

ものづくりにおけるスーパーコンピュータの 利活用事例

2021年3月16日

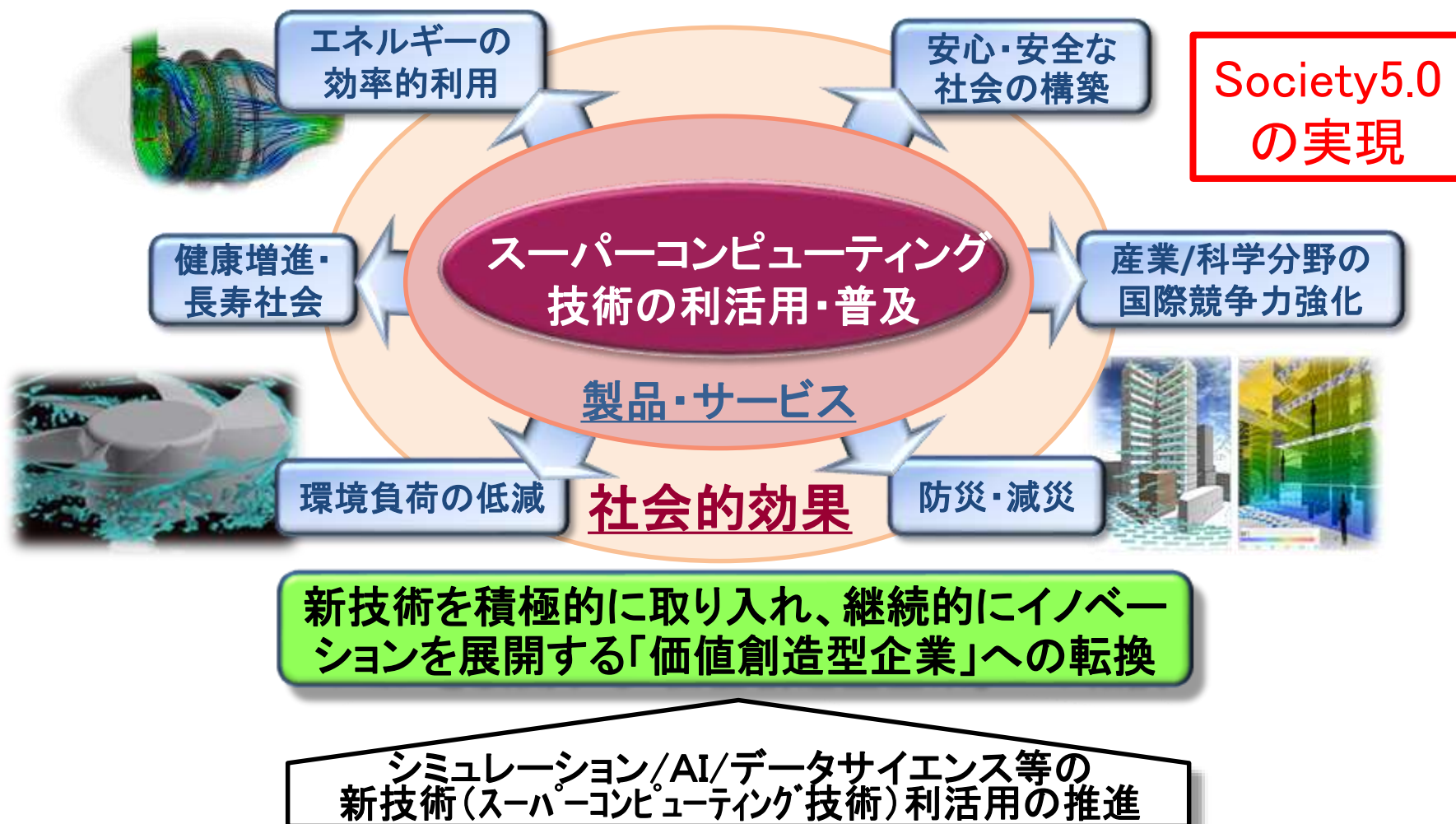
スーパーコンピューティング技術産業応用協議会(産応協/ICSCP)

川崎重工業(株)航空宇宙システムカンパニー

松岡 右典

1. スーパーコンピューティング技術産業応用協議会
(産応協/ICSCP) のご紹介
2. ガスタービン開発における大規模流れ解析と設計利用
九州大学-川崎重工業 共同研究
3. 頻発する極端気象災害に対する都市・建築のレジリエンス強化
建築CFDコンソーシアム(現_都市・建築CFDコンソーシアム)
(代表者) 東京工業大学教授 田村 哲郎
4. 室内環境におけるウイルス飛沫感染の予測とその対策
富岳コロナ対策飛沫感染グループ
(代表者) 理化学研究所チームリーダー/神戸大学教授
坪倉 誠

- スーパーコンピューティング技術の利活用を促進し、産業の発展・強化につなげることで豊かな社会の実現に寄与する



正会員

(株)IHI	鹿島建設(株)	(株)風工学研究所	川崎重工業(株)
清水建設(株)	ダイキン工業(株)	(株)竹中工務店	(公財)鉄道総合 技術研究所
(株)東芝	トヨタ自動車(株)	東レ(株)	日本電気(株)
(株)日立製作所	富士通(株)	(株)本田技術研究所	みずほ情報総研(株)
三菱ケミカル(株)	三菱電機(株)		

アソシエート会員

(一社)日本自動車 工業会			
------------------	--	--	--

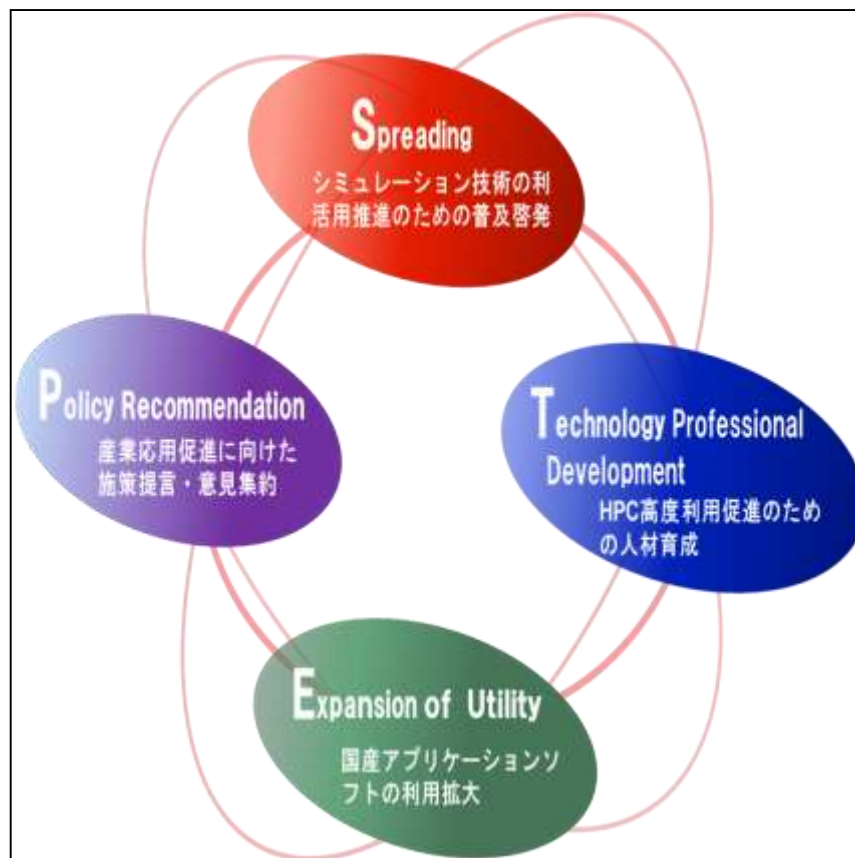
準会員(賛助会員)

住友化学(株)	(特定非営利) CAE懇話会	中外製薬(株)	
---------	-------------------	---------	--

準会員(協力会員)

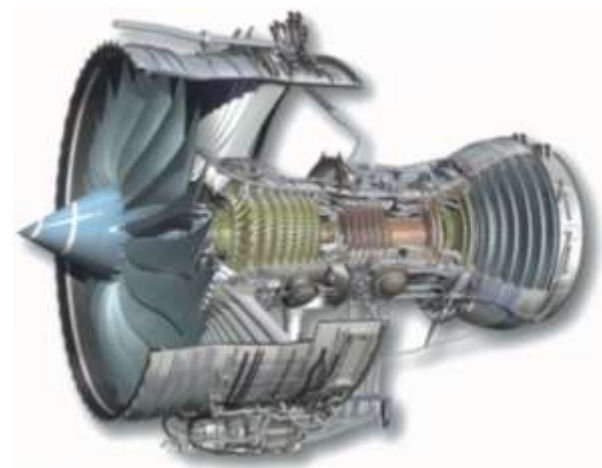
(株)大和システム エンジニア			
--------------------	--	--	--

1. **S**preading: スーパーコンピューティング技術の利活用推進のための普及啓発
2. **T**echnology Professional Development: HPC高度利用促進のための人材育成
3. **E**xpansion of Utility: 国産アプリケーションソフトの利用拡大
4. **P**olicy Recommendation: 産業応用促進に向けた施策提言・意見集約



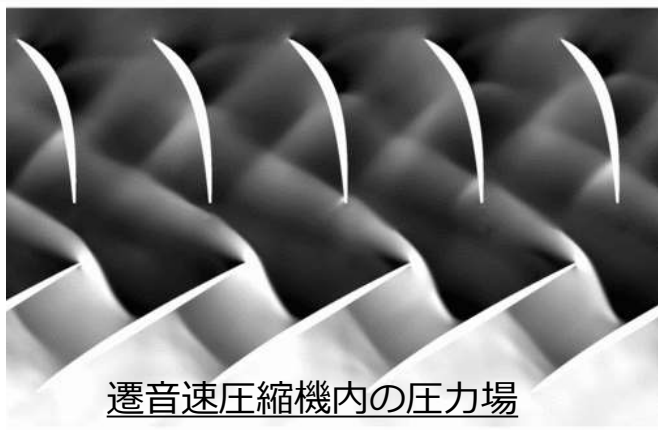
1. スーパーコンピューティング技術産業応用協議会
(産応協/ICSCP) のご紹介
2. ガスタービン開発における大規模流れ解析と設計利用
九州大学-川崎重工業 共同研究
3. 頻発する極端気象災害に対する都市・建築のレジリエンス強化
建築CFDコンソーシアム(現_都市・建築CFDコンソーシアム)
(代表者) 東京工業大学教授 田村 哲郎
4. 室内環境におけるウイルス飛沫感染の予測とその対策
富岳コロナ対策飛沫感染グループ
(代表者) 理化学研究所チームリーダー/神戸大学教授
坪倉 誠

- ❑ 多段軸流圧縮機はガスタービンの主要構成要素
- ❑ 高負荷・高効率化が常に求められている
- ❑ 圧縮機開発においてシミュレーションは必要不可欠
⇒ 計算機の高速化で、より複雑で実用的な計算可能に
- ❑ 多段軸流圧縮機の空力解析の課題
(現状まだ難しいこと)
 - 旋回失速、サージ限界の予測
 - 動静翼間の非定常干渉
 - . . .



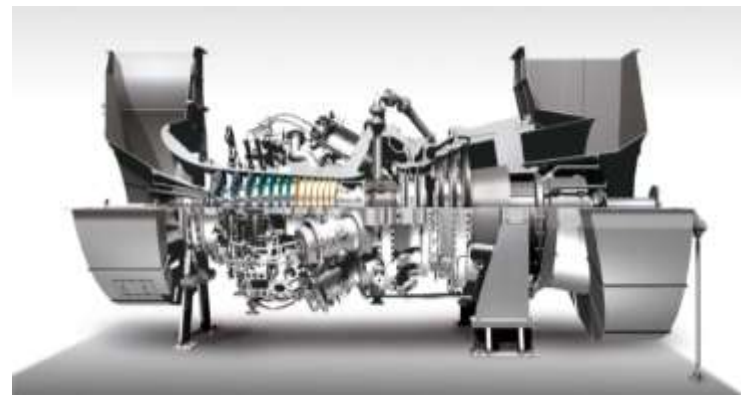
航空用ガスタービン

⇒ 企業独自では取組みが難しい高度なシミュレーション技術について、大学との共同研究として実施



遷音速圧縮機内の圧力場

P_s
1.6
0.8



発電用ガスタービン

研究目的

□ 多段軸流圧縮機内の非定常流動現象の解明、高精度予測

- 試験に替わる評価手法確立、試験できない現象の解明
- 内部流動現象の解明による性能改善
- 最適化設計への応用

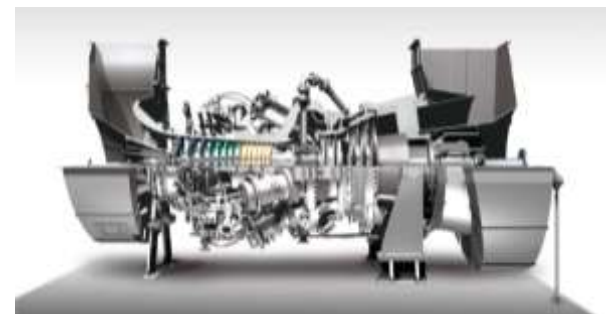
実施内容

- 対象：ガスタービン実機の多段軸流圧縮機の全周翼列
- 手法：k- ω モデルに基づいた**DES** (Detached Eddy Simulation) 計算

実施体制

九州大学-KHI 共同研究

- － 九大 － ソルバ開発・可視化手法
- － KHI － 設計・試験データ提供



「京」を中核とするHPCIシステム利用研究課題 優秀成果賞 (hp140154)
優秀成果賞 (hp180081)

