

102
分置

LES における壁の取扱いおよび 複雑流路流れに関する文献調査

(核燃料サイクル開発機構 契約業務報告書)

2005年2月

株式会社 東芝

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松 4 番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課
電話：029-282-1122（代表）
ファックス：029-282-7980
電子メール：jserv@jnc.go.jp

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:

Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184, Japan

© 核燃料サイクル開発機構
(Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2005

LES における壁の取扱いおよび 複雑流路流れに関する文献調査 (核燃料サイクル開発機構 契約業務報告書)

堺 紀夫*、清水 武司*

要 旨

LES コードでは、壁の取扱いおよび壁に囲まれた複雑流路流れへの対応が課題となっていることから、本調査では、最新の LES 手法研究における壁近傍の取扱いおよび複雑流路流れに関して文献調査を実施し、研究開発の動向を分析した。国内外の学会、研究会、国際会議、学術誌等の公開文献を対象として過去3ヶ年(2001~2004 年)程度を中心に幅広く文献の調査、収集を実施し、最終的に選定した23件の文献について内容分析を行った。

調査文献における壁面の取扱い方を(1)通常の No-slip 条件、(2)代数式型壁面モデル(壁関数)、(3)微分式型壁面モデル、(4)ハイブリッド法、(5)IB 法の大きく5つの手法に分類して分析した。このうち通常の No-slip 条件は近年の研究でも頻繁に適用されていた。代数式型壁面モデルでは壁面に垂直な速度成分の効果を考慮したものや、剥離領域に適合する新たなモデルの提案や従来のモデルから壁面せん断応力の求め方を工夫する事例があった。微分式型壁面モデルでは壁面近傍の内層において境界層近似された Navier-Stokes 方程式を解く際に、より高精度に壁面せん断応力を求めるためのモデル係数の動的修正方法や内層における高次の乱流モデルの適用が提案されていた。一方ハイブリッド法では LES と RANS の界面において速度分布や渦粘性係数の不連続性を解消するための手法の検討事例が多くみられた。また、直交格子を曲線境界面に適用する方法としては IB 法の適用が期待されており、その際の圧力解法の工夫や数値的な修正方法などが検討されていた。

調査文献の範囲ではハイブリッド法の研究が多く、界面の取扱い方法などに対し標準的な手法が確立されれば将来的に大規模複雑体系に主として用いられる可能性は高いと思われる。

本報告書は、株式会社 東芝が核燃料サイクル開発機構との契約により実施した業務成果に関するものである。

機構担当課室： 要素技術開発部 流体計算工学研究グループ

*株式会社東芝 電力・社会システム社

電力・社会システム技術開発センター システム解析技術開発部

Survey and Research of the Latest Works of LES about Models Near Wall Boundary and Applications to Complex Flow Path

Norio SAKAI* and Takeshi SHIMIZU*

Abstract

Since treatments for wall boundaries and flows around complex paths are issues in LES modeling, a literature research on the LES methods for wall boundaries and applications to flows at complex paths was conducted to investigate the latest trend. Publications of domestic or international societies, workshops, symposiums, and journals about for past 3 years (2001-2004) were searched and collected, from which 23 research papers were selected and investigated.

For the investigation, the treatments for wall boundaries used in the literature were classified roughly into five methods, i.e. (1) no-slip condition, (2) algebraic wall model (wall function), (3) wall model based on boundary-layer approximations (differential equation wall model), (4) hybrid method, (5) immersed boundary method. No-slip conditions were widely applied in recent works. For algebraic wall models, new wall functions that considered the effect of the velocity component vertical to a wall or circulation regions were examined. There were also some researches that devised the process of calculating the wall-shear stress with a conventional wall function. The researches using differential equation wall models presented the dynamic modification of model coefficients, or the application of high-order turbulence model such as the k-e model to the solution of Navier-Stokes equation in the boundary layer. The researches of hybrid methods focused on the discontinuity of velocity and eddy viscosity at the LES/RANS interface. Several researches that adopted immersed boundary methods for Cartesian grids with curved wall boundaries introduced the investigation of the Poisson solvers and the numerical modification of pressure boundary conditions. Many of investigated researches used hybrid methods. Thus, it is expected that they will be mainly applied to large-scale and complex simulations if the standard treatment for the discontinuity at the interface is developed.

This work was performed by Toshiba Corporation under contract with Japan Nuclear Cycle Development Institute.

JNC Liaison : Advanced Technology division, Thermal-Hydraulics Group

* Toshiba Corporation Industrial and Power Systems & Services Company

Power & Industrial Sysmtes Reasearch & development Center

Nuclear Sysmtem Analysis Technology R&D Department

目 次

	頁
目次.....	i
図表タイトル.....	ii
1. はじめに	1
2. 文献調査方法と収集結果.....	2
2.1 調査範囲	2
2.2 調査方法	2
2.3 収集結果	2
3. 収集文献の分析	6
3.1 収集文献の概要.....	6
3.2 代数式型壁面モデル.....	7
3.2.1 モデルの概要.....	7
3.2.2 近年の動向	8
3.3 微分式型壁面モデル.....	12
3.3.1 モデルの概要.....	12
3.3.2 近年の動向	13
3.4 ハイブリッド法.....	16
3.4.1 モデルの概要.....	16
3.4.2 近年の傾向	18
3.5 Immersed Boundary Method(IB 法).....	23
3.5.1 モデルの概要.....	23
3.5.2 近年の傾向	23
3.6 複雑流路流れへの LES の適用について.....	26
3.7 使用する SGS モデルが壁近傍流れの解析結果におよぼす影響.....	26
3.8 MILES (陰的 SGS モデル) の概要	28
4. まとめ	29
Appendix A 調査文献リスト.....	A-1
Appendix B 調査文献要旨集.....	B-1

図表タイトル

表 2.1.1	調査対象とした会議録・雑誌と調査範囲.....	3
表 3.2.1	代数式型壁面モデルのメリットとデメリット.....	11
表 3.3.1	微分式型壁面モデルのメリットとデメリット.....	15
表 3.4.1	ハイブリッド法のメリットとデメリット.....	22
表 3.5.1	IB 法のメリットとデメリット.....	25
表 3.6.1	各種壁面モデルの複雑流路体系への適用例.....	26
図 3.2.1	Temmerman ¹⁶⁾ らの研究における丘周り形状の壁面近傍平均流速分布	10
図 3.3.1	微分式型壁面モデルの計算手順.....	12
図 3.3.2	Wang ら ¹³⁾ による翼後縁解析の表面摩擦係数分布の比較	14
図 3.4.1	LES/RANS 切り替え位置における離散化スキームの概略 ⁵⁾	19
図 3.4.2	半場 ⁵⁾ が提案した離散化スキームにおける LES/RANS ハイブリッドのチャンネル乱流と DNS データの流速分布の比較.....	19
図 3.5.1	IBM 計算安定化のための境界格子における圧力条件の与え方 (例)	24
図 3.6.1	飯塚ら ³⁾ による 2 次元丘周り形状の平均速度分布.....	27

1. はじめに

本報告書は Large Eddy Simulation(LES)手法における壁の取扱いおよび複雑流路流れに関する最近の動向を調査する目的で実施した文献調査の結果をまとめたものである。

核燃料サイクル開発機構 流体計算工学研究グループ殿が進めている多次元汎用熱流動解析コード整備の一環として新たにラージ・エディ・シミュレーション (LES) コードの開発を実施しているが、LES コードでは、壁の取扱いおよび壁に囲まれた複雑流路流れへの対応が課題となっていることから、最新の LES 手法研究における壁近傍の取扱いおよび複雑流路流れに関して文献調査を実施し、研究開発の動向を分析した。

2. 文献調査方法と収集結果

2.1 調査範囲

国内外問わず、学会、研究会、国際会議、学術誌等の公開文献を対象として、LES における壁の取扱いおよび複雑流路流れを対象として最新の動向を把握するため、過去3ヶ年程度を中心に幅広く文献の調査、収集を実施した。具体的には対象年 2001～2004 年（一部資料は 2000 年以前に発行されたものも含む）に発行されたもののうち国内外の流体力学、機械工学、原子力などの各学会、研究会、雑誌出版社のウェブサイト上で本文、要旨、表題（講演リスト）のいずれかが公開されているものを検索の対象とした。表 2.1.1 に検索対象として選定した会議録ならびに雑誌のリストを示す。

2.2 調査方法

表 2.1.1 の選定した会議録・雑誌の文献について、まずタイトルに

“LES”

“Large Eddy Simulation”

“SGS”

“ラージ・エディ・シミュレーション”

などの語を含むものを検索し、該当する文献をリストアップした（キーワードや要旨の検索が可能な資料についてはそれらもあわせて実施）。各々についてリストアップされた文献の総件数は 449 件であり、会議録・雑誌毎の件数を表 2.1.1 の「件数」欄に示す。（文献名のリストは本件打合せ 2004 年 11 月 19 日付けの資料 1 を参照方。）

次にリストアップした文献タイトルから、今回の調査対象である LES における壁の取扱い方、または複雑流路流れへの適用を主眼とした研究を実際に収集する文献として選定した。このとき、要旨が閲覧可能な資料については、それらも選定の判断材料とした。収集した文献の総件数は 130 件であり、会議録・雑誌毎の件数を表 2.1.1 の「収集」欄に示す。収集した文献の中から、最終的に調査分析対象として適当と思われる文献を絞り込んだ。最終の調査文献 23 件のリストを Appendix A に示す。

2.3 収集結果

選定した文献は全て収集できた。LES 文献の収集先の傾向から本件関連研究が比較的多数投稿されているところとしては、国内会議では数値流体力学シンポジウム、日本流体力学年会、国外会議では International symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena、ASME FSMED、国内雑誌では日本機学会論文集、生産研究、国外雑誌では Physics of Fluids、Journal of Fluid Engineering、Journal of Turbulence、Journal of Computational Physics、International Journal for Numerical Methods in Fluids、International Journal of Heat and Fluid Flow など複数の雑誌に広く投稿されている。

表 2.1.1 調査対象とした会議録・雑誌と調査範囲

	会議・雑誌名	調査年	件数	収集	備考
	会議(国内)				
1	数値流体力学シンポジウム	1999	17	0	
2	数値流体力学シンポジウム	2000	12	12	
3	数値流体力学シンポジウム	2001	12	12	
4	数値流体力学シンポジウム	2003	19	19	
5	日本伝熱シンポジウム	2004	2	0	
6	日本混相流学会年会	2004	0	0	
7	日本機械学会年会	2002	4	0	
8	日本機械学会年会	2003	1	0	
9	日本機械学会年会	2004	3	2	
10	日本流体力学会年会	2003	7	0	
11	日本流体力学会年会	2004	9	0	
12	計算工学講演会	2001	1	0	
13	計算工学講演会	2002	0	0	
14	計算工学講演会	2003	1	0	
15	計算工学講演会	2004	1	0	
16	生研 NST シンポジウム講演論文集	2003	3	3	
	会議(国外)				
1	International Conference on Supercomputing in Nuclear Applications (SNA 2003)	2003	0	0	
2	International Conference on Advanced Nuclear Power Plants and Global Environment	2003	1	0	
3	2003 ANS/ENS International Winter Meeting, New Orleans, USA.	2003	1	0	
4	14th Pacific Basin Nuclear Conference, Honolulu, USA,	2004	0	0	
5	AN INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ADVANCES IN COMPUTATIONAL HEAT TRANSFER	2004	3	0	
6	NURETH-10	2003	2	1	
7	ASME PVP 2003	2003	2	0	
8	ASME PVP 2004	2004	2	0	
9	3rd International symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena (TSFP-3)	2003	32	11	
10	ICONE-9	2001	1	1	
	会議・雑誌名	調査年	件数	収集	備考
11	ICONE-10	2002	0	0	
12	ICONE-11	2003	2	2	
13	ICONE-12	2004	2	2	
14	SC2003	2003	0	0	
15	3rd ASME FSMED	2001	6	0	
16	4th ASME FSMED	2003	25	6	
17	5th Asia CFD Conference	2003	4	0	

18	International Conference on Computational Fluid Dynamics 3	2004	5	1	
	雑誌(国内)				
1	日本機械学会論文集 B(2000 年 11 月号)	2000	8	1	
2	日本機械学会論文集 B(2001 年分)	2001	3	1	
3	日本機械学会論文集 B(2002 年分)	2002	7	3	
4	日本機械学会論文集 B(2003 年分)	2003	4	0	
5	日本機械学会論文集 B(2004 年分)	2004	1	0	
6	JSME International Journal Series B	2001	2	1	
7	JSME International Journal Series B	2002	3	1	
8	JSME International Journal Series B	2003	2	1	
9	JSME International Journal Series B	2004	1	1	
10	日本計算工学会論文集	2001-2004	0	0	
11	生産研究 Vol54,No1	2002	9	9	
12	生産研究 Vol55,No2	2003	5	5	
13	日本原子力学会和文論文集	2002-2004	0	0	
14	日本原子力学会英文論文集	2001-2004	0	0	
15	Computational Fluid Dynamics JOURNAL	2001	3	0	
16	Computational Fluid Dynamics JOURNAL	2002-2004	0	0	
	雑誌(国外)				
1	Journal of Fluid Mechanics	2001	7	0	
2	Journal of Fluid Mechanics	2002	3	0	
3	Journal of Fluid Mechanics	2003	6	0	
4	Journal of Fluid Mechanics	2004	4	0	
5	Physics of Fluids	2001	16	3	
6	Physics of Fluids	2002	15	3	
	会議・雑誌名	調査年	件数	収集	備考
7	Physics of Fluids	2003	11	0	
8	Physics of Fluids	2004	11	0	
9	Journal of Fluid Engineering	2001	4	0	
10	Journal of Fluid Engineering	2002	10	2	
11	Journal of Fluid Engineering	2003	3	3	
12	Journal of Fluid Engineering	2004	0	0	
13	Journal of Heat Transfer	2001	1	1	
14	Journal of Heat Transfer	2002	0	0	
15	Journal of Heat Transfer	2003	1	0	
16	Journal of Heat Transfer	2004	0	0	
17	Journal of Applied Mechanics	2001-2004	1	1	

18	Nuclear Engineering and Design	2001-2004	0	0	
19	Nuclear Technology	2001-2004	0	0	
20	Theoretical and Computational Fluid Dynamics	2001	0	0	
21	Theoretical and Computational Fluid Dynamics	2002	1	1	
22	Theoretical and Computational Fluid Dynamics	2003-2004	0	0	
23	Journal of the atmospheric sciences	2001	1	0	
24	Journal of the atmospheric sciences	2002	3	0	
25	Journal of the atmospheric sciences	2003	3	0	
26	Journal of the atmospheric sciences	2004	1	0	
27	Journal of Turbulence	2001	2	1	
28	Journal of Turbulence	2002	7	2	
29	Journal of Turbulence	2003	5	1	
30	Journal of Turbulence	2004	7	0	
31	Journal of Computational Physics	2001	2	0	
32	Journal of Computational Physics	2002	4	2	
33	Journal of Computational Physics	2003	5	1	
34	Journal of Computational Physics	2004	6	1	
35	International Journal for Numerical Methods in Fluids	2001	1	0	
36	International Journal for Numerical Methods in Fluids	2002	6	1	
37	International Journal for Numerical Methods in Fluids	2003	7	2	
38	International Journal for Numerical Methods in Fluids	2004	4	2	
39	International Journal of Heat and Fluid Flow	2001	3	0	
	会議・雑誌名	調査年	件数	収集	備考
40	International Journal of Heat and Fluid Flow	2002	9	2	
41	International Journal of Heat and Fluid Flow	2003	14	2	
42	International Journal of Heat and Fluid Flow	2004	11	0	
43	International Journal of Heat and Mass Transfer	2001	3	1	
44	International Journal of Heat and Mass Transfer	2002	5	0	
45	International Journal of Heat and Mass Transfer	2003	7	0	
46	International Journal of Heat and Mass Transfer	2004	11	4	

3. 収集文献の分析

3.1 収集文献の概要

収集した文献において、壁面の取扱いは次の5種類に大きく分類することができる。

1. No-slip 条件
2. 代数式型壁面モデル
3. 微分式型壁面モデル
4. ハイブリッド法
5. IB 法

No-slip 条件は壁面において平行および垂直接流速成分がゼロとなるディリクレ条件を課すものである。壁面近傍は速度勾配が大きくなるため多くの格子点が必要となり、壁面第一格子点は y^+ で 1 以下から 10 前後の内層から外層までの位置に設定される。計算負荷は大きい、壁面せん断応力を精度よく解析することができるため、ポンプ、翼列などの流体機器内部、原子炉機器類、攪拌槽など様々な複雑形状の LES 解析では近年も依然として主流となっている。

代数式型壁面モデル(Algebraic Wall Model)は一般に壁法則と呼ばれるもので、壁面に垂直な方向の速度分布が特定の代数式に従うと仮定し、その式をもとに壁面せん断応力、摩擦速度を求める方法である。壁面せん断応力は壁面での速度勾配に比例するため、いわゆるノイマン型の速度境界条件を課しているとも見ることができる。

微分式型壁面モデル(Differential Equation Wall Model)は、LES 解析の壁面第一格子点のさらに壁側に別の格子(Embedded Grid)を設け、そこで RANS (レイノルズ平均モデル) 等の乱流モデルを用いて境界層方程式を解いて壁面せん断応力を求める方法である。代数式型壁面モデルに比べ対流項の主流方向変化や圧力勾配を考慮できるという利点がある。

ハイブリッド法は壁面近傍で RANS、主流領域で LES による解析を用いる手法である。壁面近傍とそれ以外で異なる乱流モデルを用いるという点で微分式型壁面モデルと類似する方法であるが、前者が乱流モデルで用いる格子を別々にしているのに対し、一般的に同一の格子系で y^+ などのモデル変数により乱流モデルを切り替えるものをハイブリッド法と呼ぶことが多い。

IB 法(Immersed Boundary Method)は、デカルト座標系で表現されるような単純な直交格子系において、複雑な壁面は計算セルの内部に設定する。このとき、壁面内部に埋め込まれた格子点において流速がゼロとなるように、隣接する流体側の格子点の流速と壁面上の流速(例えば、No-slip 条件であればゼロとする)をもとに外挿式により人工的な体積力を与えて計算を行う手法である。

以下では、上記の手法のうち No-slip 条件を除く 4 つの手法について、関連する文献の内容をもとに近年の研究の傾向について述べる。

3.2 代数式型壁面モデル

3.2.1 モデルの概要

壁面に垂直な方向の速度分布をある代数式で仮定し、その式をもとに壁面近傍の速度から壁面せん断応力、摩擦速度を求める方法である。今回調査した文献では以下のモデルが検討されている。

A. 対数則(log-law)

対数則は最もよく使用される壁面モデルである。通常は 2 層モデル^{3,4,12,14,16)}として壁面第一格子点の位置 y が内層に含まれるか外層に含まれるかにより場合分けを行い、

$$u^+ = y^+ \quad \text{for } y^+ \leq 11 \quad (3.2.1)$$

$$u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln(Ey^+) \quad \text{for } y^+ > 11 \quad (3.2.2)$$

と表される。ここで、 $u^+ = u_1 / u_\tau$ 、 $u_\tau = \sqrt{\tau_w / \rho}$ (摩擦速度)、 $y^+ = u_\tau y / \nu$ であり、 κ はカルマン定数 (約 0.4~0.42)、 $E=9.8$ 、 ν は動粘性係数である。 τ_w は壁面せん断応力であり

$$\tau_w = \mu \left. \frac{du}{dy} \right|_{\text{wall}} \quad (3.2.3)$$

で計算される (μ は粘性係数)。 u_1 に壁面第一格子点の格子スケール速度の壁面に平行な成分を代入し、繰り返し計算により τ_w と u_τ を算出する。(3.2.1)式と(3.2.2)式で場合分けを行う場合、 $y^+=11$ で勾配が不連続となるため、 $y^+=5,30$ で

$$u^+ = y^+ \quad \text{for } y^+ \leq 5 \quad (3.2.4)$$

$$u^+ = A \ln(y^+) + B \quad \text{for } 5 < y^+ \leq 30 \quad (3.2.5)$$

$$u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln(Ey^+) \quad \text{for } y^+ > 30 \quad (3.2.6)$$

$$\text{※ただし、} A = \frac{1}{\ln 6} \left[\frac{1}{\kappa} \ln(30E) - 5 \right], \quad B = 5 - A \ln 5$$

とし平滑化する 3 層モデル¹⁶⁾も提案されている。

B. Spalding 則^{4,6)}

Spalding 則は壁面近傍の流速分布において、内層と外層の分布を一つの平滑化された代数式で定式化したモデルであり、

$$u^+ - y^+ - e^{-\kappa B} \left[e^{\kappa u^+} - 1 - (\kappa u^+) - \frac{(\kappa u^+)^2}{2} - \frac{(\kappa u^+)^3}{6} \right] = 0 \quad (3.2.7)$$

