

耐風設計に向けたCFDの活用

Application of CFD toward Wind Resistant Design of Structures

枝元 勝哉

Katsuya EDAMOTO

川田工業(株)技術研究本部技術開発室室長

原 幸久

Yukihisa HARA

川田工業(株)技術研究本部技術開発室

畠中 真一

Shinichi HATAKENAKA

川田工業(株)技術研究本部技術開発室

本報告は、耐風設計の合理化を図ることを目的とした計算流体力学(CFD)の適用性について報告するものである。流れの数値シミュレーション解法として、Petrov-Galerkin型の気泡関数要素を用いた有限要素法を採用し、非圧縮性流体の基礎方程式に基づく計算手順と安定化作用の基本的な考え方を述べる。また、数値シミュレーションの実施にあたっては、解析対象領域を複数の部分領域に分けて計算を進める並列計算技法を利用しており、このための計算機環境の一つであるPCクラスターについて概説する。最後に、これらの技術を応用した数値シミュレーション事例として、鋼2主桁断面を対象とした流れ解析と山岳地帯における局地風の予測例について報告する。
キーワード：流れ, CFD, 有限要素法, 気泡関数, PCクラスター, 並列計算

1. はじめに

構造物の設計に際して風による影響を議論する場合、一般には作用する力や発生する振動現象が問題になる。また、最近では、建設地点における局地風の評価や建設後の気流変化が周辺環境に与える影響なども、設計を進める上で重要な検討項目に位置づけられる場合が多い。

いずれの場合においても、風による構造物の耐風安定性や周辺に与える影響が設計上極めて重要な位置を占める際には、従来より風洞試験を用いた耐風性の検証がもっとも信頼性の高い評価手段として利用されてきた。

ところで、建設コスト縮減という近年の社会的な要請の中で、例えば橋梁を例にとった場合にも製作の省力化を図った合理化形式が増加しており、その結果、従来は机上の耐風検討¹⁾のみで十分と考えられていた橋梁形式に関して、風洞試験を行うことによって耐風設計上の新たな知見²⁾が得られつつある。また、構造物自身の耐風安全性のみならず、利用者や周辺環境に及ぼす風の影響³⁾もこれからの設計には必要不可欠な要素であり、耐風検討の必要性は今後形を変えながらも依然少なくはならないと言える。すなわち、耐風検討を必要とする設計要素が多様化していく一方で、コストの縮減を同時に図る必要があるということであり、風洞試験と比較してコストパフォーマンスに優れた耐風検討手段として流れの

数値シミュレーション = 計算流体力学 (computational fluid dynamics, CFD) への期待⁴⁾はますます高まっている。

本報告では、まずはじめに数値流体解析手法の一つである気泡関数要素を用いた有限要素法⁵⁾について説明し、ついで、近年活発に検討が進められているPCクラスター⁶⁾を利用した流れ解析に関して概説する。最後に、これらの技術を応用した数値計算例として、鋼2主桁断面を対象とした流れ解析と山岳地帯における局地風の予測例⁷⁾について紹介する。

2. 数値解析手法

耐風検討に際しては、対象となる構造物周辺における風の流れ場を取り扱う必要がある。本章では、これらの流れ場を支配する基礎方程式について概説し、その後、流れの数値シミュレーション技法の一つである有限要素法について説明を行う。

(1) 基礎方程式

重力項を考慮しない非圧縮性流体を仮定し、流れ場を支配する基礎方程式として、以下のNavier-Stokes方程式(運動方程式)と連続の式(質量保存則)を採用する。

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j u_{i,j} + p_{,i} - \frac{1}{Re} (u_{i,j} + u_{j,i})_{,j} = 0 \quad \text{in } \Omega \quad (1)$$

$$u_{i,i} = 0 \quad \text{in } \Omega \quad (2)$$

ここに、 u_i, p は、流れ解析の対象となる領域 Ω 内において適切に無次元化された流速と圧力、また、 Re はレイノルズ数を表す。

領域 Ω の境界 Γ は Γ_1 と Γ_2 に分けられており、それぞれ以下の式で表す境界条件が課せられる。

$$u_i = \hat{u}_i \quad \text{in } \Gamma_1 \quad (3)$$

$$\left\{ -p \delta_{ij} + \frac{1}{Re} (u_{i,j} + u_{j,i}) \right\} \cdot n_j = \hat{t}_i \quad \text{in } \Gamma_2 \quad (4)$$

