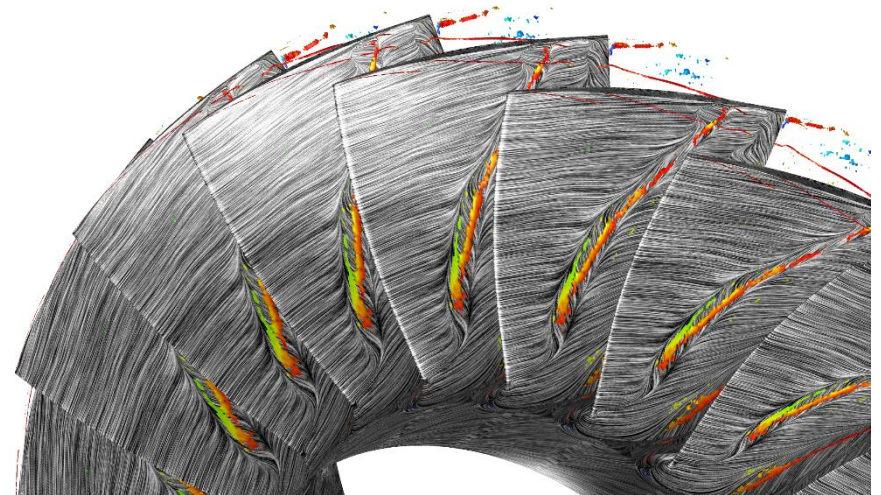


遷音速軸流圧縮機の 衝撃波を伴う乱流場のLES解析

九州大学
工学研究院機械工学部門
古川雅人

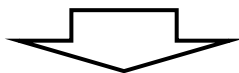
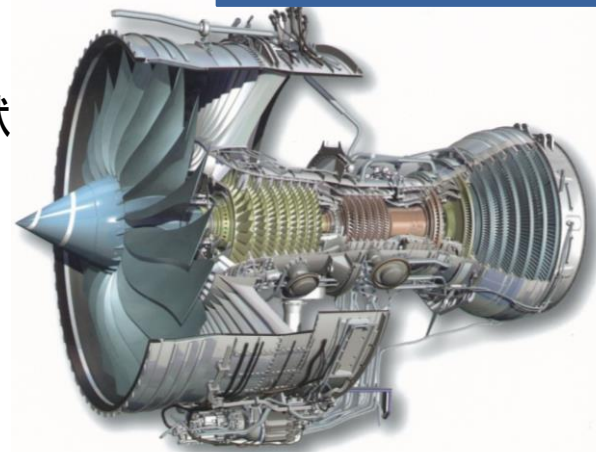


研究背景

- **多段軸流圧縮機**は、航空用および産業用ガスタービンの重要な構成要素
- ガスタービンの熱効率向上に向けた多段軸流圧縮機の**高負荷・高圧力比化**

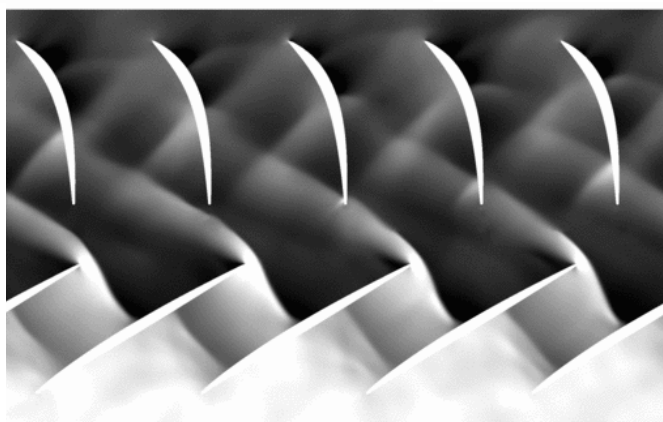
航空機用ガスタービン

- ✓ 発電効率が向上し、エネルギー問題の解決に貢献
- ✓ エンジンの軽量化による燃費向上
- ✓ 多段圧縮機の翼列当たりの空力負荷が増大
- ✓ 動翼列の回転周速の高速化(超音速化)



