高亜音速ジェットのマイクロジェット噴射による低騒音化の大規模 LES 解析

Large-Eddy Simulation of High-Subsonic Jet Noise Reduction with Microjet Injection

Ο	榎本俊治,	宇宙航空研	[:] 究開発機構, 東	夏京都	調布市深大寺	宇東町 7	/-44-1,	enomoto.	shunji@ja	ixa.jp
	山本一臣,	宇宙航空研	[:] 究開発機構, 東	京都	調布市深大寺	宇東町 7	7-44-1			
	野崎 理,	宇宙航空研	- 究開発機構,東	京都	調布市深大寺	宇東町 7	7-44-1			
	山下建志,	株式会社エ	イ・エス・アイ	イ総研	F, 東京都千代	代田区内	可神田1	-18-14		
	田中 望,	(株) I H I ,	東京都西多摩郡	邦瑞穂	町殿ヶ谷 229	9				
	大庭芳則,	(株) I H I ,	東京都西多摩郡	鄁瑞穂	原町殿ヶ谷 229	9				
	大石 勉,	(株) I H I ,	東京都西多摩郡	邦瑞穂	町殿ヶ谷 229	9				
	Shunji ENO	MOTO,	JAXA-ARD, 7-	-44-1	Jindaiji-Higasł	hi Chof	u Tokyo			
	Kazuomi YA	MAMOTO,	JAXA-ARD, 7-	-44-1	Jindaiji-Higasł	hi Chof	u Tokyo			
	Osamu NOZ	ZAKI,	JAXA-ARD, 7-	44-1	Jindaiji-Higasł	hi Chof	u Tokyo			
	Kenshi YAMASHITA,		ASIRI, 1-18-14 Uchikanda Chiyoda Tokyo							
	Nozomi TAN	NAKA,	IHI Corporation	n, 22	29 Tonogaya M	Aizuho I	Nishitan	na Tokyo		
	Yoshinori OOBA,		IHI Corporation	n, 22	229 Tonogaya Mizuho Nishitama Tokyo			na Tokyo		
	Tsutomu OC	OSHI,	IHI Corporation	n, 22	229 Tonogaya Mizuho Nishitama Tokyo					

Abstract: Large-Eddy Simulation of high subsonic jet with microjet injection was performed using UPACS-LES code developed in JAXA. Far field noise level was also calculated using FW-H method. Large scale (476M grid point) simulation was executed on JSS (JAXA Supercomputer System) using 980 processors. The result shows very good agreement with the experimental data in terms of velocity fluctuation and far-field noise level. Turbulent kinetic energy distribution of the result is different from our former computational result with coarser grid. This fact shows that this kind of large scale computation is useful for jet noise LES in spite of its heavy computational cost.

1. はじめに

航空機の主要な騒音源の一つはエンジンのジェット騒音であり、 その低減化のために、ローブミキサーやシェブロンノズルに代表 される混合促進デバイスを排気ノズルに装着する技術が、最近の 航空機には採用されるようになってきた。しかし、これらのデバ イスは巡航時の推力損失を増加させてしまうことが問題であり、 この改善を期待できる技術として、マイクロジェット噴射による ジェット騒音低減が研究されている。これは、排気ノズルの外周 囲、十数か所から排気ジェットに向けてマイクロジェットを噴射 することでジェット騒音の低減を図ろうとするものである。巡航 時にはマイクロジェット噴射を停止することにより推力への影響 は最小限に抑えることができる。

Large Eddy Simulation (LES) によるジェット騒音の予測は近年 広く行われており、特に形状が単純で実験データの蓄積の多い円 形ジェット流に関しては、LES による騒音予測が有望であること が示されている。シェブロンノズルやマイクロジェットなど低騒 音ノズルの効果をLES により評価することが可能になれば、より 効率的な低騒音デバイスの開発が期待できる。しかし、これらの 低騒音ノズルの効果は 1~2dB 程度と言われており、この程度の違 いを LES で数値予測するため、高い精度の計算が必要と考えられ る。

