

# Building-Cube 法による JAXA 主脚騒音模型の非定常流体解析

佐々木大輔, 恩田博, 石田崇, 中橋和博  
東北大学大学院工学研究科航空宇宙工学専攻

高橋俊  
東京農工大学大学院工学研究院先端機械システム部門

## Unsteady Flow Analysis of JAXA Landing Gear Model by Building-Cube Method

by  
Daisuke Sasaki, Hiroshi Onda, Takashi Ishida, Shun Takahashi, Kazuhiro Nakahashi

### ABSTRACT

Landing gear is one of critical noise sources at landing, thus it is expected to develop CFD and CAA solvers to estimate the aerodynamic noise. In this study, block-structured Cartesian-based CFD solver, Building-Cube Method, is applied to predict the flowfield around the JAXA Landing gear Evaluation Geometry model. The capability of three-dimensional unsteady incompressible flow solver for a landing gear has been demonstrated through simple and complicated landing gear models.

### 1. 緒言

近年, 世界各国の空港で航空機の離発着時の騒音規制が強化される方向にあり, 今後騒音の大きい機体の運航は制約が増えていくことが予想される. 日本においても, 騒音による空港運用時間の制限や機体の騒音レベルに応じた離発着料が徴収されている. そのため, 航空機メーカーは離発着時に生じる騒音の低減を目指して様々な開発を進めてきた. その結果, 主要な騒音源であったエンジン騒音 (ファン騒音・ジェット騒音) の低減が可能となってきた. エンジン騒音の低下に伴い, 従来あまり検討されてこなかった機体から生じる騒音も無視できなくなりつつある. そのため, 代表的な機体騒音源である高揚力装置や降着装置の騒音削減を目的とした研究が盛んに行われている[1-8].

宇宙航空研究機構 (JAXA) では, 図 1 に示す主脚騒音計測用モデル (LEG 形状, Landing gear noise Evaluation Geometry) により, 実験的・数値解析的に脚から生じる騒音に関しての研究を行っている[6-8]. 図より分かるように LEG モデルには多数の部品が存在しており, これらすべての部品を考慮した解析を構造格子で行うことは難しい. 非構造格子では複雑形状を取り扱うことができるが, 格子生成に必要な時間は大きく, 各部品の影響を考慮する場合など, 前処理にかかる時間を無視できない. そのため, 降着装置周りの解析には直交格子法に基づく手法が望ましい. 直交格子法では, 空間精度を上げることが容易であり, 後流を精度よくとらえるという意味でも都合が良い. ただし, 単純な直交格子法を用いると格子数が莫大になってしまう問題がある.

筆者らはこれまでブロック型直交格子法として, Building-Cube 法 (BCM) を開発してきた[9-12]. Building-Cube 法では, 流れ場を様々なサイズの Cube と呼ばれる立方体領域に分割し, 各 Cube 内には同数の等間隔直交格子 Cell を配置する. 解析ソルバの単純性を保つために物体は階段状表現で表され, 物体境界の幾何学精度を保つため, また境界層内の粘性領域を解くために物体近傍では非常に細かい格子が必要である. 図 2 に, 円柱の空力音解析に用いた BCM 格子を示す[13]. 物体近傍では円柱形状を解像するために十分に細かい格子を生成した結果, 空力音に対して実験値や他者の計算値と十分な一致を見た. 一方, 円柱から離れた領域では Cube サイズを大きくすることで, 格子点数の削減を図っている. 本アプローチにより, 各 Cube における計算負荷は均一となり, 大規模並列計算環境時でも十分な並列性能を上げることが期待できる.

本研究では, 3 次元非圧縮性流体解析ソルバを JAXA の LEG 形状に適用する. 図 3 に示すタイヤのみ存在する単純な形状 (Simple 形状) と脚扉・サイドブレース・トルクリンク等が付属した複雑な形状 (DST 形状) の二つの形状を用いて計算を行い, 今村らの結果[6,8]との比較を通して本手法の有効性の検証を行うと共に, 今後の空力音解析に向けての知見を得る.

