応用力学論文集 Vol.11, pp.779-787 （2008 年 8 月） 土木学会

トラス構造空力特性の数値解析

Numerical analysis of aerodynamic characteristics of a typical truss structure

岡本 大寿 *, 中山 昭彦 **, 竹田広希 ***
Daiju OKAMOTO, Akihiko NAKAYAMA and Hiroki TAKEDA

*野村総合研究所（〒100-0005 東京都千代田区丸の内 1-6-5）
**正会員 Ph.D. 神戸大学教授，工学研究科市民工学専攻（〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1）
***学生員，神戸大学大学院工学研究科市民工学専攻（〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1）

Large eddy simulation (LES) of a flow past a typical trussed structure has been conducted. The method is so called an implicit LES with dissipative differencing of the nonlinear terms but standard Smagorinsky model is used for the sub-grid scale stress. The sizes of the structure members are very small and the detailed shapes of the members are not resolved accurately. However, the simulated flow field is plausible with the drag force not too far off empirical formula and the wake and vortex structures are predicted well. It is thought to be due to the fact that the resistance of these frame structures is dominated by the form drag on individual solid members rather than the viscous skin-friction drag.

Key Words: *Trussed structure, Wind load, Large-eddy simulation, Solidity ratio*

1. はじめに

近年コンピュータの処理能力の向上によりさまざまな分野の流体運動の数値計算が可能となってきている．静止した単純な形状の物体を過ぎる流れはレイノルズ平均運動方程式（RANS）を用いる方法，あるいはラージ・エディー・シミュレーション（LES）法による解析が可能になり，風荷重など空力特性の予測も行われている（たとえば[1)-5)]）．著者ら[6)-8)]も静止あるいは１自由度振動する単純な形状の物体を過ぎる流れの数値計算を行っている．またこれまで風洞実験に頼っていた複雑な形状の物体の空力特性の評価にも数値シミュレーションの適用が可能となりつつある．

本研究は，単純形状，単体物体を過ぎる流れではなく，実際の構造物によく見られる，形状が複雑で，多数の部材や付加物からなるトラス構造物を過ぎる流れの数値解析を行ことによりその空力特性を予測しようとするものである．トラス構造は橋梁やタワーに広く用いられているが，それらの耐風設計は実験的，経験的な基準に頼っている．それも静的荷重が主で，３次元性や非定常性による動的空力特性の評価には個々のケースの模型実験が必要である．

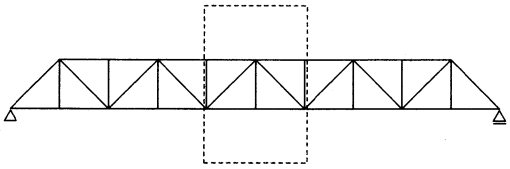
物体の空力特性の数値解析法としては，これまで乱流の平均量だけを求める RANS 法が主流であったが，瞬時の３次元非定常乱れ場を計算する LES シミュレーション法の信頼性，精度が確認できれば，後流渦の非定常性や部材ごとの荷重やモーメントの予測が可能になり設計により詳細なデータを提供できることになる．また構造物の設計のみならず構造物下流や近傍の風況の予測にもつながる．

問題は非常に込み入った形状を如何にどの程度解像しなければならないかである．部材の断面は構造物全体の大きさに比べ非常に小さくその形状を正確に解像することは不可能である．しかしパイプ構造など曲面をもつ部材ではなく，角材などの角ばった形状の物体の空力特性は形状の詳細やレイノルズ数の依存性が小さいことが知られている[9)]ので，形状を正確に解像しなくてもその特性を再現できる可能性がある．従って本研究では現在一般的に使える計算機で行える範囲で，複雑な部材の組合せの構造物を過ぎる流れがどの程度再現できるかを検証することが主目的である．

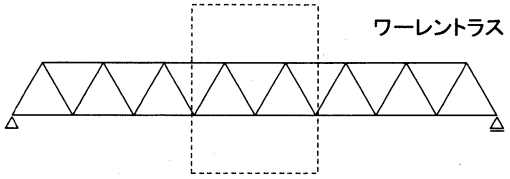
2. トラス構造物と空力解析モデル

トラス構造の代表的なものを**図-1** に示す．これらは橋梁の主構トラスを簡略化したもので，基本的構造は長さに応じ同じものが繰り返している．中段および下段のモデルはそれぞれ，ワーレントラス，ダブルワーレントラス構造で，空気力学的には，単位体積中の固体部材部分の割合や接合部の数や形状が異なるため風荷重も異なる．耐風設計上は横風に対する荷重が重要であるので，これらの構造の

