



先駆的科学計算に関するフォーラム 2015

～ 先端的計算科学研究プロジェクト成果報告 ～

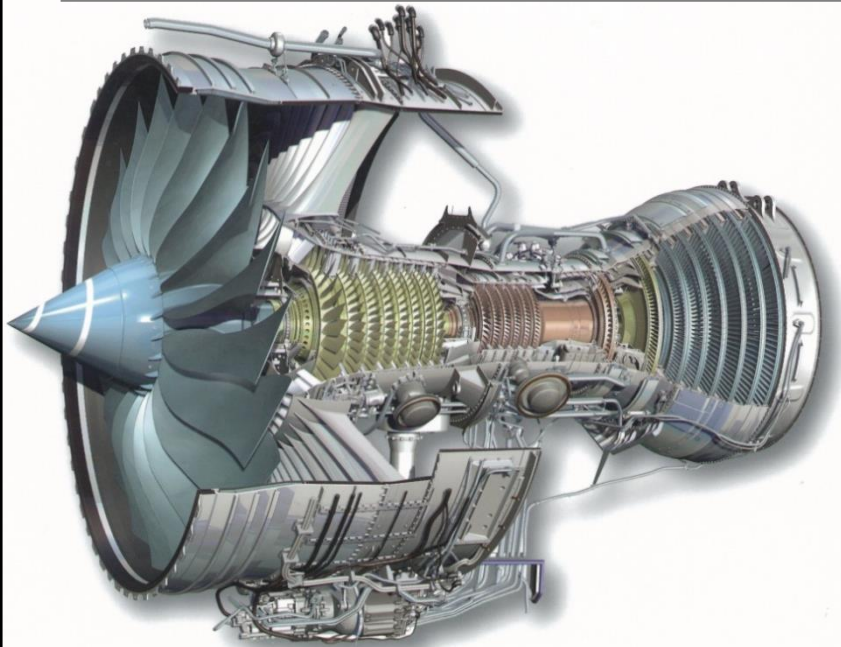
遷音速軸流圧縮機の失速点近傍 における不安定流動現象の解明

九州大学
工学研究院機械工学部門
古川 雅人

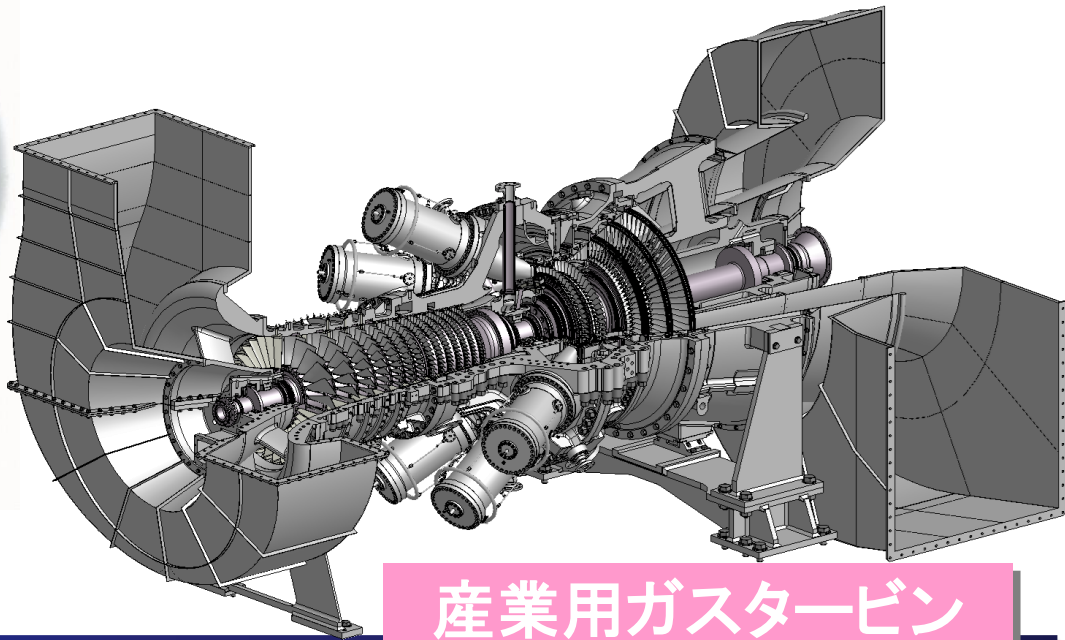
*Kyushu University
Department of
Mechanical Engineering
Fluids Engineering Science Lab.*

多段軸流圧縮機

- 航空機用・産業用ガスタービンの主要構成要素のひとつ
- ガスタービンの熱効率向上を企図して多段軸流圧縮機の高圧力比化が進む
⇒ 多段圧縮機の各翼列あたりの空力負荷が増大



航空機用ガスタービン



産業用ガスタービン

目的: 遷音速軸流圧縮機の失速近傍流れ

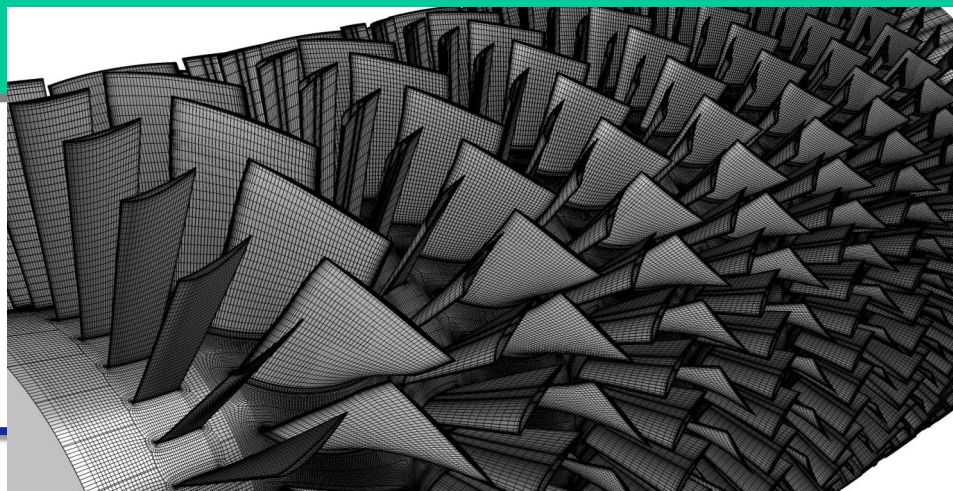
- 翼列あたりの空力負荷の増大:
 - 動翼列回転速度の高速化
⇒ 遷音速流れ場の形成
(亜音速流れと超音速流れの混在)
 - 圧縮機翼列での失速が発生しやすい

研究目的



- ガスタービンに用いられる遷音速軸流圧縮機について失速点近傍における不安定流動現象を解明する
 - 遷音速段を含む多段軸流圧縮機の全周を対象
 - DES (Detached Eddy Simulation) による大規模計算
 - 知的可視化による流動現象の抽出
 - 計測が困難な不安定流動現象 (旋回失速) を解析する

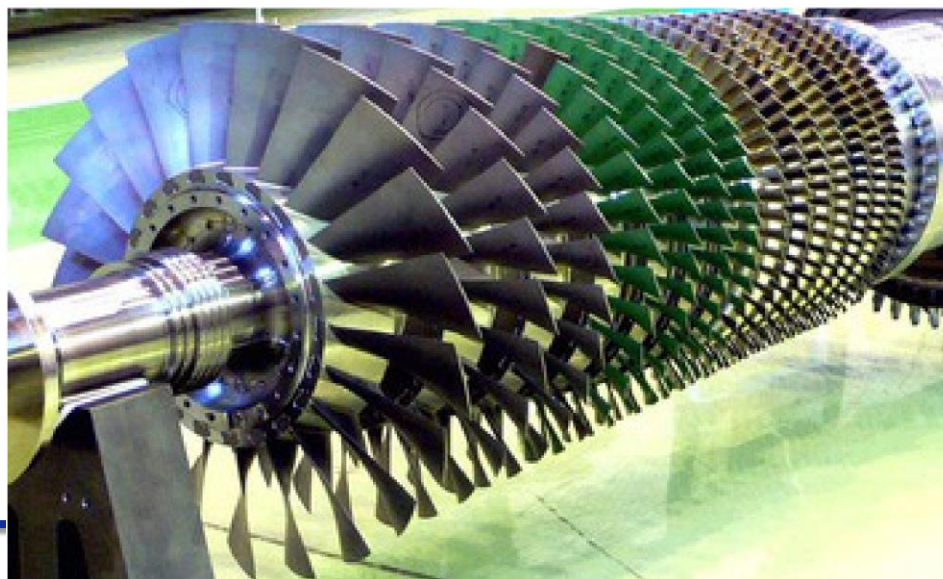
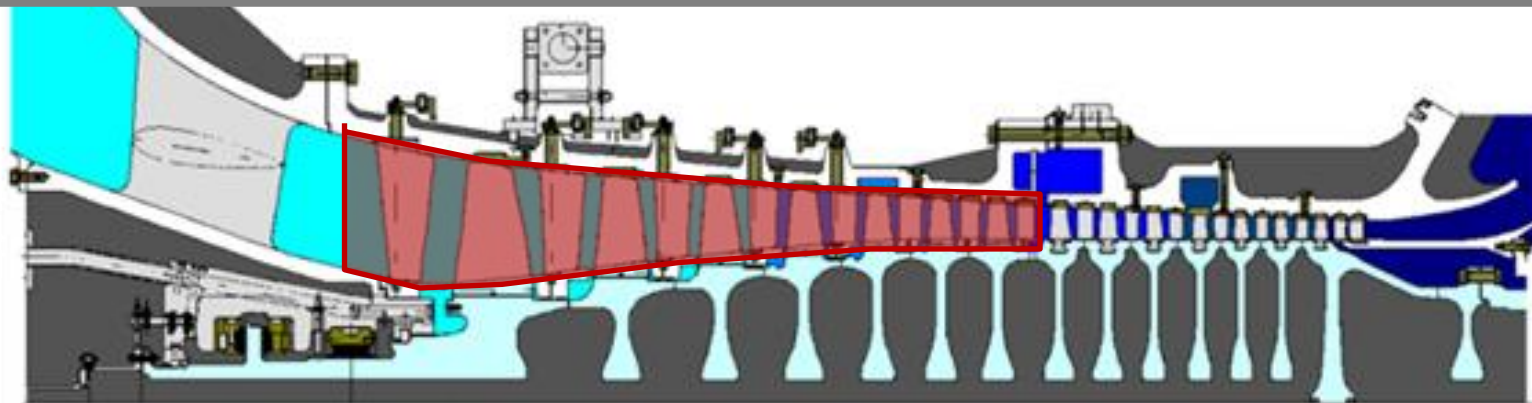
- 計算スキーム
 - 緩和形陰的高解像度風上スキーム
 - k - ω 二方程式乱流モデルに基づいたDES (Detached Eddy Simulation) 計算
- 知的可視化
 - 特異点理論に基づいた渦構造の同定
 - LIC (Line Integral Convolution) 法による限界流線のトポロジー解析
- 解析結果
 - 超大規模な計算結果データから、失速点近傍における流動現象を解析