本研究では JAXA 研究開発本部で開発中の、円形ジェットの LES 解析で実績のある UPACS-LES[1]を用いて、マイクロジェッ ト噴射を伴うジェット流れの LES 計算を行った。マイクロジェッ トに関して以前行った計算[2]では一般的な傾向は数値予測でき たものの定量的には実験結果との不一致が見られ、その原因は恐 らく解像度不足と考えられた。そのため今回は、格子点間隔を三 方向とも 1/2.6 程度に小さくした計算を行ったところ、より精度の 高い結果を得ることができたので報告する。

2. 計算対象

マイクロジェット噴射を伴うジェット流れの LES 解析を行う 技術を構築するために、Castelain らによる基礎実験[3][4][5]を対象 にして計算を行い、検証を行った。彼らの実験では、円形ノズル の周囲に 18本(20度間隔)のマイクロジェット噴射ノズルを配 している。主ノズルの直径 D は 50mm、主ジェットは、温度が周 囲温度と同じになるよう加熱されており、マッハ数は0.9である。 マイクロジェット噴射角度は45度、マイクロジェット噴射ノズル 直径 d は主ノズル直径 D の 2%、マイクロジェット噴射ノズル 直径 d は主ノズル直径 D の 2%、マイクロジェットの噴射流量は 一本あたりの流量(主ジェット流量に対する比)が 4.39x10⁴ である。 これは Castelain の論文[3]で m3 と呼ばれており、騒音低減量が比 較的大きいケースである。

3. LES 解析手法

数値解析には、JAXA総研本部で開発を進めている CFD 共通基 盤プログラム UPACS をベースに、LES に必要な渦の移流及び音 の伝播を高精度で解けるように改造した UPACS-LES[1]を用いた。 UPACS はマルチブロック構造格子に対応した有限体積法により 離散化した3次元圧縮性 NS 方程式ソルバーである。対流項の空 間離散化には6次精度の有限体積法用コンパクトスキームを用い ている。ただしブロックとブロックを接続する境界面は陽的な4 次精度である。SGS モデルには Smagorinsky モデルを用いており 定数は C_s=0.1 である。また中心差分に起因する odd-even 型の振動 を除去するためにフィルタを用いている。

計算の並列化には、計算ブロックを別々のノードに割り当て MPIを用いてノード間の情報交換を行っており、さらに一ノード 内の4コアを並列に計算させるために OpenMP を使用している。

ジェット流の LES に於いては、初期擾乱を与えないジェットで は中心軸上での速度減衰が実験より早く遠方場騒音が大きくなる が、初期擾乱を与えたジェットは実験結果とよく一致することが 知られている(福田ら[5])。そこで本研究に於いても、福田らの用 Copyright © 2010 by JSFM

	grid points	Δx	grid points for micro jet	LES region	processors	computational time per one case			
coarse	28M	0.013D	2x2	x<30D	60	7 days			
sector	11M	0.005D	4x4	x<3D	36	1.5 day (flowfield only)			
fine	476M	0.005D	4x4	x<20D	980	12 days			

Table 1. Specification of the computations

いた方法で初期擾乱を与えている。

マイクロジェット噴射を伴うジェット流れの LES を行う上で は、マイクロジェットと主ジェットのスケールに大きな差がある ことが課題になる。今回対象としたマイクロジェット噴射ノズル の場合、マイクロジェットノズル直径dが主ノズル直径Dの2% でしかないため、マイクロジェット流れを主ジェット同様に計算 するには空間解像度は全く足りず、マイクロジェットが主ジェッ トに及ぼす影響の主要な物理現象を再現でき、かつ計算量の少な い簡略化した計算を行う必要がある。マイクロジェットの効果と しては、マイクロジェット自体のもたらす乱れと、マイクロジェ ットによる主ジェットの変形、が考えられる。このうち前者は、 主ジェットの剪断層から発生する乱れエネルギーと比べて十分に 小さいことが予想されるため、マイクロジェット噴射に対しては 特に乱れを与えないこととした。後者を計算上模擬するためには、 必ずしもマイクロジェット流れの詳細な数値予測が必要ではなく、 主ジェットを変形させるために主ジェットに対して角度を持った なんらかの運動量を計算上与えてやれば良いと考えられる。そこ で、マイクロジェットの流量と流速を実験条件と合わせるために、 マイクロジェット噴射口の計算格子上の面積を実験と合わせるよ うにしつつ、マイクロジェット噴出しに対する格子点数は最小限 に留めた。