(a) トラスA



(b) トラスB



(c) トラスC

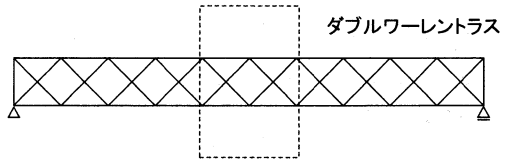


図-1 トラス構造の例

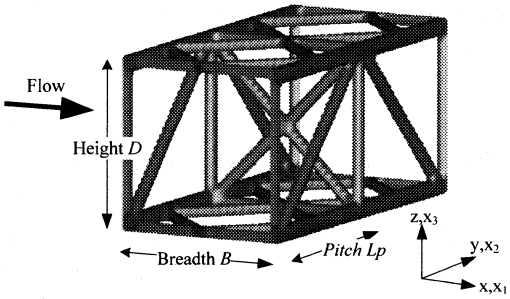
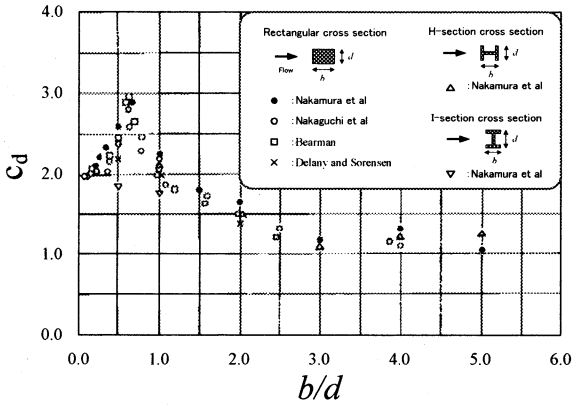


図-2 数値シミュレーション対象部

基本部分に風が横から吹いた場合の流れを解析計算の対象とする．構造物全体の抵抗を求めようとする場合モデル全体を計算領域にすべきであるが，本計算では**図-1** の破線で囲った部分だけ切り出し，両端周期境界条件を課すことで，計算負荷を軽減する．計算はこれら3種のトラスについて行うが，計算結果の詳細な考察は，**図-2** に示すように，**図-1** のトラスAの中央部について行ったものを重点的に行う．このトラスモデルの格間長 Lp は主構高さ D に等しく，斜部材は平面ではクロスするように，また立面ではカスガイ状に組まれている．この構造に横から風が当たる場合，風方向外郭投影面積あたりの部材の投影面積の比である「充実率」φは0.31である．この値はトラス構造の代表的なもので，この種の数値解析を初めて行うに適当なものである．

(d) 抵抗係数[14]



(b) Strouhal 数[15]

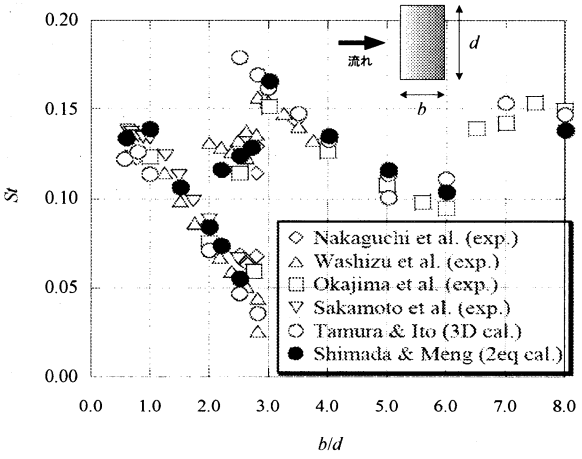


図-3 トラス部材の抵抗とStrouhal数

3. 数値解析法

本研究では既に，筆者ら[6),10)]により一様流中に置かれた角柱まわりの流れ，また複数の物体を過ぎる流れのシミュレーションに用いられ，検証されている LES 法を適用する．この手法の概要は以下のようである．

運動方程式と連続式は直交座標で Hirt & Cook [11)]による HSMAC 法を基にした方法により解かれ，移流項は3次精度の上流差分法（UTOPIA 法），粘性項は2次精度の中心差分法，時間進行は，3次精度の Adams-Bashforth 法を用いている．差分による離散化は不等間隔食違い格子上で行い，境界位置は各セルを物体セルと流体セルに区別し，物体セルと流体セルの界面で近似する．これは差分法に散逸性差分スキームを用いているので Implicit LES 法[12)]の一種であるが，サブグリッド応力として標準 Smagorinsky モデルも導入している．散逸性差分スキームを用いるのは解像が十分できない個々の部材の後流乱れによる不安定性を避けるためである．本計算対象のような構造物の場合，計算格子には overset grid や immersed boundary（IB）法[13)]が考えられるが，コーディングが比較的簡単で，精度や特性

表-1 角柱部材の詳細

ケース	格子線に対する角度	断面辺長比 b/d	Re 数 $Re_d=Ud/\nu$	断面内セル数 (M_x x M_z)	全グリッド数 (N_x x N_y x N_z)
M00102	0°	1.0	25,000	2x2	128x32x96
M00104	0°	1.0	50,000	4x4	128x32x96
M00106	0°	1.0	75,000	6x6	128x32x96
M00152	0°	1.5	25,000	2x3	128x32x96
M00154	0°	1.5	50,000	4x6	128x32x96
M00202	0°	2.0	25,000	2x4	128x32x96
M00204	0°	2.0	50,000	4x8	128x32x96
M45142	45°	1.4	25,000	2x2	128x32x96
M45143	45°	1.4	37,500	(3x3)	128x32x96
M60153	60°	1.5	37,500	(3x3)	128x32x96
M60202	60°	2.0	25,000	(2x2)	128x32x96

表-2 計算結果

ケース	計算結果		実験結果	
	C_D	St_d	C_D	St_d
M00102	2.21	0.083	2.0 ± 0.3	0.13 ± 0.01
M00104	1.78	0.143		
M00106	1.75	0.146		
M00152	1.23	0.094	1.7 ± 0.1	0.11 ± 0.01
M00154	1.58	0.128		
M00202	1.25	0.094	1.5 ± 0.2	0.08 ± 0.01 or 0.12 ± 0.01
M00204	1.43	0.128		
M45142	1.46	0.080	1.7 ± 0.1	0.11 ± 0.01
M45143	1.61	0.099		
M60153	1.53	0.086		
M60202	1.34	0.054	1.5 ± 0.2	0.08 ± 0.01 or 0.12 ± 0.01