亜音速流れと超音速流れが混在した遷音速流れ場の形成

遷音速圧縮機内の圧力場



P_s

1.6
0.8

- ◆ 衝撃波の発生
⇒ 種々の流動現象との非定常干渉
- ◆ 後流干渉およびポテンシャル干渉に加え、
衝撃波による翼列干渉も発生



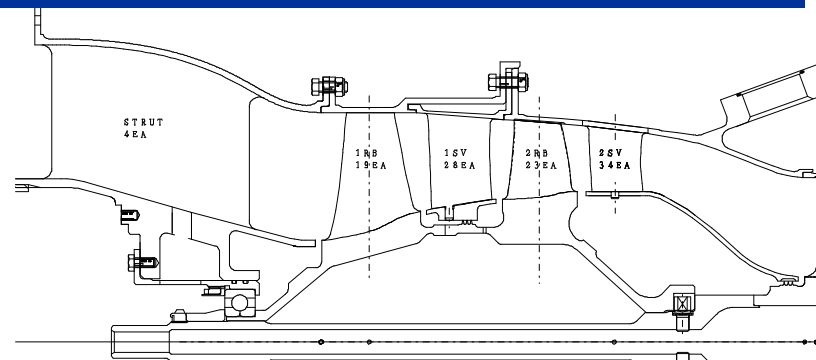
数値解析による、内部流動現象の高精度予測

採択課題

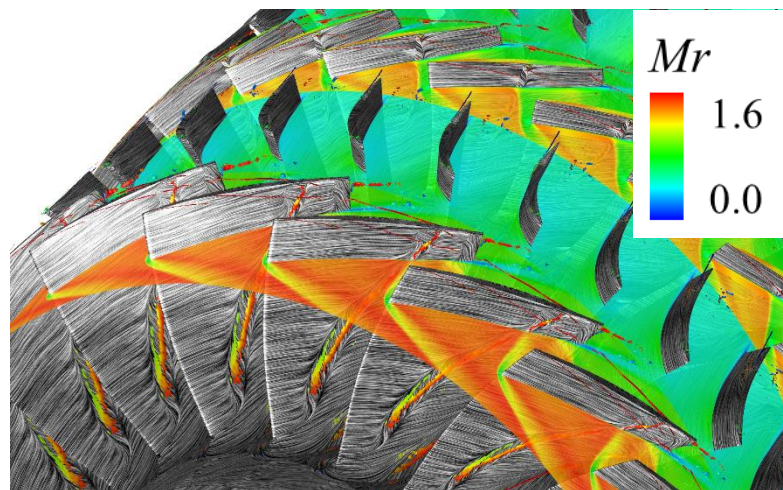
「遷音速軸流圧縮機の衝撃波を伴う乱流場のLES解析」

- 前方の遷音速軸流圧縮機に着目
： 衝撃波の効果が顕著
- 衝撃波と翼端漏れ渦および
翼面境界層との干渉を詳細に解析
- 多段の効果もあわせて

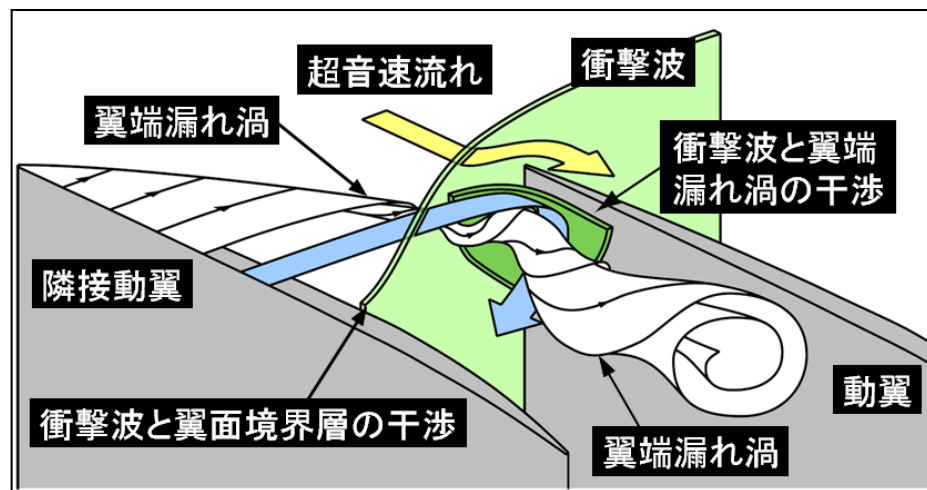
先進ガスタービン用遷音速二段軸流圧縮機



遷音速軸流圧縮機内のマッハ数分布



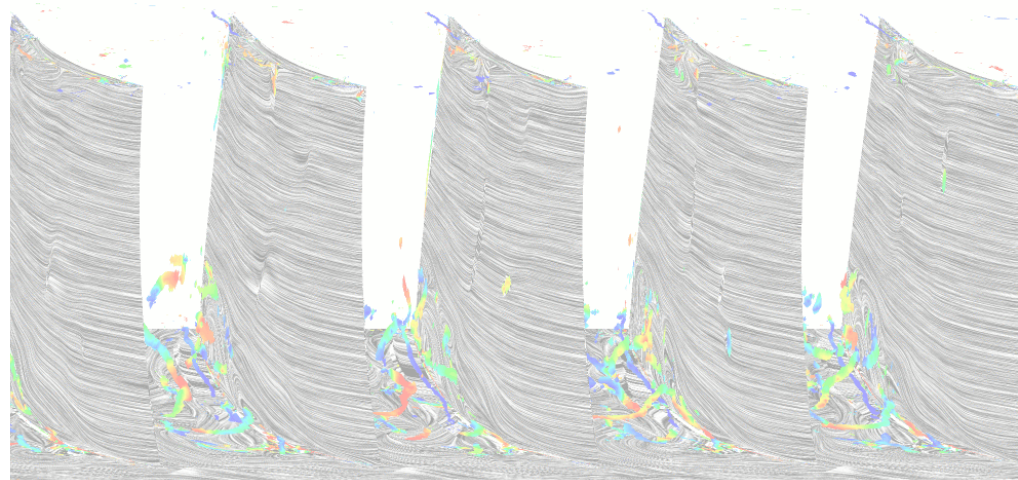
遷音速軸流圧縮機内の超音速流れ場



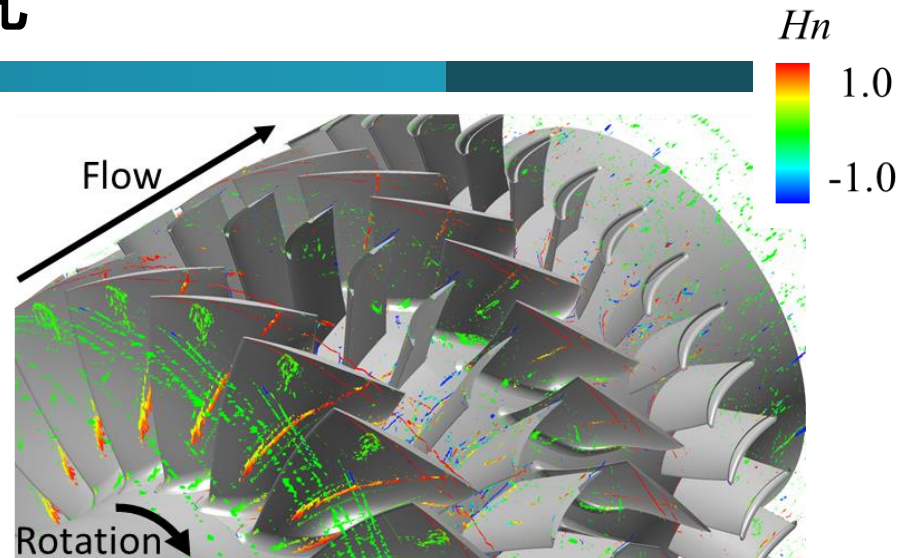
以前の採択課題での研究

大規模DES解析

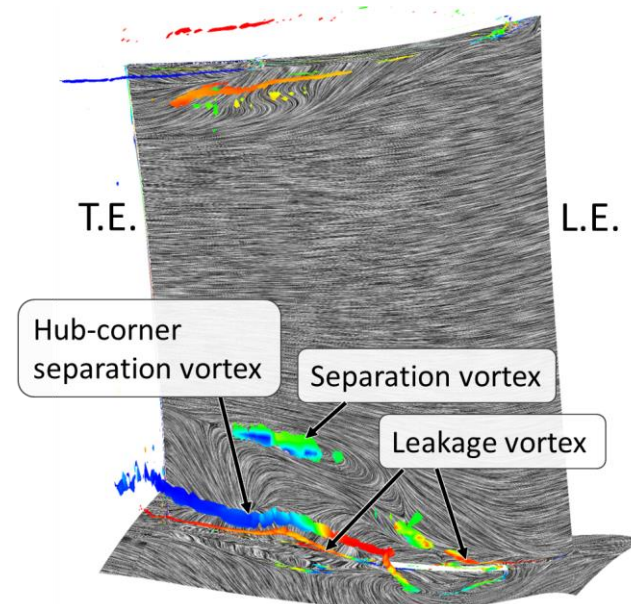
- 遷音速二段軸流圧縮機の
全段・全周を対象としたDES解析
[格子点数：4.5億点(全段・全周)]
- 衝撃波を伴う複雑流動現象の解明
⇒ 非定常流れ場および
時間平均流れ場の詳細な分析



静翼列におけるハブ/コーナーはく離



Instantaneous vortical flow structure

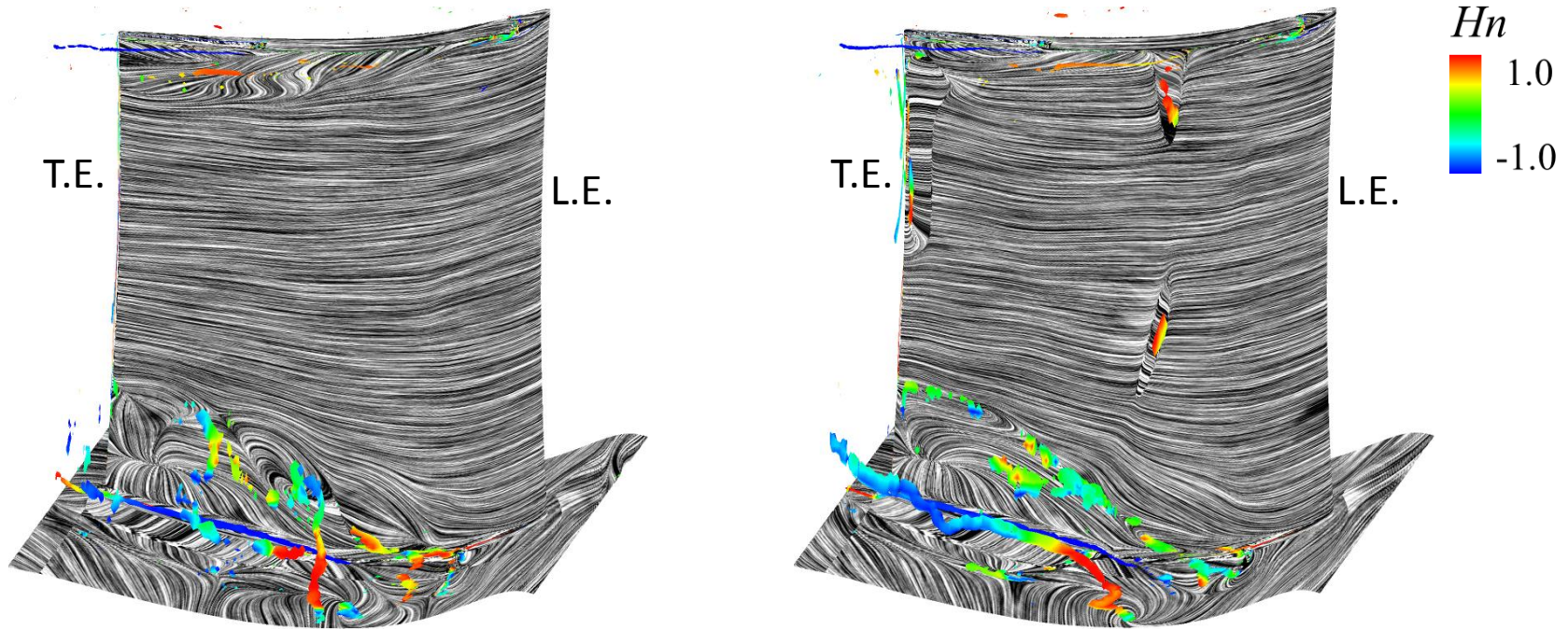


Time-averaged flow field

以前の採択課題での研究

大規模DES解析

- **翼列干渉の効果**が静翼列流れ場に与える影響について分析
 - : 非定常解析結果から、動静翼間の位相関係が同じ瞬間の流れ場を抽出し、位相毎にアンサンブル平均化処理を実施
 - ⇒ **動翼列の位相変化**に伴う静翼列流れ場の変化を調査



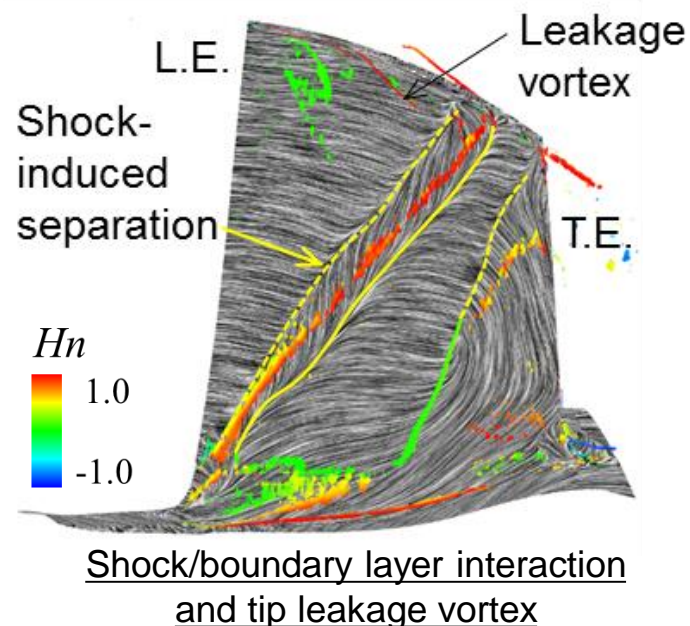
研究目的

– 研究目的 –

LES解析による動静翼干渉を伴う複雑乱流場の高精度予測

研究内容

- ◆ 圧縮機全段・全周にわたる**大規模非定常解析**
 - ： **LES解析**と**DES解析**を併用した非定常解析
 - ⇒ 実験で得ることが困難な知見を得る
- ◆ **知的可視化手法**を用いた内部流れ場の分析
 - **特異点理論**に基づく渦コアの同定
 - **LIC(Line Integral Convolution)法**による限界流線の描画
 - **無次元ヘリシティ**による渦コアの色付け

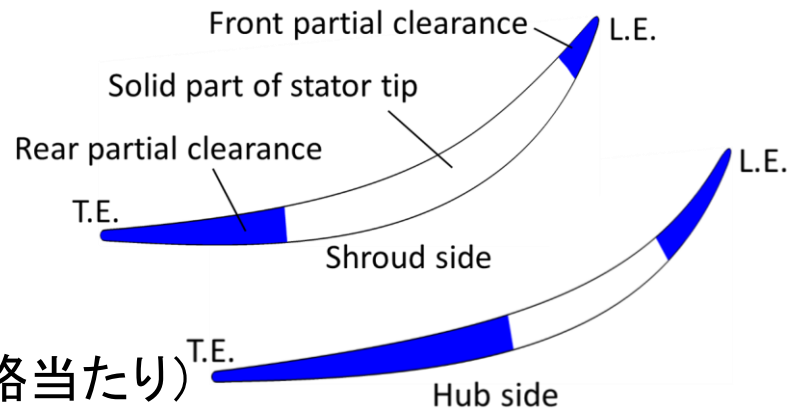


遷音速二段軸流圧縮機を対象とした非定常流動解析

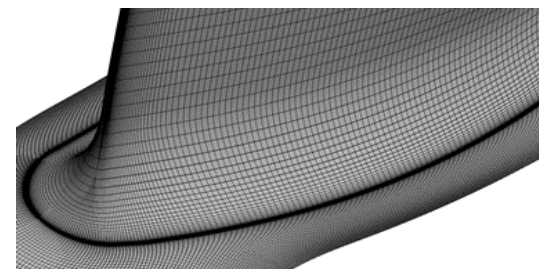
- ： 初段静翼で**LES解析**, その他の翼列で**DES解析**を実施
- ⇒ 渦構造・限界流線に基づいた流れ場のトポロジー解析を実施