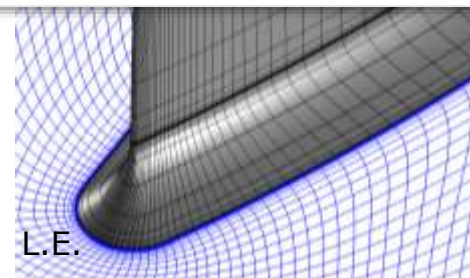
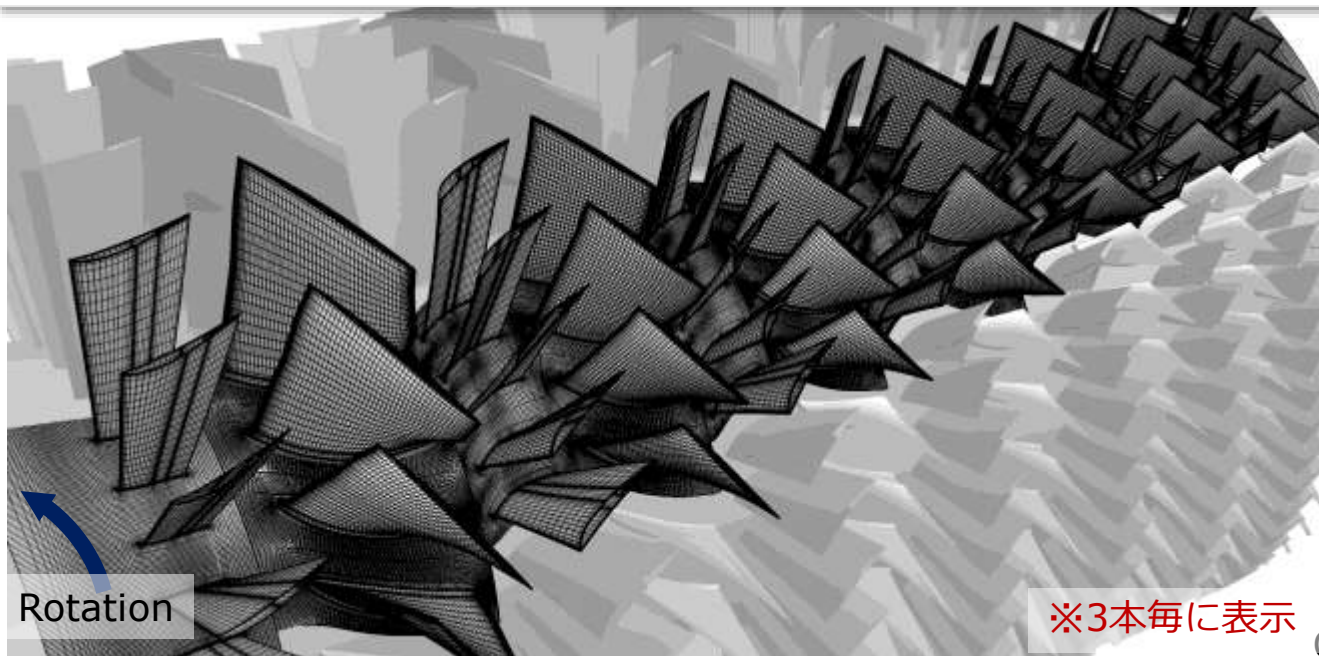
多段軸流圧縮機の旋回失速初生現象

ICSCP

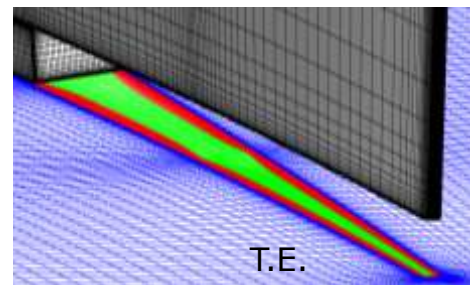
スーパーコンピューティング技術産業応用協議会

数値計算格子

- マルチブロック構造格子 (7段全周モデルで19.1億セル)
- 翼間あたり300～500万セル (各翼列あたり1.2～1.5億セル)
- 動翼根元フィレット、チップクリアランスおよび可変静翼の部分クリアランスを再現



Close-up of Fillet

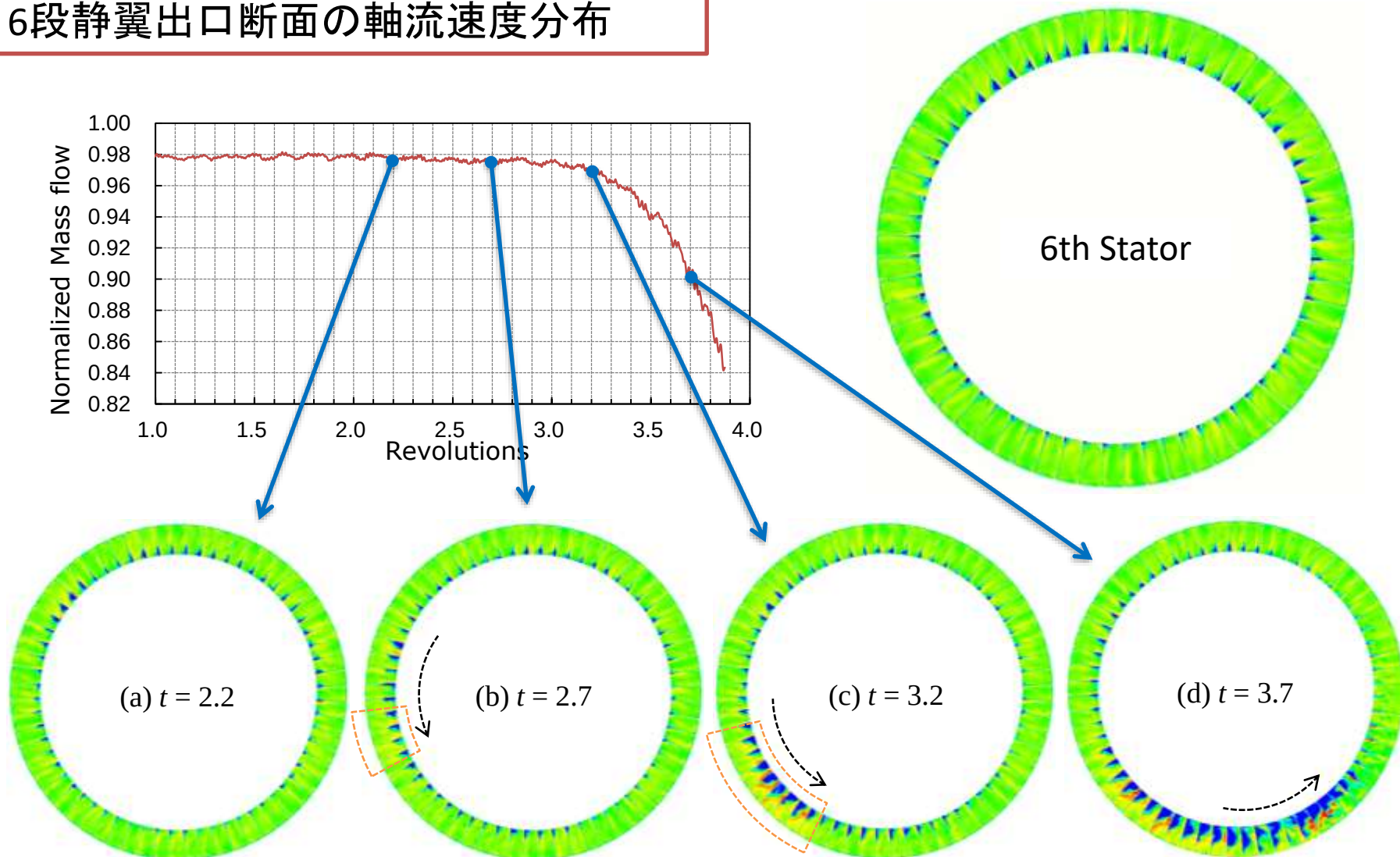
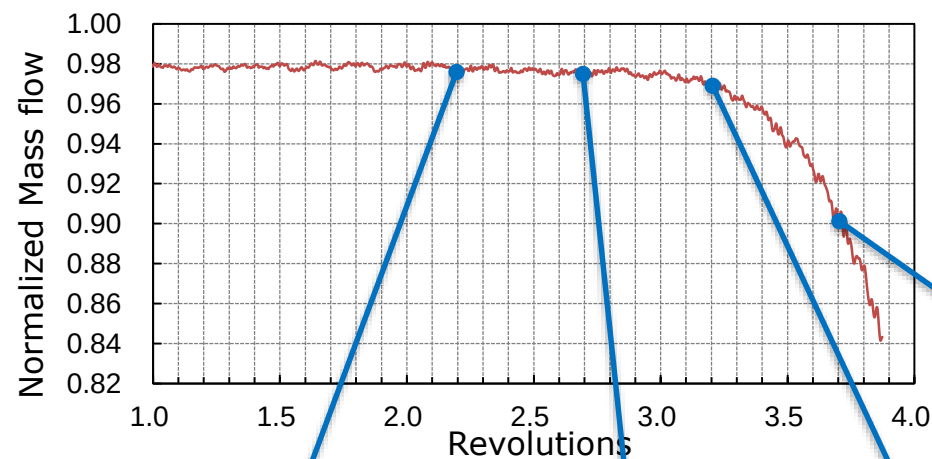


Close-up of Partial Clearance

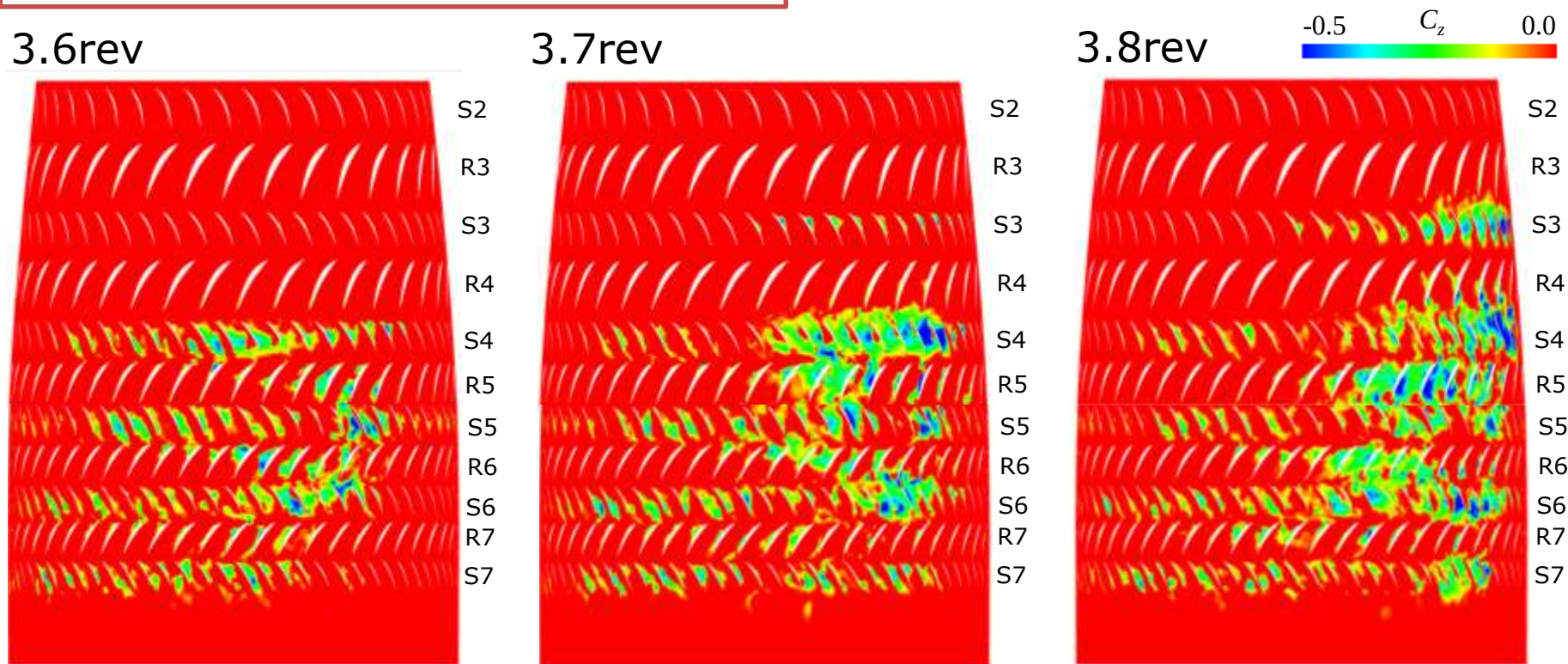
※3本毎に表示

Number of cells	1pitch	Full Annulus	Number of blades
Front 7-stage	47,057,280	1,910,611,584	671

6段静翼出口断面の軸流速度分布



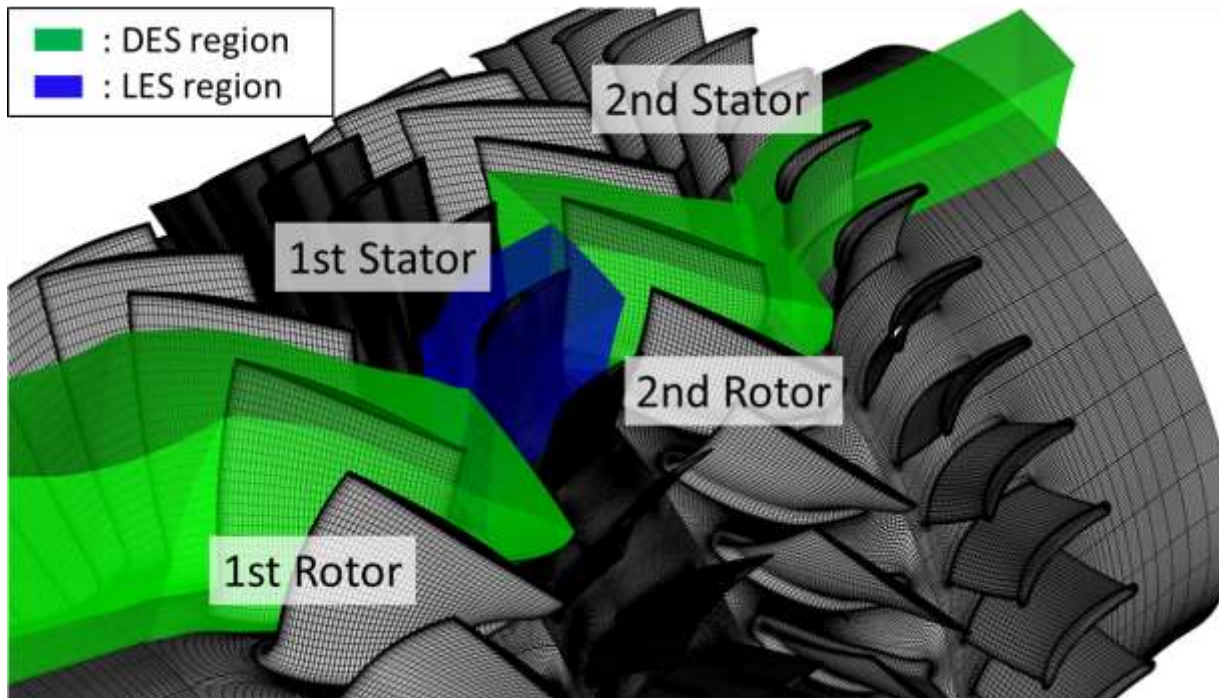
10 %スパン断面の軸流速度分布



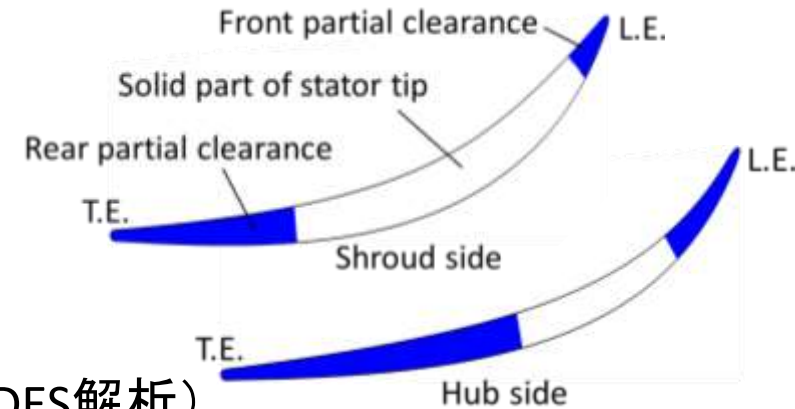
- 軸方向に連なる大スケールの失速セルを形成
- 失速セルは短時間で急速に発達.
- 安定的な旋回失速にはならず、圧縮機全体の失速へ至る

