFM, 2011)

最適制御理論

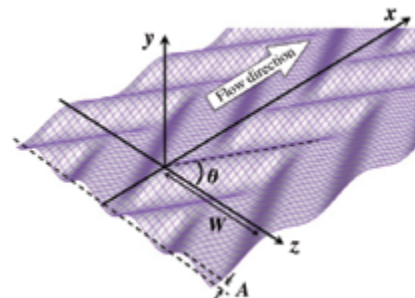
Yamamoto, Hasegawa & Kasagi (JFM, 2013)

伝熱面形状最適化

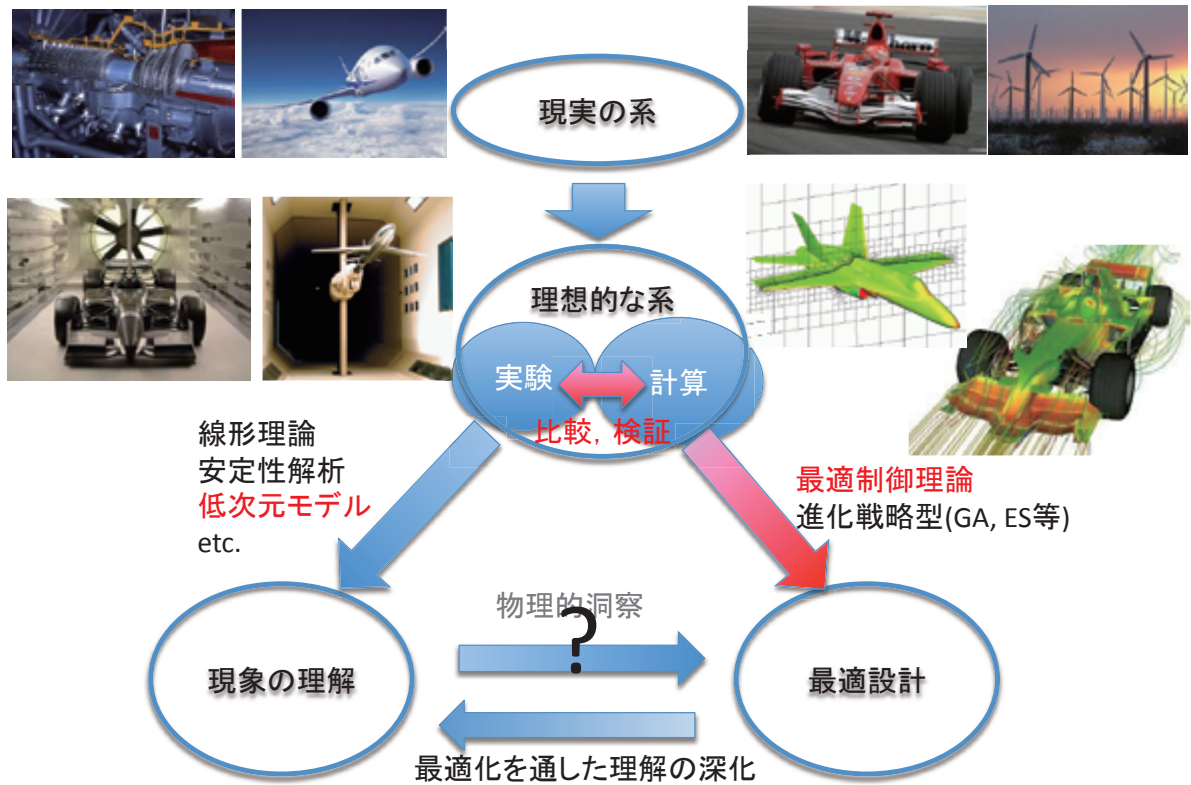
長谷川&鹿園
(熱工学コンファレンス2012,
特許出願済)



壁吹き出し/吸い込みの最適制御分布

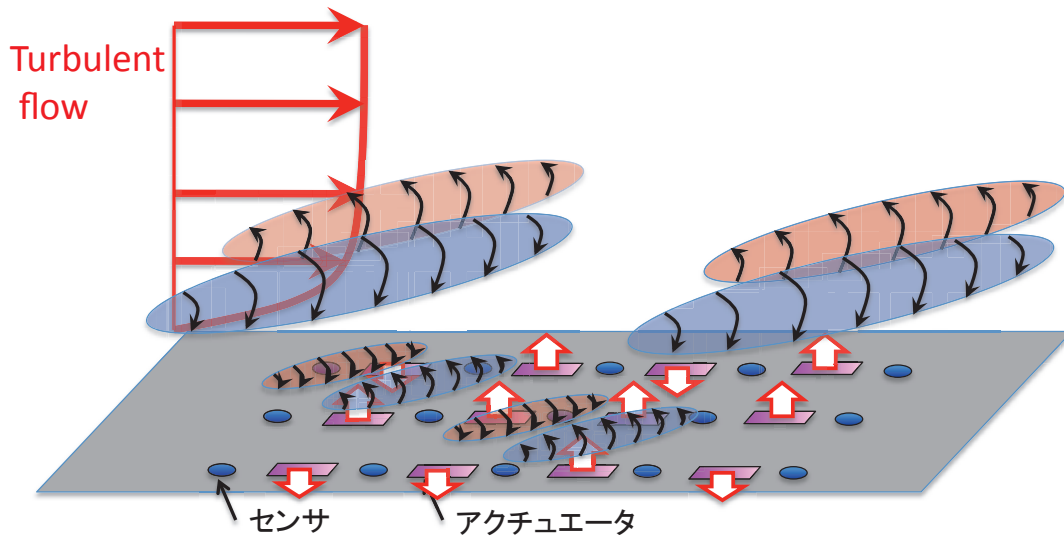


熱流体領域の研究進展とデータ同化技術



乱流輸送現象への 最適制御理論の応用

究極の乱流制御



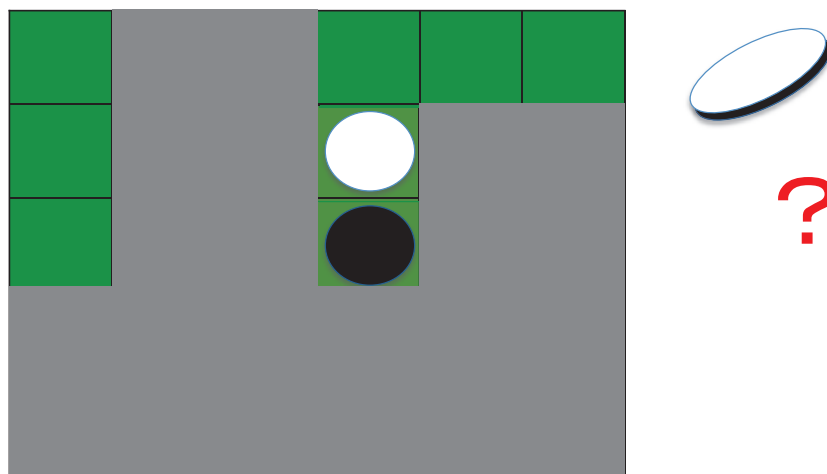
最適(最尤)状態推定(現象の予測):

有限のセンサ入力から如何に乱流場を予測するのか?

最適制御:

流れ場の状態が分かった時, どのような制御入力を加えるのか?

人類は乱流を予測し, 制御できるのか?

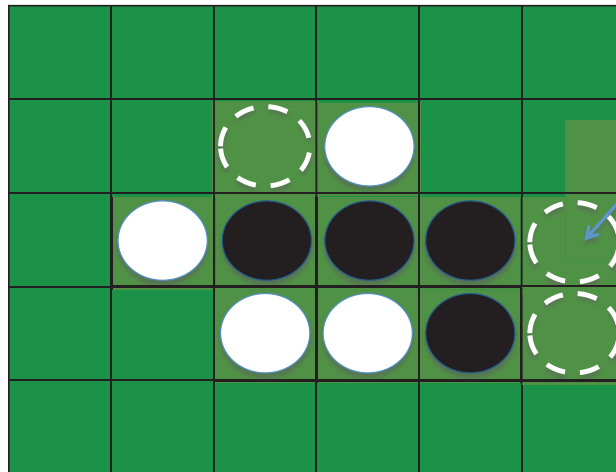
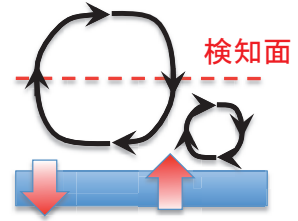


乱流制御は, 盤面の大部分が見えないオセロゲーム

流れ場の全情報が利用できたら どこまで制御できる？

■ アクティブ・キャンセレーション (Choi et al., JFM 1993)

- 壁からある距離の検知面の速度を打ち消す
- 低レイノルズ数において高々20%の抵抗低減率



"Sub"optimal,
But....
may be not optimal !

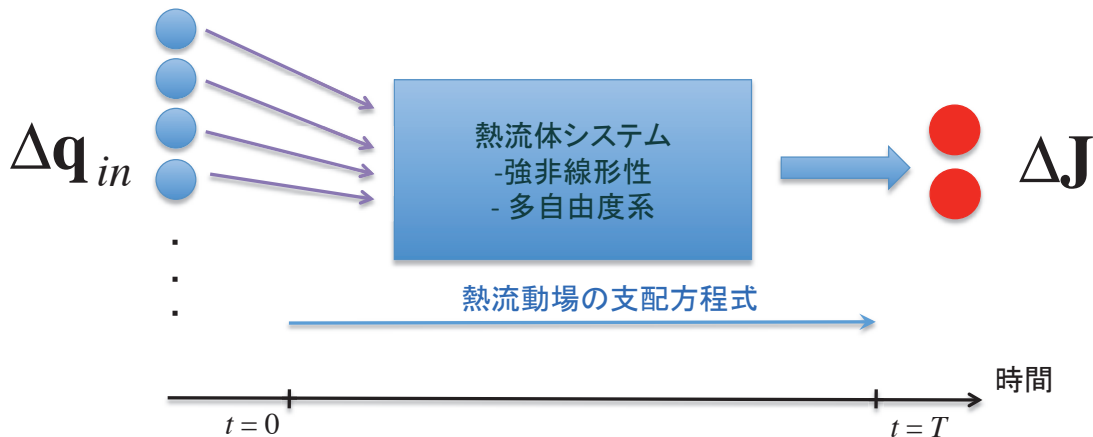
熱流体現象への制御理論の応用

多自由度の制御パラメータ

- いつ？
- どこに？
- どのような？
- どれだけ？

制御目的

- 伝熱
- 圧損
- 反応
- 揚力 etc...



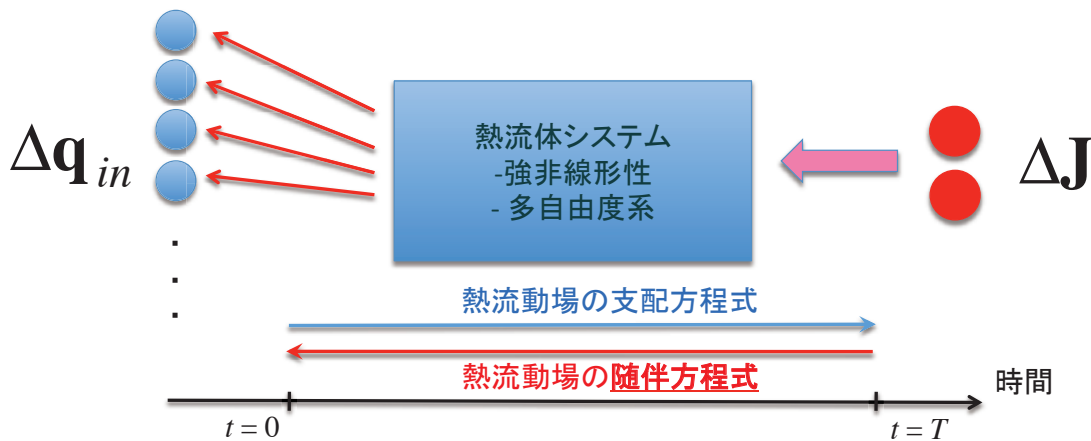
熱流体現象への制御理論の応用

多自由度の制御入力

- ・いつ？
- ・どこに？
- ・どのように？
- ・どれだけ？

制御目的

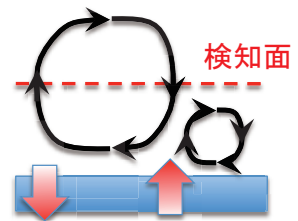
- ・伝熱
- ・圧損
- ・反応
- ・揚力 etc...



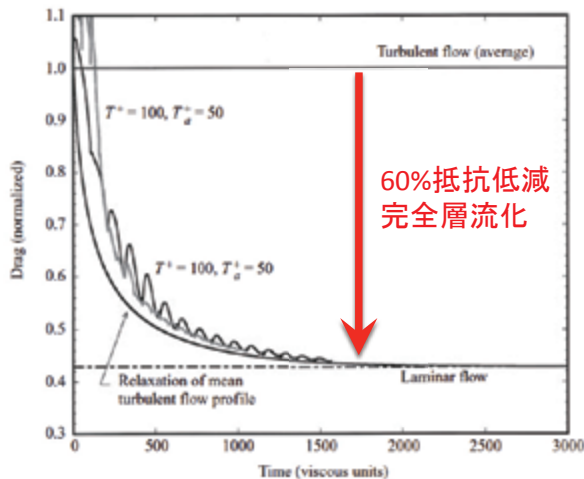
流れ場の全情報が利用できたら どこまで制御できる？

■ アクティブ・キャンセレーション (Choi et al., JFM 1993)

- ・壁からある距離の検知面の速度を打ち消す
- ・低レイノルズ数において高々20%の抵抗低減率



■ 最適制御理論 (Bewley et al., JFM 2001)



将来のダイナミクスを考慮すれば、著しい制御効果を得られる。

乱流の最適制御による 非相似伝熱促進

Less Friction & More Heat Transfer

References:

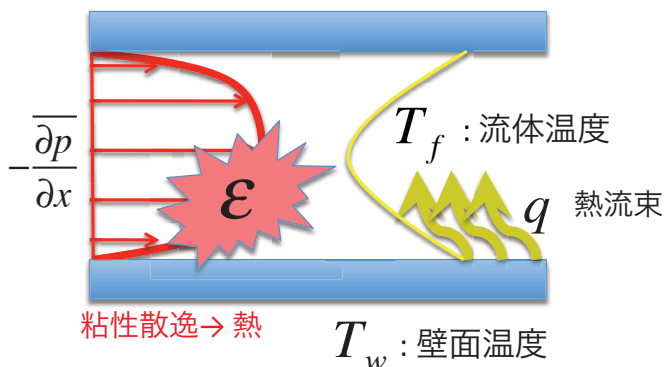
- 1) Hasegawa & Kasagi, *J. Fluid Mech.*, **683**, pp. 57-93, 2011
- 2) Kasagi, Hasegawa, Fukagata, Iwamoto, *ASME J Heat Transfer*, **134**, 031009, 2012
- 3) Yamamoto, Hasegawa & Kasagi, *J. Fluid Mech.*, **733**, pp. 189-220, 2013

究極の伝熱技術

-Less Friction More Heat Transfer-

- 次世代エネルギー機器: ヒートポンプ, 排熱からの動力回収, 高性能冷却 etc
- 高効率化, 低コスト化のための不可逆過程の抑制

伝熱を伴う管内完全発達流



□ エントロピー生成

(Bejan, *IJHMT* 1978)

$$\Delta s_f = \frac{\varepsilon}{T_f} + q \left(\frac{1}{T_f} - \frac{1}{T_w} \right)$$

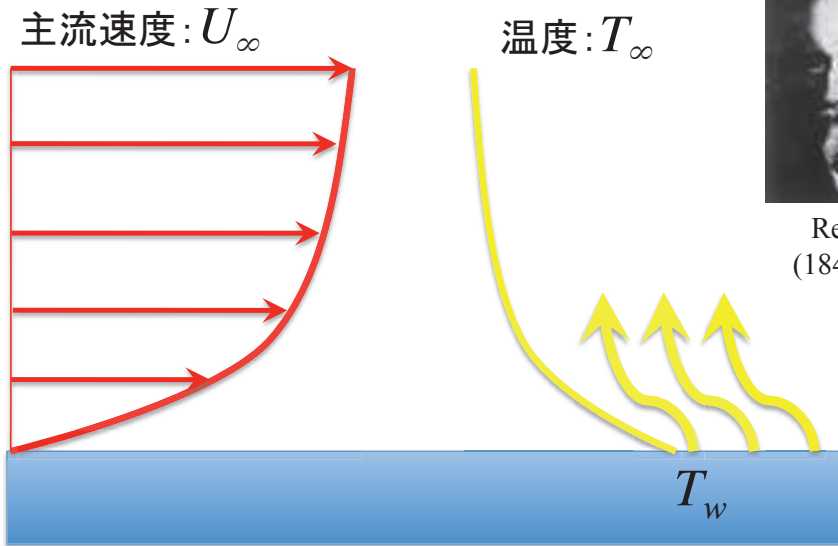
$$= \frac{\tau_w^* U_b^*}{T_f^*} + \frac{h^* \Delta T^{*2}}{T_f^* T_w^*}$$



熱伝達率 大 $h \rightarrow \infty$

圧力損失 小 $\tau_w \rightarrow 0$

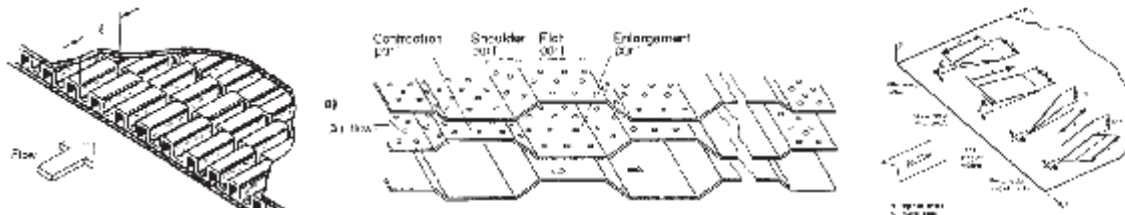
なぜ非相似伝熱促進が難しい？



運動量輸送と熱輸送の強い相似性(レイノルズ相似則)

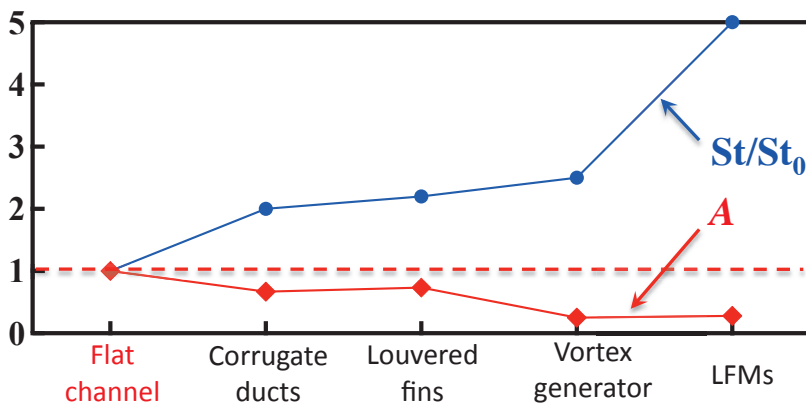
伝熱促進 → 圧力損失の増大

既存の伝熱促進技術



Bergles (1997)

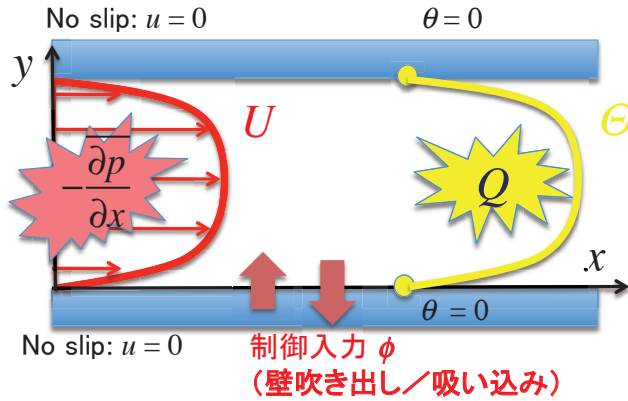
Heat transfer per unit pumping power



非相似因子

$$A = \frac{2St}{C_f} = \frac{\text{伝熱}}{\text{ポンプ動力}}$$

計算条件



- ✓ 一様発熱

$$Q = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} = const.$$
- ✓ 滑り無し, 壁温一定条件

$$u = \theta = 0 \text{ at two walls}$$
- ✓ $Re_b = 1452, 2293, 4980, Pr = 1.0$
 $(Re_\tau = 110, 150, 300 \text{ in uncontrolled flow})$

平均化した運動量方程式

$$-\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} = \frac{\partial(\overline{u'v'})}{\partial y} - \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2}$$

平均化したエネルギー式

$$\bar{Q} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} = \frac{\partial(\overline{\theta'v'})}{\partial y} - \frac{1}{Pr Re} \frac{\partial^2 \bar{\theta}}{\partial y^2}$$

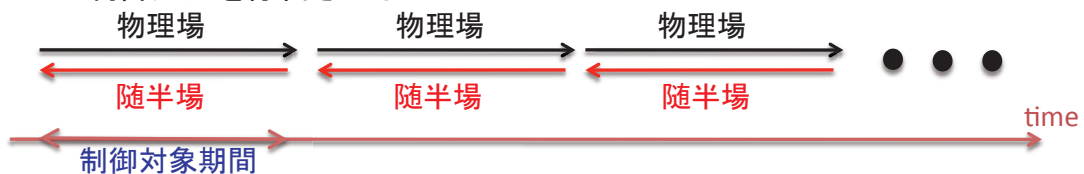
(Pr = 1.0)

乱流輸送現象への最適制御の応用

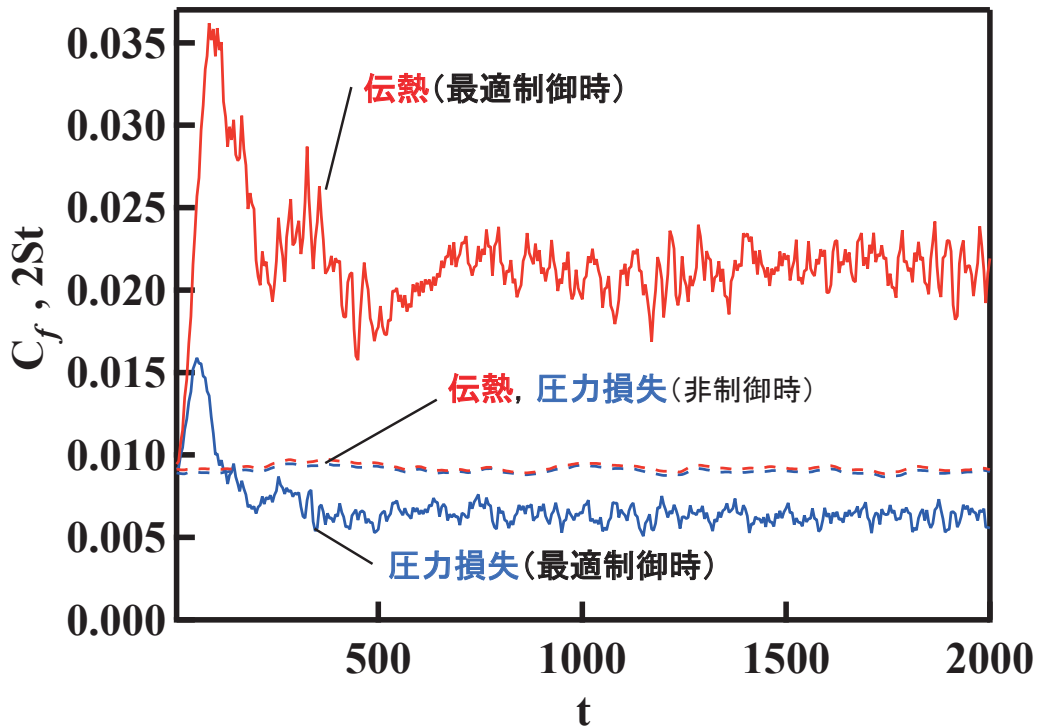
- 基本的な手順
 - ✓ コスト汎関数の定義
 - ✓ 制御入力の微小変化に対するコスト関数の変化量の導出
 - ✓ 制御入力の更新
- コスト汎関数 (Hasegawa & Kasagi, JFM 2011)

$$J(\phi) = \underbrace{\frac{\beta}{2A\Delta T} \int_S \int_t^{t+\Delta T} \phi^2 dt dS}_{\text{制御コスト}} + \underbrace{\frac{1}{\Delta T} \int_t^{t+\Delta T} C_f dt}_{\text{圧力損失}} - \underbrace{\frac{1}{\Delta T} \int_t^{t+\Delta T} 2St dt}_{\text{伝熱}}$$

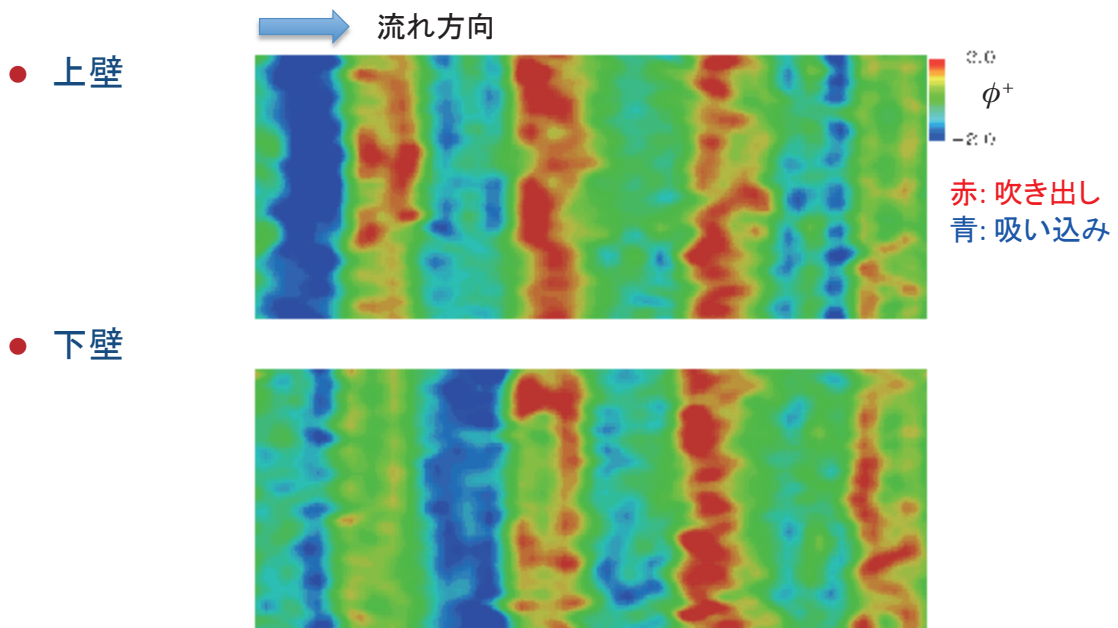
- 最適制御理論 (Bewley et al, JFM 1993, JFM 2001)
 - ✓ 有限の制御対象期間における随伴方程式を解くことにより, 制御入力を停留させる.