計算格子

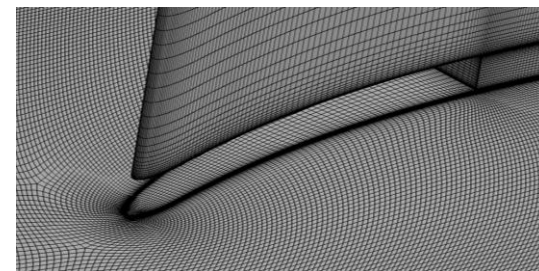
- マルチブロック構造格子
- H-J-O型を組み合わせた格子トポロジー
- フィレット, クリアランスを忠実にモデル化
- 格子点数 : 約12億点 (全段・全周)
 - 1S : 約3,000万点 (単流路当たり)
 - 1R, 2R, 2S : 約340~520万点 (単流路当たり)



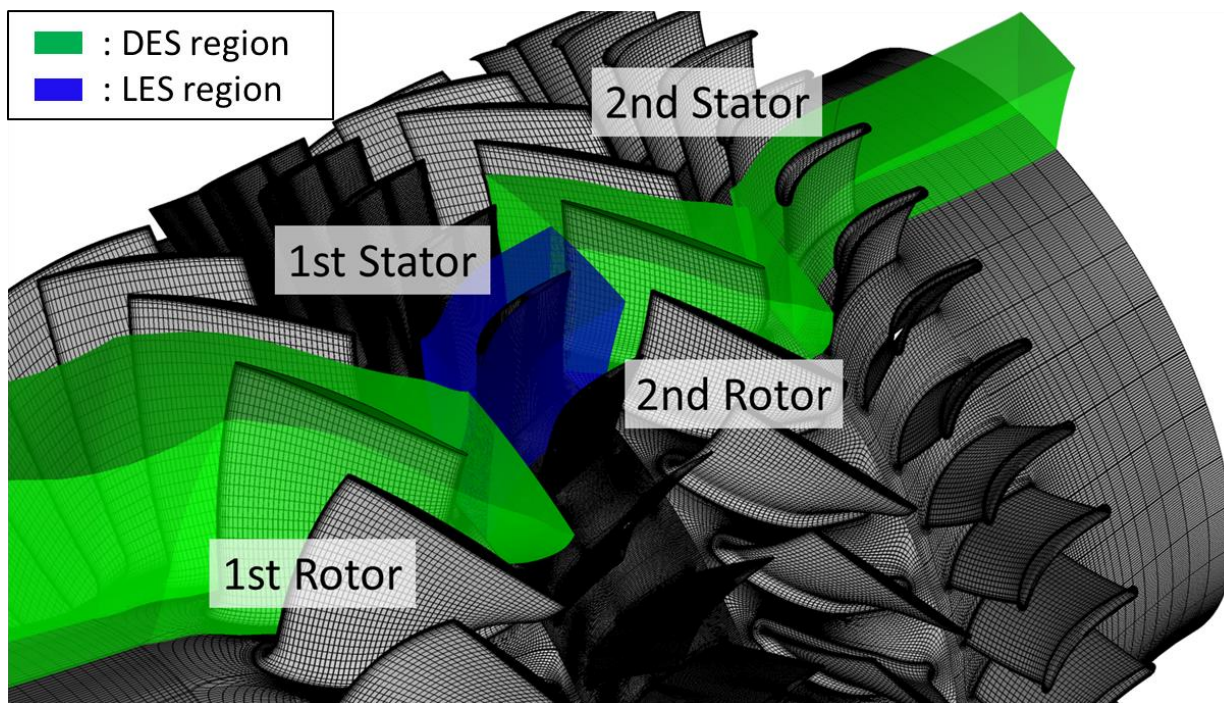
Shape of partial tip clearance in first stator



Fillet



Partial tip clearance



Overview (every three lines)

数値計算手法

◆ 計算解析手法

➤ 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 (SLAU)

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

1S : LES (WALEモデル)

1R, 2R, 2S : DES (k - ω モデル)

➤ 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100,000step

[1blade passing : 5,000step]

◆ 境界条件

➤ 入口境界条件

全圧・全温・流れ角を指定

➤ 出口境界条件

静圧固定

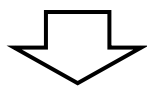
➤ 壁面境界条件

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)

知的可視化

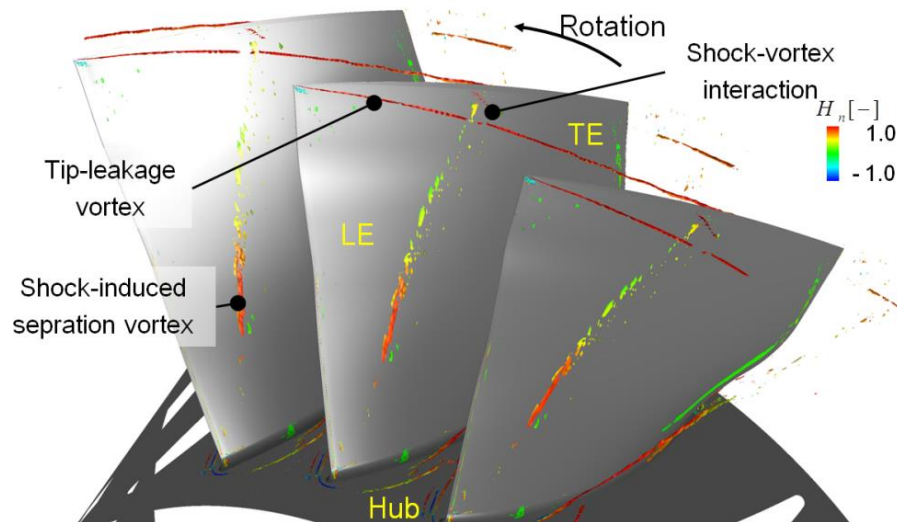
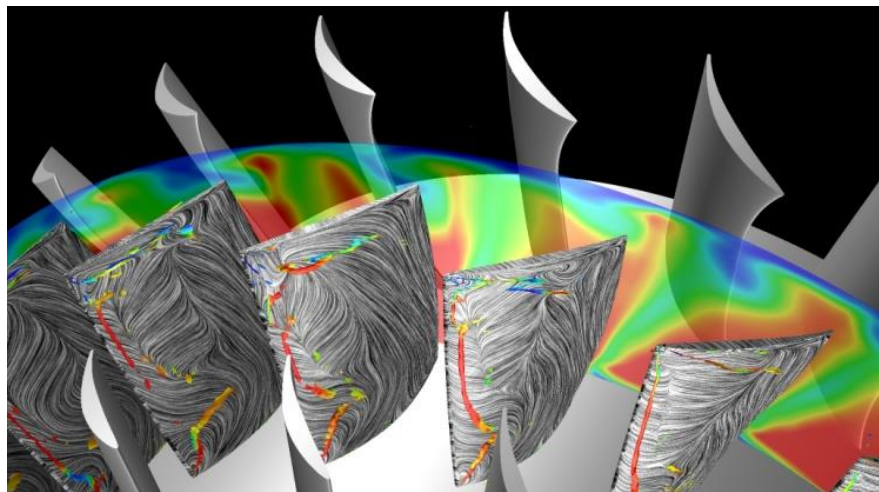
◆ 104翼間にわたる大規模な計算結果データの出力

- 10TB超の非定常解析データ
 - 従来の可視化手法(流線やベクトルの表示等)では限界
- ⇒ 解析結果から流体力学的に意味のある流動現象を効果的に抽出することが必要



◆ 知的可視化

- 特異点理論に基づいた渦中心の同定
- LIC(Line Integral Convolution)法による限界流線のトポロジー解析
- 無次元ヘリシティによる渦中心の色付け



知的可視化

◆無次元ヘリシティ

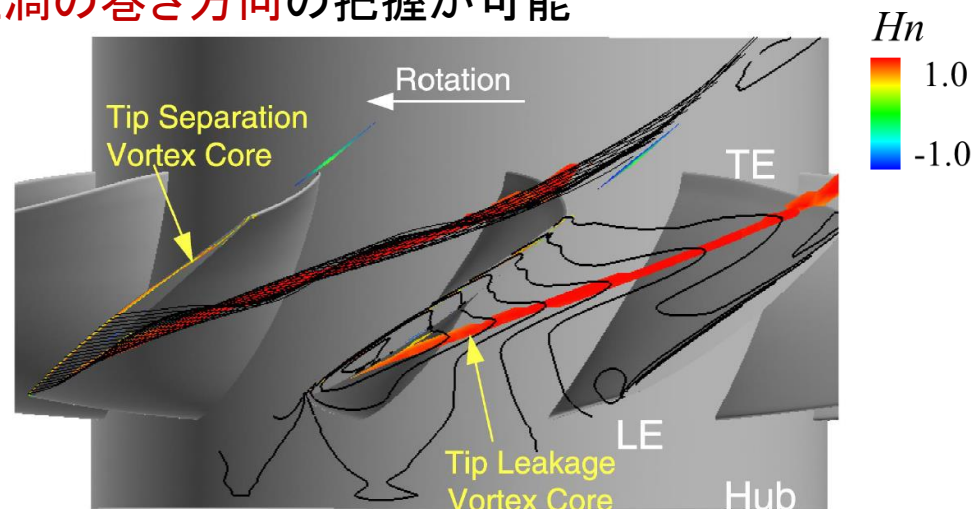
$$H_n = \frac{\vec{\xi} \cdot \vec{u}}{|\vec{\xi}| \cdot |\vec{u}|}$$

$\vec{\xi}$: 渦度ベクトル
 \vec{u} : 速度ベクトル

- 渦度ベクトルと速度ベクトルの内積をとり、それに無次元化を施したもの
⇒ 渦度ベクトルと速度ベクトルのなす角の余弦値を表す



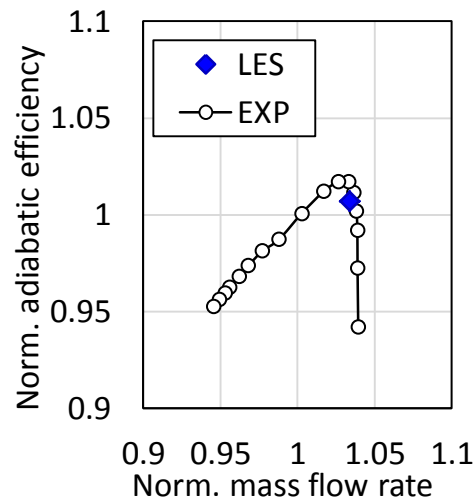
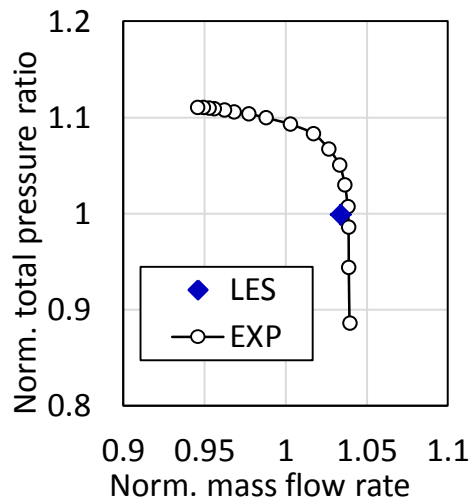
- 無次元ヘリシティの符号は、流れ方向に対する渦の回転方向を表す
- 渦中心を同定し、無次元ヘリシティで色づけ
⇒ 渦構造と渦の巻き方向の把握が可能