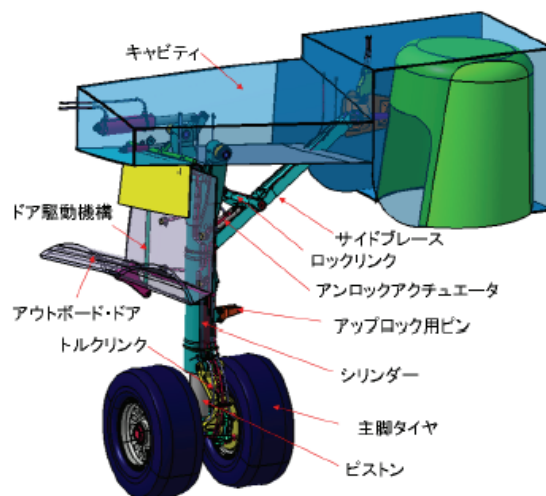


図 1 Landing Gear Noise Evaluation Geometry [6-8]

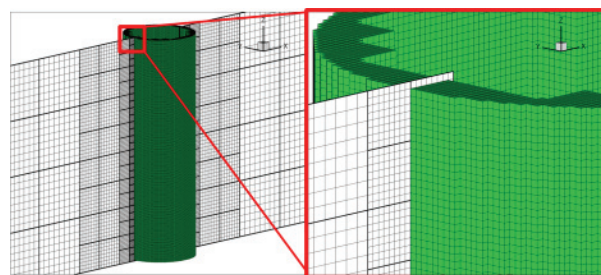


図 2 円柱まわりの BCM 格子 (太線は Cube 境界を表し, 細線は Cell を表す) [13]

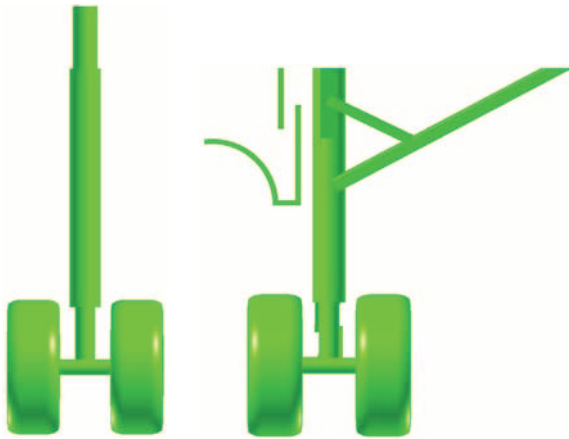


図3 解析に用いる主脚形状  
(左: Simple形状, 右: DST形状)

## 2. 解析手法

本解析で用いる Building-Cube 法は、等間隔直交格子法に基づく手法であり、解析領域は流体の特性によりサイズの異なる立方体領域 Cube に分割される。Cube 内は更に同数の等間隔直交格子 Cell によって離散化される。物体近傍や後流域では Cube サイズを小さくし、一方遠方においては Cube サイズを大きくしている。

計算には、スタガード格子有限差分法非圧縮性ソルバ [11]を用いた。流れの支配方程式は連続の式および非圧縮性 Navier-Stokes 方程式である。空間方向の離散化について、移流項には 3 次精度上流差分、拡散項には 2 次精度中心差分を用いている。時間方向の積分には Fractional Step 法を用い、仮の速度場の解法には Adams-Bashforth 時間 2 次精度陽解法を用いている。なお、異なるサイズの Cube 間での情報交換には単純な線形内挿を用いている。

## 3. 解析条件

計算に用いたのはタイヤのみの脚 (Simple 形状) と、脚扉・サイドブレース・トルクリンク等が付属した脚 (DST 形状) の 2 種類である。Reynolds 数はタイヤ直径を代表長として  $1.8 \times 10^6$  である。計算空間はタイヤ直径を  $D$  として  $x, y$  方向にそれぞれ  $30D$ ,  $z$  方向に  $15D$  である。境界条件は表 1 のように与えた。対流流出速度には流出面の速度のキューブ内平均値を用いている。また、脚の配置は図 4 に示すように  $z$  軸負側に支柱,  $z$  軸正側にタイヤがくるようにしている。 $z$  軸負側の境界条件 (支柱付け根) は実験を模擬するためにスリップ境界とした。

