



ソニックブーム推算のための高精度近傍場圧力波形推算技術に関する研究(その2)

東北大学大学院工学研究科航空宇宙工学専攻
中橋・佐々木研究室

研究担当者:

○大木裕介(修士学生), 佐々木大輔(助教), 中橋和博(教授)

研究目的 及び内容	本委託研究は、宇宙航空研究開発機構 航空プログラムグループが進める静粛超音速機技術の研究開発で必要となる、ソニックブーム推算技術のうち気体近傍場の圧力波形を高精度に推算する技術の獲得を目的とし、格子細分化に基づく解適合格子法の開発を行う
--------------	--

Outline



1. 背景・目的
2. 解適合細分化法概要
 - 数値計算法
 - 細分化指標(Shock Function)
 - 細分化手法
 - 解析例
3. 従来の手法の問題点と対策
 - 問題点
 - 辺長を考慮したフィルタリング
 - 比較解析
4. 結言・今後の課題



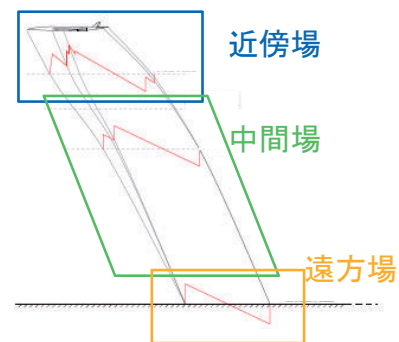
背景

▶ 超音速旅客機における騒音問題

- 機体から発生するソニックブームの**低減**が必須
- 機体の低ブーム設計・評価には、地上でのソニックブームの正確な推算が必要

▶ 地上でのソニックブーム推算

- 伝播解析による推算法
 - 近傍場: **機体近傍圧力波形**
 - 中間場: ソニックブームの伝播
 - 遠方場: 大気乱流の影響



2010/11/26

Yusuke OKI, Dept. of Aerospace Engineering, Tohoku Univ. JAPAN

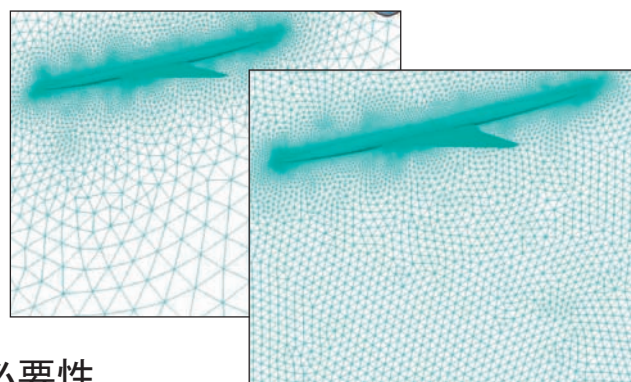
▶ 3

背景



▶ 近傍場圧力波形推算における要求

- 圧力波形精度向上
- 実用的な計算コスト
- 実機複雑形状への対応



- 効率の良い格子点配置の必要性
- 超音速域では物理量の急激な変化をもたらす衝撃波が支配的

- **非構造格子による衝撃波領域を中心とした
解適合細分化法**

2010/11/26

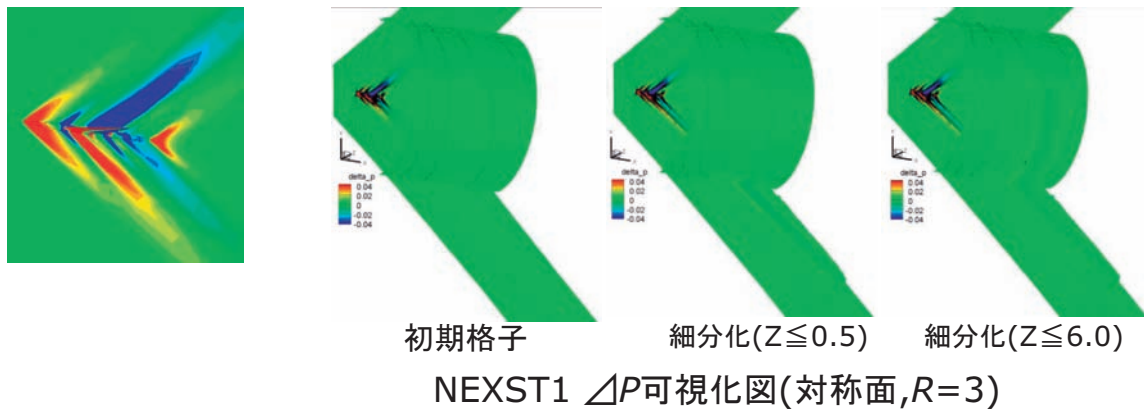
Yusuke OKI, Dept. of Aerospace Engineering, Tohoku Univ. JAPAN