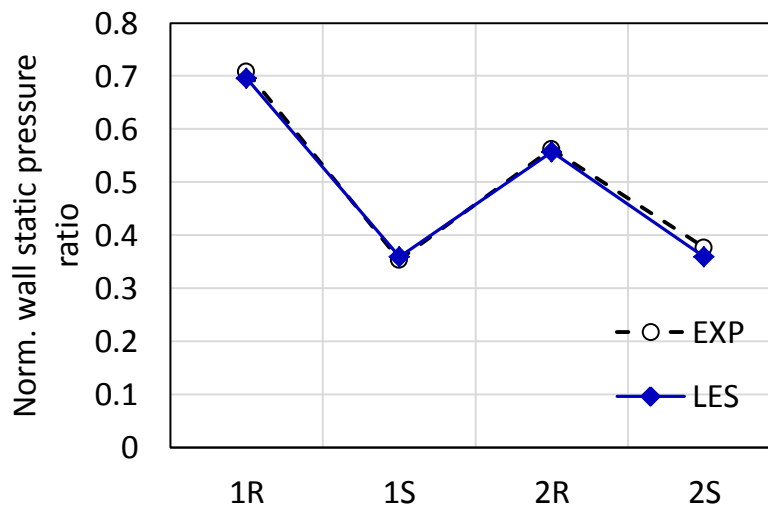
Example of vortex cores colored with normalized helicity

実験結果との比較

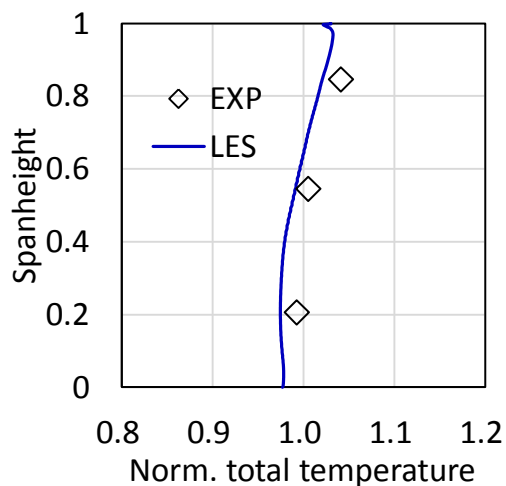
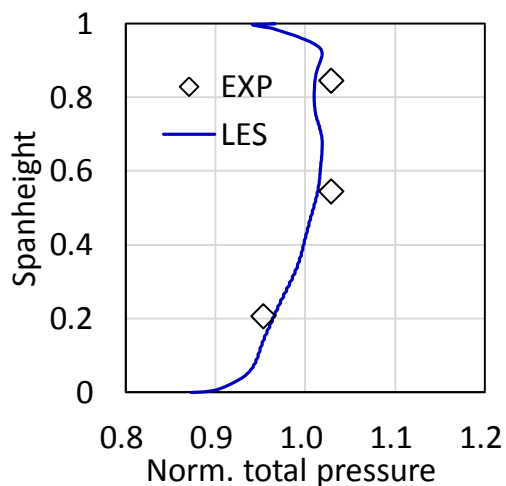
圧縮機の全体性能



各段における壁面静圧比



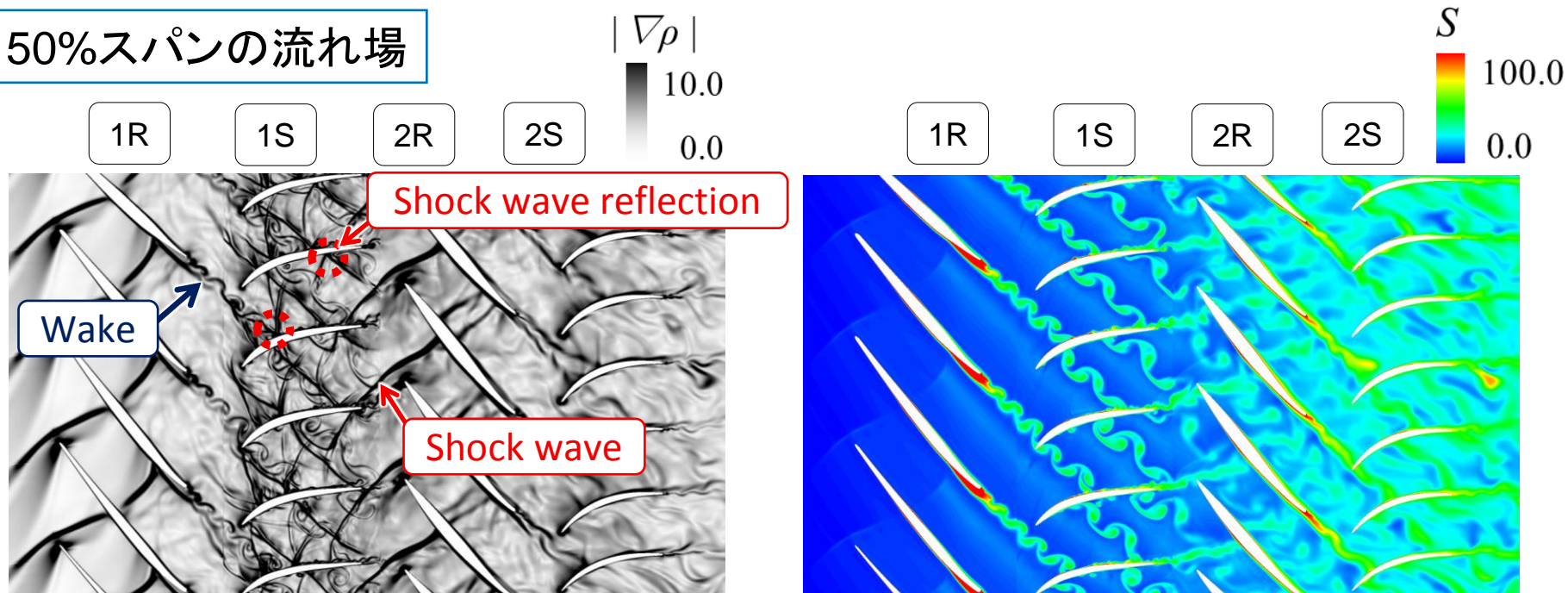
圧縮機出口の流れ場



- 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, **実験値とよく一致**

圧縮機全体の流れ場

50%スパンの流れ場



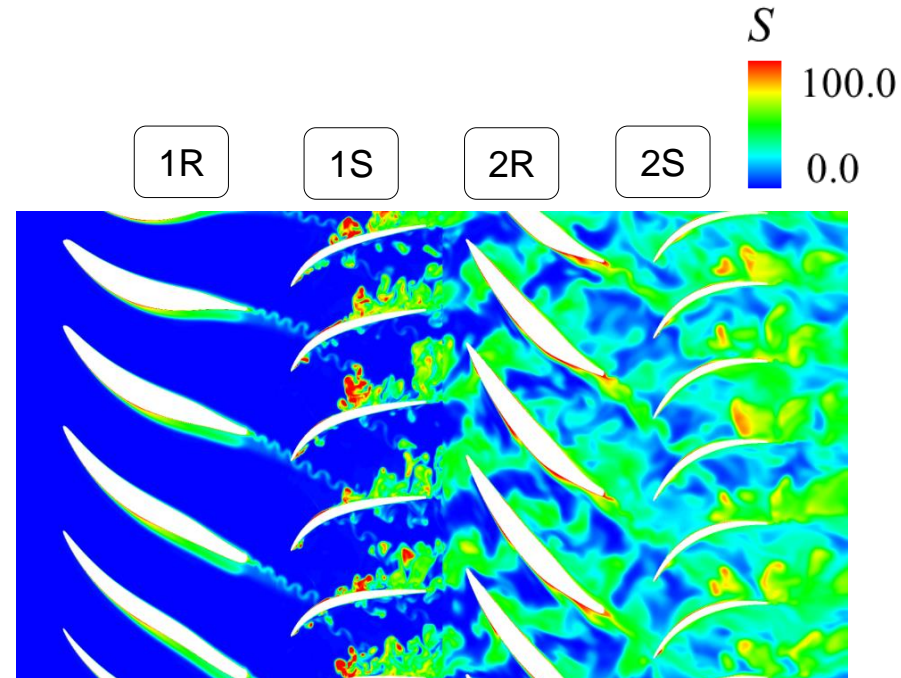
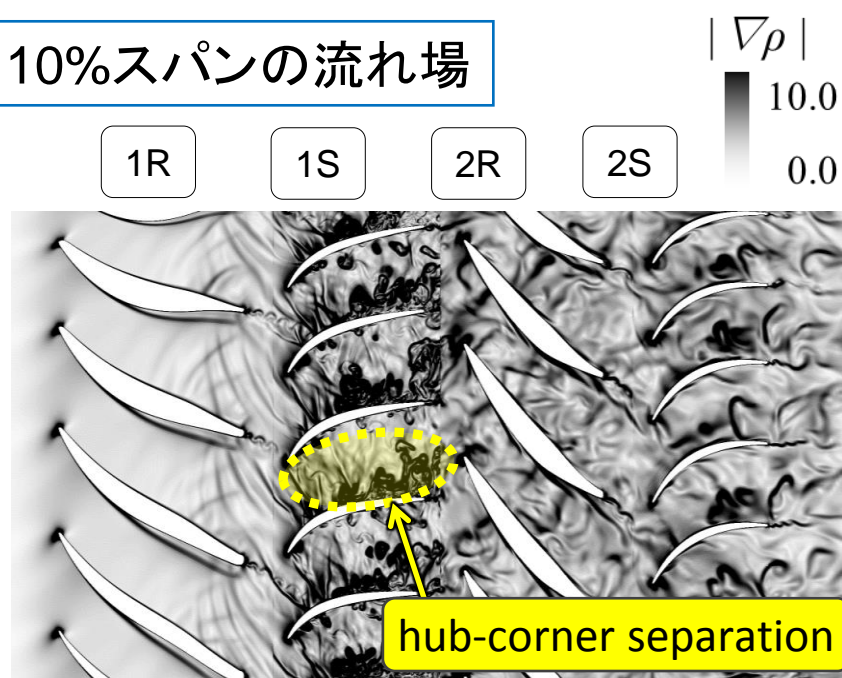
Magnitude of density gradient at 50% span