計算はそれぞれの脚につき Coarse, Fine の 2 種類の格子で実行した。それぞれの格子の諸元は表 2 に示す通りであり、多数の部品が存在している DST 形状の格子数は、Simple 形状の約 2 倍であり、約 1 億に達している。計算においては、Coarse, Fine とともに、まず非定常な流れ場を発達させるために無次元時間 10 だけ計算し、その後時間平均流れを得るために、Coarse は無次元時間 50 だけ、Fine では無次元時間 10 だけ計算した。

表 1 外部境界条件

	velocity B.C.	pressure B.C.
X-	一様流	ノイマン
X+	対流流出	ディリクレ
Z-	スリップ	ノイマン
Z+	対流流出	ディリクレ
Y-	対流流出	ディリクレ
Y+	対流流出	ディリクレ

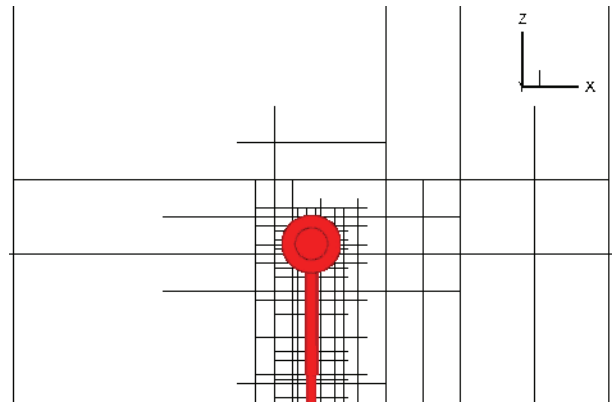
表 2 格子諸元

(a) Simple 形状

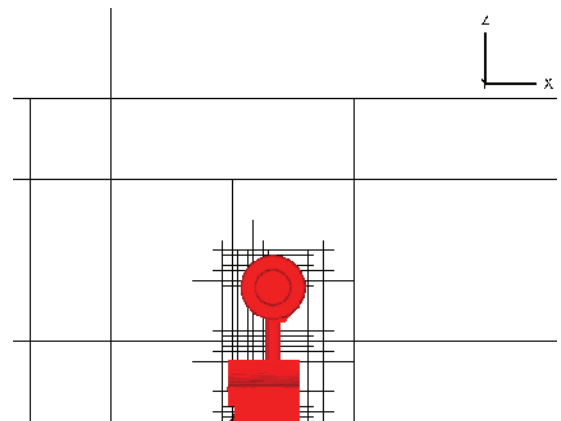
	Coarse	Fine
# of cubes	2,560	12,760
# of cells per cube	16	16
total # of cells	10,485,760	52,264,960
minimum grid spacing	$9.7 \times 10^{-3}$	$4.8 \times 10^{-3}$

(b) DST 形状

	Coarse	Fine
# of cubes	4489	23151
# of cells per cube	16	16
total # of cells	18,386,944	94,826,496
minimum grid spacing	$9.7 \times 10^{-3}$	$4.8 \times 10^{-3}$