▶ 4



目的

- ▶ 非構造格子解適合格子細分化法による
近傍場圧力波形の高精度推算手法の開発
 - 衝撃波同定に長けた指標としてShock Functionの導入
 - 三次元的に衝撃波を捉えた際の圧力波形への影響の検証



2010/11/26

Yusuke OKI, Dept. of Aerospace Engineering, Tohoku Univ. JAPAN

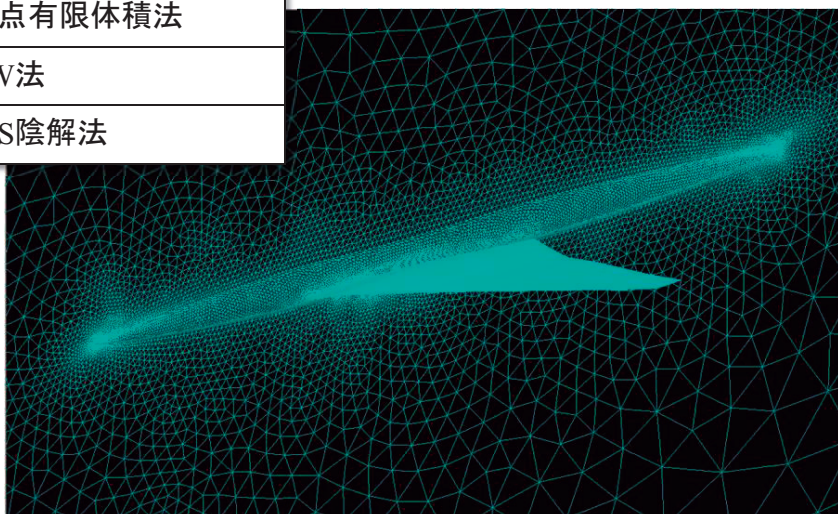
▶ 5

数値計算法



- ▶ TAS-code (Tohoku university Aerodynamic Simulation code)
 - ▶ 三次元非構造流体ソルバー

支配方程式	三次元Euler方程式
空間離散化法	セル節点有限体積法
流束評価	HLLEW法
時間積分	LU-SGS陰解法



2010/11/26

Yusuke OKI, Dept. of Aerospace Engineering, Tohoku Univ. JAPAN

▶ 6



細分化指標(Shock Function)

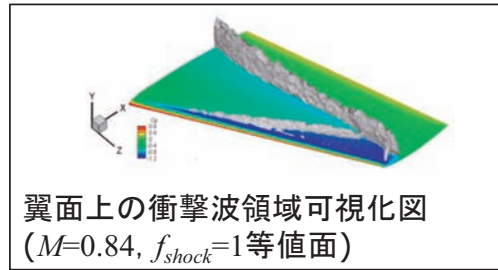
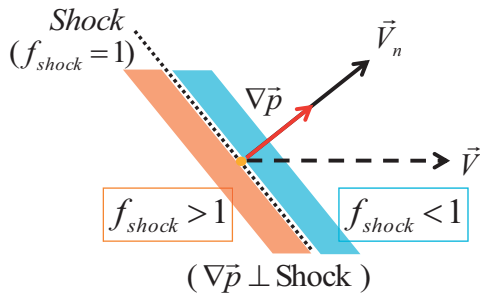
▶ 衝撃波同定に長けたShock Functionの導入