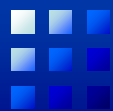




解析対象

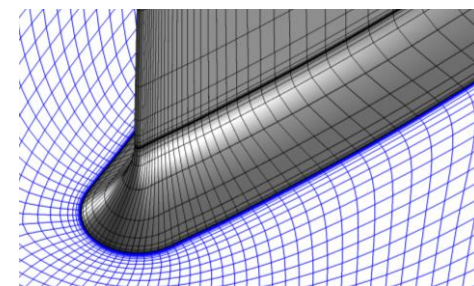
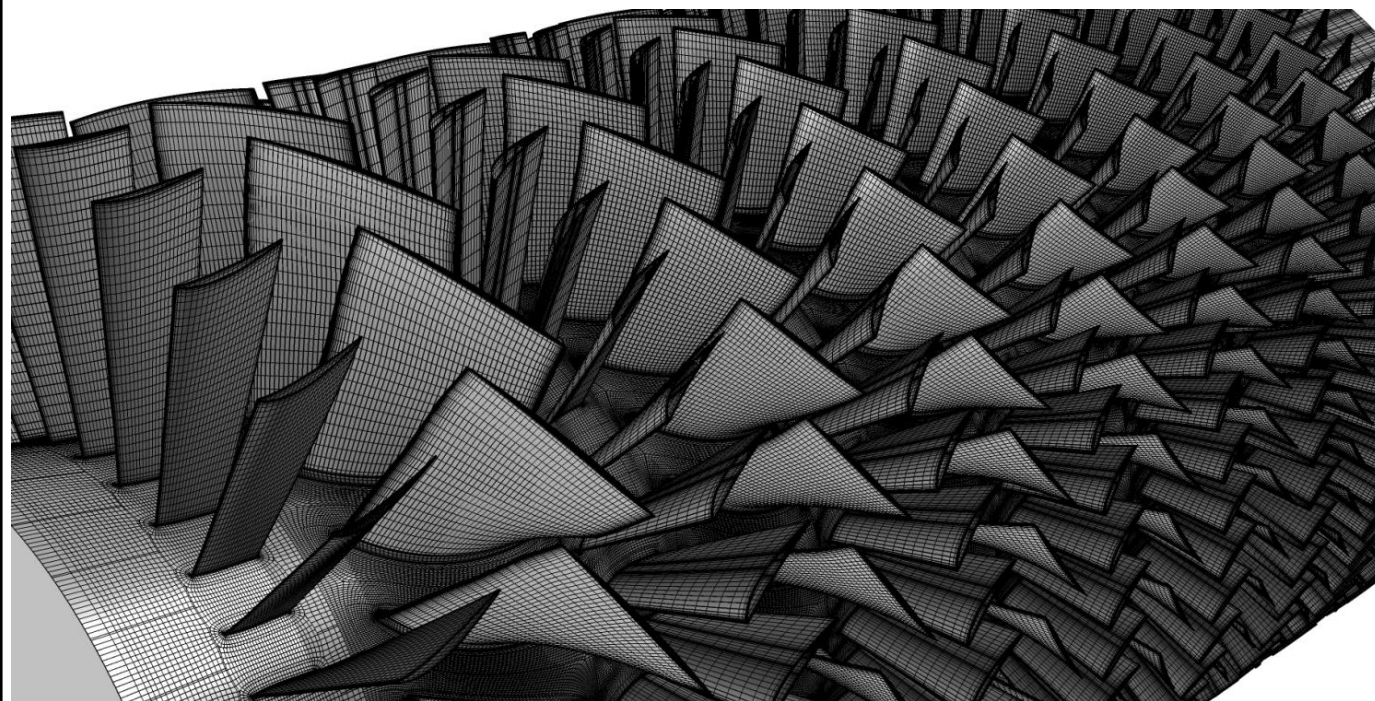
- 産業用ガスタービンの14段軸流圧縮機
 - 前半7段（入口案内羽根～7段）；前年度の課題では前方2.5段のみ
 - 全周にわたる671翼間



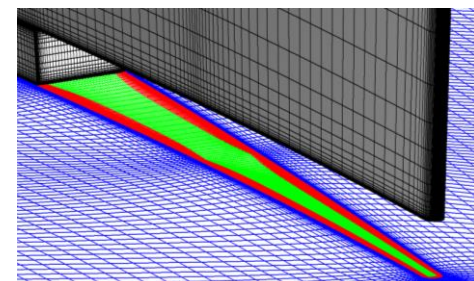


計算格子

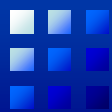
- 実機形状を忠実に再現した計算格子
 - 各翼間あたり300~600万セル × 全周(671翼間)
 - 総計算セル数=約19.1億
 - 壁面上の最小格子幅 $y^+ < 1$



フィレット



部分クリアランス



数値計算手法

数値計算手法

➤ 有限体積法

Cell-Centered法による離散化

➤ 陰的時間進行法

非粘性流束の評価

近似リーマン解法 (SHUS)

MUSCL形三次精度TVD法

粘性流束の評価

Gaussの発散定理を用いて

中心差分的に評価

➤ 乱流モデル

k- ω 2方程式モデルベースのDES

DESにおけるDES定数: CDES=1.60

➤ 緩和解法

MFGS (Matrix Free Gauss-Seidel)に

よる点緩和解法

5回のニュートン反復

➤ 時間刻み幅

動翼1回転当たり10000Step

境界条件

➤ 入口境界条件

全圧・全温・ピッチ角・ヨー角を指定

➤ 出口境界条件

質量流量を指定

➤ 壁面境界条件

セル界面における滑りなし条件を規定

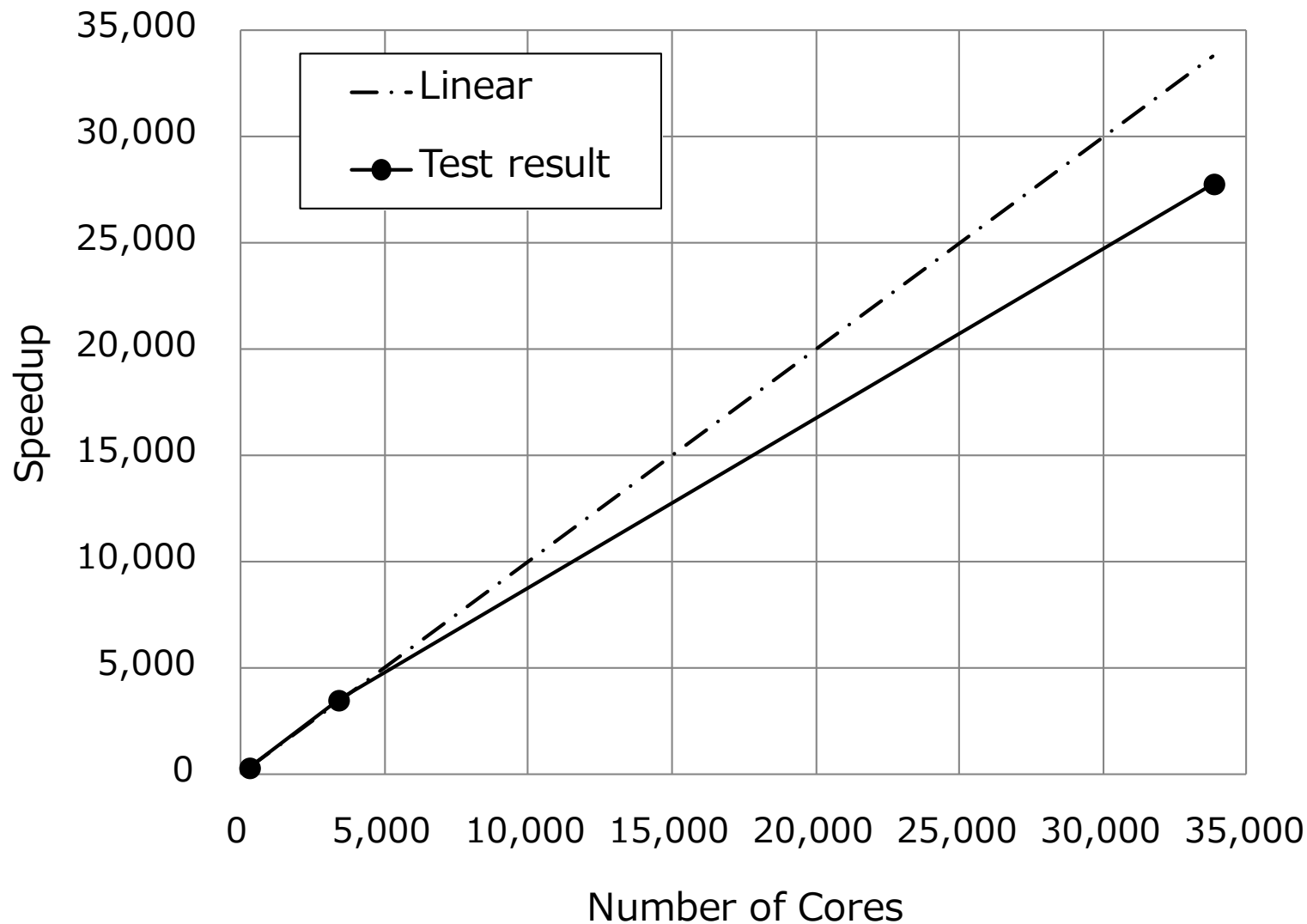
壁面仮想セルの静温は実験計測結果

に基づく分布を与える (等温条件)