DES全周解析によって失速限界付近の不安定流動現象を精度よく予測

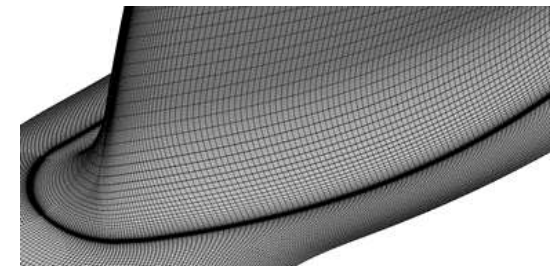
- マルチブロック構造格子
- H-O型を組み合わせた格子トポロジー
- フィレット, クリアランスを忠実にモデル化
- 格子点数 : **約12億点(全段・全周)**
 - 1S : 約3,000万点(単流路)(LES解析)
 - 1R, 2R, 2S : 約340~520万点(単流路)(DES解析)



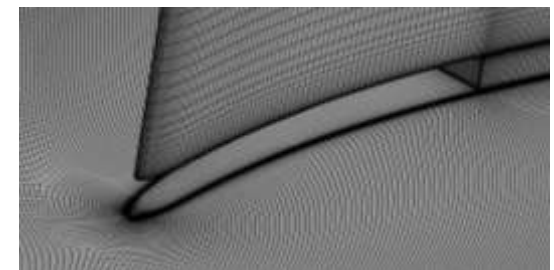
Overview (every three lines)



Shape of partial tip clearance
in first stator

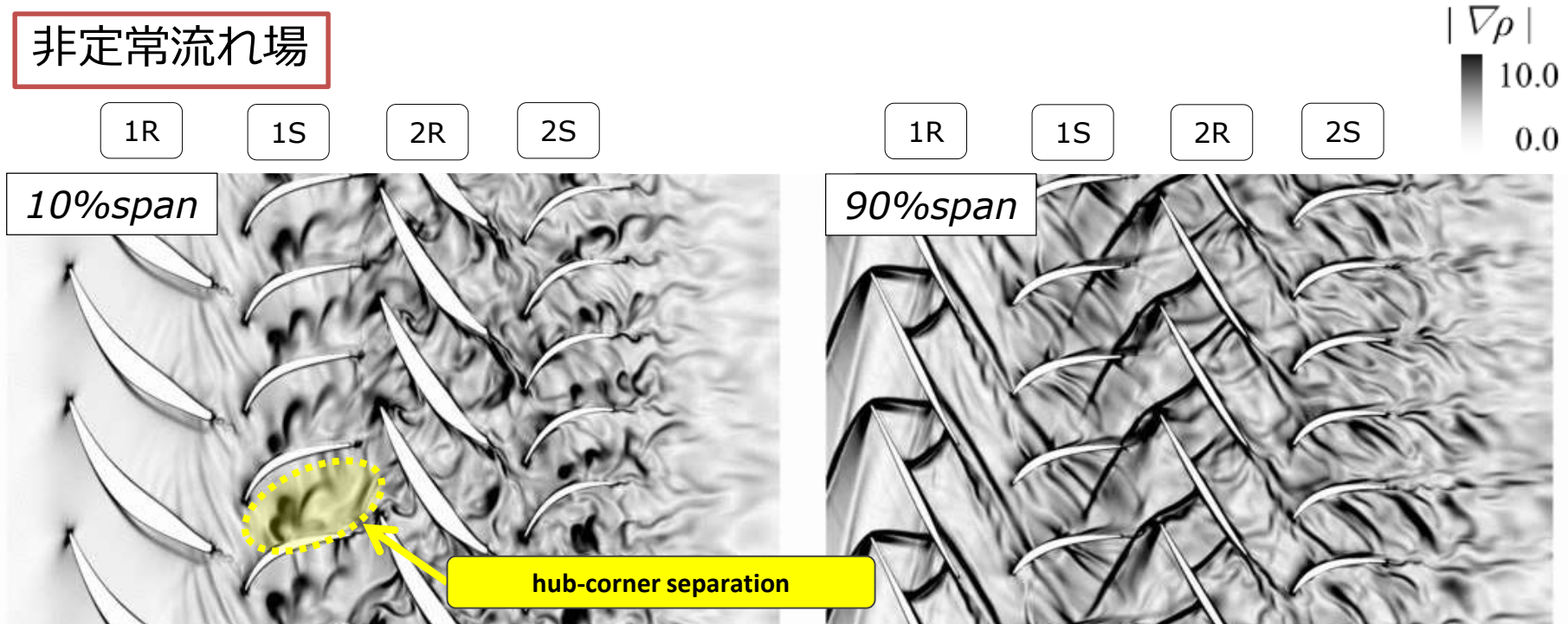


Fillet



Partial tip clearance

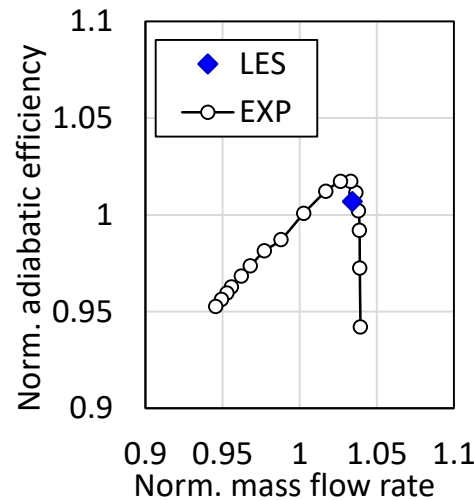
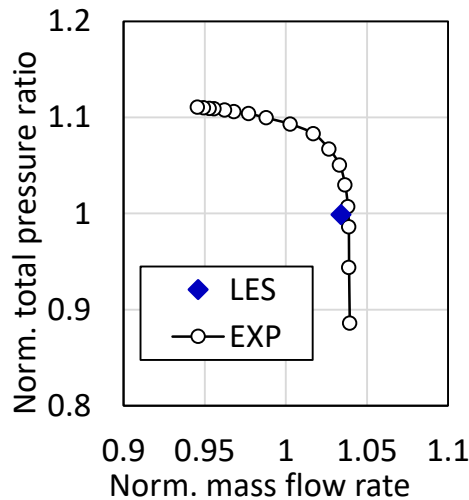
非定常流れ場



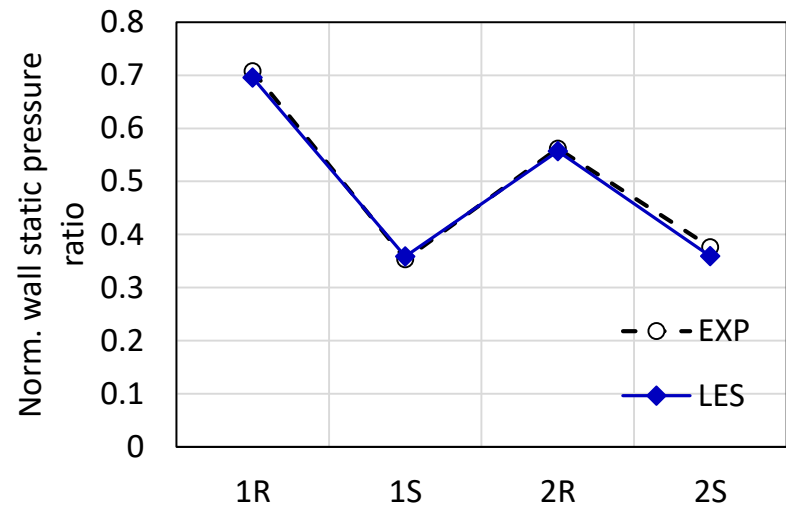
Magnitude of density gradient

- ❑ 動翼列では、離脱衝撃波（斜め衝撃波）および流路衝撃波が発生
- ❑ 2段動翼の衝撃波が初段静翼の翼間に入射し、初段静翼の翼面上で反射
⇒ 初段静翼の翼間で反射を繰り返しながら、上流側へ伝播
- ❑ 初段静翼ハブ側においてハブ・コーナーはく離が発生
⇒ 初段動翼の後流および2段動翼の衝撃波と干渉し、時間的に大きく変化

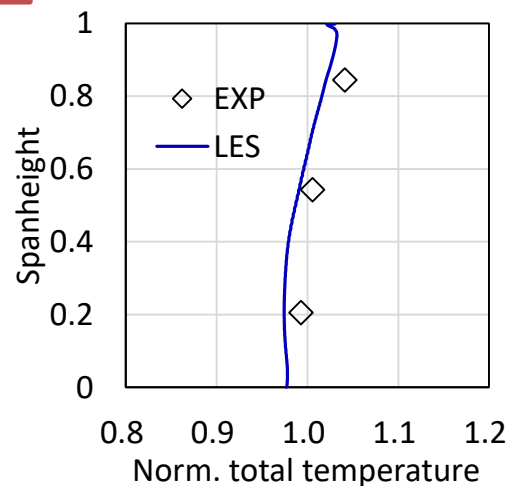
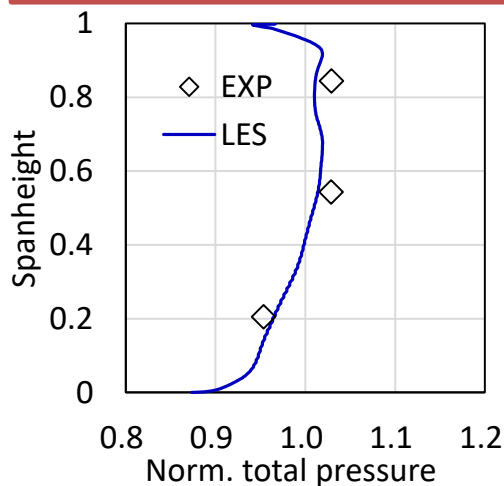
圧縮機性能



各段における壁面静圧比

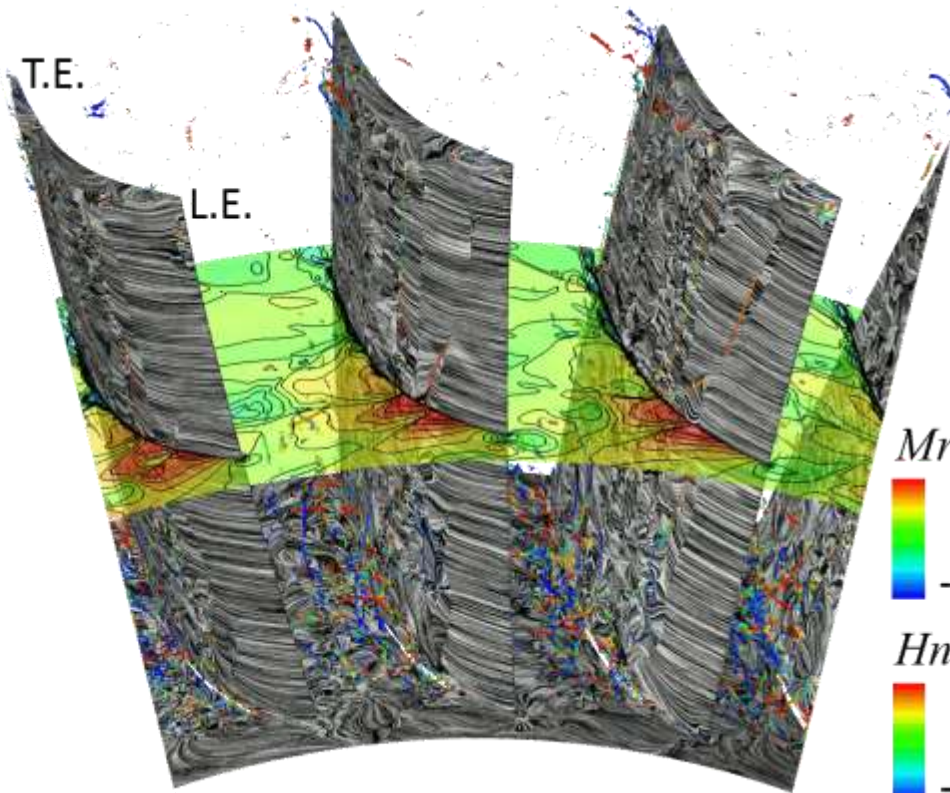


圧縮機出口の流れ場

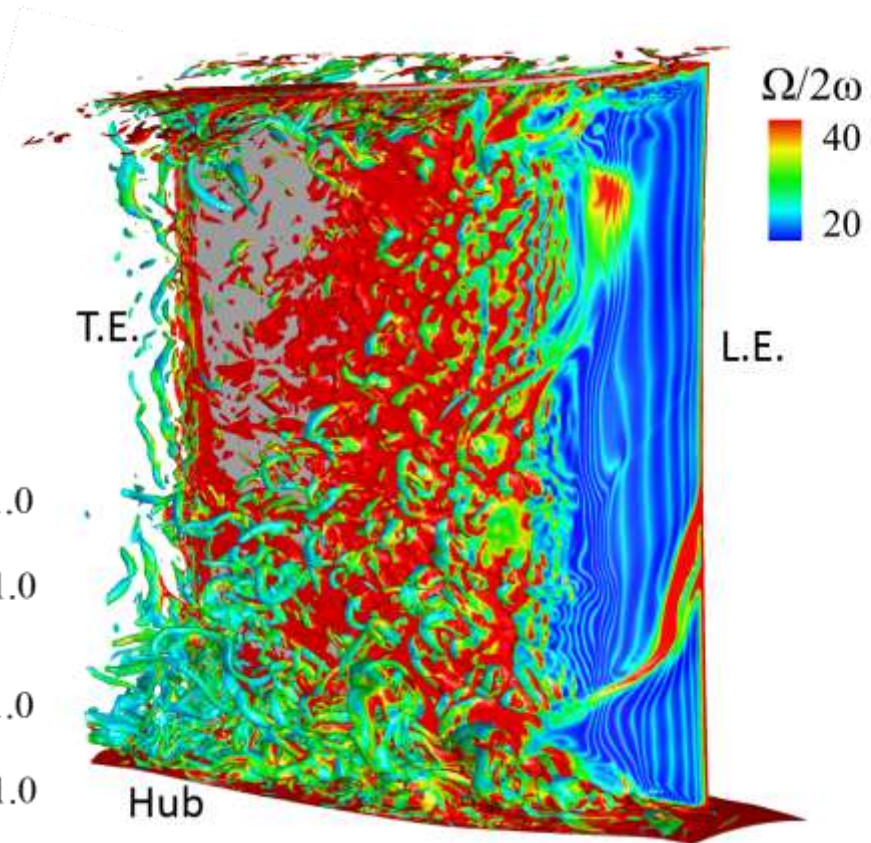


- 設計圧力比の作動点における解析を実施
- 壁面静圧比, 圧縮機出口の全圧・全温分布ともに, **実験結果とよく一致**

瞬時の流れ場



Limiting streamline, vortical structure
and Mach number distribution at 50% span



Vorticity on iso-surface of Q-criterion

- 2段動翼からの**衝撃波**およびその**反射波**と翼面境界層の干渉
- 中実部負圧面側のハブ面からスパン方向へ**ハブ・コーナー**はく離領域が拡大
⇒ 多数のはく離渦が混在した, 強い**非定常性**を有する複雑な流れ場