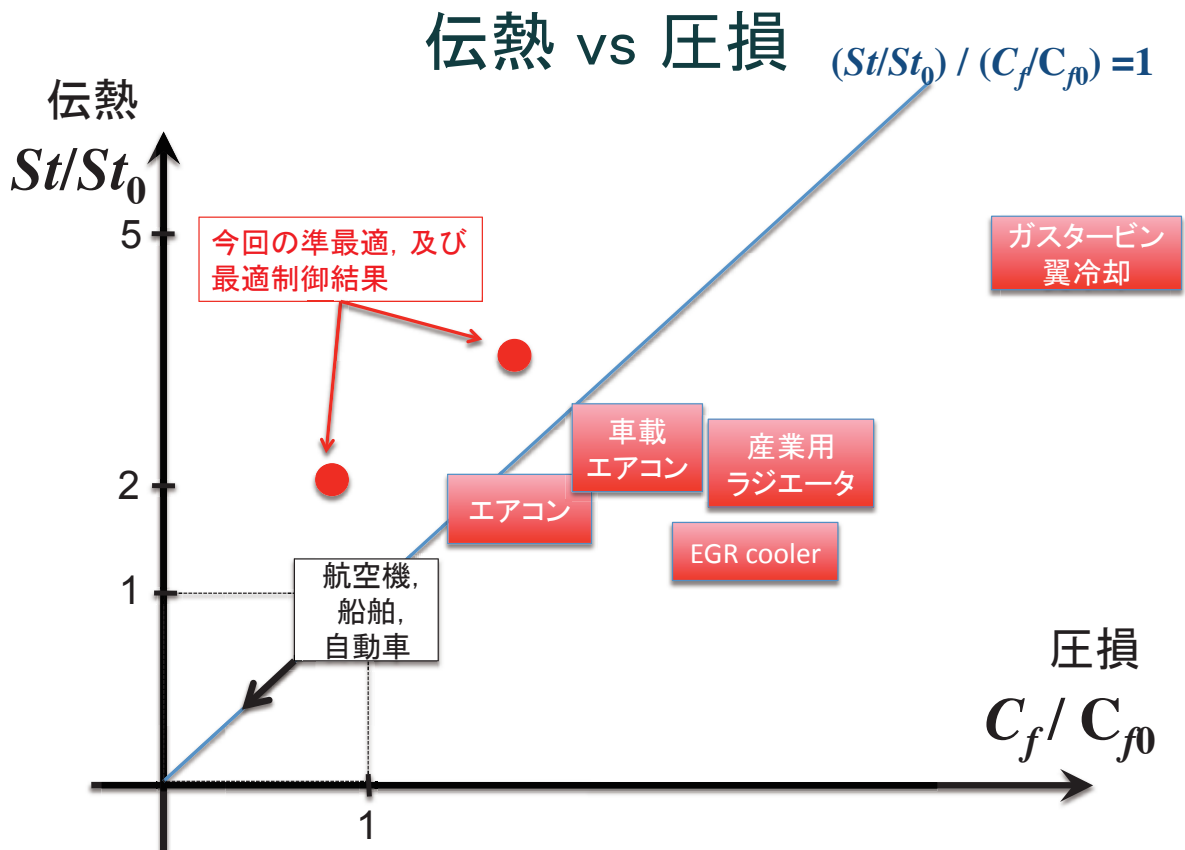
制御結果



最適制御入力



- ✓ 下流に一定速度で伝播する進行波
- ✓ 最適制御入力はVaricosモード



ここまでのまとめ

- 最適制御理論を応用し、従来難しいと考えられてきた壁乱流の再層流化や伝熱と摩擦抵抗の非相似制御が実証
- 将来のダイナミクスを考慮して制御入力を決めれば革新的な制御の可能性
- しかし、最適制御の適用では、流れ場の全情報が与えられていることが前提
- 有限センサー情報から流れ場の推定が必要

壁面情報のみに基づく 乱流制御事例

有限のセンサでどこまで乱流状態を推定できる？

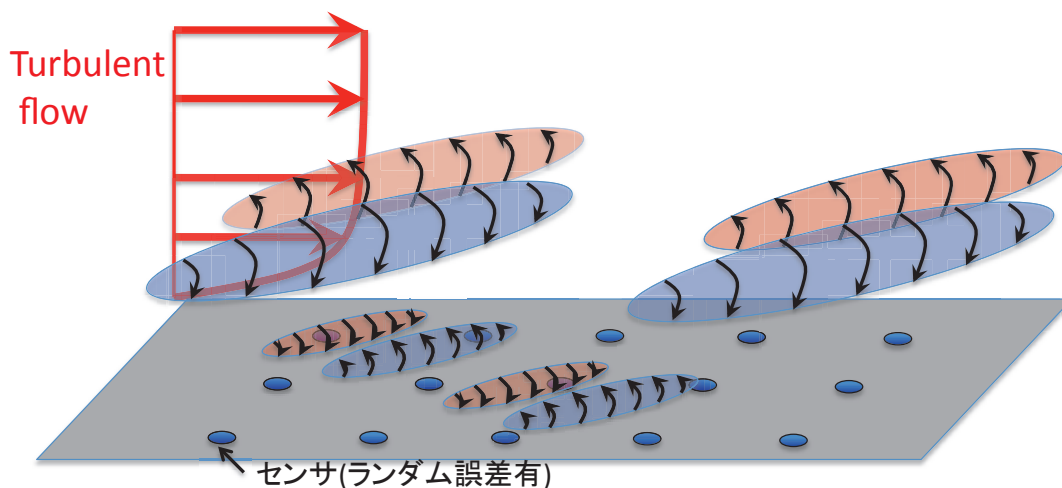
■ 最適(最尤)状態推定の乱流場への適用

層流: Kalman Filter (Hoegberg et al., JFM 2003, Hoepffner et al., JFM 2005)

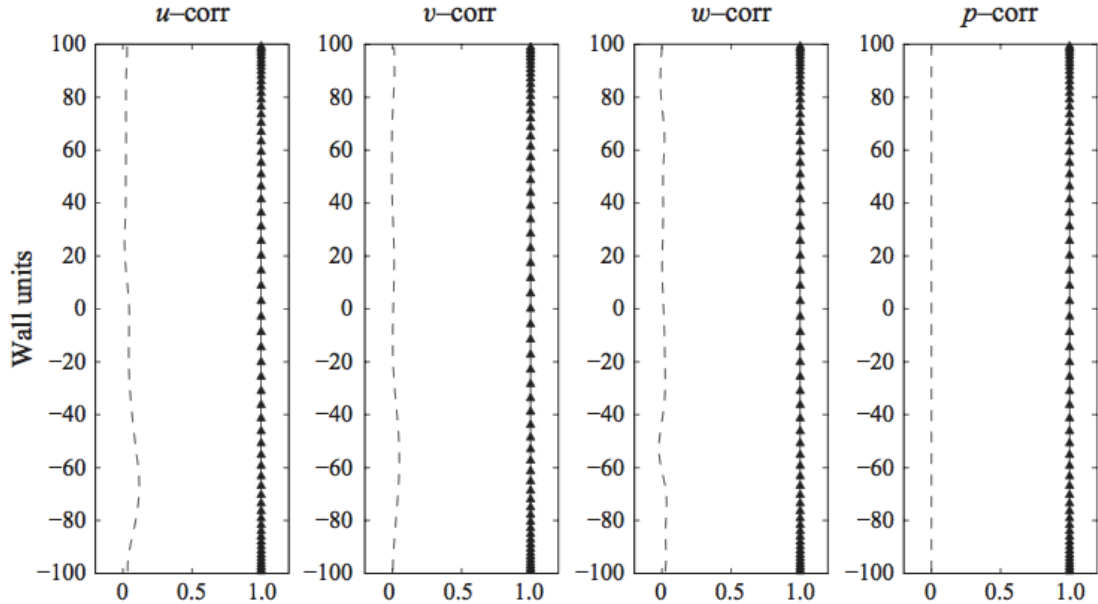
乱流: Adjoint Method (Bewley & Protas, Physica D 2004)

Extended Kalman Filter (Chevalier et al., JFM 2006)

Ensemble Kalman Filter (Colburn et al., JFM 2011)



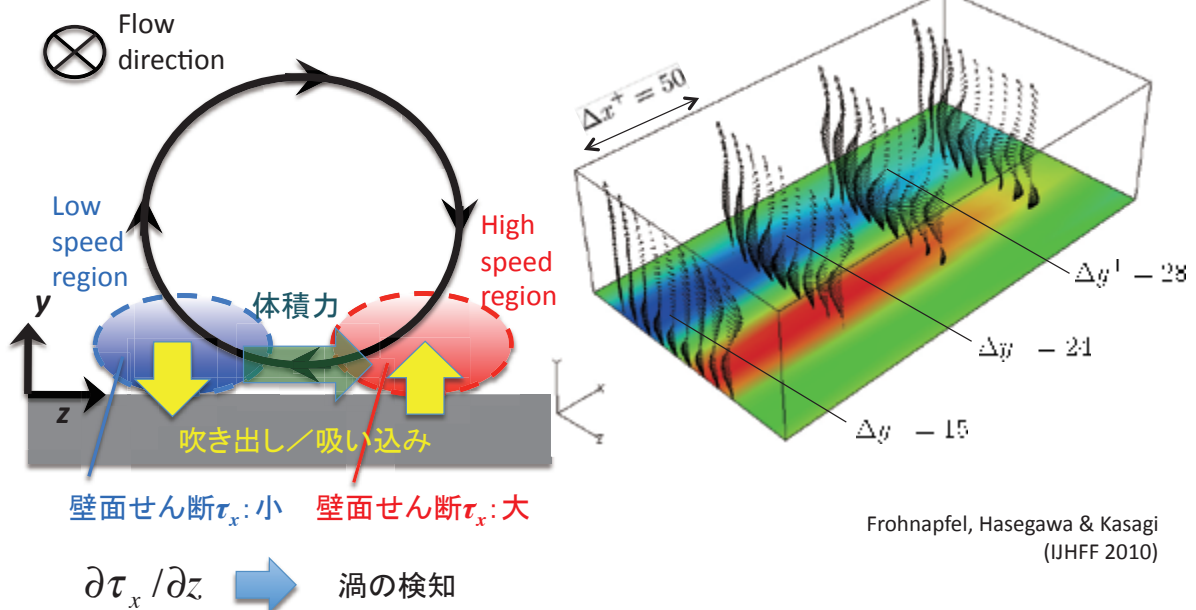
それでは、有限のセンサでどこまで乱流状態を推定できる？



全領域で、正解と予測の相関がほぼ1！

(Colburn et al., JFM 2011)

壁情報に基づくOpposition Control



Frohnafel, Hasegawa & Kasagi (JHFF 2010)

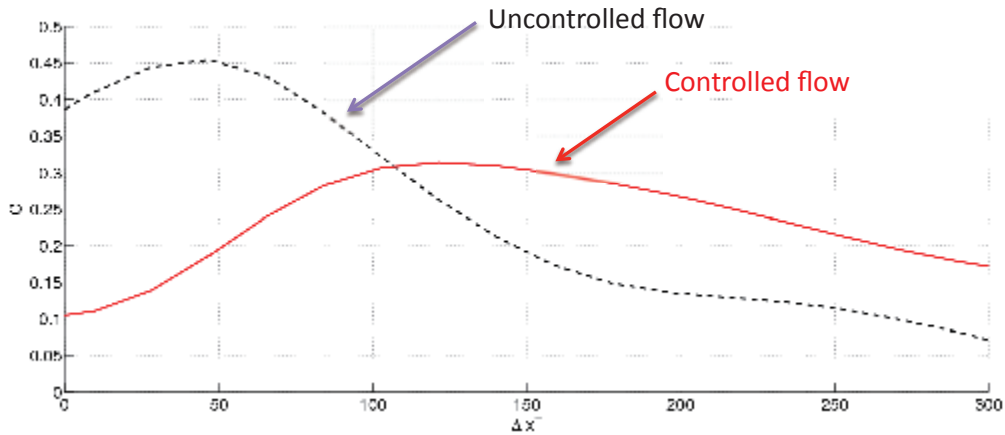
Comparison of Correlations

W-Damping based on Spanwise Wall Shear Stress

$$f_w = -\frac{f(y^+)}{\Phi^+} y^+ \epsilon_{\tau} (\tau^+ - \tau^-)$$

sensor input

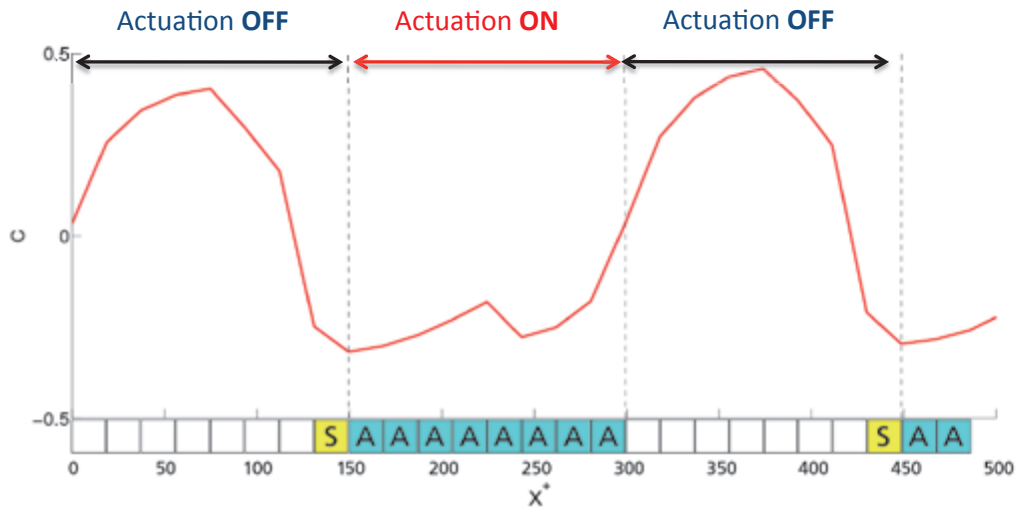
$$C^+ \left(\frac{\partial \tau_w}{\partial z}, -\tau_w(x^+ - \Delta x) \right)$$



EFMC8, Sept. 13-16, 2010 31
 B. Frohnafel, A. Stroh, Y. Hasegawa, N. Kasagi

Partial Opposition Control

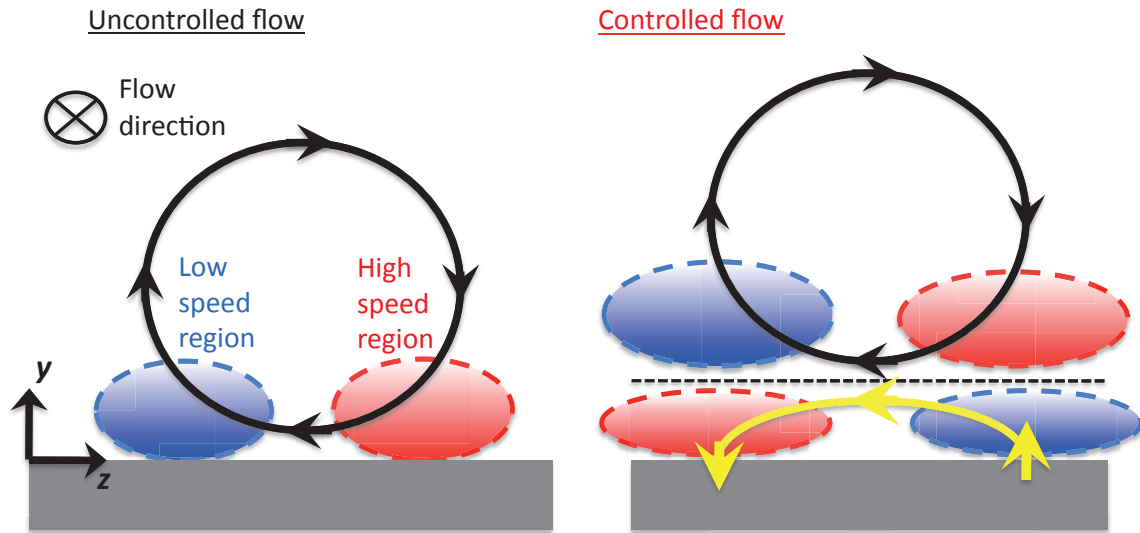
The correlation between $\partial \tau_x / \partial z_x$ and wall normal velocity in the detection plane



The correlation rapidly responds to the control input.

EFMC8, Sept. 13-16, 2010
 B. Frohnafel, A. Stroh, Y. Hasegawa, N. Kasagi

Control Effects on Sensing Quantity



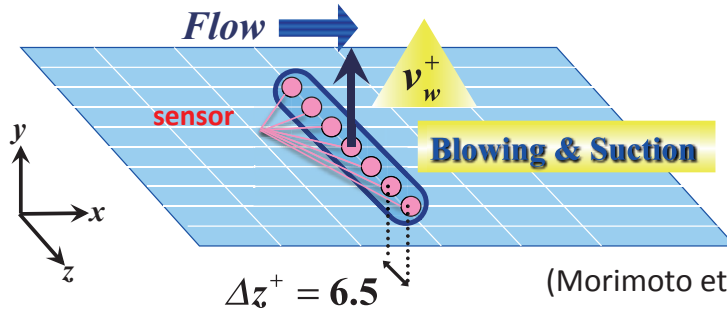
Relationship between $\partial T_x / \partial z$ and the vortex motion becomes opposite when opposition control is applied.

EFMC8, Sept. 13-16, 2010
 B. Frohnäpfel, A. Stroh, Y. Hasegawa, N. Kasagi

壁面情報のみに基づく
 適応型乱流制御

Genetic algorithm (GA) for feedback control

Turbulent Channel Flow of $Re_t = 100$



■ Cost function
→ wall friction

$$J = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \frac{\partial U}{\partial y} \Big|_w dt$$

(Morimoto et al., Proc. SMART-3, 2002)

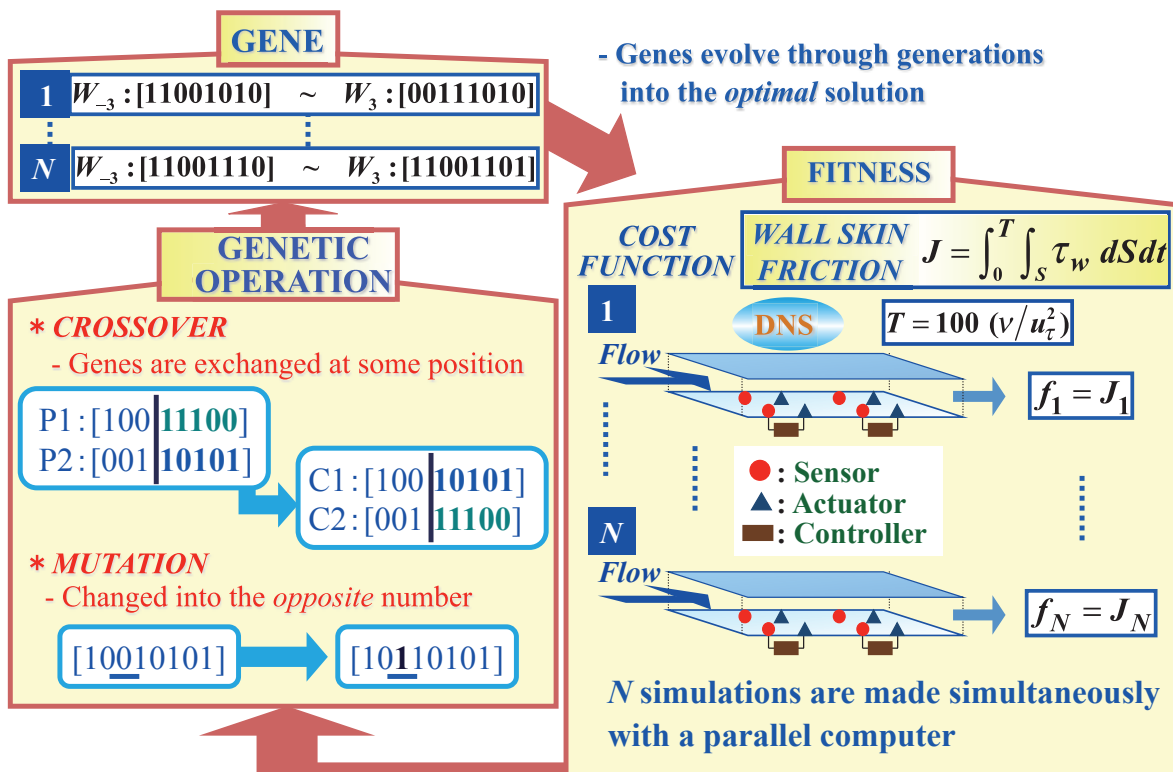
Control Input $v_w^+(x, z) = C \left(\sum_{n=-3}^3 W_n \tau_w^+(x, z + n\Delta z) \right)$

sensor inputs

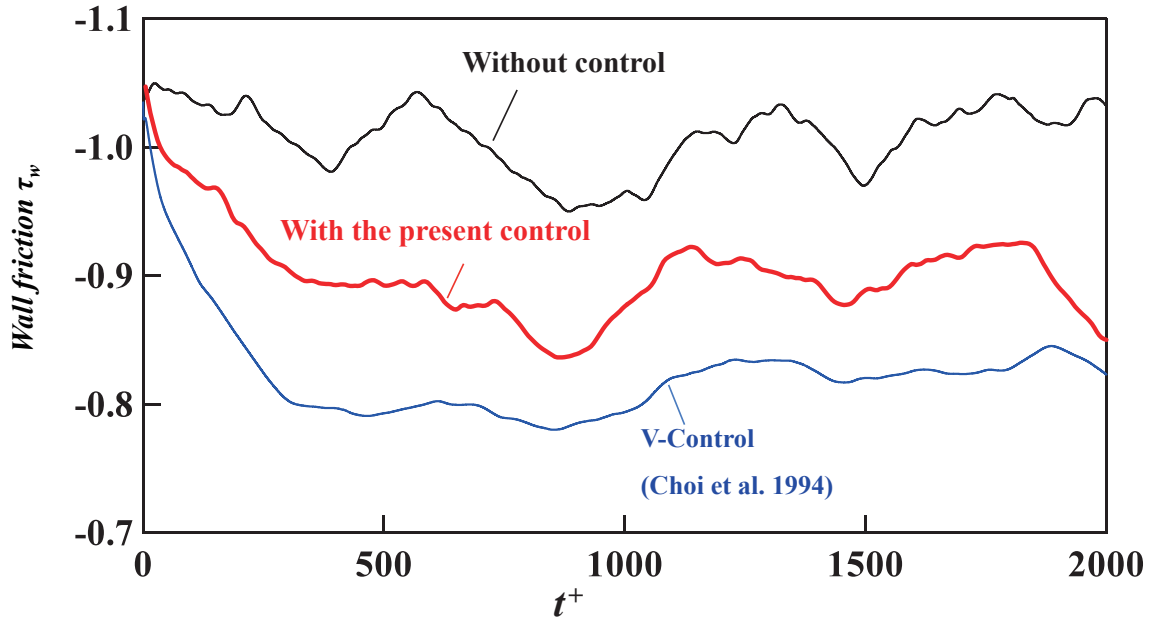
➡ Weights W_n are optimized by GA

3535

GA-based optimization



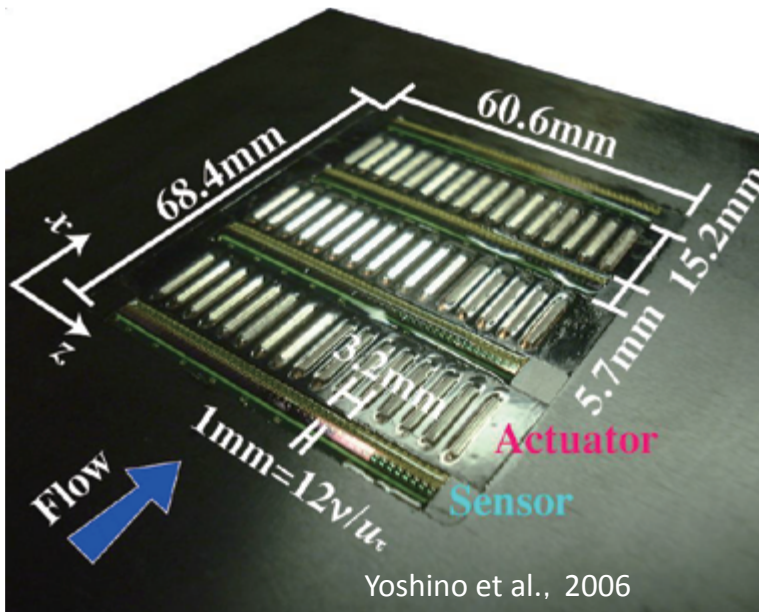
Control Results



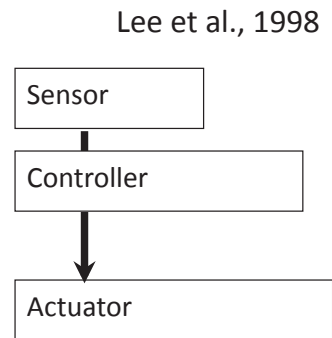
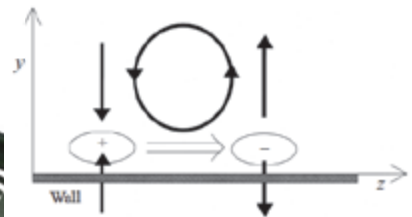
- Significant drag reduction from the onset of the control
- ➡ Mean reduction rate: 12%, Maximum rate: 18%

フィードバック制御の実証実験

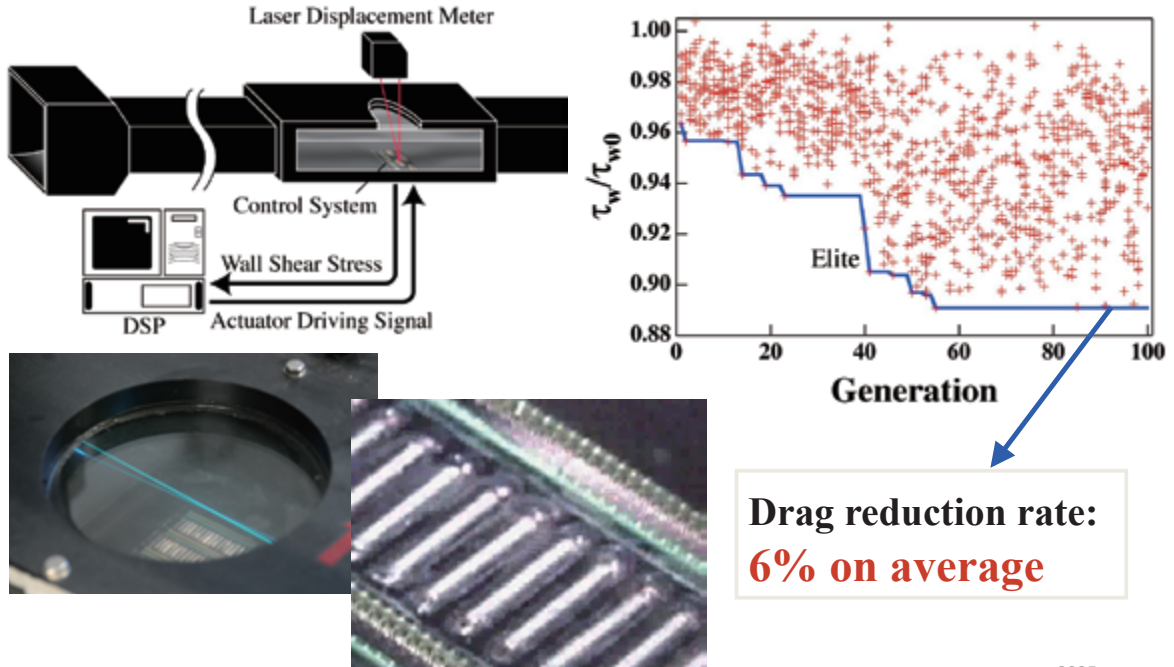
- Smart Skin



Active cancellation

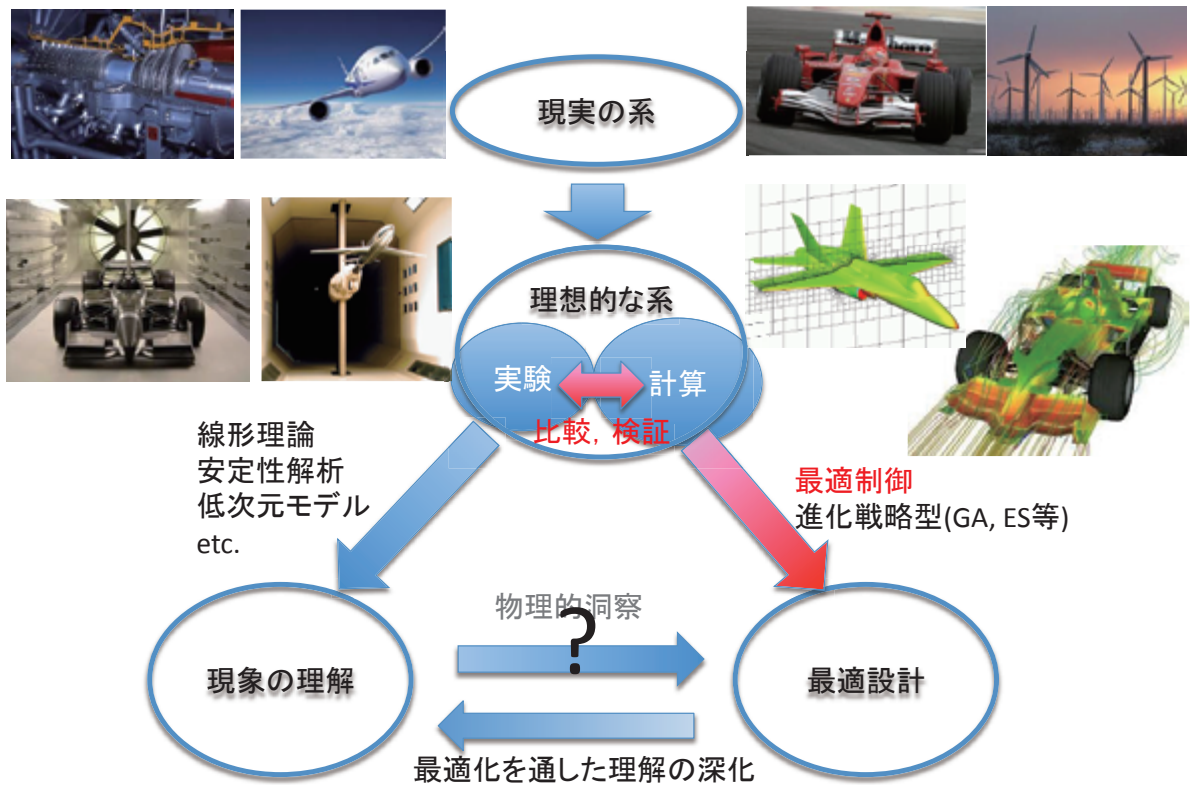


摩擦抵抗低減の実証

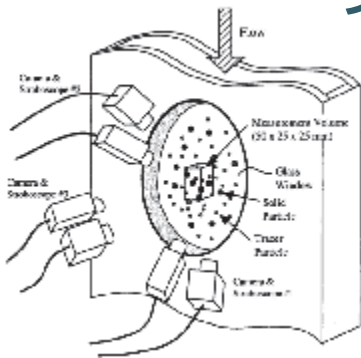


3935

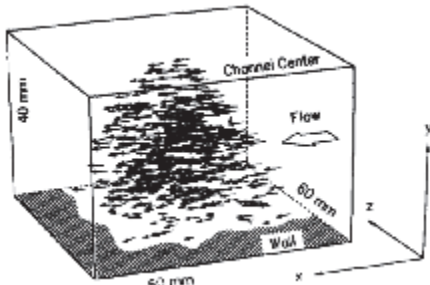
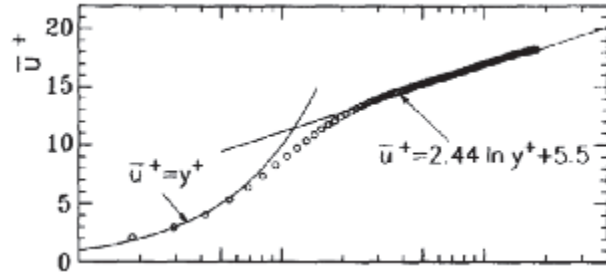
熱流体領域の研究進展とデータ同化技術



