

論文の内容の要旨

論文題目 壁面モデルを適用した乱流 LES の構築とその実用性の評価

氏名 小林 克年

LESは複雑非定常な乱流場を高精度で予測できる数値解析手法である。しかし工業界において見られる各種流体機械や環境関連機器の設計支援ツールとしてLESを用いることは、現在の計算機環境では不可能である。本研究の目的は低計算負荷かつ高精度の数値予測が可能なLES乱流数値解析手法を構築し、数種類の複雑乱流場においてその評価を行うことである。

滑り無し境界条件(No-Slip)のLESで壁乱流を数値解析した場合、高精度の数値解を得るためには壁近傍に多くの計算格子が必要であり、通常、乱流境界層の内層領域(粘性底層、緩和層、対数則領域)に全体の約50%の格子が設定される。この問題点を解決するための手段として、壁面モデルによる内層領域のモデル化がある。図1に壁面モデルの概念を示す。壁面モデルを適用したLESでは細かい計算格子を設定することによって内層領域を直接、正確に解くことを放棄する。その代わり高い予測精度を保つため壁面境界条件として必要な壁面剪断応力、壁面熱流束、壁面温度を壁面モデルから算出する。

本研究では代数式型壁面モデル(AWM)および微分式型壁面モデル(DEWM)を壁面モデルとして適用する。AWMは圧力勾配が壁面剪断応力を用いて表現できる2次元平行流の壁近傍で成り立つ壁法則(線形則+対数速度分布則)の2層モデルやSpalding則を用いて壁面剪断応力を算出する手法である。壁法則は速度と壁面剪断応力を非線形の代数式で関係付けており、壁面第一格子点でのLES速度を代入してその代数式をニュートン法で解くことにより壁面剪断応力が算出される。DEWMは壁近傍にLES格子とは別の格子(Embedded Grid)を設置し、その領域で、LES壁面第1格子点での速度および圧力を境界条件に用いて境界層方程式を離散的に解き、得られた

速度場から壁面剪断応力を算出する手法である。本研究では AWM として森西により提案された Spalding 則を適用する手法, DEWM として Cabot により提案された手法を採用している。

図2は本研究で行った解析例とそれぞれの解析において壁面境界条件に適用された手法を表している。図3に各検証例での予測精度および計算時間について示す。誤差10%以内を○, 10~50%以内は△, 50%以上を×とする。平行平板間乱流, 円管内乱流, 静止直円管内旋回乱流ではNo-Slipによる解析も行ったが, 本研究では計算格子数が不十分であったため予測精度の悪い計算結果となっている。そこで格子解像度が粗いNo-Slipの結果から得られた壁面摩擦速度を用いて, 格子解像度が主流方向に関して約57~70, スパン方向および周方向に関して約28~69となるような計算格子数の場合の計算時間と比較した結果を「計算時間(Fine No-Slipを100%)」に示した。以下に検証結果を説明する。

① 平行平板間乱流および円管内乱流の検証

2次元平行流の代表例である平行平板間乱流, 円管内乱流を AWM, DEWM, No-Slip を用いた LES で数値解析した。この2つの流れ場は圧力勾配の効果が無視できる最も単純な壁乱流であり, AWM で用いられる Spalding の式は2つの流れ場における壁近傍の平均速度を表している。よって AWM と DEWM の間に予測結果の違いはほとんどなく平均速度を誤差10%以内で予測できている。しかし2次の乱流統計量に関しては壁面モデルを適用しても予測精度は改善されない。また DEWM の計算時間は平行平板間乱流で No-Slip の13%, Fine No-Slip の3.25%, 円管内乱流で No-Slip の25%, Fine No-Slip の2.5%であり低計算負荷が実現できている。

② 逆圧力勾配平板境界層

逆圧力勾配平板境界層を AWM, DEWM を用いた LES で数値解析した。逆圧力勾配平板境界層では負の圧力勾配が生じるため, 平均速度分布が通常の対数速度分布と異なる。よって通常の Spalding 則を用いる AWM を適用した場合, 計算精度に問題が生じると考えられる。DEWM の壁近傍で解かれる境界層方程式には, LES 壁面第1格子点での圧力勾配と同じ値を示す圧力項が存在する。よってこの圧力勾配の影響を壁面剪断応力の算出に反映することができるため, DEWM の壁面摩擦速度および主流方向平均速度の予測結果は AWM よりも実験値に近づく。しかし誤差は10~50%であり予測精度は不十分である。2次の乱流統計量に関しては AWM と DEWM の間に計算結果の差異は殆ど見られない。誤差も50%以上であり予測精度は非常に悪い。