- 衝撃波面付近において

波面に対し垂直な速度成分 V_n が音速をまたぐ性質を利用

$$V_n = \vec{V} \cdot \frac{\nabla \bar{p}}{|\nabla \bar{p}|}$$

$$f_{shock} = M_n = \frac{V_n}{a}$$



\vec{V} : 速度ベクトル

a : 音速

$\nabla \bar{p}$: 圧力勾配ベクトル

超音速域下での数値誤差の影響



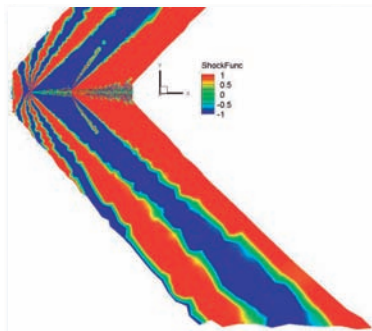
▶ 超音速域では数値誤差が衝撃波面の同定に影響

- f_{shock} のみでの同定が困難

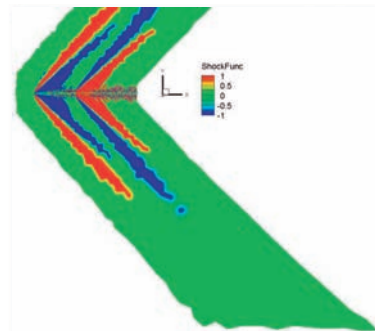
▶ 圧力勾配フィルターの導入

$$|\nabla \bar{p}| \geq E_{thr} \quad E_{thr}: \text{フィルター閾値(定数)}$$

- ▶ 圧力勾配が閾値より大きい領域で判定を行い、数値誤差を除去



フィルタリングなし



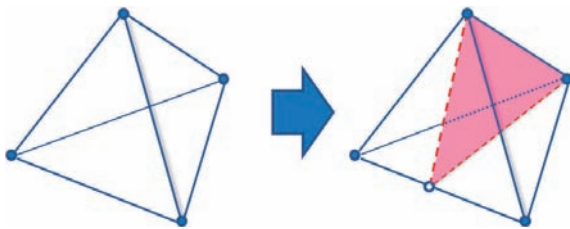
フィルタリングあり($E_{thr}=0.01$)

f_{shock} の可視化図($M=1.41$, 対称面)

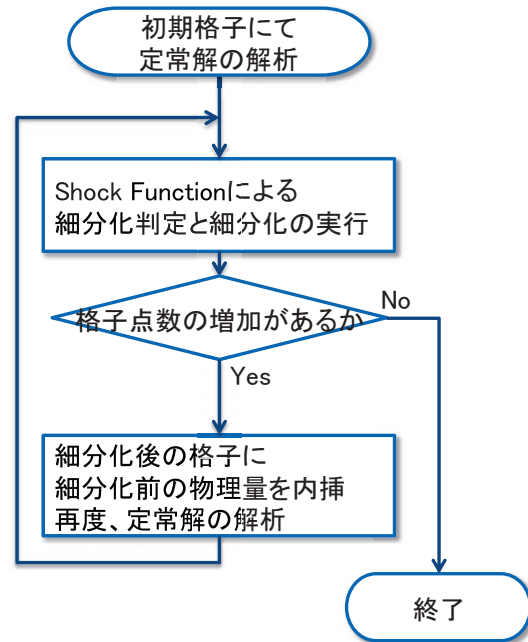


細分化手法

- ▶ Bisectionアルゴリズムによる分割
 - ▶ 四面体の最長辺の中点で分割



- ▶ 再計算時の収束性の改善
 - ▶ 細分化後の格子に、
細分化前の物理量を内挿



2010/11/26

Yusuke OKI, Dept. of Aerospace Engineering, Tohoku Univ. JAPAN

▶ 9

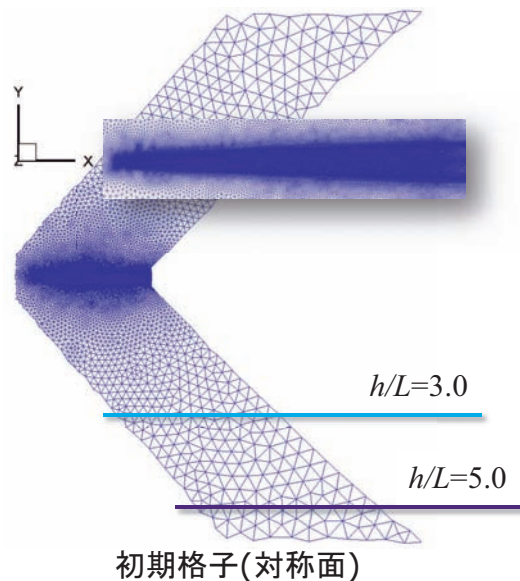
解析対象と解析条件



- ▶ 解析対象
 - 軸対称物体
 - $A(x)=0.02x$ ($0 \leq x \leq l$)
 - $l=2in.$



- ▶ 解析条件
 - ▶ 初期格子点数: 約55万点
 - ▶ マッハ数 : 1.41
 - ▶ 迎角 : 0°



- ▶ 圧力波形取得位置
 - 対称面上
 - $h/L=3.0, 5.0$ (実験値)