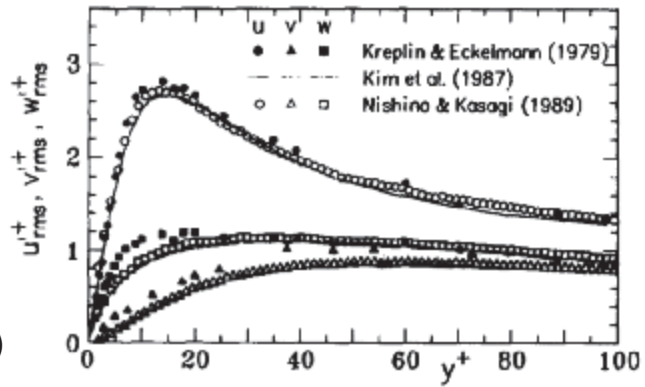
実験 vs 計算



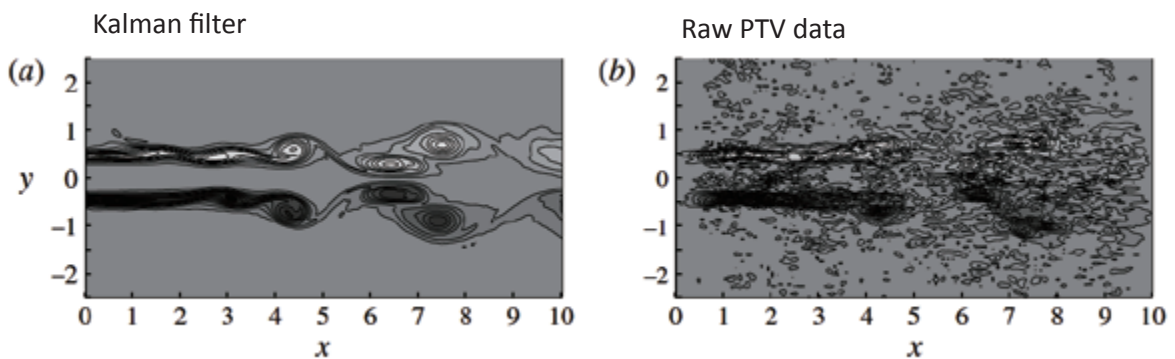
Suzuki et al. (2000)



Kasagi & Nishino (1991)



実験データの有効利用

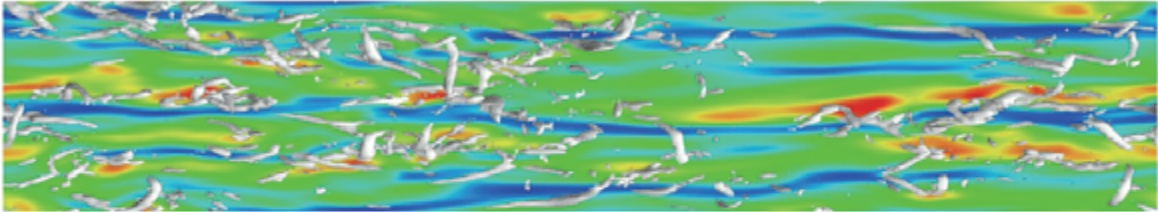


Suzuki (JFM 2012)

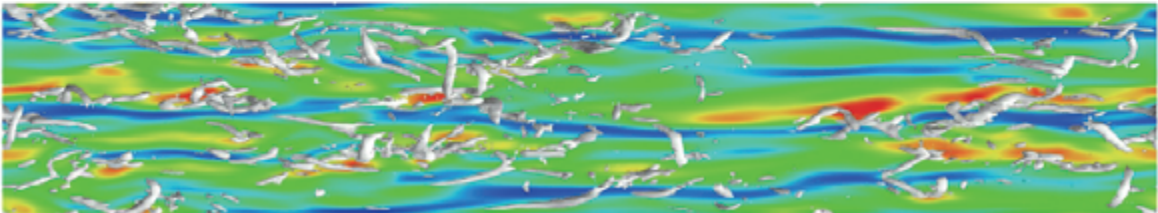
- ・境界条件, 初期条件の不確かさ
- ・計測ノイズ
- ・大事な乱流統計量の多くは微分量
- ・計測困難な領域(壁面近傍等)

統計量から瞬時場へ

倍精度のシミュレーション(有効桁16桁)



単精度のシミュレーション(有効桁8桁)



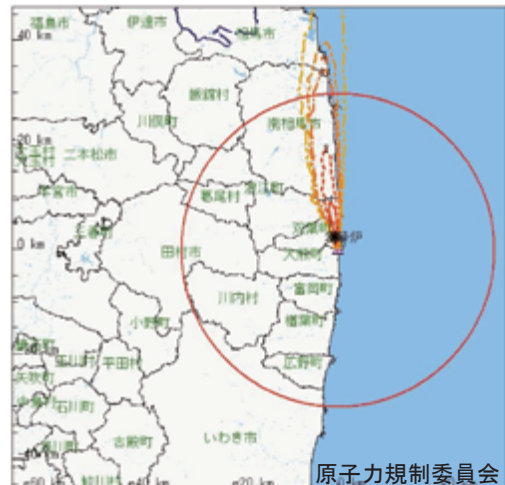
様々な誤差因子:境界条件, 初期条件, モデル精度, 打ち切り誤差……

環境予測におけるニーズ

- 異常気象予測(台風, ゲリラ豪雨)
- 風況予測(建築構造物, 風力発電)
- スカラー源予測(CO₂, 有害物質等の拡散)

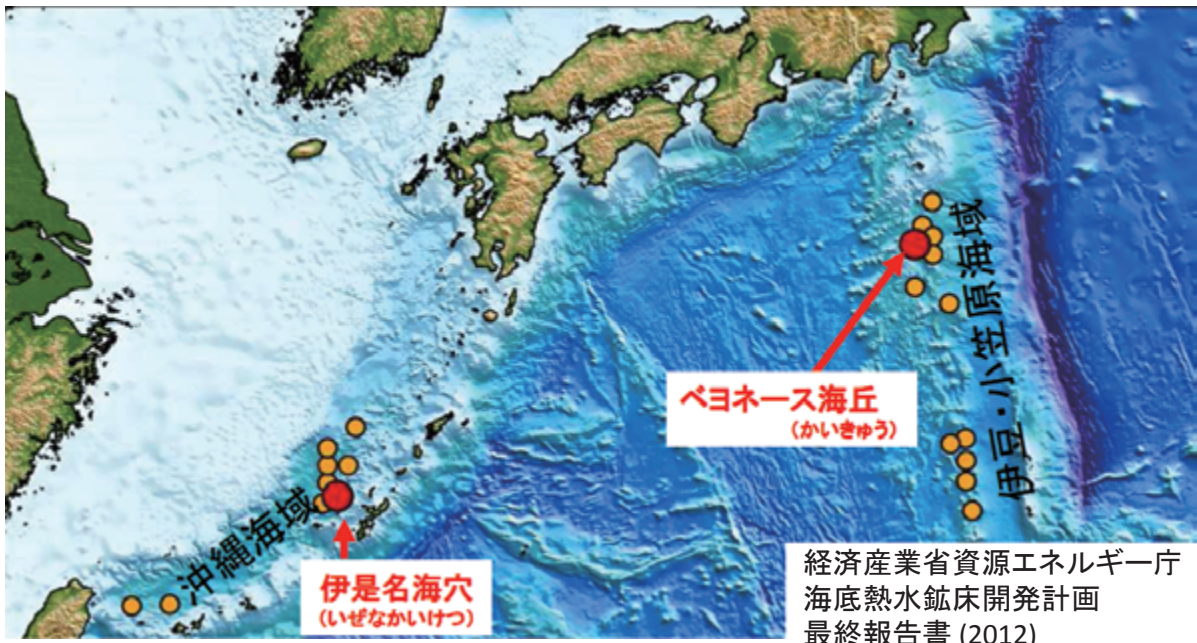


Mechali et al.



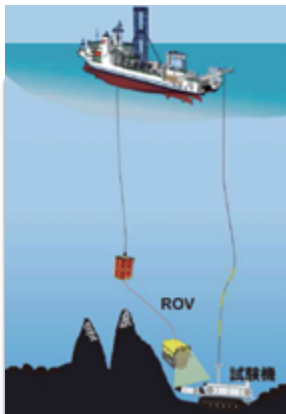
原子力規制委員会

日本国周辺の海洋熱水鉱床

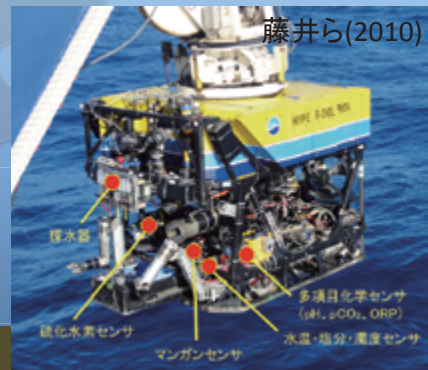
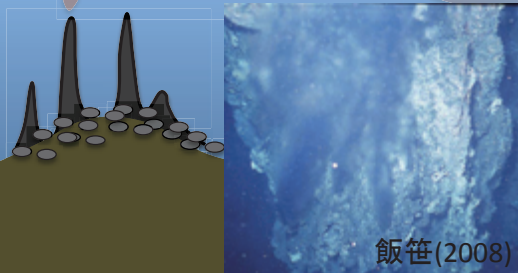


- ✓ 金属鉱物資源 (ベースメタル, 貴金属, レアメタル, レアアース)
- ✓ 固有の生態系

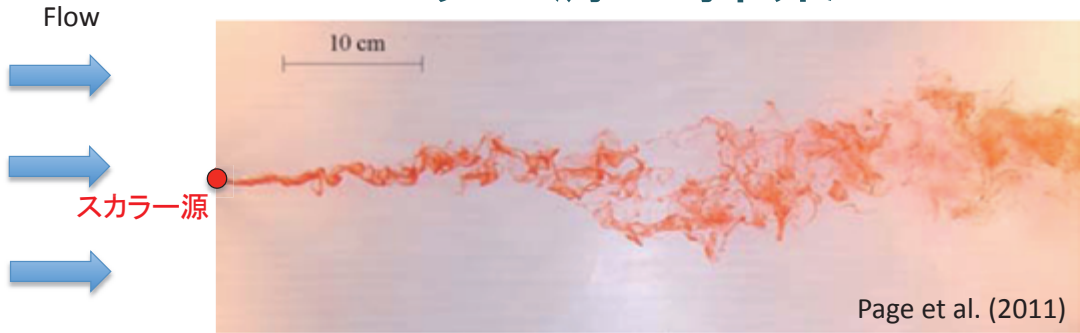
海洋資源探査



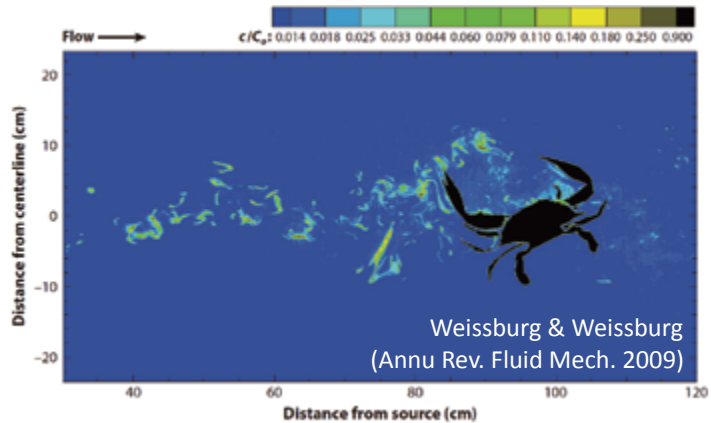
- ・限られたセンサー情報
- ・熱水鉱床の推定
- ・周辺環境, 生体系の把握
- ・採鉱による汚染物質拡散予測



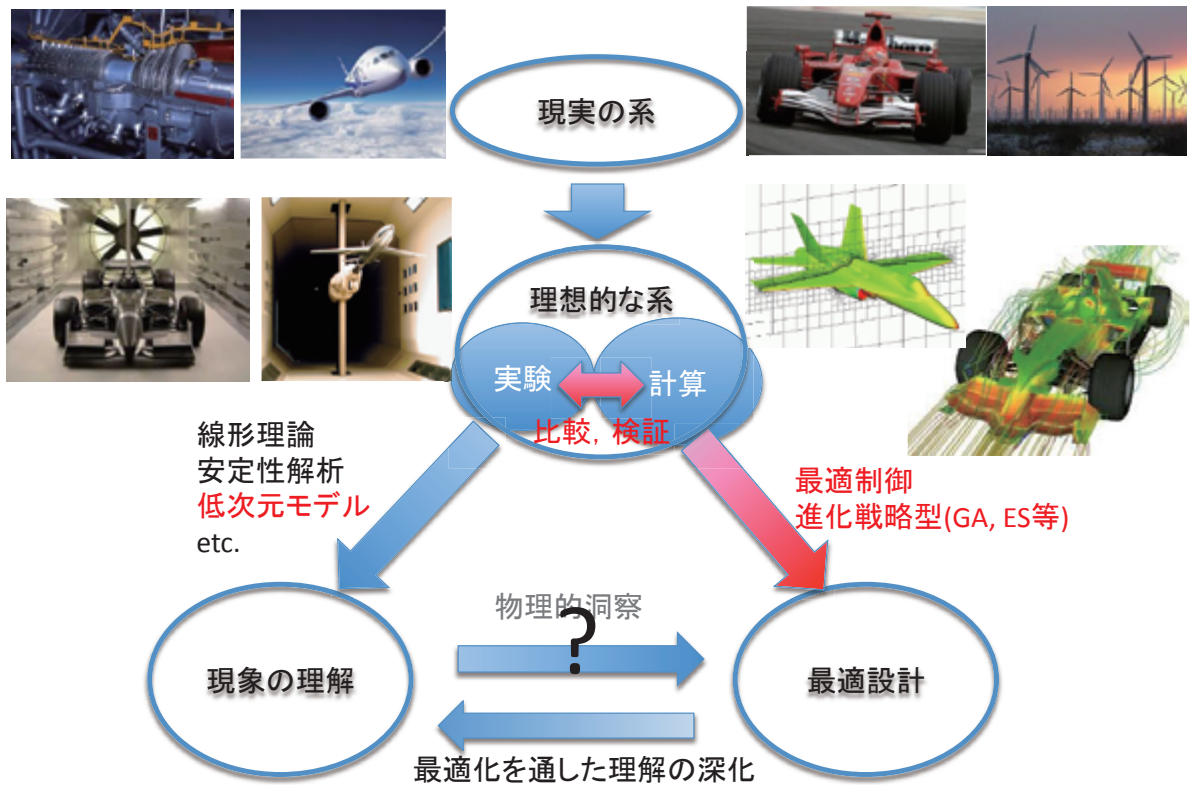
スカラー源の探索



- ・有限個の臭覚センサー
- ・瞬時の濃度スパイクに基づくスカラー源探索



熱流体領域の研究進展とデータ同化技術



まとめ

- 乱流制御の観点から
 - 能動制御の問題は,
 - 1)有限のセンサー情報に基づく**流れ場の推定**, 及び
 - 2)与えられた流れ場に対する**制御入力最適化**という2つのサブ課題に分けられる.
 - 流れ場が与えられれば, 最適制御理論は制御入力を決める強力なツール
 - 一方, 状態推定に関する研究事例は比較的少なく, センサー配置や観測すべき量に関して更なる研究の余地あり
 - Model-based or Model-free (adaptive) ?
- パラメータ推定の観点から
 - 乱流場における渦粘性, 反応流における反応定数等の未知パラメータの同定
 - 単なる**フィッティング**にならないように
- 乱流予測の観点から
 - これまで実験と計算の比較検証は, 専ら**統計量のみ**
 - ある**瞬時場**が予測できるかは別問題
 - 大気・海洋の汚染物質拡散
 - 局所の異常気象, 風況予測
 - 海洋資源探査 等
 - 信頼できる統計量が得られないアプリケーションでは, データ同化技術が重要となる



東北大学 流体科学研究所
Institute of Fluid Science, Tohoku University

不確定性定量化のための効果的手法 の確立に向けた基礎研究

下山 幸治

東北大学 流体科学研究所

第6回EFD/CFD融合ワークショップ, 2014年1月30日



Outline

✓ *Fundamentals of Uncertainty Quantification*

✓ *Research Topics*

- *Polynomial Chaos Expansion with Order Adjustment*

- * *Prof. Shigeru Obayashi (Tohoku Univ.)*

- * *Mr. Akihiro Inoue (Tohoku Univ.)*

- * *JAXA/NSRG*



- *Dynamic Adaptive Sampling based on Kriging Surrogate Model*

- * *Dr. Soshi Kawai (JAXA/ISAS)*

- * *Prof. Juan J. Alonso (Stanford Univ.)*



✓ *Summary & Future Work*



CFD Challenges

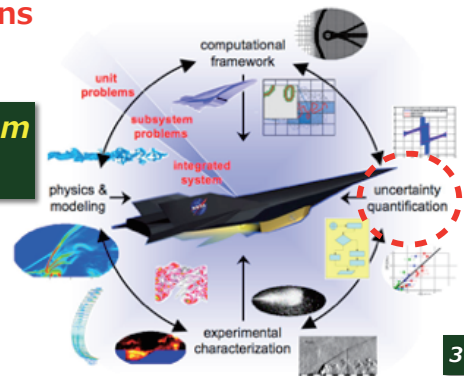
Vision 2030 "Where we believe CFD should go"

- Accurate prediction of boundary layer transition [Andersen 2012]
- Improved RANS model for efficient complex flow analysis
- Accurate prediction recovery, dynamic distortion, and swirl patterns at the Aerodynamic Interface Plane (AIP) for propulsion integration
- Accurate prediction of shock-boundary layer in presence of corner flows
- An advanced turbulence model within a single framework for accurate unsteady flow phenomena
- Efficient and robust mesh adaptation for complex configurations
- **Error estimation and uncertainty predictions**
- Multidisciplinary analysis (aeroelasticity, etc.)

Predictive Science Academic Alliance Program (PSSAP)

[pssap.stanford.edu]

Predictive Simulations of Multi-Physics Flow Phenomena, with Application to Integrated Hypersonic Systems

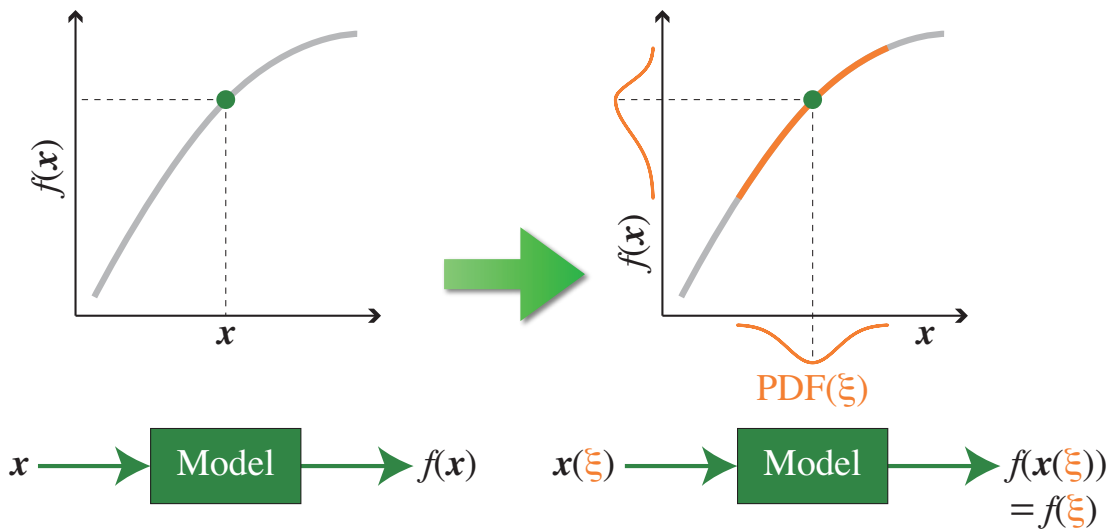


3



Uncertainty Quantification (UQ)

Science of quantitative characterization and reduction of **uncertainties** in applications [wikipedia.org]



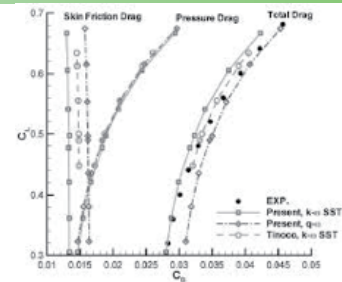
4



Contributions of UQ

✓ Simulation

- Assist verification and validation
- Make perfect models



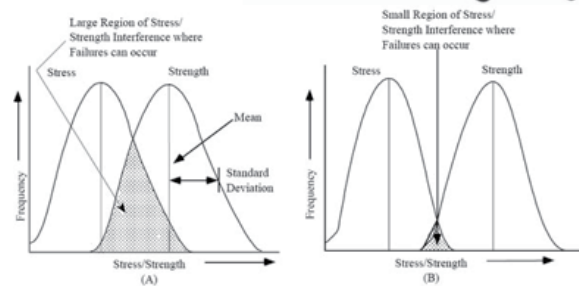
✓ Physics

- Understand complex phenomena
- Find exact principles



✓ Design

- Evaluate robustness
- Ensure reliability



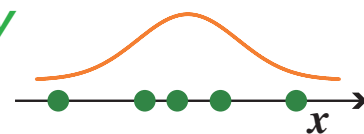
5



Types of Uncertainty

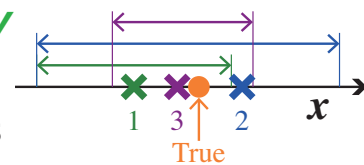
✓ Aleatory (Irreducible) Uncertainty

- Inherent variation associated with the system under consideration
- Defined in a probabilistic framework
→ Material properties, operating conditions, manufacturing tolerances, ...



✓ Epistemic (Reducible) Uncertainty

- Lack of knowledge or information in any phase or activity of the modeling process
- Involves a single but unknown true value
→ Turbulence models, chemical process models, ...



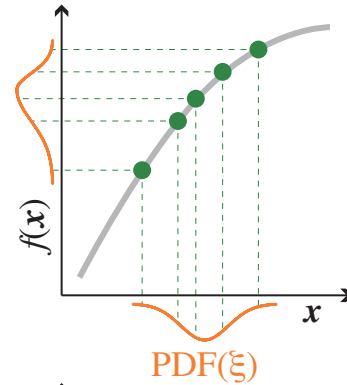
6



Types of Uncertainty Propagation

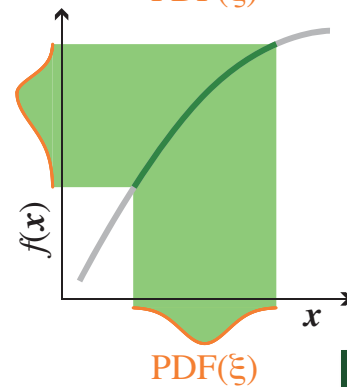
✓ Non-Intrusive Methods

- Only require (multiple) solutions of the original (deterministic) model
- Treat the model as a black box
- Less efficient to compute



✓ Intrusive Methods

- Require the formulation and solution of a stochastic version of the original model
- Need to know the mathematical structure of the model
- More efficient to compute



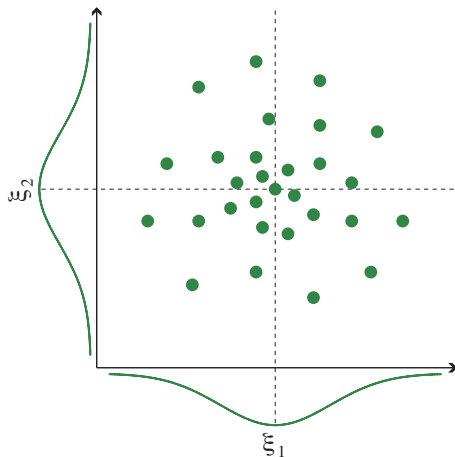
7



Sampling Methods

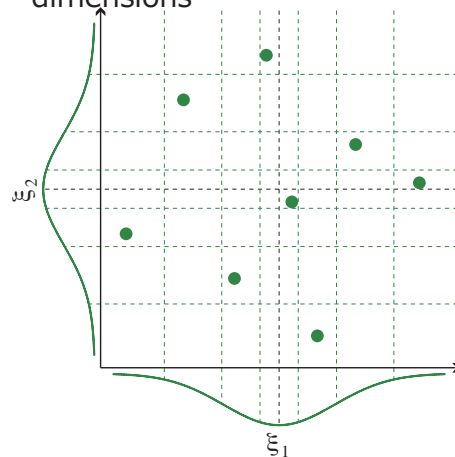
✓ Monte Carlo (MC)

Samples all points randomly



✓ Latin Hypercube Sampling (LHS) [Mckay et al. 1979]

- Samples a point in each equi-probability partition randomly
- Does not allow overlapping partitions to be sampled for all dimensions

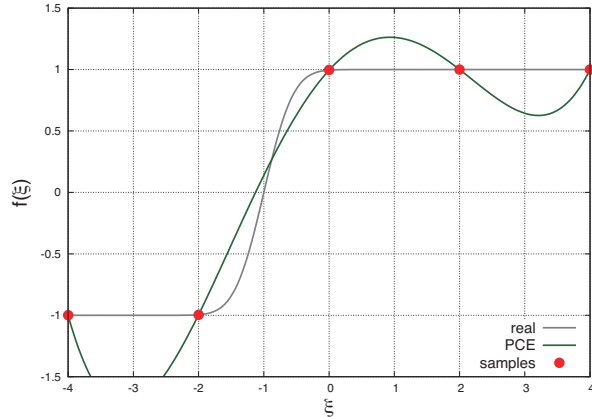


8



Approximation Methods

$$f(\xi) \simeq \sum_{i=1}^P \alpha_i \phi_i(\xi)$$



✓ **Polynomial Chaos Expansion (PCE)** [Xiu & Karniadakis 2002]

- Approximates as a linear combination of orthogonal polynomials
- Estimates coefficients for known orthogonal polynomials

✓ **Stochastic Collocation (SC)** [Xiu & Hesthaven 2005]

- Approximates as a linear combination of interpolation polynomials
- Forms interpolation functions for known coefficients

9



Polynomial Chaos Expansion (PCE)

$$f(\xi) \simeq \sum_{i=1}^P \alpha_i \phi_i(\xi)$$

where $P = \frac{(n+p)!}{n!p!}$
n: # dimensions in ξ
p: Polynomial order

$\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_P$
 obtained from $N (\geq P)$ samples

$$f(\xi^{(j)}) = \sum_{i=1}^P \alpha_i \phi_i(\xi^{(j)})$$

$(j = 1, 2, \dots, N)$

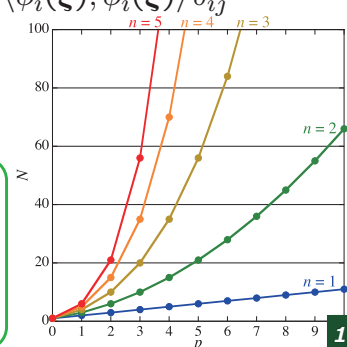
$$\mu_f = E[f(\xi)] \simeq \alpha_1$$

$$\sigma_f^2 = \text{Var}[f(\xi)] \simeq \sum_{i=2}^P \alpha_i^2 \langle \phi_i(\xi), \phi_i(\xi) \rangle$$