ここに、 δ_{ij} はクロネッカーのデルタ関数、 n_j は境界の外向き法線ベクトルである。また \hat{u}_i, \hat{t}_i はそれぞれ境界上の既知流速と表面力を表す。

(2) 時間方向の離散化

運動方程式(1)に対する時間方向の離散化手法として、安定性に優れた陰的解法であるCrank-Nicolson法を適用する。また、連続式(2)は完全陰的に表す。

$$\frac{u_i^{n+1} - u_i^n}{\Delta t} + u_j^* u_{i,j}^{n+1/2} + p_{i,i}^{n+1} - \frac{1}{Re} (u_{i,j}^{n+1/2} + u_{j,i}^{n+1/2})_{,j} = 0 \quad (5)$$

$$u_{i,i}^{n+1} = 0 \quad (6)$$

ここに、

$$u_i^* = \frac{1}{2} (3u_i^n - u_i^{n-1}), \quad u_i^{n+1/2} = \frac{1}{2} (u_i^{n+1} + u_i^n)$$

である。移流速度の線形近似である u_j^* には、時間増分量 Δt に関して2次精度のAdams-Bashforth公式を用いている。

次に、式(6)の連続式を完全には満たさない中間流速 \tilde{u}_i を導入し、圧力に関するPoisson方程式を導出する。

運動方程式(5)の圧力 p^{n+1} に対する近似値として前時間ステップの圧力 p^n を適用すると、式(5)は、未知流速 u_i^{n+1} を中間流速 \tilde{u}_i^{n+1} に置き換えた次式になる。

$$\frac{\tilde{u}_i^{n+1} - u_i^n}{\Delta t} + u_j^* \tilde{u}_{i,j}^{n+1/2} + p_{i,i}^n - \frac{1}{Re} (\tilde{u}_{i,j}^{n+1/2} + \tilde{u}_{j,i}^{n+1/2})_{,j} = 0 \quad (7)$$

ただし、

$$\tilde{u}_i^{n+1/2} = \frac{1}{2} (\tilde{u}_i^{n+1} + u_i^n)$$

式(5)と式(7)の差を取ると以下の式が得られる。

$$\frac{u_i^{n+1} - \tilde{u}_i^{n+1}}{\Delta t} + \frac{1}{2} u_j^* (u_{i,j}^{n+1} - \tilde{u}_{i,j}^{n+1}) + (p_{i,i}^{n+1} - p_{i,i}^n) - \frac{1}{2} Re^{-1} \left\{ (u_{i,j}^{n+1} - \tilde{u}_{i,j}^{n+1}) - (u_{j,i}^{n+1} - \tilde{u}_{j,i}^{n+1}) \right\}_{,j} = 0 \quad (8)$$

式(8)の両辺に対して発散をとり、式(6)を代入することによって、以下の圧力に関するPoisson方程式が得られる。

$$\Delta t (p_{,ii}^{n+1} - p_{,ii}^n) = \nabla \tilde{u}_{i,i}^{n+1} \quad (9)$$

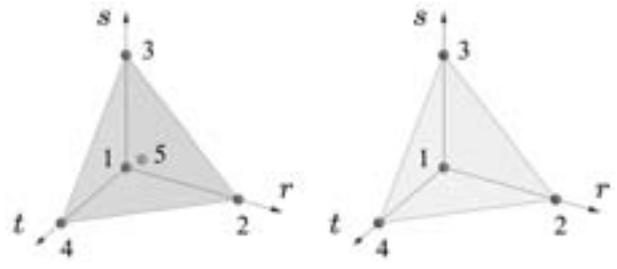


図1 3次元のMINI要素

すなわち、式(7)から中間流速 \tilde{u}_i^{n+1} を算出し、次にこれを式(9)に代入して圧力 p^{n+1} を求め、最後に式(8)により流速 u_i^{n+1} を計算するのが本手法の手順となる。

(3) 空間方向の離散化

式(7)~(9)に対して、Petrov-Galerkin法の考え方に基づいた離散化を施して最終的な有限要素方程式を得るが、その際、流速と圧力に対する補関数の組合せとしてMINI要素³⁾に基づく混合補間を用いるものとする。すなわち、流速に関しては気泡関数要素を、また、圧力に関しては1次要素を補関数として採用する。