で表される。 $B=5.0 \sim 5.5$ である。壁面せん断応力の算出は対数則と同じで、繰り返し計算により求める。この壁面モデルでは、対数法則のように y^+ に応じた場合分けが不要なことが利点である。

C. Werner and Wengle 則^{7,8,16)}

Werner and Wengle は、粘性底層から離れた部分での流速分布がべき乗則に従うと仮定することにより、以下の壁面モデルを提案した。

$$u^+ = y^+ \quad \text{for } y^+ \leq 11.8 \quad (3.2.8)$$

$$u^+ = A(y^+)^B \quad \text{for } y^+ > 11.8 \quad (3.2.9)$$

定数としては $A=8.3, B=1/7$ が用いられている。この壁面モデルの利点は、対数則や Spalding 則と異なり、壁面せん断応力を直接解析的に求められることである。(3.2.8)式と(3.2.9)式から τ_w を u_1 で表すと、

$$|\tau_w| = \frac{2\mu|u_1|}{\Delta y} \quad \text{for } |u_1| \leq \frac{\mu}{2\rho\Delta y} A^{2/(1-B)} \quad (3.2.10)$$

$$|\tau_w| = \rho \left[\frac{1-B}{2} A^{(1+B)/(1-B)} \left(\frac{\mu}{\rho\Delta y} \right)^{1+B} + \frac{1+B}{A} \left(\frac{\mu}{\rho\Delta y} \right)^B |u_1| \right]^{2/(1+B)} \quad (3.2.11)$$

$$\text{for } |u_1| > \frac{\mu}{2\rho\Delta y} A^{2/(1-B)}$$

となる。ただし Δ は壁面第一格子点の位置を示す。

D. Backflow モデル¹⁶⁾

通常の壁面モデルでは、運動方程式における対流項の主流方向変化は考慮されない。このため、剥離流れのような主流とは逆向きの流れが生じている壁面近傍では上記のモデルが有効でない場合が多い。

Mathey らは、循環流における代表スケールを主流と逆向きの流れにおける平均流速の最大値 U_N と、それをあたえる壁面からの位置 y_N で表し、特性レイノルズ数 $Re^* = U_N y_N / \nu$ を定義して、循環流域における壁面せん断応力の評価式を

$$Re^* = \frac{1}{\kappa} \sqrt{\frac{2}{c_f^*}} \left(e^{\kappa \sqrt{2/c_f^*}} - 1 \right) \quad \text{for } Re^* > 75.1 \quad (3.2.12)$$

$$Re^* = 2.41 \left(\frac{2}{c_f^*} \right)^{1.087} \quad \text{for } Re^* < 75.1 \quad (3.2.13)$$

で与えた。ここで $c_f^* = 2\tau_w / \rho U_N^2$ である。このモデルは循環流域において主流とは逆向きの流れが生じている壁面近傍にのみ有効であり、それ以外の部分には通常の壁面モデルを用いる必要がある。

3.2.2 近年の動向

今回収集した文献において代数式型壁面モデルを検討している研究の概要について述べる。Hassan and Barsamian⁷⁾は、壁乱流において見られるバースト現象、低速流体の放出(ejection)、掃引(sweep)構造を考慮し、壁面せん断応力を算出する際に対象としている壁面に平行な流速成分 u_1 だけでなく、そこから主流方向に ΔS だけずれた地点の壁面に垂直な速度成分 $v_{1+\Delta S}$ も評価に加え、Werner-Wengle 則をもとに

$$|\tau_w| = \frac{2\mu|u_1|}{\Delta y} \quad \text{for } |u_1| \leq \frac{\mu}{2\rho\Delta y} A^{2/(1-B)} \quad (3.2.14)$$

$$|\tau_w| = \rho \left[\frac{1-B}{2} A^{(1+B)/(1-B)} \left(\frac{\mu}{\rho\Delta y} \right)^{1+B} + \frac{1+B}{A} \left(\frac{\mu}{\rho\Delta y} \right)^B |u_{1+\Delta S}| \right]^{2/(1+B)} - C\rho u_\tau v_{1+\Delta S}$$

$$\text{for } |u_1| > \frac{\mu}{2\rho\Delta y} A^{2/(1-B)} \quad (3.2.15)$$

というモデルを提案している。(3.2.15)において C は 1 のオーダーをもつ定数であり、 ΔS としては

$$\Delta S = y \tan(8^\circ) \quad \text{for } 30 < y^+ < 50 \sim 60 \quad (3.2.16)$$

$$\Delta S = y \tan(13^\circ) \quad \text{for } y^+ > 50 \sim 60 \quad (3.2.17)$$

が与えられる。ここで(3.2.15)式に摩擦速度 u_τ の項が含まれているため、解析的に壁面せん断応力を求められる Werner-Wengle 則の特徴がなくなっている点に注意する必要がある。Hassan らはこの壁面モデルを 3 次元キャビティと円柱後流の流れの解析に適用し、平均流速分布や変動強度は試験値とよく一致したと報告しており、3 次元チューブバンドル周りの流れ解析にも有効だったとしている⁸⁾。

一方、Temmerman ら¹⁶⁾は前述した 4 種の壁面モデルを 2 次元丘周りの解析に適用し、丘の後流に生じる循環流の剥離点と再付着点の予測精度の評価を行った。その結果、Werner-Wengle モデルが最も高い予測精度を示したとしている。Temmerman らはこの原因として、代数式から壁面せん断応力を求める手法について言及している。すなわち、通常の壁面モデルでは第一格子点の速度をそのまま代数式に代入して壁面モデルを求めているが、Werner-Wengle モデルは、もともと壁面第一格子点の流速をその格子の平均としてとらえており、速度分布を壁に垂直な方向に積分したものと壁面せん断応力との関係式をもとに壁面せん断応力を求めている。Temmerman らはこのように第一格子点の流速を格子平均としてとらえ、格子区間内で壁に垂直な方向にモデル式を積分することにより壁面せん断応力を求める方法が有効であると指摘した。そして、図 3.2.1 のように、実際に対数則においても Werner-Wengle 則と同様の方法で壁面せん断応力を算出したところ、平均速度分布の精度が改善されたと報告している。

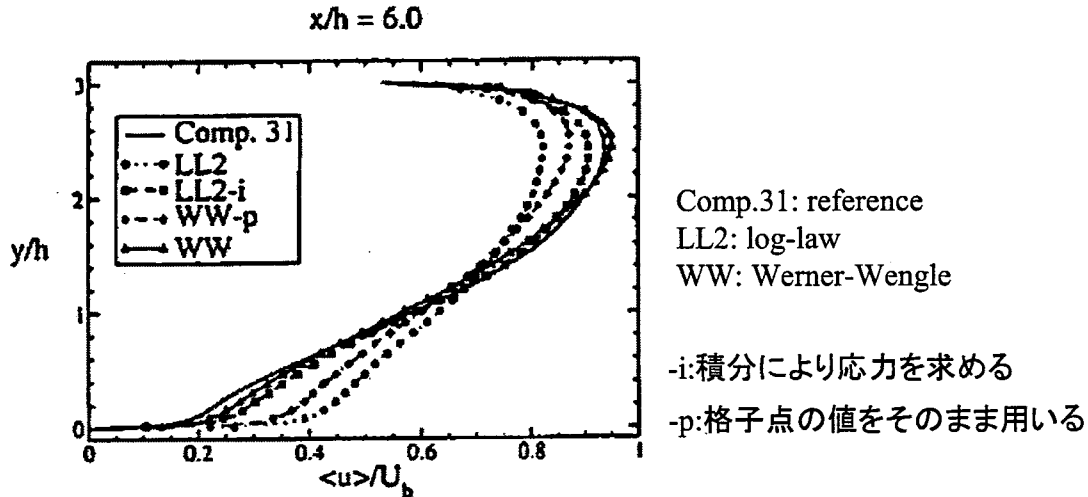


図 3.2.1 Temmerman¹⁶⁾らの研究における丘周り形状の壁面近傍平均流速分布

[Temmerman ら、International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol.24, pp173 より抜粋]

Nicoud ら¹⁴⁾は、壁面鉛直速度分布として対数則を仮定し、それを満たす主流方向とスパン方向の速度 u_{ref} , w_{ref} と計算値 u , w との差の 2 乗和を積分したものと、壁面せん断応力についても同様に 2 乗の和をとって壁面全体に面積分したものとをコスト関数とし、その値が最小となるように壁面せん断応力を最適化して境界条件を決定する方法を提案した。この手法は従来の壁面モデルよりかなり計算負荷が大きくなるため、得られた結果を用いて、任意の流れ場から確率論的に壁面せん断応力を推測できるモデルの構築を行っている。

このように、今回収集した文献において代数式型壁面モデルを検討している研究は、従来のモデルで考慮されていなかった壁面近傍の鉛直方向速度成分の影響を考慮した Hassan らのモデルや、剥離流れを生じている領域のための Backflow モデルなど、新たなモデル式を提案するものと、Temmerman や Nicoud のように、代数式は従来のものを用いて、壁面第一格子点の流速からどのように壁面せん断応力を算出するのか、そのプロセスについての検討にウエイトを置いているものがある。

複雑体系への適用事例という観点では、Hassan らの円柱後流におけるカルマン渦の解析をはじめ、Temmerman による様々な壁面モデルの丘形状への適用例のように、渦を生じるような流れ場において予測精度を高める試みもあり一定の成果もあげている。しかし代数式型壁面モデルはもともと境界層方程式より導かれる特定の代数式で壁面近傍の流れ場をすべて代表している点に制約があり、複雑な流れ場では Backflow モデルのように流れの状況に応じて流速分布に合致する代数式をそのつど構築しなければならない。したがって、流速や向き、格子点の位置などに応じてモデルを場合分けする必要がある、実際のコード化ではやや煩雑になる可能性がある。代数型壁面モデルの特長は高い精度で壁面近傍の流れを解析するというよりも、比較的簡便な方法で格子点の低減、計算負荷の低減ができることにありとえられる。代数式型壁面モデルのメリットとデメリットを表 3.2.1 に示す。

表 3.2.1 代数式型壁面モデルのメリットとデメリット

(メリット)
・ 格子点よりも内側の速度分布を仮定することにより計算負荷を低減できる。 ・ 一般座標系への拡張が容易である。 ・ 既知の流れ場の平均量を用いずに境界条件を設定できる。
(デメリット)
・ 主流方向圧力勾配の効果、壁に垂直な方向の速度の効果を考慮していない。 ・ 流れの鉛直分布を一つの代数式で表せないような再付着領域や激み点を持つ流れ、逆圧力勾配流れなどに適用すると、予測精度が悪化する。 ・ 精度の高い解析を行おうとすると様々な流れ場に応じて代数式を定式化する必要があり、モデルの場合分けが煩雑になる可能性がある。

3.3 微分式型壁面モデル

3.3.1 モデルの概要

Cabot や Baralás によって提案された微分式型壁面モデル⁶⁾は、代数式型壁面モデルのように Navier-Stokes 方程式を境界層近似して得られる代数式を用いるのではなく、LES 解析における壁面第一格子点の内側に壁に垂直な方向に細かい格子(Embedded Grid)を設定し、その格子で RANS 等により Navier-Stokes 方程式を解いて壁面せん断応力を求める

図 3.3.1 に微分式型壁面モデルの計算手法の概略を示す。LES の壁面第一格子点は境界層内にあるものとしている。Embedded 格子は壁面に垂直な方向のみ細かく分割し、主流方向とスパン方向は LES の格子幅と同一である。計算手順としては、まず LES 解析における壁面第一格子点の格子スケール速度 U_1 (または U_3)、圧力 P を Embedded Grid 上面の境界条件とし、Embedded Grid において境界層近似された Navier-Stokes 方程式

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial(u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_2} \left[(\nu + \nu_t) \frac{\partial u_i}{\partial x_2} \right] \quad \text{for } i=1, i=3 \quad (3.3.1)$$

を解く。 $i=1, i=3$ はそれぞれ主流方向とスパン方向を示す。壁に垂直な方向の速度 u_2 は連続の式により、

$$u_2 = \int_0^{x_2} \left(\frac{\partial U_1}{\partial x_1} + \frac{\partial U_3}{\partial x_3} \right) dx_2 \quad (3.3.2)$$

で与えられる(非圧縮性の場合)。Embedded Grid において壁面を No-slip を条件として得られた壁面せん断応力を LES の境界条件とする。ここで注意すべきは、(3.3.1)と(3.3.2)からわかるように境界層方程式において圧力ポアソン方程式は解かれなないことである。Embedded Grid の各格子において(3.3.1)の圧力の値は境界を含め LES の壁面第一格子点の圧力値がそのまま代入される。よって、主流方向とスパン方向の圧力勾配は LES の格子の値と対応するが、壁に垂直な方向の圧力勾配はゼロとなる。

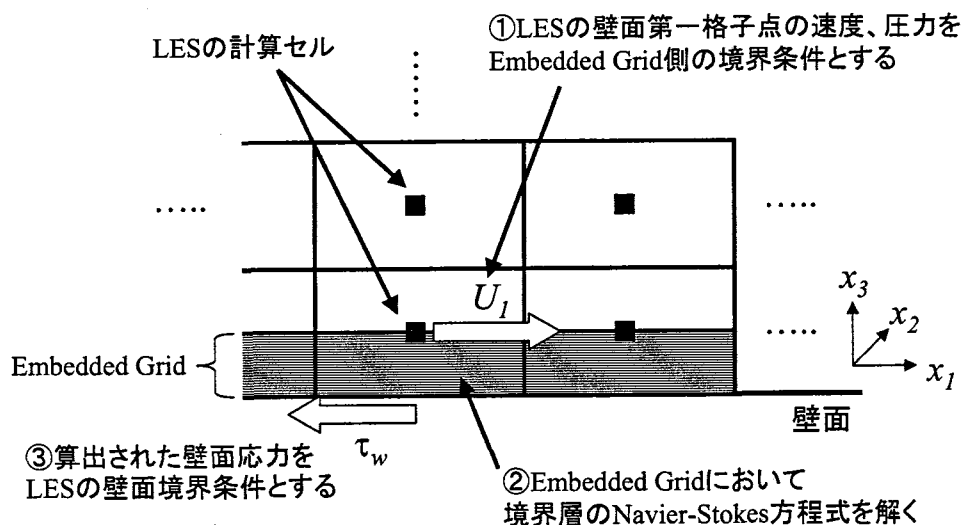


図 3.3.1 微分式型壁面モデルの計算手順

[小林ら⁶⁾、日本機械学会論文集 B 編、Vol.66、No.651、pp2782 より抜粋]

微分式型壁面モデルでは、(3.3.1)式における渦粘性係数 ν_t を RANS によってモデル化することが必要となる。通常用いられているのは混合距離モデルに基づく 0 方程式モデルであり、例えば Johnson-King の非平衡型モデルでは

$$\nu_t = \kappa y u_\tau \left[1 - \exp\left(-\frac{y^+}{A}\right) \right]^2 \quad (3.3.3)$$

と算出される。このとき y は壁面近傍の格子幅で、モデル定数 $A=19$ である。

3.3.2 近年の動向

小林ら⁴⁾は円形衝突噴流の熱流動解析において微分式型と代数式型壁面モデル (Spalding 則) の両方を比較した。その結果、微分式型モデルは平均速度分布などの 1 次の統計量は試験値とよく一致したが、2 次の乱流統計量 (LES における Grid Scale の乱流強度など) になると実験値との誤差が大きくなることを報告している。別報⁹⁾では逆圧力勾配平板流れへ同じく両壁面モデルを比較しているが、やはり 2 次の乱流統計量において試験値を過小評価する傾向にあると報告している。予測精度の改善策としては格子解像度を上げることに加え、RANS の渦粘性係数 ν_t を(3.3.3)式の Johnson-King の非平衡型モデルに基づく 0 方程式モデルによって求めた点に言及し、境界層内において RANS の乱流渦粘性係数をより高次のモデルで解くことを提案している。また、円形衝突噴流の解析で SGS モデルとして Smagorinsky と Dynamic モデルの両方を比較し、Dynamic モデルの方が乱流統計量の予測精度が高くなったことから、壁面せん断応力だけを RANS から LES 領域の壁面境界条件として与えるだけでなく、壁面第一格子点上の SGS 渦粘性係数と RANS の渦粘性係数を合わせることでできる壁面モデリングが必要となることを指摘している。

一方、Wang ら¹³⁾は微分式型壁面モデルを適用した翼後縁の解析結果において、表面摩擦係数が通常の LES 解析結果よりも過大評価される原因を考察した。そして、通常用いられる RANS の渦粘性係数は GS と SGS の両方のレイノルズ応力を考慮しているのに対し、LES の渦粘性係数は SGS のみを考慮していることをあげ、RANS 領域において渦粘性係数を求める際に必要となるカルマン定数 κ を 0.4 とするのは LES の壁面モデルとして RANS を用いる場合に最適でない可能性があることを指摘した。そこで、 κ を LES 領域における SGS 渦粘性係数 ν_{SGS} によって

$$\kappa = \frac{\langle \nu_{SGS} \rangle}{\left\langle y^+ \left[1 - \exp\left(-\frac{y^+}{A}\right) \right]^2 \right\rangle} \quad (3.3.4)$$

と動的に補正する手法を提案した。このように RANS の渦粘性係数が SGS 成分のレイノルズ応力のみを考慮した値とすることで、図 3.3.2 のように翼後縁の解析における表面摩擦係数の予測精度を改善している。ここで、括弧 $\langle \rangle$ はスパン方向に時間平均するという意味で、Wang らは計算する時間ステップから 150 時間ステップ前までの値を平均化している。

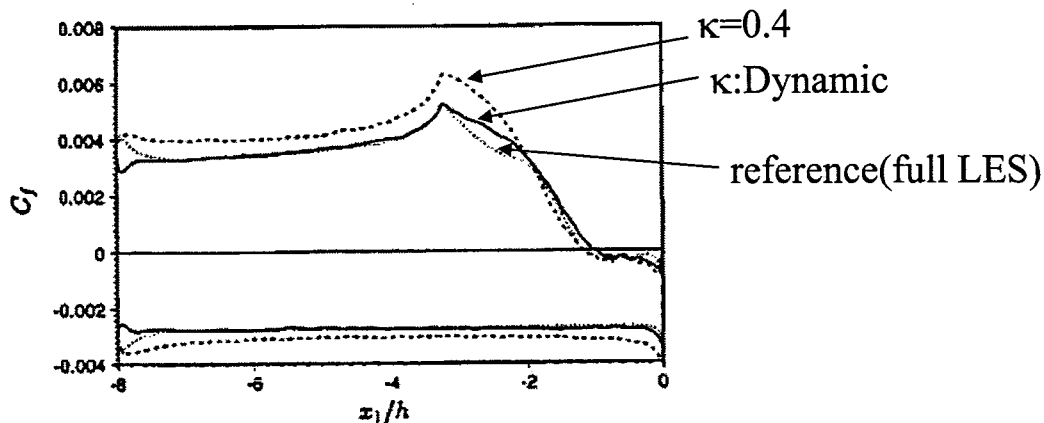


図 3.3.2 Wang ら¹³⁾による翼後縁解析の表面摩擦係数分布の比較

[Wang ら、Phys. Fluids, Vol. 14, No.7, pp2046 より抜粋]

今回の調査では円形噴流、逆圧力勾配乱流、翼後縁周りの流れへの解析であり、さらに形状的に複雑な体系への適用例はみられなかったため、今後はそれらの複雑体系や高レイノルズ数の大きい流れ場への適用が期待される。その場合は RANS 領域の渦粘性係数をより高次のモデルで計算する必要が生じると考えられるが、計算されるモデル係数を LES との境界面、すなわち壁面第一格子点においてどのように接合させるかが課題となる。方法の一つとしては Wang が提案しているように、壁面第一格子点において LES の SGS 渦粘性係数と RANS の渦粘性係数を強制的に合わせるようにカルマン定数を調整するといったものがあげられよう。

これらの課題は後述するハイブリッド法において、LES 領域と RANS 領域それぞれにどのような乱流モデルを採用するかという課題とも共通しており、むしろそちらの方でモデルの選択やその妥当性についての研究が活発になっているようである。

また、LES と RANS で別々の格子を用い、RANS の格子を壁面第一格子点内層に埋め込む手法は、比較的単純な境界適合格子程度ならよいが、壁面近傍を非構造格子で分割した体系などには適用しづらいものと考えられる。微分式型壁面モデルのメリットとデメリットを表 3.3.1 に示す。