(a) Simple形状



(b) DST形状

図4  $y=0$ 断面における主脚近傍の Cube 境界

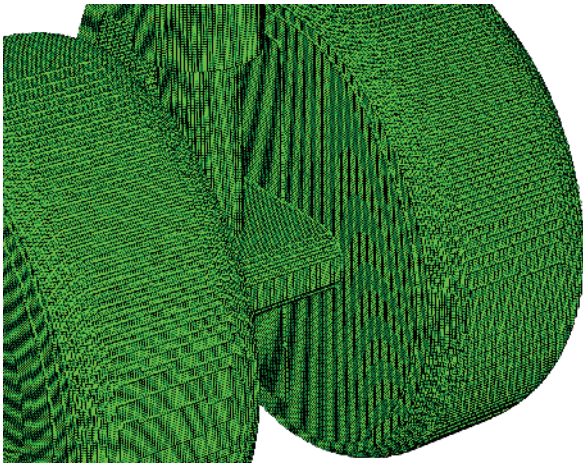


図 5 Fine 形状におけるタイヤ周りの格子

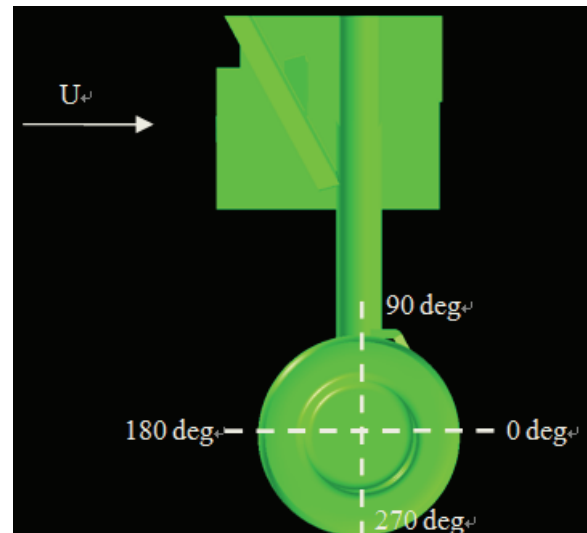


図 7 タイヤ周方向圧力係数分布の定義

#### 4. 結果

##### 4. 1 タイヤ周方向圧力係数分布

Simple 形状の解析結果の時間平均を行い、図 6 に Coarse 格子と Fine 格子におけるタイヤ中心 ( $y=0.363$ ) における周方向圧力係数分布を示す。ここで、図 7 に示すように 0 度位置を後方淀み点、90 度位置をタイヤの設置点の反対側、180 度位置を淀み点、270 度位置をタイヤ設置点とした。この図より、格子解像度が上がると  $C_p$  最小値がより小さくなり、かつタイヤ後方での  $C_p$  回復がより大きくなることが分かる。この結果は図 8 に示す今村らの論文[6]の計算結果（マルチブロック構造格子ソルバ UPACS による LES 計算、非構造格子ソルバ TAS による RANS 計算）や実験値と定性的に一致している。しかし、 $C_p$  の最小値が一致しておらず、これは今回用いた Fine 格子であっても境界層の格子解像度が不足していたため、剥離位置が前方になってしまったためであると考えられる。

DST 形状においても、同じタイヤ位置における周方向の時間平均圧力係数分布を求めた。図 9 に示すように、Simple 形状と同様の傾向を示しており、Fine 格子での改善は見られるものの剥離が前方で始まっていることが分かる。

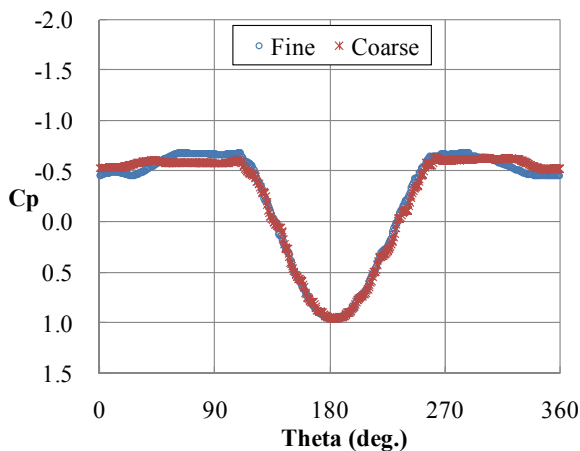


図 6 タイヤ周方向の時間平均圧力係数分布 (Simple 形状)