図1に示すような節点配置を持つMINI要素(四面体)に基づく、流速 u_i と圧力 p に対する補関式はおのの以下のように表される。

$$u_i = \Phi_1 u_{i1} + \Phi_2 u_{i2} + \Phi_3 u_{i3} + \Phi_4 u_{i4} + \phi_e u'_e \quad (10)$$

$$p = \Psi_1 p_1 + \Psi_2 p_2 + \Psi_3 p_3 + \Psi_4 p_4 \quad (11)$$

また、同じく流速と圧力に対応する重み流速 v_i と重み圧力 q は、それぞれ以下のように書き表される。

$$v_i = \Phi_1 v_{i1} + \Phi_2 v_{i2} + \Phi_3 v_{i3} + \Phi_4 v_{i4} + \varphi_e v'_e \quad (12)$$

$$q = \Psi_1 q_1 + \Psi_2 q_2 + \Psi_3 q_3 + \Psi_4 q_4 \quad (13)$$

ここに、 ϕ_e, φ_e はそれぞれ気泡関数と重み気泡関数であり、 Φ_i, Ψ_i ($i=1\sim 4$)は以下のアイソパラメトリック表示された1次補関数である。

$$\begin{aligned} \Phi_1 &= 1 - r - s - t \\ \Phi_2 &= r \\ \Phi_3 &= s \\ \Phi_4 &= t \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \Psi_1 &= 1 - r - s - t \\ \Psi_2 &= r \\ \Psi_3 &= s \\ \Psi_4 &= t \end{aligned} \quad (15)$$

(4) 気泡関数の安定化パラメータ

図1a)に示した気泡関数要素において、次式で表される気泡関数の安定化パラメータにより、流速と圧力に対して適切な数値粘性を与えることが可能になる⁵⁾。

$$\tau_e = \frac{\int_{\Omega_e} \phi_e d\Omega \int_{\Omega_e} \varphi_e d\Omega}{v \int_{\Omega_e} \nabla \phi_e \cdot \nabla \varphi_e d\Omega V_e} \quad (16)$$

ここに、 V_e は要素の体積、 ν はレイノルズ数の逆数 ($\nu = 1/Re$) で流体の動粘度に比例する量である。

いま、この気泡関数の安定化パラメータ τ_e は、安定化有限要素法⁹⁾の観点から、次式によって気泡関数に対する安定化作用の大きさが決定されることが分かっている⁵⁾。

$$\tau_e = \left[\left(\frac{2|u_i|}{h_e} \right)^2 + \left(\frac{4\nu}{h_e^2} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (17)$$

ここに、 h_e は要素代表長さである。

気泡関数 ϕ_e および重み気泡関数 φ_e の関数形状は、式(16)によって表される安定化パラメータの大きさにより、要素ごとに決定されることになる。

なお、本報告では、これらの気泡関数 ϕ_e および重み気泡関数 φ_e の関数形状を適応的に制御する上で、P型正規化気泡関数 (P-scaled bubble) の組合せを用いており、その特性については文献⁵⁾に詳述されている。

3. 並列計算の概要

近年におけるコンピュータハードウェアの性能向上は著しいものの、流れの三次元計算が一般的となりつつある現在、単一プロセッサでは処理が困難である大規模な計算領域を取り扱うには、並列コンピュータの導入が望ましい。本章では、ここ数年進展が著しいPCクラスター技術を利用した並列計算手法について概説する。

(1) 領域分割

風工学の分野でわれわれが取り扱う流れは、構造物や地表面を通過する複雑な乱流である。したがって、計算精度を高めるためには、乱流渦の細かい挙動まで極力再現する必要があり、それらを評価するためには膨大な数の離散節点を必要とする。

前述のとおり、これらの節点すべてを含む領域を単一のプロセッサで処理するのは、物理的もしくは時間的に限界がある。したがって、図2に示すように、全体領域をいくつかの部分領域に分割し、各領域ごとに専用のプロセッサを割り当てることで、計算規模の拡大と速度の向上を図ろうというのが領域分割の考え方である。