2010/11/26

Yusuke OKI, Dept. of Aerospace Engineering, Tohoku Univ. JAPAN

▶ 10



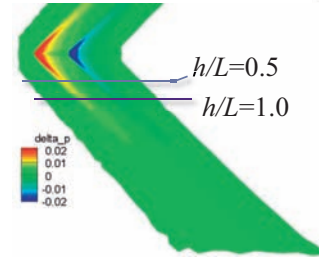
指標の感度比較

▶ Shock Function

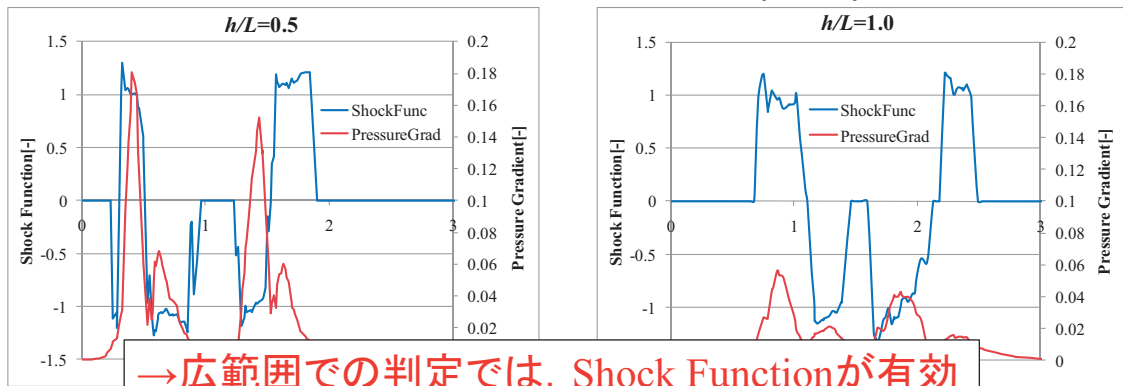
- 圧力勾配方向の速度成分を用いるため値が安定

▶ 圧力勾配の絶対値

- 減衰の影響により、遠方では変動量が減少



初期格子における Δp 分布 (対称面)



細分化領域及び条件



▶ 直方体の細分化領域

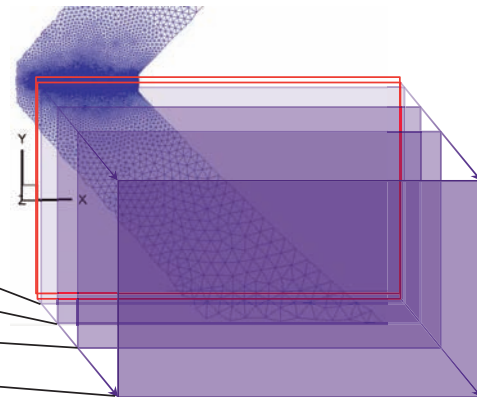
▶ 細分化対象の判定

- 細分化領域内
- 四面体の最長辺 > 分割限度

$$|\nabla \vec{p}| \geq E_{thr} \cap |f_{shock}| \geq 1$$

以上を満たす四面体

Case1
Case2
Case3
Case4

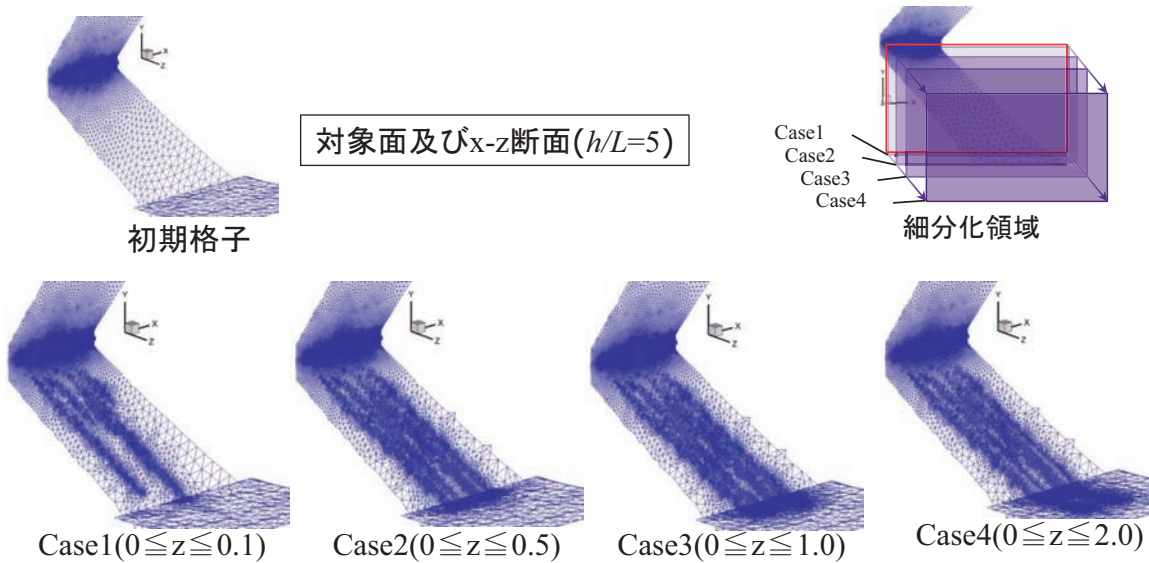


	Case1	Case2	Case3	Case4
圧力勾配フィルター	$E_{thr}=0.01$			
細分化閾値	$ f_{shock} \geq 1$ (膨張領域を考慮)			
分割限度	0.05			
細分化領域	$0 \leq x \leq 10$			
	$-6 \leq y \leq 0$			
	$0 \leq z \leq 0.1$	$0 \leq z \leq 0.5$	$0 \leq z \leq 1.0$	$0 \leq z \leq 2.0$