4. 計算ケース

Table.1 に行った計算の概要を示した。今回行った計算は fine の ケースで格子点数4億7600万点の計算を、JSS(Jaxa Supercomputer System)の M system の内、980ノードを用いて実行した。coarse と sector は以前行った計算[2]で、比較のために示している。fine と coarse はジェット全体の計算である。無次元時間(ジェット流速と ノズル直径から算出したストローハル数)で 150 程度の時間、計算 を行って定常的な流れを得て、その後 200 程度の間、遠方場騒音 レベルを取得するための FW-H 面データのサンプリング、及び乱 流統計量の算出のための時間平均データの取得を行っている。一 方、sector は計算領域を縮小し剪断層のみを計算しており、遠方 場騒音データのサンプリングを行っておらず、時間平均データを 取得した時間も短い。

Figure 1 は、計算格子を上流から下流に向かって斜めに見た図である。マイクロジェット近傍は格子点を少し寄せて噴出し面積が実験と一致するようにしている。coarse と比べ sector と fine は 一方向の格子点間隔が 1/2.6 程度である。また fine は sector の格子 点間隔を保ったまま全周に格子を拡張するという方針で作成した。 Figure 2 は格子を横から見た図である。X はジェット流れの方向 で、X=0 がノズル出口である。座標値はノズル出口直径 D で無次 元化している。coarse と fine はジェット流れの LES 計算を行って いる領域の外に、外部に伝わる波を吸収する buffer 領域を設けて いるが、図にはその一部のみが見えている。sector の計算は coarse や fine と比べてごく一部を計算している様子が分かる。図中、水 色の線で示されている部分は計算ブロックを示している。fine は 984 ブロックに分けられており、各ブロックの一辺の格子点数は 80 程度である。

5. 大規模計算実行上の問題点と対策

今回は、JSS の 980 ノードを用いて計算を行った。UPACS-LES

を用いて 200 を超えるノードを用いた計算は初めてで有ったが、 基本的には特に問題なく実行することができた。大規模並列計算 では、ノードの数に応じて計算能力は増えるものの、ノード間の MPI 通信量が増大して計算のネックになる可能性がある。本計算 に於いては、全通信量は増えているものの、一ノードあたりのノ ード間通信量は従来の計算と変わらないため、インターコネクト に特に過負荷をかけることなく実行することができたと考えられ る。

一方で、ファイル入出力に関しては多少の配慮が必要となった。 JSS では IO 処理は 3 つの IO 処理専用のノードが担当している。 ノード数の多い計算を行った場合、計算能力、ノード間通信能力 は使用ノード数に比例して増大するが、IO 処理能力は変わらない。 このため、従来のプログラムをそのまま実行すると、IO 処理は過 負荷になってしまう可能性が高い。今回の計算では、IO 処理が過 大にならないように、全ノードが一斉に入出力するのではなく、 ノードを三つのグループに分け、グループごとに順に入出力を行 うようにした。また三つの IO ノードに負荷が等分散されるよう な工夫を行った。さらに、非定常データの出力では、これまでは 小さいファイルが多数出力されるようなプログラムになっていた が、今回の計算に於いては、そのままではファイル数が膨大にな るため、HDF5 を用いて多数のデータをノードごとに一つのファ イルの中に出力することとした。

6. 結果·考察

以下に計算結果を示す。ここで'baseline'はマイクロジェットの 無い単純な円形ジェットの結果であり、'microjet''はマイクロジェ ットを噴き込んだ結果である。

(1) X/D=1 断面の流れ方向速度乱れ成分 ux'