並列性能の実測値

- 3万超の並列計算においても飽和せず



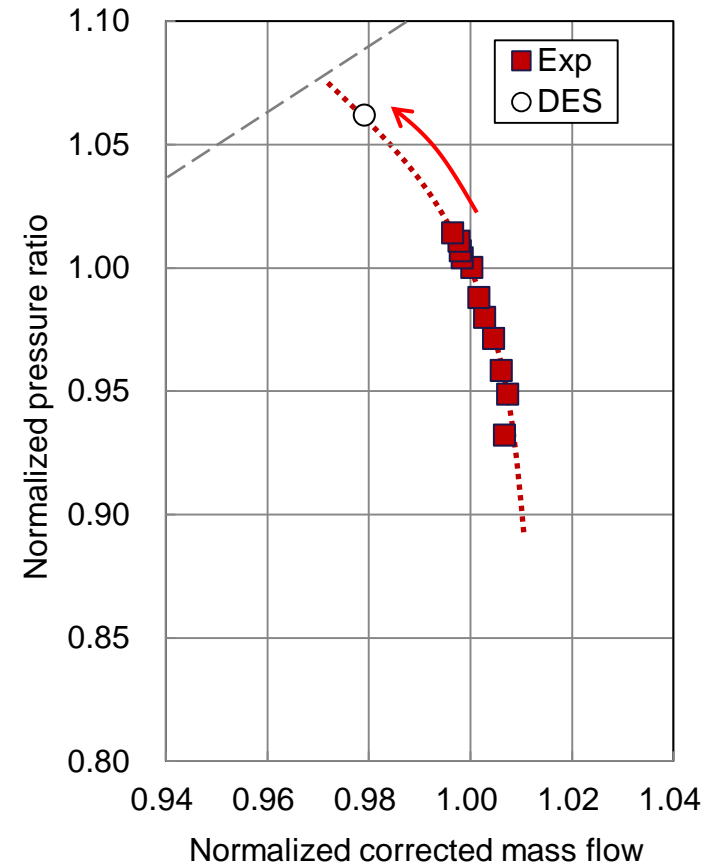
◆ 計算条件

- DESによる非定常計算
- 流量：設計点からサージ点近傍へ
徐々に絞り込む
- 回転数：100%回転数

◆ 計算時間


- 並列数：7,296並列
- 1ステップ当たりの時間：約22秒

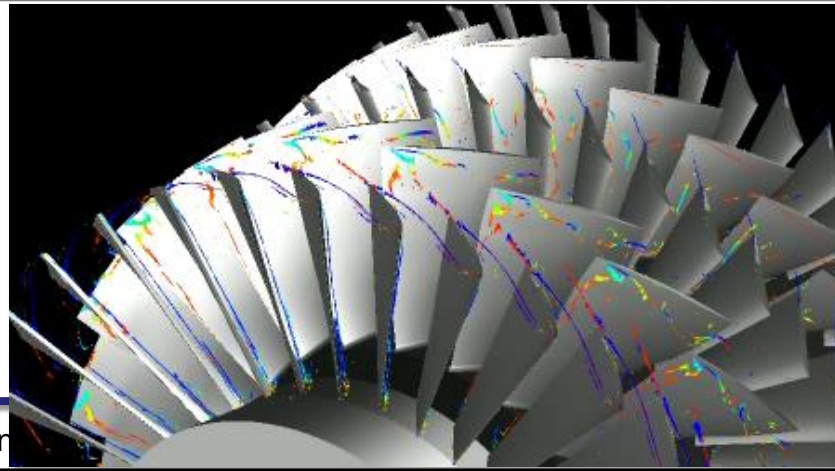
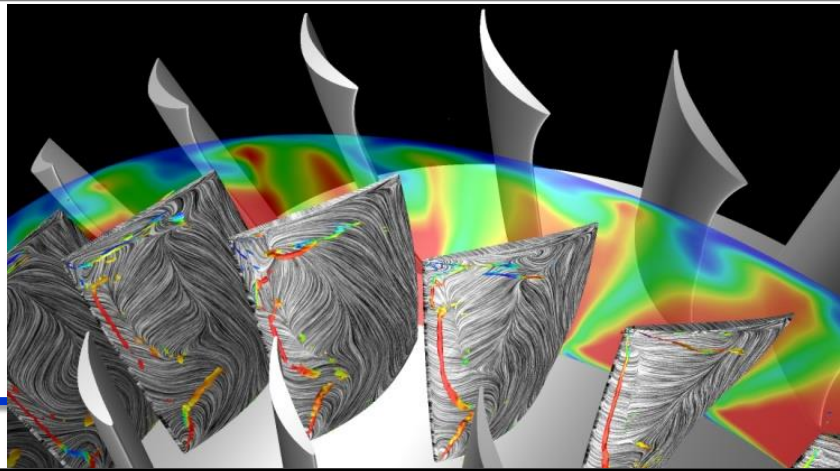
Performance map (front 7-stage simulation)





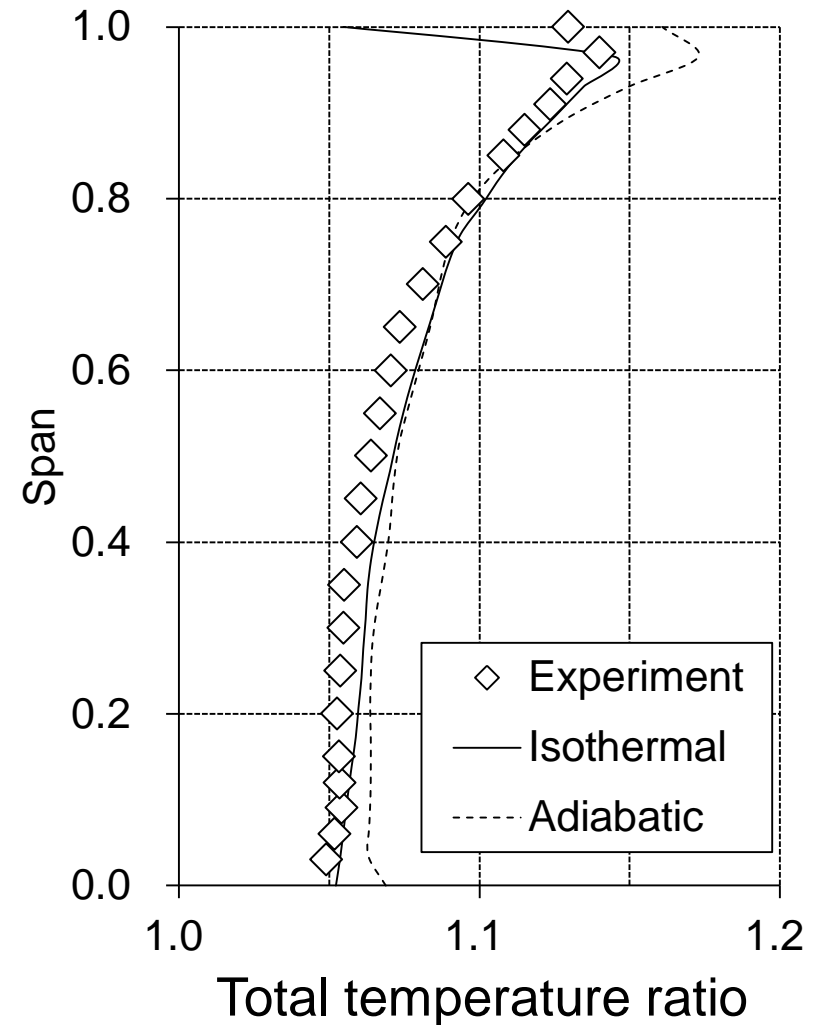
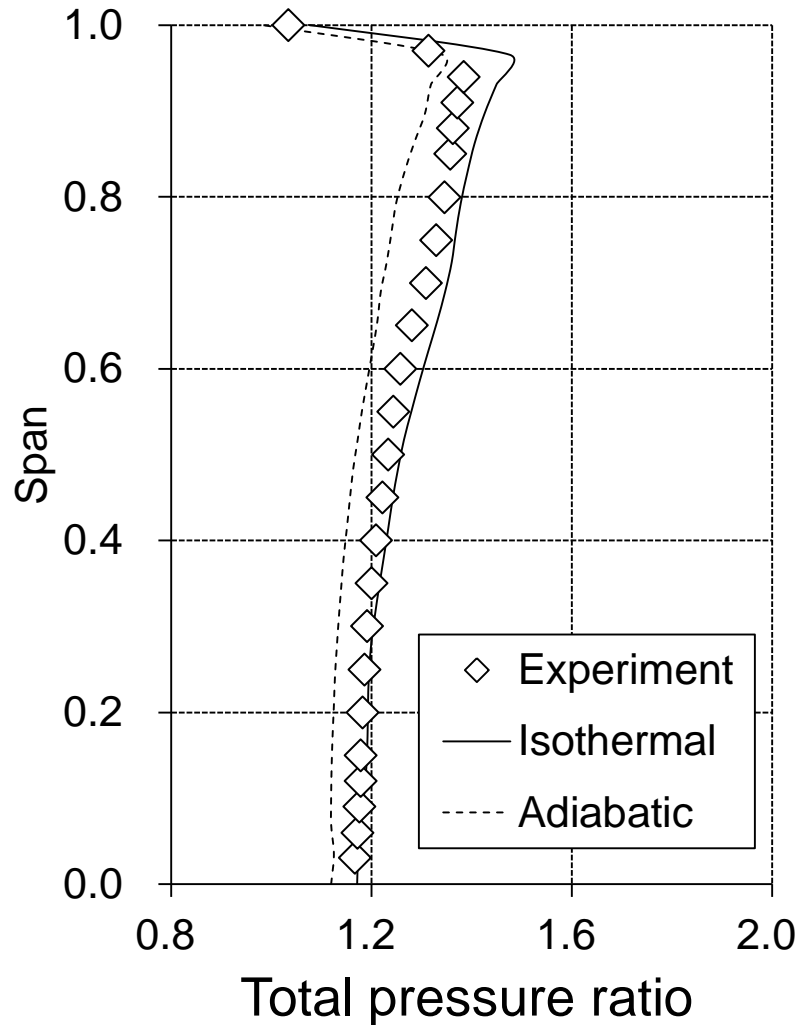
知的可視化

- 671翼間にわたる超大規模な計算結果データの出力
 - 50TB超の計算結果データ
 - 計算結果データからの流動現象の抽出が困難
 - 従来 of 可視化手法では限界(特に, 現象が未解明の場合)
 - 超大規模解析における後処理のインテリジェント化が不可欠
- 知的可視化 
 - 特異点理論に基づいた渦構造の同定
 - LIC (Line Integral Convolution) 法による限界流線のトポロジー解析
 - 超大規模な計算結果データから⇒ 失速点近傍における非定常流動現象を的確に抽出



初段動翼出口流れ (実験結果との比較)

全圧および全温分布 (実験およびDES結果)



各段の圧力比 (実験結果との比較)