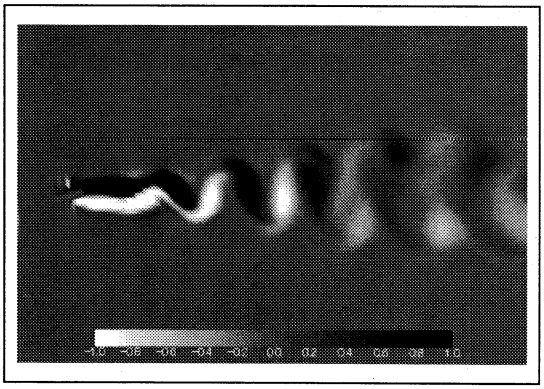


図-4 瞬時部材軸方向渦度分布の計算結果, ケース M01002.

が分かっている本方法を採用した.

境界条件は, 構造物のスパン方向に当たる y 軸方向の側面は周期境界とし, 鉛直方向である z 軸方向の上下面はすべり境界としている. 下流端では流入速度に等しい対流速度の放射境界条件を課している. 領域内に置かれた物体の表面は全て粘着条件を課している. 高レイノルズ数流れの壁面近傍を解像せず粘着条件を用いることは問題があるように思われるが, 本計算の結果から分かるように角ばった物体の形状抵抗を得るには粘着条件が適している.

4. 単一部材をすぎる流れの計算

上記のように構造物全体を計算対象とする場合, 個々の部材の解像は十分にできない. しかし角材の抵抗や渦放出周期などは形状に強く依存しない. **図-3(a)**は道路橋耐風設計便覧[14]に示されているH型断面I型断面それに長方形断面部材に横から風が当たる場合の抵抗係数, **図-3(b)**は辺長比の異なる長方形断面角注の Strouhal 数[15),16)]を示す. これによるとこれらの空力特性は部材の形状よりも辺長比に依存することが分かる. トラス構造全体の流れを巧く再現するには個々の部材にかかる抵抗と渦放出特性はある程度再現すべきなので予備計算としてトラス全体を計算する格子で単一部材をすぎる流れを計算した. 計算ケースは表-1 に示す 11 のケースである. 部材断面は長方形とし, 辺長比 1.0 から 2.0 の 4 種の断面について計算を行った. 部材断面は2x2,4x4,2x3, あるいは3x3 の格子セルで解像し, 部材軸が計算格子に沿う場合, 部材軸が格子線から 45 度, あるいは 60 度傾いている場合を想定した. 部材断面高さ d を基にしたレイノルズ数は 2x2 の解像度の場合 2500 で何れも計算領域の高さを基にしたレイノルズ数は一定である.

結果は**表-2** に示すとおりで, 解像度 3x3 以上の結果は同表に示す抵抗係数と d を基にした Straouhal 数 St_d の実験結果とよく合っている. 部材断面が 2x2 の解像の場合抵抗がやや大きく, 計算格子線から 60 度傾斜している場合 St_d は実験より小さくなっている.

瞬時流れ計算結果としてスパン方向渦度分布の一例を**図-4** に示す. 角柱直下流域はややなめされた後流になっているが角柱の幅の数倍下流では巧く後流渦が現われている.

これらの結果は, 断面形状は正確に解像しなくとも抵抗, 渦放出特性はまずまず再現できることを意味する. Jordan[16]は後流の乱流構造を解像するに必要は格子幅について調べているが, Kuwahara[17]は物体を一つのセルで表しても渦放出を再現できることをも示されている. 従って, これらの部材の組合わせからなるをトラス構造物周りの流れを計算するに本計算法に根本的な問題はないといえる.

5. 解析条件

次にトラス構造物を過ぎる流れに適用するのに, 計算領域と計算格子を**図-5** に示す. 計算に用いる座標は**図-2** を参考に, 風の方向に x, 橋軸方向に y、鉛直上方向に z としそれぞれの方向の風速成分を(u,v,w)とする. 計算領域はト