結果(格子)

	初期格子	Case1	Case2	Case3	Case4
細分化・再計算回数	-	12	13	15	18
格子点数	約55万点	約58万点	約75万点	約94万点	約130万点
細分化領域		狭 ←—————→ 広			

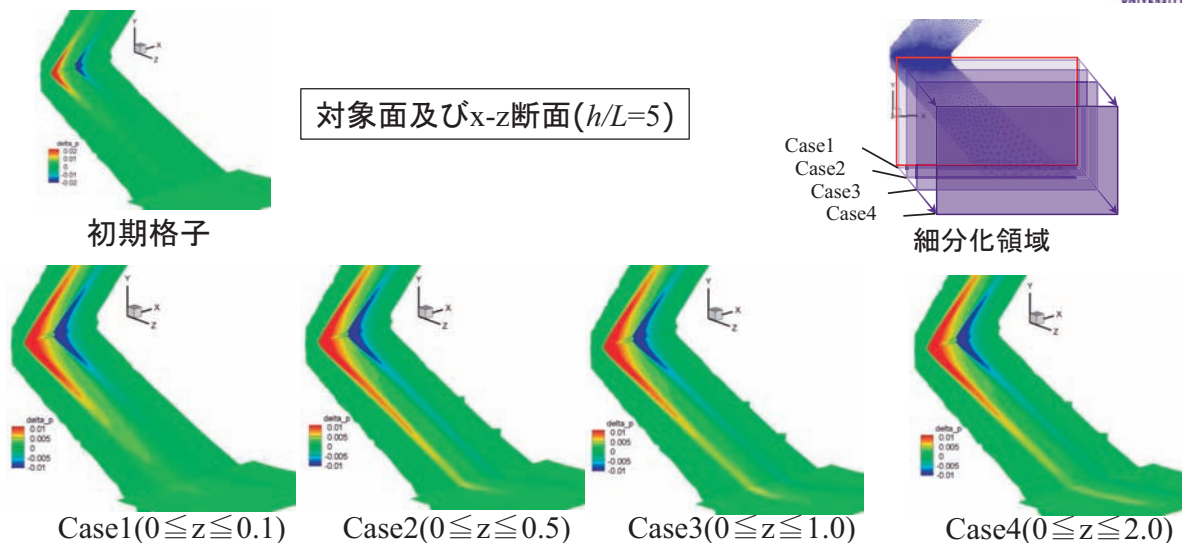


2010/11/26

Yusuke OKI, Dept. of Aerospace Engineering, Tohoku Univ. JAPAN

▶ 13

結果(Δp分布)



- ▶ Case1 : 圧力変動が減衰
- ▶ Case2 : 最も大きな圧力変動
- ▶ Case3,4: 分布が安定

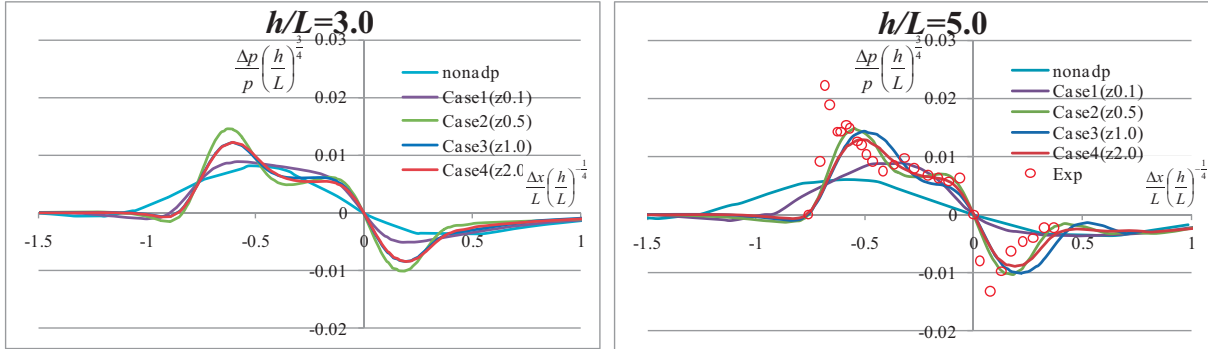
2010/11/26

Yusuke OKI, Dept. of Aerospace Engineering, Tohoku Univ. JAPAN

▶ 14

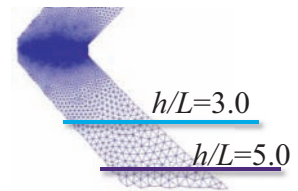


結果(圧力波形)