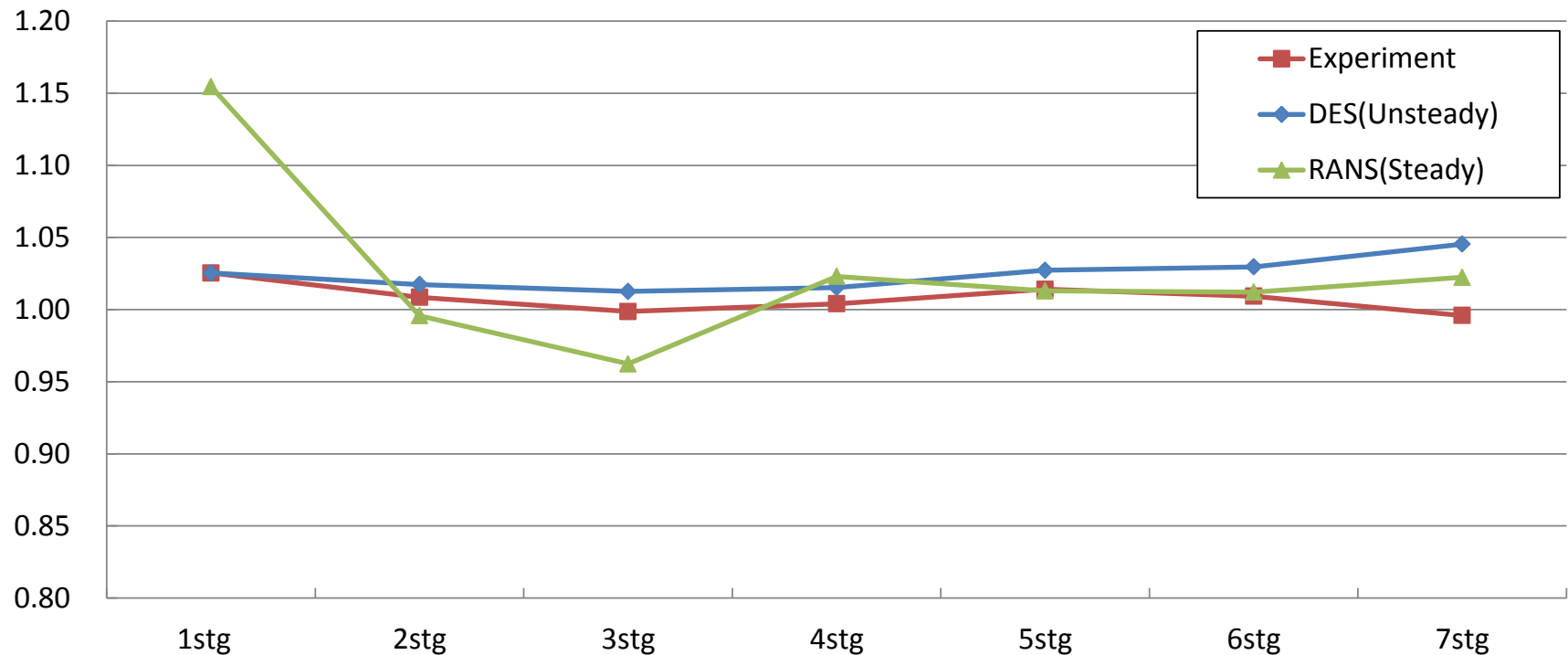
- DES解析

- 全周 (671翼間) にわたる非定常解析

- RANS解析

- DES解析と同じ計算格子の使用

- Mixing planeモデルを用いた1ピッチの定常解析

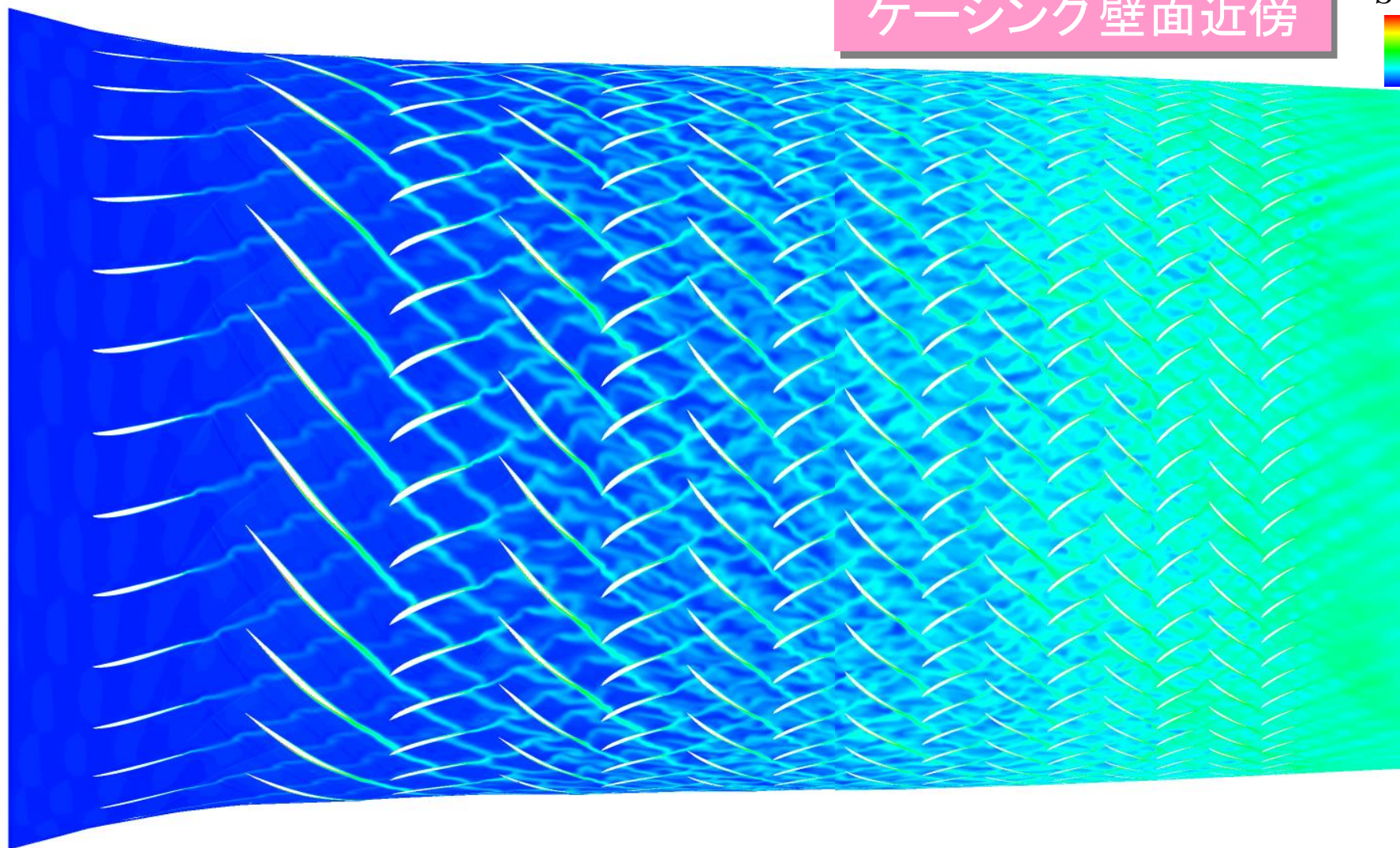




非定常流れ場(エントロピー関数分布)

ケーシング壁面近傍

S^* [-]
1.5
1.0

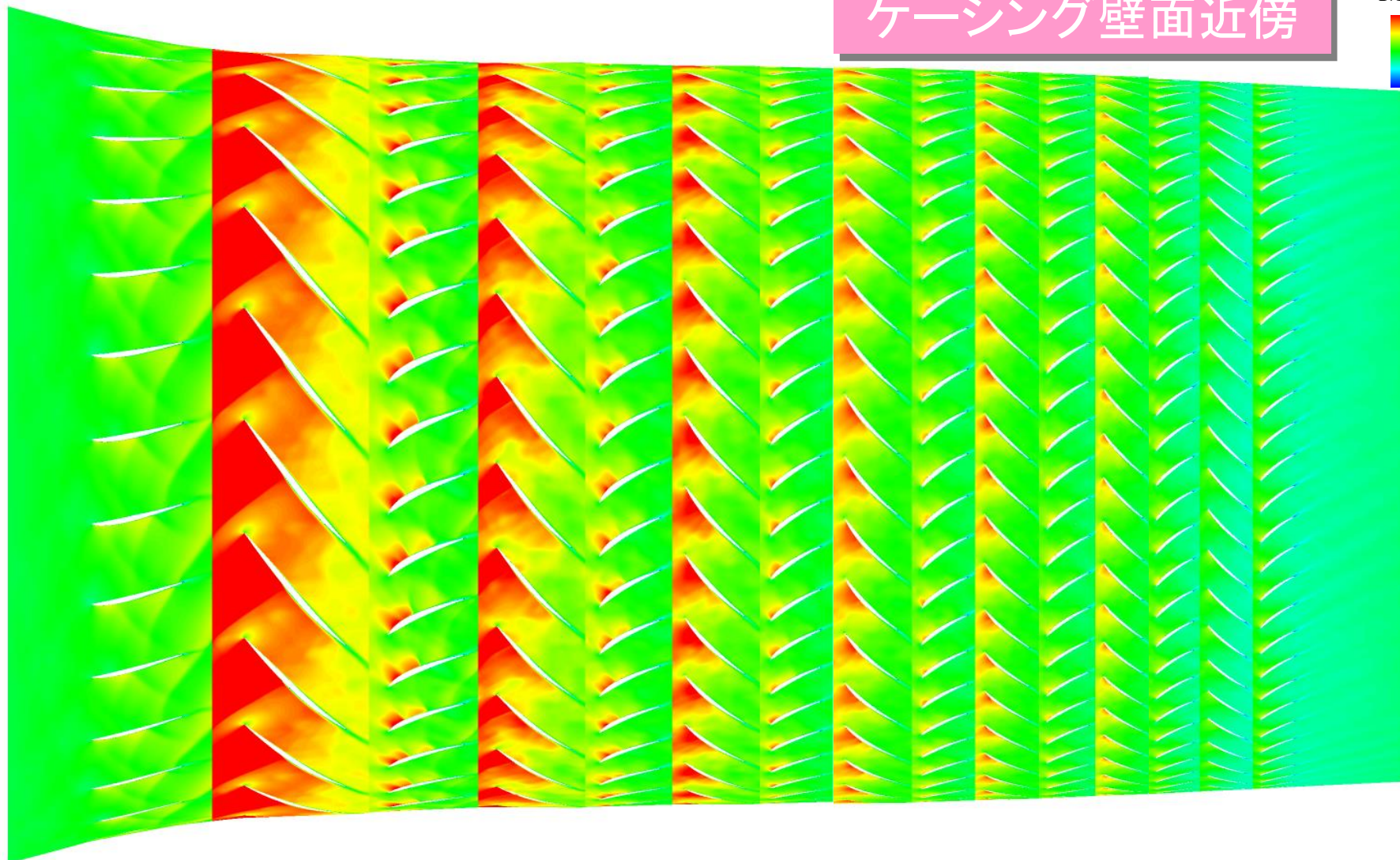




非定常流れ場(マッハ数分布)