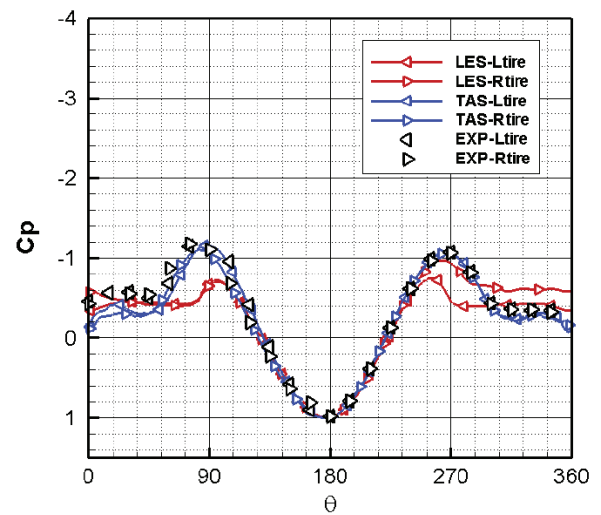


図 8 今村らによる計算及び実験におけるタイヤ周方向圧力係数分布[8]

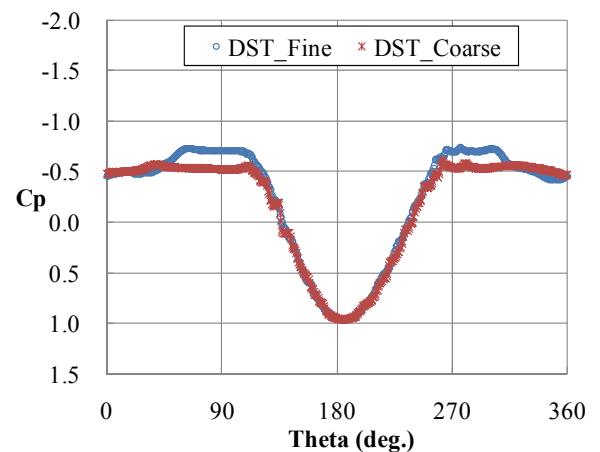


図 9 タイヤ周方向の時間平均圧力係数分布 (DST 形状)



#### 4. 2 時間平均流線

Simple 形状と DST 形状の時間平均流線及び圧力分布を図 10, 図 11 に示す. タイヤ外部の流線は大きく乱れており, 流れが剥離している様子が確認できる.

脚扉の前方も全体的に流線が乱れており, 角を回る部分で流れが剥離していることが確認できる. なお, DST 形状においてはタイヤ間に存在する部品の影響により, Simple 形状とは若干流れの様相が異なる.

