

LES による工学問題の解明

Analysis of Engineering Problems Using Large Eddy Simulation

稲垣 昌英
(株)豊田中央研究所

Masahide Inagaki
Toyota Central R&D Labs., Inc.

E-mail: masa@cfcd.tytlabs.co.jp

1 はじめに

自動車の設計において、CFD は必要不可欠なツールとなってきた。現在の乱流解析手法の主流は k -モデルに代表される RANS (レイノルズ平均モデル) であるが、今後は格子平均に基づく LES も徐々に利用されるケースが増えてくると考えられる。LES の利点には、1) 予測精度が高い、2) 非定常な現象が捉えられ、現象の理解および高度な設計コンセプトの考案に役立つ、3) モデル化する範囲がサブグリッドに限られるため、複雑な乱流場 (マルチフィジックスを含む現象など) に対しても RANS モデルと比べてモデル化し易い、が挙げられる。欠点としては、1) 計算コストが高くなる、2) RANS モデルを用いる場合と比べて基本スキーム (離散化手法) の影響が大きくなる、などが考えられるが、計算機性能および数値解析手法の向上によって解決されていくものと期待される。

一方、 k - k スキームに代表される高次精度差分法を用いた擬似直接解法 (あるいは Coherent Structure Capturing; CSC) もこれまでしばしば自動車の設計に用いられてきた。非定常計算を行なうという点で LES に類似した手法であり、LES で用いるサブグリッドスケール (SGS) モデルを高次風上差分法における数値粘性で代用した手法とも言える。物理的な根拠に基づく SGS モデルを用いた LES と比べると予測精度の低下が予想されるが、実用問題へ適用した場合には比較的良好な結果が得られているのも事実である。LES と擬似直接解法の予測精度の違いを明確にすることは、これらを設計ツールとして利用していく上で、重要であろう。

ここでは、空力・空力騒音解析への適用を前提として LES の実力評価を目的に行なった、基礎形状に対する LES の解析例を紹介するとともに、擬似直接解法の結果との比較も交えて考察する。

2 方法

2.1 離散化手法

LES ではグリッドスケール (GS) 成分は直接解く、つまり GS 成分に対しては DNS を行なう訳であり、そのため離散化手法も後述する SGS モデルと同程度に重要である。高次精度かつ保存性の高いスキーム (例えば、Morinishi *et. al* [1] などのスタガード格子) の使用が理想

的であるが，工学で対象とする複雑形状（一般座標系）への適用を考えた場合，スタガード格子や高次精度スキームの使用は難しいと考えられる．そこで後述する解析例では，一般座標系にも適用し易く，かつ 2 次精度スキームの範疇で最大限に予測精度および保存性を高めた改良型コロケーション格子[2]を用い，対流項も含めて全て二次中心差分により離散化している．

2.2 SGS モデル

SGS モデルとしては，LES の基礎であるとともに現在でも広く使われている Smagorinsky(S) モデル[3]，Germano によって提案された Smagorinsky モデルの欠点を解決するとされる Dynamic Smagorinsky(DS)モデル[4]，および混合時間スケール(MTS)モデル[5,6]の 3 種類のモデルを用いて計算を行なう．各モデルは以下のように表現される．

Smagorinsky(S)モデル

$$\nu_t = (C_s \bar{\Delta} f)^2 |\bar{S}| \quad (1)$$

$$|\bar{S}| = \sqrt{2\bar{S}_{ij}\bar{S}_{ij}}, \quad \bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right), \quad \bar{\Delta} = (\Delta x \Delta y \Delta z)^{1/3} \quad (2)$$

C_s : モデル係数， f : ダンピング関数， $(\bar{\quad})$: グリッドフィルタ

Dynamic Smagorinsky(DS)モデル

$$\nu_t = C (\bar{\Delta})^2 |\bar{S}| \quad (3)$$

$$C = -\frac{1}{2} \frac{L_{ij}^* M_{ij}}{\bar{\Delta}^2 M_{ij} M_{ij}}, \quad L_{ij} = \bar{u}_i \bar{u}_j - \tilde{u}_i \tilde{u}_j, \quad M_{ij} = \alpha^2 |\tilde{S}| \tilde{S}_{ij} - |\bar{S}| \bar{S}_{ij} \quad (4)$$