ケーシング壁面近傍

$M[-]$
1.0
0.0

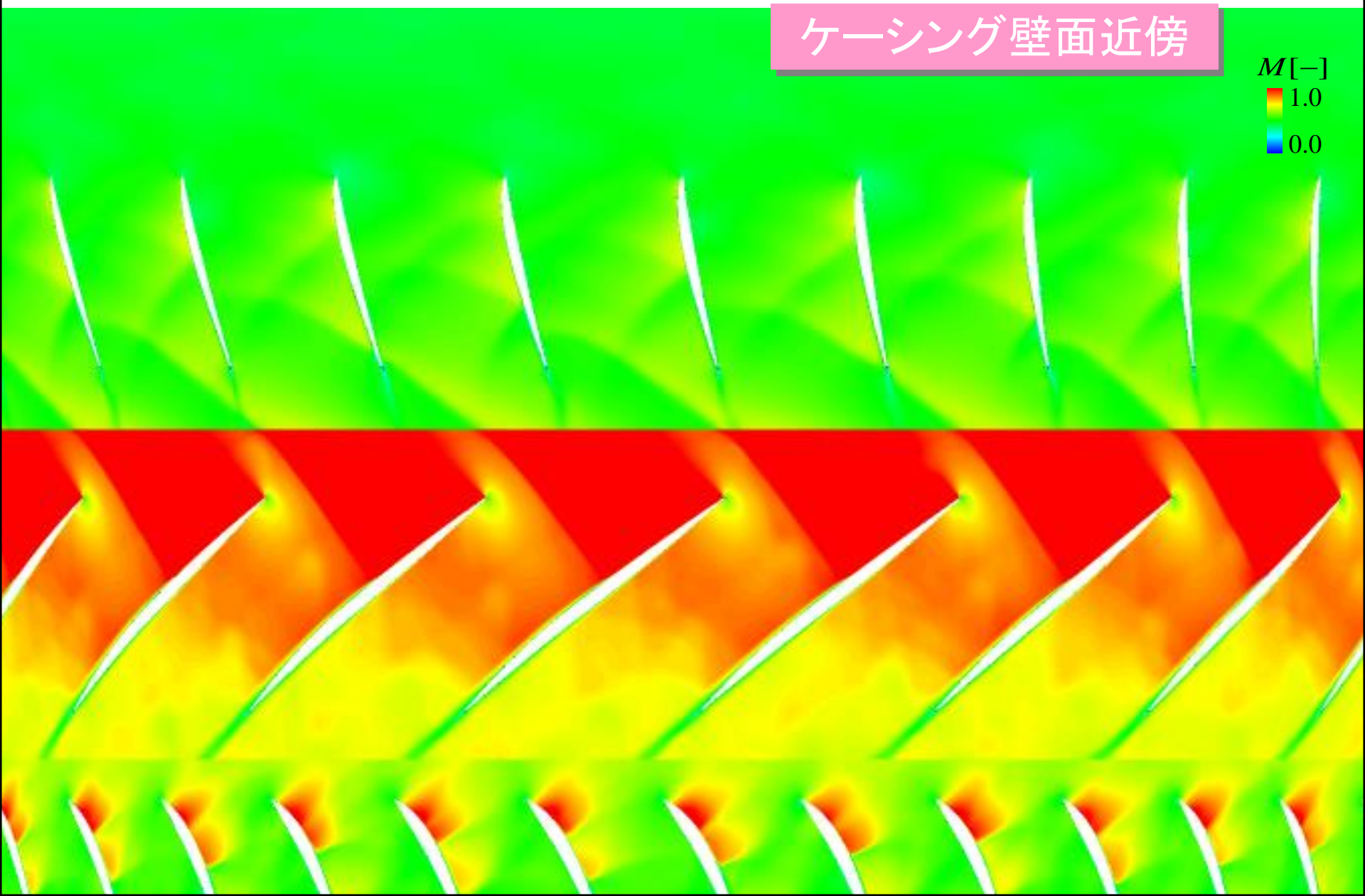




非定常流れ場(マッハ数分布)

ケーシング壁面近傍

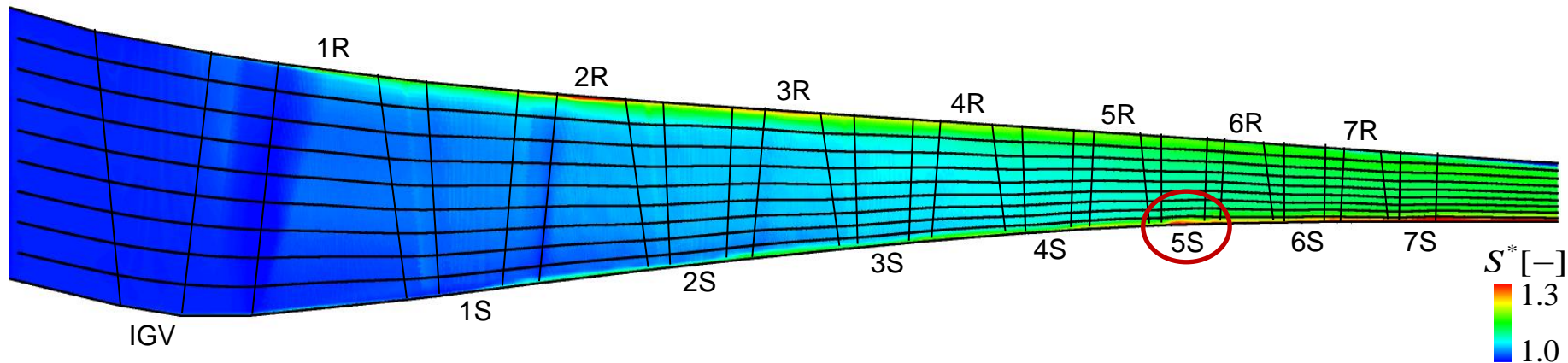
$M[-]$
1.0
0.0



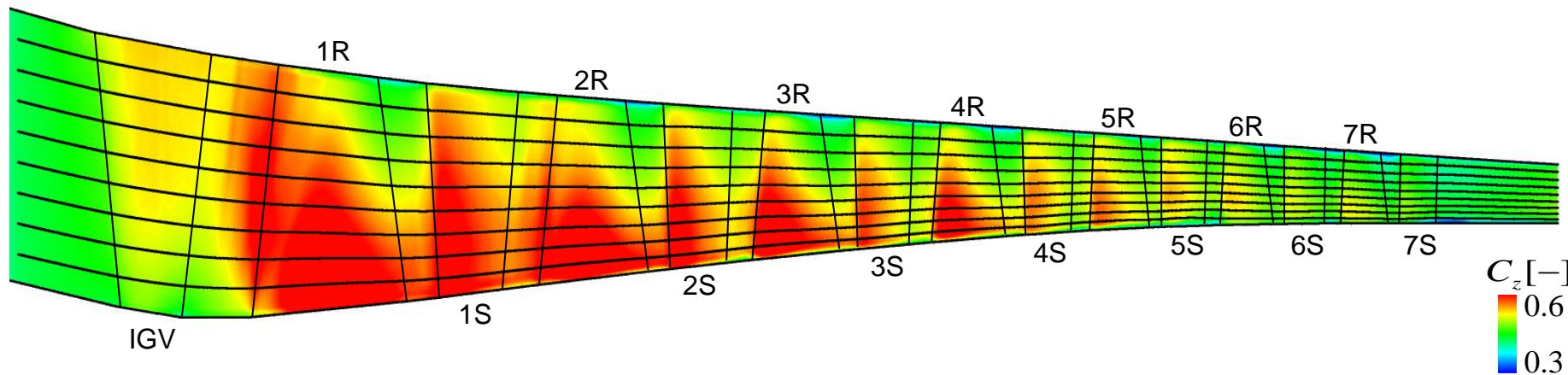


周方向平均流れ場

◆ エントロピー関数分布

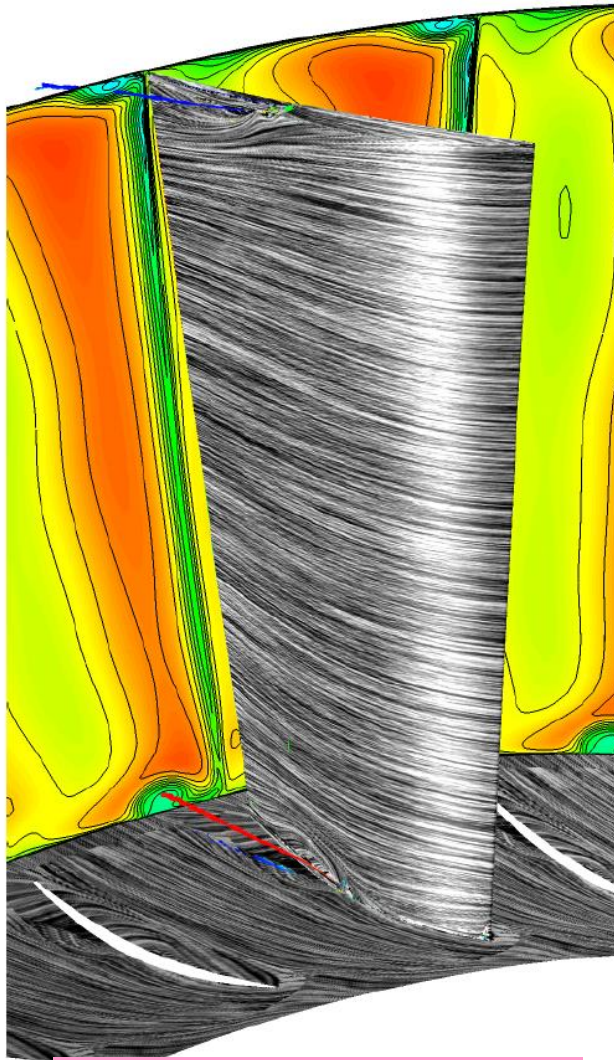


◆ 軸流速度分布

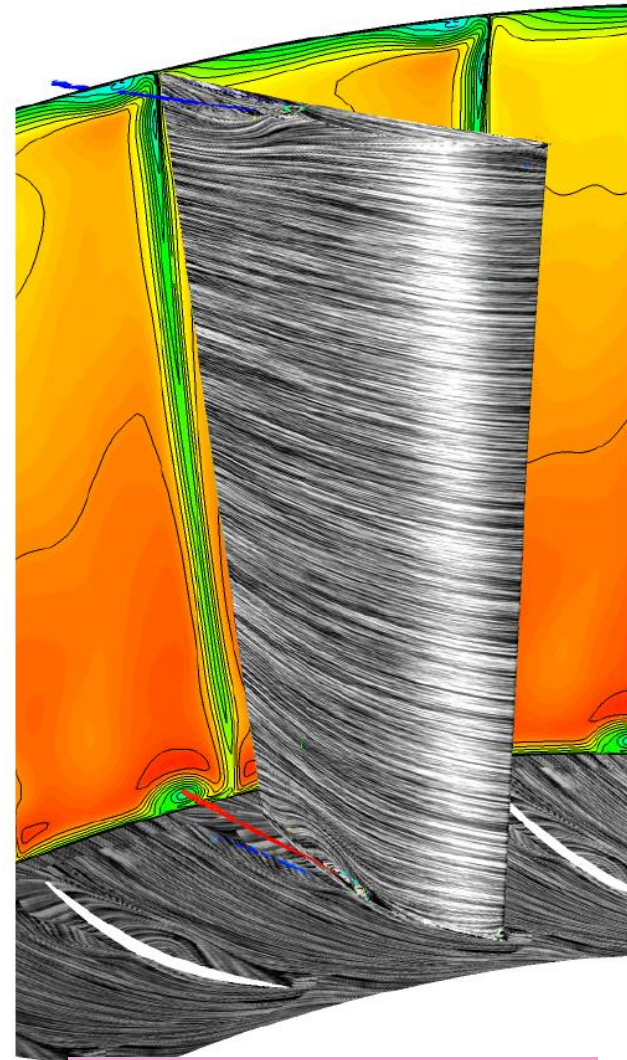




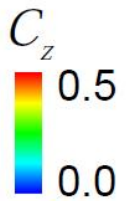
2段 動翼列内の流れ場 (RANS & DES)