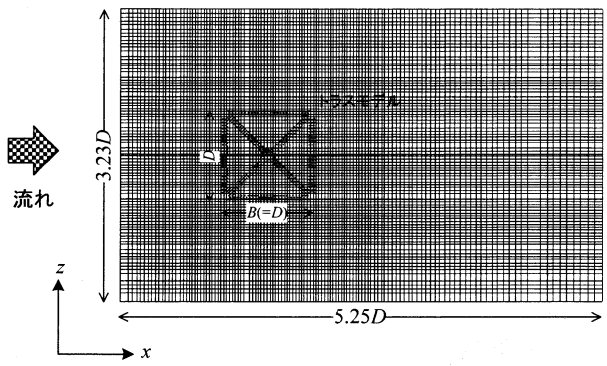


図-5 計算領域と計算格子

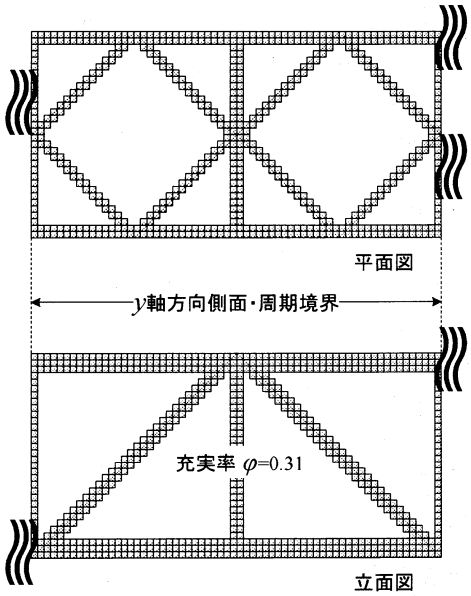
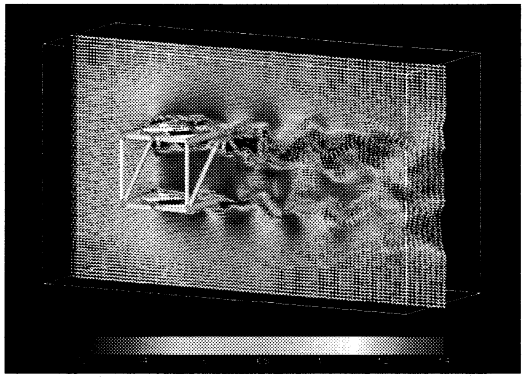


図-6 計算格子による部材の解像

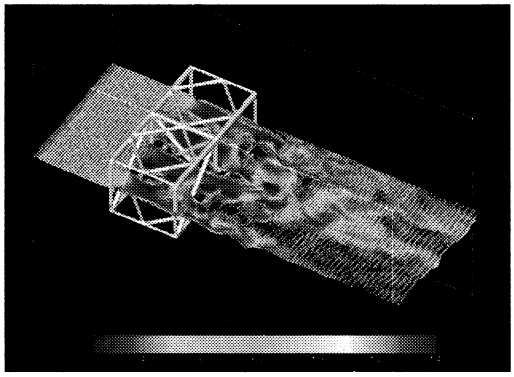
ラスの総高を D とすると，流れ方向に $5.25D$，鉛直方向に約 $3.23D$ とってある．この領域は不透過角柱の計算を行う場合と比べかなり小さいが，透過性構造物のトラスの場合遮蔽率は不透過性物体に比べ小さいため計算領域も小さめで良いと考えられる．今回は使用する計算機の容量の限界もあり格子数は x 軸方向に 128，y 軸方向に 64，z 軸方向に 96 点とし部材断面は格子セル２個あるいは３個で表現されている．この妥当性は結果から判断することにする．

解析は**図-1** に示すトラス A，B，C モデルについて行われた．これらのトラスモデルの φ の値はそれぞれ 0.23, 0.31, 0.43 である．流入流速 U_o と D を基にしたレイノルズ数は一定で 4.0×10^5 で，各部材の幅を基にしたレイノルズ数は 4 節で検証した単一部材をすぎる流れのレイノルズ数に等しい．これらは小規模風洞模型のスケールの流れの値の範囲である．LES 計算では高レイノルズ数流れを安定に計算するには細かい格子が必要になるが，本計算で安定に計算できる範囲の値である．トラス構造の空力特性の解析としては決して低い値ではない．