Input uncertainty PDF(ξ)	Polynomial $\phi_i(\xi)$
Uniform	Legendre
Normal	Hermite
Gamma	Laguerre
Beta	Jacobi

$$\langle \phi_i(\xi), \phi_j(\xi) \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} \phi_i(\xi) \phi_j(\xi) \text{PDF}(\xi) d\xi$$

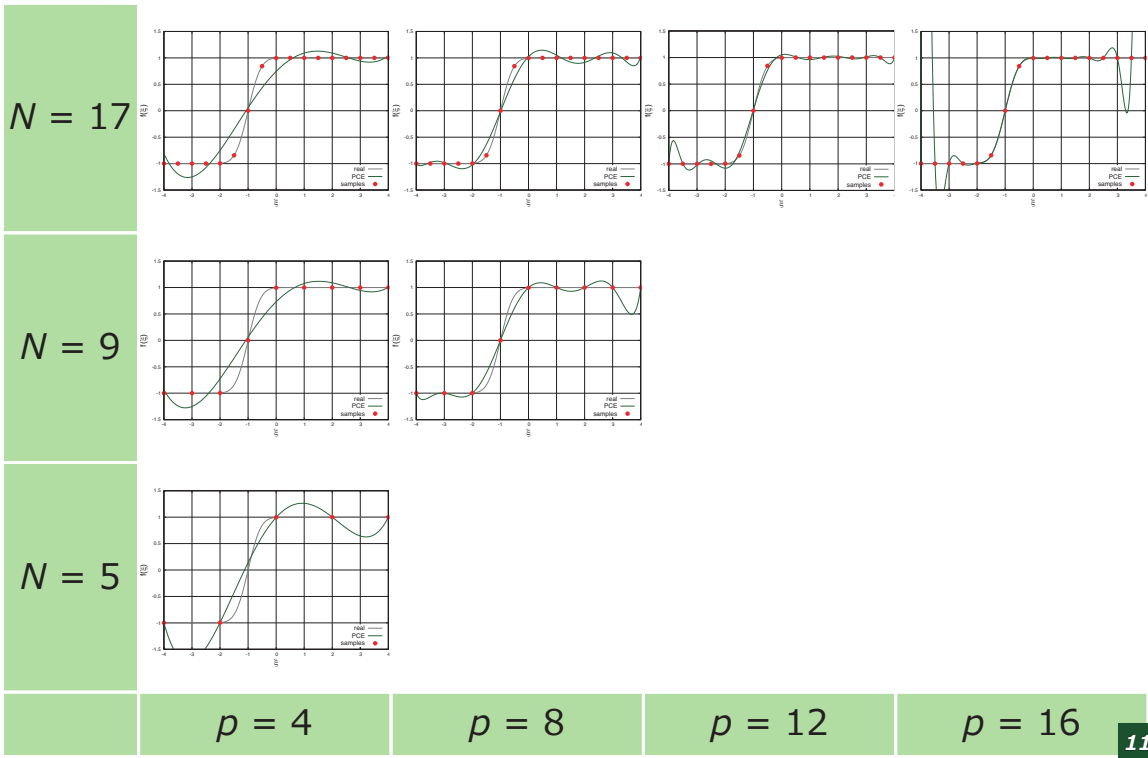
$$= \langle \phi_i(\xi), \phi_i(\xi) \rangle \delta_{ij}$$



10



PCE Examples



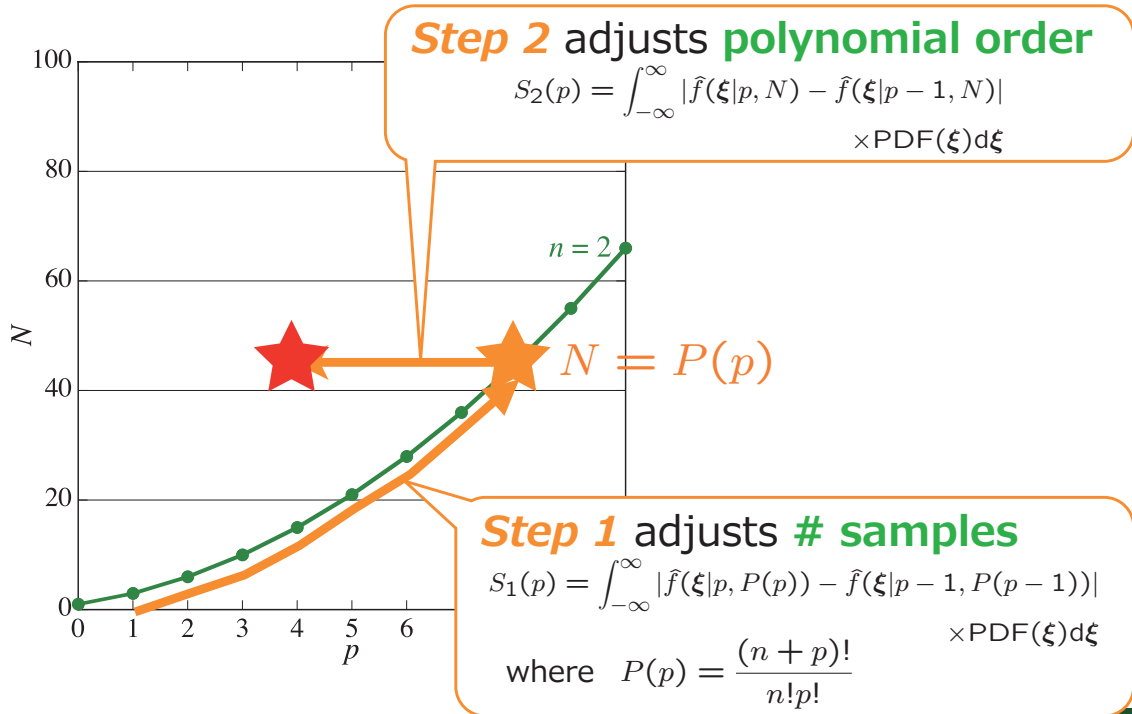
Outline

- ✓ *Fundamentals of Uncertainty Quantification*
- ✓ *Research Topics*
 - *Polynomial Chaos Expansion with Order Adjustment*
 - ✦ *Prof. Shigeru Obayashi (Tohoku Univ.)*
 - ✦ *Mr. Akihiro Inoue (Tohoku Univ.)*
 - ✦ *JAXA/NSRG*
 - *Dynamic Adaptive Sampling based on Kriging Surrogate Model*
 - ✦ *Dr. Soshi Kawai (JAXA/ISAS)*
 - ✦ *Prof. Juan J. Alonso (Stanford Univ.)*
- ✓ *Summary & Future Work*





Order Adjustment in PCE



13

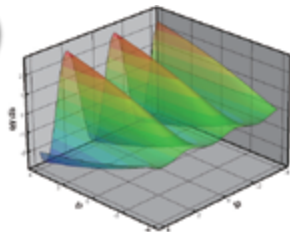


Numerical Tests (2D Func.)

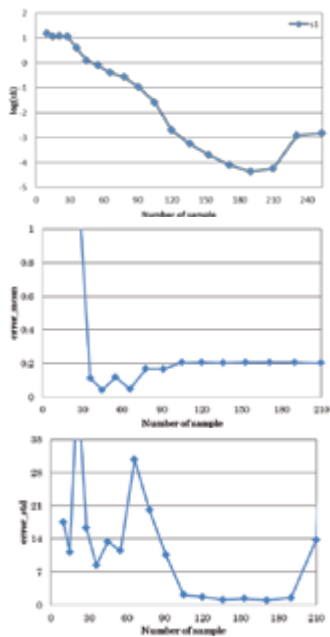
$$f(x_1, x_2) = \ln(1 + x_1^2) \sin(5x_2)$$

$$x_k = 2 + 0.4\xi_k \quad (k = 1, 2)$$

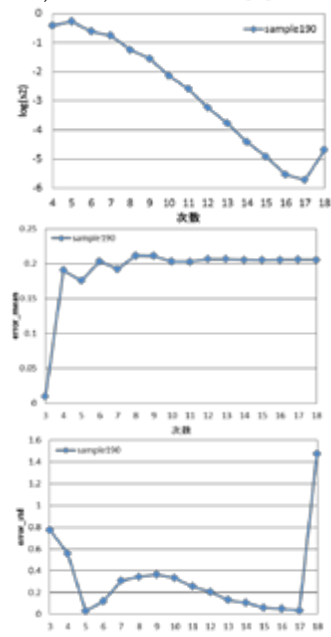
$$\text{PDF}(\xi_1, \xi_2) = \prod_{k=1}^2 \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\xi_k^2}{2}\right)$$



✓ Step 1



✓ Step 2

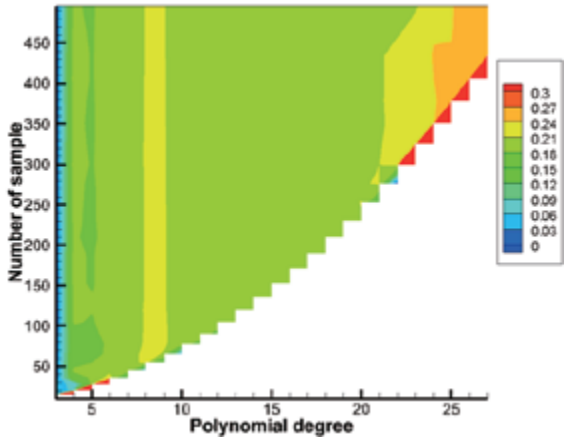


14

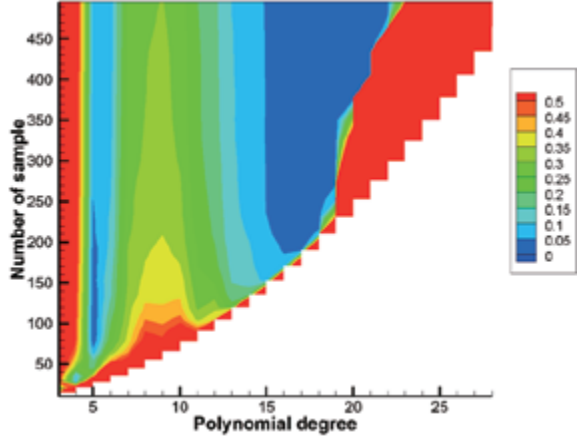


Numerical Tests (2D Func.)

Error in μf

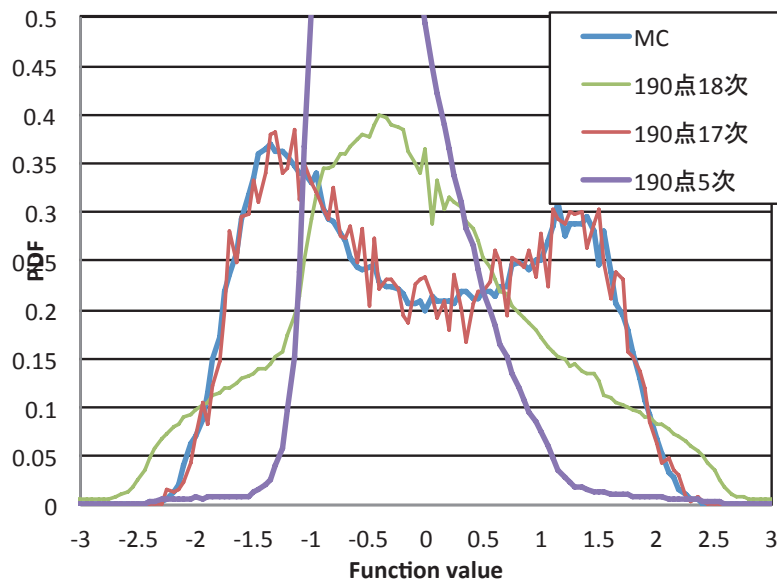


Error in σf



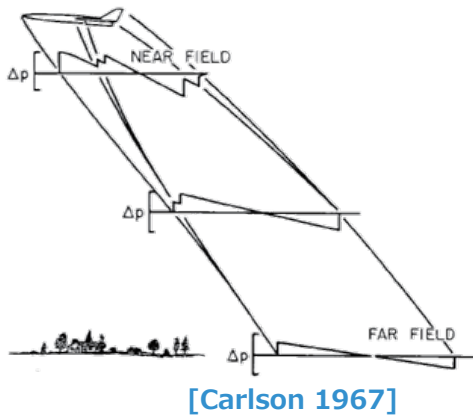
Numerical Tests (2D Func.)

PDF of $f(\xi_1, \xi_2)$





Application (Sonic Boom)

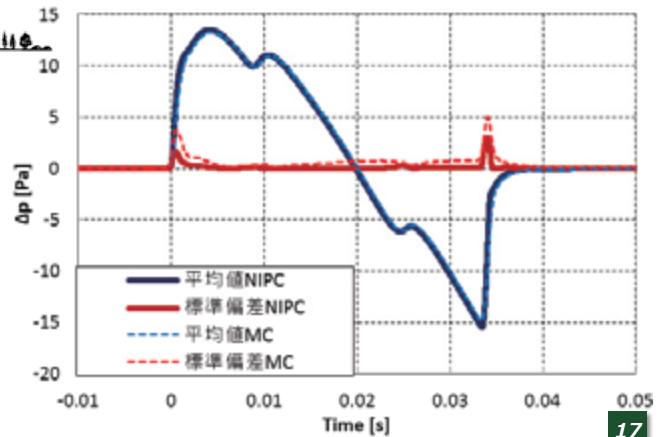


Augmented Burgers equation

[Cleveland and Blackstock 1996]

with atmospheric uncertainties

- Temperature
- Humidity
- Wind (speed & direction)



Outline

✓ Fundamentals of Uncertainty Quantification

✓ Research Topics

● Polynomial Chaos Expansion with Order Adjustment

✦ Prof. Shigeru Obayashi (Tohoku Univ.)

✦ Mr. Akihiro Inoue (Tohoku Univ.)

✦ JAXA/NSRG



● Dynamic Adaptive Sampling based on Kriging Surrogate Model

✦ Dr. Soshi Kawai (JAXA/ISAS)

✦ Prof. Juan J. Alonso (Stanford Univ.)



✓ Summary & Future Work

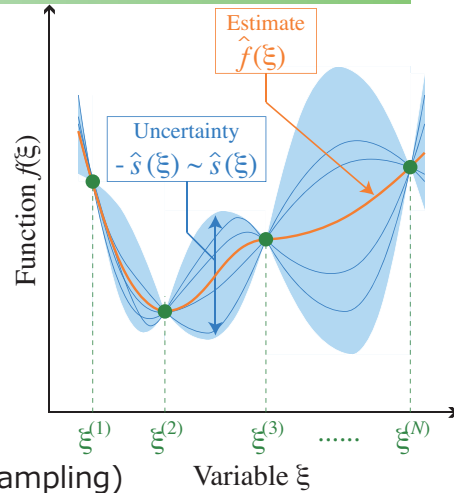


Kriging-Based Methods

✓ Kriging Surrogate Model

[Sacks et al. 1989]

- Based on the Bayesian statistics
- Adapts well to non-linear functions
- Estimates not only the **function values** but also their **fit uncertainties**



[Yamazaki 2013]

Inferior to a classical PCE (without adaptive sampling)

[Dwight and Han 2009]

Adaptive sampling based the fit uncertainty in the Kriging predictor and the PDF of input parameter uncertainties

[Bilionis and Zabaras 2012]

Adaptive refinement based on the fit uncertainty predicted by the Gaussian process regression



Kriging Surrogate Model

Deterministic $f(\xi)$



Stochastic $F(\xi) = \mu + Z(\xi)$

where

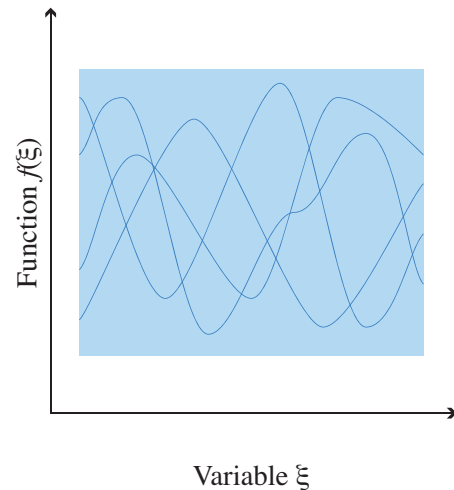
$$E[Z(\xi)] = 0$$

$$\text{Cov}[Z(\xi), Z(\xi')] = \sigma^2 k(\xi, \xi')$$

Correlation function (kernel)

- Depends on $|h| = |\xi - \xi'|$
- With a set of constants Θ (hyperparameters)

Prior distribution



Determined by the maximum likelihood estimation



Kriging Surrogate Model (cont.)

N samples $f(\xi^{(i)}) = F(\xi^{(i)})$
 $(i = 1, 2, \dots, N)$

Likelihood function

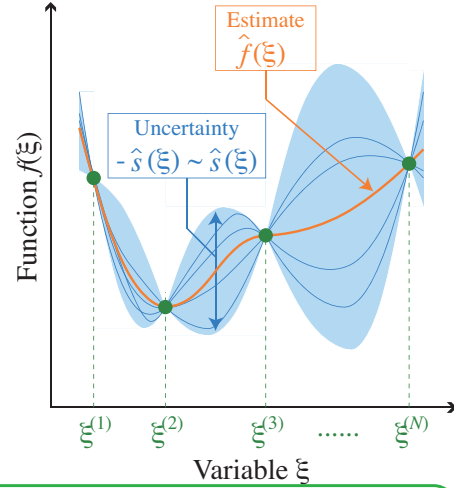
$$\ln(\mu, \sigma^2, \Theta) = -\frac{N}{2} \ln(2\pi) - \frac{N}{2} \ln \sigma^2 - \frac{1}{2} \ln |R| - \frac{(f - 1\mu)^T R^{-1} (f - 1\mu)}{2\sigma^2}$$

Maximization

$$\hat{\mu} = \frac{1^T R^{-1} f}{1^T R^{-1} 1}$$

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{(f - 1\hat{\mu})^T R^{-1} (f - 1\hat{\mu})}{N}$$

Posterior distribution



Best linear unbiased predictor

$$\hat{f}(\xi) = \hat{\mu} + r^T(\xi) R^{-1} (f - 1\hat{\mu})$$

$$\hat{s}^2(\xi) = \hat{\sigma}^2 \left[1 - r^T(\xi) R^{-1} r(\xi) + \frac{(1 - 1^T R^{-1} r(\xi))^2}{1^T R^{-1} 1} \right]$$

where

$$R_{ij} = k(\xi^{(i)}, \xi^{(j)})$$

$$r_i(\xi) = k(\xi, \xi^{(i)})$$

21



Dynamic Adaptive Sampling

✓ Criterion 1 [Dwight and Han 2009]

$$\text{Crit}(\xi) = \hat{s}(\xi) \times \text{PDF}(\xi)$$

✓ Criterion 2

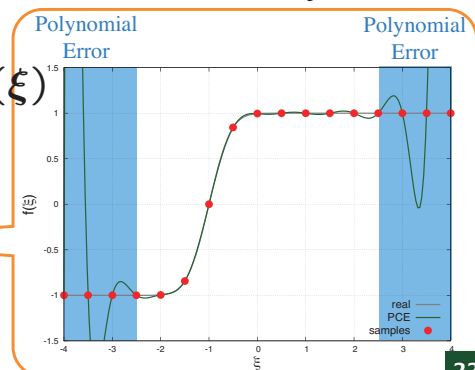
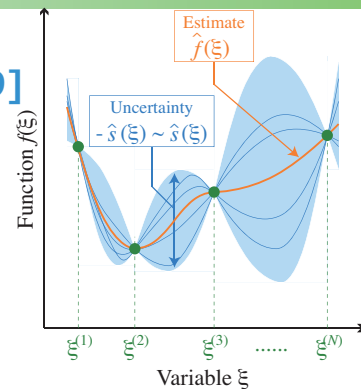
$$\text{Crit}(\xi) = \left| \frac{\partial \hat{f}(\xi)}{\partial \xi} \right| \times \text{PDF}(\xi)$$

✓ Criterion 3

$$\text{Crit}(\xi) = \left| \frac{\partial \hat{f}(\xi)}{\partial \xi} \right| \times \hat{s}(\xi) \times \text{PDF}(\xi)$$

$$= 0$$

in smooth regions



22



Dynamic Adaptive Sampling (cont.)

✓ Criterion 4 (proposed)

$$\text{Crit}(\xi) = \left(\left| \frac{\partial \hat{f}(\xi)}{\partial \xi} \right| \times \Delta\xi + D_{\hat{f}}(\xi) \right) \times \hat{s}(\xi) \times \text{PDF}(\xi)$$

$$\Delta\xi = \min_{i=1,2,\dots,N} |\xi - \xi^{(i)}|$$

$$D_{\hat{f}}(\xi) = \left| \hat{f}(\xi) - \hat{f}_{\text{pre}}(\xi) \right|$$

Current Previous
(N sampls.) (N-1 sampls.)

23



Summary of Sampling Criteria

✓ Criterion 1 [Dwight and Han 2009]

considers only **fit uncertainty**

✓ Criterion 2

considers only **gradient**

✓ Criterion 3

considers both **fit uncertainty** & **gradient**

✓ Criterion 4 (proposed)

adds an extra **error-estimate term** in criterion 3

24

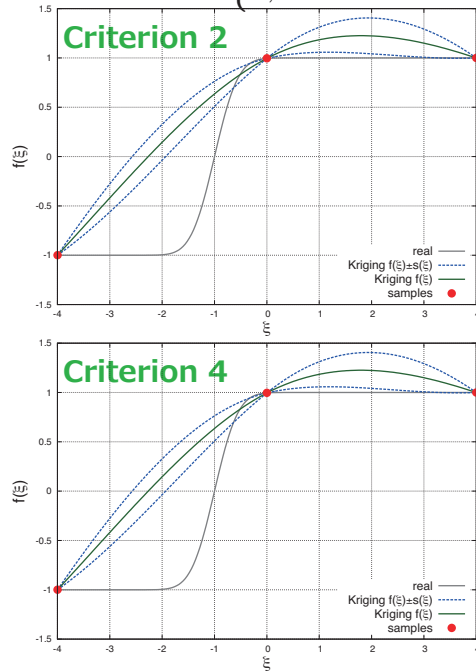
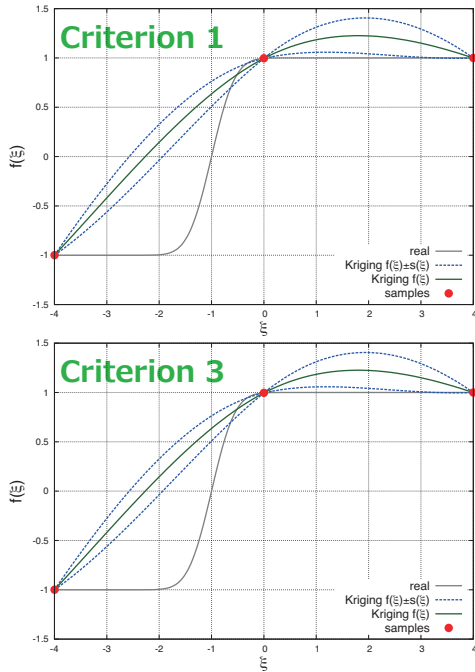


Numerical Tests (1D Funcs.)

3 samples
(evenly distributed)

$$f(\xi) = \text{erf}[2(\xi + 1)]$$

$$\text{PDF}(\xi) = \begin{cases} 1/8, & \text{if } -4 \leq \xi \leq 4, \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases}$$



25

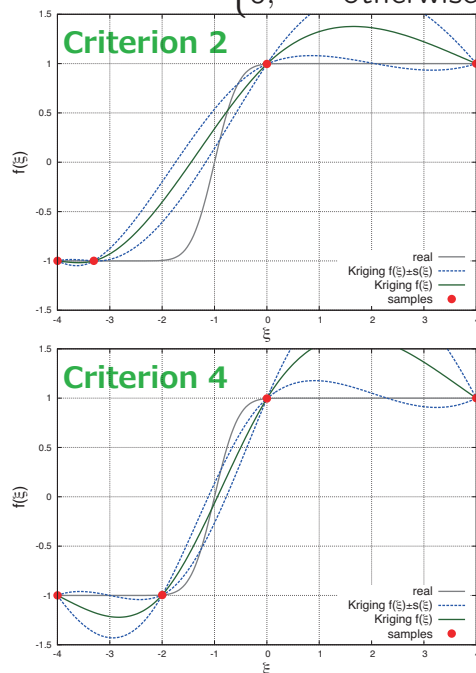
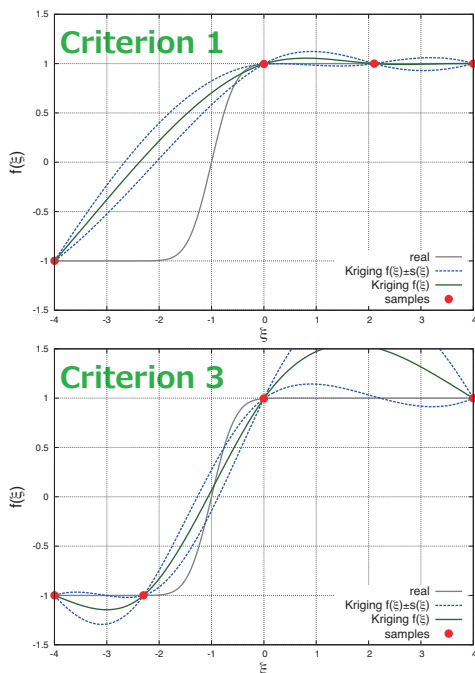


Numerical Tests (1D Funcs.)

4 samples

$$f(\xi) = \text{erf}[2(\xi + 1)]$$

$$\text{PDF}(\xi) = \begin{cases} 1/8, & \text{if } -4 \leq \xi \leq 4, \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases}$$



25

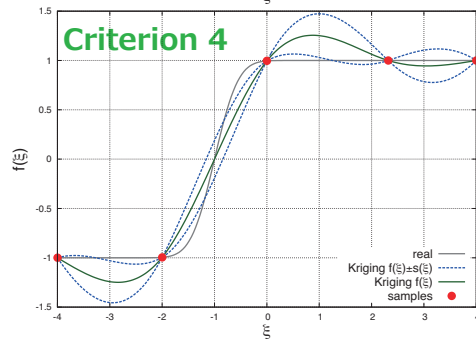
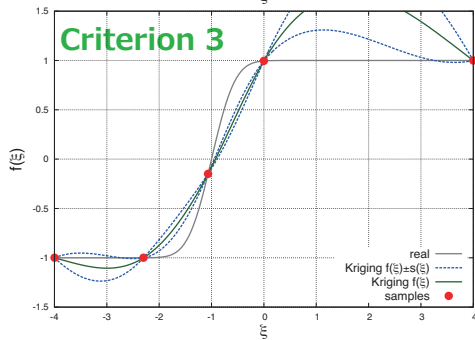
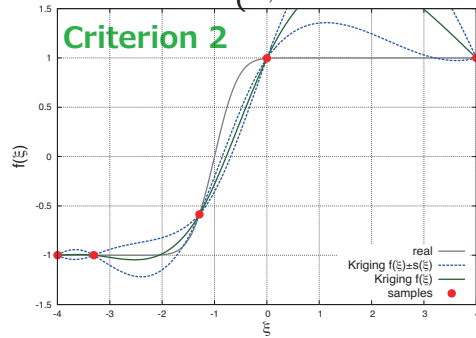
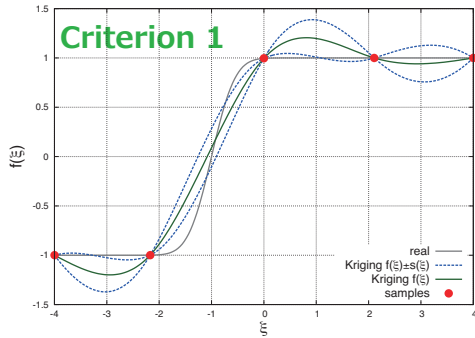


Numerical Tests (1D Funcs.)