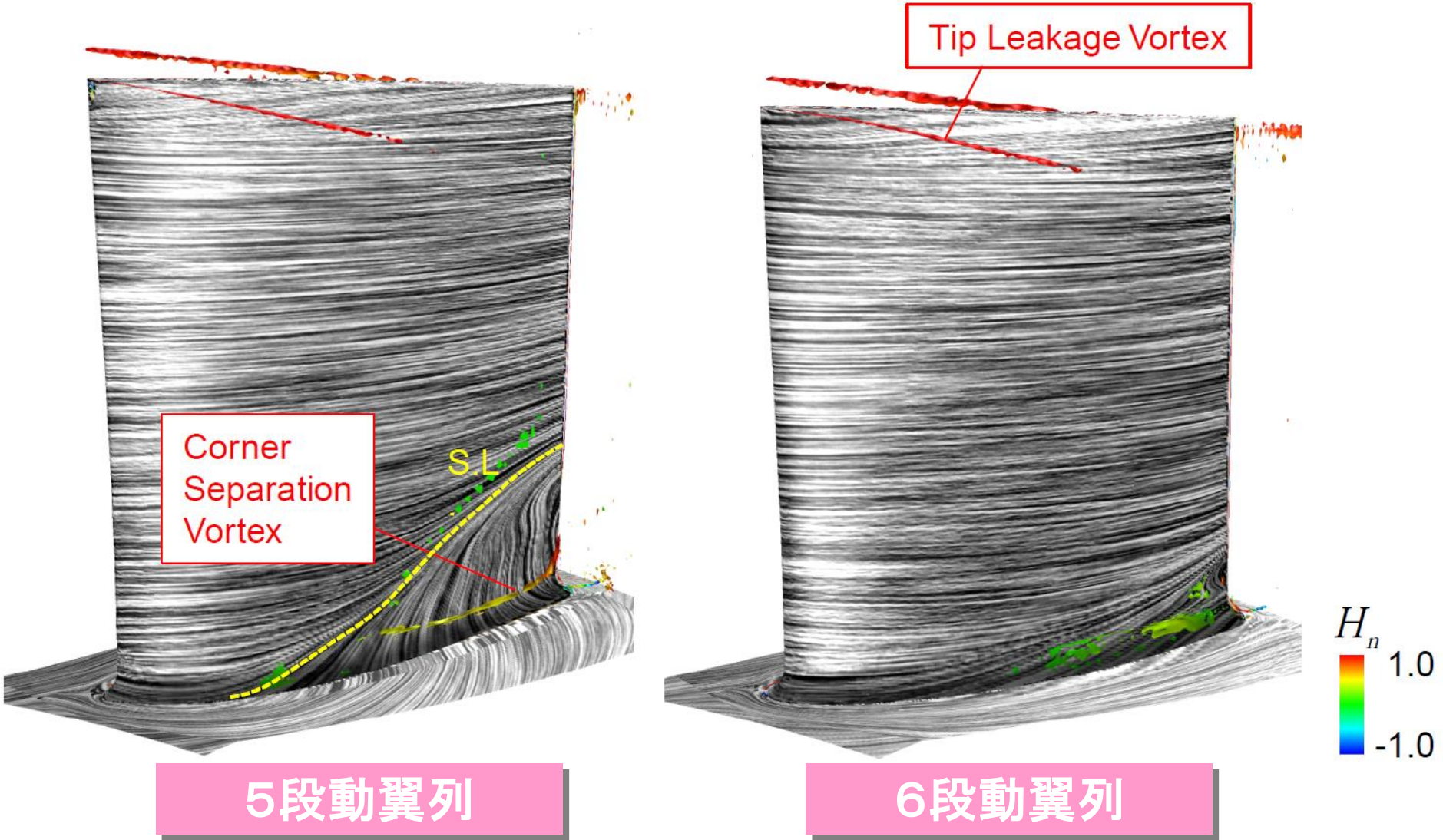
RANS 定常解析



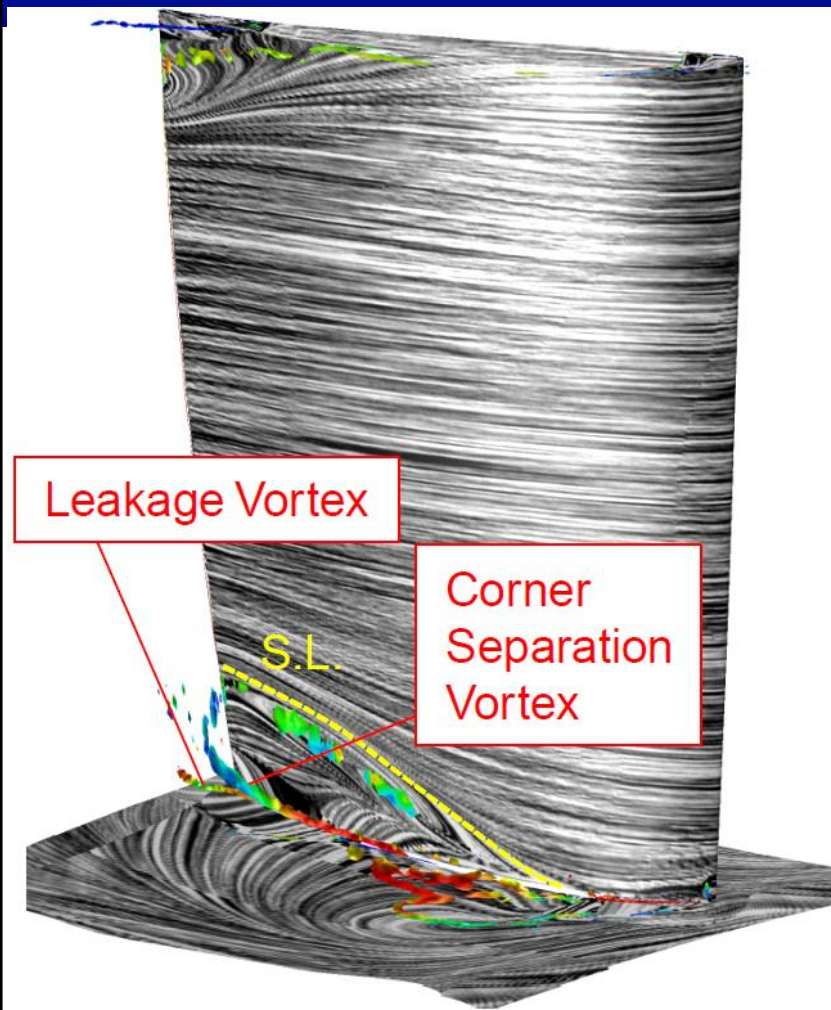
DES 非定常解析



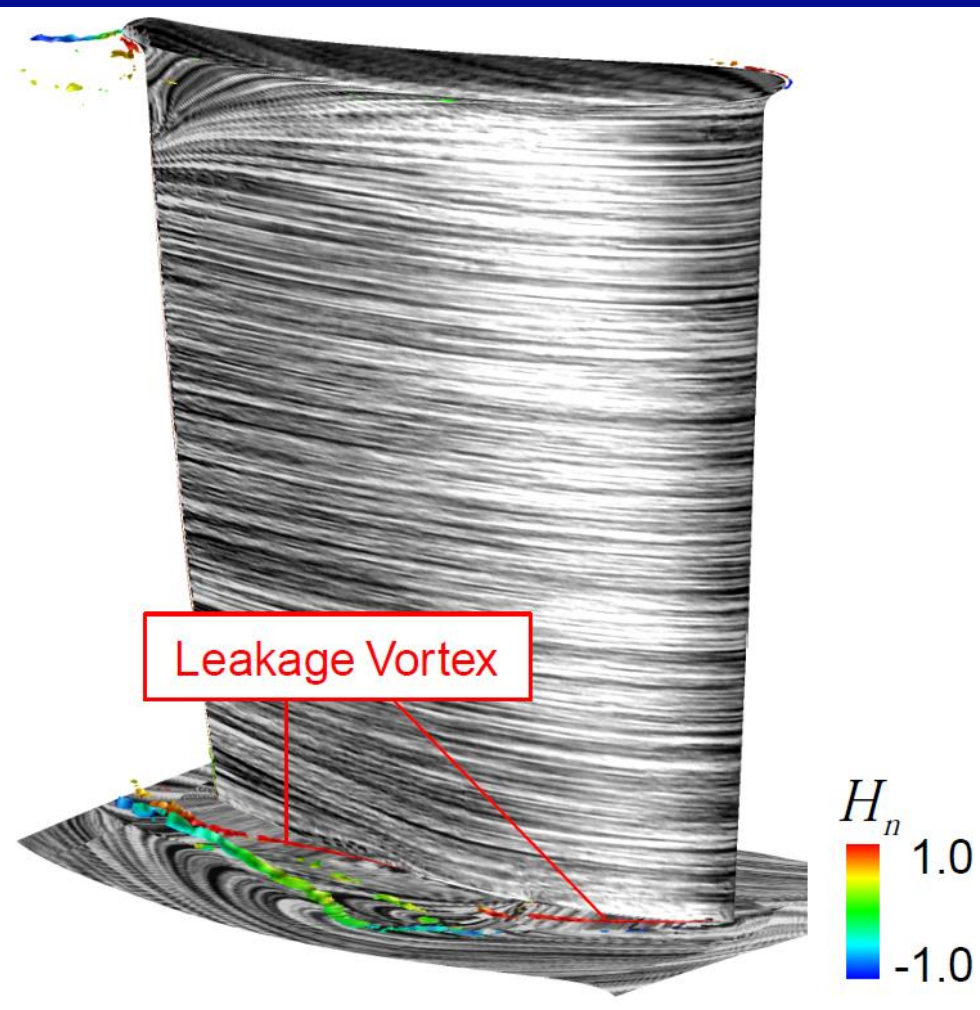
5段および6段 動翼列内の流れ場 (DES)



5段および6段 静翼列内の流れ場 (DES)