Figure 3 は X/D=1 断面の baseline の速度乱れ成分、Figure 4 は同 断面の microjet を吹き込んだ場合の速度乱れ成分である。(a)coarse では、baseline に比べて microjet は剪断層が厚くなっている様子が 見られる。一方(b)sector では、baseline はより剪断層が細く、乱れ は弱くなっており、microjet は剪断層の変形の様子がはっきりと 見られる。(d)experiment に Castelain らの実験の PIV のデータ[4][5] を比較のために示した。実験結果ではマイクロジェットが噴き込 まれることにより剪断層が変形している様子が現れている。これ と比較すると、coarse は分布が実験と比べて広がっており、マイ クロジェットによる剪断層の変形の様子が明確でなく、乱れレベ ルが過剰になっているのに対し、sector は実験の分布とかなりよ く一致している。そこで、sector の格子密度を保ったまま全周の ジェットの計算を行った結果が(c)fine である。fine は sector よりも 時間平均を採った長さが長いため綺麗な分布をしており、 (d) experiment と比べ、かなりよく一致する結果が得られている。 (2) X/D=3 断面の流れ方向速度乱れ成分 ux'

Figure 5 は X/D=3 断面の baseline の速度乱れ成分、Figure 6 は同 断面の microjet を吹き込んだ場合の速度乱れ成分である。この断 面では既に microjet による剪断層の変形は見られず、周方向に一 様な分布となっている。(a)coarse と(c)fine ではどちらも micorjet によって乱れが減衰している様子がみられる。(d)experiment と比 較すると、coarse は剪断層厚さが厚く、乱れレベルも若干過剰で あるのに対し、fine は剪断層厚さはかなり改善され、乱れレベル は baseline では若干低いものの microjet では良く一致している。ち なみに(b)sector の結果は時間平均が十分ではなかった様子である。

これらの結果より、fineの結果は少なくとも X/D=3 までは実験 結果とよく一致していることが確認された。次に流れ方向の変化 を見てみる。

(3) Z=0 断面の流速及び TKE

Figure 7 および Figure 8 はジェット中心断面(Z=0)の速度分布の 詳細である。coarse では剪断層が厚く、sector や fine では薄い計算 結果となっている。また microjet 噴出しによって一時的に剪断層 が厚くなり、その後、剪断層の発達が遅くなっている様子が見ら れる。Figure 9 及び Figure 10 は、より下流まで示している。fine は coarse に比べ、ポテンシャルコアを始めジェットの高速領域が 長くつづいている。また baseline と microjet を比較すると、僅かで はあるが microjet により高速領域が長く続いている様子がわかる。

Figure 11とFigure 12はTKE(turbulent kinetic energy)の詳細を示し ている。coarse では TKE の大きな領域が X/D=3 程度まで続くの に対し、sector と fine では X/D<1 の狭い領域のみ TKE が大きく現 れている。マイクロジェットが噴き込まれることにより乱れは一 時的に増大しているが、すぐに減衰している様子がわかる。これ は、マイクロジェット噴き込みによって剪断層が厚くなり速度勾 配が緩やかになり、その後の TKE の生成が抑えられるためと考え られている。Figure 13 と Figure 14 は、TKE を下流まで示してい る。ここで coarse と fine は大きく異なっている。 coarse ではジェ ット出口近傍の剪断層の部分が最も TKE が大きく下流に行くに 従い減衰しているが、fineでは、ジェット噴出し直後のX/D<1で 一旦ピーク値となりその後減衰した TKE が、X/D=4 あたりから 再び成長し、X/D=10近傍で再びピークとなっている。格子密度 の違いでこのように結果に差が出ることは、大規模な計算を行う ことの必要性を示している。fine の結果を baseline と microjet を比 べると、microjet の方が 6<X/D<16 の領域で TKE の値が小さく、 microjet を噴き込んだ効果が、噴き込み直後だけでなく、下流領 域にまで現れていると考えられる。