$\alpha = \tilde{\Delta} / \bar{\Delta}$ ， $\tilde{\Delta}^2 = \bar{\Delta}^2 + \tilde{\Delta}^2$ ， $(\tilde{\quad})$: テストフィルタ

混合時間スケール(MTS)モデル

$$\nu_t = C_{MTS} k_{es} T_S \quad (5)$$

$$k_{es} = (\bar{u}_k - \hat{u}_k)^2, \quad T_S^{-1} = \left(\frac{\bar{\Delta}}{\sqrt{k_{es}}} \right)^{-1} + \left(\frac{C_T}{|\bar{S}|} \right)^{-1} \quad (6)$$

$C_{MTS} = 0.05$ ， $C_T = 10$ ， $(\hat{\quad})$: シンプソン則によるテストフィルタ

S モデルは， C_s および f を流れ場に応じて予め与える必要があり，普遍性に問題がある．DS モデルでは C を自動的に算出するので表式上は S モデルの問題点を解決しているが，算出される C の時空間的変動が計算不安定性を引き起こす[5-7]とともに予測精度も不十分であることが指摘されている．特に，通常行なわれる壁に垂直な方向の空間フィルタは施さず，壁と

平行な方向のフィルタのみ施すという条件の下での DS モデルの評価結果と、実用上は不可避と考えられる全方向に空間フィルタを施した場合の評価結果とが大きく異なる[5,6]ことに注意を要する。一方 MTS モデルは、混合時間スケールを導入することによってモデル係数を固定したままでも様々な流れ場に適用可能としたモデルであり、DS モデルでみられる計算不安定性はなく予測精度も十分に高いことが基本的な乱流場において確認されている[5,6]。

3 空力・空力騒音解析への適用

3.1 円柱周りの流れ (エオルス音)

最も基本的な空力問題の一つであり、狭帯域騒音の代表例であるエオルス音を発生する円柱周りの流れ ($Re=10,000$) へ適用した結果[8]を以下に示す。図 1,2 は抵抗係数および揚力係数変動量の計算結果の比較である。図中、QUICK は対流項に QUICK スキームを用いた擬似直接解法、S2+QUICK は QUICK と S モデルを併用した場合を意味する。S モデルは、内部流れの解析で用いられる $C_s = 0.1$ (S1 モデル)を用いると予測精度が著しく悪く、外部流れで通常用いられる $C_s = 0.15$ (S2 モデル)とすることによって良好な結果が得られる。一方、MTS モデルはチャンネルやバックステップ流れでの検証と同一のモデル係数を用いても良好な結果が得られる。DS モデルは抵抗係数を若干小さく見積もるとともに、安定な計算を保持するために時間刻みを他の場合の半分に短くする必要があった。QUICK は、10%以上抵抗係数を小さく見積もっているが、それよりも強調すべき点は S2+QUICK の結果は S2 の結果よりも QUICK の結果に近いことであろう。これは、図 3 に示す平均速度分布や乱流強度分布に関しても同様