5 samples

$$f(\xi) = \text{erf}[2(\xi + 1)]$$

$$\text{PDF}(\xi) = \begin{cases} 1/8, & \text{if } -4 \leq \xi \leq 4, \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases}$$



25

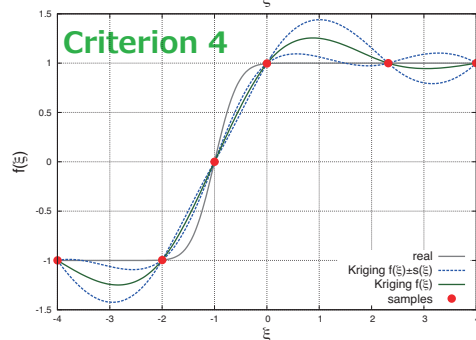
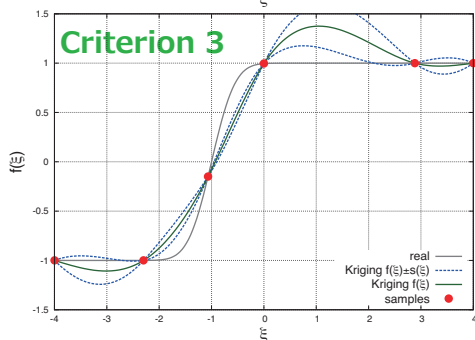
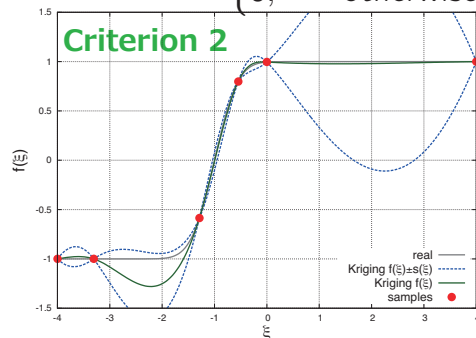
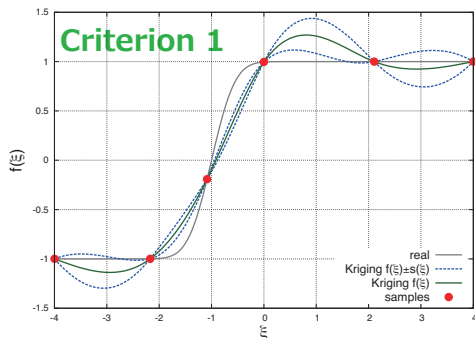


Numerical Tests (1D Funcs.)

6 samples

$$f(\xi) = \text{erf}[2(\xi + 1)]$$

$$\text{PDF}(\xi) = \begin{cases} 1/8, & \text{if } -4 \leq \xi \leq 4, \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases}$$



25

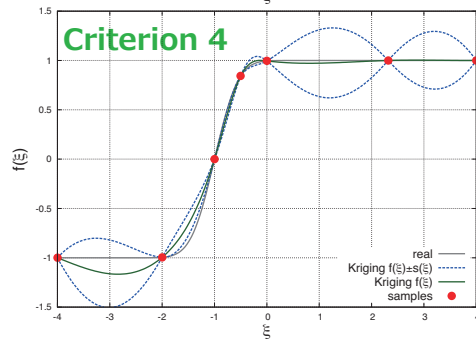
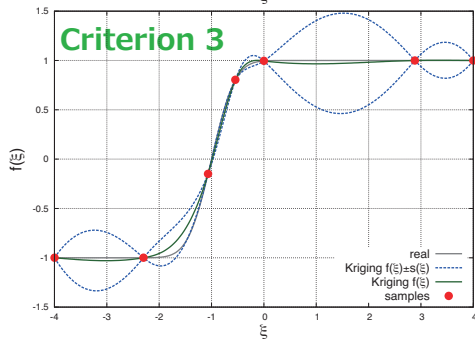
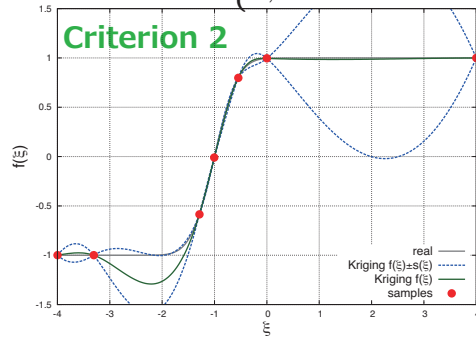
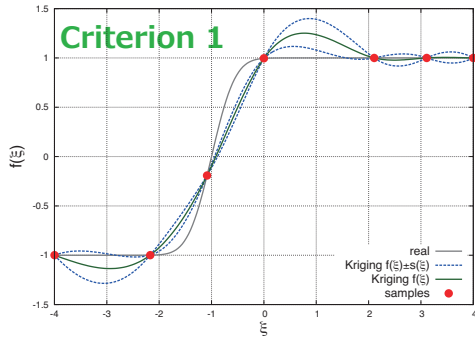


Numerical Tests (1D Funcs.)

7 samples

$$f(\xi) = \text{erf}[2(\xi + 1)]$$

$$\text{PDF}(\xi) = \begin{cases} 1/8, & \text{if } -4 \leq \xi \leq 4, \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases}$$



25

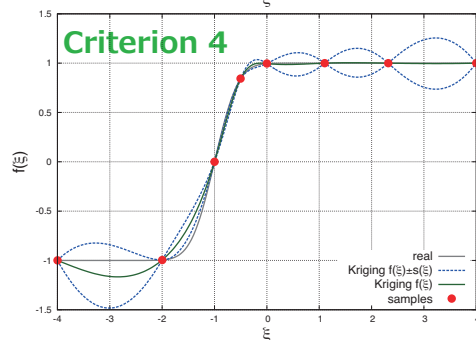
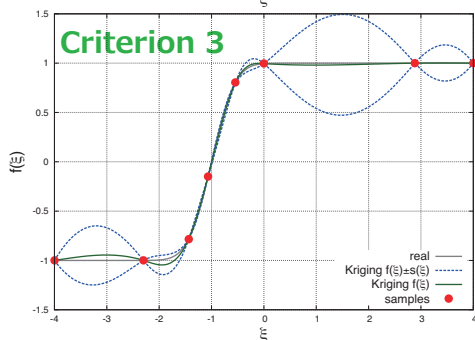
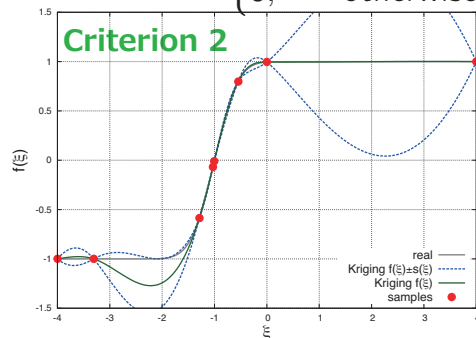
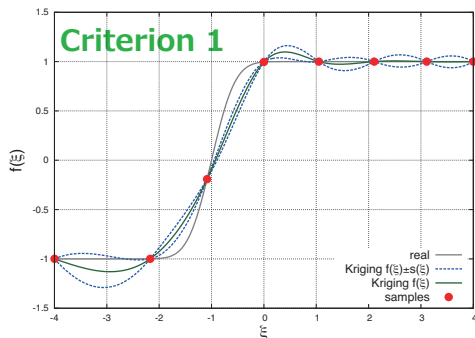


Numerical Tests (1D Funcs.)

8 samples

$$f(\xi) = \text{erf}[2(\xi + 1)]$$

$$\text{PDF}(\xi) = \begin{cases} 1/8, & \text{if } -4 \leq \xi \leq 4, \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases}$$



25

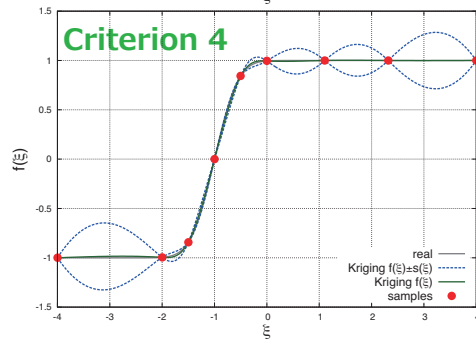
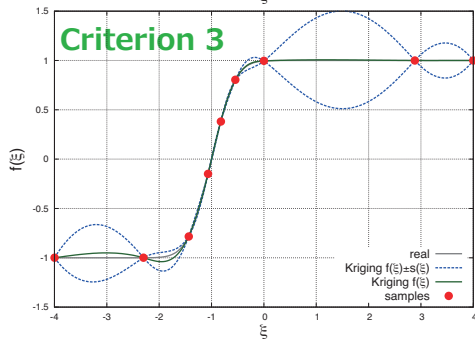
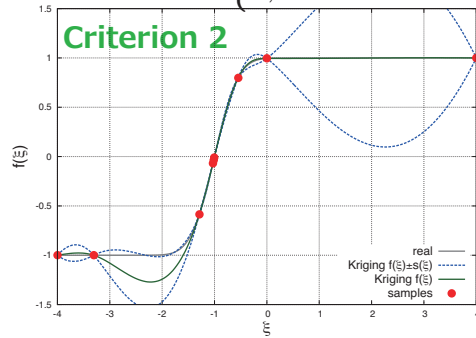
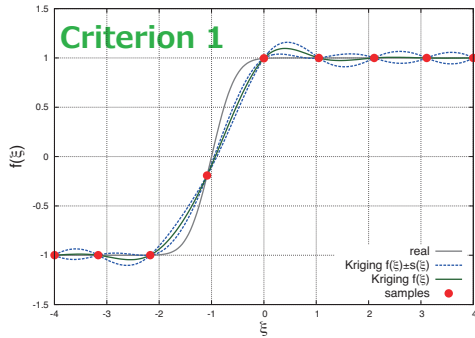


Numerical Tests (1D Funcs.)

9 samples

$$f(\xi) = \text{erf}[2(\xi + 1)]$$

$$\text{PDF}(\xi) = \begin{cases} 1/8, & \text{if } -4 \leq \xi \leq 4, \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases}$$



25

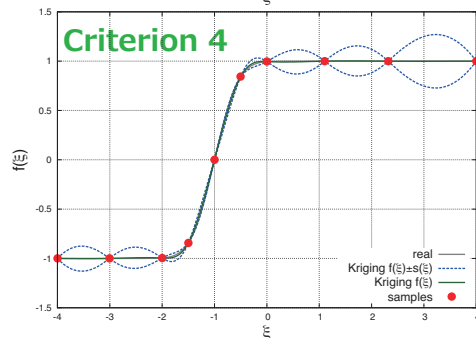
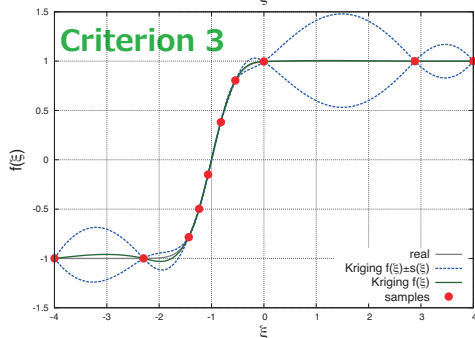
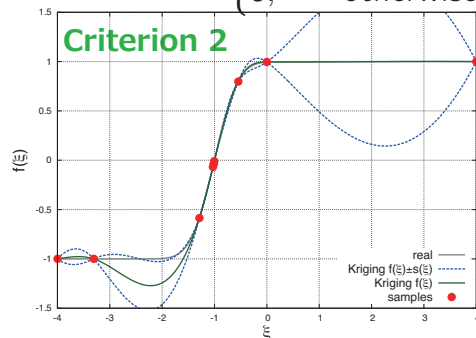
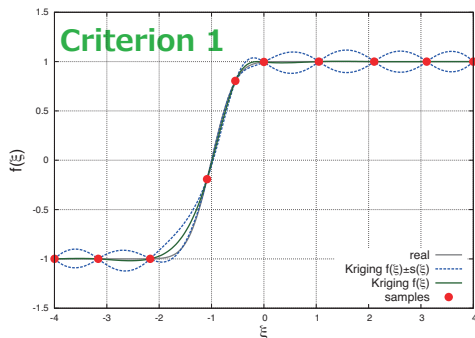


Numerical Tests (1D Funcs.)

10 samples

$$f(\xi) = \text{erf}[2(\xi + 1)]$$

$$\text{PDF}(\xi) = \begin{cases} 1/8, & \text{if } -4 \leq \xi \leq 4, \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

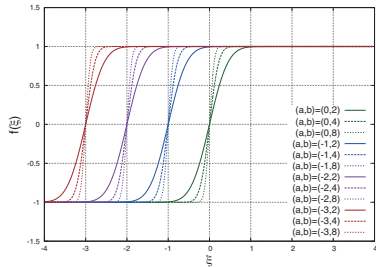


25



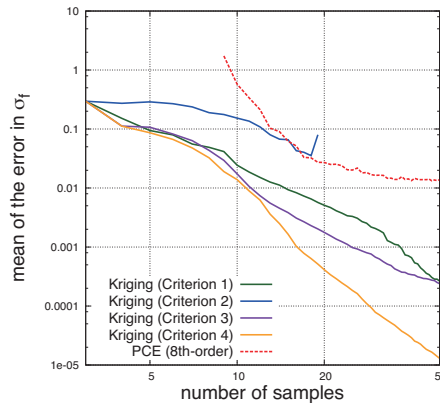
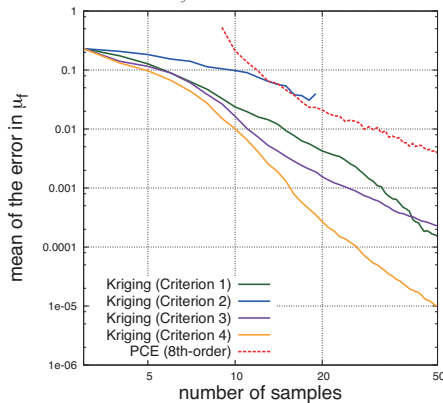
Numerical Tests (1D Funcs.)

Averaged on **30 trials from 3 initial samples (randomly generated)**
 in **all cases (4 pos x 3 grad)**



$$f(\xi) = \text{erf}[b(\xi - a)]$$

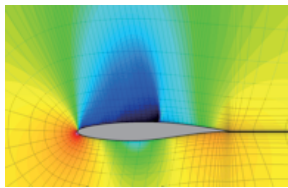
$$\text{PDF}(\xi) = \begin{cases} 1/8, & \text{if } -4 \leq \xi \leq 4, \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases}$$



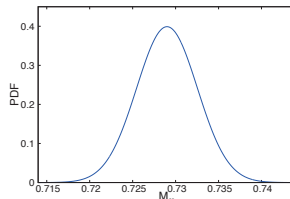
26



Application (Transonic Airfoil)

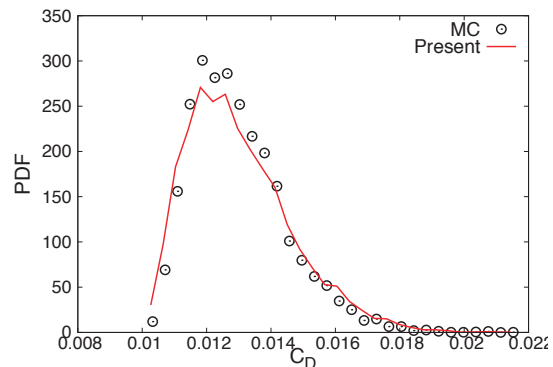
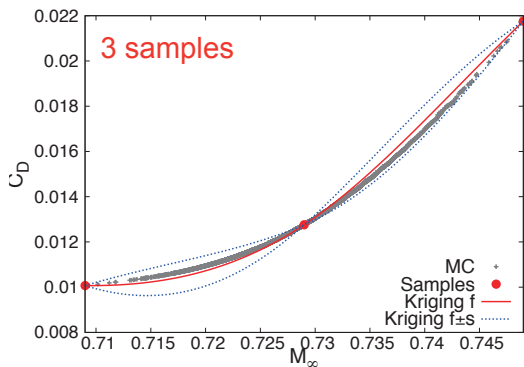


$$M_\infty = 0.729$$



$$\sigma_M = 0.005$$

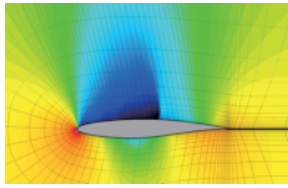
- 2D RANS (Baldwin-Lomax)
- $Re_c = 6.5 \times 10^6$
- $\alpha = 2.31$
- MC (10,000 pts.)



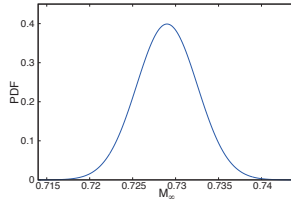
27



Application (Transonic Airfoil)

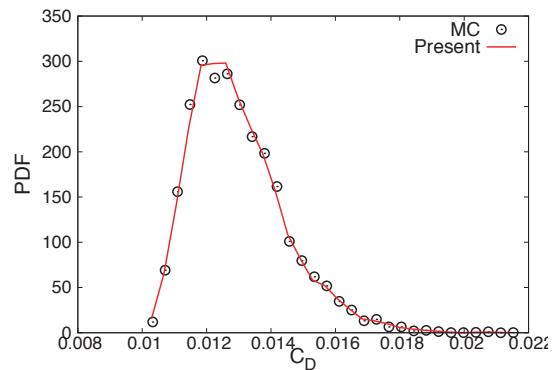
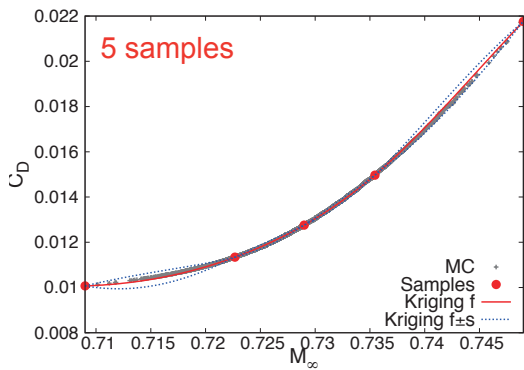


$M_\infty = 0.729$



$\sigma_M = 0.005$

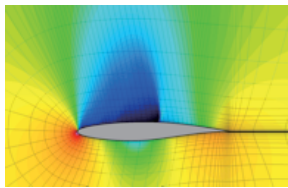
- 2D RANS (Baldwin-Lomax)
- $Re_c = 6.5 \times 10^6$
- $\alpha = 2.31$
- MC (10,000 pts.)



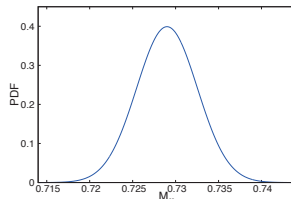
27



Application (Transonic Airfoil)

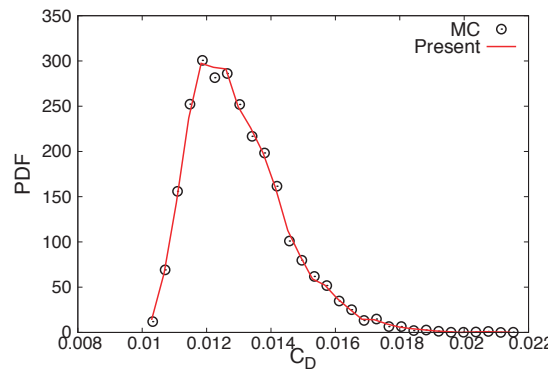
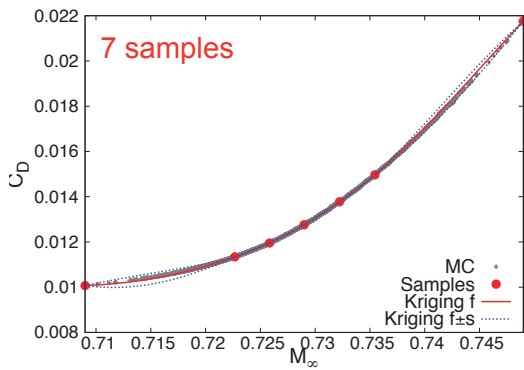


$M_\infty = 0.729$



$\sigma_M = 0.005$

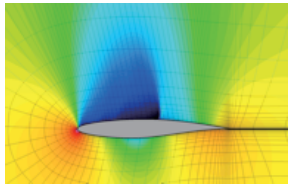
- 2D RANS (Baldwin-Lomax)
- $Re_c = 6.5 \times 10^6$
- $\alpha = 2.31$
- MC (10,000 pts.)



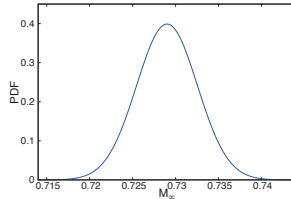
27



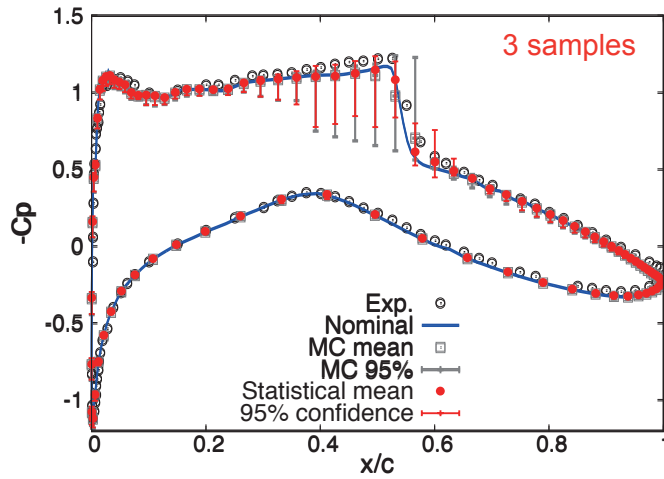
Application (Transonic Airfoil)



$M_\infty = 0.729$



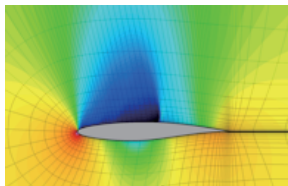
$\sigma_M = 0.005$



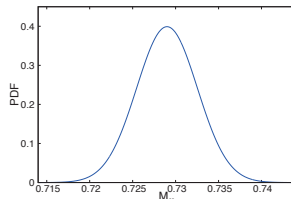
28



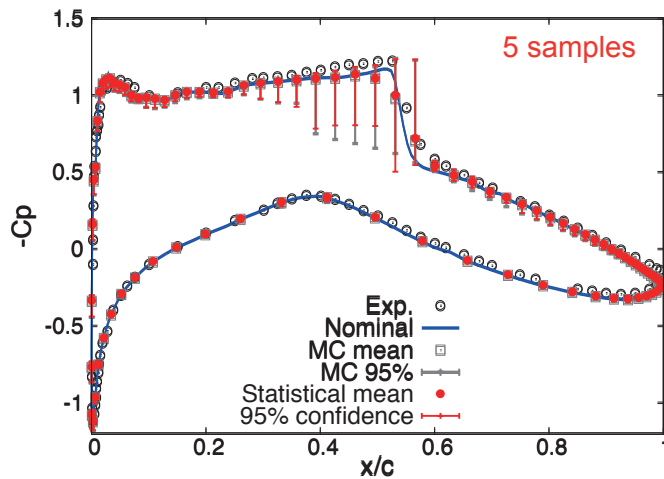
Application (Transonic Airfoil)



$M_\infty = 0.729$



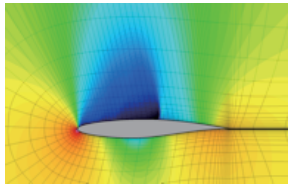
$\sigma_M = 0.005$



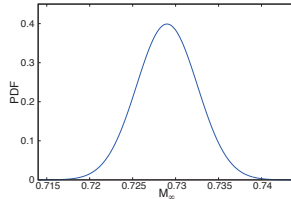
28



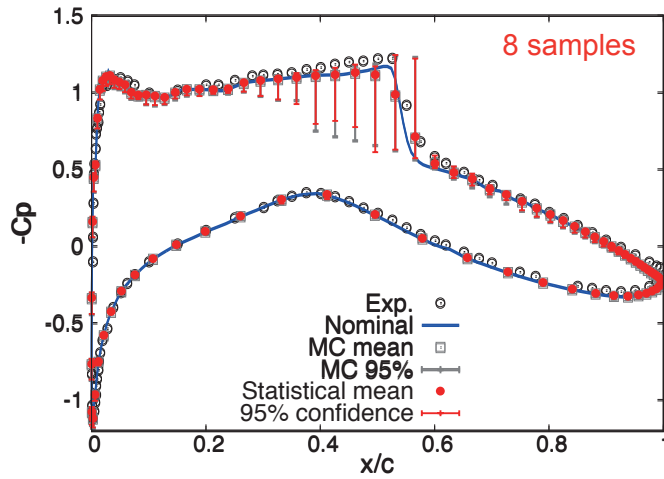
Application (Transonic Airfoil)



$M_\infty = 0.729$



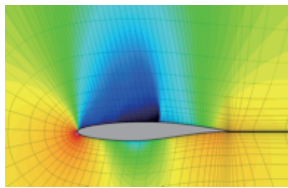
$\sigma_M = 0.005$



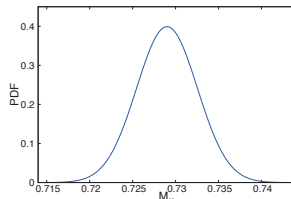
28



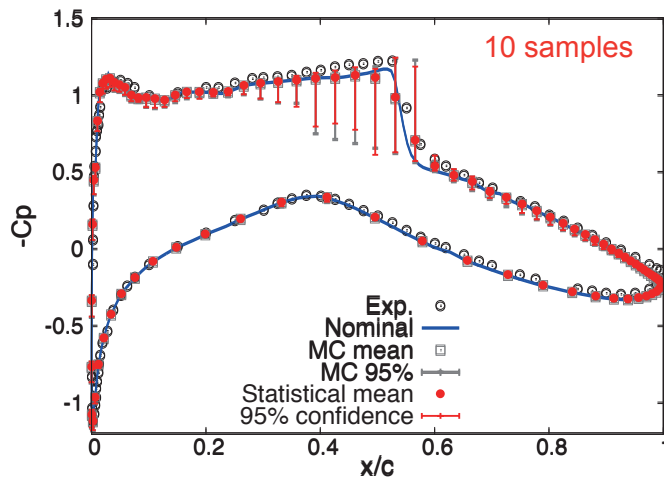
Application (Transonic Airfoil)



$M_\infty = 0.729$



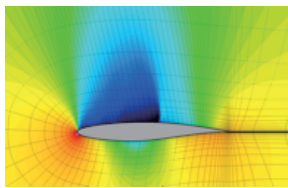
$\sigma_M = 0.005$



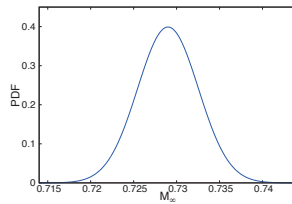
28



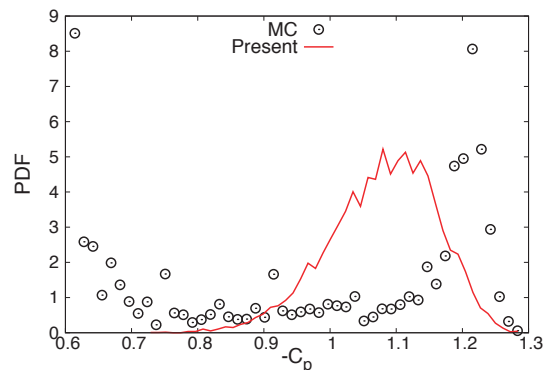
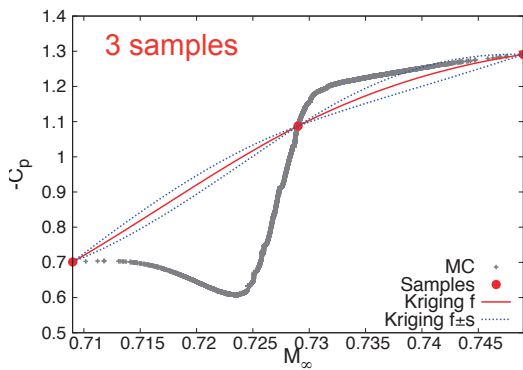
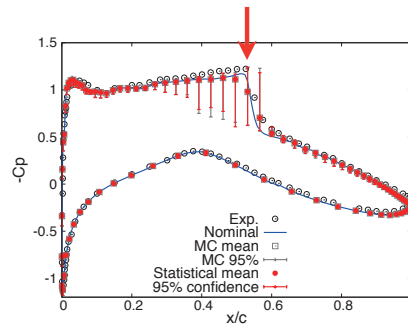
Application (Transonic Airfoil)