Entropy at 50% span

- 初段静翼の翼間に初段動翼の後流が流入し、初段静翼の翼面境界層と干渉
- 2段動翼の衝撃波が初段静翼に入射し、初段静翼の翼面で反射
⇒ 衝撃波は初段静翼の翼面で反射を繰り返しながら上流側に伝播
衝撃波および反射波が初段動翼の後流と干渉
- 各翼列の翼面境界層および後流において損失が発生
⇒ 50%スパンにおける主要な損失生成要因

圧縮機全体の流れ場

10%スパンの流れ場

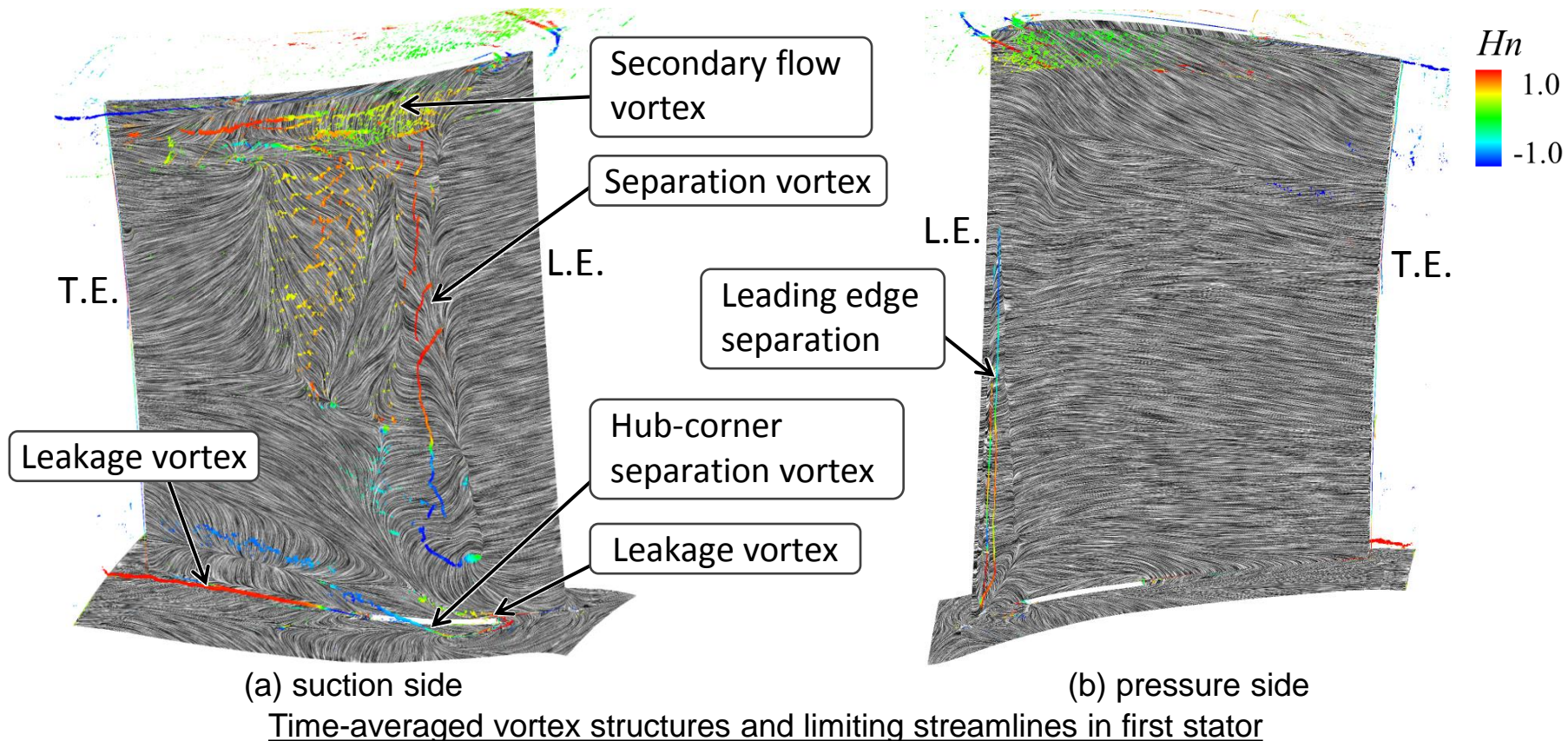


Magnitude of density gradient at 10% span

Entropy at 10% span

- 初段静翼負圧面側において大規模なハブ・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
- 初段静翼のハブ・コーナーはく離によって大きな損失が発生
⇒ 圧縮機ハブ側における主な損失生成要因
- ハブ・コーナーはく離領域における密度勾配分布は翼間毎に異なる
⇒ ハブ・コーナーはく離領域内の流れ構造は、時間的に大きく変化

時間平均流れ場

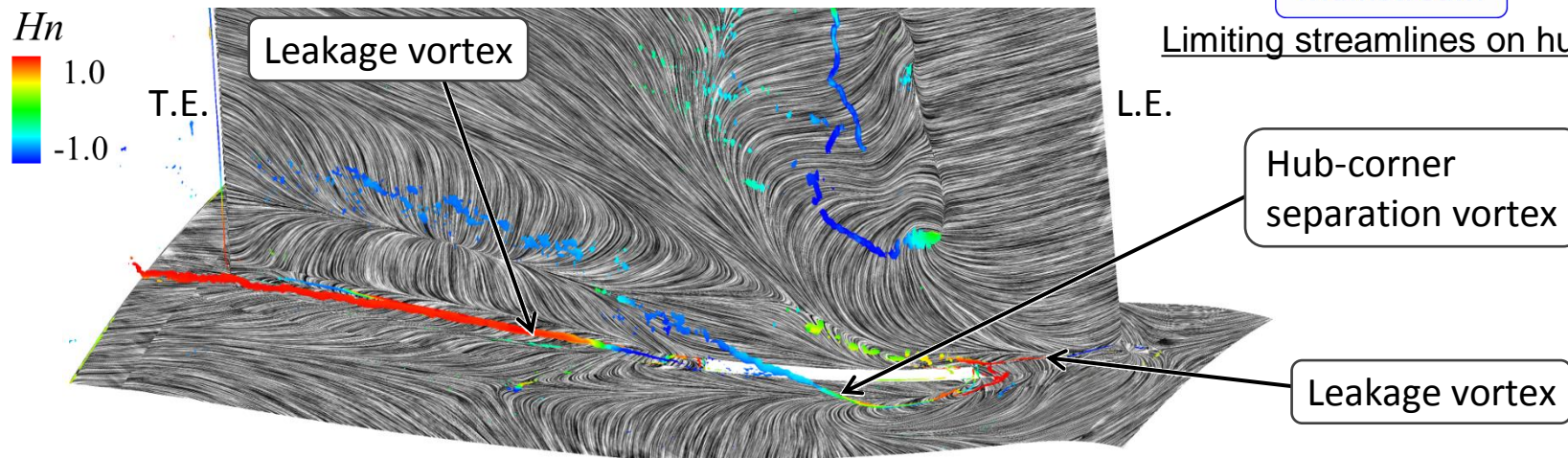
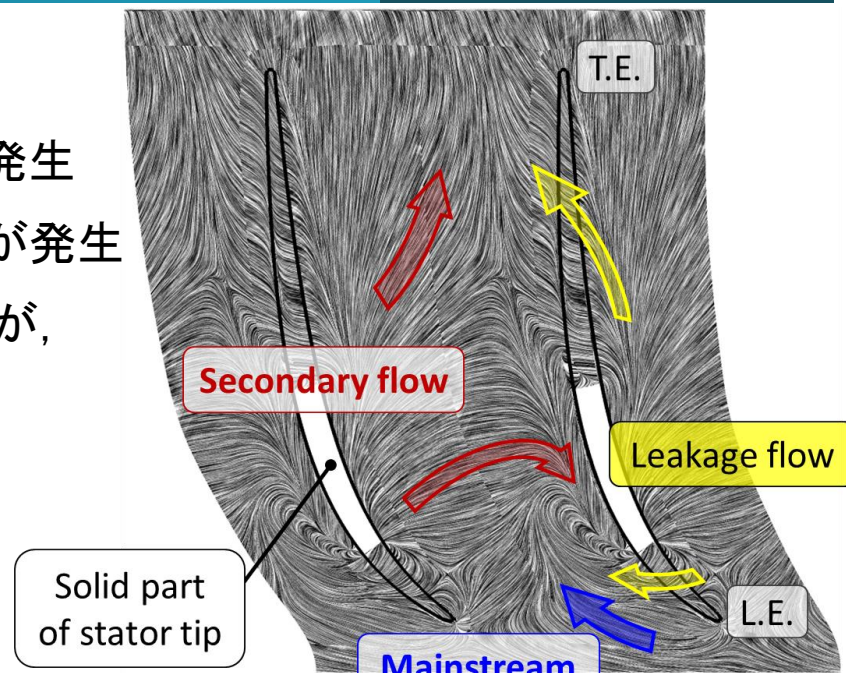


- 20%コード付近において、**ほぼ全スパン**にわたって**はく離**が発生
⇒ はく離領域内には、縦渦状のはく離渦が発生
- シュラウド面上の**二次流れ**が負圧面に到達し、負圧面上を半径下向きに流れる
⇒ シュラウド側において**二次流れ渦**を形成
30%コードから60%コードにかけて、負圧面上の広範囲で**はく離**が発生