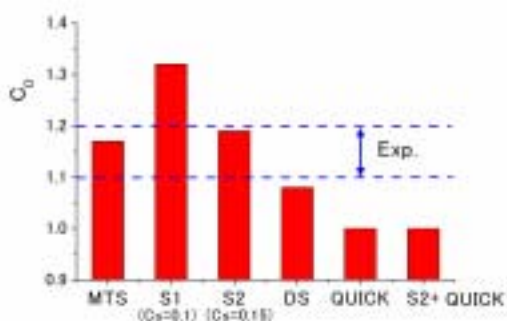


Fig. 1: Drag coefficient

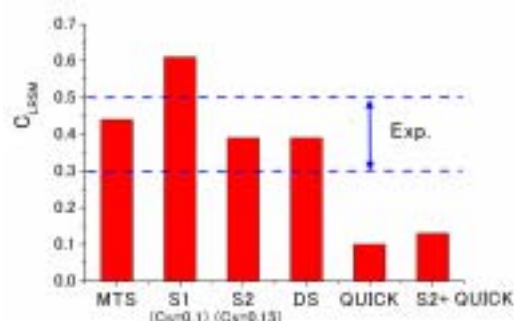


Fig. 2: RMS of lift coefficient

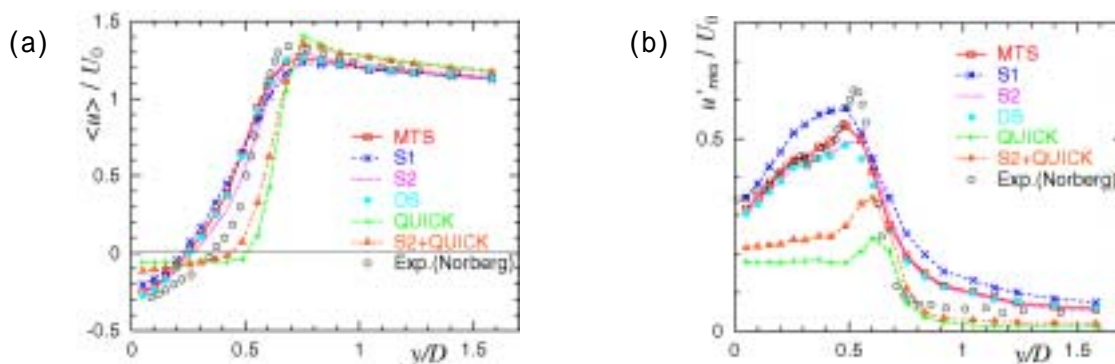


Fig. 3: Results in $x=D$ plane: (a) Mean streamwise velocity; (b) Streamwise turbulent intensity

である．しばしば LES 計算で安定化のため対流項に高次風上法を用いるケースが見受けられるが，それは LES というよりもむしろ擬似直接解法の結果とした方が妥当と考えられる．

図 4 は，円柱表面の圧力変動量を示す．MTS モデルは実験結果 [9] と良く一致している．QUICK や S2+QUICK の結果は変動量を 1/3 ~ 1/4 程度に小さく予測しており，これは図 3(b) にみられるように乱流強度をかなり小さく予測していることに起因している．これらは QUICK スキームによってもたらされた数値粘性の影響であり，LES においては数値粘性の大きさに十分注意する必要がある．Lighthill-Curle の式 [10] に従えば，エオルス音は表面圧力の時間微分値から与えられるが，QUICK の結果に基づくと騒音レベルを 10dB 以上小さく予測してしまうことになる．

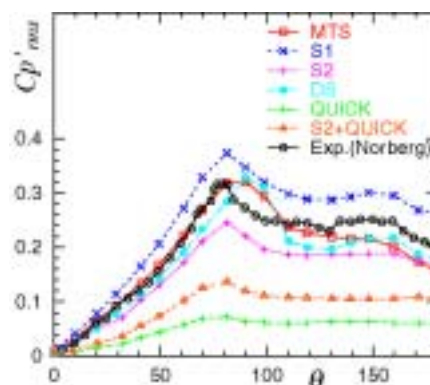


Fig. 4: RMS of pressure fluctuation on cylinder surface

3.2 空力解析 (Ahmed ボディ)

自動車の空力問題の基礎モデルとしてしばしば取り上げられる Ahmed ボディの解析に LES を適用した結果 [6] を以下に示す．解析条件は予測が難しいとされる背面傾斜角 $\theta = 25^\circ$ のケース (図 5) であり，流入速度は 40m/s に設定される．重合格子法に基いて 2 つの部分格子を重合させており，総格子点数は約 370 万点である．最小格子間隔は 0.05mm とし，物体表面では三層モデルに基づく人工的壁面境界条件 [11] を課している．