$M_\infty = 0.729$



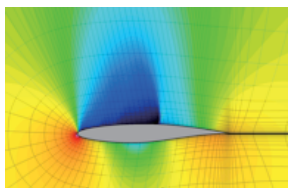
$\sigma_M = 0.005$



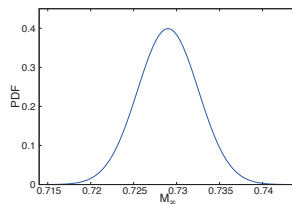
29



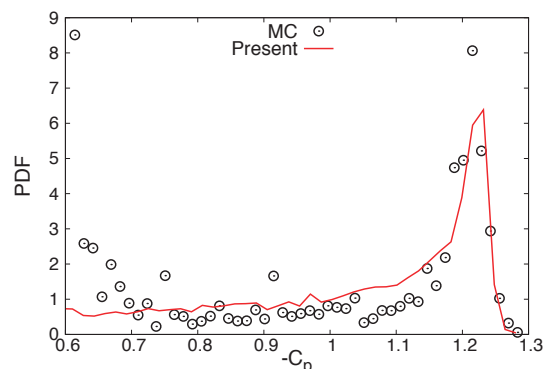
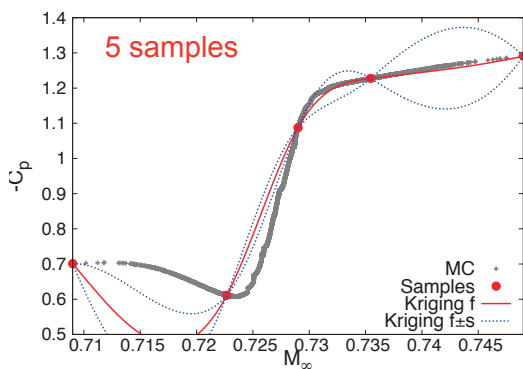
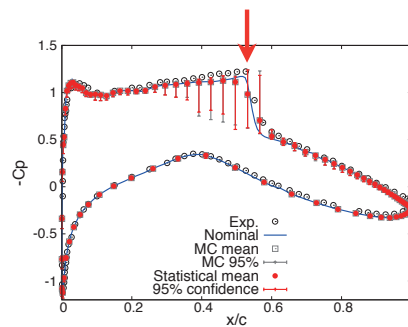
Application (Transonic Airfoil)



$M_\infty = 0.729$



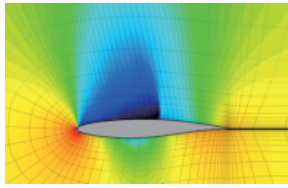
$\sigma_M = 0.005$



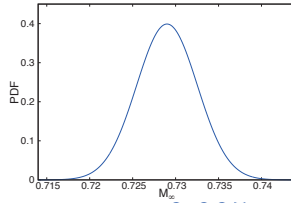
29



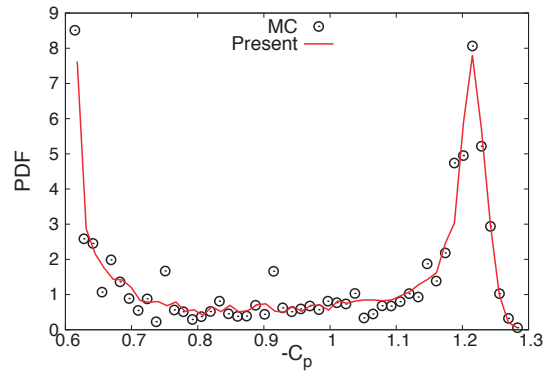
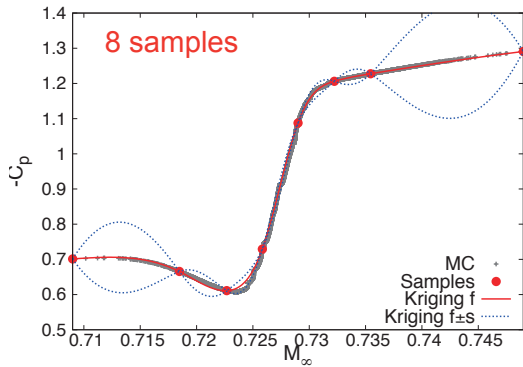
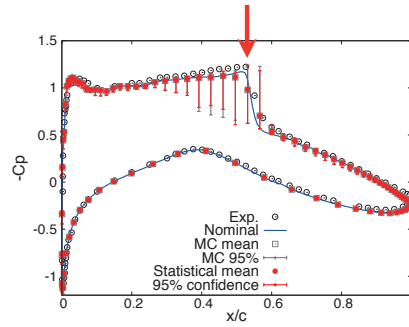
Application (Transonic Airfoil)



$M_\infty = 0.729$



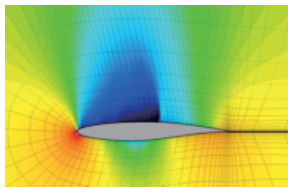
$\sigma_M = 0.005$



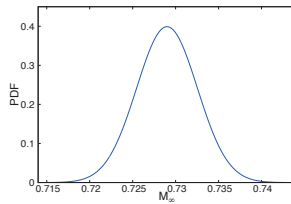
29



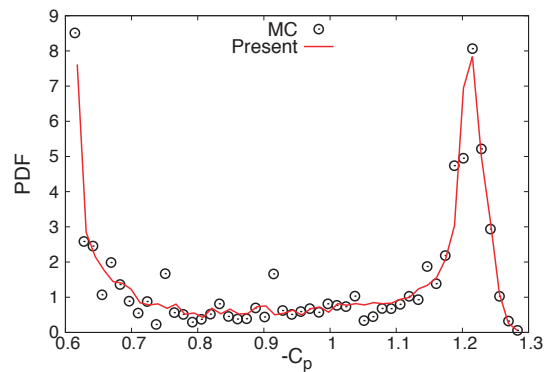
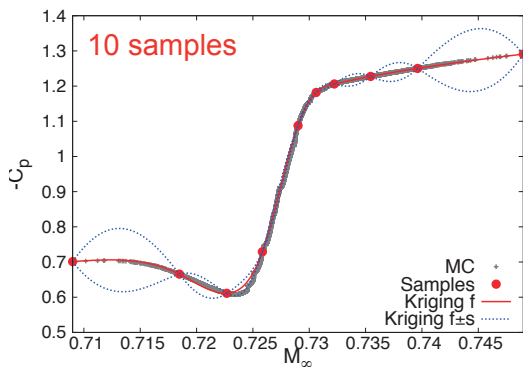
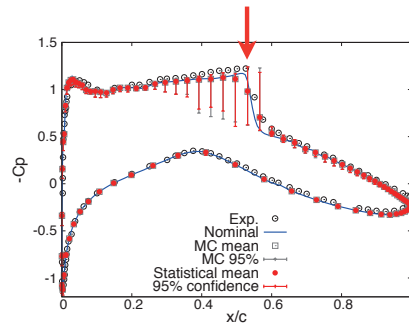
Application (Transonic Airfoil)



$M_\infty = 0.729$



$\sigma_M = 0.005$



29



Outline

✓ *Fundamentals of Uncertainty Quantification*

✓ *Research Topics*

● *Polynomial Chaos Expansion with Order Adjustment*

✦ *Prof. Shigeru Obayashi (Tohoku Univ.)*

✦ *Mr. Akihiro Inoue (Tohoku Univ.)*

✦ *JAXA/NSRG*



● *Dynamic Adaptive Sampling based on Kriging Surrogate Model*

✦ *Dr. Soshi Kawai (JAXA/ISAS)*

✦ *Prof. Juan J. Alonso (Stanford Univ.)*



✓ *Summary & Future Work*

30



Summary

✓ UQ is expected to contribute to the fields of simulation, physics, design, etc., but still has technical issues to be considered

✓ PCE can be well tuned through the order adjustment based on appropriate measures

✓ Kriging-based dynamic adaptive sampling can make UQ with discontinuity more effective

31



Future Work

- ✓ Challenges for the curse of dimensionality
- ✓ Application to real-world simulation and design
- ✓ Contribution to EFC/CFD integration

32



Acknowledgments



- ✓ *Young Researcher Overseas Visits Program for Vitalizing Brain Circulation*
- ✓ *Grant-in-Aid for Young Scientists (B)*



- ✓ *International Top Young Fellowship Program*

33

第6回EFD/CFD融合ワークショップ
The 6th Workshop on Integration of EFD and CFD



非線形領域におけるEFDと 飛行シミュレーションの融合

*Integration of EFD and Flight Simulation in
Nonlinear Flight Regimes*

東北大学 航空宇宙工学専攻

浅井圭介

平成26年1月30日

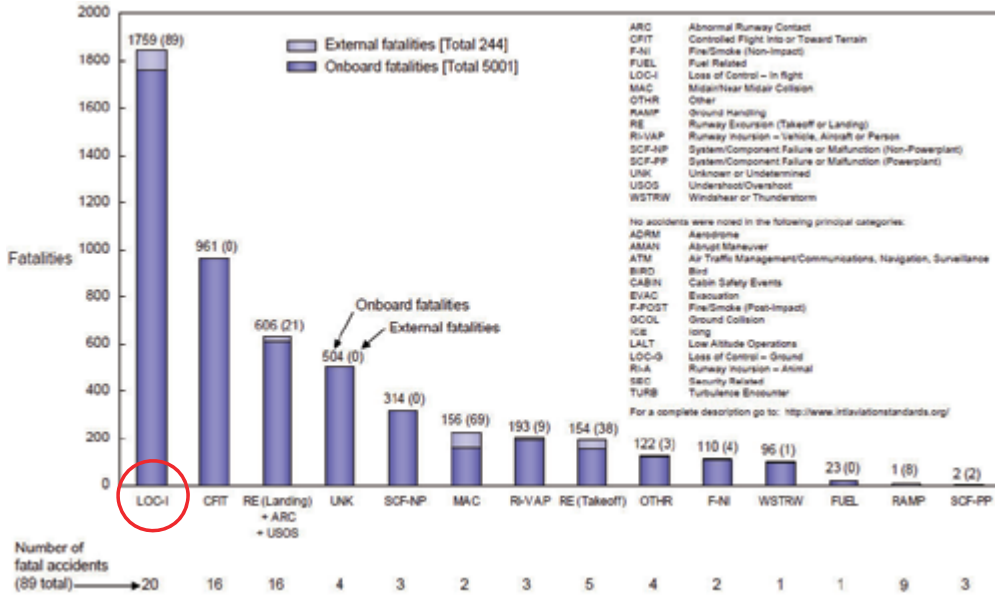
秋葉原コンベンションホール

目的

非線形領域における飛行シミュレーション技術を構築するために、実験流体(EFD)、計算流体(CFD)、ロボット技術(RT)が連携して取り組んでいる研究活動の現状と課題について考える。

- 研究背景
 - LOC-I, Upset Recovery, Post Stall運動
- 非定常空力現象とそのモデリング
- 新しい取り組み
 - 6-DoF ロボットマニピュレータ
 - Hybrid Simulation
 - 計測融合シミュレーション
- 今後の展開

背景：LOC-I (Loss of Control in Flight)



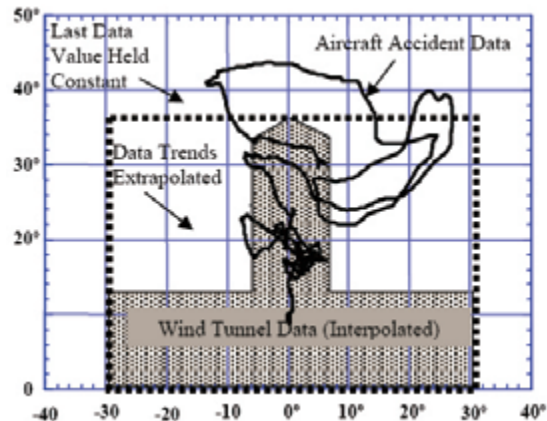
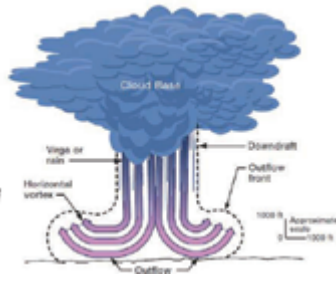
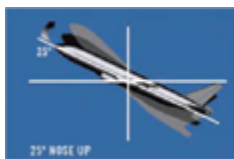
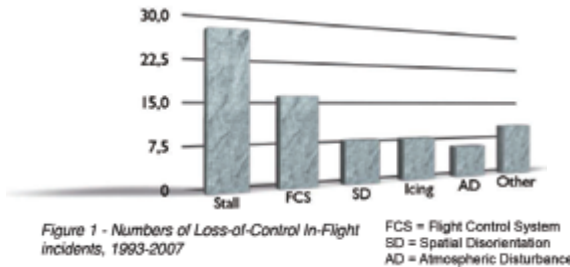
※ 出典：Boeing Commercial Airplanes, Statistical Summary of Commercial Jet Airplane Accidents, Worldwide Operations 2000 – 2009

背景：LOC-I (Loss of Control in Flight)

<原因> 失速, 自動操縦装置, パイロットエラー, 着氷, 大気乱気流, ダウンバースト, 後方乱気流...

Upset (異常飛行姿勢) 運動

ピッチ角：+20度以上 (機首上げ)
-10度以下 (機首下げ)
バンク角：45度以上



Foster, et al (2005) AIAA-2005-5908

背景：海外の動き

SUPRA – *Simulation of UPset Recovery in Aviation* – is a collaborative research project funded by the 7th Framework Programme of the European Union, under the 2nd Transport and Aeronautics Call (3 years, Oct 2009 – Sep 2012, € 4.3M)



VSST-Vehicle Systems Safety Technologies (VSST) Project, NASA's Aviation Safety Program(AvSP)



- 1.) Improve crew decision-making under complex situations (**CDM**)
- 2.) Maintain vehicle safety between major inspections (**MVS**)
- 3.) Assure safe and effective control under hazardous conditions (**ASC**)

背景：無人航空機(UAV)の問題

<要求>

- ハザードエリアでの運用 (悪天候, 乱気流, 火災, 火山等)
- 高機動マニューバ
- 垂直離着陸時の遷移飛行

→ 「自律飛行」が求められる

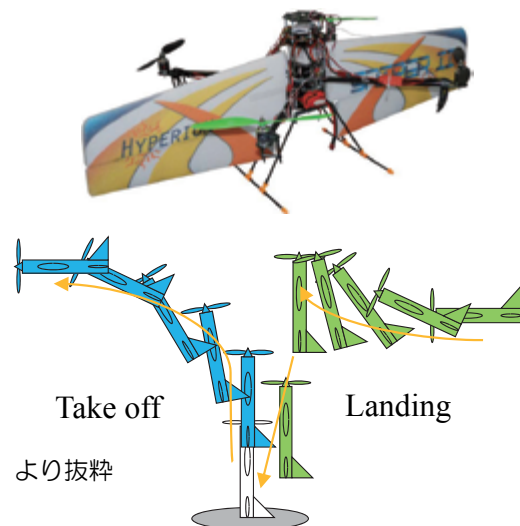
<無人飛行機の事故率>

(10000飛行時間あたりの回数)

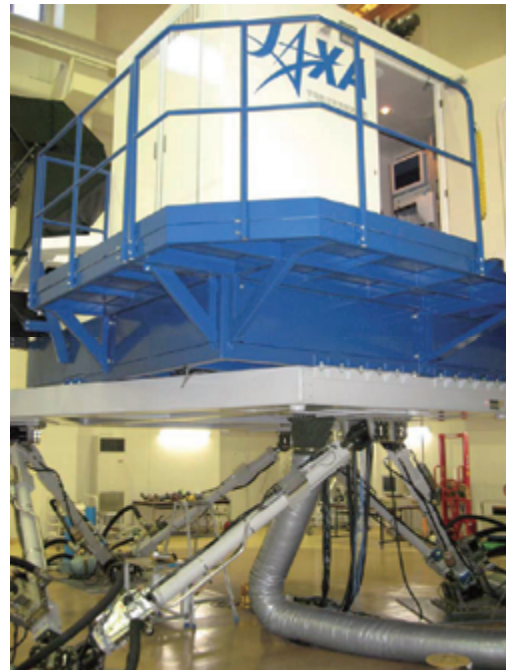
- 旅客機：0.163
- 自家用機：6.63
- 無人機：20-281

→ 旅客機に比べ約**1000倍**高い

※「次世代航空機からみた無線通信」(2012 泉耕二氏)より抜粋



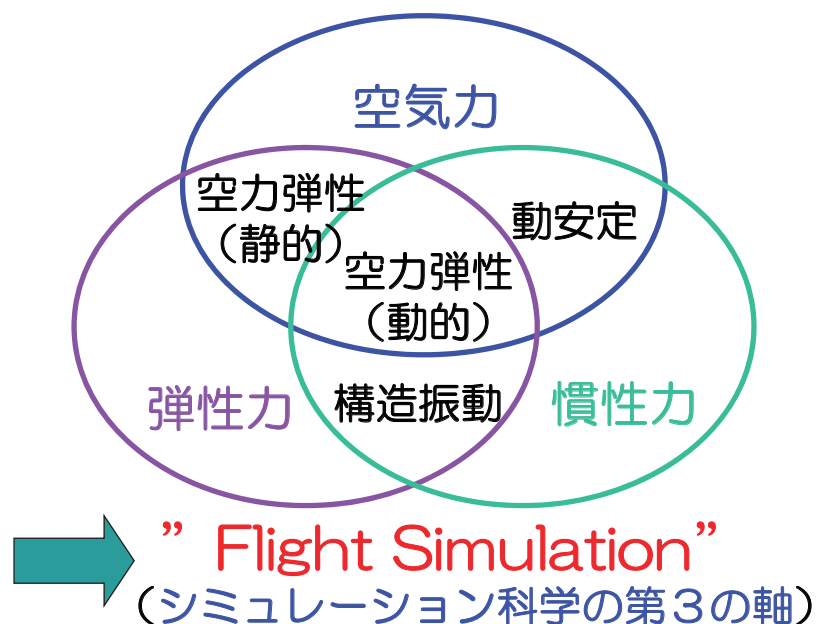
飛行運動のシミュレーション



- 飛行試験
 - フライトシミュレータ
- データ供給：
- EFD（動的風洞実験）
 - CFD（デジタルフライト）

航空機の運動解析

- 空気力, 重力 → 定常飛行、静安定
- 空気力, 重力 + 慣性力（剛体） → 動的安定性（Dynamics Stability）
- 空気力, 重力, 慣性力 + 弾性力 → 空力弾性（Aeroelasticity）

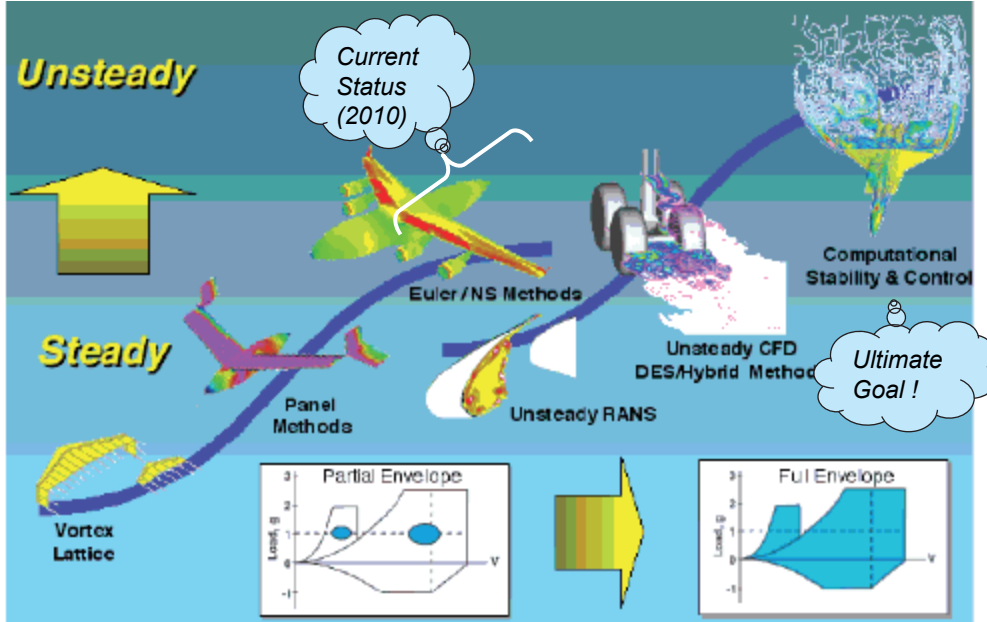


Digital Flight Dynamics

- NASA Langley Research Center -

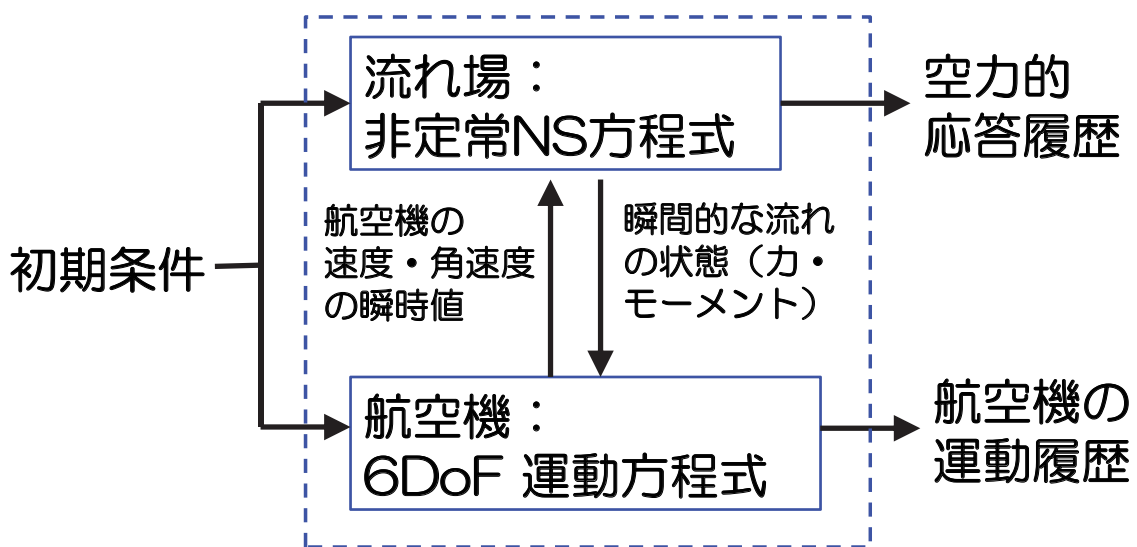


An ability to simulate in a computer a flight maneuver satisfying the governing flow equations, the aircraft aeroelastic characteristics, the 6-DOF equations, the flight control system, and the propulsion system.



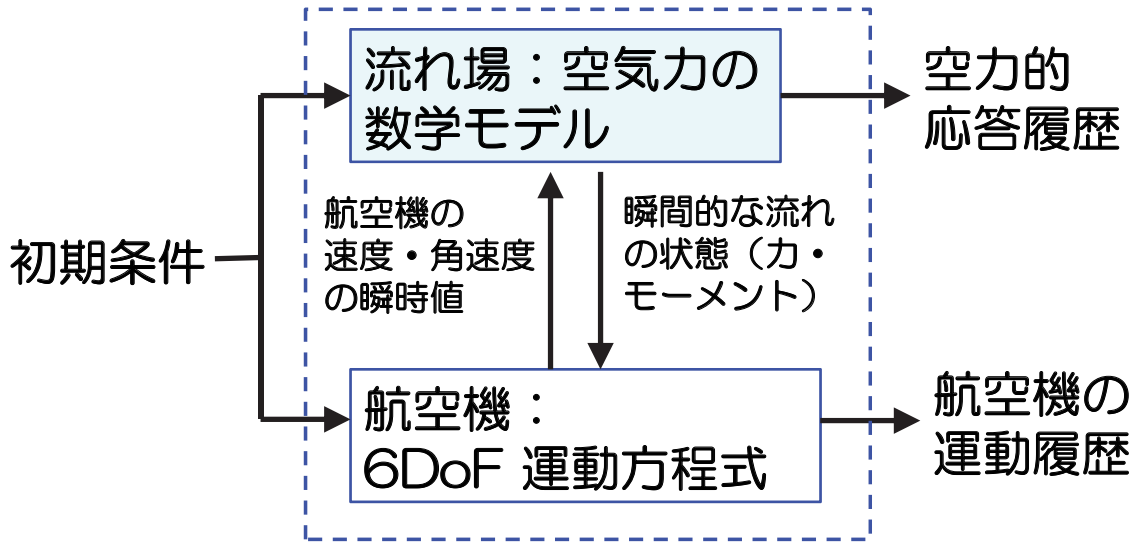
AIAA 2007-6573, J. J. Chung, et al. "Development and Assessment of CFD Methods for Integrated Simulation of Air Vehicle Stability and Control"

飛行シミュレーション - 理想的なアプローチ -



完全なカップリング → 現状では難しい

飛行シミュレーション - 数学モデルを使うアプローチ -



数学モデル → 「基本運動」に対する実験・理論

航空機の運動方程式

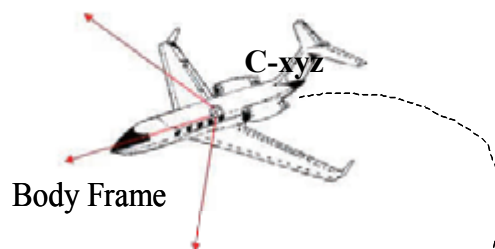
基準座標系

- ・慣性座標系 (Inertia Frame) O-XYZ系 (Fixed)
- ・機体座標系 (Body Frame) C-xyz系, 回転角速度: ω (P,Q,R)

ニュートンの運動方程式

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{F} &= m \frac{d\mathbf{V}_C}{dt} \\ \mathbf{M} &= \frac{d\mathbf{H}}{dt} \end{aligned} \right\} \text{慣性系}$$

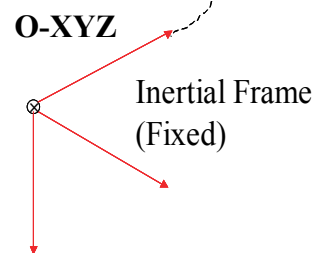
(注) 剛体と仮定する



V_C は重心速度, H は角運動量 (angular momentum)

●運動方程式 (機体座標系, C-xyz)

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{F} &= m \frac{d\mathbf{V}_C}{dt} = m \frac{\delta \mathbf{V}_C}{\delta t} + m(\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{V}_C) \\ \mathbf{M} &= \frac{d\mathbf{H}}{dt} = \frac{\delta \mathbf{H}}{\delta t} + (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{H}) \end{aligned} \right\} \text{機体座標系}$$



航空機の運動方程式

● **並進の運動方程式**

$$m(\dot{U} + QW - RV) = -mg \sin \Theta + F_{Ax} + F_{Tx}$$

$$m(\dot{V} + RU - PW) = mg \sin \Phi \cos \Theta + F_{Ay}$$

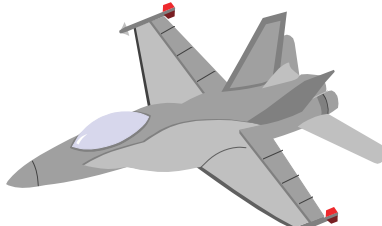
$$m(\dot{W} + PV - QU) = mg \cos \Phi \cos \Theta + F_{Az} + F_{Tz}$$

● **回転の運動方程式**

$$\dot{P}I_{xx} + QR(I_{zz} - I_{yy}) - (\dot{R} + PQ)I_{xz} = L$$

$$\dot{Q}I_{yy} - PR(I_{zz} - I_{xx}) + (P^2 - R^2)I_{xz} = M$$

$$\dot{R}I_{zz} + PQ(I_{yy} - I_{xx}) + (QR - \dot{P})I_{xz} = N$$



空気力 (F_{Ax}, F_{Ay}, F_{Az})
 モーメント (L, M, N)
 推力 (F_{Tx}, F_{Tz})
 角速度 (P, Q, R)
 オイラー角速度 (φ, θ, ψ)
 慣性モーメント (I_x, I_y, I_z, \dots)

極めて**非線形性**が強い

- (1) 方程式を線形化する (**微小擾乱理論**)
- (2) 空気力による力・モーメントを各変数の関数として表現 (**Bryanの方法**)
 - ※ **動安定微係数 (Dynamic Stability Derivative)** または**安定微係数**

➡ 飛行運動の**モード**を調べることが可能になる。

空気力の線形化—安定微係数 (Stability Derivative)

空気力学的な力（モーメント）が、外乱によって生じる速度，加速度，角速度，角加速度の関数であるとして，テーラー級数に展開し，2次以上の高次項がすべて無視できると仮定する。例えば，

$$\Delta X = \frac{\partial X}{\partial u} u + \frac{\partial X}{\partial \dot{u}} \dot{u} + \frac{\partial X}{\partial v} v + \frac{\partial X}{\partial \dot{v}} \dot{v} + \dots + \frac{\partial X}{\partial r} r + \frac{\partial X}{\partial \dot{r}} \dot{r}$$

$$= X_u u + X_{\dot{u}} \dot{u} + \dots + X_r r + X_{\dot{r}} \dot{r}$$



George H. Bryan
(1864-1928)

このときの微係数のことを，**安定微係数 (Stability Derivative)** と呼ぶ。定常飛行状態の数値を用いる。

このままでは，冗長で扱いが困難→実際の飛行条件を考慮して簡略化する。

- (1) 対称面内の運動：常に $Y = L = N = 0$ 。これらの微係数は全て0。
- (2) 非対称面内の運動：対称面内の力・モーメント (X, Z, M) に対する微係数を無視。
- (3) 加速度による微係数： M_v, Z_v を除き小さいとして無視する。
- (4) その他， X_q など，物理的に小さいと予想される微係数を無視する。