時間平均流れ場

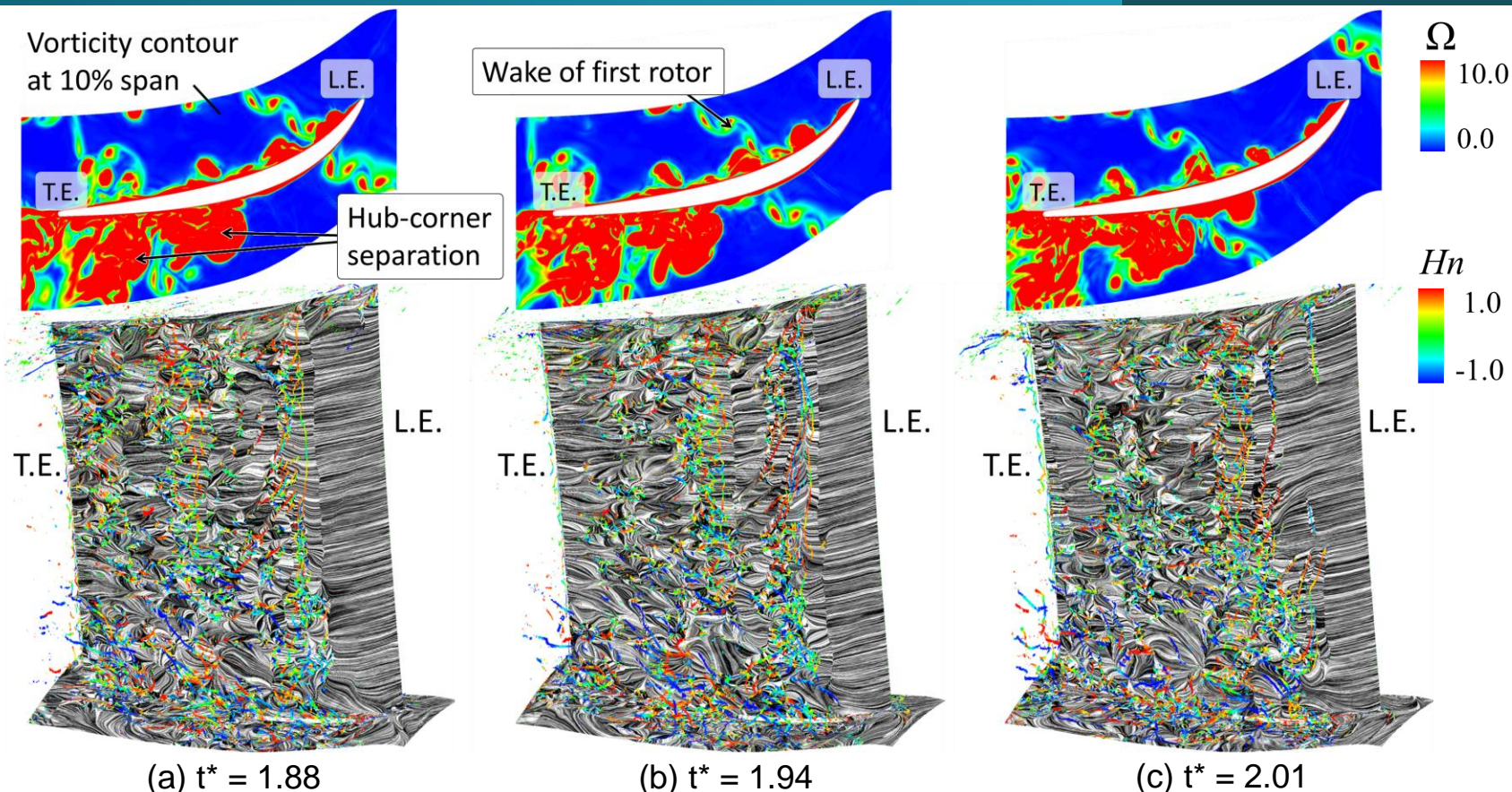
ハブ側の流れ場

- 中実部負圧面側にハブ・コーナーはく離渦が発生
- 前方および後方部分クリアランスから漏れ渦が発生
- 主流および前方部分クリアランスの漏れ流れが、翼間の二次流れと合流
- ⇒ ハブ・コーナーはく離渦を形成
- はく離領域は、中実部から下流側にかけてスパン上方に急激に拡大



Time-averaged vortex structures and limiting streamlines in first stator

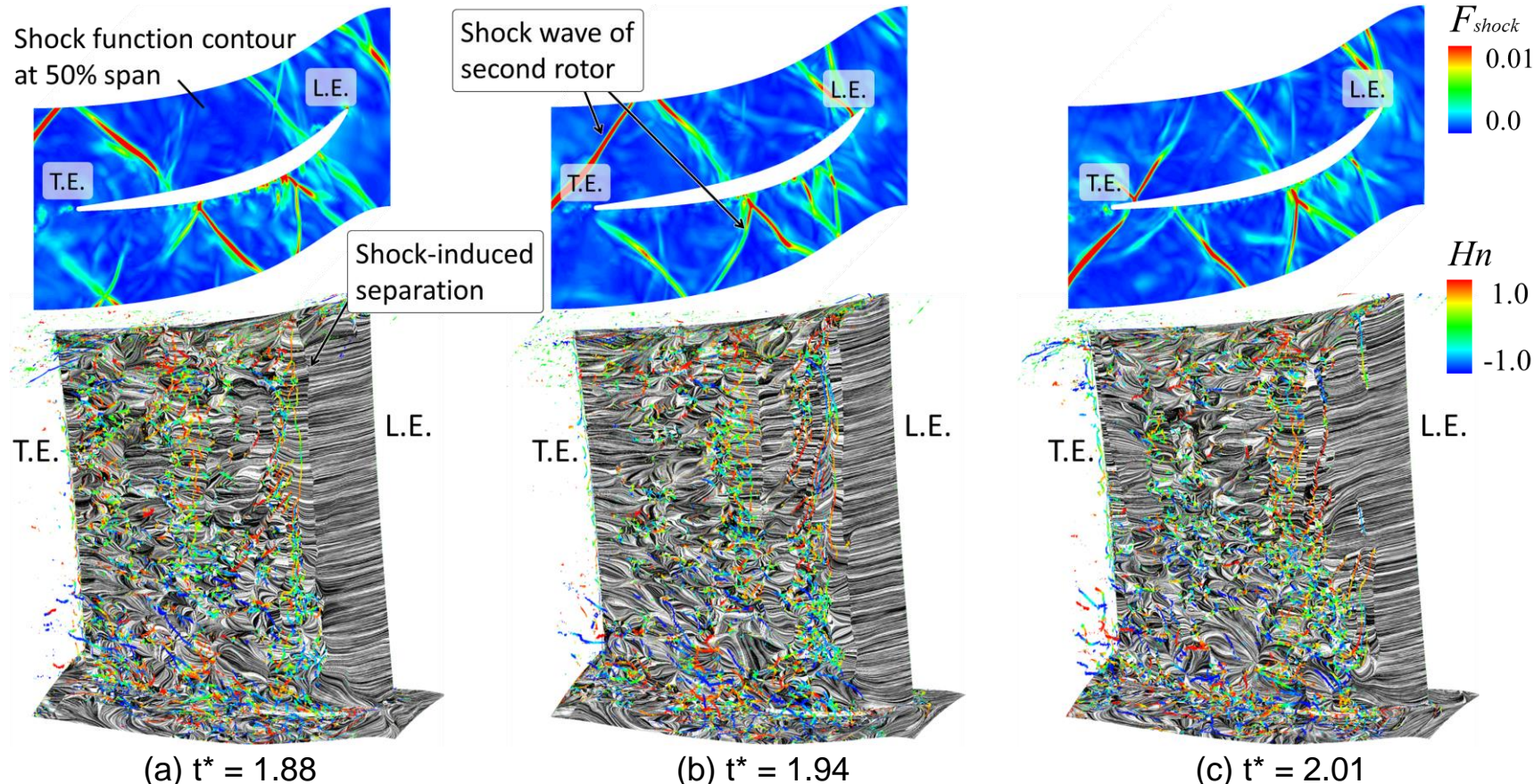
瞬時の流れ場



Instantaneous vortex structures and limiting streamlines, and vorticity contour at 10% span in first stator

- 時間平均流れ場では、ハブ・コーナーはく離領域内にはく離渦が1つ発生
瞬時の流れ場では、**多数のはく離渦**が発生し、それらが互いに**干渉**
⇒ 時間的に、はく離渦の位置や形状が大きく変化
- ハブ・コーナーはく離領域の内部には、**渦度の高い領域が複数に分かれて存在**

瞬時の流れ場

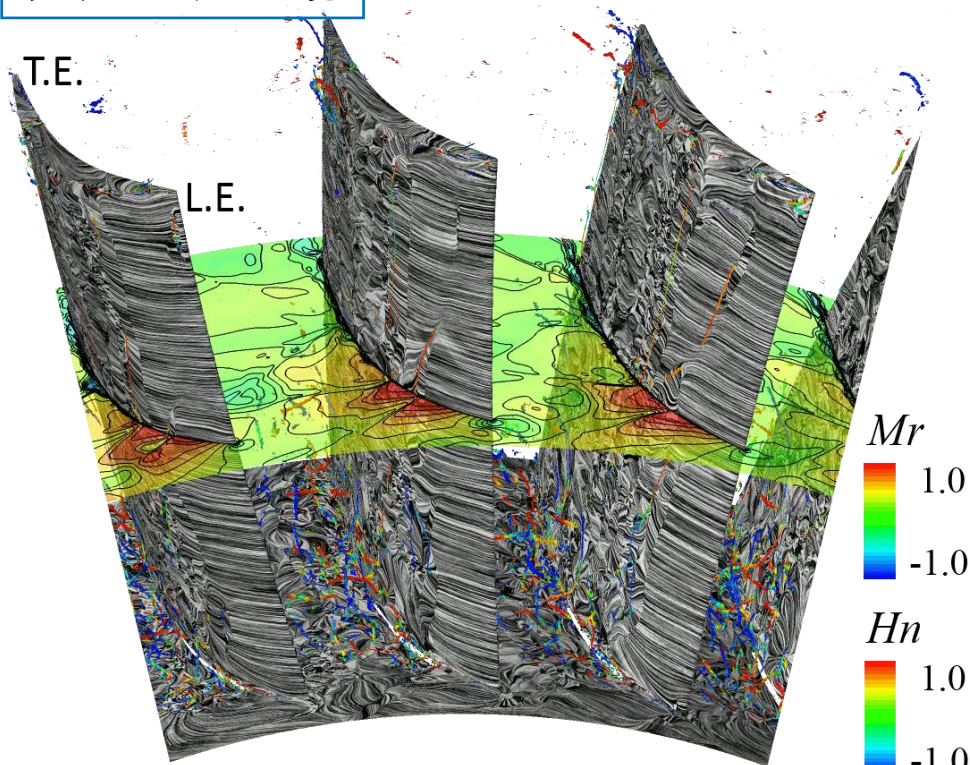


Instantaneous vortex structures and limiting streamlines, and shock function contour at 50% span in first stator