表 3.3.1 微分式型壁面モデルのメリットとデメリット

(メリット)
・ 壁面に垂直な速度成分や境界層内の主流方向圧力分布などを考慮するため、壁近傍において種々の物理現象を反映させることができる。 ・ 代数式モデルよりも複雑な流れへ適用した際の予測精度は高い。
(デメリット)
・ LES と RANS の接合部において境界値が整合性を持つようにモデル係数等の設定値に注意しないと、LES との接合部で渦粘性の不連続な分布が発生する。 ・ 精度の高い計算を行う場合、RANS 領域において高次のモデルを使用する必要があるが、乱流エネルギーや散逸などの輸送方程式を新たに解くことにより本来の目的である LES における計算負荷低減のメリットが損なわれる可能性がある。 ・ 壁面近傍を非構造格子で分割した体系では適用が難しい。

3.4 ハイブリッド法

3.4.1 モデルの概要

ハイブリッド法とは、壁面付近で RANS を適用し、主流領域で LES を用いる手法をいう。前述の微分式型壁面モデルと異なるのは、LES と RANS の格子は同一のものを使用し、 y^+ や乱流の長さスケールなどで LES と RANS 領域を切り替える点である。ハイブリッド法は LES と RANS でそれぞれどのようなモデルを用いるかによって様々な手法がある。今回収集した文献では以下の組み合わせが用いられている。

- A. LES 領域に 0 方程式モデル (例えば Smagorinsky モデル)、RANS 領域にも 0 方程式モデル (例えば混合距離モデル) を用いる。すなわち、LES の SGS 渦粘性係数

$$\nu_{SGS} = (C_s \Delta)^2 \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \quad (3.4.1)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (3.4.2)$$

を求める際に、長さスケール Δ を格子幅とすれば通常の LES となり、混合距離を用いれば混合距離モデルで RANS の渦粘性係数を求めていることになる。LES と RANS の切り替えは流れ場の計算により得られた y^+ で行われる⁵⁾。

- B. RANS 領域では乱流エネルギー k や散逸率 ε の輸送方程式を解くのが通常である。そこで、 k や ε の値をスムーズに LES 領域に受け渡せるように、RANS 領域を k - l や k - ε モデルなどの 1 方程式モデルや 2 方程式モデルで解き、LES においては乱流エネルギー k の輸送方程式を解く 1 方程式モデルを用いる。LES の 1 方程式モデルとしては吉沢らが提唱した

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{u}_i k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\nu + \nu_{SGS}) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + 2\nu_{SGS} S_{ij} S_{ij} - \varepsilon \quad (3.4.3)$$

$$\varepsilon = C_\varepsilon \frac{k^{1.5}}{\Delta} \quad C_\varepsilon = 1.05 \quad (3.4.4)$$

$$\nu_{SGS} = C_k \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad C_k = 0.07 \quad (3.4.5)$$

がよく用いられる^{21,22)}。このとき、散逸率 ε については(3.4.4)式から代数的に求め、LES 領域において輸送方程式は解かれない。なお、近年は RANS に k - ω モデルを用いた研究例もある²⁰⁾。

- C. ハイブリッド法のうち、特に RANS 領域を Spalart-Allamaras モデルと呼ばれる一方程式モデルで解き、壁から離れた領域で同様な 1 方程式モデルの LES を用いる手法を DES (Detached Eddy Simulation) と呼ぶ^{2,15)}。

DES では、渦粘性係数に関する変数 $\tilde{v}$ を新たに設定し、その輸送方程式

$$\frac{D\tilde{v}}{Dt} = c_{b1}\tilde{S}\tilde{v} - c_{w1}f_w\left(\frac{\tilde{v}}{\tilde{d}}\right)^2 + \frac{1}{\sigma}\left\{\nabla \cdot [(\mathbf{v} + \tilde{\mathbf{v}})\nabla\tilde{v}] + c_{b2}(\nabla\tilde{v})^2\right\} \quad (3.4.6)$$

を解くことを考える。このとき、必要なパラメータは以下のように計算される。

$$\tilde{S} = |S_{ij}| + \frac{\tilde{v}}{\kappa^2\tilde{d}^2}f_{v2} \quad (3.4.7)$$

$$f_{v2} = 1 - \frac{\chi}{1 + \chi f_{v1}} \quad (3.4.8)$$

$$f_{v1} = \frac{\chi^3}{\chi^3 + c_{v1}^3} \quad (3.4.9)$$

$$\mathbf{v}_{SGS} = \tilde{v}f_{v1} \quad (3.4.10)$$

$$\chi = \frac{\tilde{v}}{v} \quad (3.4.11)$$

$$f_w = g\left(\frac{1 + c_{w3}^6}{g^6 + c_{w3}^6}\right)^{\frac{1}{6}} \quad (3.4.12)$$

$$g = r + c_{w2}(r^6 - r) \quad (3.4.13)$$

$$r = \frac{\tilde{v}}{\tilde{S}\kappa^2\tilde{d}^2} \quad (3.4.14)$$

また、 c_{b1} , c_{b2} , c_{w1} , c_{w2} , c_{w3} , c_{v1} , σ はモデル係数であり、

$$c_{b1}=0.1355, c_{b2}=0.622, \sigma=0.41, c_{w1} = \frac{c_{b1}}{\kappa^2} + \frac{(1 + c_{b2})}{\sigma} = 3.239, \quad (3.4.15)$$

$$c_{w2}=0.3, c_{w3}=2.0, c_{v1}=7.1$$

となる。パラメータがかなり多くなっているが、(3.4.6)式と(3.4.10)式に着目すると $\tilde{v}$ が粘性係数の次元を持つ変数で、1方程式モデルであることがわかる。DESにおいてLESとRANSとの切り替えは、(3.4.6)式の長さスケール $\tilde{d}$ で行い、

$$\tilde{d} = \min(d, C_{DES}\Delta), \quad \Delta = \max(\Delta x, \Delta y, \Delta z) \quad (3.4.16)$$

と与えられる。 d は格子点の壁からの距離、 C_{DES} はモデル係数で一般的なDESでは0.65である。(3.4.16)式からわかるように、各方向の格子幅が境界層厚さ以内のオーダーにあれば、壁面近傍では格子点と壁面との距離を代表長さスケールとするRANSモデル(Spalart-Allamarasモデル)となり、格子点が壁面から離れると長さスケールとして格子幅に由来する $C_{DES}\Delta$ を用いるLESに切り替わる。したがってDESにおいては、通常のハイブリッドのように y^+ ではなく格子の分割数やモデル定数 C_{DES} を調整することによって界面を変えることになる。なお、 Δ としては

$$\Delta = (\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2)^{1/2} \quad (3.4.17)$$

といった式が用いられる場合もある。

3.4.2 近年の傾向

これまでに知られているハイブリッド法の大きな問題点として、LES 領域と RANS 領域を切り替える界面において物理的に不合理な速度分布の不連続点ができてしまうことがあげられる。近年の研究もこの不連続な分布の解消に言及したものが多。例えば半場⁵⁾は不連続性の原因として、微分式型壁面モデルでも指摘されていたように界面において RANS 領域では LES の SGS 成分に相当する渦粘性係数が LES に比べ大きくなる影響を受けて LES 領域の GS 速度成分が過小評価されていることをあげ、界面で RANS と LES 領域それぞれの速度の離散化に別々の速度を代入する新しいスキームを提案した。図 3.4.1 はその概要を示したものである。LES と RANS の界面が体系において j に設定されており、RANS としては $\Delta = 5h$ とする混合距離モデルを用いている。このとき、界面において定義される速度を RANS 側 v_j^{5h} と LES 側 v_j^h の 2 種類定義すると、界面に接する格子において連続の式は

$$\left. \frac{\partial \bar{u}^h}{\partial x} \right|_{j+1/2} + \frac{\bar{v}_{j+1}^h - \bar{v}_j^h}{h_j} + \left. \frac{\partial \bar{w}^h}{\partial z} \right|_{j+1/2} = 0 \quad \text{for LES region} \quad (3.4.17)$$

$$\left. \frac{\partial \bar{u}^{5h}}{\partial x} \right|_{j-1/2} + \frac{\bar{v}_j^{5h} - \bar{v}_{j-1}^{5h}}{h_j} + \left. \frac{\partial \bar{w}^{5h}}{\partial z} \right|_{j-1/2} = 0 \quad \text{for RANS region} \quad (3.4.18)$$

となる。ただし、RANS 側の界面の速度 v_j^{5h} は v_j^h を用いて

$$v_j^{5h} = \hat{v}_j^h, \quad \hat{\Delta} = \sqrt{5^2 - 1^2} h \quad (3.4.19)$$

と x - z 方向にフィルター平均して求める。このとき u (w) 方向の運動方程式において界面を横切る移流項のみ示すと、

$$\frac{\partial \bar{u}_{j+1/2}^h}{\partial t} = -\frac{1}{h_j} (\cdots - \bar{u}_j^h \bar{v}_j^h) + \cdots \quad \text{for LES region} \quad (3.4.20)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_{j-1/2}^{5h}}{\partial t} = -\frac{1}{h_j} (\bar{u}_j^h \bar{v}_j^h - \cdots) + \cdots \quad \text{for RANS region} \quad (3.4.21)$$

となる。半場は上記のスキームを界面 j だけでなく、その前後の格子点についても適用し、切り替えのための緩衝層を作ることによりさらに段差が解消されることを示した (図 3.4.2)。

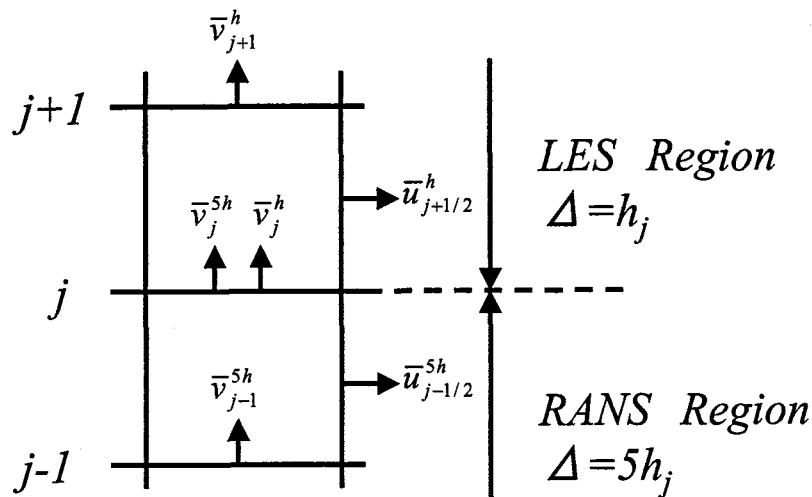


図 3.4.1 LES/RANS 切り替え位置における離散化スキームの概略⁵⁾

[半場ら⁵⁾、生産研究、Vol.1、No.55、pp18 より抜粋]

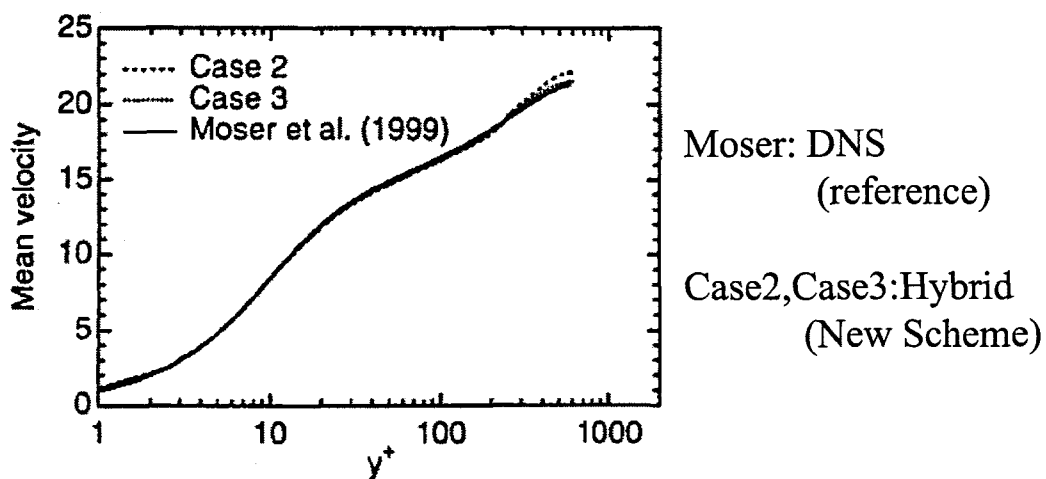


図 3.4.2 半場⁵⁾が提案した離散化スキームにおける

LES/RANS ハイブリッドのチャネル乱流と DNS データの流速分布の比較

[半場ら⁵⁾、生産研究、Vol.1、No.55、pp20 より抜粋]

Davidson and Peng²⁰⁾も 2 次元丘周りの流れに LES/RANS を適用し、やはり界面付近で渦粘性が不連続になることを指摘しており、原因として RANS の渦粘性係数が LES に比べ大きすぎ、乱流の長さスケールが急減することをあげている。Temmerman ら²²⁾はこの問題に対し、界面において RANS の渦粘性係数が LES と強制的に等しくなるように RANS の渦粘性係数を求めるためのモデル係数 C_μ を調整し、さらに RANS 領域内の C_μ の値を以下のような y または y^+ のスムージング関数で表現した。

$$y \text{ の関数: } C_\mu = 0.09 + (C_\mu - 0.09) \frac{\left[1 - \exp\left(-\frac{y}{\Delta}\right)\right]}{\left[1 - \exp\left(-\frac{y_{\text{int}}}{\Delta_{\text{int}}}\right)\right]} \quad (3.4.22)$$

$$y^+ \text{ の関数: } C_\mu = 0.09 \frac{y^+}{27} \quad \text{for } y^+ \leq 27$$

$$C_\mu = 0.09 + \frac{(C_{\mu, \text{int}} - 0.09) \left(1 - \frac{\exp(-(y - y^+_{y^+=34}))}{\Delta}\right)}{\left(1 - \frac{\exp(-(y - y^+_{y^+=34}))}{\Delta_{\text{int}}}\right)} \quad \text{for } y^+ > 27 \quad (3.4.23)$$

上式において添字 int は界面での値を、 Δ は格子幅の相乗平均を意味する。Temmerman らはこの手法を 2 次元丘周りの体系に適用したところ、reference とした細格子の LES 解析に定性的に一致する傾向を示し、格子を粗くしたケースよりも精度が高く高速化されたとしている。そして、より精度の高い解析を行うためには、RANS 領域における壁面せん断応力の誤差を少なくする必要があると指摘している。

一方、DES においても界面付近で非物理的な速度の不整合面が生じ、表面摩擦係数の誤差が大きくなることが知られている。Piomelli ら¹⁵⁾は DES によるモデル係数 C_{DES} を調整したり、LES 領域において通常の Smagorinsky モデルを用いたり、フィルター幅の求め方を変更したりして界面の変化による誤差への影響を検討した。その結果切り替えの界面が壁面に近づくほど小さいスケールの渦が再現され、レイノルズ応力の解像度も上がるが平均速度分布の誤差はそれほど改善されなかったと報告している。そこで平均速度分布と摩擦係数の誤差を改善するために RANS モデルとして後方散乱モデルを提案した。これは長さスケールにフィルター幅、時間スケールに時間ステップ、振幅 f が壁からの距離 y の関数

$$f(y) = A \frac{(\lambda y)^2}{1 + (\lambda z)^4}, \quad \lambda = 30, A: \text{empirical parameter} \quad (3.4.24)$$

で与えられる 3 つのパラメータをもつ抗力項を運動方程式に加えるものであり、これにより表面摩擦係数の誤差が改善されたと報告している（抗力項の具体的な式については原論文に記述されていない）。

このように、近年は界面における平均速度分布や渦粘性係数の不連続点の解消に向けたモデルの工夫についての研究例が多く、界面での RANS $\leftrightarrow$ LES の物理量の受け渡し方や使用する乱流モデルが確立されればハイブリッド法は今後普及する可能性が高いと考えられる。複雑形状への適用事例はまだ少ないが、 k - ϵ モデルは RANS として幅広い体系に適用されている実績があることを考えると、かなり広い範囲の高レイノルズ数流れ場に適用できることが期待される。また半場¹¹⁾が壁面近傍に LES、主流域に RANS を用いる手法を適用しているように、壁面のモデル化という目的以外に、RANS において壁面の非定常な性質を考慮するために壁面近くで LES を適用したり、LES の流入境界条件として RANS のデータを利用したりするといった応用方法もある。

今後ハイブリッド法で精度の高い解析を行うためには、Temmerman²²⁾の研究結果から、上記の課題に加えて RANS 領域において壁面せん断応力をより正確に求めることが必要と考えられる。

そのために RANS をどのくらいの格子で解析するか、その時に LES と RANS の界面となる y^+ の値をいくつにするかなどのノウハウの蓄積が必要となるだろう。

一方、流速以外の物理量をハイブリッド法でどのように取り扱うかもまだ確立されていないようである。例えば Liu ら²¹⁾は計算機管体内部の熱流動予測をハイブリッドと RANS (レイノルズ応力方程式モデル) で行い、両解析結果と試験値とを比較している。それによると流れ場の予測精度はハイブリッドの方が高かったものの、温度場の予測はレイノルズ応力モデルの方が高い予測精度を示したとしている。Liu らは温度 θ の変動成分の取扱いを乱流プラントル数 P_π をもとに

$$\overline{u_j' \theta'} = - \frac{v_i}{P_\pi} \frac{\partial \theta}{\partial x_j} \quad (3.4.25)$$

としている。これ自体は一般的な手法であるが、ハイブリッド法において温度場の予測精度を高めるにはさらに温度やスカラーといった物理量の界面における受け渡し方も工夫する必要があると考えられる。

DES については、もともと航空宇宙分野において翼形状周りの解析を対象として研究が進められてきた経緯から、翼形状を中心とする剥離流れへの適用例が多く、その意味では高レイノルズ流れへの適用性は高いと考えられる。しかし他のハイブリッド法と同様、界面における平均速度勾配の非物理的な不連続性をどのように抑制するかが課題である。前述した Piomelli¹⁵⁾が適用した後方散乱モデルも著者自身が指摘しているように物理的な根拠はなく ad hoc な方法であり、今後さらに検討が必要である。ハイブリッド法のメリットとデメリットを表 3.4.1 に示す。

表 3.4.1 ハイブリッド法のメリットとデメリット

(メリット)
・ RANS を壁近傍に適用することにより計算の高速化を図ることができる。 ・ これまで RANS が適用されてきた複雑形状や高レイノルズ数の流れ場に適用できる可能性がある。 ・ 壁面のモデル化という目的以外に、RANS において壁面の非定常な性質を考慮するために壁面近くで LES を適用したり、LES の流入境界条件として RANS のデータを利用したりするといった応用方法もある。
(デメリット)
・ LES と RANS の界面において非物理的な平均速度分布、渦粘性の段差が生じるため、その解消のためにモデルの工夫が必要となる。 ・ 温度場やスカラー量などの流れ以外の物理量をハイブリッド法で解く際に、確立された方法がまだない。

3.5 Immersed Boundary Method (IB 法)

3.5.1 モデルの概要

Immersed Boundary Method (IB 法)は、単純直交格子を使用し、曲線的な壁境界を有する体系に対しては格子内部に境界を埋め込む手法である。境界条件として壁面の内部にある格子（実質的境界格子点）の流速成分を流体側格子点の流速と物体境界上において想定している流速（No-slip 条件であればゼロ）から外挿式により決定する。このとき実質的境界格子点には流速のディリクレ条件を与えるのではなく、実際の物体境界で設定値になるように体積力を追加する。これにより、直交格子で表現することのできない曲線的な壁面においてもそれに沿ってディリクレ境界条件を課すことなく解析を行うことができる。

IB 法を適用する場合、壁面に隣接する格子点における Navier-Stokes 方程式は以下のように記述される。

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} = -u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\tau_{ij} + R_{ij}) + f_i \quad (3.5.1)$$

ここで R_{ij} は SGS 応力、 τ_{ij} は剪断応力である。 f_i が実際の壁境界条件を与えるために課せられた実質的境界格子点に与える人工的な体積力成分であり、通常の LES 基礎方程式と唯一異なる点である。Mohd-Yusof はこの体積力を

$$f_i = \frac{U_i^{n+1} - u_i^n}{\Delta t} - Rhs \quad (3.5.2)$$

として扱っている。ここで Rhs は(3.5.1)式の体積力を除く右辺成分である。 U_i^{n+1} は実質的境界格子点での境界流速値であり、Immersed Boundary 近傍の流体内格子点から Immersed Boundary 上の境界流速条件を満足するように決められた補間関数で与えられる。すなわち、(3.5.2)式は計算上の実質的境界格子における(3.5.1)式の離散化式であり、 U_i^{n+1} をディリクレ条件として課す代わりに、壁近傍流体内部の流速からの補間による体積力 f_i として与えていることがわかる。