1. スーパーコンピューティング技術産業応用協議会
(産応協/ICSCP) のご紹介
2. ガスタービン開発における大規模流れ解析と設計利用
九州大学-川崎重工業 共同研究
3. 頻発する極端気象災害に対する都市・建築のレジリエンス強化
建築CFDコンソーシアム(現_都市・建築CFDコンソーシアム)
(代表者) 東京工業大学教授 田村 哲郎
4. 室内環境におけるウイルス飛沫感染の予測とその対策
富岳コロナ対策飛沫感染グループ
(代表者) 理化学研究所チームリーダー/神戸大学教授
坪倉 誠

3. 頻発する極端気象災害に対する都市・建築 のレジリエンス強化

ー建築CFDコンソーシアムでの取組みー
(現_都市・建築CFDコンソーシアム)



■ 理念

コンソーシアム形式による産学官が連携した出口戦略を見据えた実証研究

■ 目的

【現状】建築物の耐風設計における数値流体計算の適用方法の確立

【将来】極端気象災害によるリスク評価と都市・建築のレジリエンス強化

■ 活動内容

○建築物の耐風設計でのHigh Performance Computingの実現

- ・重要建築物でのCFD性能評価資料の雛型の作成

○数値的推定値における不確定性の定量化

- ・CFD結果判定基準の精緻化

➡Capacity computing

○頻発する極端気象災害に対する都市・建築のレジリエンス強化

- ・CFDの展開範囲の拡大

➡Capability computing

■ 社会貢献の視点

- ハイエンド計算による数値流体計算の妥当性確認とコード検証用データ提供
- 耐風設計用の数値流体計算実用モデルの標準化と提案
- 数値流体計算に基づく耐風試設計の実施と安全性評価による数値流体計算の法的根拠確立
- 日本建築学会にて出版された数値流体計算の適用ガイドの改定に向けての基礎資料の提示
- 極端気象下での都市・建築のシミュレーションを実施し、被災度を推定
実際の被災状況と比較しながら、シミュレーションによる推定可能性を検証し、現行設計指針の妥当性を確認

■ 産業界の視点

- ◇基盤技術の共有や認証制度・法改正への協働
- ◇大学・研究機関がソフトウェアを開発し、産業界がニーズ提供とシミュレーションを通じて、開発ソフトの実証評価や実用化を実施
- ◇業界企業の多数が参画することで、業界全体のレベルアップを実現
- ◇自然災害のインパクトに対する都市・建築の持続性・脆弱性の共通認識を醸成

■ 頻発する極端気象災害に対する都市・建築のレジリエンス強化

- ・極端気象現象(極大台風、竜巻、猛暑等)を想定した被害推定
- ・新しい対災害設計法の確立

将来(10年程度)

2019年度まで

- ・強風災害メカニズム推定
(重点課題④の階層型格子・壁面LESプログラム)
- ・数値解析による風荷重評価
手順確立(国交省建築基準整備促進事業での検証)

・数値解析による風荷重評価
の実案件への展開

近い将来(数年程度)

- ・数値解析の高速化による風洞実験と同等の精度・時間での耐風設計の実現
- ・数十億格子の高速計算
- ・極端気象に対する都市・建築の強風災害リスク解析

・精緻な風圧情報取得による耐風安全性向上
・強風災害リスクの定量化

- ・将来増強する台風を想定した新しい耐風設計法確立
- ・極端気象現象を含む気象モデルとの連成とマルチハザードへの展開
- ・百億格子レベルの大規模・超大サンプル数の計算とAI解析による不確定性の定量化と設計法確立

・極端気象災害に対する都市・建築のレジリエンス強化

100倍の計算能力

1,000倍の計算能力

階層型格子・壁面LESで計算効率化

重点課題④等との連携

課題設定段階
の早期参画

気象・建設分野の専門家による産学連携プロジェクト

東工大・神戸大・理研・建設会社等が組織する「建築CFDコンソーシアム」活動

(1) 建築基準整備促進事業での取組み

ー複雑な表面形状を持つ建築物での検証ー

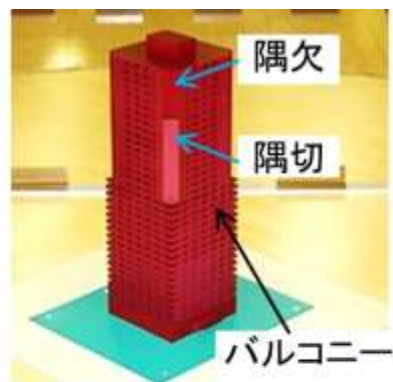
平成27～28年度「京」一般課題(競争的資金等獲得課題)

【参考文献】

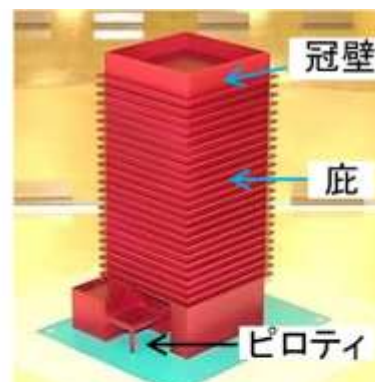
Tetsuro Tamura et al. (2017).

Application of LES to wind loading estimation on buildings. Proc. of 9th Asia-Pacific Conference on Wind Engineering

設計業務での数値流体計算(CFD)の実用化を目指し、国土交通省建築基準整備促進事業(基整促)「S18.風圧力、耐風設計等の基準への数値流体計算の導入に関する検討」において、モデル建物を対象として、**風洞試験と同等な妥当性のある結果を得ることができる時間・空間解像度等の計算条件範囲を明確化**することを目的とした調査を実施。**受審者・審査者の双方が活用できるガイドラインを提示する。**



バルコニーを有する住宅棟



環境配慮型ファサードを有するオフィス棟



周辺街区有り

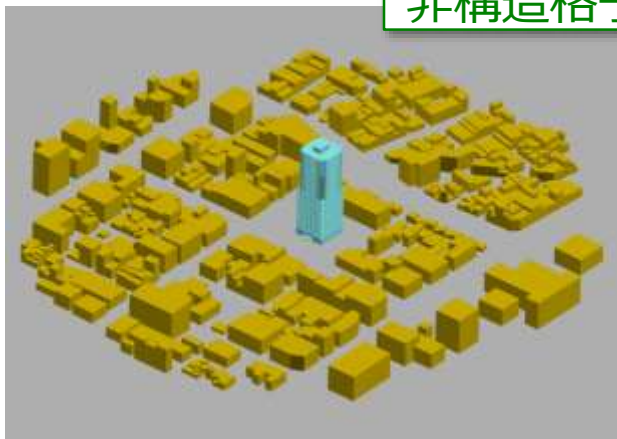


周辺街区無し

複雑な表面形状
を持つ建築物

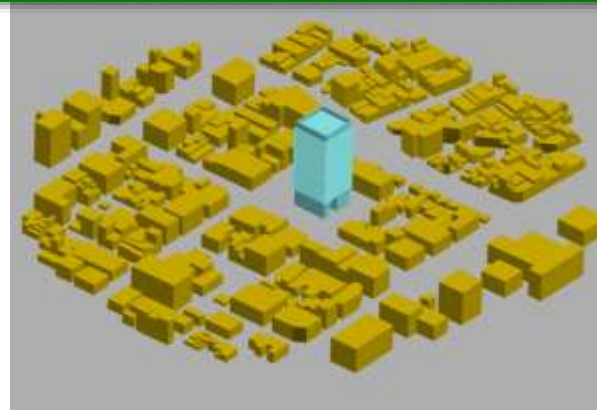
基整促での取組み

非構造格子・有限体積法ソルバーFrontFlow/red-HPC



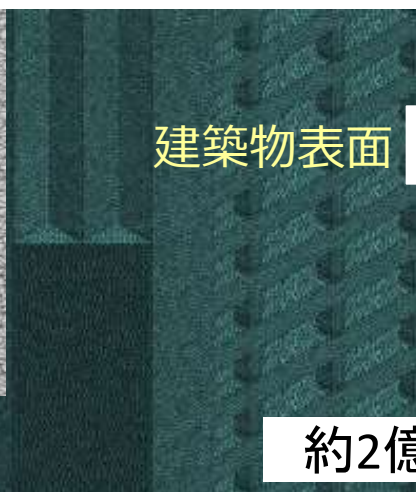
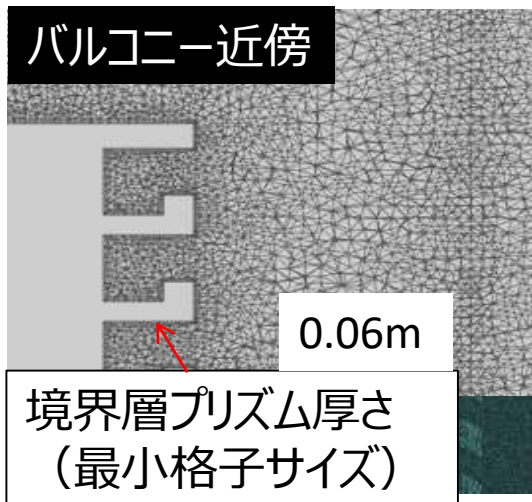
住宅棟

解析モデル



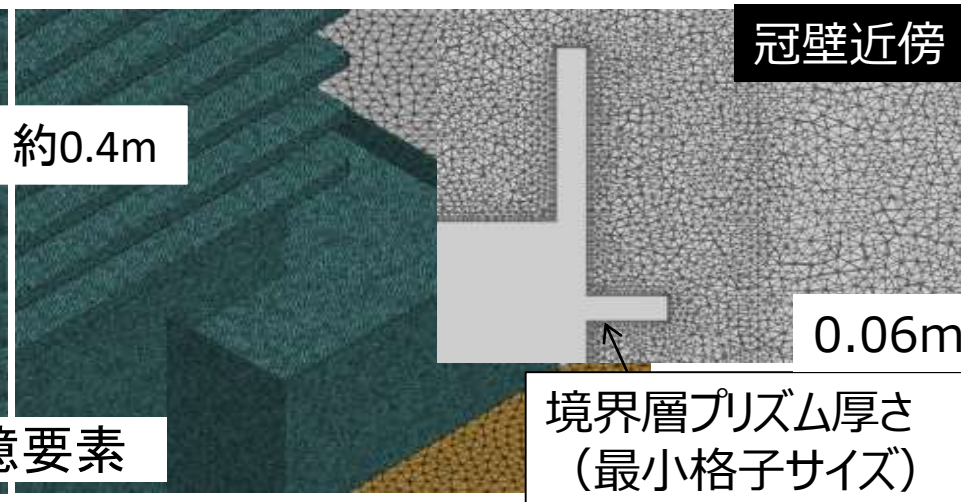
オフィス棟

バルコニー近傍



住宅棟

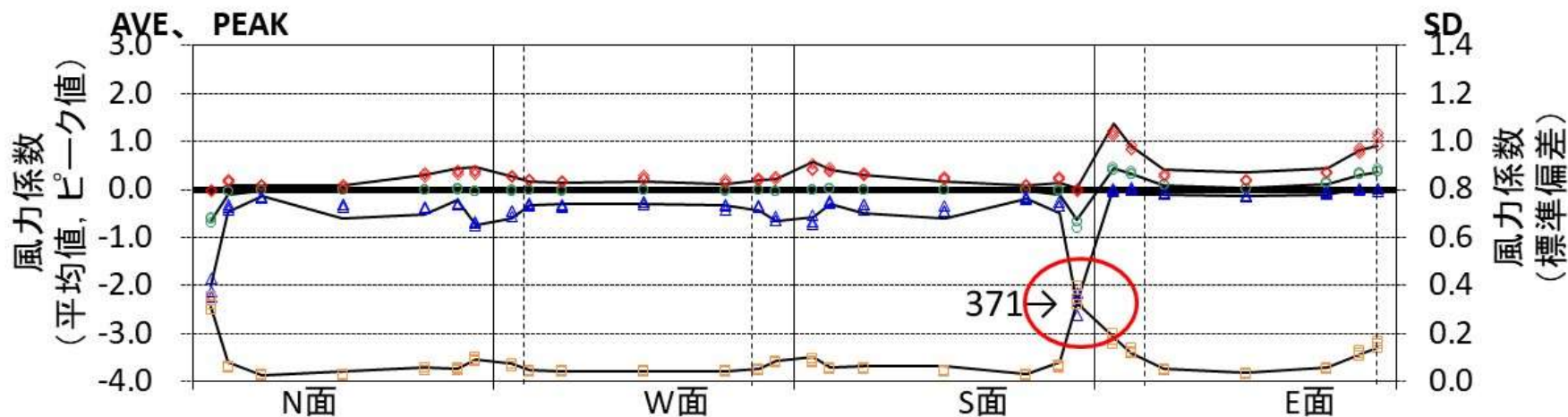
計算格子



オフィス棟

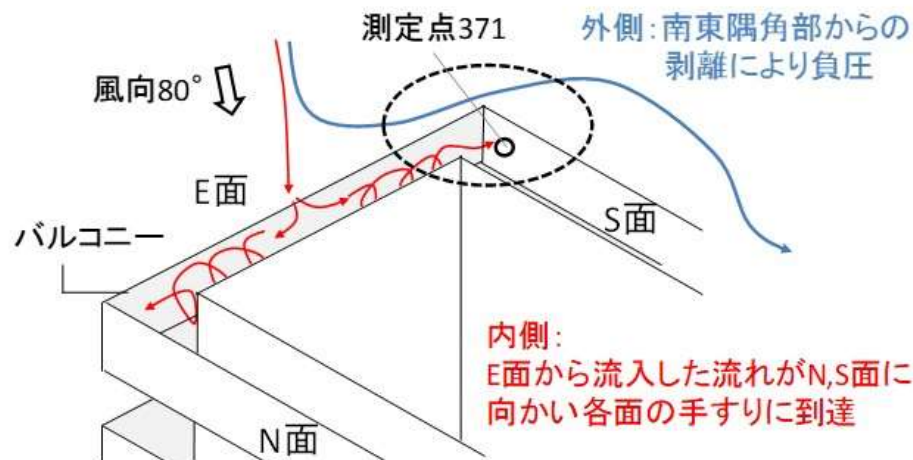
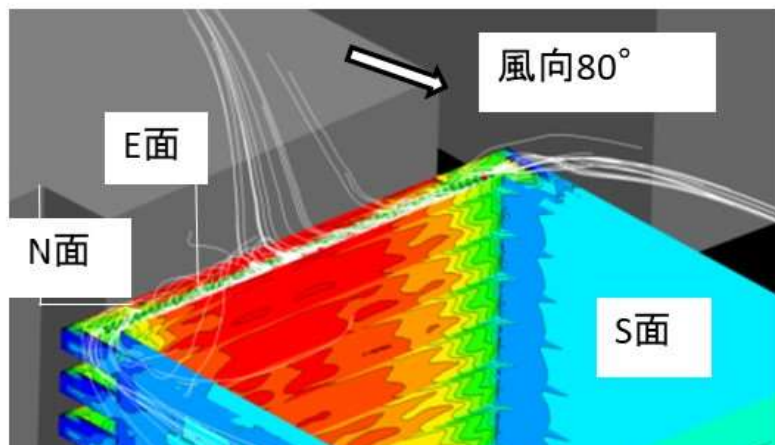
約2億要素(高精度) ⇒ 20億要素(超高精度:検証用) ⇒ 0.5億要素(実用計算)