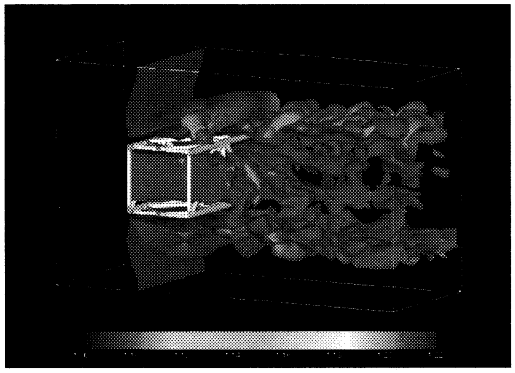
(a) 鉛直断面内瞬時風速ベクトル分布



(b) 水平断面内瞬時風速ベクトル分布



(c) 等速度面



(d) 鉛直断面内瞬時圧力分布

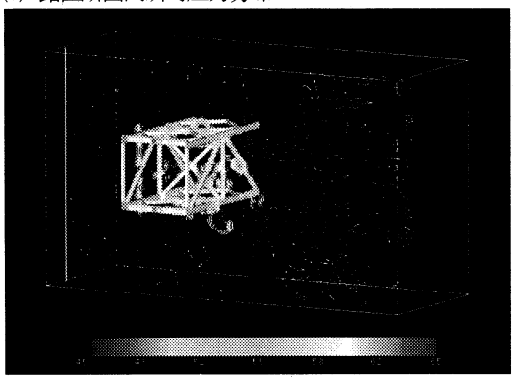


図-7 瞬時流れ場計算結果

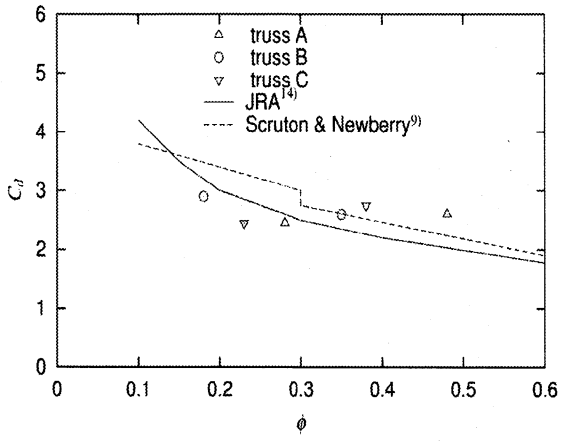


図-8 抗力係数

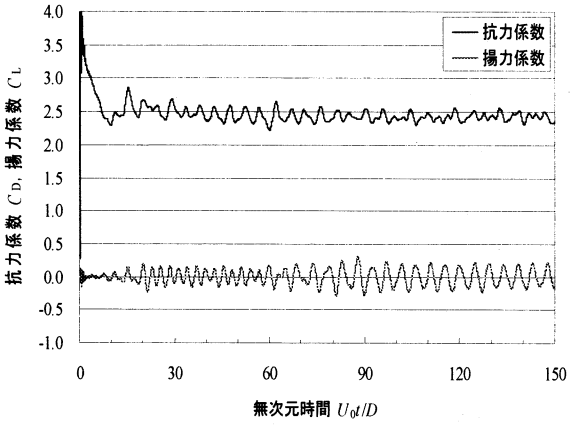


図-9 抗力係数と揚力係数の時系列

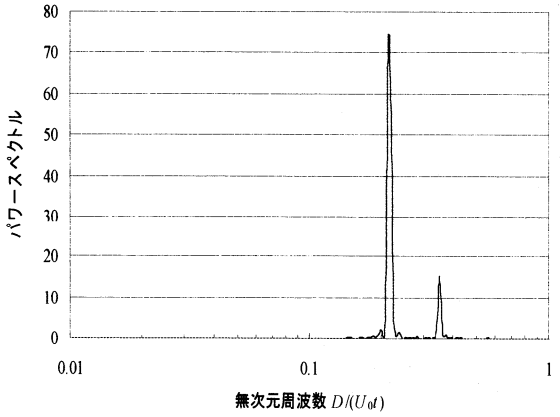


図-10 揚力係数のパワースペクトル

6. 計算結果

6.1 瞬時流れ場

瞬時流れ場の結果はφ=0.31 のトラス A について詳しく考察するが，他の φ の値の結果についてもほぼ同様な結果である．図-7 に，計算領域内の瞬時流れ場の計算結果を３次元的に可視化した図を示す．図-7(a)は鉛直部材のある面でのスパン方向断面内の風速ベクトル分布，図-7(b)は水平面内のベクトル分布を示す．個々の部材の下流で後流が形成され渦放出が見られる．これらの部材スケールの乱れは下流に移流するに従って近傍の渦と干渉し徐々に大きなスケールの運動に発達する過程が伺える．スパン方向には基本構造２周期分 2D の領域であるが本計算領域では十分であるといえる．図-7(c)は無次元流速 u/U_0=1.10 および 1.20 の 3 次元等値曲面を表している．この図も個々の部材の後流の生成とこれらの下流への移流と干渉を表している．図-7(d)は中心鉛直面内での圧力分布を示している．圧力分布は全体的に単一物体まわりの圧力分布に似ている．すなわち前面でほぼ淀み圧に近く下流側で低くなっている．しかし個々の部材のスケールではやはり前面で大きく背面で小さく，また下流ほど不規則な乱れも見て取れる．

以上の瞬時流れの計算結果は何れも，これまで知られている不透過性物体を過ぎる流れとその後流特性から予測される結果である．

6.2 抗力および揚力係数

トラス構造の抵抗係数 C_Dは，抗力 F_Dをトラス構造を流れ方向に投影した面積で無次元化したもので定義される．従って構造の空隙の効果はこの C_D に反映はされている．しかし立体的充実率 φ にも依存することが知られている．C_D の計算結果をφ に対してプロットしたものが図-8 である．抗力は部材表面の圧力分布より求め，摩擦応力は含めていない．同じトラスモデルで異なる φ の値があるのは，部材の太さを変えたためである．この図には Scruton & Newberry[9]による経験式，および「道路橋耐風設計便覧 [14]の関係式

$$C_D = \frac{1.35}{\sqrt{\varphi}} \tag{1}$$

も示してある．本計算結果の C_D の値はφ についての傾向はこれらの経験式の傾向と必ずしも一致していないが，値はほぼ合っており、10%程度のずれである．

次に抗力係数 C_D と揚力係数 C_L の時間変動を図-9 に示す．計算開始から t=60D/U_o までは計算開始後の過渡的な変化をするがそれ以降はほぼ定常的な変動を示している．C_L の変動はかなり規則的で，単体物体のように渦放出に関連していると考えられる．C_L に比べ C_D は不規則成分が大きいがこれも単体物体の場合と変わらない．また変動幅は 0.2 程度でかなり小さいことが分かる．

図-10 はこの変動揚力係数のパワースペクトルである．卓越周波数が 0.2U_o/D と 0.4U_o/D 辺りに見られる．この周

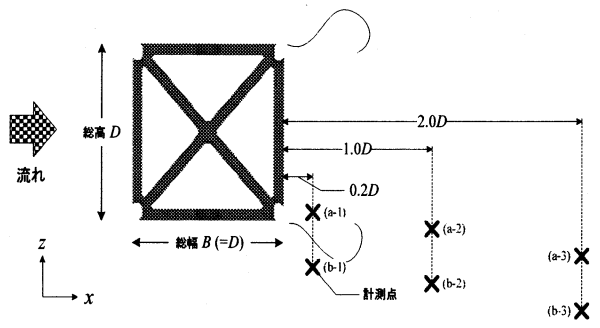


図-11 トラスモデル下流の流速変動の検索位置

波数を Strouhal 数にすると 0.2 で，これは**図-3** の辺長比 1 の角柱の Strouhal 数に近いもので[15]，揚力はトラス全体の高さ D を幅とする角柱の揚力変動特性に近いといえる．これは後述の部材別の荷重からも分かるように揚力変動は主に上流部材の後流が下流部材と干渉することに起因しているため，　渦発生周期も D に依存しているためと考えられる．