3.5.2 近年の傾向

IB 法は、曲線境界を有するような体系を直交格子で取り扱うことにより境界適合格子生成のコストを低減できるのが最大の特徴といえる。この際、境界付近の補間方法によっては圧力ポアソン方程式の収束性が悪くなるので解法に工夫が必要であると考えられる。例えば、Li ら¹⁹⁾は埋め込み境界を含む格子点に図 3.5.1 のような数値的な圧力条件を与えることにより、実境界上の圧力勾配をゼロとして数値安定性を向上させている。Tseng ら²³⁾は波状境界流れに IB 法を適用しており、境界適合格子と比較して妥当な結果を得ているが、 f_i を与える格子点と境界との位置関係の偏りが計算安定性に影響を及ぼす点を指摘し、埋め込み境界と格子点の位置関係が偏らないように注意しなければならないとしている。また圧力ポアソン方程式の収束性が悪くなる点についてソルバの検討も行っており、SIP 前処理による Bi-CGSTAB を用いると最も収束性がよくなることを示している。

池野ら¹⁾は IB 法を適用した運動方程式を部分段階法(Fractional Step Method)による時間進行で解く際に、通常の 2 段階解法を採用すると計算の過程で壁面の no-slip 条件が満たされない問題点を

改善するために、各ステップの計算式を補正して

$$\text{圧力: } \frac{\partial^2 P^{n+1}}{\partial x_j^2} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\delta_i (1 - \varphi_i) \frac{\partial P^{n+1}}{\partial x_j} \right] = \frac{1}{\Delta t} \frac{\partial u_i^F}{\partial x_i} \quad (3.5.3)$$

$$\text{流速: } u_i^{n+1} = u_i^F - \Delta t (1 - \delta_i) \frac{\partial P^{n+1}}{\partial x_i} - \Delta t \delta_i \varphi_i \frac{\partial P^{n+1}}{\partial x_i} \quad (3.5.4)$$

とする方法を提案している。 u_i^F は速度の部分段階を示す。このほか、Gridoriadis ら¹⁸⁾はSGSモデルとして high pass filter の機能を持つ filtered structure function model をIB法へ適用したところ、Smagorinsky モデルよりも実験値を精度よく予測したと報告している。

なお、Cui ら¹⁰⁾は矩形格子を用いて波状境界流路の解析を行うために、固体側に含まれる格子点には時間離散化された Navier-Stokes 方程式において速度成分の時間進行値 u^{n+1} をゼロとしたときの外力を課するという手法をとっており、境界適合格子の解析ケースと比較して妥当な結果を得たと報告している。著者自身はIB法という呼び方はしていないが本手法とほぼ同様な手法と考えられる。

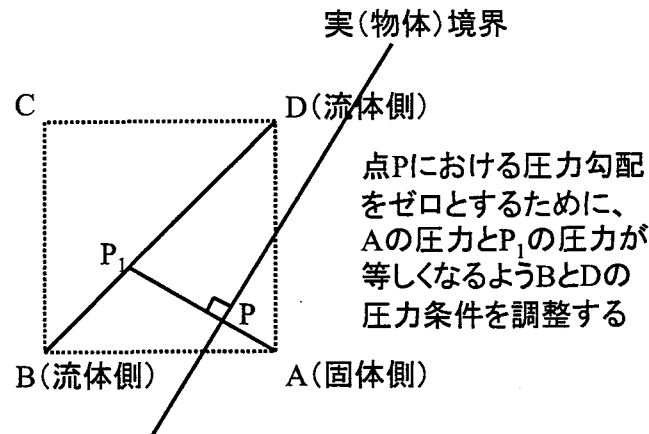


図 3.5.1 IBM 計算安定化のための境界格子における圧力条件の与え方 (例)

[Li ら¹⁹⁾, International Journal for Numerical Methods in Fluids, Vol.46, pp94 より抜粋]

IB法はもともと心臓や血管などの血流解析に向けて開発されたようで、今回収集された論文の多くは今後の適用分野として移動境界を有する体系をあげている。実際 ALE(Arbitrary Lagrangean Eulerian Method)のように領域の再分割を行う必要がなく境界での体積力のみで処理できることから、複雑な体系における移動境界問題への適用手法として検討すべきものと考えられる。ただし、物体の実境界は格子の内部に埋め込まれるため、壁面近傍の流速分布や応力を精度よく解析する場合には近傍の格子分割数や体積力の補間の精度に十分注意しなければならない。なお、従来単純体系での乱流構造解析が中心であった DNS への適用も挙げられている。IB法のメリットとデメリットを表 3.5.1 に示す。

表 3.5.1 IB 法のメリットとデメリット

(メリット)
・ 直交格子で曲線境界を取り扱うことができるため、格子生成のコストを低減できる ・ 計算負荷が低い
(デメリット)
・ 圧力ポアソン方程式の収束性が悪化する可能性があるため、解法を工夫する必要がある。 ・ Immersed Boundary 内の実質的境界格子点、隣接する流体側の格子点、および Immersed Boundary との位置関係が偏ると、補間の精度が悪化するため、格子アスペクト比は小さく抑えるなど対策の必要がある。

3.6 複雑流路流れへの LES の適用について

今回収集した文献を複雑流路へ LES を適用した研究という観点からみると、適用例としては全体的に以下のようなものがあげられる。

1. 角柱周り・円柱周りの流れ
2. 波状境界を壁面とするチャンネル流れ
3. ベンド、合流部、リブなどを含む配管内の流れ
4. 航空機、風車、タービンなどの翼形状周りの流れ
5. ポンプ内部、原子炉内部などの形状的に非常に複雑な流体機器類内部の流れ

1 については、角柱や円柱の後流部で発生するカルマン渦などを以下に精度よく予測できるかに焦点が置かれている。2 では、波状境界の山から谷に向かって発生する剥離流の特性を正確に予測することが求められており、剥離領域内部の流速分布や、流れの剥離点および再付着点の位置などが検討の指標とされている。3～5 においても壁面近傍の流速や圧力分布、表面摩擦係数などが検証の指標となっている。

このような複雑流路への LES の適用例において壁面の取扱いは、3.1 節の冒頭でも述べたように通常の No-slip 条件を用いている研究が依然として多い。一方、今回調査した文献のうち、壁面モデルを複雑流路へ適用した例をまとめると表 3.6.1 のようになる。

表 3.6.1 各種壁面モデルの複雑流路体系への適用例

調査文献	壁面の取扱い	適用した体系
鹿野 ²⁾	DES	バックステップ流れ、180°ベンド内
小林ら ⁴⁾	微分式型壁面モデル	円形衝突噴流
Hassan and Barsamian ⁷⁾	代数式型壁面モデル	3次元キャビティ、円柱後流
Hassan and Barsamian ⁸⁾	代数式型壁面モデル	3次元チューブバンドル
Cui ら ¹⁰⁾	IB 法に類似	波状境界流路
Falcomer and Armenio ¹²⁾	代数式型壁面モデル	リブ付き管路内
Wang ら ¹³⁾	微分式型壁面モデル	翼形状の後縁部
Temmerman ら ¹⁶⁾	微分式型壁面モデル	波状境界流路
Grigoriadis ら ¹⁸⁾	IB 法	角柱周り
Li and Wang ¹⁹⁾	IB 法	角柱、橋脚トラス周り
Liu ら ²¹⁾	ハイブリッド	計算機筐体内部
Temmerman ら ²²⁾	ハイブリッド	波状境界流路
Tseng and Ferziger ²³⁾	IB 法	波状境界流路

壁面モデルを用いた研究では、角柱・円柱後流周りの流れや波状境界流路への適用例が主で、前述の 5 にあたるような形状的に複雑な体系への適用例はみられなかった。

3.7 使用する SGS モデルが壁近傍流れの解析結果におよぼす影響

壁面近傍の流れを精度よく解析するためには、適切な壁面モデルを選択するだけでなく、LES

において使用する SGS モデルによっても変わってくる可能性がある。この観点から飯塚ら³⁾、小林ら⁴⁾、Hassan and Barsamian⁷⁾、Temmerman ら¹⁶⁾などは複数の SGS モデルを適用し、壁付近の流速分布にどの程度影響を及ぼすかを評価している。最もよく用いられる Smagorinsky モデルと Dynamic モデルとの比較研究に着目すると、例えば飯塚らの丘周り形状の解析では、Dynamic モデルが自由せん断流域での乱流エネルギーなどを高精度に予測できているが、Smagorinsky モデルの方が壁境界近傍の剥離点、再付着点の予測精度がよいという結果になっている。この原因としては Dynamic モデルのモデル係数が壁面近傍で過小評価されることによって壁面せん断応力も過小評価されていることをあげており、フィルター格子幅に問題がある可能性を指摘している。

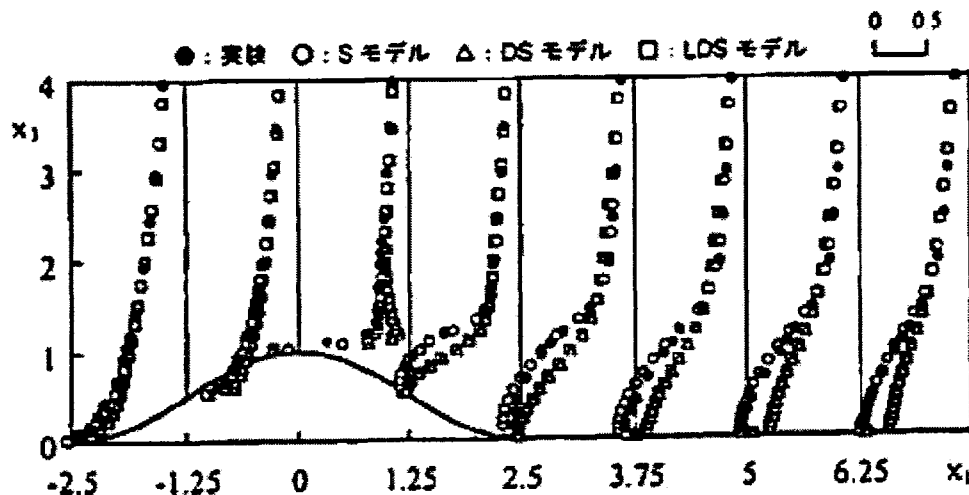


図 3.6.1 飯塚ら³⁾による 2 次元丘周り形状の平均速度分布

(S モデル : Smagorinsky モデル($C_s=0.2$)、DS モデル : Dynamic モデル)

[飯塚ら³⁾、第 18 回生研 NST シンポジウム講演論文集、pp43 より抜粋]

一方、小林らの円形衝突噴流の解析では、Dynamic モデルと微分式型壁面モデルの組み合わせが Smagorinsky モデルよりも GS 乱流強度の誤差が小さくなることを指摘している。しかし Smagorinsky モデルを適用したケースでも平均速度分布は試験値とよく一致している。

Hassan and Barsamian の 3 次元キャビティと円柱後流の流れ解析でも Smagorinsky モデルと Dynamic モデルの両方を用いており、レイノルズ応力は Dynamic モデルの方が実験値に近い分布を示しているが、平均速度分布は小林らと同様 SGS モデルによる予測精度の差はほとんどない。

Temmerman らはさらにいくつかの SGS モデルも検討対象に加えて、2 次元丘周りの剥離流れの剥離点と再付着点の予測を行ったところ、Smagorinsky モデルと Wall-adapted Local eddy viscosity モデル

$$v_{SGS} = C_w \bar{\Delta}^2 \frac{(S_{ij}^d S_{ij}^d)^{3/2}}{(S_{ij}^d S_{ij}^d)^{5/2} + (S_{ij}^d S_{ij}^d)^{5/4}} \quad (3.6.1)$$

$$S_{ij}^d = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_k} \frac{\partial \bar{u}_k}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_k} \frac{\partial \bar{u}_k}{\partial x_i} \right) - \frac{1}{3} \delta_{ij} \left/ \left(\frac{\partial \bar{u}_k}{\partial x_k} \frac{\partial \bar{u}_k}{\partial x_k} \right) \right., \quad C_w=0.1 \quad (3.6.2)^{**}$$

※Temmerman らの文献では、式 (3.6.2) の右辺第 3 項目を割り算としているが、表記ミ

スと思われ、正確にはかけ算となるべきである。

および Mixed Scale モデル

$$\nu_{SGS} = C_M \left(\sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \right)^\alpha q^{1-\alpha} \bar{\Delta}^{1+\alpha} \quad (3.6.3)$$

$$q = 0.5 \left(\bar{u}_i - \hat{\bar{u}}_i \right) \left(\bar{u}_i - \hat{\bar{u}}_i \right), \quad C_M=0.1, \quad \alpha=0.5 \quad (3.6.4)$$

が reference とした細格子の LES 解析結果に近い値を示したとしている。ただし SGS モデルによる影響よりも、使用する壁面モデルの影響の方が大きいとしている。

以上のことから、複雑流路の LES 解析において SGS モデルとして Smagorinsky モデルを用いても、適切な壁面モデルを導入することにより壁近傍の流れの予測はある程度の精度で行うことができると思われる。ただし、自由せん断流の特性予測や 2 次の乱流統計量の予測においては Dynamic モデルの方が適しているため、必要であれば Dynamic モデルを用いることが望ましい。Dynamic モデルを適用する場合はテストフィルタ処理において問題が生じないように、壁近傍の格子幅やアスペクト比など、格子の生成方法に十分注意することが必要である。

3.8 MILES (陰的 SGS モデル) の概要

MILES は従来の渦粘性係数やスケール相似則を用いる SGS モデルと異なり、陰的 LES と呼ばれる手法の一つである。これは、ある特定の条件を満たす離散化スキームで Navier-Stokes 方程式を離散化する手法であり、従来の LES のようにフィルター操作や SGS のモデル化を必要としないことが大きな特徴と考えられる。

Fureby and Grinstein⁹⁾は減衰等方乱流、自由せん断流、平行平板乱流に MILES を適用し、実験値、DNS、LES (Smagorinsky および Dynamic モデルを使用)、DSM (応力方程式モデル) との比較を行っている。MILES の離散化スキームでは、Navier-Stokes 方程式において運動量 (ないしはエネルギー) の対流項を 1 次もしくは 3 次補間 (すなわち、2 次か 4 次精度の中心差分) として与える高次のフラックス v_f^H と、風上差分に類似する低次のフラックス v_f^L をリミッター関数 Γ で

$$v_f = v_f^H - (1 - \Gamma)(v_f^H - v_f^L) \quad (3.7.1)$$

と表現する。制限関数は上式の高次、低次のフラックスが時間進行において解の振動を生じないように定式化されたものである (具体的なリミッターの式については原論文に記述されていない)。対流項をこのような方法で離散化すると、陰的 SGS 応力項は一般的な渦粘性項と Bardina らのスケール相似則に基づくモデルの類似項の和として表すことができる。

Fureby and Grinstein の報告における平衡平板乱流の壁面近傍の解析結果では、MILES は通常の LES と同様に平均速度分布では DNS 結果に一致し、対数則に合致する分布を示したと報告されているが、摩擦レイノルズ数が 2030 となるケースで乱流のストリーク構造 (壁面近傍で低速部と高速部の縞模様ができる現象) を十分に再現することができなかったため、今後高レイノルズ数への解析の高精度化が望まれるとしている。また、MILES において適切な陰的 SGS モデルを与えるような離散化スキームの確立や、それに対応するリミッター関数の定式化なども今後の課題であり、以上の点から複雑体系への適用という意味ではまだ時間がかかるのではないかと考えられる。

4. まとめ

2001～2004年に発行された文献を中心に、LESにおける壁面の取扱い、および複雑流路への適用事例について研究動向の調査を行った。調査結果のまとめを以下に述べる。

- ・ 調査の結果、壁面の取扱い方としては①通常の No-slip 条件、②代数式型壁面モデル（壁関数）、③微分式型壁面モデル、④ハイブリッド法、⑤IB 法、の大きく 5 つの手法にわけられることがわかった。
- ・ 通常の No-slip 条件は計算負荷が最も大きくなるが、各種流体機器の複雑な体系においては近年の研究でも頻繁に用いられている。その際、壁面第一格子点の位置は y^+ で 1 以下～10 程度までが一般的である。
- ・ 代数式型壁面モデルでは、従来考慮されていなかった壁面に垂直な速度成分の効果や、剥離領域に適合するモデルの開発といった新たなモデルの提案と、従来のモデルはそのまま使用し、壁面せん断応力の求め方を工夫する研究の二つにウエイトが置かれている。
- ・ 微分式型壁面モデルでは、壁面近傍の内層において境界層近似された Navier-Stokes 方程式を解く際に、より高精度に壁面せん断応力を求めるためのモデル係数の修正が提案されている。また内層と外層の接合部において渦粘性係数が合うような工夫や、将来的に複雑体系へ適用する場合には内層をより高次の方程式モデルで解く必要があると考えられる。
- ・ ハイブリッド法では、微分式型壁面モデルと同様、LES と RANS の界面において速度分布や渦粘性係数の不連続性を解消するための方法に研究の焦点が集まっている。具体的には界面付近の格子点で対流項の離散化スキームの工夫や、渦粘性係数を合わせるためにモデル係数をスムージングするなどの方法がみられた。界面の取扱い方に標準的な手法が確立されれば複雑体系への適用例が増える可能性は高い。
- ・ 移動境界を含む複雑体系には IB 法の適用が期待されている。IB 法では物体境界付近で圧力ポアソン方程式の収束性が悪くなることから、解法の工夫や数値的な圧力修正項を加えるなどの手法が検討されている。
- ・ SGS モデルが壁面近傍の流れに及ぼす影響は壁面モデルの影響に比べると少ない。また MILES などの陰的 LES は、数値スキームなどの基礎研究の段階であり、複雑体系への適用にはまだ時間がかかるものと考えられる。

なお、今回調査した文献で以前は代数的な壁面モデルを研究していた研究者がハイブリッド法の検討を行っている例が散見（Temmerman^{16,22)} や Piomelli¹⁵⁾）されており、今後壁面近傍の高速化の手法としてハイブリッド法の適用が活発になっていく傾向にあると考える。

This is a blank page.