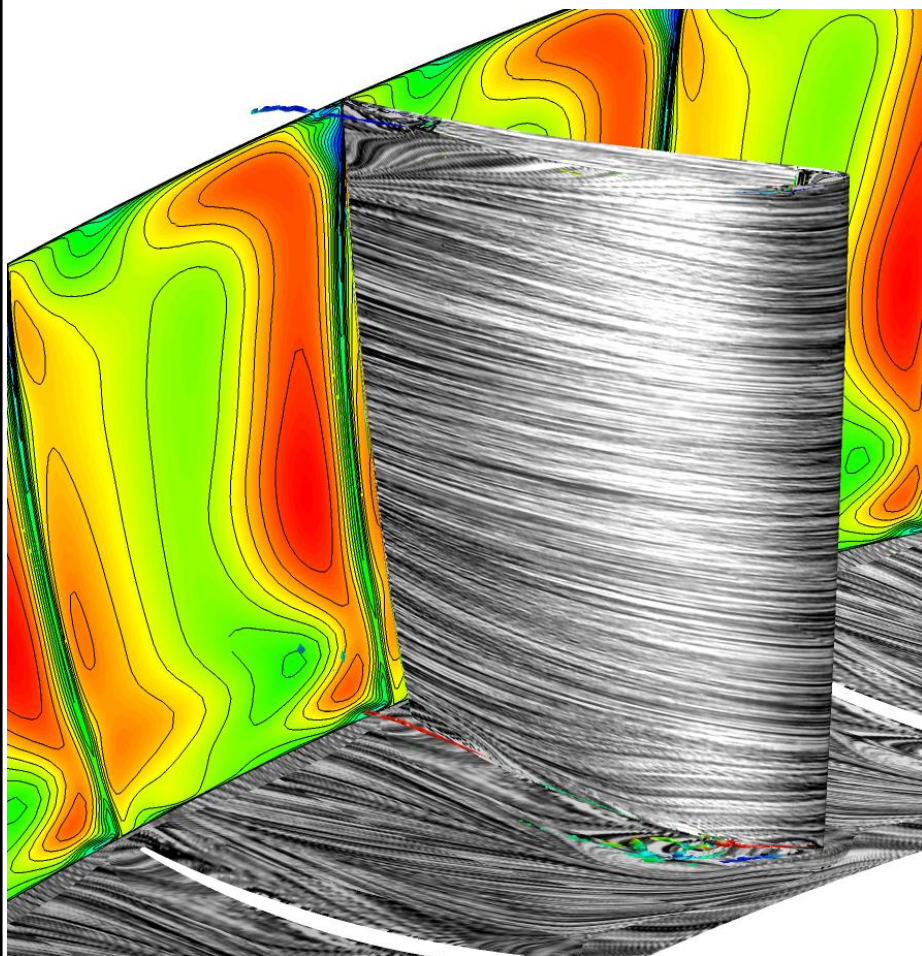


5段静翼列

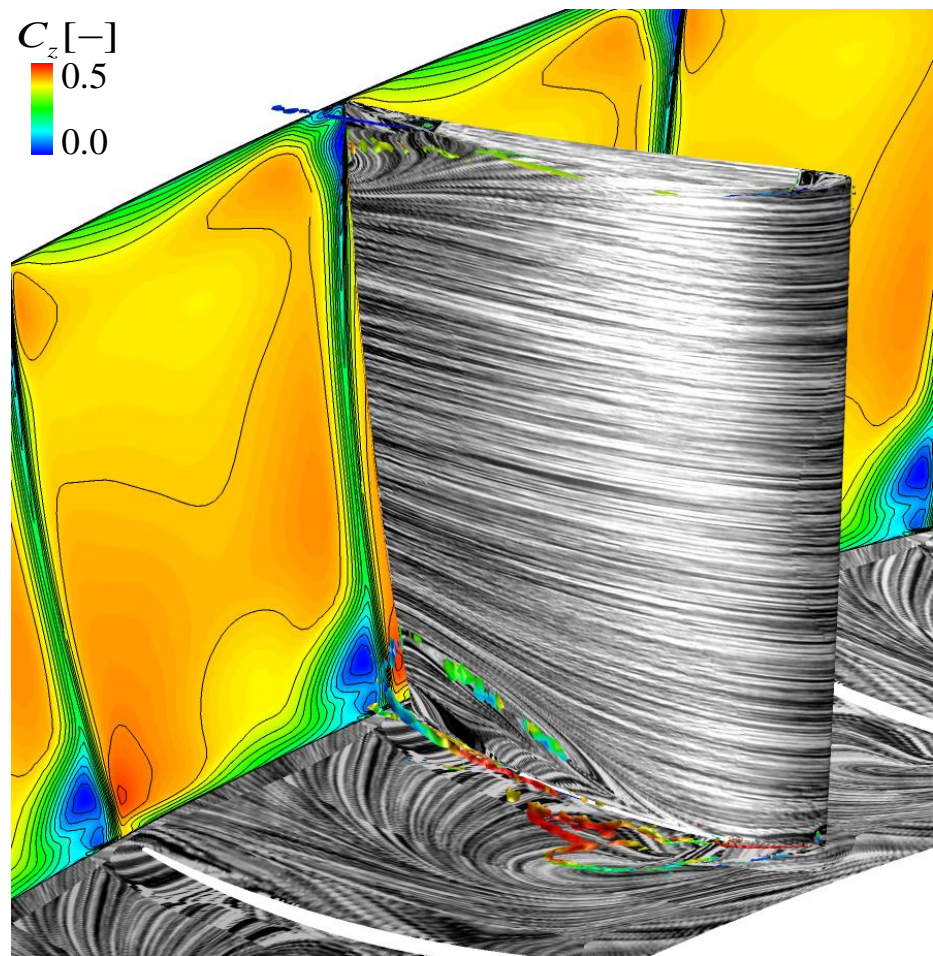


6段静翼列

5段 静翼列内の流れ場 (RANS & DES)



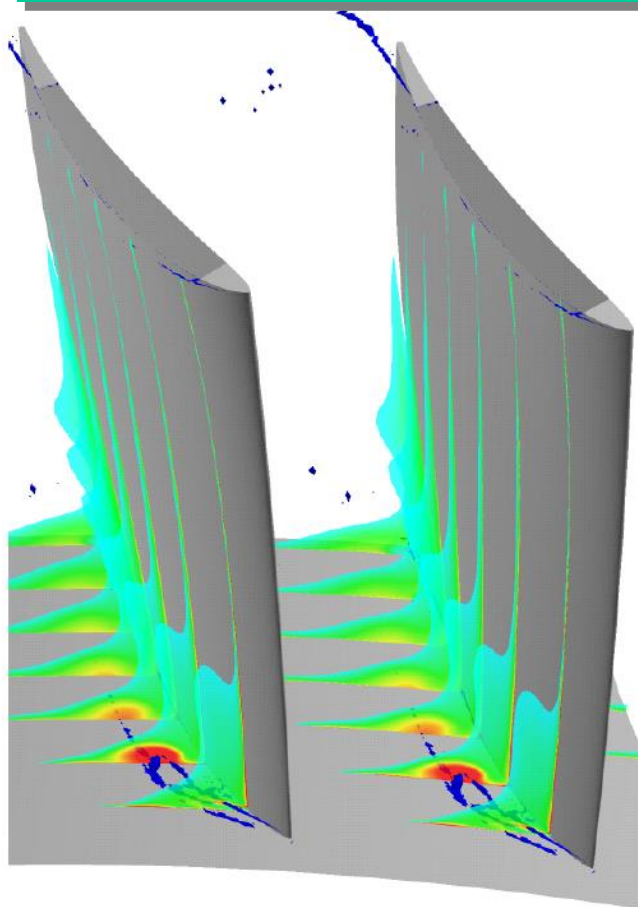
RANS 定常解析



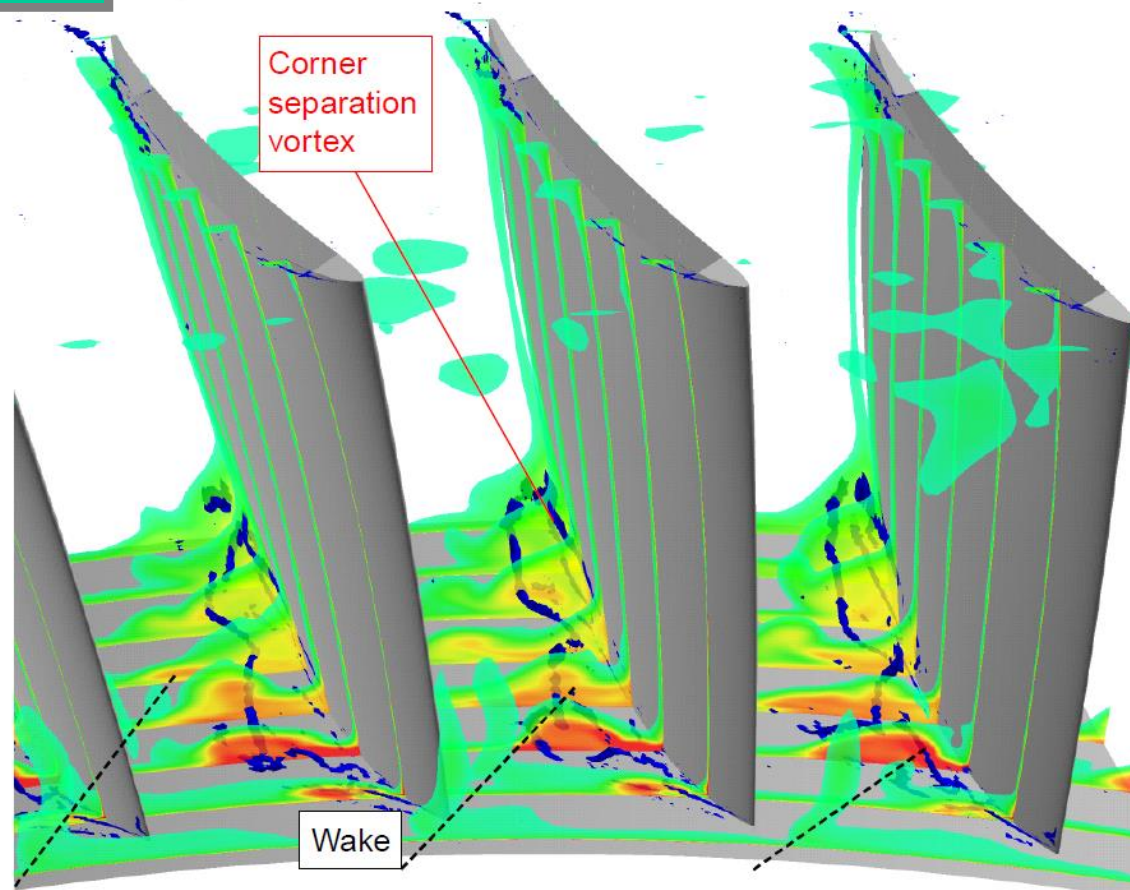
DES 非定常解析

5段 静翼列内の流れ場 (RANS & DES)