計算で得られた抵抗係数，および計算可能な時間刻み幅を図 6 に示す．ここでも，MTS モデルは 2% 強の誤差で抵抗係数を予測しているのに対し，DS，S2 モデルは各々誤差 15% 強，7% 強と予測精度が劣る．また，DS モデルはやはり計算不安定性のため時間刻み幅を半分にする必要があった．一方 QUICK による計算では，時間刻み幅を MTS モデルの場合の 2 倍とすることができたが，抵抗係数の誤差は最も大きい．これらの抵抗係数に対する誤差は，傾斜面上部での剥離の様相が正しく捉えられていないことに起因する．図 7 にセンター断面における速度分布および乱流強度分布を示す．MTS モデルは剥離域内の流れ場を概ね正しく予測しているの

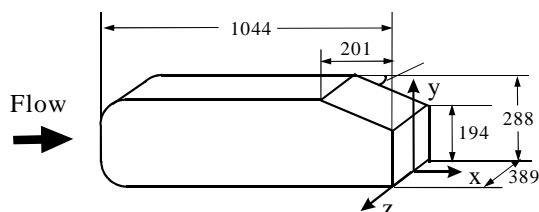


Fig. 5: Ahmed body

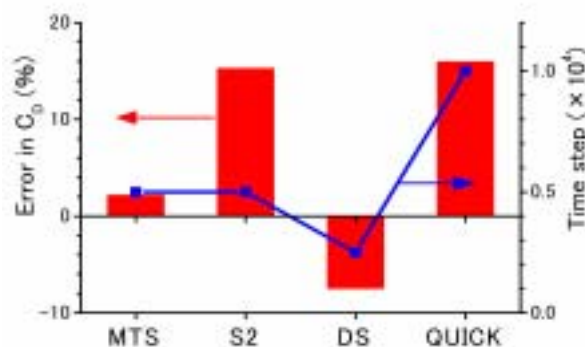


Fig. 6: Error in drag coefficient and computational time step

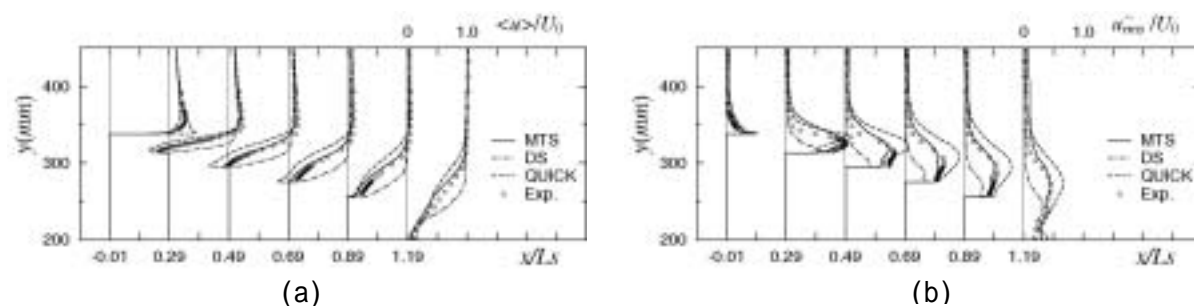


Fig. 7: Comparison of calculated flow fields around an Ahmed body in symmetry plane: (a) mean streamwise velocity; (b) streamwise turbulent intensity