③ 静止直円管内旋回乱流

旋回乱流の壁面近傍では遠心力によって乱れが促進される。この現象を壁面モデルに反映させるため勾配リチャードソン数を用いて DEWM の境界層方程式における乱流渦粘性係数のモデル化に適用されている Johnson-King ゼロ方程式乱流モデルを修正した。この修正微分式型壁面モデ

ル(MDEWM), DEWM, No-Slip を用いた LES で静止直円管内旋回乱流の数値解析を行った。DEWM は軸方向および周方向壁面剪断応力の減衰分布を実験値よりも過小評価し, No-Slip は過大評価する。MDEWM は勾配リチャードソン数の効果により乱流渦粘性係数が旋回乱流場において大きく評価されることから, DEWM に見られる過小評価を改善し実験値を高精度で予測できている。平均速度及び乱流強度, レイノルズ剪断応力の予測精度に関しては DEWM と MDEWM の間に予測結果の差異は殆ど見られない。それぞれの予測に対する誤差は表に示されている通りである。MDEWM の計算時間は No-Slip の 35%, Fine No-Slip の 1.4%と低計算負荷になっている。また旋回成分がなくなるにつれて勾配リチャードソン数はゼロに漸近するため, MDEWM は円管内乱流も DEWM と同様に十分予測することができる。

④ 円筒炉内強旋回乱流

MDEWM を用いた LES で円筒炉内強旋回乱流の数値解析を行った。旋回強度が高いため勾配リチャードソン数は静止直円管内旋回乱流の場合に比べ非常に高くなる。レイノルズ数が約 3×10^6 と非常に高いたため現在の計算機環境では No-Slip の LES で高精度な予測を行うことは不可能である。MDEWM は平均速度を誤差 10~50%以内, 乱流強度を誤差 10%以内で予測できている。