• エントロピー関数分布



RANS 定常解析

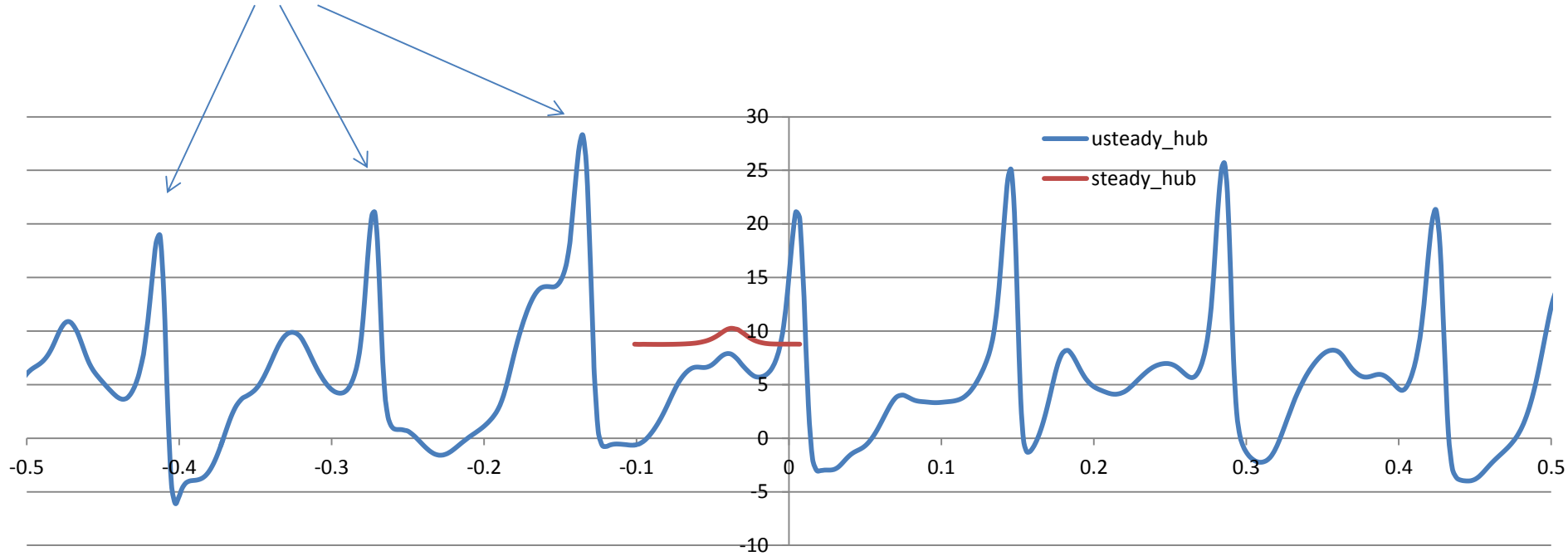


DES 非定常解析



5段 静翼列の入射角分布 (RANS & DES)

5Rのウエイク



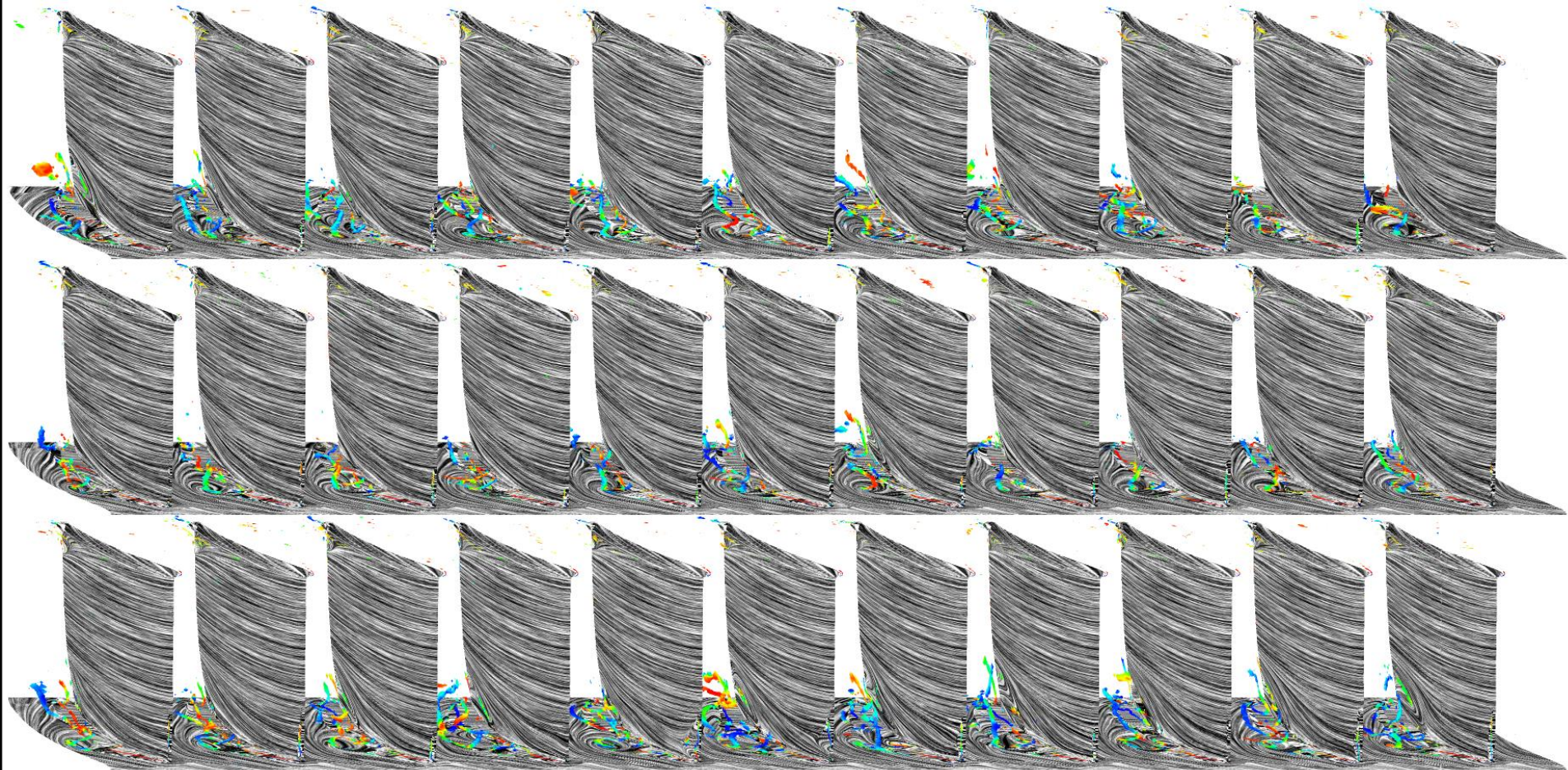


6段 静翼列内のはく離渦流れ構造

6段静翼 (2.2回転)

旋回失速の発生前

H_n
1.0
-1.0

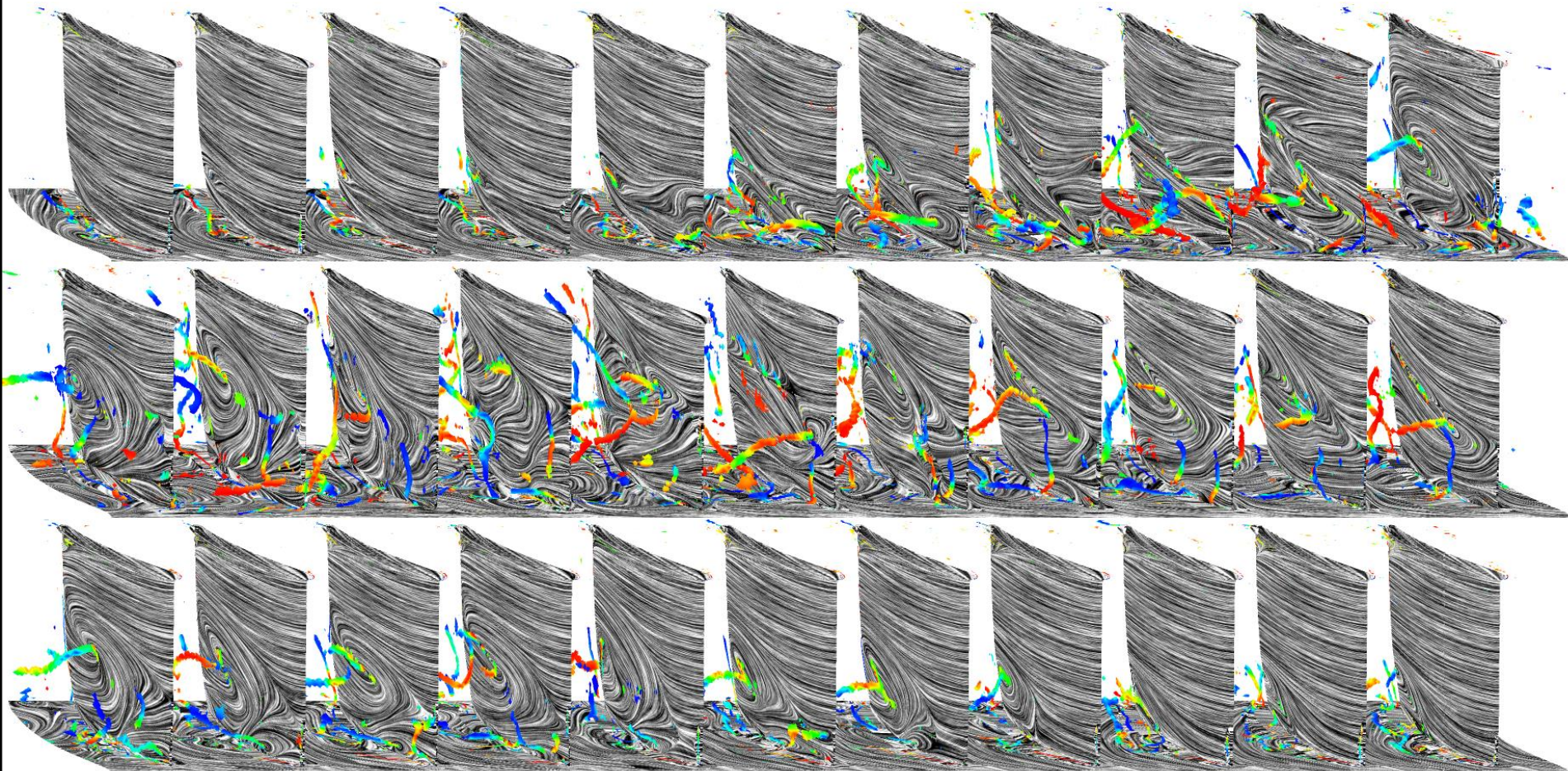
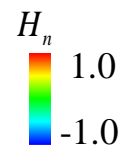




6段 静翼列内のはく離渦流れ構造

6段静翼 (3.7回転)

旋回失速の発生後



• DES計算

- 緩和形陰的高解像度風上スキーム
- k - ω 二方程式乱流モデルに基づいたDES計算
- 19.1億格子セル(7,296並列)を用いた失速点近傍の非定常解析

• 知的可視化

- 特異点理論に基づいた渦構造の同定
- LIC(Line Integral Convolution)法による限界流線のトポロジー解析

• 解析結果

- DESによる非定常解析とMixing planeモデルによる1ピッチのRANS定常解析の相違が顕著 ⇒ 動・静翼列干渉の影響が顕著
- 失速直前に、5段静翼列でハブ側コーナーはく離が発生
- その後、6段静翼列のハブ側コーナーはく離が非軸対称性を伴って成長 ⇒ 旋回失速の発生
- 低速の単段軸流圧縮機での旋回失速初生メカニズム(動翼先端部の前縁はく離から成長した竜巻状はく離渦が支配)との相違