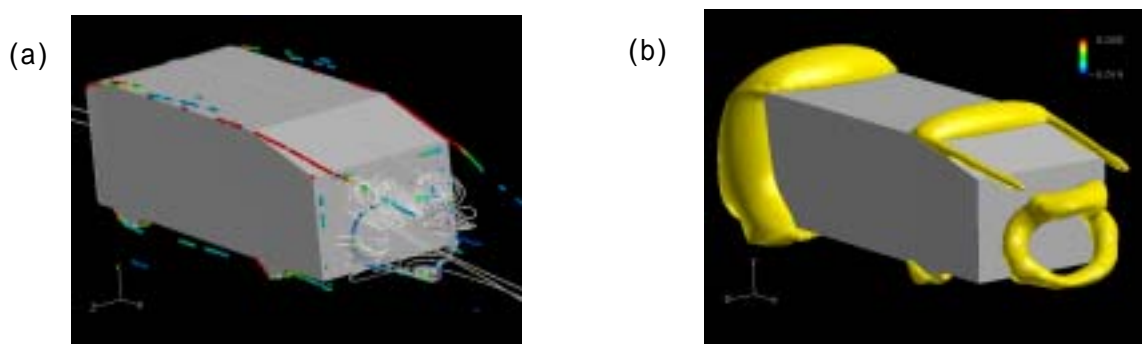


Fig. 8: Calculated flow field using MTS model; (a) vortex core and streamlines (red: high vorticity); (b) pressure iso-surface

に対し、DS モデルでは剥離が小さく、QUICK では剥離が大きく見積もられている。図 8 には、少し計算条件が異なる ($\theta = 20^\circ$, タイヤ付き) が、MTS モデルを用いて得られた時間平均場から算出される渦中心、流線および圧力等値面を示す。傾斜面上におけるサイドからの流れの巻き込みに伴う渦と、背面後方に発生する渦輪が確認され、複雑な後流域を精度良く捉えることが出来ている。

3.3 風切り音解析

自動車の空力騒音で最も重要である風切り音解析へ適用した結果[12]を以下に示す。解析対象はフロントピラーを簡略化したモデル(図 9)で、流入風速は 27.8m/s、モデル形状高さは 0.606m である。計算では 5 つの部分格子(図 10)を重合させて領域全体を覆っている。主要な騒音源を含むと考えられる Domain 1 の計算格子のみ 3 種類の格子解像度を用いている(図 11)。Case 1 から Case2, Case 3 と格子解像度が上がるに伴い、サイドウィンドウ上の格子点数は Case 1 の約 2.7 倍, 6.4 倍と増加している。壁面垂直方向の最小格子間隔も Case 1 では 0.2mm であるが、Case 2 および 3 ではその半分の 0.1mm である。総格子点数は、Case 3 の場合で 400 万点程度(フルモデル)である。

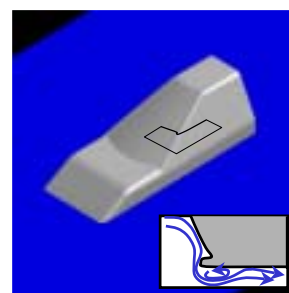


Fig. 9: Front-pillar model

図 12 に、実験でのオイルフローパターンと計算結果

(MTS モデル, Case2) から求められた壁面近傍流線を比較して示す. この流れ場の特徴的なフローパタンとして, 図 12 中青線で表される再附着線と赤線で表される剥離領域内における旋回渦の剥離線が挙げられるが MTS モデルの結果はこれらの位置を精度良く予測している. なお, DS モデルによる計算 (Case1 1) では, 時間刻みを MTS モデルを用いた場合の 1/4 に

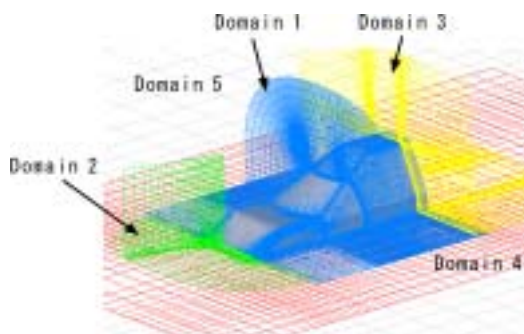


Fig. 10: Overlaid grid system

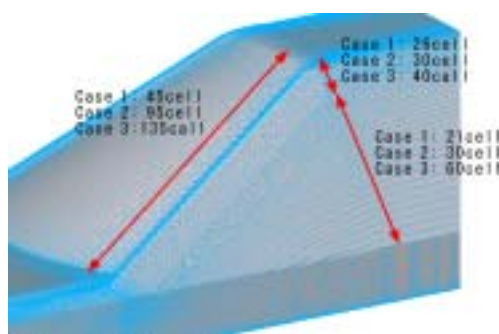


Fig. 11: Grid arrangement on body surface

(a)