高層住宅棟バルコニーの風力

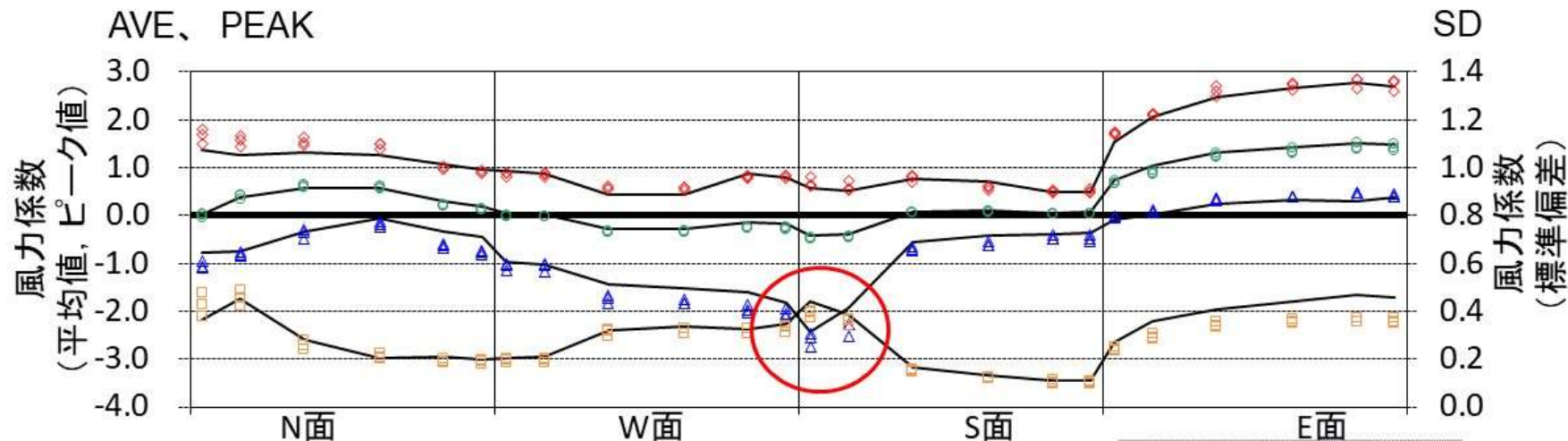


実験結果: ○平均 □変動 ◇最大 △最小 計算結果: ライン

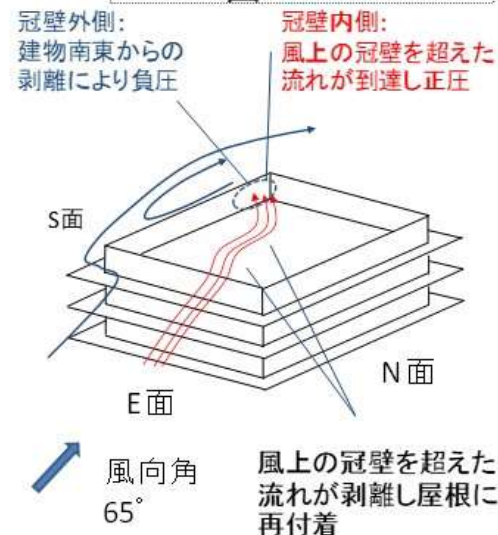
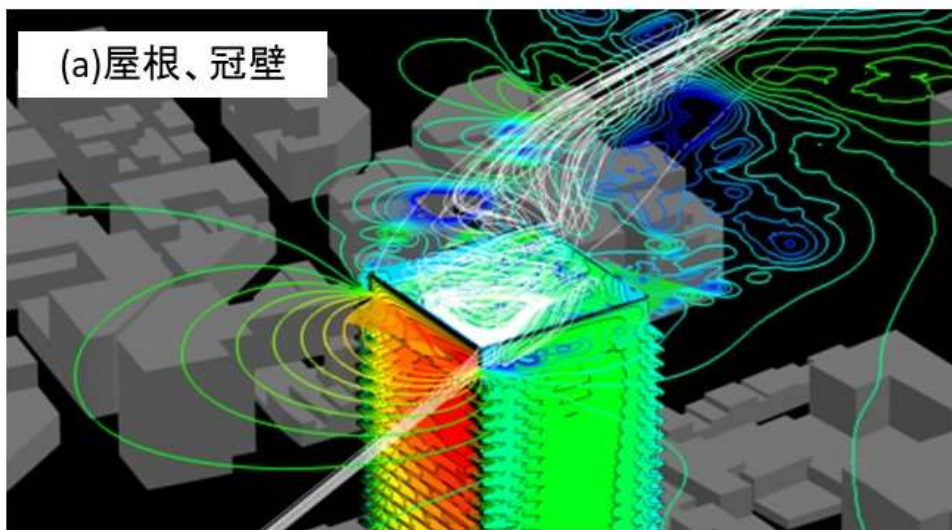
11階 バルコニー (z=40.7m)



高層オフィス棟冠壁の風力



実験結果: ○平均 □変動 ◇最大 △最小 計算結果: ライン



(2) 重点課題 4「観測ビッグデータを活用した 気象と地球環境の予測の高度化」での取組み

ー気象データマイニングによる局地的突風解析と
接地乱流場に基づく建築構造物の被災推定ー

平成26～31年度 ポスト「京」で重点的に取り組むべき
社会的・科学的課題に関するアプリケーション開発・研究開発

【参考文献】

Masaharu Kawaguchi, Tetsuro Tamura, Wataru Mashiko. (2020). A numerical investigation of building damage during the 6 May 2012 Tsukuba tornado using hybrid meteorological model/engineering LES method. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 204, 104254.

Kawaguchi, M., Tamura, T., & Kawai, H. (2019). Analysis of tornado and near-ground turbulence using a hybrid meteorological model/engineering LES method. International Journal of Heat and Fluid Flow, 80, 108464.

川口真晴, 河合英徳, 田村哲郎, 益子渉. (2019). 2018年台風21号における大阪市街地の強風・風圧力特性-気象モデル・工学LESの適用-. 第33回数値流体シンポジウム

地表による竜巻渦下層の運動

渦の可視化: 圧力等値面(-55hPa)

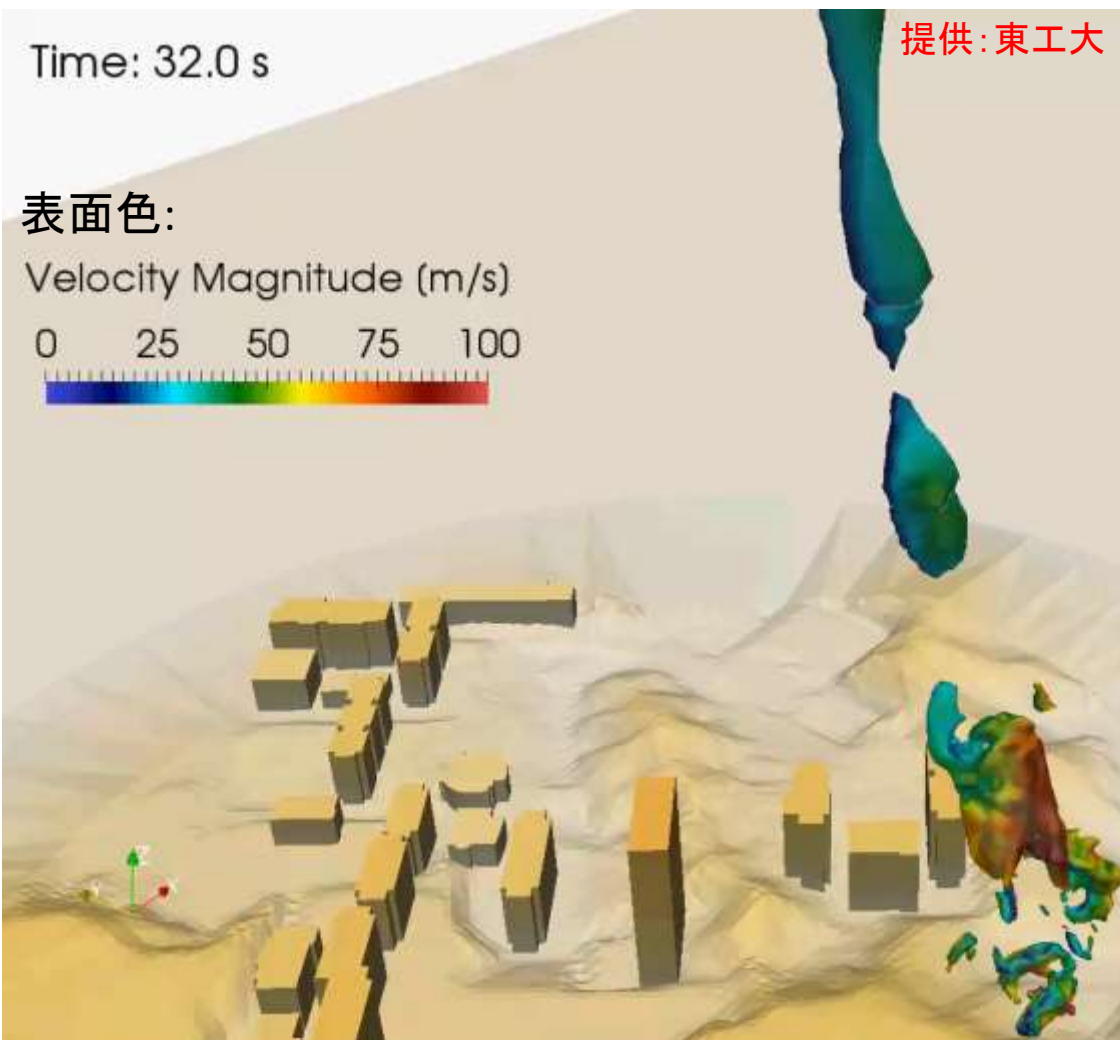
Time: 32.0 s

提供: 東工大

表面色:

Velocity Magnitude (m/s)

0 25 50 75 100



階層型直交格子ソルバー-CUBE



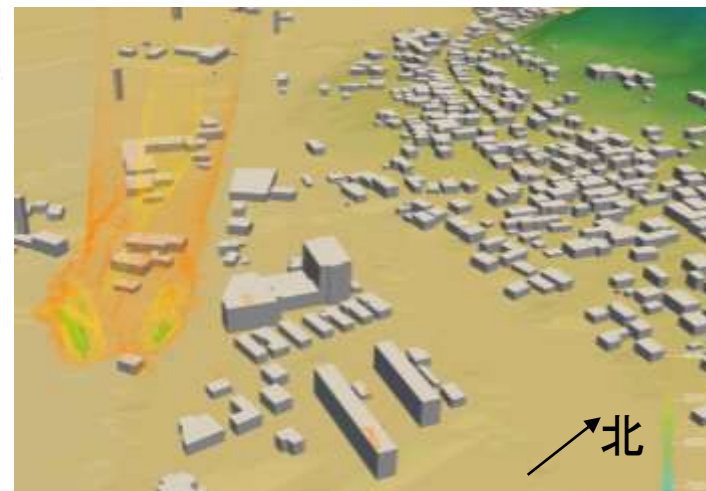
- ・ 渦が大きく揺動しながら移動
- ・ 経路と移動速度も大きく変化
- ・ 竜巻内部では平坦面の場合より低い圧力のピーク値が断続的に出現

- ・ 低圧部は地表や建物にきわめて局所的に作用する

つくば竜巻の実経路での計算

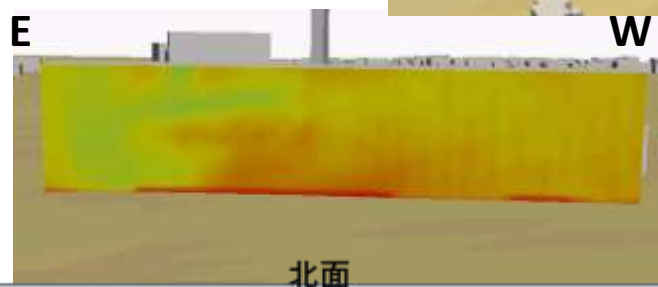
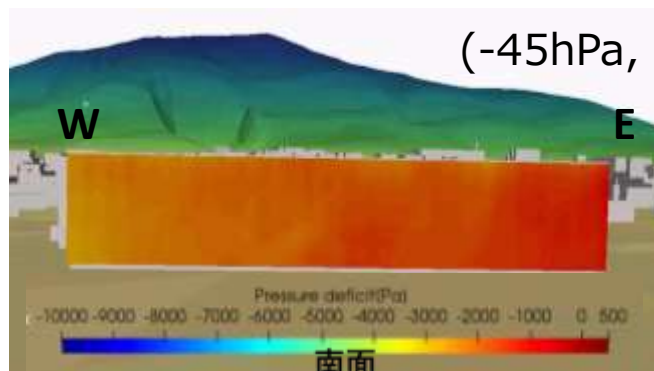


大きな被害を生じた
建物に作用する圧力
の推定



3次元負圧分布

(-45hPa, -50hPa以下は10hPa毎)