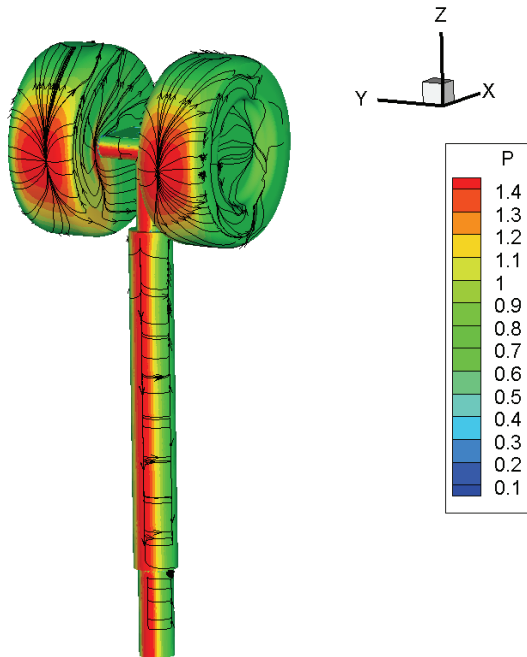


図 10 Simple 形状の時間平均流線と圧力分布

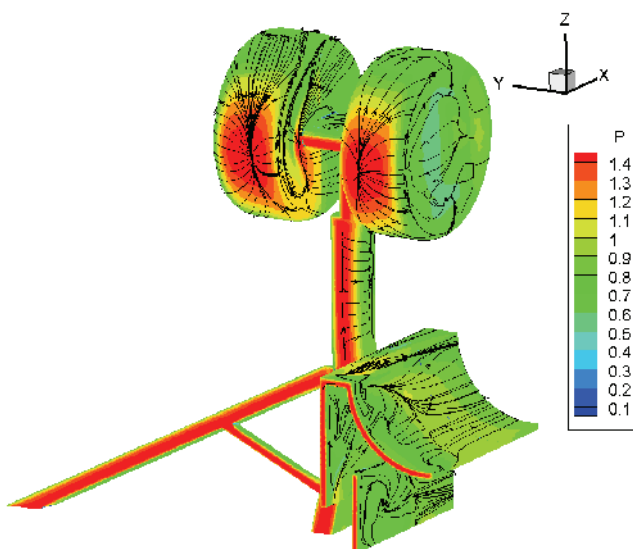


図 11 DST 形状の時間平均流線と圧力分布

#### 4. 3 断面速度分布

脚扉等の部品の存在する DST 形状の Fine 格子における時間平均の地面に水平な断面上の速度分布を図 12 に示す. 支柱付け根を 0%  $Z_{\max}$ , タイヤ先端を 100%  $Z_{\max}$  としてある. 比較のため, 図 13 に今村らの定常計算結果[8]である断面マッハ数分布を示す. 今村らは非構造格子ソルバである TAS (Tohoku university Aerodynamic Simulation) を用いて RANS 計算を行っている.

主脚付け根近傍 ( $Z=20\%\sim 30\% Z_{\max}$  位置) においては, サイドブレースと支柱の間の流れや脚扉と支柱の間に加速領域が生じており, 今村らの結果と定性的に一致している. ただし, その加速は小さく, 支柱や脚扉の先端から生じた剥離が影響していると考えられる.

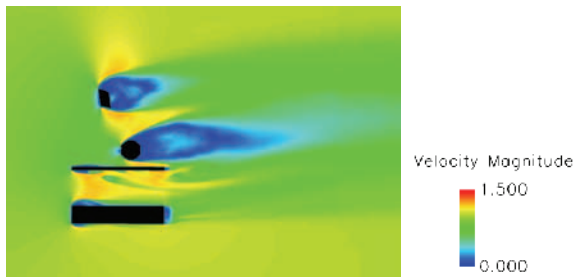
タイヤ断面位置 ( $Z=70\%\sim 90\% Z_{\max}$  位置) においては, 部品との干渉により位置毎に流れ場が大きく異なる. 70%  $Z_{\max}$  位置では, 支柱の後流がトルクリンクに衝突している様子が確認でき, 流れ場は今村らの結果と定性的に一致している. しかし, 今村らの結果ほどの加速は観測されていない. 90%  $Z_{\max}$  位置ではタイヤ間の流れに関して今村らの結果と大きく異なっており, タイヤ後方で減速している様子が確認できる. これらの結果は, 解像度不足によりタイヤ入口で剥離が生じ, タイヤ間に入る流れが減速してしまったことに起因すると思われる. 今後, 高 Reynolds 数の流れに対しての乱流モデル等のアプローチが必要である.

最後に, Simple 形状の Fine 格子における時間平均の断面速度分布を図 14 に示す. 70%  $Z_{\max}$  位置では, 支柱後流を遮るトルクリンクがないため, タイヤと支柱の間での加速が大きくなっていることが確認できる. 80%や 90%  $Z_{\max}$  位置においては, 流れ場は DST 形状の断面速度分布とほぼ同じとなっている.

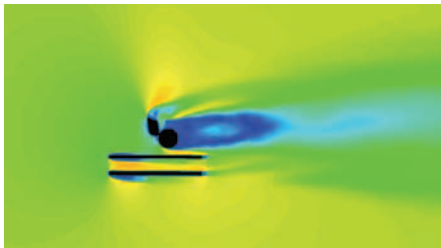
#### 5. 結言

BCM 非圧縮性流体解析ソルバを用いて, タイヤのみの脚と脚扉やサイドブレース等各種部品の存在している脚の 2 種類について計算した. タイヤ周方向の表面圧力係数分布は, 既存の結果と定性的に一致するものの, 剥離が前方で始まっていることが分かった.  $z$  軸の各断面での時間平均主流方向速度分布より, 付属物が複雑な流れを誘起していることが確認できた. 既存の結果と異なり脚扉の前面で剥離が生じたため, 加速領域の大きさが制限され, 実際の流れ場と異なっていることが分かる.