(b)

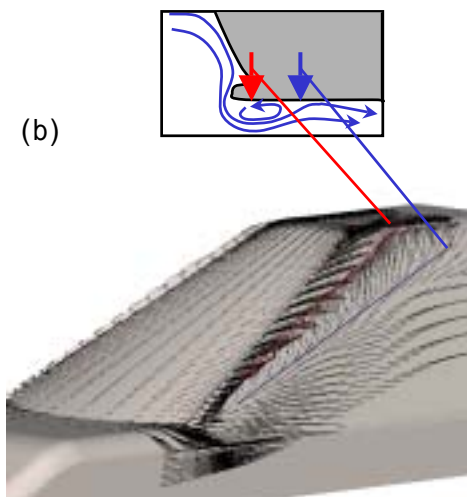


Fig. 12: Flow pattern: (a) oilflow in experiment; (b) streamline near wall in calculation (MTS, Case2)

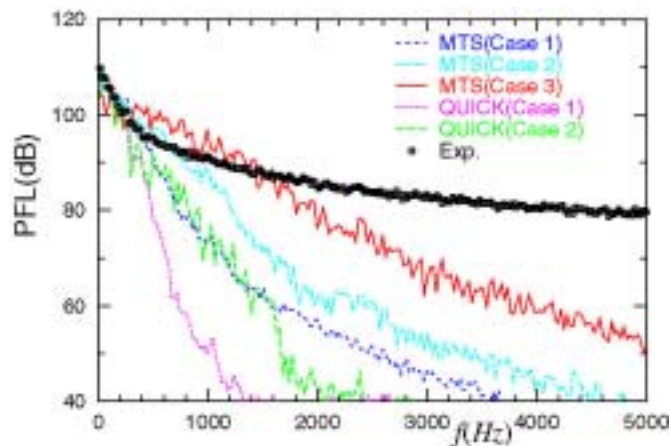


Fig. 13: Comparison of spectrum of wall pressure fluctuation

しても発散しており、以下では MTS モデルを用いた LES の結果と QUICK の結果とを比較する。

図 13 に、再付着点近傍での壁面圧力変動の周波数解析結果の比較を示す。LES, QUICK いづれの場合も高周波数帯域での減衰がみられるが、格子解像度を高めることによって高周波数帯域での予測精度が向上する。同じ格子解像度を用いた場合には、LES の方が QUICK よりも高周波数帯域での予測精度がより高く、より小さなスケールの変動までを捉えていることがわかる。Case 3 の LES の結果では、自動車の風切り音予測で最低限必要と考えられる 2kHz 付近の変動まで減衰のない良好な結果が得られており、Lighthill-Curle の式に基づいてこれらの表面圧力変動を積分して得られる車外音は実験値を十分な精度で予測すると期待できる。ただし、自動車の風切り音解析では乗員に聞こえる騒音が第一に重要であるため、実際にはその結果をそのまま用いることは出来ない。厳密には、車内への伝播経路を含めた複合的な解析が必要である。