東(E)側ほど気圧が周辺より高く相対的に正圧が働く。
裏側の窓が壊れることで更に強まったか。中央では、建
物との相互作用による瞬発的・局所的な負圧が発生。

極めて強い負圧領域が東(E)から弧を書く
ように広がる。

提供: 東工大

壁面圧力分布と窓サッシ被害[1]との比較

[1]国土技術政策総合研究所資料 建築研究資料 No.703 2013年1月, No.141



3階室内の壁に突き刺さった
木片と床に散乱したガラス
(引用:防災システム研究所HP)

つくば竜巻の実経路での計算

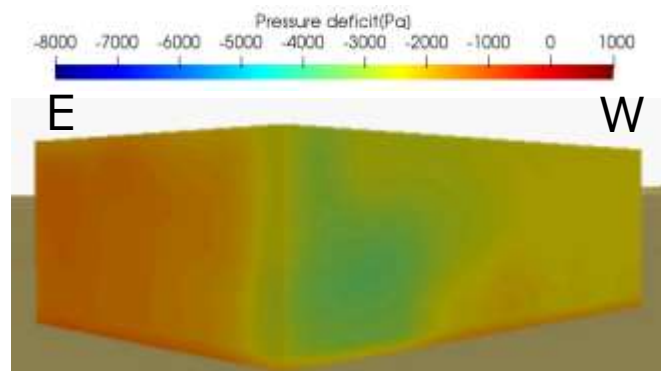


引用：国土技術政策総合研究所資料 建築研究資料 No.703 2013年1月, No.141

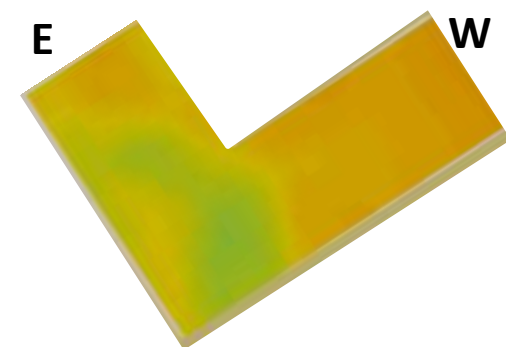
各面の圧力降下量



南面



北面



屋根面

上部構造の飛散した木造住宅の圧力による被害推定
南面と北面の間に大きな差圧(50~90kN/m²)が継続的に発生
屋根面の負圧も大きい

提供：東工大

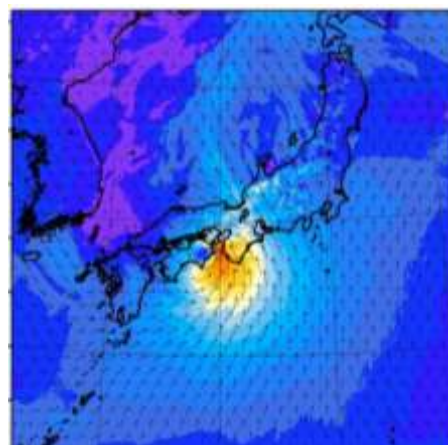
2018年台風21号における強風

気象モデルによる台風境界層の変動から市街地の細かな変動までの広範なスケールの乱れを直接に再現ができる。上空の乱れが実市街地内に発生する突風や強風に与える影響を理解し、建築物への被害発生に関する推定を行う。

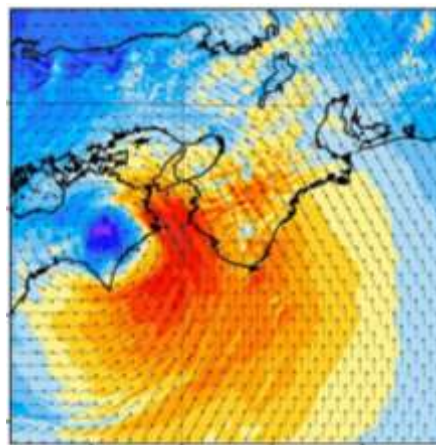
進路東側の近畿地方で記録的な暴風。最大瞬間風速の観測史上最大値を全国100地点で観測（気象庁）

死者14人、負傷者965人、住家被害(全壊59,半壊637,一部壊85,715),非住家被害8公共建物1,195,その他4,529（消防庁）

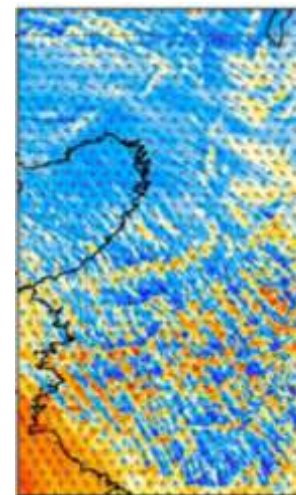
気象モデルWRFによる台風の再現(水平風速)



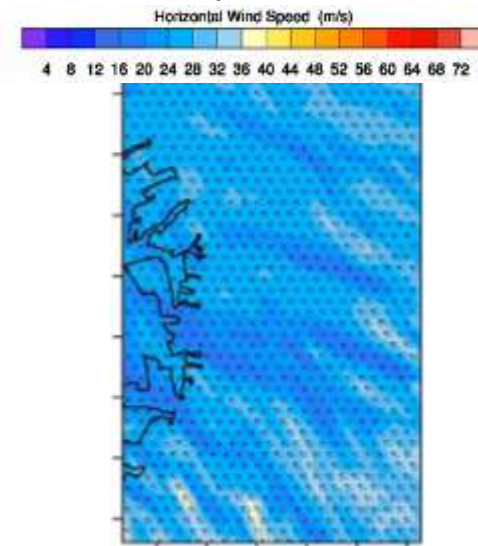
Domain 1



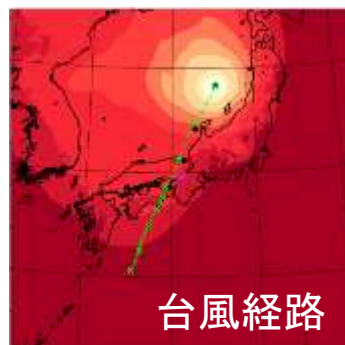
Domain 2



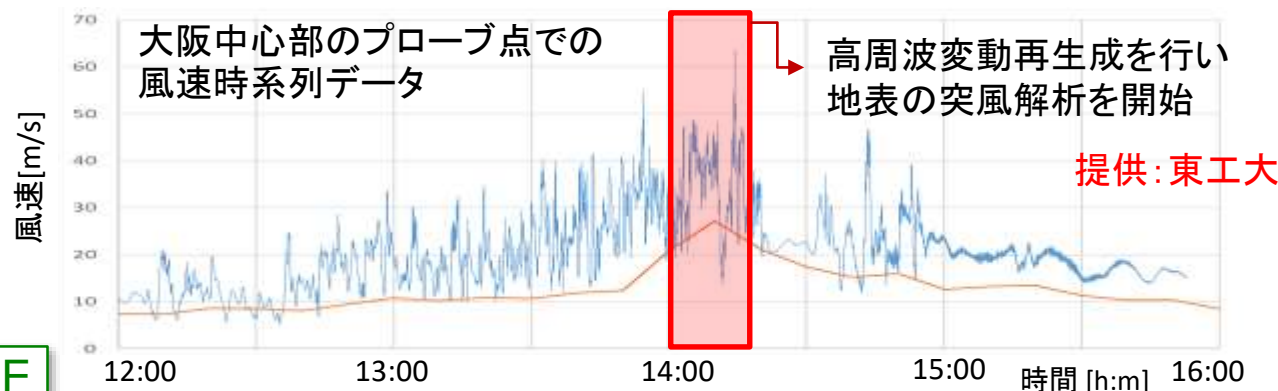
Domain 3



Domain 4



台風経路



階層型直交格子ソルバー-CUBE

大阪市内の強風の状況



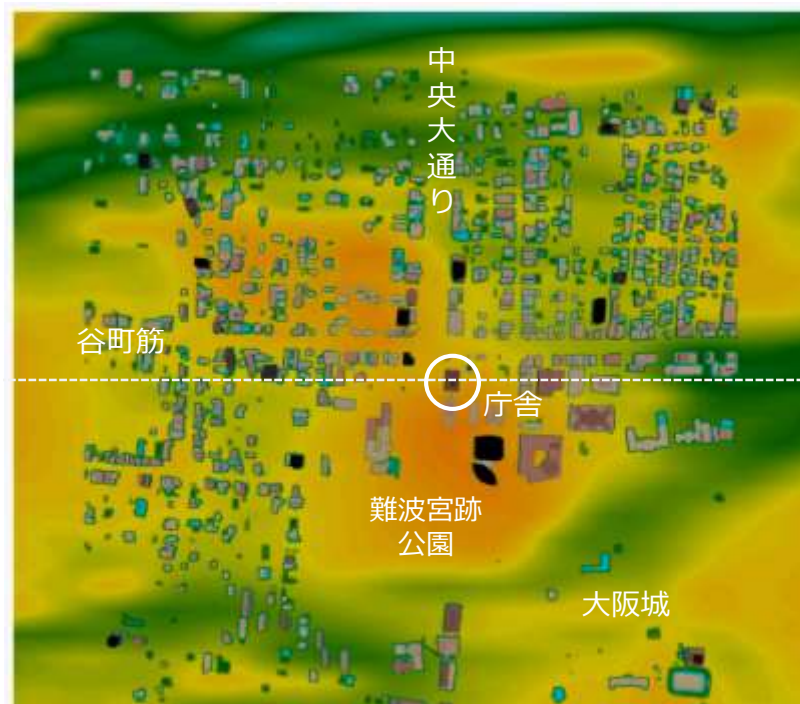
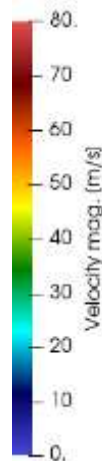
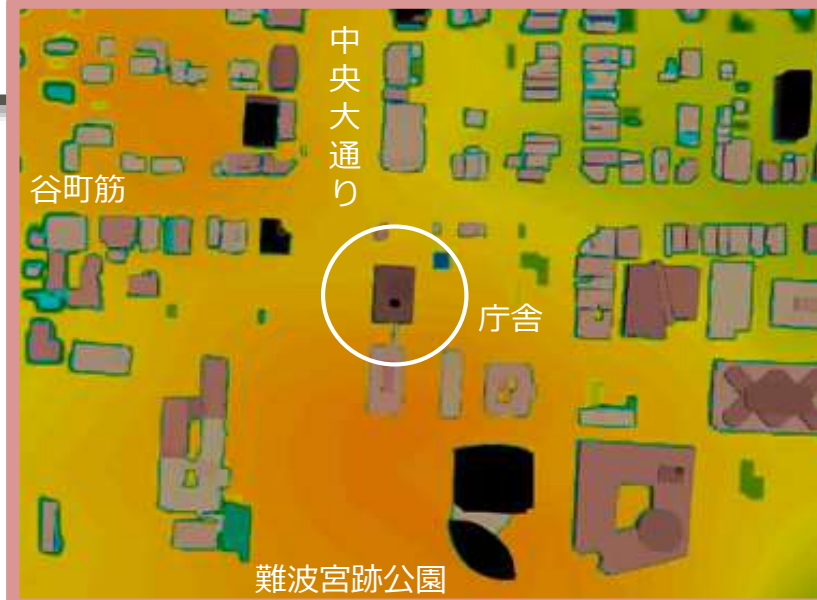
階層型直交格子
ソルバー-CUBE

2018年台風21号

国総研・建築研究所：
平成30年台風第21号に伴う強風による
建築物等被害現地調査報告(速報)

提供：東工大

大阪管区気象台 (庁舎から2.5km東, 地上高さ24m)
最大風速27.3m/s 最大瞬間風速が47.4m/s



1. スーパーコンピューティング技術産業応用協議会
(産応協/ICSCP) のご紹介
2. ガスタービン開発における大規模流れ解析と設計利用
九州大学-川崎重工業 共同研究
3. 頻発する極端気象災害に対する都市・建築のレジリエンス強化
建築CFDコンソーシアム(現_都市・建築CFDコンソーシアム)
(代表者) 東京工業大学教授 田村 哲郎
4. 室内環境におけるウイルス飛沫感染の予測とその対策
富岳コロナ対策飛沫感染グループ
(代表者) 理化学研究所チームリーダー/神戸大学教授
坪倉 誠

4. 室内環境におけるウイルス飛沫感染の予測と その対策

ー富岳コロナ対策飛沫感染グループでの取組みー

ステアリングメンバー



National Univ. of Singapore

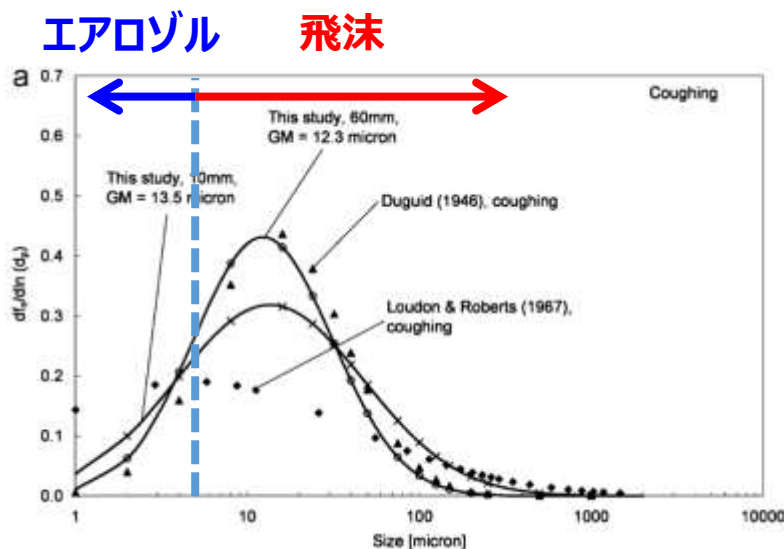
【参考文献】

坪倉 誠. (2020). 特別講演「富岳による新型コロナ飛散・エアロゾル感染シミュレーション」. 第34回数値流体力学シンポジウム CFD34

- ・理化学研究所(理研)は、文部科学省と連携し、新型コロナウイルス対策に貢献する成果をいち早く創出するために、開発・整備の途上であるスーパーコンピュータ「富岳」の計算資源を関連研究開発に供出することを決定(4/7)。
- ・4/7のプレスリリースを受け、理化学研究所坪倉チームが飛沫シミュレーションに取り組むことを決め、産学官の研究者に参加を要請。4/10の初回ネット会議でプロジェクトへの応募を決定。4/24に理研と文科省によりプロジェクト「室内環境におけるウイルス飛沫感染の予測とその対策」が正式採択された。