付 録

Appendix A 調査文献リスト

Appendix B 調査文献要旨集

Appendix A 調査文献リスト

調査した文献 23 件の文献番号および出典を以下に示す。

1. 池野 勉、梶島岳夫、保存型境界埋め込み法 (Conseervative immersed boundary method)、第 17 回数値流体力学シンポジウム (講演番号 A5-4)、2003.12
2. 鹿野 一郎、DES による内部流の計算、第 17 回数値流体力学シンポジウム (講演番号 A9-3)、2003.12
3. 飯塚 悟、近藤裕昭、各種渦粘性型 SGS モデルによる複雑地上流れの LES、第 18 回生研 NST シンポジウム講演論文集、pp41-47、2003
4. 小林克年、谷口伸行、小林敏雄、壁面モデルを適用した L E S による円形衝突噴流の熱流動解析、生産研究、Vol.54、No.1,2、pp50-54、2002
5. 半場 藤弘、チャネル乱流における RANS と LES のハイブリッド計算、生産研究、Vol.1、No.55、pp17-21、2003
6. 小林克年、谷口伸行、小林敏雄、レイノルズ平均乱流モデルに基づく壁面境界条件の LES への適用、日本機械学会論文集 B 編、Vol.66、No.651、pp2780-2788、2000
7. Y. A. Hassan, H. R. Barsamian, New-wall modeling for complex flows using the large eddy simulation technique in curvilinear coordinates, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.44, pp4009-4026, 2001
8. Y. A. Hassan, H. R. Barsamian, Tube bundle flows with the large eddy simulation technique in curvilinear coordinates, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.47, pp3057-3071, 2004
9. Christer Fureby and Fernando F. Grinstein, Large Eddy Simulation of High-Reynolds-Number Free and Wall-Bounded Flows, Journal of Computational Physics, Vol.181, pp68-97, 2002
10. Jie Cui, Virendra C. Patel, and Ching-Long Lin, Prediction of Turbulent Flow Over Rough Surfaces Using a Force Field in Large Eddy Simulation, Trans. ASME J. Fluids Engineering, Vol.125, pp2-9, 2003
11. Fujihito Hamba, An Attempt to Combine Large Eddy Simulation with the $k-\epsilon$ Model in a Channel-Flow Calculation, Theoretical Computational Fluid Dynamics, Vol.14, pp323-336, 2001
12. Luca falcomer and Vincenzo Armenio, Large-eddy simulation of secondary flow over longitudinally ridged walls, Journal of Turbulence, Vol.3, 008, 2002
13. Meng Wang, Parviz Moin, Dynamic Wall Modeling for Large-Eddy Simulation of Complex Turbulent Flows, Phys. Fluids, Vol. 14, No.7, pp2043-2051, 2002
14. F. Nicoud, J. S. Baggett, P. Moin, and W. Cabot, Large eddy simulation wall-modeling based on suboptimal control theory, Phys. Fluids, Vol.13, No.10, pp2968-2984, 2001
15. U.Piomelli, E.Balaras, H.Pasinato, K.D.Squires and P.R.Spalar, The inner-outer layer interface in large-eddy simulations with wall-layer models, International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol.24, pp538-550, 2003
16. Lionel Temmerman, Michael A. Leschziner, Christopher P. Mellen, Jochen Frohlich, Investigation of wall-function approximations and subgrid-scale models in large eddy simulation of separated flow in a

- channel with streamwise periodic constrictions, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol.24, pp157-180, 2003
17. Parviz Moin, Advances in large eddy simulation methodology for complex flows, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol.23, pp710-720, 2002
 18. D.G.E. Grigoriadis, J.G. Bartzis and A. Goulas, LES of the flow past a rectangular cylinder using the immersed boundary concept, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol.41, pp615-632, 2003
 19. C.W. Li and L.L. Wang, An immersed boundary finite difference method for LES of flow around bluff shapes, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol.46, pp85-107, 2004
 20. L. Davidson and S. H. Peng, Hybrid LES-RANS modeling : a one-equation SGS model combined with a $k-\omega$ model for predicting recirculating flows, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol. 43, pp1003-1018, 2003
 21. Y. Liu, P.G. Tucker, A. Jouvray, P.W. Carpenter, Computation of a Non-Isothermal Complex Geometry Flow using Non-Linear URANS and Zonal LES Modeling, *Proceedings of 3rd International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena*, pp87-99, 2003
 22. Lionel Temmerman, Michael A. Leschziner, Kemo Hanjalic, A Combined RANS-LES Strategy with Arbitrary Interface Location for Near-wall flows, *Proceedings of 3rd International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena*, pp. 929-934, 2003
 23. Y.-H. Tseng and J.H. Ferziger, LES OF 3-D TURBULENT WAVY BOUNDARY FLOW: VALIDATION OF A GHOST-CELL IMMERSED BOUNDARY METHOD, *3rd International symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena* pp935-1244, 2003

Appendix B 調査文献要旨集

調査した文献 23 件の要旨を以下にまとめた。

資料 No.	1	分類	IB 法	チャンネル	
文献名	保存型境界埋め込み法 (Conseervative immersed boundary method)				
出典	著者	池野 勉 (原燃工)、梶島岳夫 (阪大院)			
	誌名	第 17 回数値流体力学シンポジウム (講演番号 A5-4)			
	Vol.	No.	Page :	～	発行年 2003
	記事	immersed boundary method (単純格子による複雑流路流れ解析手法であり、セル内に浸漬された壁の流速境界条件を外力により強制する手法) を LES に適用			
5. 目的	immersed boundary method の従来研究では圧力ポアソン方程式に物体壁に関する境界条件を付加したものとし、ないものがあり統一されていないため、数学的に物体壁で正しい non-slip 条件を与える解法を検討し提案する。				
2. 実施内容	immersed boundary method ではデカルト座標系のような単純な直行構造格子を使い、複雑な物体壁は計算セルの内部に境界 (immersed boundary) として設定する。したがって計算上の実質的境界は物体内部に設定される。この計算境界の流速境界条件値は物体境界に隣接する流体格子点流速と物体境界流速 (non-slip 条件の場合は零値) から外挿式により設定されるが、計算上はディリクレ条件を与えるのではなく、この計算境界で設定された流速境界条件値になるように外部体積力を与える。この論文の要点は定式化において時間に関して 2 段階解法を採用した定式化の場合に圧力ポアソン方程式の解法ステップで使用する中間流速段階では物体壁で non-slip 条件は満足されているが流速を update し各時間ステップでの流速解を求めた段階では厳密に non-slip 条件が成立していないとし、各ステップの計算式を以下のように補正した式を提案している。				
3. 結果	従来手法 : $\partial^2 P^{n+1} / \partial x_j^2 = 1 / \Delta t \partial u_i^F / \partial x_i$ $u_i^{n+1} = u_i^F - \Delta t \partial P^{n+1} / \partial x_i$ 提案手法 : $\partial^2 P^{n+1} / \partial x_j^2 - \partial \{ \delta_i (1 - \phi_i) \partial P^{n+1} / \partial x_j \} / \partial x_j = 1 / \Delta t \partial u_i^F / \partial x_i$ $u_i^{n+1} = u_i^F - \Delta t (1 - \delta_i) \partial P^{n+1} / \partial x_i - \Delta t \cdot \delta_i \cdot \phi_i (\partial P^{n+1} / \partial x_i)$ [δ_i : immersed cell で 1、その他 cell で 0、 ϕ_i : 流速外挿式]				
	LES は SGS モデル定数を 0.10 とした標準的なスマゴリンスキーモデルと Van Driest 減衰モデル使用。時間積分は対流項と SGS をアダムスバッシュフォース法、粘性項のみクランクニコルソン法、ポアソン方程式解法は SOR を使用。				
	差圧境界条件による平行平板乱流流れ解析では境界適合格子による LES 計算とも比較した結果、流量を大きく予測している (壁最小メッシュサイズは $y^+=5$)。速度変動成分分布はほぼ同程度。物体壁での non-slip 条件は格子分割数によっては若干満足しないケースもあるが深い議論は難しいとしている。				
4. 結論	「提案した保存型数値解法は non-slip 条件および連続条件を高精度で満足し、良好な平均流れ場の計算結果を得た」としているが、まだ検討が不十分という印象である。				
5. その他	「immersed boundary method」引用文献 : Mohd-Yusof, J., Combined immersed boundary/B-splines methods for simulations of flows in complex geometries, CTR Annual research briefs, NASA Ames/Stanford university, (1997) 関連文献 : 池野 勉、野村耕平、梶島岳夫、管群流れにおける旋回と剥離の効果、第 18 回数値流体力学シンポジウム (講演番号 A1-1), 2004 (概要 : immersed boundary method による混合羽根付き燃料スパーサグリッド部の LES 解析結果)				

資料 No.	2	分 類	DES	チャンネル、バックステップ、180°ベンド
文献名	DES による内部流の計算			
出典	著者	鹿野 一郎		
	誌名	第 17 回数値流体力学シンポジウム		
	Vol.	No.	Page:	A9-3 ~ 発行年 2003.12
	記事			
1. 目的	これまで外部流の 3 次元非定常剥離流れの計算に適用されてきた DES (Detached-Eddy Simulation) を内部流に適用し、その精度を確認する。			
2. 実施内容	DES で用いられる RANS と LES の長さスケールの切り替えは壁面からの距離で行っており、LES の長さスケールのパラメータには Piomelli らのものを参照している。解析はチャンネル乱流、バックステップ流れ、180°ベンド内流れについて行い、チャンネル乱流では DNS (Moser et al.)、LES(Smagorinsky モデル)、DES で、バックステップ流れでは Kasagi らの実験と、180°ベンド内流れでは Suzuki らの実験と比較している。			
3. 結果	・チャンネル乱流 DNS に比べると平均速度分布を過大に見積もっているが、LES と DES は同様の結果を示すとしており、モデルの影響ではなくメッシュの影響であるとしている。また、座標系 (直交、一般) で影響がないことも示している。 ・バックステップ流れ 速度分布は概ね実験と一致するが、再付着位置が実験よりもより下流に見積もっており、上流部での速度分布に関しては中心部で DNS に比べて過大に見積もっている。 ・180°ベンド内流れ $\theta = 90^\circ$ の速度分布を実験と比較している。定性的には比較的よく一致しているが、壁面からの速度増加位置が実験よりも小さい傾向を示している。			
4. 結論	これまで外部流に適用されてきた DES を内部流に適用し、定量的には異なる部分もあるが定性的には実験をよく再現し、その有効性を確認した。			
5. その他				

資料 No.	3	分 類	対数則	2 次元丘周り	
文献名	各種渦粘性型 SGS モデルによる複雑地上流れの LES				
出典	著者	飯塚 悟、近藤裕昭（産業技術総合研究所）			
	誌名	第 18 回生研 NST シンポジウム講演論文集			
	Vol.	No.	Page :	41 ~ 47	発行年 2003
	記事				
1. 目的	ある程度粗い計算格子でも高精度の予測が可能な SGS モデルを検討すること。				
2. 実施内容	・ 体系は余弦の 2 乗断面をもつ山岳地形モデル（山の高さ基準の $Re=1.57 \times 10^4$） ・ 使用した 7 つの SGS モデルは全て渦粘性型で、(1)標準 Smagorinsky モデル(S)、(2)Dynamic モデル(DS)、(3)Lagrangian Dynamic モデル(LDS)、(4)ハイブリッド（地表面第 1～3 格子点まで S、以降は DS）モデル、(5)稲垣モデル、(6)修正稲垣モデル、(7)坪倉モデル。ただし坪倉モデルの計算結果は未完了。 ・ 地表面境界は粗度長型対数則（表 4 の第 5 式）を適用（壁面近傍の格子間隔については記述なし）。				
3. 結果	・ 主流方向速度の鉛直分布は、S が実験結果とよく一致した。DS および LDS は山岳後流側の剥離領域を過小評価した。 ・ この原因は、DS および LDS のグリッドフィルタとテストフィルタでモデル係数を同一とする仮定（scale-dependence の仮定）や、地表面から鉛直方向へのフィルタ操作上での問題により地表面付近のモデル係数 C が過小評価されているためと考えられる。 ・ ハイブリッドモデルでは、地表面近傍は S の効果により後流の循環流領域が正しく再現され、循環流と剥離流の境界部分は DS により予測精度が向上している。ただしこの手法は ad hoc の意味合いが大きい。 ・ S の壁面減衰関数を必要としない稲垣モデルは山岳後流の循環流の予測精度が悪い。そこで、稲垣モデルにおける渦粘性係数に用いられる速度スケール項を修正 Leonard 項に適用したものを計算すると、実験とよい一致を示した。				
4. 結論	実験との比較検証の結果、Smagorinsky モデルと Smagorinsky/Dynamic ハイブリッドモデル、および修正した稲垣モデルがよい一致を示した。				
5. その他	・ 稲垣モデルとは、渦粘性を（速度スケール）²×（時間スケール）によって表現する静的モデルであり、標準 Smagorinsky モデルに比べ壁面での減衰を考慮する必要がないことが特徴である。坪倉モデルは稲垣モデルの Dynamic 型に相当する。 参考文献：稲垣モデル→日本機械学会論文集 B、No68-673、pp.2572、2002 坪倉モデル→Phys. Fluid 13(2)、pp. 500、2001				

資料 No.	4	分類	代数・微分式型 モデル	円形衝突噴流																				
文献名	壁面モデルを適用したLESによる円形衝突噴流の熱流動解析																							
出典	著者	小林克年、谷口伸行、小林敏雄																						
	誌名	生産研究																						
	Vol.	54	No.	1・2	Page: 50 ~ 54 発行年 2002																			
	記事																							
1. 目的	低計算負荷で高精度の数値予測を行うために、壁面モデルを適用したLES乱流数値解析手法の構築を行う。																							
2. 実施内容	代数式型壁面モデル(AWM)および境界層方程式を用いる微分式型壁面モデル(DEWM)を壁面境界条件に適用したLESにより熱伝達数値解析を実施し、温度の壁面境界条件に対応した壁面温度モデルを提案しその検証を行っている。 - 速度場のSGS渦拡散係数 : スマコリンスキーモデル($C_s=0.10, 0.16$) ／ダイミクモデル - 温度場のSGS渦拡散係数 : ダイミクモデル - 解析対象 : 円形衝突噴流、レイノルズ数 23000(円形ノズル内の平均流速とノズル直径) - 計算格子 : LES ($70 \times 90 \times 120$)、境界層方程式($20 \times 90 \times 120$)																							
3. 結果	<table border="1"> <thead> <tr> <th>壁面モデル</th> <th>SGSモデル</th> <th>平均流速</th> <th>GS乱流強度</th> <th>局所Nu数</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="2">DEWM</td> <td>スマコリンスキー</td> <td>○</td> <td>過大</td> <td>過大</td> </tr> <tr> <td>ダイミク</td> <td>○</td> <td>スマコリンスキーモデルより30%改善</td> <td>過大</td> </tr> <tr> <td>AWM</td> <td>ダイミク</td> <td>○</td> <td>過大</td> <td>よどみ領域で不適切</td> </tr> </tbody> </table> 課題：2次の乱流統計量の予測精度を改善するために格子解像度を上げる必要がある。					壁面モデル	SGSモデル	平均流速	GS乱流強度	局所Nu数	DEWM	スマコリンスキー	○	過大	過大	ダイミク	○	スマコリンスキーモデルより30%改善	過大	AWM	ダイミク	○	過大	よどみ領域で不適切
壁面モデル	SGSモデル	平均流速	GS乱流強度	局所Nu数																				
DEWM	スマコリンスキー	○	過大	過大																				
	ダイミク	○	スマコリンスキーモデルより30%改善	過大																				
AWM	ダイミク	○	過大	よどみ領域で不適切																				
4. 結論	円形衝突噴流における乱流熱伝達の数値予測には、SGSモデルにはダイミク、壁面モデルには微分式型壁面モデル(DEWM)を適用する。																							
5. その他	DEWM引用文献： W.CABOT, Flow, Turb. And Comb., 63, (1991), 269-291.																							

資料 No.	5	分 類	LES/RANS	チャンネル	
文献名	チャンネル乱流における RANS と LES のハイブリッド計算				
出典	著者	半場 藤弘			
	誌名	生産研究 2003			
	Vol.	1	No.	55	Page: 17 ~ 21 発行年 2003
	記事				
1. 目的	これまでに LES の計算負荷低減のために壁面近傍で RANS モデルを用いて LES と接続する方法が提案されてきているが、チャンネル乱流への適用結果を見ると2つのモデルの接続部において平均速度分布に段差が生じるという共通の欠点が見られる。本論文ではその段差の原因を考察した上でそれを改善する接続方法を提案し、シミュレーションにより有効性を検証する。				
2. 実施内容	1) チャンネル乱流計算による平均速度分布の段差の原因検討と新しい接続法の提案 ・流動条件 : $Re_{\tau}=590$ ・計算体系 : $L_x \times L_y \times L_z = 2\pi \times 2\pi \times \pi$ $N_x \times N_y \times N_z = 64 \times 64 \times 64$ ・乱流モデル : 混合長 RANS モデル* + Smagorinsky LES モデル ・数値計算スキーム: スタッガード格子 + 2次精度中心差分 壁面近傍では RANS を使い、中心では LES を用いたモデルでチャンネル乱流を実施し、レイノルズ応力のグリッドスケール (GS) 成分、サブグリッド (SGS) 成分、分子粘性成分の分布により段差の原因を検討し、その改善方法を提案する。				
3. 結果	2) 新しい接続方法の有効性の検証 ・乱流モデル: Van Driest 型減衰関数適用の k - ϵ モデル+ 1 方程式 LES モデル**				
	●平均速度分布の段差の原因 ・乱流モデル接続境界幅近傍の LES 領域側で平均速度分布に段差 (既研究結果の再現) ・平均渦粘性率は RANS 領域で大きく接続界面で不連続的に急減する。 ・LES 領域界面近傍では揺らぎの小さい RANS 領域の影響を受けてレイノルズ応力の GS 成分が過小評価されそれを補うために速度勾配が過大になっていると考えられる。				
	●新しい接続方法 ・フィルター幅が異なる境界面での速度の不整合をなくするために接続面で2種類の速度を定義して各領域の計算に別々の速度を用いる。この手法により段差は改善された。 ・界面1格子点のみではなく y 方向に緩衝層をとりフィルター幅を徐々に切り替えることにより段差は更に改善された。				
4. 結論	●新しい接続方法の有効性の検証 ・一般の散逸率を2つのモデルの散逸率の線形内挿 ($\epsilon = \alpha \epsilon_R + (1 - \alpha) \epsilon_L$) で定義し、緩衝層内で徐々に変化させることによって平均速度分布の段差は解消された。				
	壁面近傍で RANS モデルを用いて LES と結合する際の接続界面前後での格子幅の相違による速度の不整合を改善する方法を提案し検証計算により有効性を確認した。				
5. その他	*: 本論文では Smagorinsky モデルのフィルター幅を格子幅 h から Moser et. al.による DNS データを統計処理して求めた積分長さ l に変えたモデルを混合長 RANS モデルと呼んでいる。 R. D. Moser, J. Kim and N. N. Mansour : Phys. Fluids 11 (1999) 943 **: エネルギー k の輸送方程式を用い、散逸率 ϵ_L は代数的に求めるモデル				

資料 No.	6	分 類	微分式型 モデル	逆圧勾配流れ	
文献名	レイノルズ平均乱流モデルに基づく壁面境界条件の LES への適用				
出典	著者	小林克年、谷口伸行、小林敏雄			
	誌名	日本機械学会論文集 B 編			
	Vol.	66	No.	651	Page: 2780 ~ 2787 発行年 2000
	記事				
1. 目的	壁面近傍の計算負荷低減のため、No-slip 条件を細かい格子と共に用いる代わりに、壁法則や境界層方程式により壁面剪断応力を求める方法が提案されている。本報ではこれらをチャンネル流 LES 計算に適用して有用性を検証する。また、逆圧勾配下での境界層の解析にも適用し、境界層方程式には圧力勾配項が含まれている効果を検証する。				
2. 実施内容	Van-Driest 型減衰関数を適用した Smagorinsky モデルにより以下 3 種の検討を行う。 ・ No-slip ・ 壁法則（以下 WM1）は Spalding 則（参考文献(8)）を用いる。 ・ 境界層方程式（以下 WM2）：壁面から第一格子点までの領域を RANS 領域として、この領域を解く。この範囲をさらに 4 2 分割した格子を用いて解く。境界層方程式の中の渦粘性係数は Johnson-King の非平衡モデルを平衡型にしたゼロ方程式モデルを適用。				
3. 結果	●細格子モデル 32x32x32(grid1)を用いた場合： ・ <u>対数領域の主流方向平均速度</u>： No-slip では過大評価、WM1、WM2 では改善。 ・ <u>壁付近の Reynolds 剪断応力分布</u>： RANS-LES の接合部付近で J-K モデルにより評価される値が過大評価され、LES と連続的な分布になっていない。連続的になるように J-K モデル定数を動的に修正する方法（Cabot、参考文献(3)）の適用が必要。 ・ <u>2 次乱流統計量（GS 乱流強度）</u>： ➢ No-slip では主流方向を過大評価し、壁垂直方向、スパン方向を過小評価する。 ➢ WM1, WM2 では主流方向は No-slip での過大評価は改善するが、他 2 方向は改善せず。これは壁近傍のストリーク（縦渦）が乱れを生成する現象がモデル化されていないために主流方向しか精度が出ない。 ●粗格子 32x16x32(grid2)を用いた場合： WM2 では J-K モデルにより評価される RANS 領域のレイノルズ剪断応力が LES との接合部付近で過小評価され、対数領域の主流速度を過小評価する。 ●逆圧勾配平板境界層： ・ 摩擦速度は、WM1 の過小評価が WM2 では改善。 しかし WM2 も壁面剪断応力の試験値との比較では全領域にわたって過小評価。これは本研究で適用した入口・出口境界条件が不適切であったためと考えられ、現時点では WM2 が逆圧勾配下での精度が良いモデルと断定できない。今後の課題として、Spalart ら（参考文献(14)）が提案している流入出境界条件を適用して検証する必要がある。				
4. 結論					
5. その他					