(4) 遠方場騒音

Figure 15は、遠方場の騒音レベルをFW-H法により数値予測し たものと実験結果とを比べている。図の横軸は周波数(Hz)、縦軸 は周波数×PSD(パワースペクトル密度)で単位は Pa²である。(a)は 下流30度方向に指向性を持つ騒音であり、低周波にピークを持っ ている。 実験[3]ではマイクロジェット噴き込みにより騒音のピー クが3割程度(1.5dB)下がっている様子が見られる。計算のfineと 実験の baseline のピークを比較すると約半分(3dB)の差であり、ま たピークの周波数はほぼ同じである。またマイクロジェットによ る低騒音効果も約1.5dBと実験と同様であり、精度の良い結果が 得られていると考えられる。一方、coarse は、ピークの騒音値を さらに低く、周波数は少し高めであり、マイクロジェット効果も 明確には表れていない。(b)は真横 90 度方向の騒音値である。こ ちらは縦軸のレベルが(a)と比べて 1/10 である。coarse がかなり過 大評価しているのに対し、fine は実験値とレベルがかなり近くな っている。しかし周波数は実験と比べ高周波側にずれ、マイクロ ジェットによる低騒音効果も明確には見られない。(a)に比べると 小さなレベルの変化であるため定量性を達成することが難しいと 考えられる。

7. まとめ

JSS の 980 ノード使用し、4億7600 万点の格子を用いて、マイ クロジェット噴射のあるジェットの LES 計算を行った。それによ り、流れ場、遠方場騒音ともに精度の良い計算結果を得ることが できた。TKE の分布は以前行った粗い格子の計算と比べてかなり 異なっており、細かい格子で計算しなければ得られない計算結果 が得られたものと考えられる。今後はより詳細に計算結果を分析 し精度を検証することを通じて、より良い低騒音効果を得るための指針を示すことを目標としている。

謝辞

本研究の計算は、JSS の戦略的大規模解析の一つとして実行させて頂きました。関係各位に感謝申し上げます。

参考文献

[1] 榎本俊治 他、「LES による円形ジェットの乱流混合騒音の数 値予測」第21回数値流体力学シンホジウム講演論文集, 2007.12.

[2] 榎本俊治 他、「マイクロジェット噴射による高亜音速ジェットの低騒音化の LES 解析」第 41 回流体力学講演会/航空宇宙数 値 数 値 シミュレーション技術 シンポジウム 2009, JSASS-2009-0191-A

[3] T. Castelain, M. Sunyach, D. Juve, "Jet Noise reduction by impinging microjets: an aerodynamic investigation testing microjet parameters", 13th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, AIAA 2007-3419

[4] T. Castelain, M. Sunyach, D. Juve, J.C. Bera," Jet-Noise Reduction by Impinging Microjets: An Acoustic Investigation Testing Microjet Parameters," AIAA Journal Vol.46, No.5, (2008)

[5] Castelain, T., 2006, Control of jet by impinging microjets. Measurement of radiated noise and aerodynamic analysis, Ph.D. thesis, ECL - No. 2006-33, http://acoustique.ec-lyon.fr/thomas.castelain.php

[6] 福田勇也 寺本進 「LES を用いた高亜音速ジェット騒音の数 値解析」第35回ガスタービン定期講演会講演論文集 2007.9



(a) Coarse grid



(b) Sector grid



(c) Fine grid

Figure 1. Computational grid (bird view)



(a) Coarse grid



(b) Sector grid



Figure 2. Computational grid (side view)

第 24 回数値流体力学シンポジウム C7-1











(c) Fine grid



Figure 4. Velocity fluctuation (ux'/Uj) X/D=1.0, with microjet

5







X/D=3.0, baseline





(c) Fine grid







第24回数値流体力学シンポジウム

(a) Coarse grid





Figure 8. Velocity (U/Uj) Z=0(detail), with microjet





Figure 10. Velocity (U/Uj) Z=0, with microjet





(b) Sector grid



(c) Fine grid

Figure 7. Velocity (U/Uj) Z=0(detail), baseline





Figure 9. Velocity (U/Uj) Z=0, baseline





























Figure 13. Turbulent Kinetic Energy (TKE/Uj²) Z=0, baseline