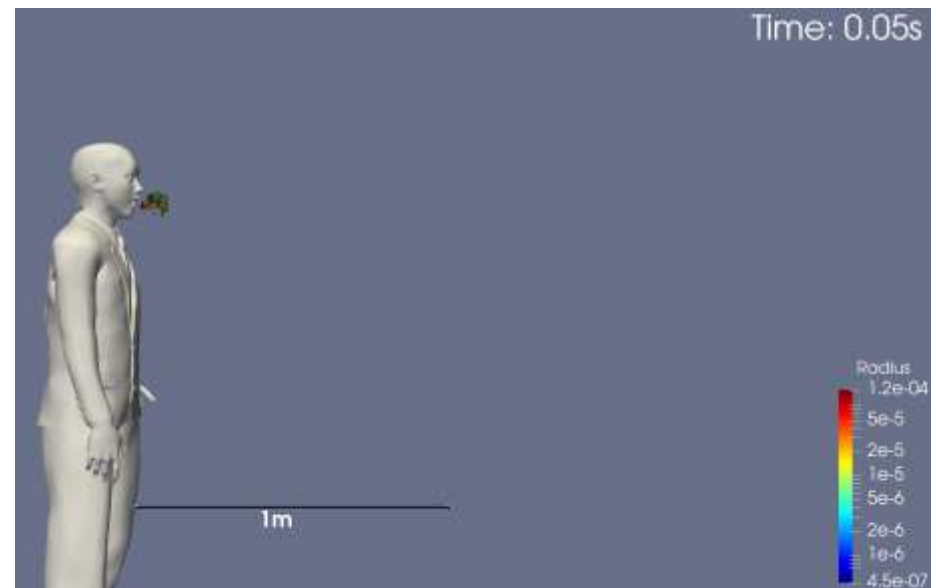
- ・ウイルス飛沫の飛散、拡散経路を空気と粒子の運動シミュレーションで予測する。
 - ・「富岳」の能力を活用して、詳細な物理モデル(蒸発、壁付着等)を用い、様々な状況や条件を調べ、感染リスク低減のための対策を検討する。
 - ・目に見えない飛沫を可視化し、社会に発信することで、飛沫に対して正しい理解と感染予防の啓発を行う。
 - ・闇雲に恐れさせず、必ずリスク低減のための対策と対にして発信する。
- 飛沫飛散の特性、マスクの効果、通勤列車、オフィス、学校教室、体育館、病室、音楽ホール、ライブハウス、カラオケボックス、居酒屋、タクシー、救急車、バス、航空機、BBQ等に取り組み、そのデータを国、自治体、業界団体に提供し、ガイドライン策定等に活用。

- ・飛沫粒径 $5\mu\text{m}$ 未満をエアロゾル、 $5\mu\text{m}$ 以上を飛沫と定義。
- ・ $5\mu\text{m}$ 以上の大きな粒径の飛沫はほぼ1m以内で落下。
- ・ $5\mu\text{m}$ 以下のエアロゾルは空气中に滞留。
- ・大きな粒径の飛沫はマスクで捕捉し、マスクの隙間から漏れた小さな粒径の飛沫は換気等で除去するのが効果的。



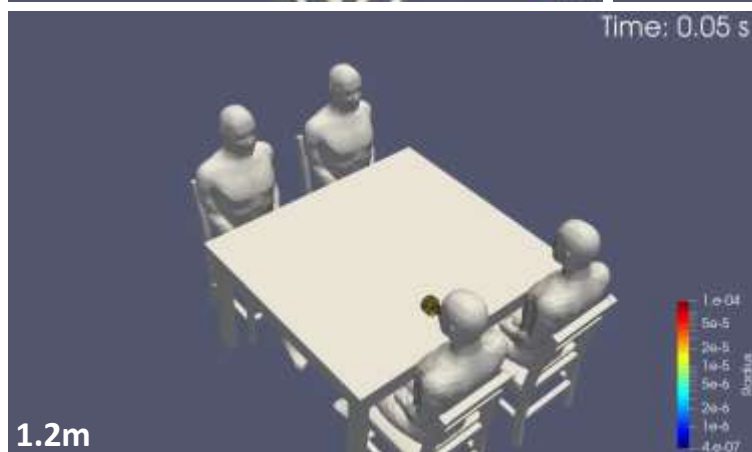
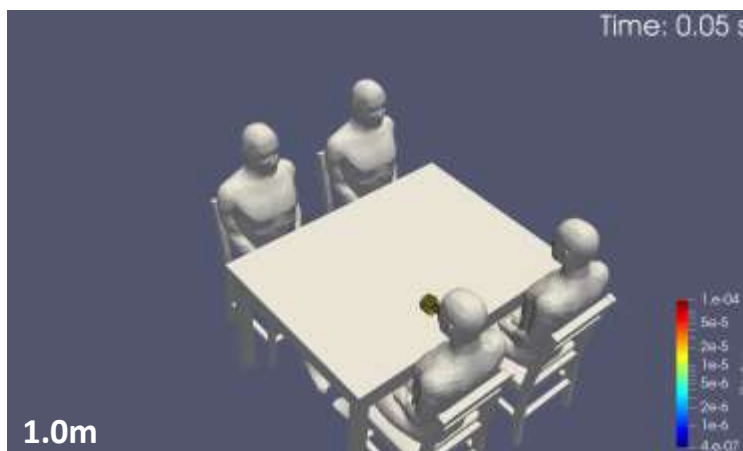
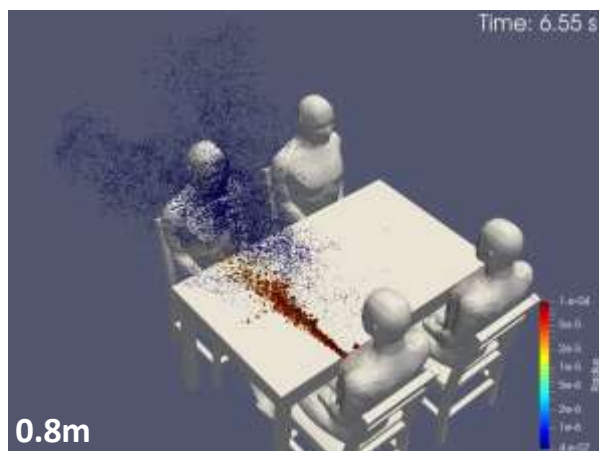
C.Y.H. Chao et al./Aerosol Science 40(2009)122-133

咳時の飛沫の粒径分布

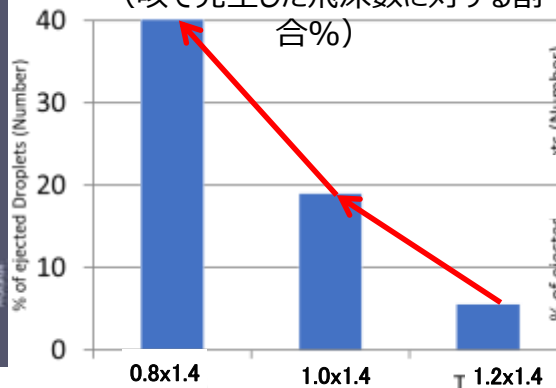


提供：理研・豊橋技科大・神戸大，協力：京工繊大・阪大

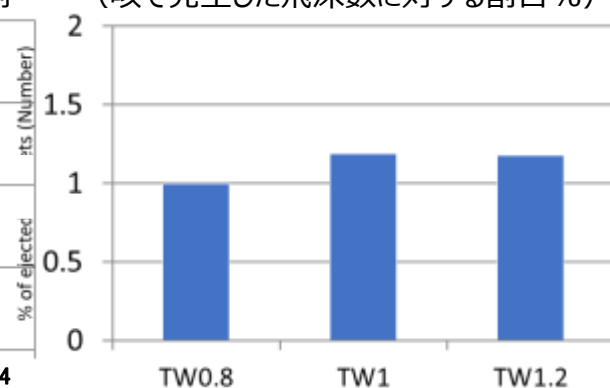
- ・真正面に感染者がいて咳をした場合、1.2m離れていれば到達する飛沫は、総飛沫数に対して5%程度であるが、1mでは20%、0.8mでは40%に達する。



真正面の人に到達する飛沫の数
(咳で発生した飛沫数に対する割合%)

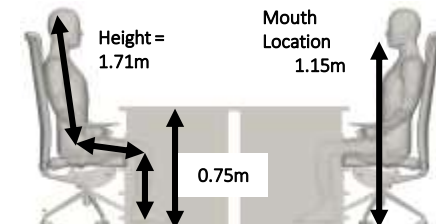
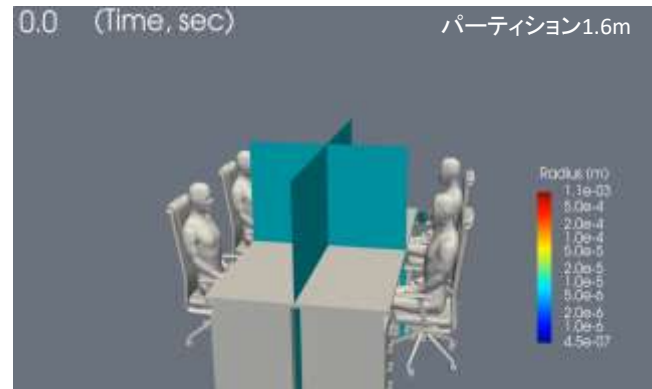
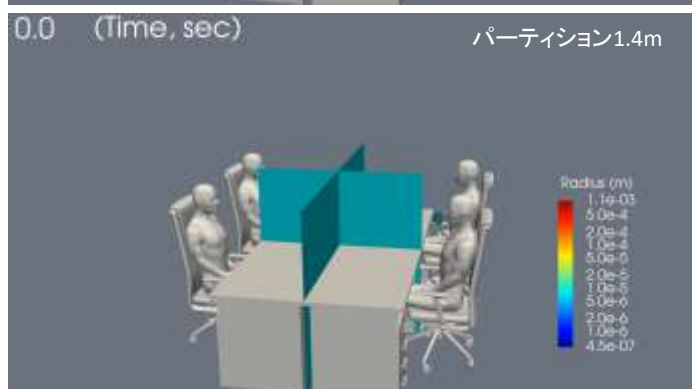
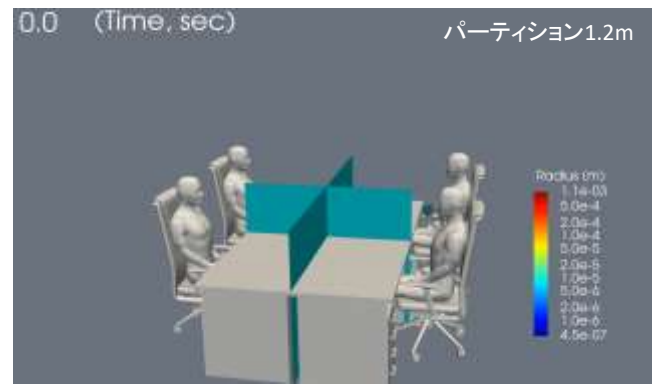
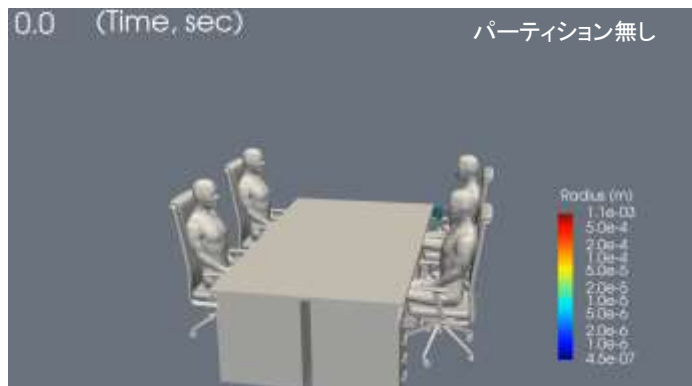


対角の人に到達する飛沫の数
(咳で発生した飛沫数に対する割合%)



パーティションの効果

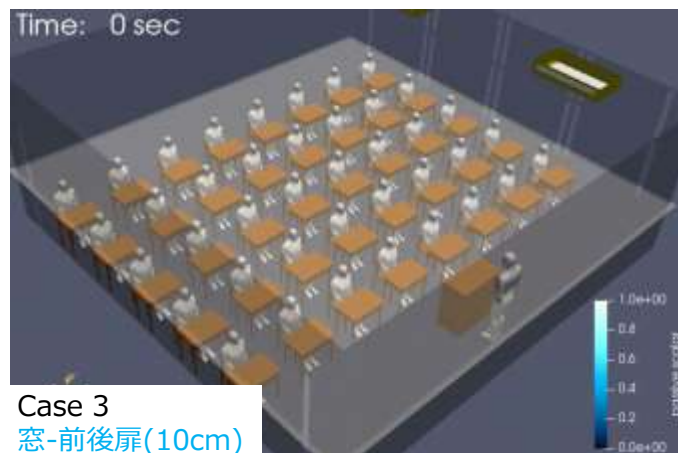
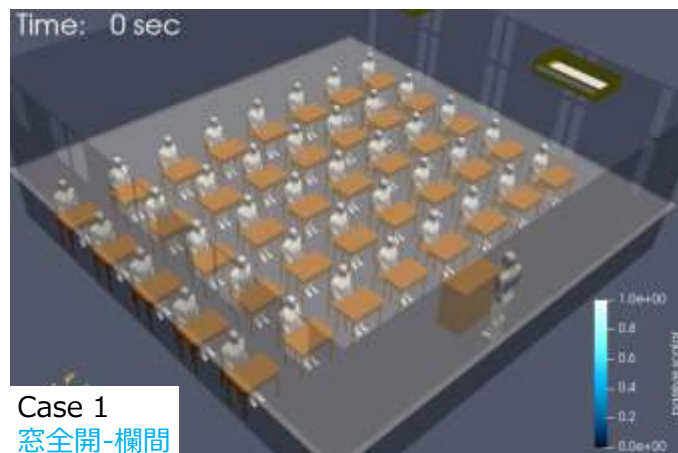
- ・飛沫やエアロゾルの飛散性状は、パーティションの高さによって変化する。
- ・高さ1.2mでは不十分であり、1.4m程度は必要であるが、1.4mと1.6mではほとんど効果は変わらない。