資料 No.	7	分 類	代数式型 モデル	3 次元 キャビティ 円柱後流	
文献名	New-wall modeling for complex flows using the large eddy simulation technique in curvilinear coordinates				
出典	著者	Y. A. Hassan, H. R. Barsamian			
	誌名	International Journal of Heat and Mass Transfer			
	Vol.	44	No.	Page :	4009 ~ 4026 発行年 2001
	記事				
1. 目的	複雑流れの LES 解析に適用できる新たな壁面モデルを開発すること。				
2. 実施内容	- SGS モデルは標準 Smagorinsky と Dynamic モデル。ただし Dynamic モデルは計算安定化のため、モデル定数 C に再帰的(low-pass)フィルタ(8)式をかけて補正し、渦粘性に上限、下限を設けている。 - 壁面モデルは、Shumann model (15)式、Shifted Model (18)式、および Werner-Wengle(WW)の 1/7 乗則モデル(24),(25)式をもとに、対象壁面の鉛直方向にある格子点の速度分布だけでなく、その流れ方向にある格子点の速度分布も考慮したモデル(26),(27)式を使用。 - 空間離散化は 2 次中心差分、時間離散化は Crank-Nicolson を使用。 - 体系は 3 次元キャビティ (大きさ基準 $Re=10000$、$32 \times 32 \times 32$ 格子、) と円柱周りの流れ (円柱径基準 $Re=21700$、$95 \times 38 \times 32$ 格子) に適用し、実験値との比較を行った。				
3. 結果	3 次元キャビティの計算では、WW モデルを用いたケースが最も実験に近い速度分布を示したが、速度変動強度とレイノルズ応力分布は実験と隔たりがある。 (注 : Fig.3~5 を参照。実験との差の大きさについては定量的記述はなし) - 速度分布と変動強度では SGS モデルの違いによる差はなかったが、レイノルズ応力に関しては Dynamic モデルの方が実験値をよく再現した(Fig.6~8)。 - 円柱後流の計算では、後流に生成するカルマン渦の構造などを実験に対し定性的に再現することができた (Fig.15~17)。このとき、SGS モデルによる予測精度の差はほとんどないと考えられる。 - 円柱後流部の流路中心線上の点($x/D=0.65$)における流れ方向、スパン方向の流速 PSD を求めたところ、カルマン渦に対応する周波数のピークが見られた。				
4. 結論	Werner-Wengle(WW)の 1/7 乗則モデルに基づく壁面モデルに、流れ方向の格子の流速分布の効果を取り入れた新たな壁面モデルを開発し、3 次元キャビティおよび円柱後流への適用による検証を行った結果、実験値とよい一致をみた。今後、さらに複雑な流路体系への適用が期待できる。				
5. その他	文献 : - Shumann wall model の文献→J. Comput. Phys., 18, pp. 376-404 (1975) - Shifted wall model の文献→Phys. Fluids, A 1 (6) ,pp. 1061-1068 (1989) - Werner and Wengle wall model の文献→8th Symp. on Turbulent Shear Flows, pp. 155-168(1991)				

資料 No.	8	分 類	代数式型 モデル	3 次元チューブ バンドル	
文献名	Tube bundle flows with the large eddy simulation technique in curvilinear coordinates				
出典	著者	Y. A. Hassan, H. R. Barsamian			
	誌名	International Journal of Heat and Mass Transfer			
	Vol.	47	No.	Page :	3057 ~ 3071 発行年 2004
	記事				
1. 目的	3 次元チューブバンドルの流れ解析において、LES の有効性を検証すること。				
2. 実施 内容	- SGS モデルは Dynamic モデルのモデル定数 C に再帰的(low-pass)フィルタをかけて補正し、さらに渦粘性に上限値、下限値を設けている。 - 空間離散化は 2 次中心差分、時間離散化は Crank-Nicolson 法で、時間刻みは $5 \times 10^{-5} \text{sec}$ とした。 - 体系は 10 本の管束からなるチューブバンドルで、管中心間の距離は管径の 2.07 倍とした。流れの $Re=21700$ (管径、流入速基準) とした。本体系の特徴は管束の配置が軸対称でないことにある。格子数は $236 \times 122 \times 37$ である。 - 管束の上流側には 4D (D : 管径)、下流側には 5D の助走区間を設定し、流入境界条件として 5% の乱流強度を設定した。 - 壁境界は Werner-Wengle モデルの改良版を使用した (文献(27))				
3. 結果	- 管束付近では、深さ方向の管表面でも強い渦度が分布していることがわかった。 - 管束の間隙における管に平行な断面の流速分布およびせん断力を実験値と比較したところ、ほぼ一致する傾向が得られた。 - 上記のせん断力分布の比較において、各チューブの後流域で発生する渦の摂動(a flapping phenomenon)を定性的に再現することができたと考えられる。 - 管の wake 部分における地点での Dynamic モデルのモデル係数は、そのままの値だと激しく振動するが、low-pass フィルタの処理を行った後は Smagorinsky 定数の 0.1~0.15 に相当する値とほとんど差がなかった (Fig.19)。 - 管束の間隙における流速の PSD 分布を調べたところ、単管周りの解析の時 (文献(26)) のような強い周波数のピークはみられなかった。 - 乱流量の減衰特性を調べるため、管束の各地点における流速の瞬時値の自己相関関数をとったところ、遅れ時間は助走部分の地点の流速の方が管束部分よりも短くなった。これは、管束の wake 部分での乱流強度が強くなっていることを示している。				
4. 結論	3 次元チューブバンドル周りの流れ解析に改良 Werner-Wengle 壁面モデルを用いた LES 解析を行い、妥当な結果を得た。今後、これらの複雑流路における不安定振動の予測解析などにおいて LES 解析の活用が期待される。				
5. その他	参考文献(27)→Int. J. Heat. Mass. Trans, 44, pp. 4009-4026(2001)				

資料 No.	9 (1/2)		分 類	MILES	チャンネル	
文献名	Large Eddy Simulation of High-Reynolds-Number Free and Wall-Bounded Flows					
出典	著者	Christer Fureby and Fernando F. Grinstein				
	誌名	Journal of Computational Physics				
	Vol.	181	No.	Page :	68 ~ 97	発行年 2002
	記事					
1. 目的	従来型の LES の欠点を改良する目的で開発された MILES[1,2]の概念を紹介するとともに、等方性乱流の減衰(Decaying Isotropic Turbulence)、自由ジェットの遷移(Transitional Free Jets)、平板間の十分発達した乱流(Fully Developed Turbulent Channel Flow)の 3 つの事象について実験、直接シミュレーション、従来 LES、および MILES で比較検討またはメッシュサイズの影響を評価している。					
2. 実施内容	直接シミュレーション(DNS)では困難なさまざまなスケールの渦の追跡を目的に提唱された LES について、eddy-viscosity モデルの範疇に入る Smagorinsky model(SMG)[3]および SMG より派生した DSMG[4]、eddy-viscosity モデルとは異なる範疇の DSM[5]などがある事が紹介されている。 従来開発された LES に関わる SGS モデルの精度、定式化の困難さなどの点を解決するべく、MILES が開発された。MILES の特徴は、空間的に非均一な乱流場(inhomogeneous turbulent flow)の補足にある。 MILES の離散化手法は本論文では有限体積法およびフラックスリミットが用いられている。差分スキームは有限体積法である必要はない。陰解的 SGS モデルは、物理的には eddy-viscosity の一般形と Bardina 等のモデルの類似項の和となっている。さらに MILES に用いるフラックスリミットおよびスキームが満たすべき、全時間変化減少(total variation diminishing)などの条件について議論されている。 本論文では減衰する等方乱流(Decaying Isotropic Turbulence)、遷移自由乱流(Transitional Free Jet)、および平板間の十分発達した乱流(Fully Developed Turbulent Channel Flow)について、実験、DNS、従来 LES、および各種 MILES の評価結果について比較検討、また計算結果についてはメッシュ解像度の結果に対する影響評価についても紹介している。					
3. 結果	●減衰する等方乱流の概要 計算機評価は 32^3、64^3 のメッシュ解像度でおこなわれ、Comte-Bellot 等の実験[6]と比較され、すべての計算手法でよい予測結果を出し、またメッシュ解像度を上げると補足可能な波数領域が広がることなどがわかった。 ●遷移自由乱流の概要 矩形のジェット噴出し口のアスペクト比を変えた評価をおこなっている。エネルギーのソレノイド成分(E^s)のスペクトルについて粘性が効かない領域では $k^{-5/3}$ のラインに乗り、より高波数領域の散逸領域近くでは実験同様に $k^{-5/3}$ より速く減衰することが確認している。MILES を用いた評価結果の SGS のモデル依存を調べるために複数の MILES 手法について同一現象について評価をおこない、Jeong 等により提案された渦の中心部の判定パラメータ λ_2[7]、各々の速度変動のスペクトル等が報告されている。どの手法をとっても概ね結果に差異がないが、低波数領域で SGS モデルの差異・粘性の違いによる変動の低下が見られる。さらに DNS を用いた均一乱流場と MILES を用いた遷移乱流を確率分布関数を用いて議論している。 ●平板間の十分発達した乱流の概要 実験、DNS との比較の観点から摩擦速度より求めたレイノルズ数 $Re_\tau=395$、2030 について評価。メッシュは 90^3、60^3 を用いている。 壁面境界は no-slip。壁近傍で高解像度のメッシュ配置。最初のメッシュは y^+ は 1 から 10 の間。 離散化手法 : 時間に関しては 2 次精度の 3 点後退差分を用いている。クーラン数は 0.5。 [次頁に続く]					

資料 No.	9 (2/2)	分 類	MILES	チャネル
3.結果続き	従来手法との比較 : パルク速度 $Um=0.5 \int v_1 d(x_2/\delta)$, $Re_\tau=U_\tau \delta/\nu$ 条件で表面摩擦係数 $Cf=\tau/(0.5)\rho Um^2$ は DNS と実験結果と比較して手法によらず概ねよい一致を見た。SGS が陰解法かは結果に影響がなく DSM がメッシュサイズによらずもっともよい予測値を出している。$Re_\tau=395$ で LES の予測精度の指標の一つ mean streak spacing は LES、MILES の手法によらず DNS との差異は 20%以内である。$Re_\tau=2030$ では今回用いたメッシュでは mean streak spacing は観測できなかった。統計的な性質についてシミュレーションと実験[8]と比較してよい一致をみたため、$Re_\tau=2030$ で mean streak spacing が観測できなかったものの、global effects のレイノルズ依存性については観測できる事を示している。壁付近渦度や、速度勾配に関する第 2 不変量(the second invariant of the velocity gradient)を見る限り異なった SGS モデル間で結果の差異は見られない。 また壁から繰り返し放出される渦度の挙動は、DNS や実験の観測事実と一致する。この渦度放出メカニズムによる渦度の流入により境界層が乱れていると判断される。 主流方向と主流と直角をなし平板に平行な方向とで空間平均し、さらに時間平均した主流方向速度の壁に垂直な軸方向分布は各種 LES、MILES と DNS および実験とでよい一致を見た。 メッシュ解像度の影響は $Re_\tau=395$ ではほとんど無視できるが、$Re_\tau=2030$ では、60^3 メッシュでは LES、MILES の結果と DNS および実験との違いが顕著となるため、最低でも 90^3 程度の解像度は必要である。 SGS モデルの違いによる主流速度方向の平均値に対する影響は小さいが、DSM および MILES で予測精度の向上が見られる。 さらに壁近傍の主流方向の速度プロファイルが、壁近傍の分布として提唱されている対数曲線分布などを、メッシュ解像度やメッシュ配置によらず再現している事は注目に値する。 各方向速度の rms の壁に垂直方向分布は、$Re_\tau=395$ では手法によらずほとんど差異がないが、v_1^{rms} では $y^+>150$ で v_2^{rms}、v_3^{rms} ではチャネル全域で空間分解能の影響が出る。 $Re_\tau=2030$ では、$y^+<50$ で大きな違いが出る。$Re_\tau=2030$ の壁近傍のピーク値については SGS モデル依存、メッシュ解像度依存が見られる。$Re_\tau=2030$ でメッシュ解像度 60^3 では、SGS モデルの違いによる差異が顕著になる。特に MILES と DSM モデルでは、90^3 メッシュでは他のモデルと比較してばらつきが少ないが、粗いメッシュでは MILES のばらつきは相対的に最大級のものになる。ピークの位置は LES、MILES とともに DNS や実験値とよい一致を示している。 v_2^{rms} と v_3^{rms} に注目した場合、SMG や DSMG では、DNS、MILES、DSM と比較して平坦になることが確認でき、DSM や MILES は比等方分布を SMG や DSMG と比較して局所ピークを持つ分布の補足には適していると判断される。 壁近くの粘性が効く領域や隣接するバッファ領域では SGS モデルによる結果の違いが見られる。すべてのレイノルズ数で実験および DNS と最もよい一致を見せたのは DSM であり、以下 MILES、DSMG、SMG と続く。中央断面内の実効 SGS 渦粘性 ν^* の瞬時ピーク値は、SMG と MILES で一致し DSM ではファクター 2 だけ小さくなり、空間分布では 3 者で異なる。			
4 結論	今後の課題：壁付近の低速、高速の縞の解釈と壁から放出される渦度との関係の理解。 $Re_\tau=2030$ 付近で壁付近の流れの詳細を明らかにするべく SGS モデルの高精度化。 異なるタイプのフラックスリミターの壁近傍の流れに対する影響評価。 従来型の LES および MILES の概念について解説し、3つのケースについて実験、DNS および MILES の詳細な評価結果について比較検討がなされた。局所的にピーク値を持つようなプロファイルの補足などをはじめとして従来手法と比較して概ね MILES の優位である事が示されている。ただ壁付近の流れ、特に高レイノルズ数のケースで課題が残されている。また MILES で使用するスキームが満たすべき条件についても今後さらなる検討が必要である。			

資料 No.	9 (2/2)	分 類	MILES	チャネル
5. その他	参考文献 [1]J.P.Boris et al.,New insights into large eddy simulation,<i>Fluid Dyn.Res.</i>10,199(1992). [2] C.Fureby et al.,Monotonically integrated large eddy simulation of free shear flows,<i>AIAA J.</i>37,544(1999). [3]J.S.Smagorinsky, General circulation experiments with primitive equations,<i>Mon. Weather Rev.</i>94,99(1963). [4]M.Germano et al.,A dynamic subgrid scale eddy viscosity model,<i>Phys.Fluids A</i> 3,1760(1994). [5]J.W.Deardorff, The use of subgrid transport equations in a three-dimensional model of atmospherical turbulence, <i>J.Fluids Eng.Trans ASME</i> 95,429(1973). [6]G.Comte-Bellot et al.,Simple Eulerian time correlations of full and narrow band velocity signals in grid generated `isotropic` turbulence,<i>J.Fluid Mech.</i>46,273(1971) [7]J.Jeong et al.,On the identification of a vortex, <i>J.Fluid Mech.</i>285,69(1995). [8]R.B.Dean, Reynolds number dependence of skin friction and other bulk flow variables in two-dimensional rectangular duct flow, <i>Trans. ASME I J.Fluids Eng.</i> 100, 215(1978)			

資料 No.	10	分 類	IB 法	2 次元丘周り	
文献名	Prediction of Turbulent Flow Over Rough Surfaces Using a Force Field in Large Eddy Simulation				
出典	著者	Jie Cui, Virendra C. Patel, and Ching-Long Lin			
	誌名	Trans. ASME J. Fluids Engineering			
	Vol.	125	No.	Page : 2 ~ 9	発行年 2003
	記事				
1. 目的	ダイナミック LES において表面粗さを考慮するモデルの提案。				
2. 実施内容	- 表面粗さは『resolved-scale 粗さ』と『SGS 粗さ』に分解して扱う。粗さを地形にたとえると resolved-scale 粗さは山の外形、SGS 粗さはその上の樹木に相当する。 - sin 関数により流下方向にのみ大きく波打つ壁面を持つチャンネル流を対象とする。				
3. 結果	- 体積力としての resolved 粗さのモデリング (Verzicco ら(ref. 12)) : - 細かな Cartesian 格子により粗さの部分も含めた矩形格子とする。 - 粗さの固体の中となる格子点では、Navier-Stokes 方程式を変形した式にて $u^{n+1} = 0$ として求めた外力を課す。このモデルでは経験値を含まない。 - この解析結果を、実際に BFC により波打った壁面をそのまま格子モデルに反映して解析したケースと比較したところ、壁面の極めて近傍以外は流下方向の速度 profile は良好に一致。より細かい格子を用いるとより一致すると考える。 $y^+ - u^+$ のグラフにおいて、対数領域は滑面のときに比較して粗さのために下降するが、体積力モデルは BFC と良好に一致。 - 抵抗を"pressure resistance"と"frictional resistance"の 2 成分に分けて算出したところ、これも BFC の結果と良好に一致。 - ランダム力場(Random force field)としてモデル化した SGS 粗さ - Miyake ら(ref.11)の仮想円錐に類似したランダム粗さとしてモデル化。 C_d 値は明示的に与え、仮想的な円錐があるものとして抵抗力の式により陽的に算出してこれを考慮する。これは SGS 粗さのある全ての格子点に課す。 C_d 値は経験定数として扱われる。Miyake らは 0.5、本報での解析は 0.2。 - 計算の安定性は大きく低下し、時間刻みを非常に小さくする必要有り。 $y^+ - u^+$ の対数領域はわずかに下降。 - SGS 粗さはわずかな影響しか持たない。				
4. 結論					
5. その他	訳注 : SGS 粗さのモデル化に関しては、精度の検証はされていない。				

資料 No.	11	分 類	RANS/LES	チャネル	
文献名	An Attempt to Combine Large Eddy Simulation with the k-ε Model in a Channel-Flow Calculation				
出典	著者	Fujihiko Hamba			
	誌名	Theoretical Computational Fluid Dynamics			
	Vol.	14	No.	Page : 323 ~ 336	発行年 2001
	記事				
1. 目的	LES と RANS を組み合わせて用いるハイブリッド型の解析手法では2つのモデルの結合方法が課題である。本論文では、壁面近傍を LES、壁面から離れた領域で RANS を用いる解析モデル*を用いて、一部重なり合う2つの格子系を用いて共通領域内で両者の解をつなげる新しい接続方法を提案しチャンネル乱流へ適用して有効性を検証する。				
2. 実施内容	1) 乱流モデル ・壁面近傍 : 3次元の1方程式 LES モデル** ・壁面から離れた領域 : y 方向1次元の標準 k-εモデル 2) 新しい接続方法 ・壁面の法線方向 (y 方向) に2つの格子系を採用し、一部重なった共通領域を設けて各々の格子系で LES と RANS の計算を行い、結果を滑らかにつなげる。 ・格子サイズは双曲線関数 (tanh(y)) を用いて壁面から中心向かって増加させる。 ①LES 計算領域 (0<y<y4) の境界条件 ・ノースリップ条件(y=0) ; RANS よりレイノルズ応力と k を与える(y=y4) ②RANS 計算領域 (y1<y<Ly , Ly : チャンネル中心) の境界条件 ・スリップ条件 (y=Ly) ; LES より x-z 平面の平均値として ux,k,ε を与える(y=y1) ③共通領域 (y1<y<y4) での LES 計算ではこの領域内の2点間(y2,y3)でフィルター幅を格子幅から乱流の長さスケールまで線形内挿する。 3) チャンネル乱流計算による有効性の検証 ・流動条件 : Reτ= uτLy/ν=1900 , Rec= UcLy/ν=44500 (基本ケース) ・計算体系 : NLES=Nx x Ny x Nz= 64 x 34 x 64, NRANS=26 (基本ケース) ・数値計算スキーム : 2次精度中心差分, Adams-Bashforth 法時間積分 Re 数、x 方向と z 方向の格子サイズ、モデル切替の境界などを変えて計算を行い、対数則や、既存研究の DNS データ、実験データ、全体を LES で計算した結果と比較した。 ・LES の精度評価のために2点間速度相関を求めて DNS データとの比較を行った結果基本ケースでは x 方向の解像度が不十分だが格子サイズを小さくすると改善される。 ・モデル切替の境界を変えても基本ケースと変わらず影響は殆どない。 ・LES 計算結果は共通領域において平均流速や散逸率が過大評価となる傾向を示すが、この部分で RANS の結果を用いることにより全領域にわたり良い結果が得られ、本論文の手法の有効性が検証された。				
3. 結果					
4. 結論	本手法により壁近傍の取扱いに関して汎用性の高い統合乱流モデル構築が期待できる。				
5. その他	* : 良く見られる LES の壁面近傍モデルとして RANS を用いる手法とは逆に、RANS の壁面近傍モデルとして壁法則などの代わりに LES を用いたモデルと見なすことができる。前者より計算時間はかかるものの、壁近傍領域のモデル化の工夫が不要で取り扱いが容易であるとしている。 ** : エネルギーk の輸送方程式を用い、散逸率 εL は代数的に求めるモデル				