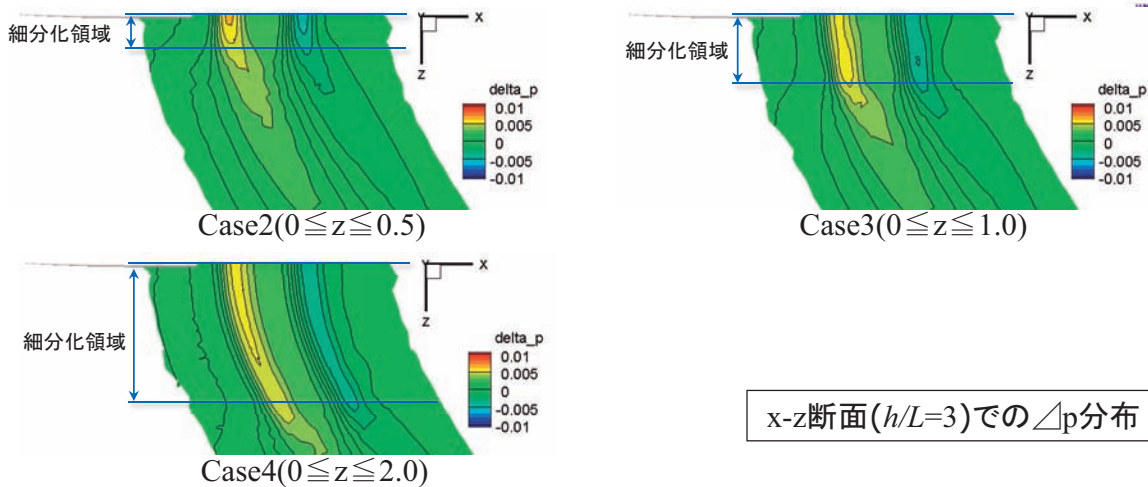
▶ 細分化領域(z軸方向)により波形が変化

- $h/L=3$: Case3($0 \leq z \leq 1.0$) で収束
 - $Z=0.5$ のとき初期圧力上昇が最大に
- $h/L=5$: 未収束



波形取得位置

結果(細分化領域の圧力分布への影響2)



x-z断面($h/L=3$)での Δp 分布

▶ 圧力波形を取得する際、領域端部の影響を考慮する必要性



従来の本手法における問題点

- 設定した最小格子サイズ(分割限度: $5e-2$) では波形が減衰
- Z軸方向(スパン方向)の細分化領域により,
取得される圧力波形が変化



- より細かな細分化(分割限度の縮小)
 - 細分化領域の拡張(領域の影響の検証)
- } 格子点数増加に直結

△ 格子点の増加により、従来のままでは計算コストが非現実的

- 細分化領域を最小サイズまで細分化するため、格子点増加が著しい
- 分割限度を表面格子サイズ($1e-2$ 以下)にすると、モデル近傍の数値誤差の影響を受ける

➡ 判定の改善が必要

2010/11/26

Yusuke OKI, Dept. of Aerospace Engineering, Tohoku Univ. JAPAN

▶ 17

圧力勾配によるフィルタリング



- ▶ 従来
 - ▶ 節点基準での判定(各節点の圧力勾配の大きさ)
 - ▶ 閾値を手動で入力, 各節点の値が閾値を下回る場合に領域判定から除外

▶ 新しい指標

- ▶ 辺基準での判定
 - ▶ (各辺に接する節点の圧力勾配値, edgeの長さ)