提供：理研・豊橋技科大，協力：京工繊大，阪大

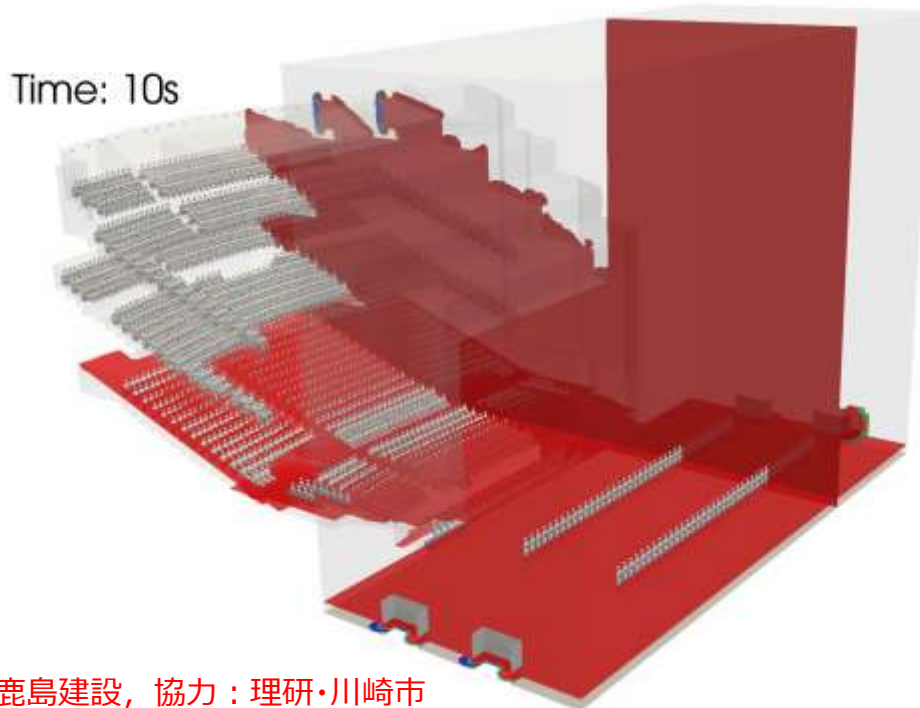
教室の窓開けの効果

- ・数種類の窓の開け方について、自然換気の効果を確認。冷暖房効率を考えると対角位置の窓・扉を開けるのが効果的。
- ・対角窓・扉開放で約 $30\text{m}^3/\text{人}/\text{時間}$ の換気量を確保。



提供：京工繊大，協力：神戸大，鹿島建設，理研

- 大規模な多目的ホール(約14,000m³)に2,000人程度の観客が着席した状態で、空調設備による換気性能の評価を行い、ホールにおけるエアロゾル感染に対するリスクを評価。
- 客席下のエアコンから清浄な空気を送り込むことで客席から換気が進み、数分で客席は清浄化。客席と比較してステージ上の換気がやや悪いが、全体的に良好な換気が維持される。



提供：神戸大・鹿島建設，協力：理研・川崎市

鉄道車両の換気

- 混雑時、窓を開けることで車内の換気が促進される。換気は車内上面の中央から後方にかけて進んで行く一方、前方空気はややよどみ気味。
- ドアが開いた瞬間、車内の空気がドア下側から排出され、車外の空気がドア上側から入り込む。列車ドア入口付近空気は勢いよく交換されるが、ドア閉め後に再び一定の濃度になるように攪拌され、窓開け5cmの結果に近くなり落ち着く。

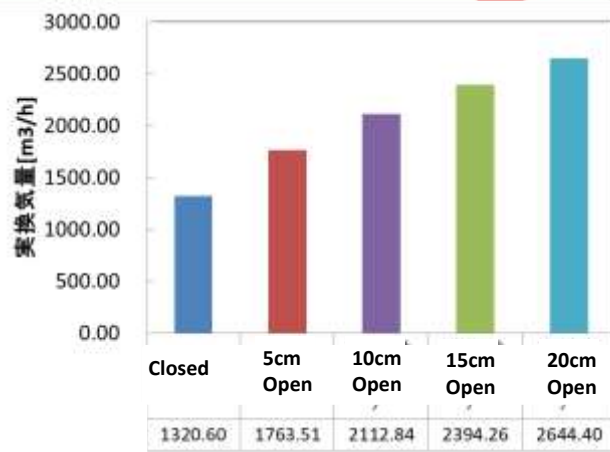
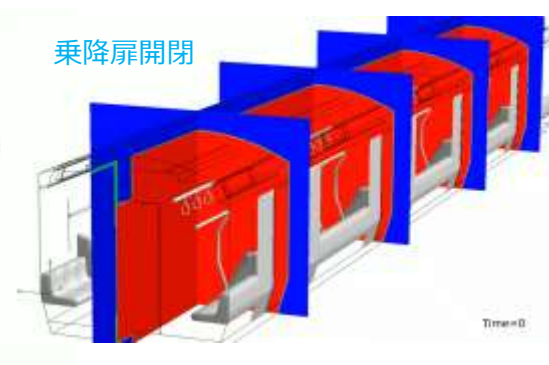
機械換気のみ



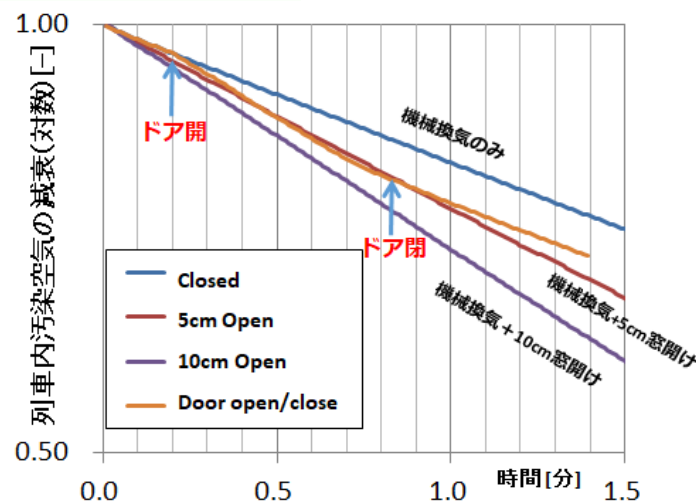
機械換気 + 窓開け



乗降扉開閉



山手線先頭車両（窓4か所、扉6か所）、時速80キロ走行時の窓開け（5, 10, 15, 20cm）、停車時の扉開閉（開放時間30秒）

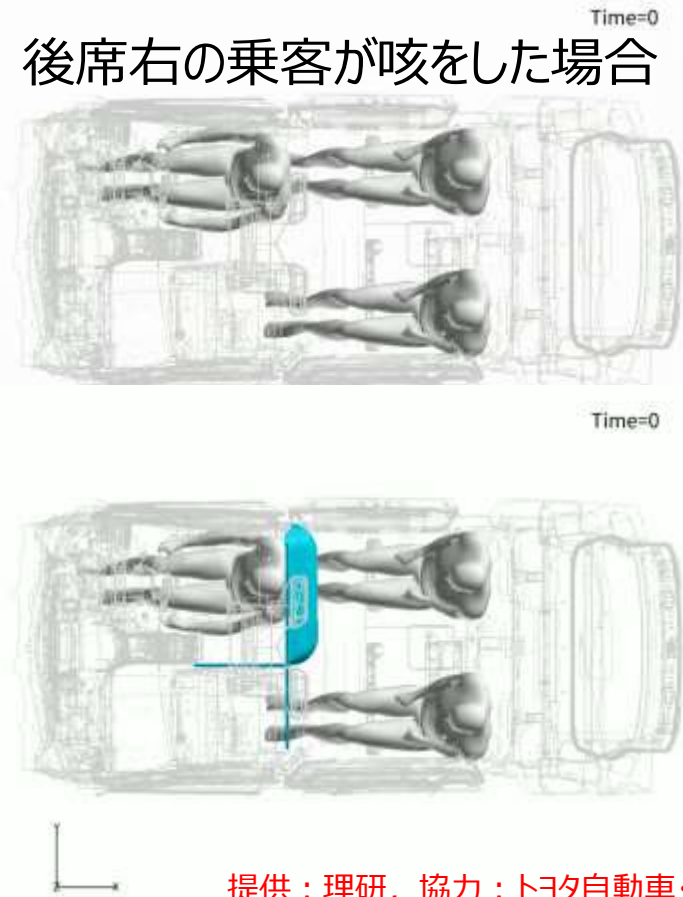
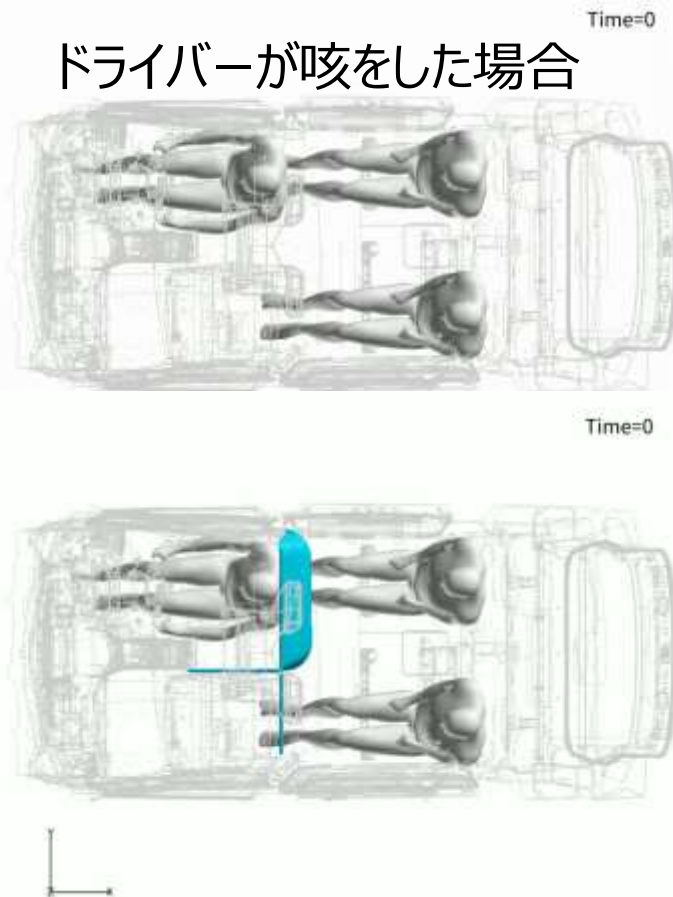


提供：理研，協力：国交省・豊橋技科大・鹿島建設

タクシー車内の飛沫飛散

- ・パーティションが無い場合、ドライバーと乗客のどちらが咳をしても、速やかに車内に飛沫が飛散。
- ・パーティションが有る場合は、飛沫はそれぞれのブロックに留まり、社内全体への拡散は抑えられる。

パーティション無し
パーティション有り



提供：理研，協力：トヨタ自動車・国土交通省

航空機客室の飛沫飛散

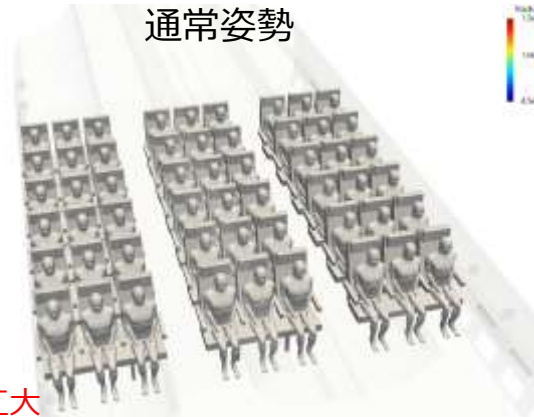
- ・換気の評価(50% 外気、50% HEPAフィルター循環)と咳時の飛沫飛散の様子。

リクライニング姿勢

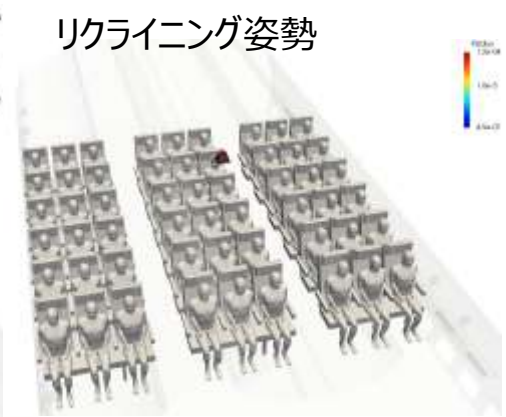


Time: 0.0 s

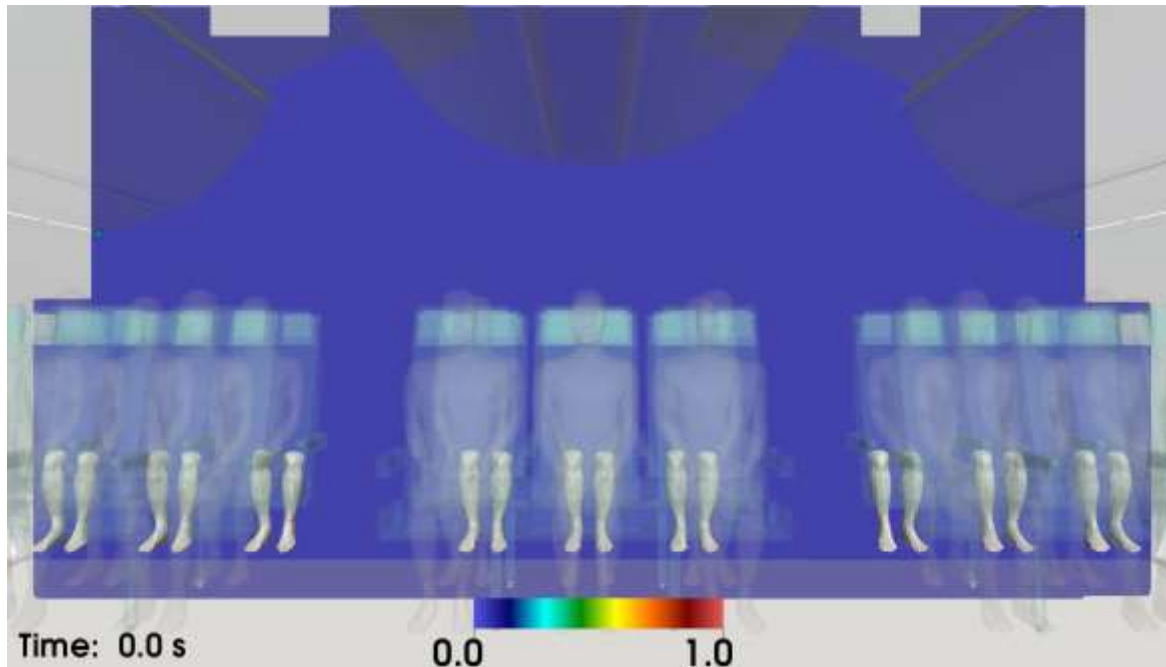
通常姿勢



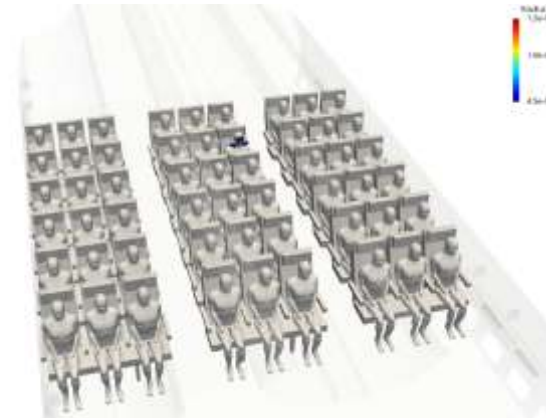
リクライニング姿勢



提供：理研・神戸大，協力：日本航空・豊橋技科大・東工大



Time: 0.1 s



リクライニングでマスク着用