

平成 21 年 6 月 22 日現在

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2007～2008

課題番号：19760400

研究課題名（和文）実大円柱構造物まわりの流れに関する LES 解析

研究課題名（英文）LES analysis of the flow around a realistic scale-structure with circular section

研究代表者

小野 佳之（ONO YOSHIYUKI）

株式会社大林組技術研究所・環境技術研究部・副主査

研究者番号：70393593

研究成果の概要：実大円柱まわりの流れは、縮尺相似則の問題から通常の風洞実験や流体計算で再現するのは困難である。本研究では、大規模計算機の利用により細かい解像度を確保した上で、実大スケールの円筒形構造物まわりの複雑な流れを再現するための解析手法の検討を行った。その結果、精度良く再現できる計算条件・モデルを示すとともに、得られた解析結果から、これまでの実験的考察では得られなかった円柱近傍の複雑な流れ特性を明らかにした。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,700,000	0	1,700,000
2008年度	1,600,000	480,000	2,080,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	480,000	3,780,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学・建築構造・材料

キーワード：構造設計・風工学

1. 研究開始当初の背景

(1) 円柱まわりの流れや作用する空気力に関しては、風洞実験や水槽実験を用いて古くから研究が行われており、縮尺の相似パラメータであるレイノルズ数 ($Re=UD/\nu$ 、 U : 流速、 D : 円柱直径、 ν : 動粘性係数) に依存して複雑に変化する特性が明らかにされてきた。しかし、強風時の円筒形タワーや、煙突など、建築構造物まわりの流れは、レイノルズ数が非常に高い超臨界あるいは極超臨界流れに分類され、縮尺の相似条件の問題から一般の風洞実験（亜臨界：流れが層流剥離）で再現することは不可能である。

(2) 近年急速に発達している流体解析は流

れの詳細を把握できるといった利点があり、また今後の大規模計算の実現により高レイノルズ数流れを再現できる手法として期待されている。しかしながら、現状では計算機の性能や解析手法の問題から、レイノルズ数が数万～十万程度の流れを対象とした計算がほとんどであり、実大スケールの円柱構造物まわりの流れを的確に再現した例はない。

2. 研究の目的

本研究では、急速に普及している超高速計算機の利用により大規模計算を実施し、実大スケールの非常に高いレイノルズ数域における円筒形構造物まわりの流れを再現する

解析手法の検討を目的とする。まず、平板乱流などの基礎研究における乱流モデルを調査し、実大円柱構造物まわりの流れへ適用できる乱流モデルを検討する。同時に既存の解析コードを大規模計算向けに改良した上で、計算負荷・精度などを考慮し、計算条件の選択を行う。最後に、各種乱流モデルを用いた大規模流体計算を実施し、実大スケールの高いレイノルズ数域における円筒形構造物まわりの流れを再現する解析手法の検討を行う。

3. 研究の方法

高いレイノルズ数域における円柱構造物まわりの流れを再現する解析手法の検討には、高速計算機の利用および乱流剥離現象を捉える適切な乱流モデルの適用が必要である。そこで、本研究は以下に示す方法・計画で進める。

- (1) 平板乱流などの基礎研究における乱流剥離現象を再現可能な乱流モデルを調査し、実大円柱構造物まわりの流れへ適用できる乱流モデルを検討する。検討結果に基づき、乱流モデルを既に構築済の非定常流体計算手法に組み込む。
- (2) 既存の計算コードを大規模並列計算機向け解析コードに改良し、精度・高速化性能を検証する。さらに、円柱構造物まわりの流れの解析結果への格子解像度依存性などを検討することで、計算条件を決定する。
- (3) 各種乱流モデルを用いた大規模流体計算を実施する。
- (4) 解析精度を検証し、解析手法や乱流モデルの変更を行う。

4. 研究成果

(1) 格子解像度の影響を検討するため、周方向に500分割、スパン方向に50分割したgrid1に対し、スパン方向に格子点を増やしたgrid2、さらにスパン方向の格子解像度を向上させたgrid3（メモリの都合上、分割数をgrid2と同様とし、スパン方向長さを半分）を用いて計算を行った。

空気力係数の結果を表1に示す。Grid1を用いたケースは既往の実験結果と比べて抗力係数 $C_{D_{ave}}$ が大きい。また、既往の計算結果と同様にストローハル数（ St ）の急増も再現できていない。他の乱流モデル、数値粘性などを変化させても同様であった。一方、スパン方向の分割数を150に急増させ、解像度を上げると、いずれのケースも抗力係数が減少し実験結果に近づいている。さらに、実験結果で認められているストローハル数の増加が本計算により再現されていることが判る。

これまでの研究により、高レイノルズ域

の流れは、円柱の周方向の解像度が解に大きく影響を与えると考えられてきた。本研究により、スパン方向の解像度が解に大きく影響を与え、従来に比べ非常に細かい格子を採用する場合には、これまで再現が困難であった超臨界域におけるストローハル数（渦放出周波数）の急激な増加が再現できることが明らかとなった。