資料 No.	12	分 類	対数則	リブ付き流路																						
文献名	Large-eddy simulation of secondary flow over longitudinally ridged walls																									
出典	著者	Luca falcomer and Vincenzo Armenio																								
	誌名	.Journal of Turbulence																								
	Vol.	3	No.	008	Page : ~ 発行年 2002																					
	記事																									
1. 目的	DNS や試験の結果と比較し、Les モデルによる解析精度を検討する。																									
2. 実施内容	Les モデルの解析結果を $Re \tau=140$ の DNS 直接シミュレーション結果と比較し、主壁面応力や 2 次流れの検討を実施。体系はリブ付き管路。 <table border="1"> <thead> <tr> <th>Case</th> <th>Domain</th> <th>Gridpoint</th> <th>Δx^+</th> <th>Δz^+</th> <th>Δy_{min}</th> <th>Δy_{max}</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>KS99</td> <td>$1.25 \pi \delta \times 0.375 \pi \delta \times 2 \delta$</td> <td>$48 \times 96 \times 36$</td> <td>12</td> <td>5</td> <td>0.2</td> <td>5</td> </tr> <tr> <td>Curent LES</td> <td>$1.25 \pi \delta \times 0.375 \pi \delta \times 2 \delta$</td> <td>$24 \times 64 \times 32$</td> <td>25</td> <td>6</td> <td>1</td> <td>10</td> </tr> </tbody> </table>					Case	Domain	Gridpoint	Δx^+	Δz^+	Δy_{min}	Δy_{max}	KS99	$1.25 \pi \delta \times 0.375 \pi \delta \times 2 \delta$	$48 \times 96 \times 36$	12	5	0.2	5	Curent LES	$1.25 \pi \delta \times 0.375 \pi \delta \times 2 \delta$	$24 \times 64 \times 32$	25	6	1	10
Case	Domain	Gridpoint	Δx^+	Δz^+	Δy_{min}	Δy_{max}																				
KS99	$1.25 \pi \delta \times 0.375 \pi \delta \times 2 \delta$	$48 \times 96 \times 36$	12	5	0.2	5																				
Curent LES	$1.25 \pi \delta \times 0.375 \pi \delta \times 2 \delta$	$24 \times 64 \times 32$	25	6	1	10																				
3. 結果	また、試験結果 (NN84) との比較を実施。 $Re \tau=140$ の DNS シミュレーション結果と比較して主壁面応力の分布は良く一意し、2 次渦の中心は LES で $y=0.33 \delta$、$z=0.34 \delta$ となり、KS99 の位置とすばらしく一致している。また、無次元平均渦度分布についても、DNS の最大値 0.32 に対して 0.28 でよくシミュレートできており、乱流強度 (別で報告) のみでなく、平均渦度の xyz 成分も DNS と比較して満足できるものである。																									
4. 結論	NN84 試験結果と比較して、LES では渦の中心は $z=0.28 \delta$、0.21δ の位置となり nearly equoal である。しかしながら、流速の分布については若干異なるが、これは NN84 と LES で ridge の数が異なる為としている。																									
5. その他																										

資料 No.	13	分 類	微分式型 モデル	翼縁後流	
文献名	Dynamic Wall Modeling for Large-Eddy Simulation of Complex Turbulent Flows				
出典	著者	Meng Wang, Parviz Moin			
	誌名	.Physics of Fluids			
	Vol.	14	No.	7	Page : 2043 ~ 2051 発行年 2002
	記事				
1. 目的	複雑な壁面境界を有する物体周りの流れ解析において、壁面モデルを用いた LES を適用しその有用性を検証する。				
2. 実施内容	翼後縁を通過する乱流境界層流れを解析対象として、壁面で乱流境界層方程式を解く TBLE(Turbulent Boundary Layer Equations)モデルを適用し、翼面の平均圧力係数や表面摩擦係数、流速分布などに関して壁法則 (log ρ) や壁面モデルを用いない場合の LES、試験と比較を行っている。TBLE モデルにおいて乱流渦粘性は RANS によって求められるが、Von Karman 定数 κ を 0.4 とした場合と、境界層外の LES 計算における渦粘性係数 ν_{sgs} によってダイナミックに計算する手法 (κ=< ν_{sgs}>/< yw⁺(1-exp(-yw⁺/19))²>) を検討している。 ・解析手法 : 差分スペクトル法のハイブリッド ・移流項の離散化 : 3 次 Runge-Kutta 法 ・拡散項の離散化 : Crank-Nicolson 法 ・計算格子 : 1536(流れ方向)×96(壁面法線方向)×48(周方向)~1536×96×48				
3. 結果	Von Karman 定数を一定値とした場合、表面摩擦係数を過大予測してしまうが、定数をダイナミックに計算することによって壁面モデルを用いない LES と同等の結果が得られている。特に計算格子を粗くしたケースでも翼後縁での非定常な剥離を捉えており、表面圧力変動が少ない計算コストで高精度に予測されている。				
4. 結論	壁面モデルとして TBLE モデルを適用する場合、壁面モデルの渦粘性を乱流境界層外の LES 計算による渦粘性と連続になるようにダイナミックに求める。 課題：解析対象に応じた壁面モデルと LES 計算の接続位置の妥当性。				
5.その他					

資料 No.	14 (1/2)	分 類	対数則	チャンネル	
文献名	Large eddy simulation wall-modeling based on suboptimal control theory and Linear stochastic estimation				
出典	著者	F. Nicoud, J. S. Baggett, P. Moin, and W. Cabot			
	誌名	Phys. Fluids			
	Vol.	13	No.	10	Page : 2968 ~ 2984 発行年 2001
	記事				
1. 目的	特に粗格子（壁面第一格子点に対数領域）を用いた高 Re 流 LES 解析において、流れ場の解を対数分布に合致させるために、準最適制御手法を適用して壁面応力境界条件を決定する。また、この手法により得られたデータを用いて、線型確率論的な推察より新しい実際の壁面モデルを導出する。				
2. 実施内容	壁面第一格子点に対数領域にあると乱流積分長さは格子幅の半分以下であり、SGS のモデリングと数値誤差の両方が重要になる。故に適切な境界条件というのは、粗格子を用いた場合にこれらの数値誤差を補正することも含め正しい平均流速プロファイルを得るものである。つまり、最適な剪断応力の値とは DNS から得られるような物理的な値ではなく、アプリオリに決めることはできない。Bagwell ら(ref.16)はこの数値誤差の部分を認識していなかった。 準最適制御を適用して粗格子 LES 計算用の壁面応力境界条件を求める。壁面に平行な壁面剪断応力 2 成分（ここではτ_{12}^w, τ_{32}^w : 1 が流下方向、2 は高さ方向、3 がスパン方向）を、与えられたコスト関数の元で最適化する。速度の発散はゼロのものに限定する。コスト関数は以下の 2 つの和とする。 ・ 流下方向とスパン方向それぞれの目標とする速度分布関数との差の 2 乗和を壁からの高さ方向の領域の範囲で積分したもの（流下方向は対数速度分布）。 ・ τ_{12}^w, τ_{32}^w の 2 乗和を壁面全体で面積積分したもの。				
3. 結果	・ Re_τ（摩擦レイノルズ数）4000 の流れでは、制御により求められたτ_{12}^w, τ_{32}^w の値を用いると、shifted model に比べて極めて対数分布に近づいた解が得られた。 ・ 準最適制御の解から求めたτ_{12}^w, τ_{32}^w の分布と速度勾配・速度成分の分布より相関係数を求めたところ、τ_{12}^w には dw/dz、τ_{32}^w には $dudz$ への相関が強いことがわかった。 ・ 準最適制御を用いると、乱流変動を大きく算出する。				
4. 結論	[次頁に続く]				

資料 No.	14 (2/2)	分 類	対数則	チャネル	
	- この最適化手法では陽的に壁面応力を与えるモデルを使用した場合に比べ 20 倍程度計算コストを要するため、この結果を用いて線型確率論的推察(LinSE)により速度場から陽的に与えることが可能なモデルを構築する。 ➤ 求めるべき壁面応力を $\langle \tau_{i2}^w(x,z) E \rangle$ で表す。 $\langle \rangle$ は面平均を表す。LinSE は $\langle \tau_{i2}^w(x,z) E \rangle = L_{ij} E_j$ で表される。ここで E_j は速度場や圧力、速度勾配、2 次の量など、壁面応力を特徴付けるイベント（訳注：前述の例では相関係数を求めて相関の強いことが判明した要素を示すものと考えられる）を含むベクタ。 L_{ij} は τ_{i2}^w と E_j を関連付ける推定係数である。 ➤ LinSE を得るためには、壁面応力を良く特徴付けるイベントを決め、 $\langle \tau_{i2}^w E_k \rangle$ と $\langle E_j E_k \rangle$ の関係を求め、 $\langle \tau_{i2}^w E_k \rangle = L_{ij} \langle E_j E_k \rangle$ の式より L_{ij} を求めることが必要。 ➤ ここでの手法は Bagwell ら(ref.16)に基本的に同じだが、Bagwell らが参照データとして低 Re DNS からの値を用いていたのに対して、ここでは粗格子の高 Re 流で良い結果が得られていることがわかっている前述のものを用いていることが異なる。 本報では前述の $Re_\tau = 4000$ 流れを対象にして上記 LinSE を実装した具体的な方法を示し、準最適制御の解とほぼ同一の良好な速度プロファイルを得た。				
5. その他	- 本報 II 章に、過去の壁面応力モデルの変遷がレビューされている。Shifted model(Piomelli ら)、 two-layer model(Cabot)、与えられた速度場に対応する壁応力を再現する Bagwell らのモデル、壁近傍に RANS を適用(Schumann) - LinSE については本報には詳しく書かれていない。Ref. 31, 32, 16 を参照。 - 訳注： ターゲットの速度分布（対数分布）を与えないと本手法は適用しようがないと考える。				

資料 No.	15 (1/2)	分 類	DES	チャネル	
文献名	The inner-outer layer interface in large-eddy simulations with wall-layer models				
出典	著者	U.Piomelli, E.Balaras, H.Pasinato, K.D.Squires and P.R.Spaltart			
	誌名	International Journal of Heat and Fluid Flow			
	Vol.	24	No.	Page : 538 ~ 550	発行年 2003
	記事				
1. 目的	壁面近傍の渦を精度よく捉えることは全体の精度向上に必要である。そのため、LESでは壁面メッシュを細かくする必要があり、それがコスト増を招いており、DNSに対する Advantage が小さくなっている。壁面境界層のモデリングは、境界層を解像するのに必要なメッシュ数が $Re^{0.4}$ に比例することを強いる。しかし、これは強く経験則に従うため、境界層のモデルは重要となる。 壁面境界層モデルの最近の動向にはいくつかあるが、一般に 2 つのアプローチがある。一つは平衡則であり、もう一つは領域モデルである。平衡則としては RANS の壁関数が有名であるが、複雑形状流れや完全非構造格子、主流の平均流速分布が分かっている流れなどへの適用には制限がある。領域モデルとしては 2 層モデルとして知られる 2 つに分けられた格子を用いる手法と DES がある。 2 層モデルは、主流部をフィルタリングされた Navier-Stokes 方程式を解き、壁面近傍は LES の格子より粗い格子で簡素化された方程式群を解くものである。しかし、壁面近傍の内層の計算は計算コストの内の数パーセントに過ぎないので、平衡モデルに比べると計算コストはかなり大きい。 一方、DES は境界層における RANS と LES を組み合わせた手法である。標準的な DES は全ての境界層を非定常 RANS 方程式でモデル化している。しかし、Nikitin らは壁面境界層モデルとして DES を用いている。これは、境界層の内層と外層とで異なるモデルを採用するもので、いくつかの有望な結果を得ているが、表面摩擦係数の誤差は大きく、内層で非物理的な流れを生じるといった問題もある。この問題は、流れ方向と壁面に垂直な方向との相関が悪くなっていることが原因と考えられる。 RANS/DES の界面（遷移層）が生じるが、この遷移層で時空間スケールの整合性が取れず、その連続性が全体の精度へ影響する。この論文では、遷移層での整合性を取るためのいくつかのアプローチについて詳細に検討している。また、境界層の内層（RANS 領域）に後方散乱モデルを適用して解析を行い、検証している。				
2. 実施内容	チャンネル流れで RANS/LES 境界が平均流速分布と壁面摩擦係数に与える影響を調べる。DES では、境界で長さスケールを RANS から LES に切り替えるが、RANS は壁面からの距離、LES はフィルター幅（格子サイズ）としている。ここで、LES の長さスケールは $d_{LES}=C_{DES}\Delta$ と定義されるが、C_{DES} は定数、Δ は格子幅から得られるパラメータである。この 2 つのパラメータに対して、C_{DES} では 0.25、0.38、0.65 の 3 つ、Δ では $\max(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ と $(\Delta x^2+\Delta y^2+\Delta z^2)^{1/2}$ の 2 種の計算法を検討している。また、界面を壁面に近づけると連続性がよくなることから、この手法も検討している。基本的には RANS 領域も LES 領域も Spalart-Allmaras モデル（SA モデル）で検討しているが、LES 領域に Smagolinsky モデルを適用した計算や RANS 領域（内層）に後方散乱モデルを適用した計算も行っている。 [次頁に続く]				

資料 No.	15 (2/2)	分 類	DES	チャンネル	
3. 結果	LES 領域におけるΔの定義に関わらず、表面摩擦係数の誤差は 20%前後と大きいことから、内層での速度分布は RANS モデルに左右される。また、DES 緩衝層と著者が呼ぶ非物理的な高い速度勾配を持った領域が出来てしまう。 $d_{LES}=0.65(\Delta x^2+\Delta y^2+\Delta z^2)^{1/2}$ (C065S) としたモデルにおいて、壁面からの距離 z^+ による流れ方向の速度の時間履歴から、$z^+>2000$ の領域で時間的に小スケールな速度変動が現れてくる。 C065S における各断面の速度分布から、RANS 領域に“Super-Streaks”と著者が呼ぶ流れ方向に 3 本の縞状の速度分布が存在する流れが生じている。この領域で大きな速度変動が見られるが、渦スケールは非物理的であるとしている。 RANS/LES の界面を壁に近づけた場合、Super-Streaks は非常に小さくなったが、表面摩擦係数の誤差は依然として大きいままである。 内層に SA モデル、外層に Smagolinsky モデルを適用したケースは、短いスケールの変動成分を捉えることはできたが、これも表面摩擦係数の誤差は大きい。 これまでの平均流速分布にあまり影響を与えることなしに流れの構造を改善した事実は、RANS/LES 界面における物理的像と平均流速分布のつながりが弱いことを示している。また、界面を壁面近傍に近づけることは結果としてせん断応力の解像度を上げることとなった。このことは、Super-Streaks と増加する速度勾配の連成がそんなに強くなく、小スケール構造が平均速度分布を変えることなしに界面の位置を変えることで壁面近傍に生成されることを示している。 さらに、内層に後方散乱モデルを適用したケースもテストしている。このモデルでは、運動量方程式の右辺に抗力項を加えており、少なくとも長さスケール、固有時間スケール、振幅の 3 つのフリーなパラメータがある。後方散乱はサブグリッドスケールの効果を与えるので、その長さスケールはフィルター幅であり、時間スケールはタイムステップである。ゆえにこの項はガウシアン乱数から得られる。このモデルを用いると、表面摩擦係数の誤差は 5%程度となり、壁面近傍の小スケール渦も捉えることができる。				
4. 結論	RANS/LES 界面の位置は結果に重大な影響を与える。界面が壁面に近づくと、小スケール渦が生成され、せん断応力の解像度も上がるが平均流速分布の改善は十分でない。後方散乱モデルの導入は、非常によい結果を示した。モデルのエネルギー入力乱流エネルギー生成に相当するとき、渦を運ぶレイノルズ応力が生成される。このことは結果として平均流速分布と表面摩擦係数の改善につながった。 しかし、ここで導入した後方散乱モデルは実現可能性の低いものとして見られている。それは、物理的証明が成されていないからである。一般的な流れの挙動は他のモデルと同様の傾向を見せるが、その振幅は他のモデルより大きい。しかしながら、この方法が効果的かもしれないという事実は、この種のモデルの発展への努力を続けていくことの必要性を示している。				
5. その他					

資料 No.	16	分 類	代数型モデル	2 次元丘周り	
文献名	Investigation of wall-function approximations and subgrid-scale models in large eddy simulation of separated flow in a channel with streamwise periodic constrictions				
出典	著者	Lionel Temmerman, Michael A. Leschziner, Christopher P. Mellen, Jochen Frohlich			
	誌名	. International Journal of Heat and Fluid Flow			
	Vol.	24	No.	Page :	157 ~ 180 発行年 2003
	記事				
1. 目的	剥離流れの LES 解析で、使用する SGS モデルや壁法則、格子分割数により流れの予測精度にどの程度影響を及ぼすかを特定すること（ベンチマーキング）。				
2. 実施内容	・ 計算体系は剥離流れを生じる周期丘陵周りであり、丘陵の高さ基準の $Re=10595$ ・ SGS モデルは、Smagorinsky(SM)、Dynamic Smagorinsky(DSM)、Localized Dynamic Smagorinsky(LDSM) 、 Mixed-Scale(MSM) (5) 式 、 Wall-Adapted Local Eddy-Viscosity(WALE) (7),(8)式、Dynamic Mixed(DMM) (9)式の 6 種類。 ・ 壁面近傍は、No-slip、対数則 2 層 (LL2) (10)式、対数則 3 層 (LL3) (11)式、乱流エネルギー利用型対数則 2 層 (LLK) (12)式、Werner-Wengle の 1/7 乗則(WW) (14)式、WW-Backflow モデル(BF) (15),(16)式の 6 種類。LL2 と WW は、壁面応力を求めるのに壁面からの第 1 格子点の速度から直接計算する通常の方法(pointwise)と、第 1 格子点の速度をセル平均速度とみなし、鉛直方向の積分値と壁面応力との関係式を解いて求める方法(integration)の 2 種類を用いている。 ・ 計算コードは STREAMLES と LESOCC の 2 種類。 ・ 空間積分は 2 次精度の中心差分、時間積分は STREAMLES が 2 次の Adams-Bashfort 法、LESOCC は Runge-Kutta 陽解法。 ・ 丘陵体系の格子は Fine (約 460 万)、Coarse (約 104 万)、Coarsest (約 66 万) の 3 種類。Fine による計算結果を reference として残りの 2 格子でモデルの評価を行った。				
3. 結果	・ 丘陵体系の計算の前にチャンネル流の解析を行ったところ、SGS モデルに WALE、壁モデルに WW-integration を用いたケースが reference とした DNS の解析結果と最もよく一致した。 ・ 丘陵の後流部循環流域における壁面の鉛直速度プロファイルは対数則をほとんど満たさないが、壁法則に BF を用いるとよく再現される。 ・ 各解析条件による流れの剥離点と再付着点は、丘陵高さの比でそれぞれ 0.20~1.12、2.17~4.72 と大きく変動している。 ・ 格子数は壁面を No-slip 条件としたときにもっとも予測精度に影響する。 ・ 壁法則による壁面応力の算出方法は、通常の pointwise よりも integration の方が予測精度が高くなる。 ・ SGS モデルは主に再付着点の予測精度に影響し、SM、WALE、MSM の結果が reference に近い。				
4. 結論					
5. その他					

資料 No.	17	分 類	IB 法 微分型モデル	各種複雑流路	
文献名	Advances in large eddy simulation methodology for complex flows				
出典	著者	Parviz Moin			
	誌名	International Journal of Heat and Fluid Flow			
	Vol.	23	No.	Page: 710 ~ 720	発行年 2002
	記事				
1. 目的	これまでの LES 研究のレビュー及び、CTR(Center for Turbulent Research)における複雑流路での LES に関する以下の 2 つの取り組みについて紹介する。				
2. 実施内容	(1) IB 法に基づくアプローチ				
	(2)任意要素を持った非構造格子のためにデザインされた手法。				
3. 結果	○LES での壁モデル				
	Nicoud ら (2001) …非常に高い Re 数では対数平均速度プロファイルを考慮 Wang and Moin(2001)…壁面近傍領域に RANS を適用、但しモデル係数を導くために新規の直接手法を採用。渦粘性を決めるカルマン定数 κ を標準値 (=0.4) にすると壁面揃断応力の予測値が大きくなりすぎるため、LES と RANS 渦粘性をマッチさせて動的に κ を求める手法を用いた。その結果、実験と非常に良く一致する結果が得られた。このときの κ は 0.4 よりずっと小さい(Fig.1 参照)。				
4. 結論	○IB (Immersed Boundary) 法：複雑形状周りの流れを扱うためのメッシュ生成手法。				
	●攪拌槽の LES に IB 法を適用した例 各速度成分について測定結果と解析結果(RANS/ $k-\epsilon$ および LES)を比較。RANS/ $k-\epsilon$ は測定結果と一致しない部分(特に径方向速度が過大評価)があるが、LES は非常に良く一致している (Fig.5 参照)。RANS の結果が測定と一致しない原因は大規模な非定常・不均質流れが存在するためである。[LES 解析条件についての記載なし]				
5. その他	●空気抵抗低減手段を設けた自動車の LES の例 デカルト IB 法を使用。目的はウェイクの非定常挙動の研究と抵抗低減手段の改良である。試験結果 (Re=170,000) と解析結果 (Re=20,000、Re=100,000) のウェイク内の速度プロファイルを比較し、Re 数の高い解析結果が試験結果に近いと結論している。低 Re 数の解析では床面境界層の厚さを過大評価。抵抗係数を比較すると、高 Re 数 LES の結果では、square back 形状で 0.291、boattail 形状で 0.223、試験結果はそれぞれ 0.3 と 0.23 である。[LES の解析条件についての記載なし]				
	●湾曲メッシュでの IB 法の適用例 stator-rotor における tip-clearance flow への適用事例。				
	○非構造格子での LES ガスタービンエンジンの燃焼器解析に LES を適用。LES を用いた場合にロバスト性と精度を両立させる方法が必要。即ち、運動量のような一次元パラメーターだけでなく、運動エネルギーのような二次元パラメーターの保存を考慮することで数値拡散することなくロバストにすることができる。構造格子については Harlow&Welch アルゴリズムが適用でき、LES でも広く適用されている。非構造格子については Mahesh ら (2001) がアルゴリズムを開発。試計算でロバスト性が確認された。				