6.3 後流風速の乱れと渦放出特性

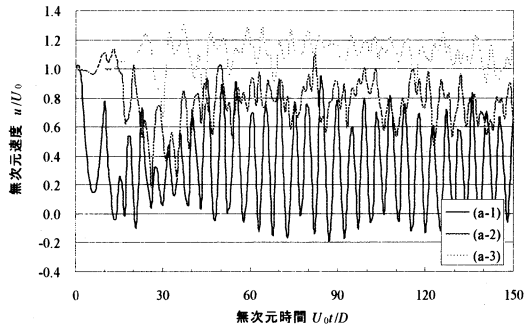
次にトラス構造下流の風速と渦放出についての結果を詳しく調べる．**図-10** に風速変動の詳細を調べる点の位置を示す．Bearman[18]によると，流れに対して垂直な辺の長さが D の角柱に関しては，角柱の後端から 1.0D ないしは 2.0D 程度下流において，角柱投影面の外郭近傍で風速が渦放出に影響される領域があると報告されている．トラス構造の場合，構造全体からの渦放出と部材からの渦放出が予想されるので，乱流後流にはいると思われる点 a-1，a-2，a-3 とその外の領域の点 b-1，b-2，b-3 での風速変動を調べる．これらの点はそれぞれトラス構造の下流端より 0.2D，1.0D，2.0D の位置である．

図-11 にこれらの点での流れ方向風速の時系列とそのパワースペクトルを示す．**図-11 (a)**は点 a-1，a-2，a-3 での流れ方向流速 u の時系列である．点 a-1 では変動幅は大きいが規則的である．これに対し点 a-2，と a-3 では変動幅は点 a-1 より小さいが不規則な変動が卓越している．後者は乱流後流にはいっていると考えられる．

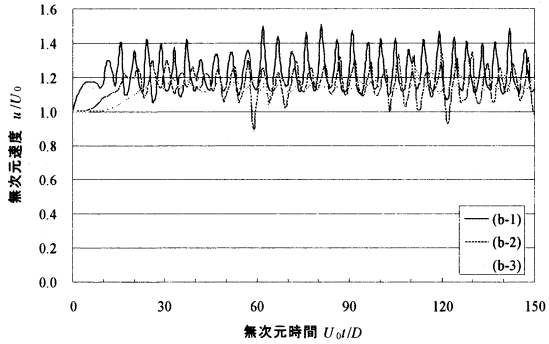
図-11(b)は点 a-1，a-2，a-3 より下側の点 b-1，b-2，b-3 での流れ方向流速 u の時間変化である．これらの点では流速の値も大きく変動も規則的なもので乱流後流の外側で主に変動は渦放出によるポテンシャル流的変動であると考えられる．

図-11(c),(d)は上記の点の変動風速のパワースペクトルである．部材の後流内の点 a-1 のスペクトルは 0.15U_0/D で大きなピークがみられるが，b-1，b-2，b-3 の点では 0.2U_0/D のピークは小さくなり，低周波数の 0.02U_0/D から 0.03U_0/D 辺りにやや幅の広い領域にピークが見られる．これは構造全体のスケールの変動に関係するものと思われる．従ってトラス後流内では部材スケールの変動が卓越し，