安定微係数の限界—Tobakによる考察 AGARD LS-114 (1981)

Bryan理論の仮定：

- (1) 空気力はその瞬間の運動変数のみに依存する。
- (2) 空気力は運動変数の線形関数で与えられる。

$$C_m(t) = C_m(\delta(t), q(t))$$

$$C_m(t) = C_{m_0} + \delta(t) \left(\frac{\partial C_m}{\partial \delta} \right)_{\substack{\delta=0 \\ q=0}} + q(t) \frac{l}{V} \left(\frac{\partial C_m}{\partial \left(\frac{ql}{V} \right)} \right)_{\substack{q=q \\ \delta=0}}$$

履歴の効果が
まったく考慮
されていない

Tobakによる改良：

- (1) 空気力は運動変数（関数）の関数として表される。
- (2) 任意の運動は基本運動の「Indicial関数」の畳み込みで表現できる。

$$C_m(t) = G[\delta(\varepsilon), q(\varepsilon)]$$

$$C_m(t) = C_m(0) + \int_0^t C_{m_\delta}(t - \tau; \delta(\tau), q(\tau)) \frac{d}{d\tau} \delta(\tau) d\tau + \frac{l}{V} \int_0^t C_{m_q}(t - \tau; \delta(\tau), q(\tau)) \frac{d}{d\tau} q(\tau) d\tau$$

動安定風洞試験— 理論的背景

任意の運動は基本運動の「Indicial関数」の畳み込みで表現できる

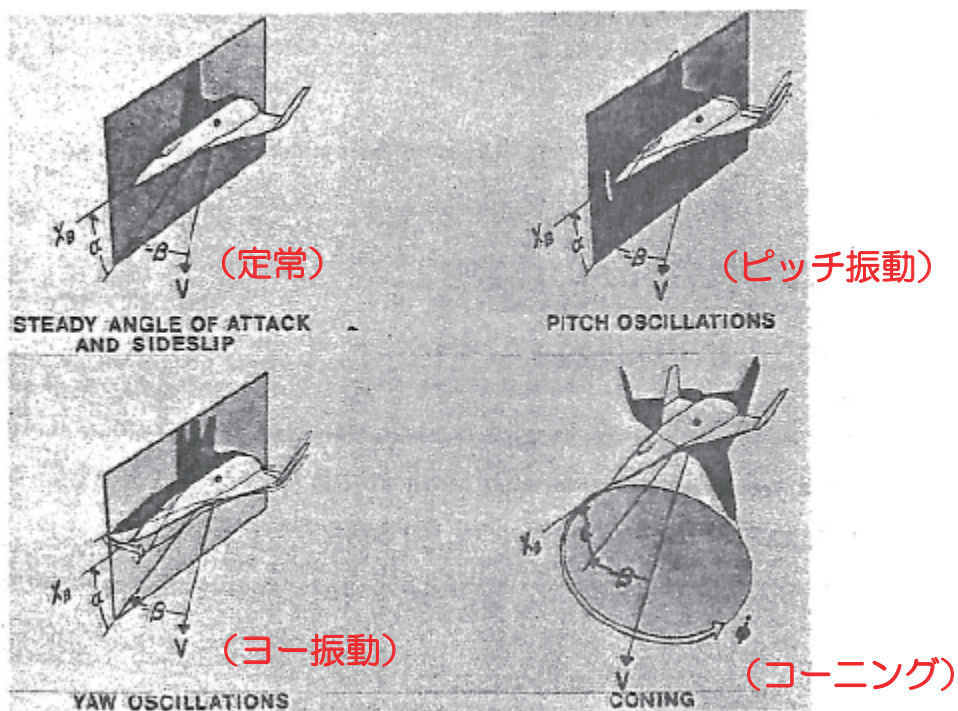
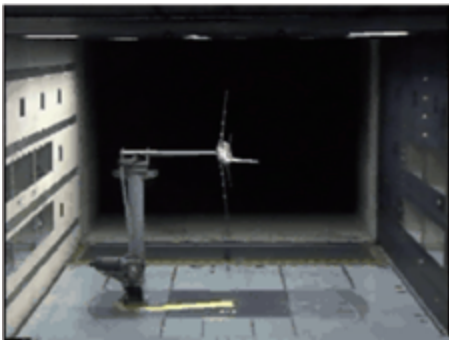
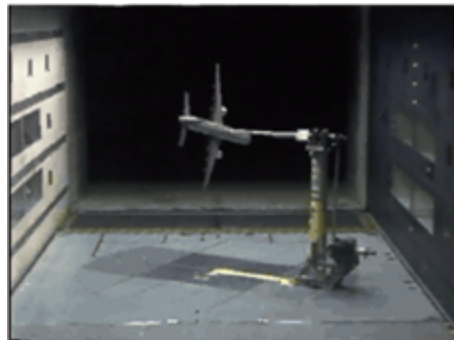


Figure 15. Characteristic motions in the body axis system. Linear dependence on angular rates

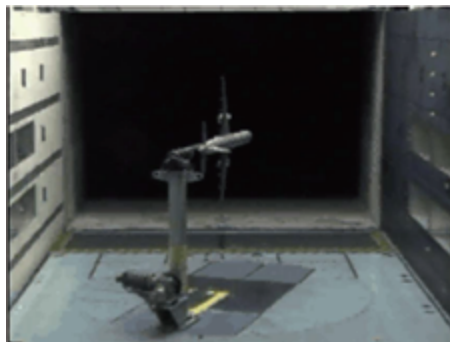
動的風洞試験(強制加振法)



Pitch



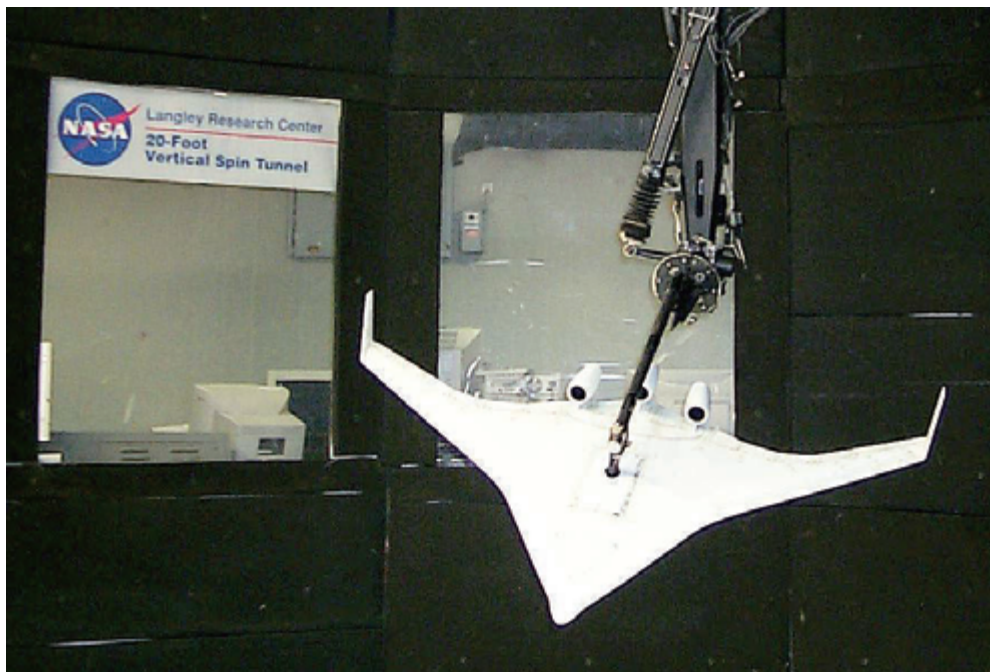
Yaw



Roll



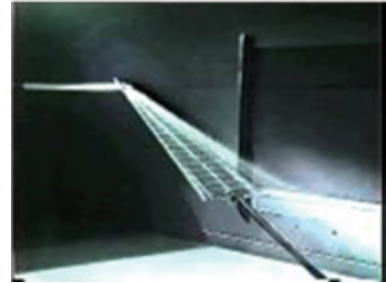
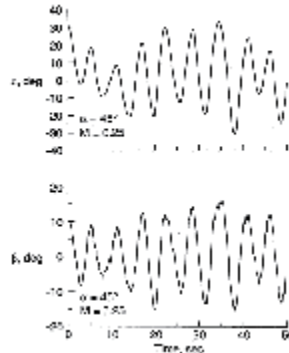
Blended Wing Bodyの垂直風洞試験



http://wte.larc.nasa.gov/images/facilities/flight_dynamics/20ft_spin_test.jpg

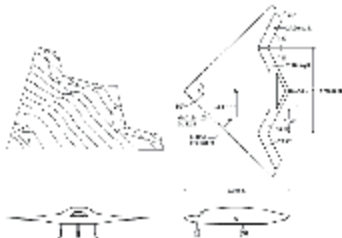
高迎角飛行 (Wing Rock & Dynamic Stall)

F-18 High Alpha Research Vehicle (HARV)

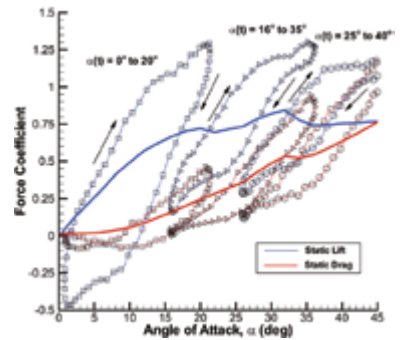
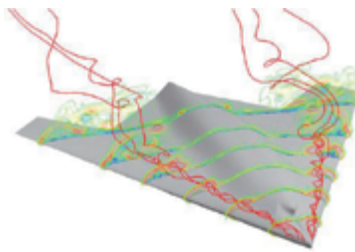


Nelson et al (1991)

Boeing 1301 UCAV

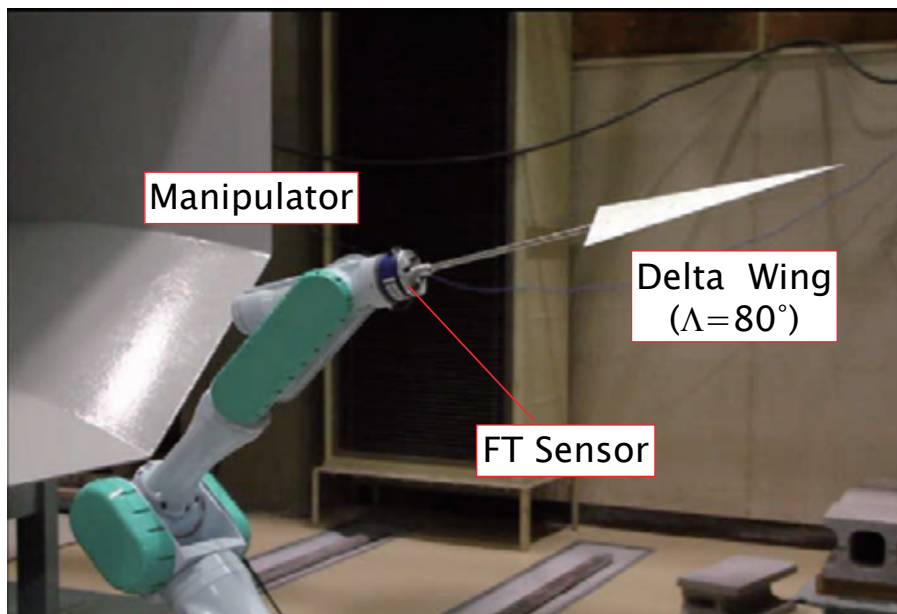


Cummings et al (2007)

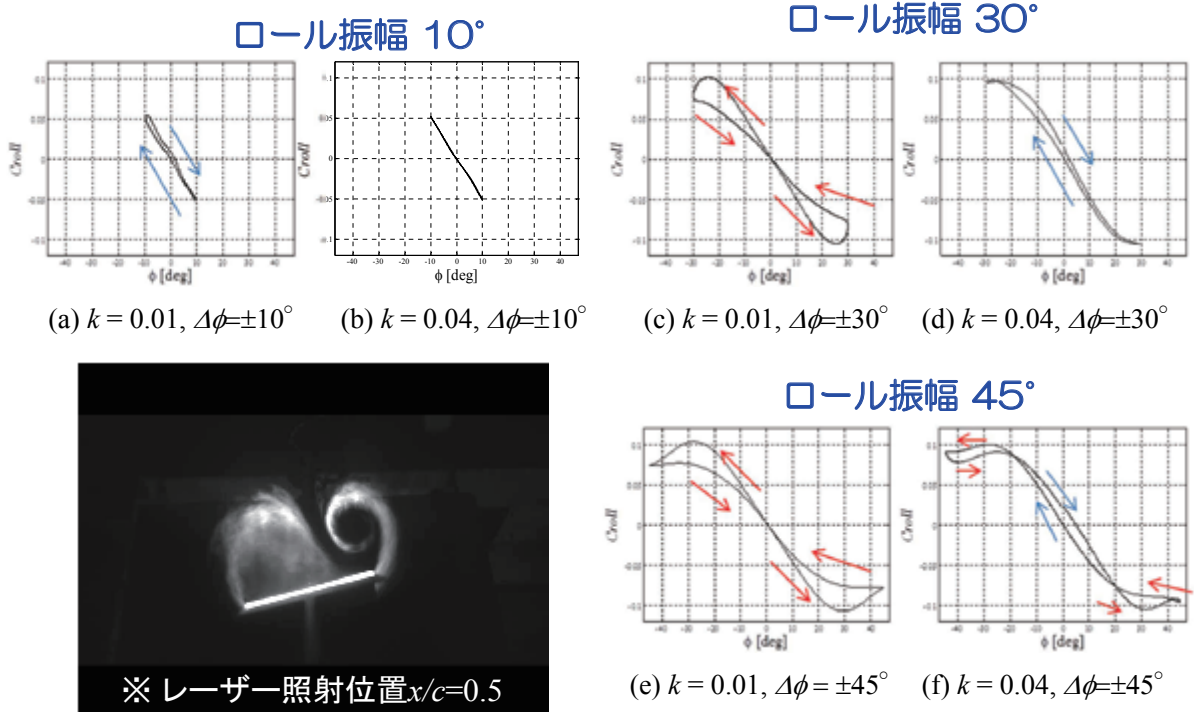


デルタ翼の強制ロール振動 (東北大)

($\alpha=35\text{deg}$, $\Delta\phi=30\text{deg}$, $k=0.01$)



デルタ翼に働くローリングモーメントに対する無次元周波数と振幅の影響 ($\alpha=35^\circ$)



非定常空力モデル

D. I. Greenwell; A Review of Unsteady Aerodynamic Modeling for Flight Dynamics of Maneuverable Aircraft (AIAA 2004-5276)

I. Introduction

II. Conventional “Unsteady” Modeling

III. Frequency-Dependent Aerodynamic Modeling

Frequency-Dependent Derivatives

IV. Linear Modeling of Time-Dependence

Aerodynamic Transfer Functions

State-Space Modeling

Linear Indicial Response

V. Nonlinear Time-Dependent Modeling →

Nonlinear Indicial Response

Fourier Functional Analysis

Volterra Series

Nonlinear Differential Equations

非線形領域は
まだまだ手つかずの
研究領域

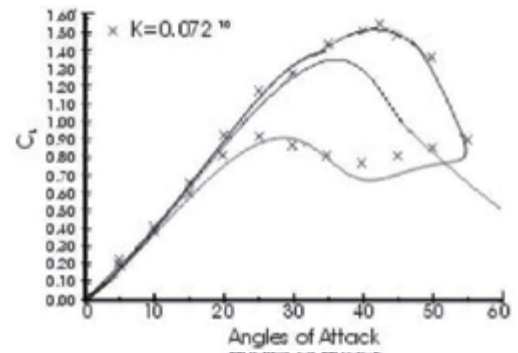
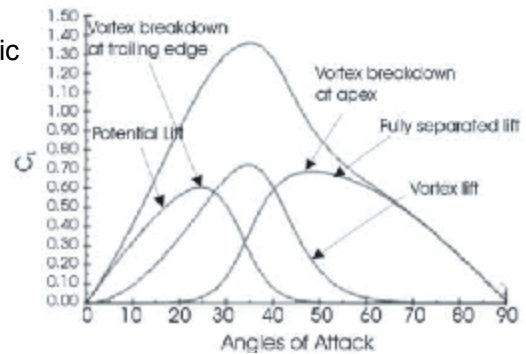
非定常空力モデルの一例

◆デルタ翼のDynamic Stall

Christopher et al, Modeling of Unsteady Aerodynamic Characteristics of Delta Wings (ICAS 2002)

$$\begin{aligned}
 C_L &= C_{L0} + K_p \cdot x_1 \cdot \cos^2 \alpha \cdot \sin \alpha + \\
 &K_v \cdot x_2^2 \cdot \sin^2 \alpha \cdot \cos \alpha + K_\beta \cdot (1 - x_2) \cdot \cos^2 \alpha \cdot \sin \alpha \\
 C_N &= x_3 \cdot K_p \cdot \cos \alpha \cdot \sin \alpha + (1 - x_3) \cdot C_{Df} \cdot \sin \alpha \\
 &+ x_4 \cdot \left(1 - K_p + \frac{K_v}{\cos \Lambda_{LE}} \right) \cdot \frac{K_p}{\cos \Lambda_{LE}} \cdot \sin^2 \alpha \\
 C_D &= x_3 \cdot K_p \cdot \cos \alpha + C_{Df} \cdot (1 - x_3) \\
 &+ x_4 \cdot \left(1 - K_p + \frac{K_v}{\cos \Lambda_{LE}} \right) \cdot \frac{K_p}{\cos \Lambda_{LE}} \cdot \sin \alpha - \\
 &K_p \cdot x_1 \cdot \cos^3 \alpha - K_v \cdot x_2^2 \cdot \sin \alpha \cdot \cos^2 \alpha \\
 &+ K_\beta \cdot (1 - x_2) \cdot \cos^3 \alpha \\
 \tau_1 \cdot \frac{\partial x}{\partial t} + x &= x_0(\alpha) \\
 x_0(\alpha) &= \frac{1}{1 + e^{\sigma(\alpha - \alpha')}}
 \end{aligned}$$

Time Dependency



Different time constant for the different input

EFD/飛行シミュレーション融合 (現状)

<目的> 非線形領域の飛行を模擬する
動的風洞実験技術 (DWT) の構築

実験流体 (EFD) + 計算流体 (CFD) + ロボット技術 (RT)

- 6DoF ロボットマニピュレータの開発
- Hybrid Simulation 東北大学 内山研
- 計測融合シミュレーション
 - 東北大学 大林/下山/三坂研
 - 東京大学 今村研

動的風洞実験 (DWT)

◆ 線形領域におけるDWT (従来)

- Pitch, Yaw, Rollの**1自由度**運動+**微小振幅**における強制加振試験

◆ 非線形領域におけるDWT

- 極限的な飛行領域では運動は基本的に**多自由度**
Rolling/Yawing, Pitching/Heavingなどを組み合わせた運動
- 空気力の**周波数や振幅**に対する依存性を評価

多自由度のロボットを利用した動的風洞試験が有効

(例)

- 鳥取大：リンク機構
- DLR/DNW：直動平行機構
“Model Positioning Mechanism (MPM)”



鳥取大



DLR/DNW

6自由度ロボットマニピュレータ

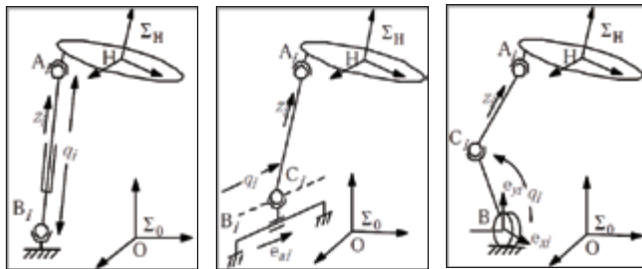
(要求)

- 可動領域が広い
- 広範囲で周波数と振幅が可変できる
- 6自由度の運動が実現できる



タイプ	シリアル	パラレル
長所	制御が簡単 可動範囲が広い	メカニズムが簡単 剛性が高い 加速度が大きく高速駆動が可能 位置決め精度に優れる
短所	加速度や速度が制限される バックラッシュ等の誤差が積算 位置や姿勢の設定精度に限界がある	制御が複雑 可動範囲が小さい

6自由度ロボットマニピュレータ



(Stewart platform) 各種の平行リンク



Serial Robot (PA-10)



Oscillatory Model Support (OMS)



Model Positioning Mechanism (MPM)



Parallel Robot. (HEXA-X2)



東北大学

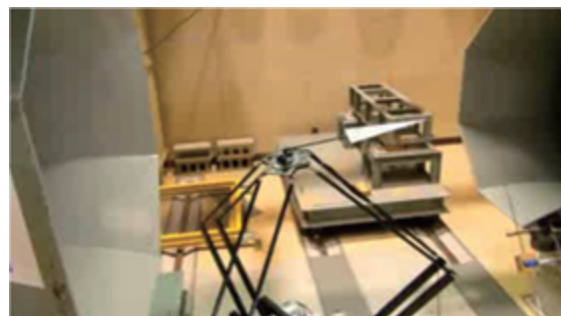
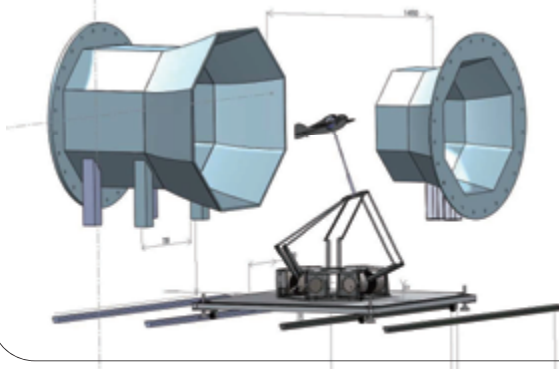
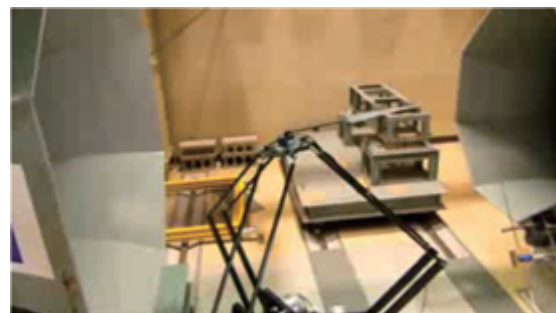
HEXA-X2 : 6-DoF Robotic Manipulator

東北大学内山研究室が開発した平行リンクマニピュレータ

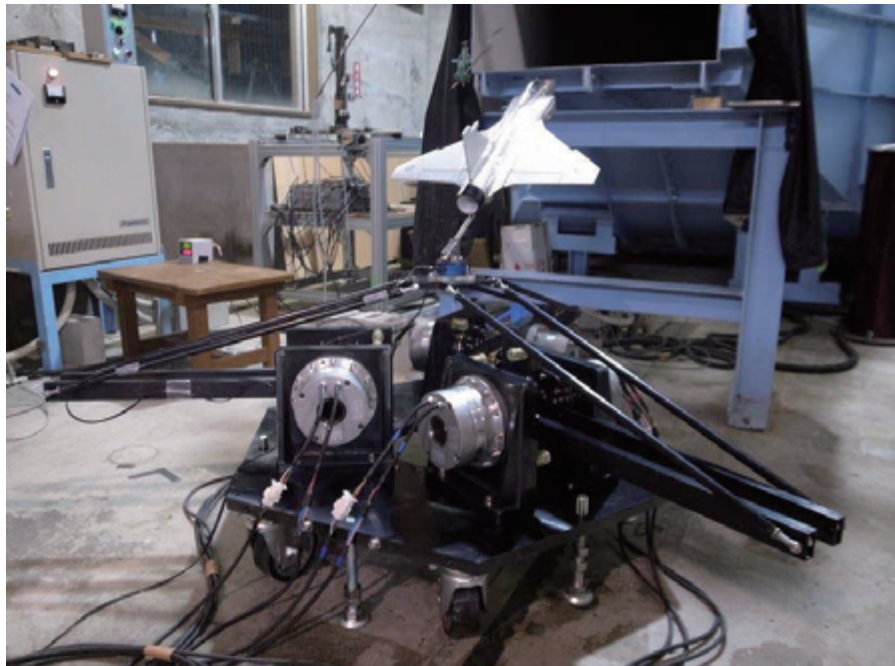


HEXA97
 モータ M-SSB045
 (トルク45Nm ダイレクトドライブ)
 ベース+モータ重量 129kg

HEXA-X2
 モータ SHA40A51SG
 (トルク340Nm ギヤードモータ)
 ベース+モータ重量 158kg



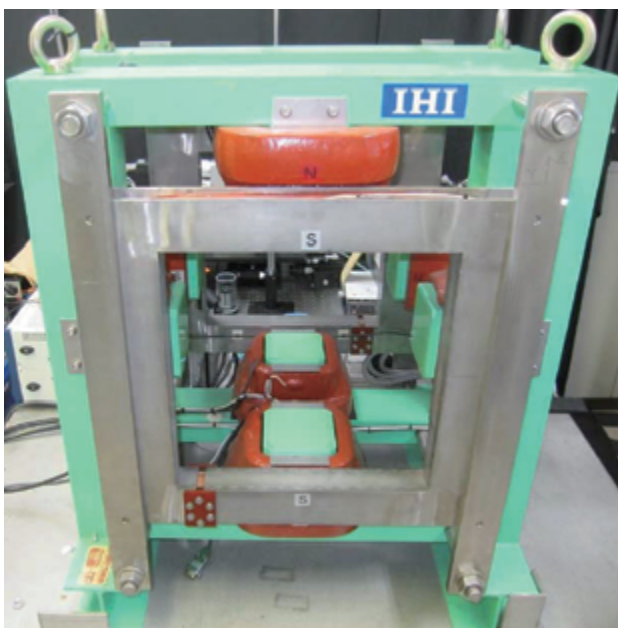
HEXA-X2 : 6-DoF Robotic Manipulator



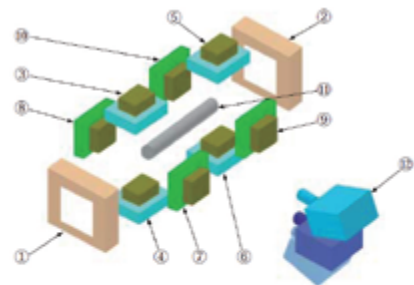
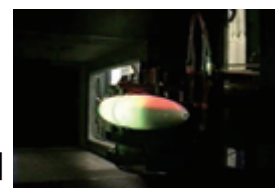
Achieved Roll Oscillation with amplitude of **10 deg** and at frequency of **4Hz**

内山・姜・安孫子研究室

0.3-m Magnetic Suspension and Balance System (Tohoku Univ.) Acquired from IHI (2011.7)



Capacity
 Drag: 1[N]
 Lift: 10 [N]
 Side F: 1[N]

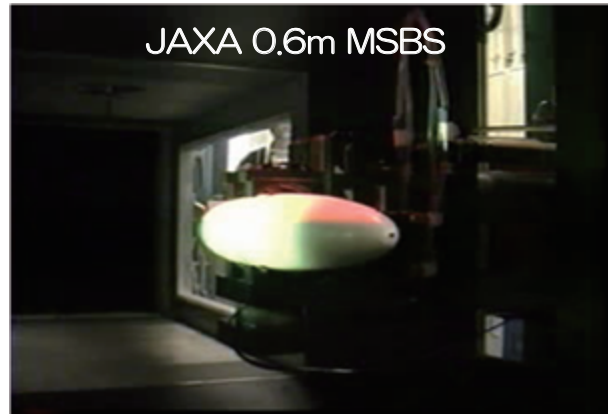
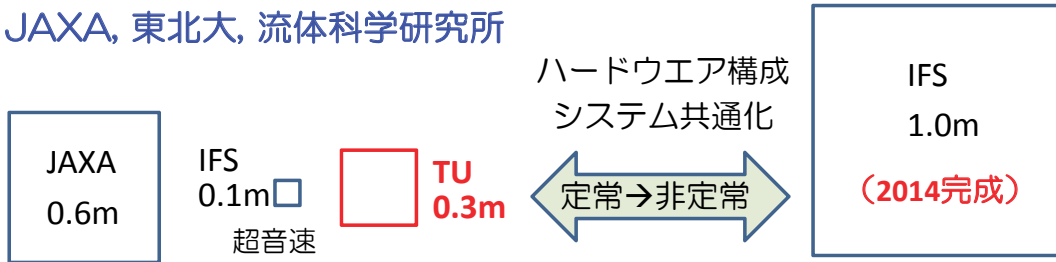


- | | |
|--------------|--------------|
| ①：抗力方向制御用コイル | ⑦：横力方向制御用コイル |
| ②：" | ⑧：" |
| ③：揚力方向制御用コイル | ⑨：" |
| ④：" | ⑩：" |
| ⑤：" | ⑪：浮遊模型 |
| ⑥：" | ⑫：位置検出カメラ |