表1 得られた空気力係数の比較

Numerical condition		Computational results		
mesh	SGS model	$C_{D_{ave}}$	$C_{L_{rms}}$	St
Grid1 スパン方向 長さ2D 51分割	DS	0.36	0.13	0.30
	DM	0.33	0.12	0.30
Grid2 スパン方向 長さ2D 151分割	DS	0.27	0.13	0.4
	DM	0.23	0.07	0.43
Grid3 スパン方向 長さD 151分割	DS	0.26	0.13	0.43
	DM	0.21	0.08	0.48
EXP		0.2-0.4	0.02	0.42
		4	-0.13	-0.48

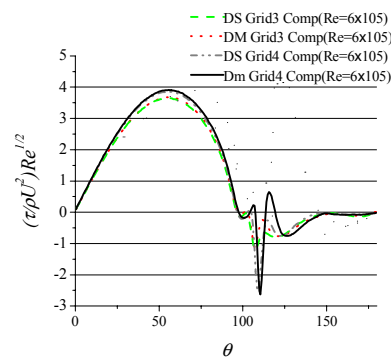
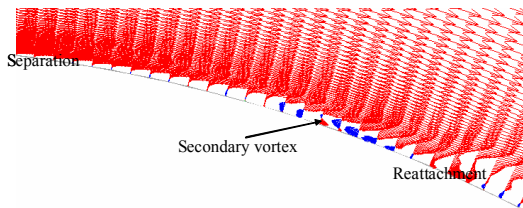


図1 摩擦係数の比較

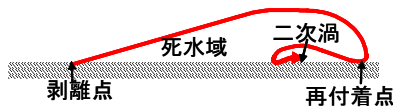
(2) 次に、既往の実験的研究で報告されている超臨界域の円柱からの流れの剥離・再付着現象に関する再現性について検討した。図1に表面の摩擦係数の比較を示す。超臨界域の流れは円柱から剥離した流れが円柱表面に再付着するため、その近傍では平均場として正の風速（主流と同じ方向の流れ）になるものと考えられる。しかし、用いる乱流モデルによって、その再現性が異なり、ダイナミクス・マゴリンスキーモデルを用いた場合、再付着現象が再現されないこ

とが明らかとなった。それに対しダイナミック・ミックスモデルを用いた計算結果は、再付着点近傍で全体的に風速が増加し、平均的に正の風速が再現されることが判った。

(3) 得られた解析結果を用いて円柱近傍の流れを考察した。図2に円柱近傍のある断面の瞬間速度のベクトル図およびイメージ図を示す。円柱から剥離した流れは再付着すると剥離バブルが形成される。その際、剥離バブル内に二次渦が発生し、その風上側では死水域を呈することが判った。



(1) 円柱近傍の速度ベクトル図



(2) イメージ図

図2 円柱近傍の流れ

図3、図4に円柱近傍の渦度のコンター図を示す。剥離点近傍は層流が維持され、バブル逆流域の剥離せん断層で乱流化が急激に進行している。そして、剥離バブルは三次元性を有し、スパン方向に崩されていることが確認できる。これは、既往の実験的研究で得られた知見と同様である。また、本計算で得られた円柱近傍の流線に関してLoiseauらによるスパン方向の流れの特徴を現した可視化結果と比較すると(図5、解析結果は剥離点より風下側の領域を拡大表示)、両者ともに剥離バブルの崩壊により剥離点から直接剥がれた流れが数本の束となる現象が認められる。

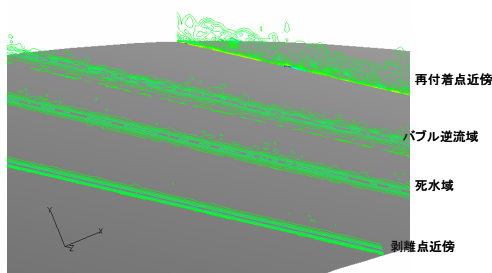


図3 円柱表面に直交する面の渦度のコンター図

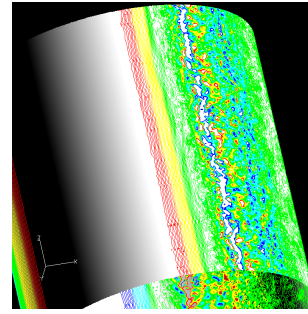
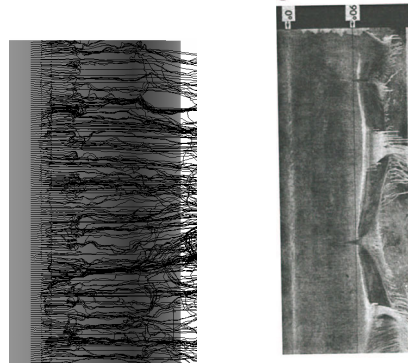