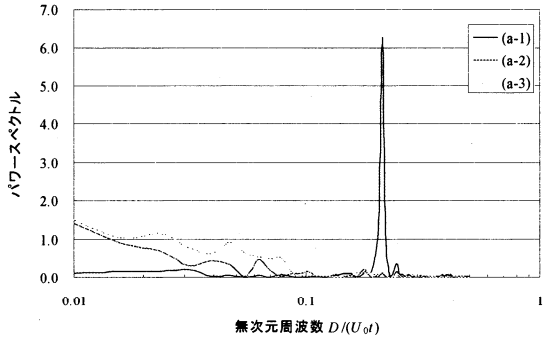
(a) a-1，a-2，a-3 での風速 u の時系列



(b) b-1，b-2，b-3 での風速 u の時系列



(c) a-1，a-2，a-3, での変動風速のパワースペクトル



(d) b-1，b-2，b-3 での変動風速のパワースペクトル

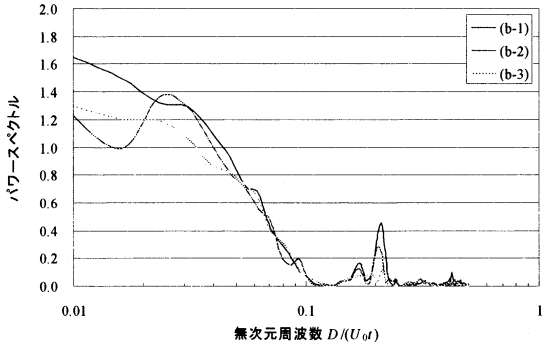


図-12 流速の時系列とパワースペクトル

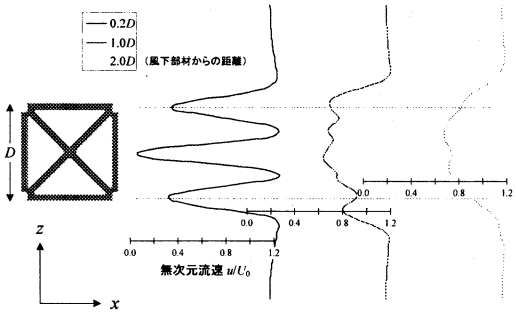


図-13 鉛直部材間中央断面下流の平均風速分布

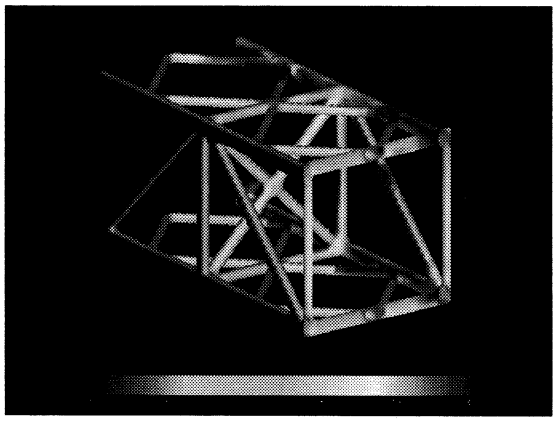
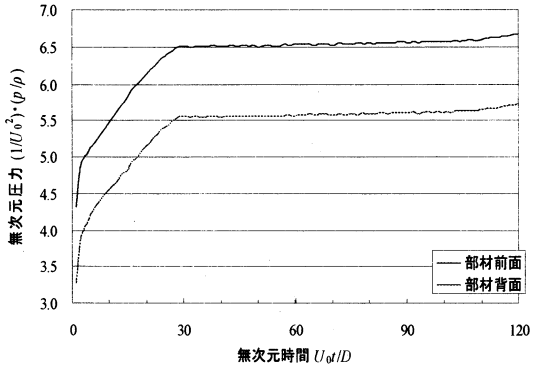


図-14 部材表面の時間平均圧力

(a) 風上部材



(b) 風下部材

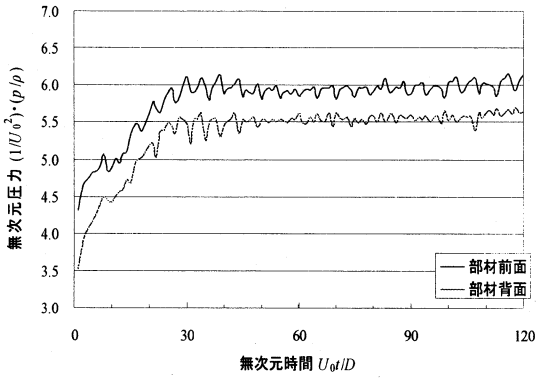


図-15 部材にかかる圧力抵抗の時間変動

外側では構造全体のスケールの変動が大きくなっている.

6.4 平均風速分布

次にトラス構造下流の平均風速分布の結果を示す. 図-13は, トラス構造鉛直部材間中間の下流 0.2*D*, 1.0*D*, 2.0*D* での鉛直断面内の平均風速分布である. 0.2*D* の位置では部材の下流の後流が顕在し, 部材下流で大きな速度欠損が見られる. 1.0*D* 下流では個々の部材の後流が合流しひとつの後流になっている. 2.0*D* 下流では構造全体の後流になっているがその幅は単一物体の後流のように広がらず, 速度分布だけが滑らかになっていく形になっている. 乱れスケールまたそれによる渦粘性が小さいためと推察される.

6.5 部材別風荷重分担特性

次に部材ごとに異なる風荷重の分担特性に関して詳細な分析を行う.

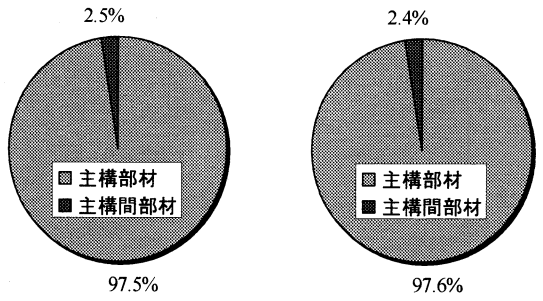
図-14に部材表面の時間平均圧力分布を示す. 各部材の風上側の圧力は背面より大きくなっているが, 風上部材の前面で圧力が最も高くなっている. また主に主構造に大きくかかり主構間の部材は主構造の背後になっているためか荷重はあまりかかっていないことが分かる.

次に主な部材にかかる抗力の時間変化を図-15 に示す. 図-15(a)の風上部材の風圧は計算開始の過渡的変化を除けば比較的安定でしかも大きい, すなわち前面と背面での値の差が大きい. これに対し図-15(b)に示す風下部材の前面と背面にかかる圧力差は小さく荷重も小さいが, 変動幅風上部材に比べかなり大きくなっている. これは下弦材は風下にあるため, 風上の主構に乱された流れ場の影響を受けるためと考えられる.

図-16は, 主構の部材とそれ以外の主構間の部材にかかる抗力の割合の瞬時値の例を示したものである. 主構間の横構や対傾構に作用する抗力は全体に比べ微量であり, 大部分は上弦材・下弦材・垂直材・斜材の主構部材が分担していることが分かる.