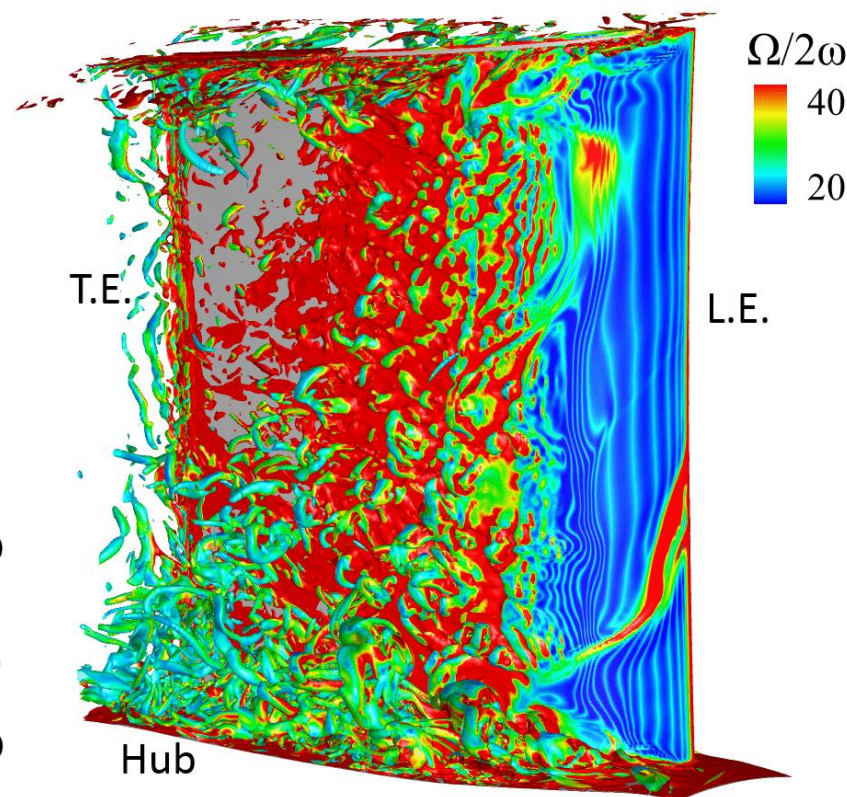
- 10%~20%コードにかけて、翼面境界層と衝撃波の干渉による、はく離が発生
⇒ はく離を起点として、その下流側では翼面近傍に多数のはく離渦が発生
- 10%~20%コードでは衝撃波の伝播速度が低下し、衝撃波に伴うはく離が密接して発生
⇒ 時間平均流れ場における翼面上のはく離の原因

瞬時の流れ場

非定常流れ場



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

まとめ

大規模非定常解析

- : 遷音速二段軸流圧縮機の**全段・全周**を対象とした大規模非定常解析
⇒ 初段静翼で**LES解析**, その他の翼列で**DES解析**を実施

圧縮機全体の流れ場

- : 初段静翼ハブ側において大規模な**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

初段静翼における流れ場

◆ 時間平均流れ場

- : 中実部負圧面側において, **主流**および前方部分クリアランスからの**漏れ流れ**が翼間の**二次流れ**と合流し**ハブ・コーナーはく離渦**を形成

◆ 瞬時の流れ場

- : 2段動翼の衝撃波と初段静翼の翼面境界層との干渉によって**はく離**が発生
- : ハブ・コーナーはく離領域内に**多数のはく離渦**が発生
⇒ 互いに干渉することで, その位置や形状が時間的に大きく変化
ハブ・コーナーはく離領域内には, **渦度の高い領域が複数に分かれて存在**

今後の展開

～ NASA Rotor37を対象としたWall-Resolved LES ～

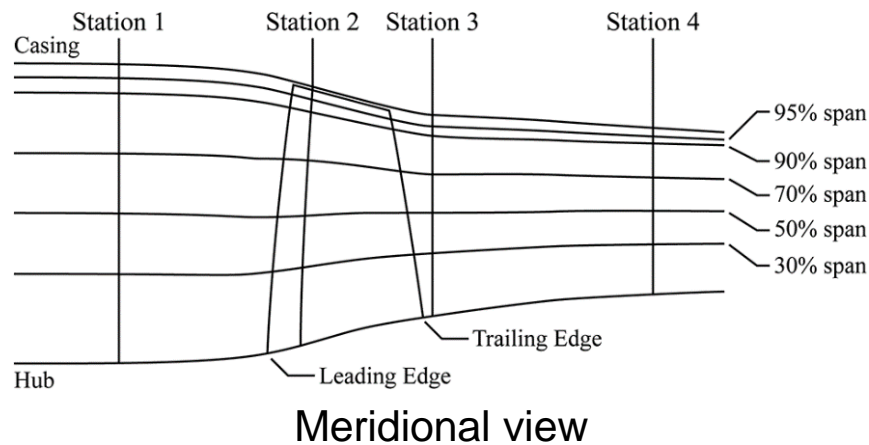
今後の展開

解析対象

◆ NASA Rotor37

: NASA Lewis研究所において、テスト用航空機エンジンのコア・コンプレッサーとして設計された遷音速圧縮機動翼

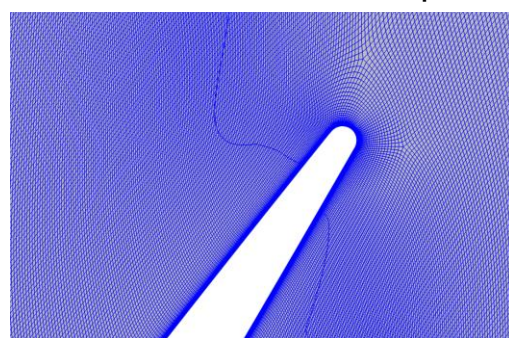
主要緒元	
回転数	17188.7 [rpm]
設計流量	20.188 [kg/s]
翼端半径	0.252 [m]



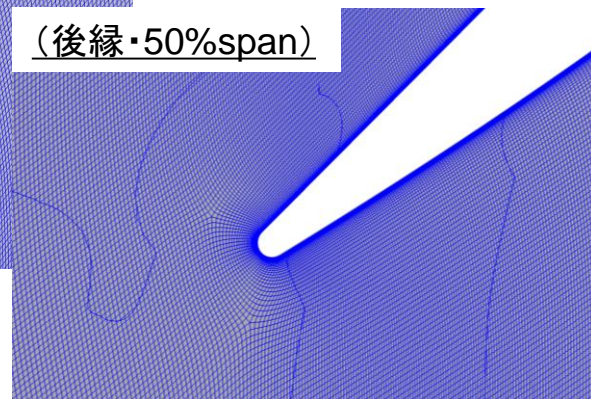
計算格子

- ◆ マルチブロック構造格子
- ◆ 圧縮機動翼の単流路のみ対象
- ◆ 格子点数 : 11億点(単流路)
 - 約3,000点(流れ方向)
 - 約1,000点(スパン方向)
 - 約500点(周方向)

計算格子図(前縁・50%span)



(後縁・50%span)



数値計算手法

◆ 計算解析手法

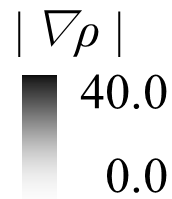
- 有限体積法
Cell-Centered法による離散化
- 陰的時間進行法
非粘性流束の評価
近似リーマン解法 (SLAU)
6次精度コンパクトスキーム

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
WALEモデル
(モデル定数 $C_w = 0.325$)
- 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4,000,000step
[1blade passing : 約100,000step]