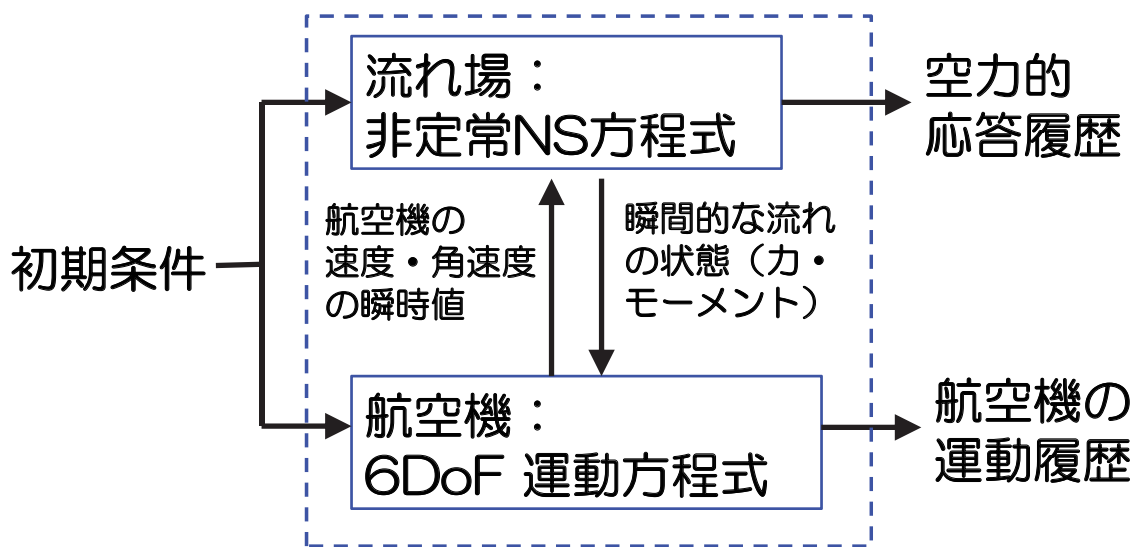
第1図 磁力支持天びん装置概要

磁力支持天秤装置（国内体制）

JAXA, 東北大, 流体科学研究所

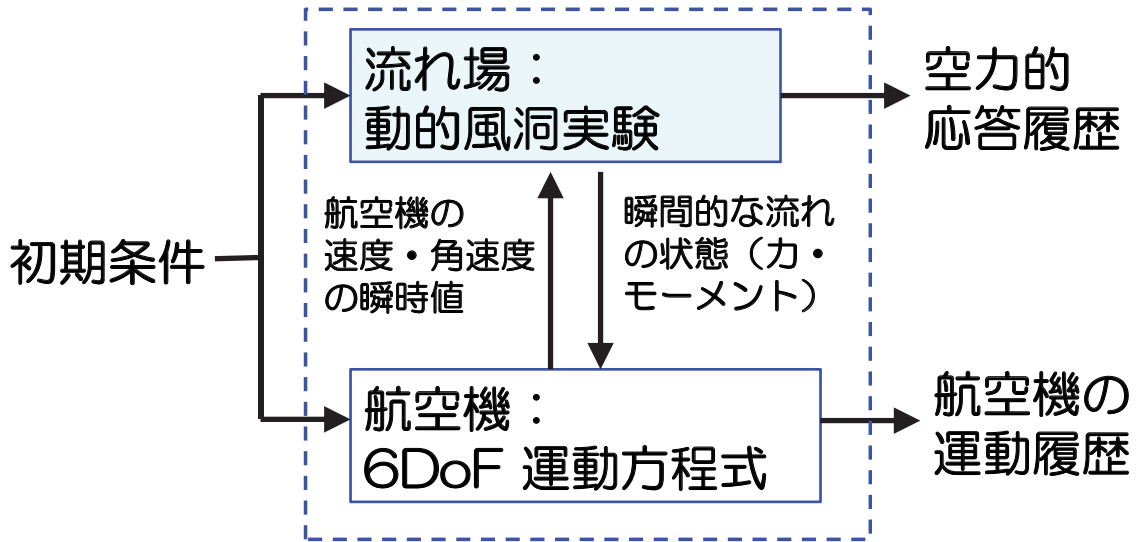


飛行シミュレーション - 理想的なアプローチ -



完全なカップリング → 現状では難しい

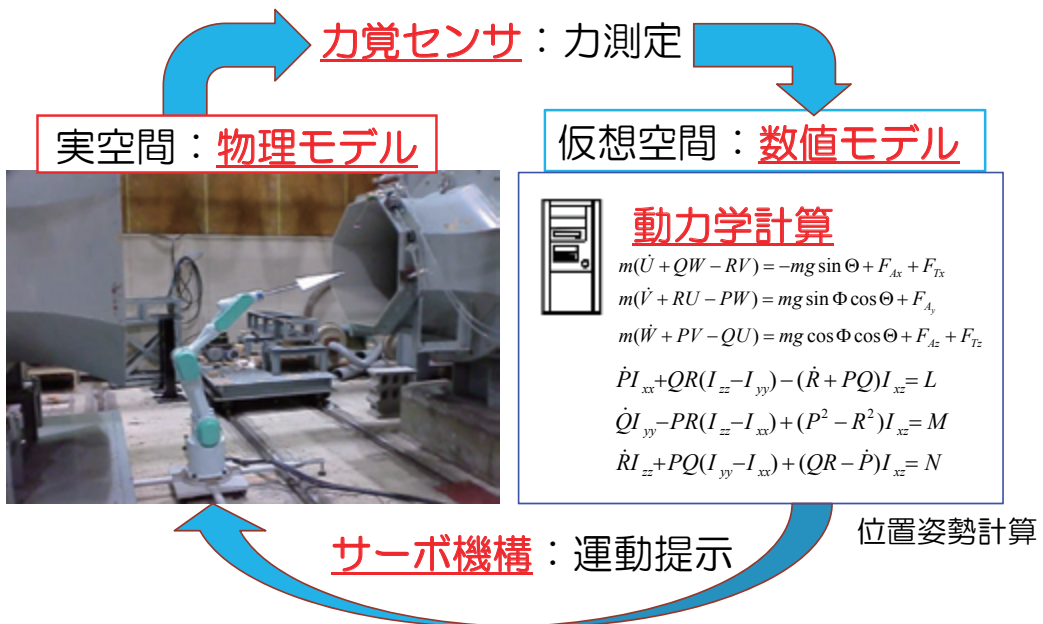
飛行シミュレーション - Hybridアプローチ -



流体は風洞実験 / 運動はコンピュータで模擬

Hybrid Simulation：システム構成

- 流れの模擬は風洞で行い，運動計算はコンピュータで行う。
- Closed Loop制御によるリアルタイムのシミュレーション

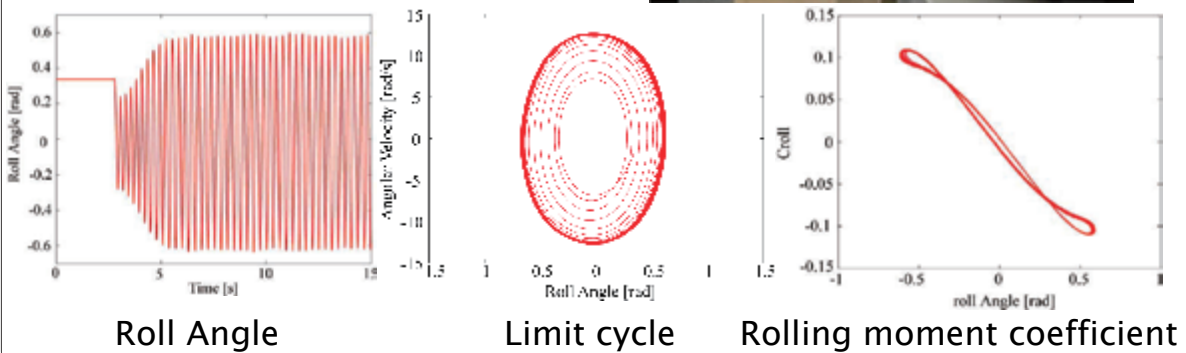


迎角35°におけるWing Rock現象

デルタ翼のWing Rock
- リミットサイクル現象



Hybrid Simulationの
模擬対象（基準）



Roll Angle

Limit cycle

Rolling moment coefficient

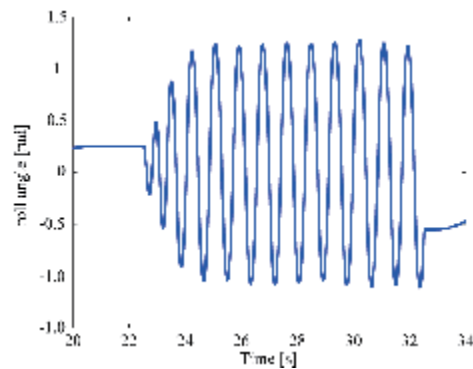
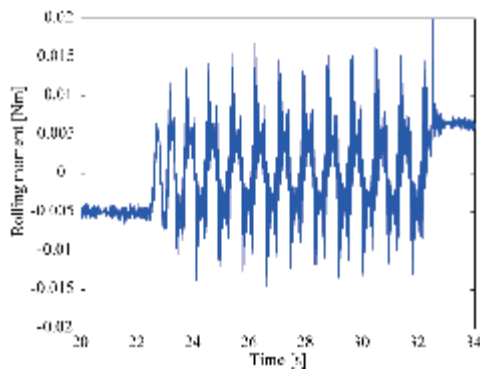
Hybrid Simulation (First Trial)

※流速 10 [m/s], 初期角度 15 [°]
フロンティア風洞を使用

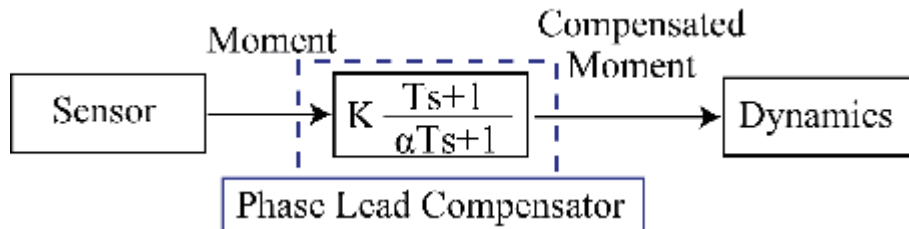


リミットサイクルが発生

シミュレーション 1.15 [Hz]
模擬対象周波数 3.22 [Hz]

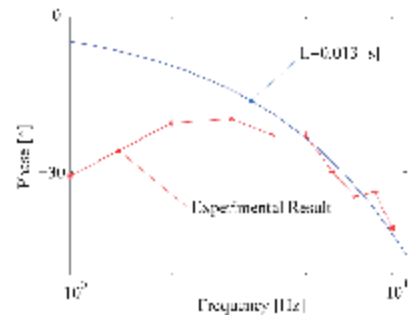


位相進み補償器の設計



周波数応答試験によりセンサの遅れを同定
センサの伝達関数をむだ時間モデルで近似

$$G(s) = e^{-Ls}$$



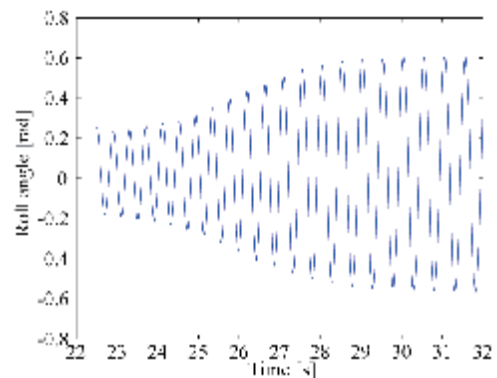
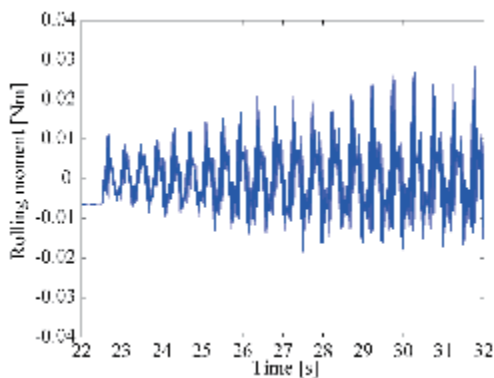
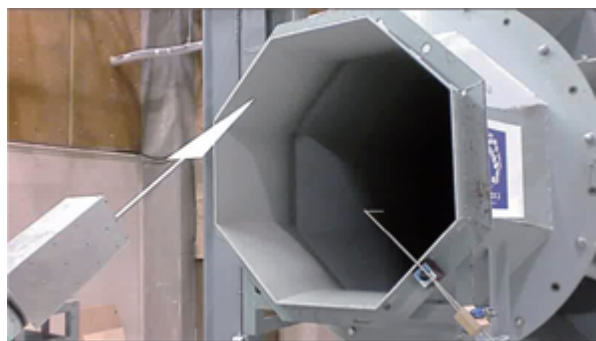
センサの伝達関数モデル
模擬対象の周波数 ➔ 3.2 [Hz] 15° 位相を進める
位相進み補償器を設計

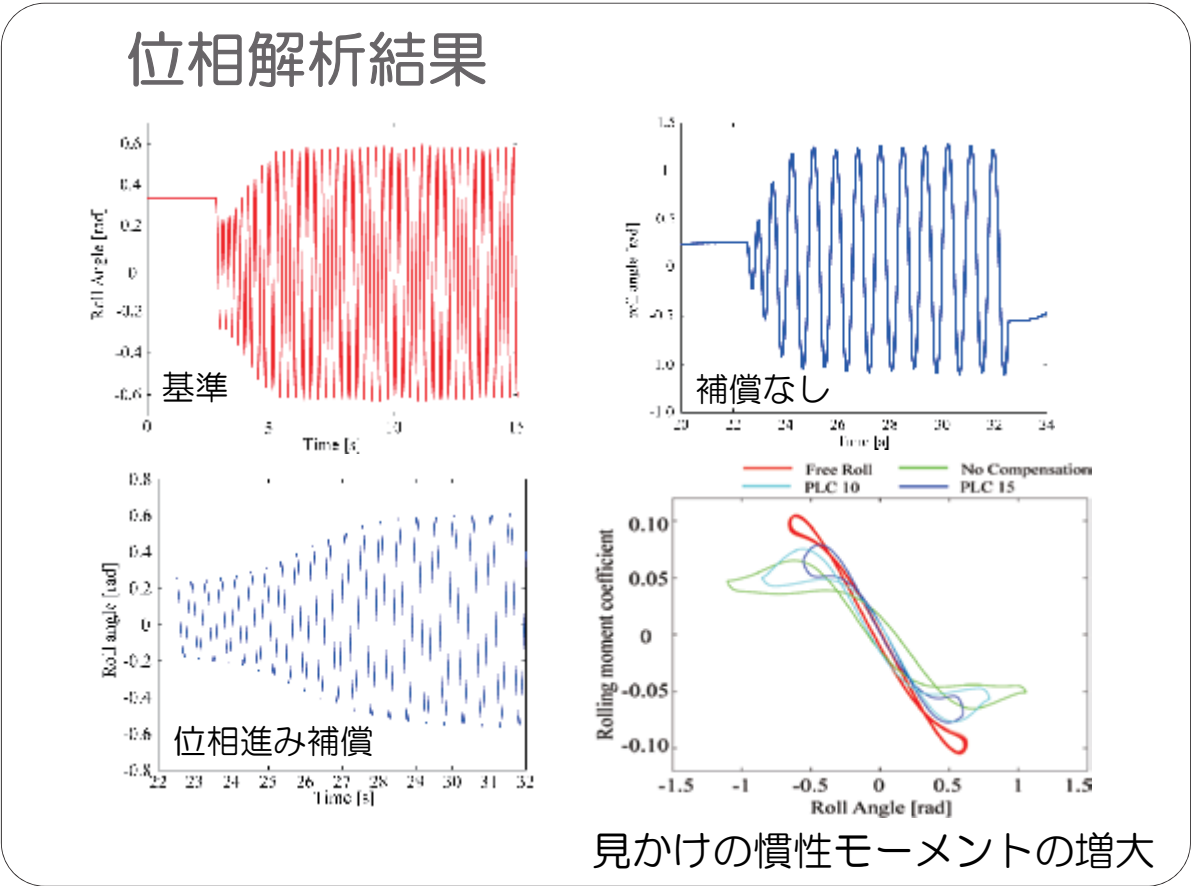
Hybrid Simulation (with 位相補償)

※流速 10 [m/s], 初期角度 15 [°]
低乱熱伝達風洞を使用

シミュレーション

補償あり	1.964 [Hz]
補償なし	1.145 [Hz]
模擬対象	3.221 [Hz]



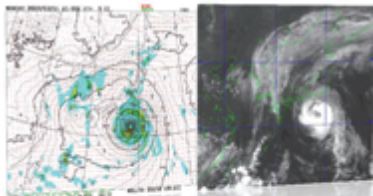


データ同化について

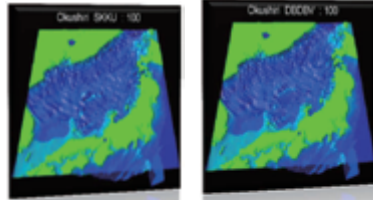


データ同化手法

- ✓ 観測（実験）と数値シミュレーションを融合させる手法
- ✓ 気象・海洋分野で発展、理論・観測（実験）・数値解析に次ぐ研究分野としての地位を確立



天気予報の初期値推定（気象庁など）



津波データ同化（統計数理研究所）

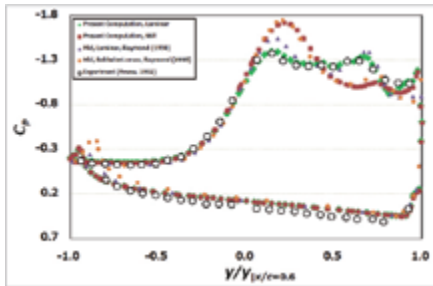
アンサンブルカルマンフィルタによるデータ同化

- ✓ 統計的データ同化手法のひとつ
- ✓ ばらつきを持つ有限個の状態（アンサンブルメンバー）で真値を推定
- ✓ 数値（シミュレーション）モデルが現実から離れないように、ある時間間隔で実験値を取りこみアンサンブルを修正

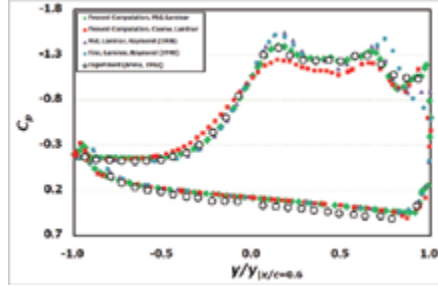
CFDと実験データとの比較（迎角30°，ロール角45°）



翼面圧力係数分布（ $x/c=0.6$ ）オイルフロー/渦崩壊のようす

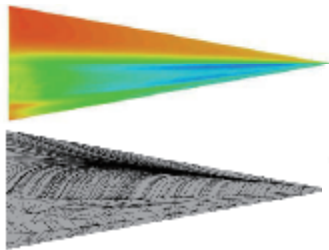


物理モデルの影響比較



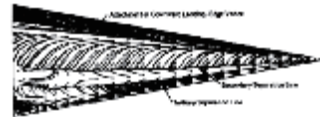
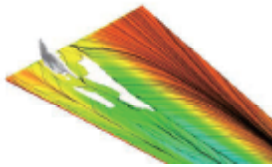
格子密度の影響比較

オイルフロー/渦崩壊のようす



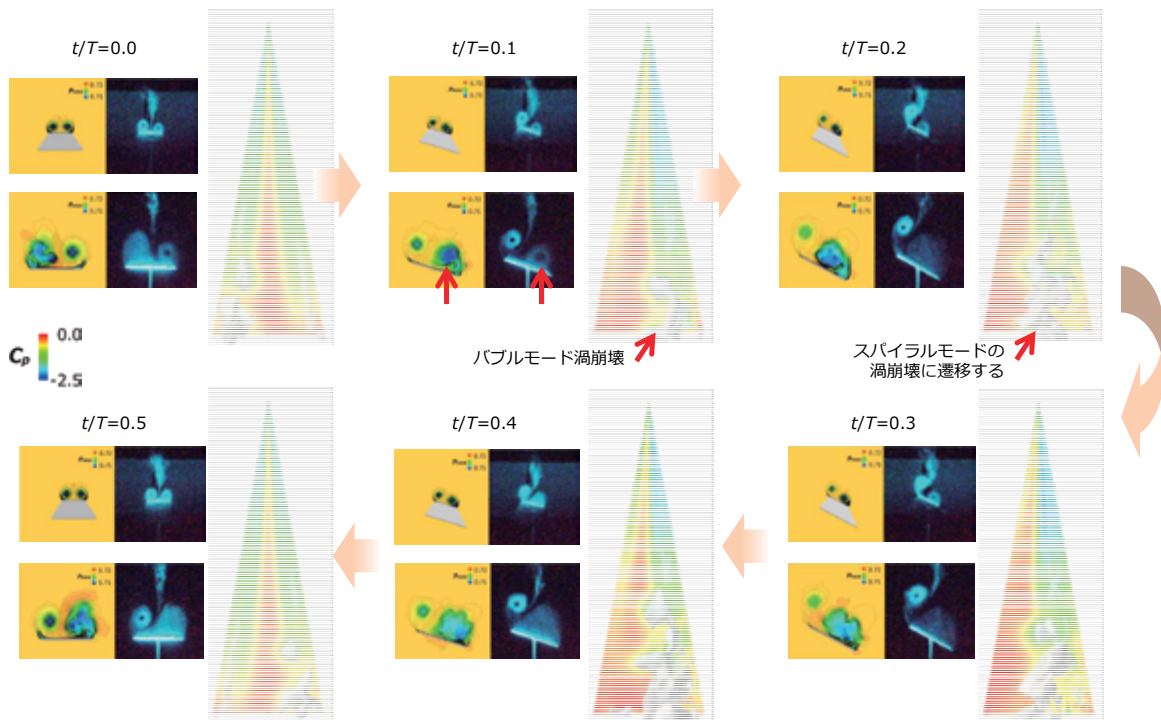
二次剥離渦が発達した後縁付近で $u=0$ （渦崩壊が生じる）

実験のオイルフローとはかなり合う様子。



✓ 層流計算・Medium格子で十分実験値をとらえている

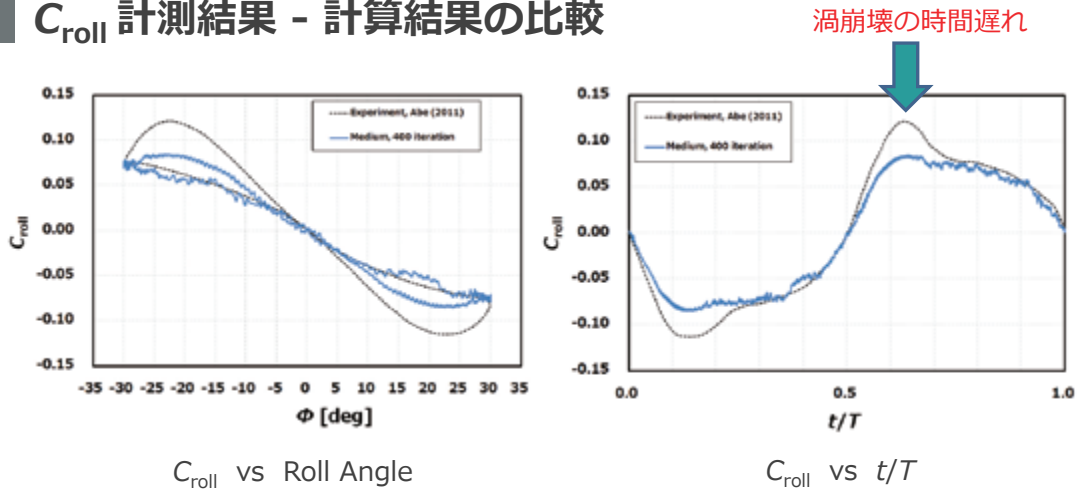
非定常計算の精度検証 - 結果 翼面 C_p 分布, $u=0$ 等値面, 剥離渦



非定常計算（C_{roll}比較）



C_{roll} 計測結果 - 計算結果の比較



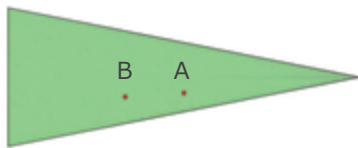
- ✓ 渦崩壊の傾向（ピークをとるタイミング）は捉えている
- ✓ ローリングモーメントの極値は小さいが、渦崩壊状態の履歴は実験値を捉えている

圧力計測値を用いたデータ同化



観測点の設定

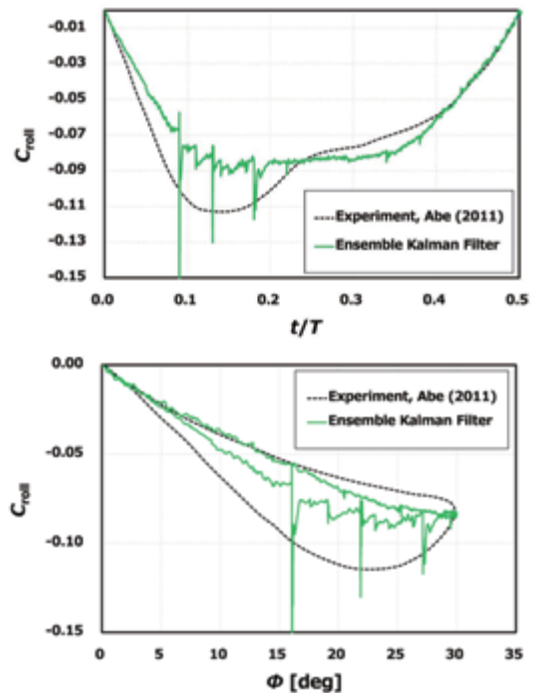
- ✓ 観測点数 2点（圧力センサ位置）



計算条件

一様流マッハ数 M_∞	0.088
強制ロール振幅 ϕ_0 [deg]	30
無次元振動数 f_{exp}^*	0.01
無次元時間刻み	0.056708*
内部反復数	80

- ✓ 実験値のピークの領域ではフィルタリングのたびに空力値が実験値の方向に修正される
⇒ 観測点 C_p が実験の C_{roll} ピークの生成に影響している



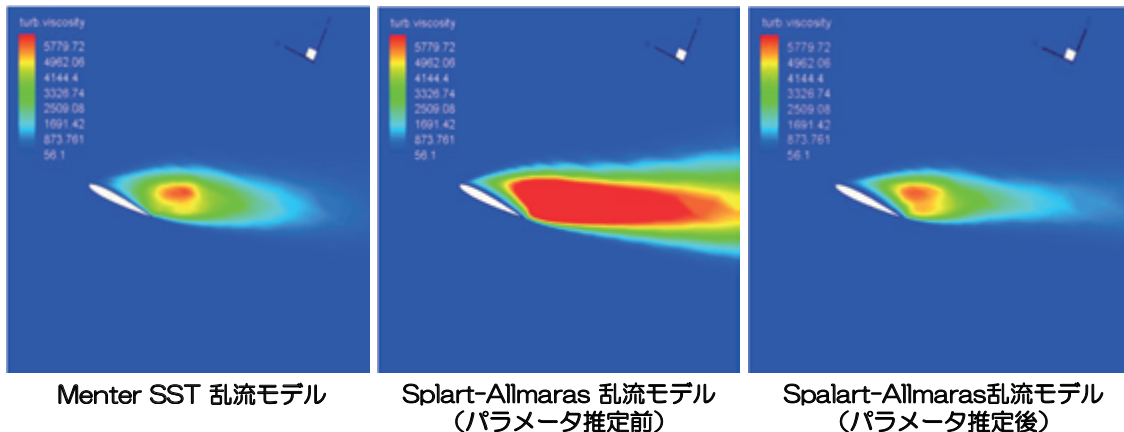
データ同化について



乱流モデルのパラメータ推定

Menter SST乱流モデルに対するSA-R乱流モデルのパラメータ最適化
(加藤ら, 2011)

乱流モデルパラメータの最適化



2013/02/06 修士論文審査会

3/19

まとめ

非線形領域における飛行シミュレーション技術の構築に向けて、EFD, CFD, RTが連携して取り組んでいる研究活動の現状と課題を紹介した。

- ロボットマニピュレータの開発
運動性能のさらなる向上（可動範囲，周波数，振幅）
磁力支持装置（MSBS）
- Hybrid Simulation
センサやサーボ系の位相遅れを補償する（Feed Forward）
多自由度運動への拡張
- 計測融合シミュレーション
非線形空力モデルのパラメータ推定
ニューラルネットワークの適用

ロボットなどのハードウェア技術や各種の運動解析手法は整いつつある。



空気力学と飛行力学，制御工学の専門家による共同が不可欠

Fin