7. まとめ

橋梁やタワーによく見られるトラス構造の空気力学特性がラージ・エディー・シミュレーション (LES) 法でどの程度再現可能であるのかを, 一般的なトラスのモデルに



(a) 無次元時間 60　　(b) 無次元時間 90

図-16 瞬時における抗力分担の割合

ついて数値計算することにより調べた．これまでトラス構造のような細い部材が多数組み合されてできている複雑でしかも透過性の物体を過ぎる流れの数値解析はなされていないが，角材で構成されている構造の場合，部材の詳細は解像しなくとも，直交格子で部材の遮蔽率などを合わせれば構造物全体のまわりの流れは概ね再現され，空力特性の予測もできることが分かった．

時間平均抗力係数充実率に対する傾向は既往の実験結果からややずれているが，値自体は風洞試験結果とほぼ一致する結果が得られた．

シミュレーション結果からは抵抗以外に非定常性，部材ごとの荷重，部材の圧力分布、また速度場など実験では簡単に得られない流れの詳細が得られた．渦放出特性は個々の部材からの渦放出より構造全体のスケールの渦が主になっている．部材別荷重はその大半を主構が負担し，主構間の部材は，前面と背面の圧力差はほとんど生じることがなく，抵抗も小さい．非定常荷重は上流部材より下流部材が大きい．上流部材で剥離した流れが下流の部材に衝突することで下流側の部材の非定常荷重は上流のそれに比べ非常に大きい，などいろいろな特性が明らかになった．

以上のように物体とその近傍の小スケール形状と小スケール運動は解像しなくとも構造物全体の抵抗や流れ特性が巧く再現できるのは，角材からなる物体の場合個々の部材にかかる流体力は，速度分布の詳細に依存する摩擦応力より全体の形状に依存する圧力が主で，その圧力分布は剥離を巧く再現できれば巧く計算できるためである．直交格子を用いた場合，部材角の剥離が良好に再現できるので，実質的な剥離域の幅が得られるよう部材の大きさをとれば全体の抵抗も再現できることになる．また流れの非定常性は個々の部材からの非定常渦放出より，部材間の相互干渉によるところが大きく，部材の詳細よりその相対的配置が実際とあっておれば干渉もほぼ捉えられるためと考えられる．今後計算速度が速く容量の大きい計算機を使えばさらに現実的な構造物の空力解析が可能となるであろう．

参考文献

1) Rodi,W., Ferziger, J.H., Breuer, M. and Pourquie, M. :Status of large eddy simulation, *J. Fluids Engnrng.*, Vol.119, pp.248-262, 1997.

2) Kuroda, M. , Tamura, T. and Suzuki, M.: Applicability of LES to the turbulent wake of a rectangular cylinder - Comparison with PIV data, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 95, 1242–1258, 2007.

3) 加藤真志：修正k-e法を用いた静止，振動角柱の２次元流れ解析，土木学会論文集，No.577/I-41，pp.217-230, 1997.

4) Lubcke, H., Schmidt, S., Rung, T. and Thiele, F. : Comparison of LES and RANS in Bluff-Body Flows, comparison of LES and RANS in Bluff-Body Flows," *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, Vol. 899, pp.1471471-1485, 2001.

5) Murakami, S. and A. Mochida, A.: On turbulent vortex shedding flow past 2D square cylinder predicted by CFD, *J. Wind Eng Ind. Aerodyn.* 54&55 191-211, 1995.

6) 中山 昭彦, 永井 史保, 野田 博: LES による角柱の振動応答解析, 応用力学論文集, Vol.1, pp.633-640, 1998.

7) Nakayama, A. and Noda, H.: LES simulation of flow around a bluff body fitted with a splitter plate, *J. of Wind Eng.and Ind. Aerodyn.*, Vol.85, pp.85-96, 2000

8) 堀 高太郎，中山 昭彦: LES によるタンデム角柱の応答解析，応用力学論文集, Vol.7, pp.987-996, 2004

9) Scruton, C. and Newberry, C. W.:On the estimation of wind loads for building and structural design, *Proc. Inst. Civil Engs.* Vol.25, pp.97-126, 1963.

10)Nakayama, A. and Vengadesan, S.N.: On the influence of numerical schemes and subgrid-stress models on large-eddy simulation of turbulent flows past a square cylinder, *Int. J. Numer. Meth. In Fluids*, Vol.38, pp.227-253, 2002.

11)Hirt, C.W. and Cook, J.L.: Calculating three-dimensional flow around structure and over rough terrain, *J. Comp. Phys.* pp.324-340, 1972.

12)Grinstein, F.F., Margolin, L.G. and Rider, W.J.:*Implicit Large Eddy Simulation,* Cambridge University Press, Cambridge, 2007.

13)Fadlun, E. A., R. Verzicco, P. Orlandi, and J. Mohd-Yusof,: Combined Immersed-Boundary Finite-Difference Methods for Three-Dimensional Complex Flow Simulations, Journal of Computational Physics *t,r* 35–60, 2000.

14)社団法人日本道路協会：道路橋耐風設計便覧, pp.52-70, 1991.

15)嶋田健司，孟岩：種々の断面辺長比を有する矩形断面柱の空力特性評価に関する修正型k-eモデルの適用性の検討，日本建築学会構造系論文集，第514号，pp.73-80, 1998.

16)Okajima, A.:Strouhal number of rectangular cylinders, *J. Fluid Mech.*, Vol.123, pp.379-398, 1982.

17)Kuwahara, K.:Rearrangement of Kaman Vortex Street, 第13 回数値流体力学シンポジウム講演要旨集，p.227, 1999.

18)Bearman, P.W.: Investigation of the flow behind a

two-dimensional model with a blunt trailing edge and fitted with splitter plates, *J. Fluid Mech.,* Vol.21, part2, pp.241-255, 1965.

(2008 年 4 月 14 日　受付)