(2) 並列計算環境とPCクラスター

図2に示した各部分領域ごとに専用の計算CPUばかり

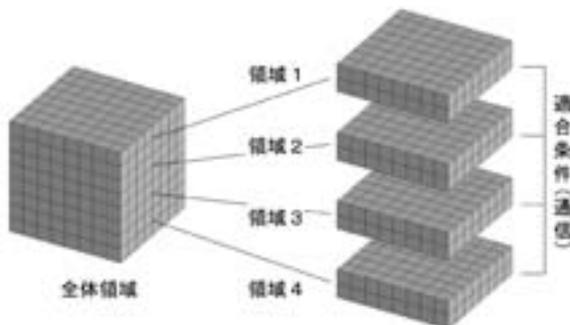


図2 領域分割の概念

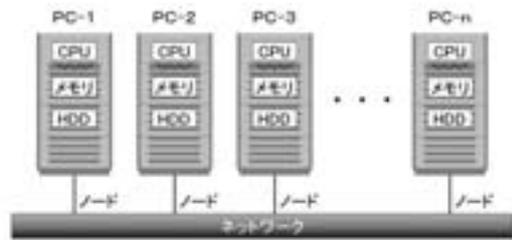


図3 PCクラスターの構成

でなくメモリーまで割り当てて全体の装置構成を図る方式を分散メモリー型の並列計算機環境と呼ぶ。

従来、並列計算機と言えば一つのメモリーと複数のCPUを備えた共有メモリー型のシステムを指すことが多かった。しかしながら、PCの性能が向上したことに伴い、近年では図3に示すように複数のPCを高速ネットワーク回線で結んだ分散メモリー型の並列計算環境 = PCクラスターを構築することも容易になった。本報告においても、小規模のPCクラスターを使用しており、その装置の外観と仕様は写真1、表1に示すとおりである。本システムのOSには、PC-UNIXの一種であるLinuxを採用し、プログラムコンパイラとしてはOSに標準装備されるg77 FORTRANを使用している。

前述した領域分割を行う場合、本来連続する部分領域境界において適合条件を満たすため、各領域を担当するプロセッサ間で計算過程の情報を相互に交換する必要が生じる。このような隣接プロセッサ間通信は、FORTRANコード中で例えば表1に示したMPICHなどの通信ライブラリをコールすることによって実現される。

以上のOSや通信ライブラリは原則としてフリーウェアであり、PCクラスターは、安定性とコスト面双方の向上を図ったシステムを構築する上で極めて有利な選択肢の一つとなる。



写真1 PCクラスターの外観

表1 ハードウェアの構成概要

項目	仕様(8台構成)
CPU	Pentium-III 1GHz x 1 / 台
メモリ	512MB / 台
ネットワーク	10/100Base-TX
システムOS	Linux (Kernel 2.4.7-10)
通信ライブラリ	MPICH-1.2.3

4. 数値シミュレーション事例

4.1 鋼2主 桁橋を対象とした流れ解析

鋼2主1桁橋は、合理化橋梁の一つとして近年数多く建設されている橋梁形式であるが、従来の桁橋ではそれほど問題とならなかった風による振動現象の発現性について、最近検討の必要性が指摘²⁾されている。

そこで、本節では標準的な幅員・床版支間を持つ2主桁橋を対象として、CFDによる橋梁断面まわりの流れ状況の把握を試みることにした。

(1) 解析モデルの設定

解析の対象としたのは、図4に示す標準的な断面比 ($B/d = 2.3$) を有する2主桁橋であり、気流条件として一様流、迎角 0° の条件で計算を実施した。その際、断面周辺に対して図5に示すような要素分割を施している。その他の主な計算諸元を表2に示す。