4 おわりに

今回示した計算結果のうち、円柱を除く 2 ケースでは壁面近傍の格子解像度（特にスパン方向や流れ方向）が LES としては不十分である。これはしばしば指摘されるように、LES では少なくともその場所での最も大きなスケールの組織的構造は格子スケールで解像している必要があり、したがって壁面近傍ではストリーク構造を解像できる格子密度が必要となるためである。本計算例でそのような条件の下でありながらも十分な予測精度をもつ計算結果が得られているのは、剥離点が比較的はっきりした流れ場であることが影響しているかもしれない。しかし一方で、LES よりも予測精度が劣ると考えられる擬似直接解法による計算が、前にも少し触れたように実用上比較的精度良く剥離位置を含めて予測しているのも事実であり、壁面近傍での格子解像度の不足、つまり乱流境界層の不十分な解像が流れ場全体の予測（特に剥離位置の予測）にどの程度の影響を及ぼすかについて、今後詳細な評価を行なっていく必要があると考えられる。一方、このような壁面近傍での格子解像度の不足を補う手法として、壁面近傍では RANS 的扱いとなる DES（あるいは hybrid RANS/LES）[13][14]や壁モデル[15]などの研究が進められている。もちろん、騒音解析において高周波数の変動を直接捉える目的に対しては必ずしも有効でないが、少なくとも空力解析においては解の信頼性を高め得る方法として注目される。今後これらの技術が実用化され、また MTS モデルのような高精度かつ安定性の高い SGS モデルと併せて利用することにより、従来よりも数段信頼性の高い「数値風洞」が比較的低コストで利用可能になると期待される。

参考文献

- [1] Morinishi, Y., Lund, T. S., Vasilyev, O. V. and Moin, P., Fully conservative higher order finite difference schemes for incompressible flow, J. Comput. Phys., 143, (1998), 90-124.
- [2] 稲垣・安倍, コロケーション格子を用いた LES の計算精度改善に関する一考察, 日本機械学会論文集, 64-623, B(1998), 1981-1988.
- [3] Smagorinsky, J., General circulation experiments with the primitive equations. I.

- The basic experiment, *Monthly Weather Review*, 91, (1963), 99-164.
- [4] Germano, M., Piomelli, U., Moin, P. and Cabot, W. H., A dynamic subgrid-scale eddy viscosity model, *Phys. Fluids*, A3(7), (1991), 1760-1765.
- [5] 稲垣・近藤・長野, 実用的な LES のための混合時間スケール SGS モデル, *日本機械学会論文集*, 68-673, B(2002), 2572-2579.
- [6] Inagaki, M., Kondoh, T. and Nagano, Y., A mixed-time-scale SGS model with fixed model-parameters for practical LES, In *Engineering Turbulence Modelling and Experiments 5* (Edited by Rodi, W. and Fueyo, N.), 257-266, Elsevier (2002).
- [7] Akselvoll, K., and Moin, P., Large eddy simulation of a backward facing step flow, In *Proc. 2nd International Symposium on Engineering Turbulence Modeling and Measurements*, May 21-June 2, 1993, Florence, Italy.
- [8] Inagaki, M., Kondoh, T. and Nagano, Y., Large eddy simulation of separating flows with a new mixed-time-scale SGS model, In *Proc. 5th JSME--KSME Fluids Engineering Conference (CD-ROM)*, 1431-1436, 2002, Nagoya, Japan.
- [9] Norberg, C. and Sundén, B., Turbulence and Reynolds number effects on the flow and fluid forces on a single cylinder in cross flow, *J. Fluids and Structures*, 1, (1987), 337-357.
- [10] Curle, N., The influence of solid boundaries upon aerodynamic sound, *Proc. R. Soc. London*, A231, (1955), 481-484.
- [11] Inagaki, M., Murata, O., Kondoh, T. and Abe, K., Numerical prediction of fluid-resonant oscillation at low Mach number, *AIAA J.*, 40, (2002), 1823-1829.
- [12] Inagaki, M., Horinouchi, N., Ichinose, K. and Nagano, Y., Predictions of wall-pressure fluctuation in separated complex flows with improved LES and quasi-DNS, *3rd International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena*, June 25-27, 2003, Sendai, Japan, to be presented.
- [13] Spalart, P. R., Strategies for turbulence modelling and simulations, *Int. J. Heat and Fluid Flow*, 21, (2000), 252-263.
- [14] Hamba, F., An approach to hybrid RANS/LES calculation of channel flows, In *Engineering Turbulence Modelling and Experiments 5* (Edited by Rodi, W. and Fueyo, N.), 297-306, Elsevier (2002).
- [15] Wang, M. and Moin, P., Wall modeling in LES of trailing-edge flow, In *Proc. 2nd International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena*, 2001, Stockholm, Sweden, , 165-170.