- ▶ 入力された物理量から閾値を設定

$$f = |\nabla p|_{edge} \cdot L_{edge}$$

- $|\nabla p|_{edge}$ に2節点の平均値
- $|\nabla p|_{edge}, L_{edge}$ に重み付け無し

- ▶ 必要に応じて重み付けを検討

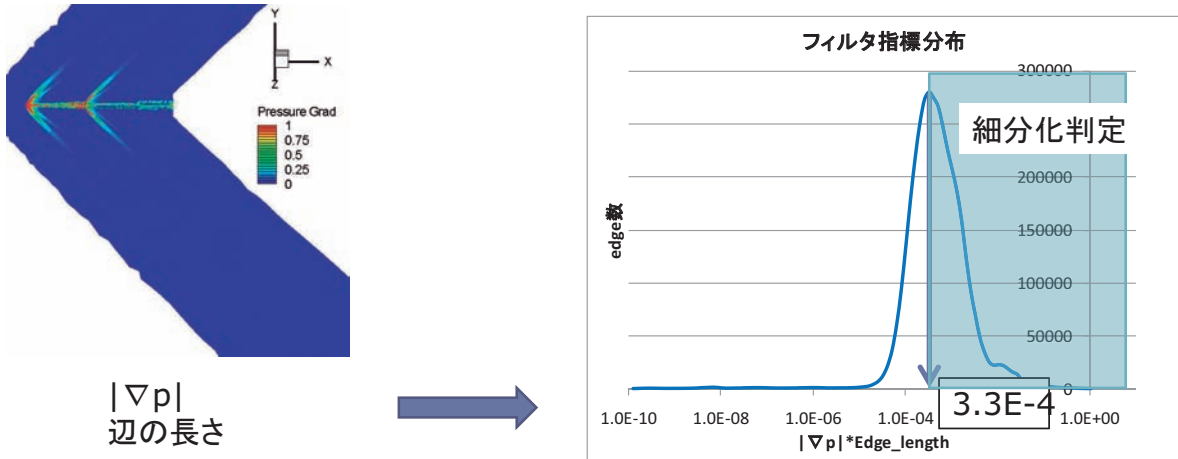
2010/11/26

Yusuke OKI, Dept. of Aerospace Engineering, Tohoku Univ. JAPAN

▶ 18

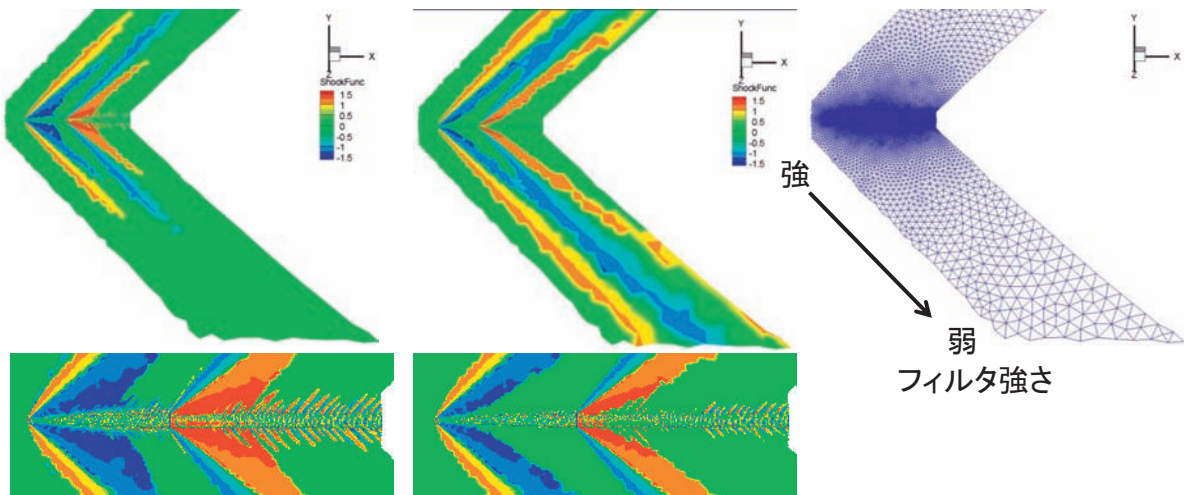


フィルタ閾値の設定



フィルタ指標の分布で最大数をもつ値を閾値とし
閾値以上の領域を判定領域に設定

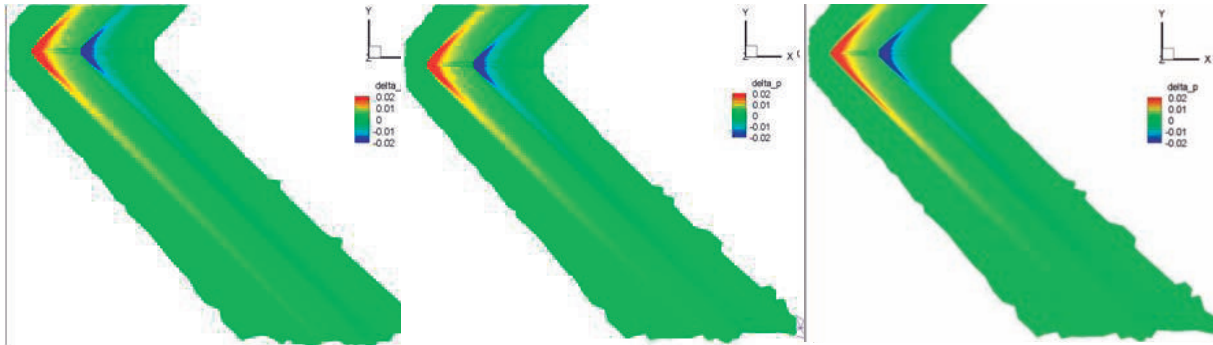
フィルタの比較(PGF 1e-2 , edge)