資料 No.	18	分 類	IB 法	3 次元角柱周り	
文献名	LES of the flow past a rectangular cylinder using the immersed boundary concept				
出典	著者	D.G.E. Grigoriadis, J.G. Bartzis and A. Goulas			
	誌名	INTERNATIONAL JOURNAL FOR NUMERICAL METHODS IN FLUIDS			
	Vol.	41	No.	Page :	615 ~ 632 発行年 2003
	記事	immersed boundary method (単純格子による複雑流路流れ解析手法であり、セル内に浸漬された壁の流速境界条件を外力により強制する手法) を LES に適用			
1. 目的	角柱を横切る後流渦非定常問題に対して immersed boundary method(IMB)(1)の適用性、SGS モデルとして large-scale motion を抑制する high-pass filter の機能をもつ filtered structure function model(FSF)を使用した LES 手法の妥当性を示す。				
2. 実施内容	immersed boundary method ではデカルト座標系のような単純な直行構造格子を使い、複雑な物体壁は計算セルの内部に境界 (immersed boundary) として設定する。したがって計算上の実質的境界は物体内部に設定される。この計算境界の流速境界条件値は物体境界に隣接する流体格子点流速と物体境界流速 (non-slip 条件の場合は零値) から外挿式により設定されるが、計算上はディリクレ条件を与えるのではなく、この計算境界で設定された流速境界条件値になるように外部体積力を与える。 SGS モデル : Laplacian filter を使用した FSF モデル(2,3) 数値解法 : Fractional step technique (Kim and Moin が採用した方法)(4)				
3. 結果	角柱表面に沿った直交格子を使用して主に FSF と通常の Smagorinsky model との比較を行なっている。流動条件は $Re = 22000$ 、入り口外乱は 2-5% (Gaussian divergence-free perturbation)。この解析では IMB の外挿誤差を省いてテストできるようにメッシュは角柱境界に沿った格子を使用した。				
4. 結論	比較した実験結果を全体的に良く予測できている。 ・メッシュ効果 : 粗いほど後流渦スケールとドラッグ係数を過大評価する。変動流速と Reynolds 応力を精度良く予測するには格子間隔を $0.2d$ (d : 角柱断面の辺長さ) より小さくする必要がある。 ・格子解像度が高い場合、後流渦構造と別に渦間を繋ぐ構造 (fingers と呼ばれる) も予測できた。 ・SGS モデル : FSF の方が実験データをより良く予測している。 ・FSF は非定常流れ場の過渡的特性を予測できる。				
5. その他	(1) Lai M-C, Peskin CS. J. of Computational Physics, vol.160, pp719-750, 2000. (2) Ducros FD, Comte PC, Lesieur M. Journal of Fluid Mevhanics 1996;326:1-36 (3) Metais O, Lesieur M. Journal of Fluid Mevhanics 1992;239:157-194. (4) Kim J, Moin P. Journal of Computational Physics 1985; 59:308-323.				

資料 No.	19	分 類	IB 法	クロス流れ	
文献名	An immersed boundary finite difference method for LES of flow around bluff shapes				
出典	著者	C.W. Li and L.L. Wang			
	誌名	INTERNATIONAL JOURNAL FOR NUMERICAL METHODS IN FLUIDS			
	Vol.	46	No.	Page: 85 ~ 107	発行年 2004
	記事	immersed boundary method (単純格子による複雑流路流れ解析手法であり、セル内に浸漬された壁の流速境界条件を外力により強制する手法) を LES に適用			
1. 目的	immersed boundary method(IMB)を採用した LES 流動モデルを開発し、角柱および TsingMa suspension bridge deck の bluff body 周辺の解析を行い妥当性を確認する。				
2. 実施内容	IMB method はデカルト座標系のような単純な直行構造格子を使い、複雑な物体壁は計算セルの内部に境界 (immersed boundary) として設定する。したがって計算上の実質的境界は物体内部に設定され、この計算境界の流速境界条件値は物体境界に隣接する流体内格子点流速と物体境界流速 (non-slip 条件の場合は零値) から外挿式により設定されるが、計算上はディリクレ条件を与えるのではなく、この計算境界で設定された流速境界条件値になるように外部体積力を与える手法である(1)。離散化は Lin and Li(2) の 4 段階 fractional step 法を修正して使用。輸送ステップでは後退特性法と Lax-Wendroff 法を結合した手法を、拡散ステップは 2 次中心差分、圧力伝播ステップでは連続の式に Kim 等の提案した数値的な mass source/sink を加え IMB 境界付近の質量残差を減らす(3)。最後の体積力ステップで IMB 法を導入する。SGS モデルは Smagorinsky モデル ($C_s=0.15$)。流速は格子点で定義し、境界流速の評価は一次または双一次補間を使う。				
3. 結果	○四角柱クロス流れ解析：平行流路中央に一辺が流路高さの 10%の角柱を置き、角柱表面に平行に不等分割格子を、スパン方向は等分割格子を配置した。最小格子幅は一辺の長さの 1%とした。角柱断面内格子のアスペクト比は 1~1.2 とした。 $Re=22000$ 。 剥離、後流渦挙動、定常、非定常ドラッグ／リフト係数は実験との一致は良好。但し、最小格子幅を 4%にした場合上下面での剥離が起こらず、アスペクト比の増加による境界補間精度の悪化が原因しているかもしれない。 ○TsingMa bridge deck クロス流れ解析：先の解析に比べ、より複雑な形状を持つ問題である。 $Re=3280-5730$ 。向かい角 0-5 度。直接比較できる実験は無いが、向かい角と流体力係数の関係は正しい傾向を予測できた。				
4. 結論	複雑体系への IMB 法の有効性は補間手法による。immersed boundary に沿って零圧力勾配境界条件を与えると正しい圧力分布が予測でき、マス残差と数値安定性が向上。				
5. その他	(1) Mohd-Yusof, J., Combined immersed boundary/B-splines methods for simulations of flows in complex geometries, CTR Annual research briefs, NASA Ames/Stanford university, (1997) (2) Lin P, Li CW. J. for Numerical Methods in Fluids, 2002; 38:1045-1068. (3) Kim J, Kim D, Choi H., J of Computational Physics 2001;171:132-150.				

資料 No.	20	分 類	LES/RANS	チャンネル	
文献名	Hybrid LES-RANS modelling : a one-equation SGS model combined with a $k-\omega$ model for predicting recirculating flows				
出典	著者	L. Davidson and S. H. Peng			
	誌名	International Journal for Numerical Methods in Fluids			
	Vol.	43	No.	Page : 1003 ~ 1018	発行年 2003
	記事				
1. 目的	LES の実用化に向けてのボトルネックとなっている壁面近傍の取扱いについて、本論文では壁面近傍で RANS を用い中心部は LES を用いる手法（ハイブリッド LES-RANS 手法と名づけられている）を提案し、チャンネル流れと 2 次元丘まわり流れへ適用して手法の有効性を検討する。				
2. 実施内容	2) ハイブリッド LES-RANS 乱流モデル ・壁面近傍（RANS 領域） : $k-\omega$モデル ・中心領域（LES 領域） : 1 方程式 SGS モデル（Yoshizawa モデル）* ・両モデルの接合面 : 境界層の対数領域内に設定 ・数値計算法 : 陰的 2 段階時間進行法 ・境界条件 : x 方向、z 方向には周期境界条件				
3. 結果	2) 流れ計算による有効性の検証 チャンネル流れ、2 次元丘まわり流れの計算を行い、詳細格子サイズを用いた解像度の高い LES 解析のベンチマークデータとの比較により本論文の手法の有効性を検証した。				
	①チャンネル流れ —流動条件 : $Re_\tau = u_\tau \delta \nu = 1050$ (δ: チャンネル幅の 1/2) —計算体系 : $N_x \times N_y \times N_z = 32 \times 64 \times 32$ ・接合面位置($y^+=60$)を適切に選べばこの程度の粗い格子でも平均流速の分布はベンチマークデータと良い一致が見られたが速度の揺らぎ成分の一致は悪く流れ方向の揺らぎ成分を過大評価する傾向にある。				
	②2 次元丘まわり流れ —流動条件 : $Rec = U_c H / \nu = 21500$ (基本ケース) —計算体系 : $N_x \times N_y \times N_z = 104 \times 64 \times 32$ (基本ケース) ・平均流速、速度の揺らぎ成分共にベンチマークデータと比較的良く一致した。 ・平均流速分布の接合面近傍で小さな節目状の変化が見られる。①に比べて②がかなり小さいが、これは壁面に起伏のある②の方が接合面を介しての対流拡散が大きくこれが分布を平滑化する効果を有しているためと考えられる。 ・乱流粘性係数は RANS 領域の方が LES 領域よりかなり大きく接合面近傍で不連続的に急減するのは乱流の長さスケールが急減するためであり精度悪化の要因である。 ・本手法の大きな課題として RANS 領域と LES 領域間で乱流の時間／長さスケールが大きく異なるため、接合面を介して受け渡される RANS 領域の流動変動に LES 計算に必要なスケールの情報が含まれていないことがあげられ接合方法に改善の余地がある。				
	ハイブリッド LES-RANS 手法をチャンネル流れ、2 次元丘まわりの流れに適用し、粗いメッシュでも平均流速を良好に評価できることを確認すると共に、接合方法の課題と改良方法について検討した。				
4. 結論					
5. その他	* : 乱流エネルギー k の輸送方程式を用い、乱流粘性係数は代数的に求めるモデル 但し、一般曲線座標系の格子サイズから求めるサブグリッドスケールの代表長さを Yoshizawa モデルの $\Delta = (\Delta_\xi \Delta_\eta \Delta_\zeta)^{1/3}$ から $\Delta = \min \{ \Delta_\xi, \Delta_\eta, \Delta_\zeta \}$ に変更している。				

資料 No.	21 (1/2)	分 類	LES/RANS	計算機筐体内部	
文献名	Computation of a Non-Isothermal Complex Geometry Flow using Non-Linear URANS and Zonal LES Modeling				
出典	著者	Y. Liu, P.G. Tucker, A. Jouvray, P.W. Carpenter			
	誌名	3rd International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena			
	Vol.	No.	Page :	87 ~ 91	発行年
	記事				
1. 目的	RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) は非定常流れの予測に不向きであるが、LES (Large Eddy Simulation) は計算コストが大きい。そこで近年では RANS または URANS (Unsteady RANS) と LES を組み合わせたハイブリッドモデル (DES ; Detached Eddy Simulation、ZLES ; Zonal k-l-based LES) が注目を浴びている。これらのモデルは、主流を LES で解き、コスト増を招く壁面近傍流れに対して URANS を適用するものである。 本論文の主な目的は以下の 3 つである。 (1) Gatski と Speziale の代数応力モデル (EASM ; Explicit Algebraic Stress Model) と Speziale らのレイノルズ応力モデル (full RSM ; Reynolds Stress Model) を含む最先端の乱流モデルが複雑形状流れの予測精度を向上させるかどうかを調査 (2) ZLES の性能評価 (3) 熱輸送測定実験との比較				
2. 実施内容	解析体系としては計算機筐体内部の複雑形状流れを対象とし、支配方程式は有限体積法で離散化、各乱流モデルは以下の通りである。 RSM→FLUENT を使用。 EASM→基本的に RSM を簡素化したモデルであり、レイノルズ応力が平均ひずみ速度と渦度テンソルの陽的関数として表現されるモデル。 ZLES→RANS 領域に k-l モデル、LES 領域には Yoshizawa の一方程式サブグリッドモデルを適用。RANS と LES の界面は $y^+ = 30$ に設定。RANS/LES 界面では長さスケールをスムージング。 実験は熱電対とサーモグラフを用いて測定。測定結果から計算の熱的条件を与えている。 計算は k-ε と EASM を用いた粗いメッシュ、ZLES を用いた細かいメッシュで行っている。壁からの第 1 層セルの y^+ は低 Re 数で 2 程度、高 Re 数で 15 程度となっている。温度に対して壁関数の仕様を避けるために、ZLES では y^+ を 1 以下にしている。EASM と RSM で使用する壁関数は Tucker らの式で URANS の結果は ZLES の初期条件として用いられる。 [次頁に続く]				

資料 No.	21 (2/2)	分 類	LES/RANS	計算機筐体内部	
3. 結果	流線の比較から、ZLES は URANS と比較して流れの非定常性が強くでている。平均流速と渦度の誤差評価において、ZLES は平均流速の誤差が小さいが、渦度では EASM や RSM がよりよい結果を示している。しかし、EASM と RSM は平均流速が線形モデルと大差なく、改善が見られない。全体としては EASM、RSM、ZLES は線形モデルに比べると予測精度は向上している。EASM と RSM で平均流速の誤差の改善が見られないのは、流線曲率効果 (Spalart, 2001) を十分に再現できないためだと考えられる。両モデルは経験則からくる項を持っており、非定常流れに対する理論的根拠が薄いのである。 熱輸送の評価として、著者が定義する壁面温度を基準とした Nu 数と平行平板において一般的に定義される Nu 数、それらと解析結果を比較している。これから、前者に対して ZLES は Nu 数を低く見積もるが、後者に対しては比較的よく再現している。しかし、EASM が前者に対してよい一致を示している。ZLES は RANS/LES 界面の設定が性能にかなり影響する。壁面近傍のメッシュが十分に細かくないのかもしれない。				
4. 結論	複雑形状の非定常流れにおいて、流動の予測精度は ZLES が最もよく、熱輸送の予測精度は EASM がよい。低レイノルズ数流れでは、ZLES や低レイノルズ数線形モデルは渦度に対してよいパフォーマンスを示すが、熱輸送の予測精度は悪い。今後もさらなる研究を続ける必要がある。				
5. その他					

資料 No.	22 (1/2)	分 類	LES/RANS	2 次元丘周り	
文献名	A Combined RANS-LES Strategy with Arbitrary Interface Location for Near-wall flows				
出典	著者	Lionel Temmerman, Michael A. Leschziner, Kemo Hanjalic			
	誌名	Proceedings of 3rd International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena, pp. 929-934 (2003)			
	Vol.	No.	Page :	929 ~ 934	発行年 2003
	記事				
1. 目的	RANS 領域と LES 領域の境界を格子で固定しないハイブリッド法において、界面における物理量を滑らかに結合する手法の有効性を検討すること。				
2. 実施内容	・ RANS 領域は Wolfshtein(1969)の一方程式モデル(3)式、LES 領域は Yoshizawa and Horiuti(1985)の一方程式モデル(2)式により、乱流エネルギーの輸送方程式を解く。 ・ このとき RANS/LES の界面(interface)において、LES で算出された渦粘性 ν_{LES} をもとに、RANS の乱流粘性 ν_{RANS} を算出する際のモデル係数 C_μ を(9)式の形で表すことにより、界面における両手法の乱流（渦）粘性係数が強制的に等しくし、界面での諸量が連続になるような条件を与えた。 ・ さらに、RANS 領域における C_μ の値は y^+ の関数の形(10),(11)式で与えた。 ・ 体系はチャンネル流（格子数 $64 \times 64 \times 32$）5 ケースと、丘陵後流の剥離流れ（格子数 $112 \times 64 \times 56$）4 ケース。チャンネル流の計算ケースは C_μ を与える関数、および界面とする y^+ の値を順次変えた。一方、剥離流れのケースは界面を計算格子で区別した。これらと実験データ（チャンネル流のみ）およびより細かい格子で LES 計算した結果を reference として比較検討した。				
3. 結果	・ チャンネル流の計算では、速度の鉛直プロファイルが界面付近で実験値よりもやや大きな値を示した。RANS 領域における乱流エネルギーは速度分布と同様、どのケースも reference より大きな値を示した。RANS 領域における乱流粘性係数の分布は界面とする y^+ の値に大きく依存する結果となった。一方、LES 領域における諸量は reference とよい一致を示した。 ・ 剥離流れの計算では、LES-RANS 計算は reference よりも丘後流の剥離領域からの再付着点の位置を過大評価する結果となった。RANS 領域において使用する乱流モデルを変更してもこの傾向に変化はなかった。 ・ このとき、reference で得られた壁面のシアストレスを境界条件として LES-RANS の計算をすると再付着点の過大評価に改善が見られたことから、原因は RANS 領域における壁面のシアストレスの予測精度に問題があるためと考えられる。 ・ 循環流域における速度の鉛直プロファイルは、対数則に基づく分布とはかなり異なる様相を示した。reference と LES-RANS のプロファイルは、前述した再付着点の相違などによって定量的には差がみられたが、概形はよく一致している。 ・ LES-RANS に用いた格子と同一の粗さの格子で LES を行った場合の結果よりも、LES-RANS の計算結果の方が reference に近い結果となっている。				
[次頁に続く]					

資料 No.	22 (2/2)	分 類	LES/RANS	2 次元丘周り	
4. 結論	今回の剥離流れの Re は比較的低いため、今後はより大きな Re をもつ剥離流れへの有効性の検討を行う必要がある。				
5. その他	- Wolfshtein(1969)の RANS 一方程式モデル→Wolfshtein, M., Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.12, pp.301-318 (1969) - Yoshizawa and Horiuti(1985)の LES 一方程式モデル→Yoshizawa, A., Horiuti, K., J. Phys. Soc. Japan, Vol. 54, pp.2834-2839 (1985)				

資料 No.	23	分 類	IB 法	複雑流路流れ	
文献名	LES OF 3-D TURBULENT WAVY BOUNDARY FLOW: VALIDATION OF A GHOST-CELL IMMERSED BOUNDARY METHOD				
出典	著者	Y.-H. Tseng (Stanford University, USA) and J.H. Ferziger			
	誌名	3rd International symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena Jun. 25-27, 2003 (講演番号 A333)			
	Vol.	No.	Page :	～	発行年 2003
	記事	immersed boundary method (単純格子による複雑流路流れ解析手法であり、セル内に浸漬された壁の流速境界条件を外力により強制する手法) を LES に適用			
1. 目的	波状境界上の流れ解析に immersed boundary method を使用した LES を適用し、immersed boundary method の複雑流れへ適用性の柔軟さを示すこと、および数値解法の評価を目的としている。				
2. 実施内容	immersed boundary method (IBM) ではデカルト座標系のような単純な直行構造格子を使い、複雑な物体壁は計算セルの内部に境界 (immersed boundary) として設定する。したがって計算上の実質的境界は物体内部に設定される。この計算境界の流速境界条件値は物体境界に隣接する流体格子点流速と物体境界流速 (non-slip 条件の場合は零値) から外挿式により設定されるが、計算上はディリクレ条件を与えるのではなく、この計算境界で設定された流速境界条件値になるように外部体積力を与える。 空間離散化は有限体積法、時間積分は fractional step 法を使用、対流項微分は Quick 法、その他の微分は中心差分を使用、SGS モデルは Zang の dynamic mixed model を使用。解析格子は直行構造格子を使用。 immersed cel 境界流速を外挿して求める流体内部流速格子点が位置的に偏りが有るときは外挿行列係数は負となり計算の安定性が損なわれることから、場合によっては鏡面法の使用を勧めている。				
3. 結果	IBM では圧力ポアソン方程式の収束性がより悪化することからポアソンソルバーの比較検討を行ない、SIP 前処理による Bi-CGSTAB により収束性がよい結果を得ている。解法境界適合座標系による解析結果と IBM による解析結果を比較し、定常 (一定差圧条件)、非定常計算 (変動差圧条件) とともに波状境界壁から鉛直方向の流れ分布は良い一致を示している。非定常計算結果の乱流渦構造は Scandura 等の既往試験研究結果と類似した結果が得られた。				
4. 結論	計算時間幅の制限値は IBM により減少することなく安定に計算できた。従来の波状境界上の流れに対する解析、実験結果と良好に一致しており本手法の妥当性と精度を確認した。				
5. その他	「immersed boundary method」引用文献 : Mohd-Yusof, J., Combined immersed boundary/B-splines methods for simulations of flows in complex geometries, CTR Annual research briefs, NASA Ames/Stanford university, (1997)				