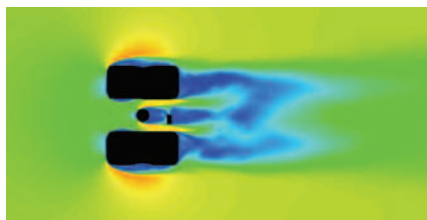
本手法では, 直交格子を用いていることから複雑な主脚周りの解析を行うことは容易であり, 各付属物の影響を評価する際には非常に有効である. しかし計算結果から明らかのように, 境界層内の格子解像度不足により実際よりも早く剥離が生じる. 現在の計算機環境では, 更なる格子解像度の向上は難しいため, 今後乱流モデルを導入するなどの対処によって, より解析の信頼性を上げる必要がある.



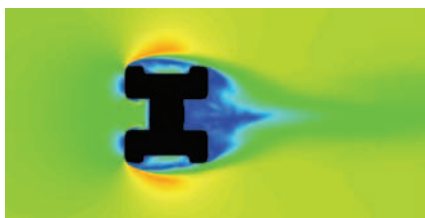
(a) 20%  $Z_{\max}$



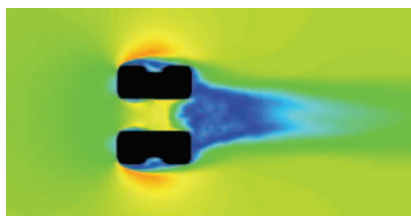
(b) 30%  $Z_{\max}$



(c) 70%  $Z_{\max}$



(d) 80%  $Z_{\max}$



(e) 90%  $Z_{\max}$

図 12 DST 形状の断面速度分布 (Fine 格子)

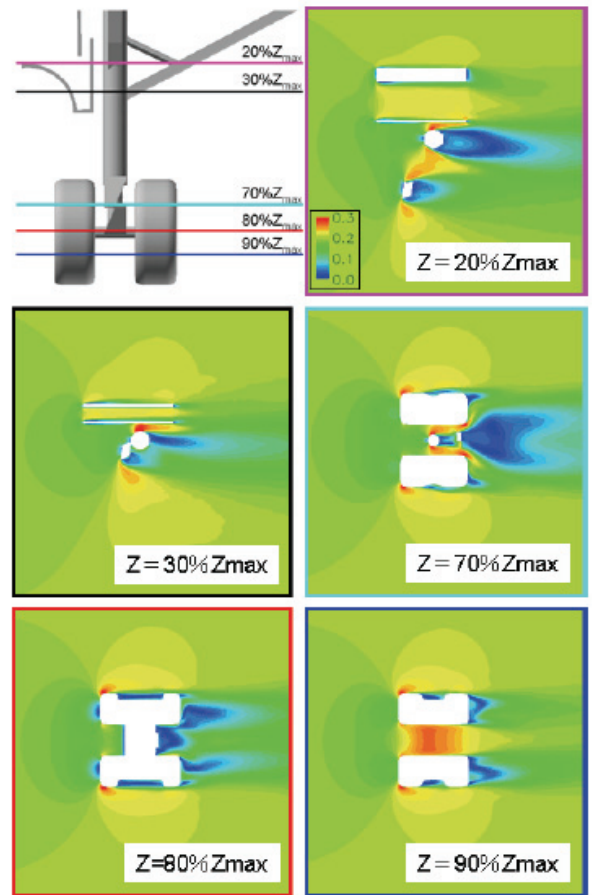
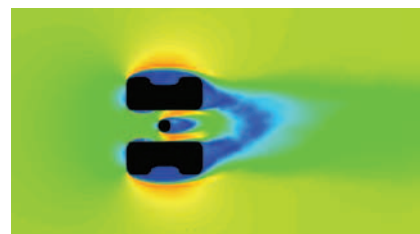
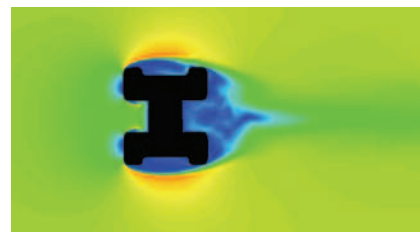