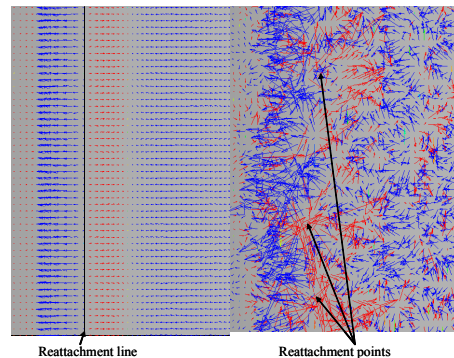
図4 円柱表面に平行な面の渦度のコンター図



Computations Oil flow patterns

[Loiseauら]

図5 流線の比較



平均

瞬間

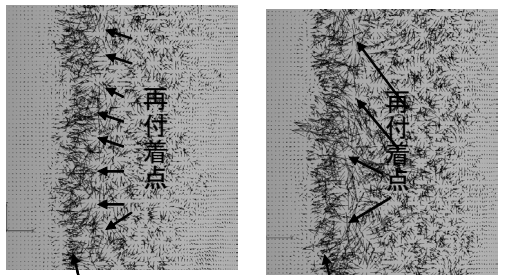
図6 円柱近傍の速度ベクトル図

次に、剥離バブルの挙動の詳細をみるため、図6に円柱表面第一格子点における平均および瞬間速度ベクトル図を示す。時間平均した流れ場では、再付着線が軸に平行である。すなわち、二次元的な剥離バブルが形成されている。一方、瞬間場を見てみると、再付着線は明確ではない。すなわち、瞬間場では流れの再付着は三次元的であり、淀み点がスパン方向に点在している。そして、流れが点在する淀み点に当たり流れの発散が生じており、円柱近傍の表面の点であるにも拘わらず、非常に大きな風速が認められる。上記剥離バ

ブルの崩壊は、この三次元的な再付着に伴う流れの発散に関連するものと考えられる。

既往の研究によれば、剥離バブルの崩壊は、レイノルズ数の増加とともに顕著となることが報告されている。図7にレイノルズ数が変化した時の円柱近傍の速度ベクトル図を示す。また、レイノルズ数の増加に伴い、流れが再付着する淀み点の間隔がスパン方向に広がるとともに、その付近の流れの発散の風速が急増し、剥離バブルは崩壊していく。そして、剥離バブルが消滅すると、せん断層が傾き、円柱の背後で渦の巻き込みが認められた。

以上、本研究では細かい解像度を確保した条件の下で、実大スケールの円筒形構造物まわりの複雑な流れを再現するための解析手法の検討を行った。その結果、スパン方向の解像度を確保し、ダイナミック・ミックスモデルを採用した場合に、既往の解析で困難であったストローハル数の増加が再現できることを示した。また、超臨界域の流れの再付着に伴い淀み点がスパン方向に点在し、流れの発散現象が生じることを明らかにした。この現象は円柱ばかりではなく、曲面を有する多くの構造物で生じる可能性があり、今後、さらに詳細な検討が必要と考えられる。

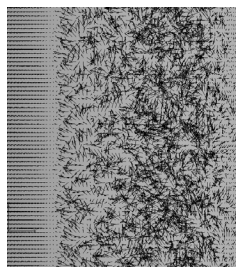


剥離バブル

剥離バブル

(1) $Re=3.5 \times 10^5$

(2) $Re=6 \times 10^5$



剥離バブルなし

(3) $Re=2 \times 10^6$

図7 レイノルズ数の違いによる剥離バブル変化(速度ベクトル図)

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計1件)

小野佳之、田村哲郎、超臨界域における円柱まわりの流れに関する LES 解析、第20回風工学シンポジウム論文集、385-390、2008年、査読有

[学会発表](計4件)

Y.ONO、T.TAMURA、LES of flows around a circular cylinder at the critical Reynolds numbers、60th annual meeting Division of fluid dynamics(American physical society)、2007年、査読無

Y.ONO、T.TAMURA、LES of flow around a circular cylinder in the critical Reynolds number region、BBAA VI International Colloquium on Bluff Bodies Aerodynamics & Applications、2008年、査読無

小野佳之、田村哲郎、超臨界域における円柱まわりの流れに関する LES 解析、日本流体力学会年会 2008 講演要旨集、2008年、査読無

Y.ONO、T.TAMURA、LES of flows around a circular cylinder at critical and super critical Reynolds numbers、61th annual meeting Division of fluid dynamics *American physical society*、2008年、査読無

6. 研究組織

(1)研究代表者

小野 佳之 (ONO YOSHIYUKI)

株式会社大林組技術研究所・環境技術研究部・副主査

研究者番号：70393593

(2)研究分担者

()

研究者番号：

(3)連携研究者

()

研究者番号：