各節点ごと, $E_{thr} = 1.e-2$ 各辺ごと, $E'_{thr} = 3.3e-4$

- ✓ 格子が細かいほどフィルタが強く働く
- 格子サイズに応じたフィルタリング

格子比較



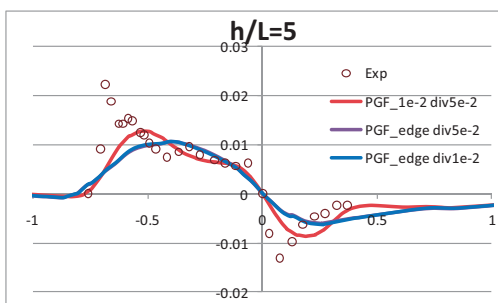
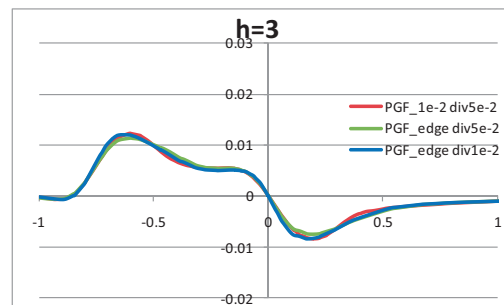
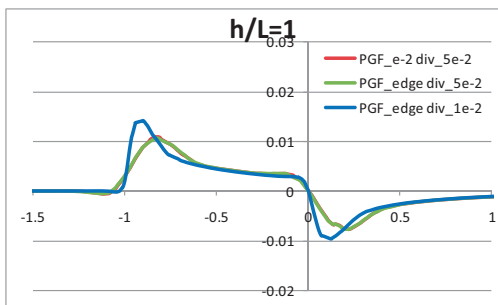
格子点数: 130万点
PGF: 1.e-2(node)
分割限度: 5e.-2
細分化回数: 18

格子点数: 86万点
PGF: edge
分割限度: 5e.-2
細分化回数: 7

格子点数: 170万点
PGF: edge
分割限度: 1e.-2
細分化回数: 10

- ▶ フィルタに辺長を考慮することで,圧力勾配・辺長に応じた細分化が可能に
 - より細かな細分化が可能(より細かな分割限度)
 - △遠方の勾配が小さい部分で,十分な細分化が難しい

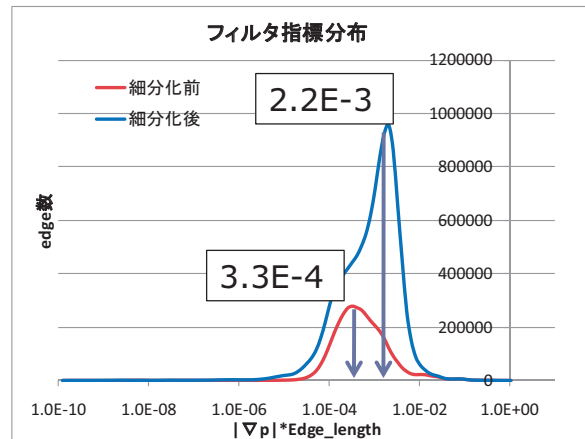
圧力勾配の比較



- ▶ 節点基準のフィルタ
 - 遠方の細分化に有効
 - △分割限度を細くできない
- ▶ 辺基準のフィルタ
 - 分割限度をより細くできる
 - モデル近傍の数値誤差を除去可能
 - △遠方の細分化で十分な細分化が得られない



フィルタ閾値の変化



- ▶ 細分化による結果の改善により、フィルタの閾値が大きくなる
(フィルタが強くなる方向へシフト)
- より細かな細分化に有効
- △遠方ではフィルタが強すぎ、細分化が不十分に
 - ・ 指標の重み付け、閾値の決定法の改善

2010/11/26

Yusuke OKI, Dept. of Aerospace Engineering, Tohoku Univ. JAPAN

▶ 23

結言・今後の課題



- ▶ 結言
 - 数値誤差除去のために、圧力勾配・辺長を指標とするフィルタを導入し、指標の分布数からフィルタ閾値を自動で求めるよう変更を加えた
 - フィルタに辺長を考慮することで圧力勾配・辺長に応じた細分化が行われ、従来以上の細分化を行う際の計算コストの減少を確認した
 - 一方で、閾値の自動化によるフィルタ強度の変化により、遠方での細分化が不十分となることを確認した
- ▶ 今後の課題
 - フィルタの指標及び閾値決定法の改善
 - より細かな細分化を行った際の波形精度の検証
 - 細分化領域が及ぼす波形への影響の検証
 - Coarseningの導入による計算コストの削減

2010/11/26

Yusuke OKI, Dept. of Aerospace Engineering, Tohoku Univ. JAPAN

▶ 24