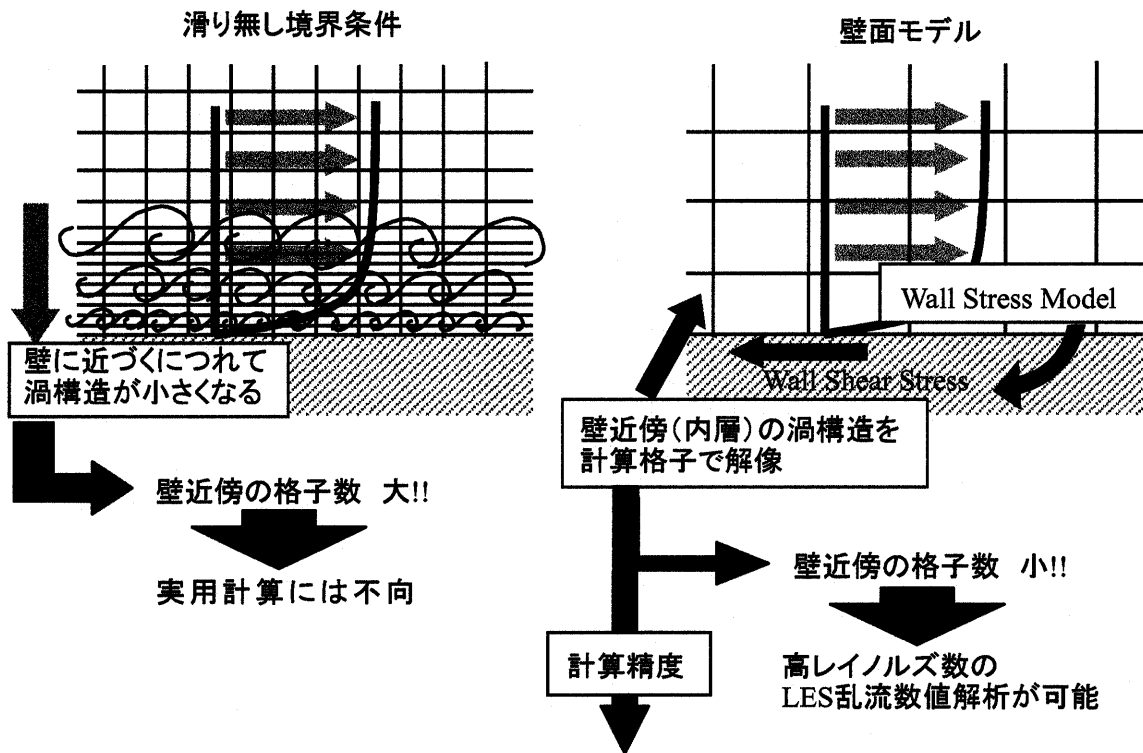
⑤ 円形衝突噴流

AWM, DEWMにより円形衝突噴流の熱流動解析を行った。DEWMによる温度の数値解析は今だ行われていない。本論文では速度場と同様に壁近傍において温度境界層方程式を解き, 温度の境界条件として必要な壁面熱流束および壁面温度を算出する微分式型壁面温度モデルを考案した。速度場に関してはAWM, DEWMの間に予測精度の差異は殆どなく, 平均速度に関しては誤差 10%以内, 2次の乱流統計量に関しては誤差50%以上という結果になっている。ヌセルト数の予測に関して, AWMで適用される温度の対数分布則がよどみ点領域において不適切であるため, AWMはヌセルト数をよどみ領域において定性的に予測できていない。DEWMはヌセルト数を定性的に予測できるが, 定量的には過大評価しており誤差は10~50%以内である。

AWMおよびDEWMを適用したLESにより複雑乱流場の数値解析を行った。乱流場が複雑になるにつれて壁近傍を代数式でモデル化することは困難であり, 高精度の予測を行うためにはDEWMで適用される境界層方程式の様に, より高次のモデルが必要とされる。本研究ではAWMの代数式としてSpalding則および温度対数分布則を適用したが, 逆圧力勾配平板境界層においては負の圧力勾配をモデルに反映できるDEWMがAWMよりも良い予測結果を得ている。また円形衝突噴流の熱流動解析ではAWMはよどみ領域においてヌセルト数を定性的に予測できていない。しかし静止直円管内旋回乱流では, DEWMは遠心力による乱れの増幅を表現できないため壁面剪断応力を

過小評価する。勾配リチャードソン数を用いて乱流渦粘性係数を修正したMDEWMは壁面剪断応力を高精度で予測することが可能である。またMDEWMは旋回のない円管内乱流も十分に予測できている。即ち乱流場の複雑さにおおじて境界層方程式の乱流渦粘性係数のモデル化を工夫することにより、DEWMの予測精度を向上させることができる。

壁面モデルDEWM,MDEWMを適用したLESはNo-Slipよりも低い計算負荷で平均速度など1次の乱流統計量を予測することができる。しかし2次の乱流統計量に関しては今回適用した壁面モデルで予測精度を改善することができない。また剥離流れなどのように更に乱流場が複雑になる場合は境界層方程式中の乱流渦粘性係数のモデル化を工夫する必要がある。その際、RANSがLESよりも優れているとされる利点の一つである、様々な乱流場を予測できる汎用性が損なわれないように、修正モデルの普遍性には留意しなければならない。壁近傍のGS渦構造を格子で直接解くことはLESにDNSに相当する計算負荷を要求することになる。よって気象関係や航空機、またゴミ焼却システムのような大規模な環境装置はレイノルズ数が非常に高いため、No-SlipのLESでは高精度の数値予測が不可能である。しかしDEWMおよびMDEWMを適用したLESはこのような高レイノルズ数の複雑乱流場を予測できる計算手法である。またこのような流れ場にDEWMおよびMDEWMを適用することが、LESの基本的概念である大きな渦だけを直接解くという真意を体現していると考えられる。



壁面モデルにより正しい壁面剪断応力を算出する必要がある

図1 滑り無し境界条件と壁面モデルの比較

	平行平板間乱流	円管内乱流	逆圧力勾配平板境界層	静止直円管内旋回流	円筒炉内強旋回流	円形衝突噴流
壁面境界条件	AWM	AWM	AWM			AWM
	DEWM	DEWM	DEWM	DEWM		DEWM
		MDEWM		MDEWM	MDEWM	
	No-Slip	No-Slip		No-Slip		

図2 解析例と壁面境界条件に適用した手法

	平行平板間 乱流 DEWM	円管内 乱流 DEWM	逆圧力勾配 平板境界層 DEWM	静止直円管内 旋回流 MDEWM	円筒炉内 強旋回流 MDEWM	円形衝突噴流 熱流動解析 DEWM
平均速度	○	○	△	○	△	○
壁面剪断応力	○	△	△	○		
旋回強度				○		
2次の 乱流統計量	△		×	△	○	×
ヌセルト数						△
計算時間 (No-Slipを 100%)	13%	25%		35%		
計算時間 (Fine No-Slipを 100%)	3.25%	2.5%		1.4%		

図 3 計算精度および計算時間