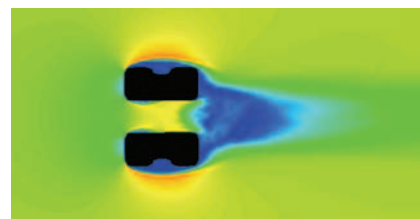
図 13 TAS による断面マッハ数分布[6]



(a) 70%  $Z_{\max}$



(b) 80%  $Z_{\max}$



(c) 90%  $Z_{\max}$

図 14 Simple 形状の断面速度分布 (Fine 格子)

## 謝辞

本研究で使用した脚形状は JAXA より提供を受けた。また、本研究は JSPS 科学研究費(21226018)の助成を受けている。本研究では、東北大学サイバーサイエンスセンター大規模科学計算システムを利用して計算を行った。

## 参考文献

- [1] 今村太郎, 浦弘樹, 横川譲, 山本一臣, “高揚力装置騒音計測用模型を用いたスラット騒音低減デバイスの研究”, 第 40 回流体力学講演会/航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム 2008 論文集, 2008.
- [2] Khorrami, M. R., Lockard, D. P., Humphreys, Jr., W. M., Choudhari, M. M., and Van de Ven, T., “Preliminary Analysis of Acoustic Measurements from the NASA-Gulfstream Airframe Noise Flight Test,” AIAA Paper 2008-2814, 14th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, 2008.
- [3] Neuhart, D. H., Khorrami, M. R., and Choudhari, M. M., “Aerodynamics of a Gulfstream G550 Nose Landing Gear Model,” AIAA Paper 2009-3152, 15th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, 2009.
- [4] Zawodny, N. S., Liu, F., Yardibi, T., Cattafesta, L., Khorrami, M. R., Neuhart, D. H., and Van de Ven, T., “A Comparative Study of a 1/4-scale Gulfstream G550 Aircraft Nose Gear Model,” AIAA Paper 2009-3153, 15th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, 2009.
- [5] Keating, A., Dethioux, P., Satti, R., Noelting, S., Louis, J., Van de Ven, T., and Vieito, R., “Computational Aeroacoustics Validation and Analysis of a Nose Landing Gear,” AIAA Paper 2009-3154, 15th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, 2009.
- [6] 今村太郎, 平井亨, 横川譲, 村山光宏, 山本一臣, “主脚騒音計測用模型周り定常流れ場の数値解析”, 日本航空宇宙学会論文集, Vol. 57, No. 671, pp. 493-498, 2009.
- [7] 横川譲, 今村太郎, 浦弘樹, 小林宙, 内田洋, 山本一臣, “JAXA 主脚騒音模型の遠方場特性”, 第 41 回流体力学講演会/航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム 2009 講演論文集, 2009.
- [8] 今村太郎, 平井亨, 雨宮和久, 横川譲, 榎本俊治, 山本一臣, “簡素化した航空機主脚周りの非定常流体解析”, 第 23 回数値流体力学シンポジウム CD-ROM 講演論文集, 2009.
- [9] Nakahashi, K., “High-Density Mesh Flow Computations with Pre-/Post-Data Compressions,” AIAA Paper, 2005-4876, 2005.
- [10] Nakahashi, K., Kitoh, A. and Sakurai Y., “Three-Dimensional Flow Computations around an Airfoil by Building-Cube Method,” AIAA Paper, 2006-1104, 2006.
- [11] Takahashi, S., “Study of Large Scale Simulation for Unsteady Flows,” PhD dissertation, Department of Aerospace Engineering, Tohoku University, 2009.
- [12] Ishida, T., Takahashi, S. and Nakahashi, K., “Efficient and Robust Cartesian Mesh Generation for Building-Cube Method,” *Journal of Computational Science and Technology*, Vol. 2, No. 4, pp. 435-446, 2008.
- [13] 恩田博, 高橋俊, 佐々木大輔, 中橋和博, “Building-Cube 法に基づく円柱周りの空力音の解析”, 日本機械学会 2009 年度年次大会講演論文集, 2009.