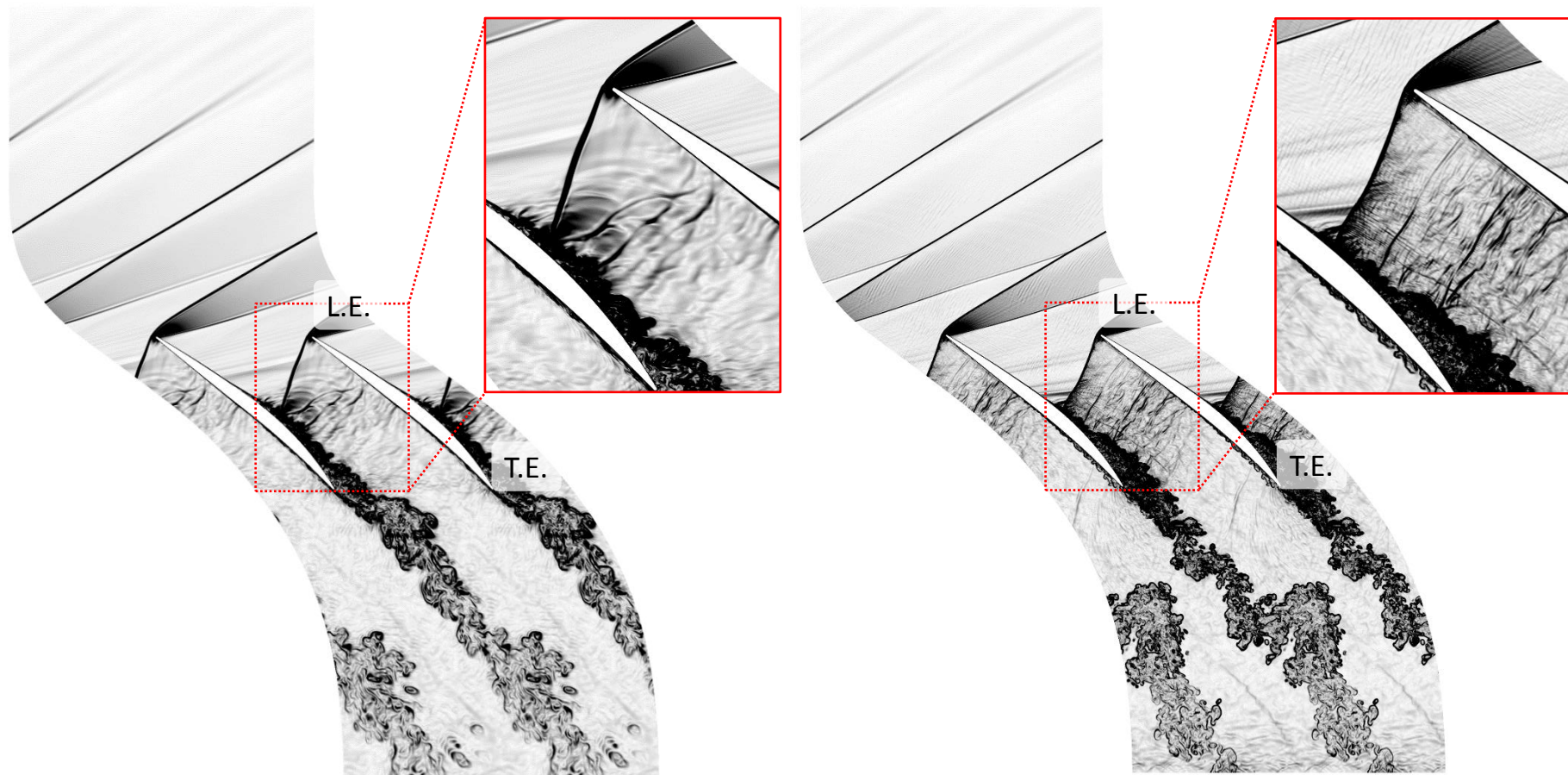
◆ 境界条件

- 入口境界条件 : 全圧・全温・流れ角を指定
- 出口境界条件 : 静圧固定
- 壁面境界条件 : 断熱すべり無し

LES解析



- ◆ 計算スキーム・クーラン数の影響
- : ミッドスパンにおける瞬時の流れ場を比較

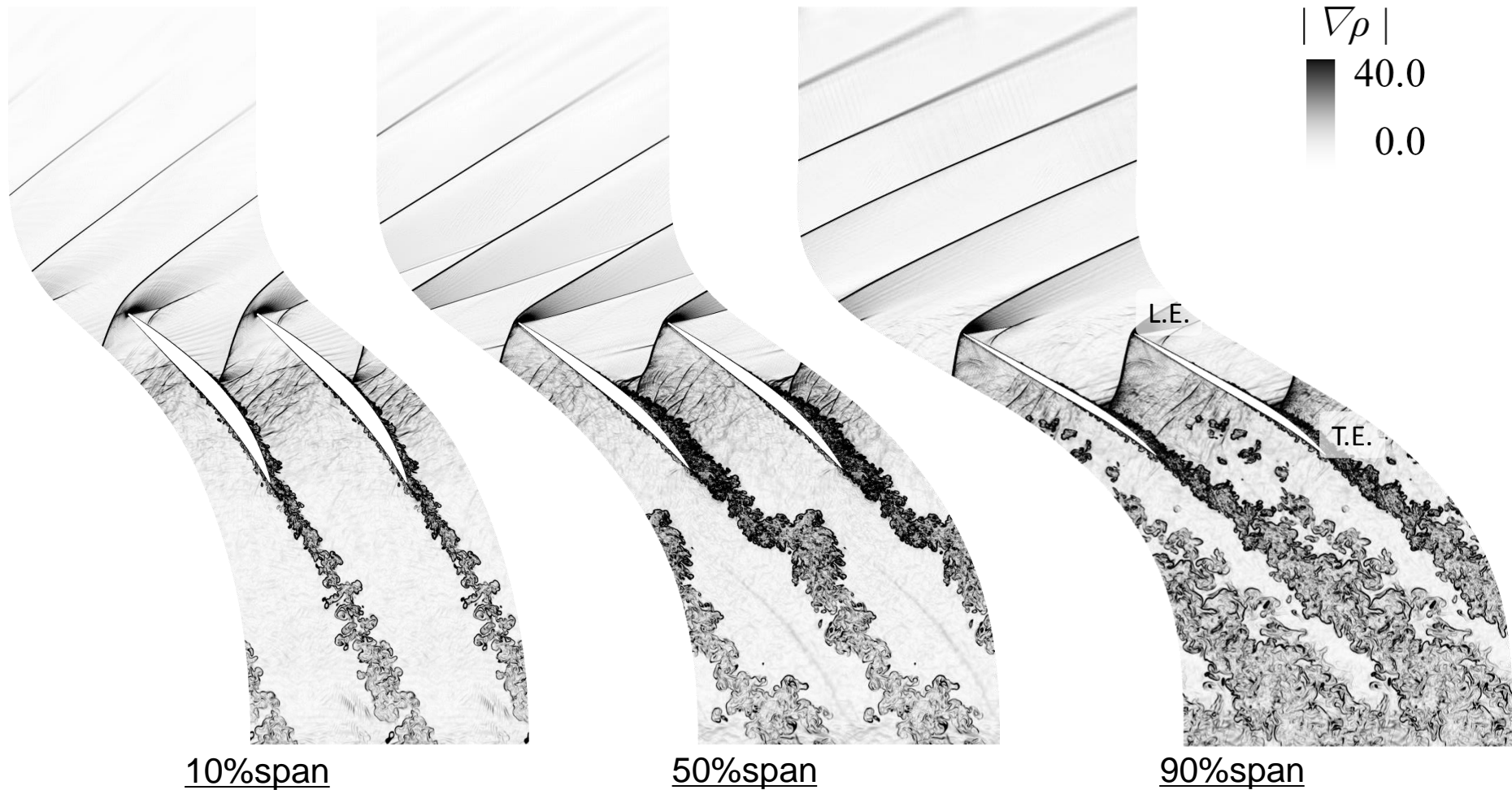


非粘性流束 : 3次精度MUSCL
+ SHUS
平均クーラン数 : $CFL = 1.4$

非粘性流束 : 6次精度COMPACT
+ SLAU
平均クーラン数 : $CFL = 0.035$

LES解析

密度勾配分布



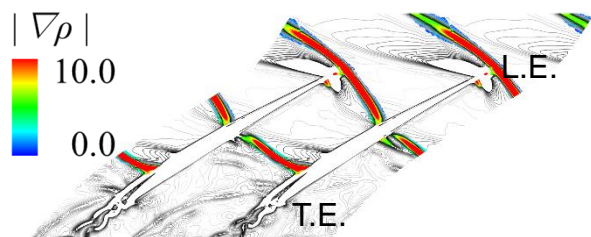
➤ 境界層内の微細な渦構造まで解像

今後の展開

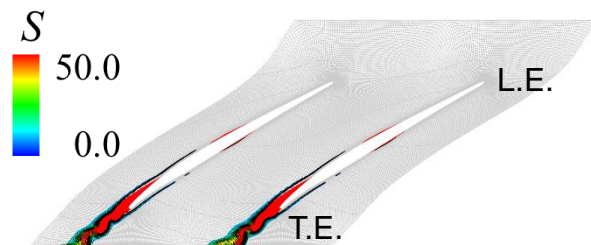
■ 損失発生メカニズムの解明

➤ 損失発生メカニズムの切り分け:

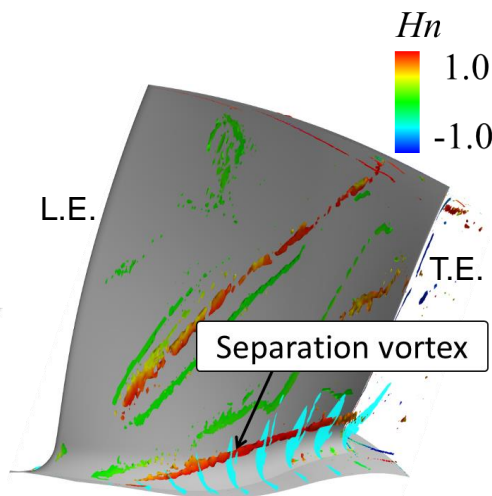
- 衝撃波に伴う損失
- 翼面境界層による損失
- 端面境界層による損失
- 後流による損失
- 翼端漏れによる損失
- ハブ/コーナーはく離による損失



衝撃波

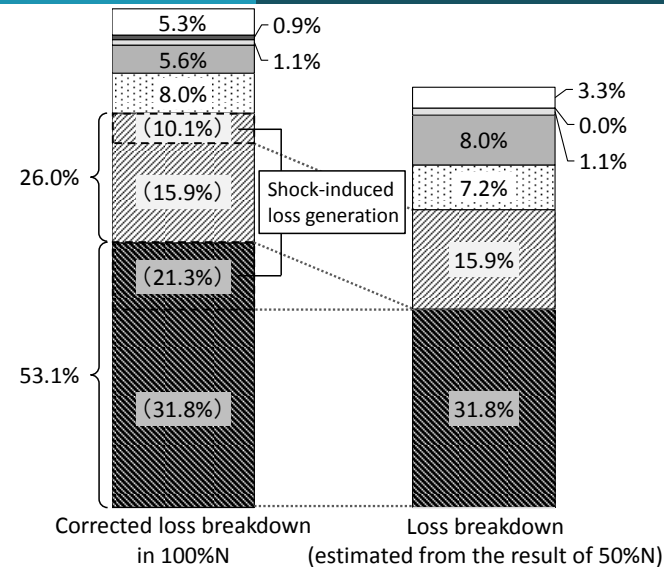


後流



ハブ・コーナーはく離

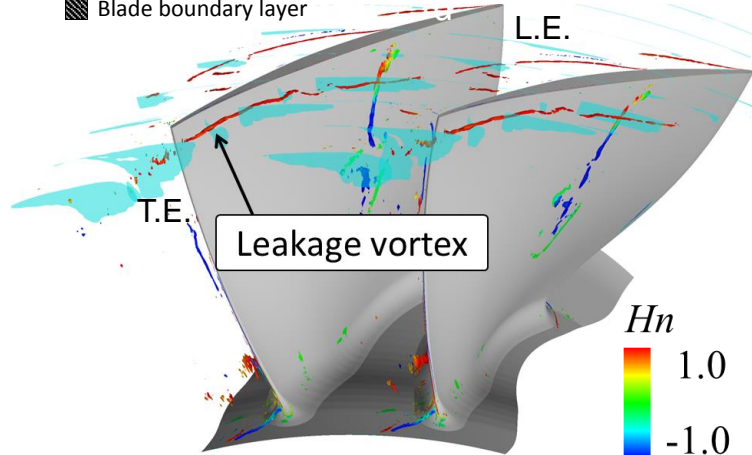
損失発生メカニズムの切り分け



Corrected loss breakdown in 100%N

Loss breakdown (estimated from the result of 50%N)

- Others
- Hub-corner separation
- ▨ Leakage vortex
- ▨ Blade boundary layer
- Shock wave
- ▨ End-wall boundary layer
- ▨ Wake



翼端漏れ渦