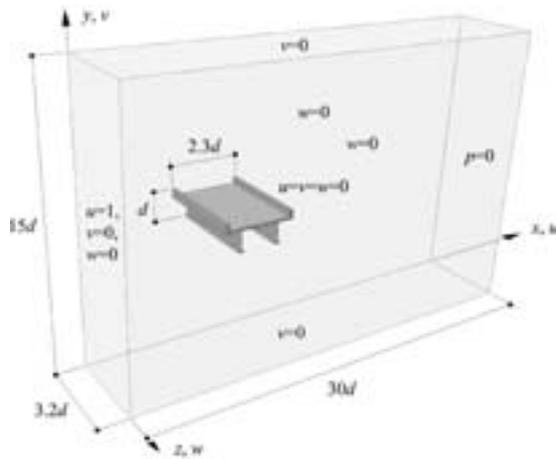


図4 解析領域と境界条件

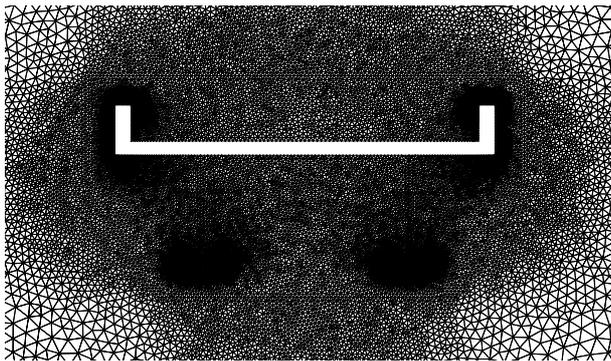


図5 断面周辺の要素分割

表2 計算諸元

パラメータ	設定値
総幅 $B \times$ 桁高 d	10.41 m \times 4.516 m ($B/d = 2.3$)
レイノルズ数 Re	2 000
総節点数	1 146 288 (= 34 736 \times 33)
総要素数	6 561 408 (= 205 044 \times 32)
橋軸方向長さ	3.2d
橋軸方向分割数	32
最小要素幅	0.0033d (壁高欄), 0.0018d (下フランジ)

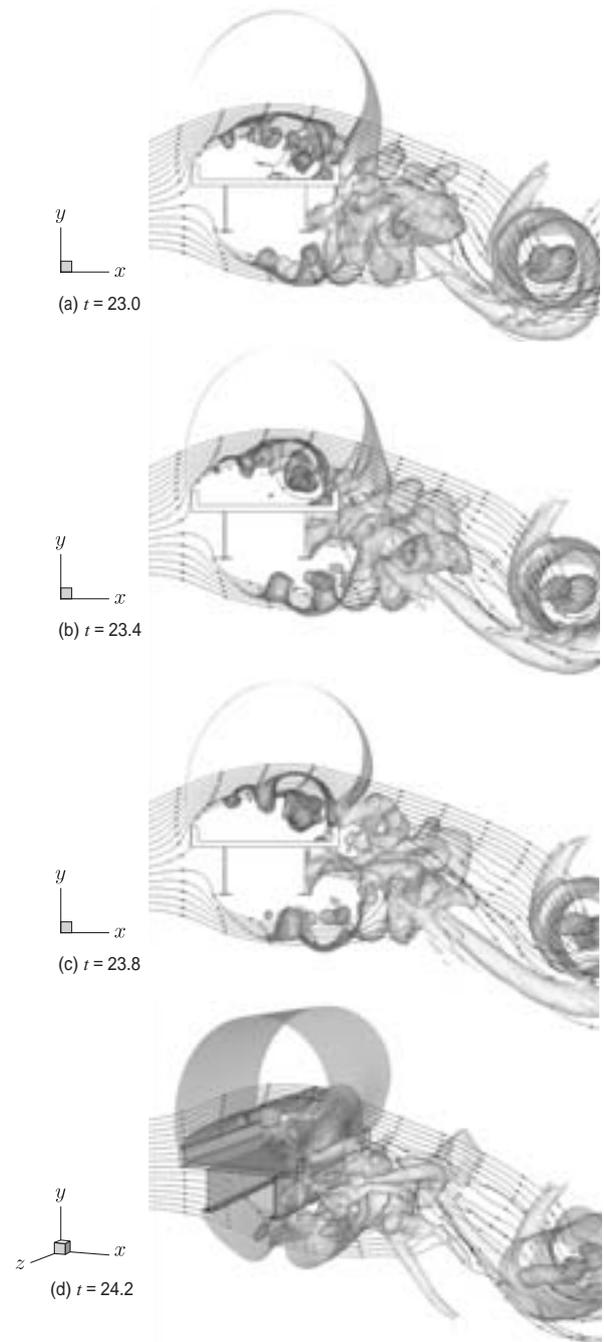


図6 2主桁断面周辺の圧力等値面と流線の推移

(2) 2主桁断面周辺の流れパターン

図6は、断面周辺の非定常な流れ構造の推移を示したものである。上流側壁高欄ではく離れた流れはそのまま後流域に達しており、橋面での流れの再付着は認められない。また、はく離せん断層に沿った周期的な渦配置も認められるが、これらの渦は床版と下流側壁高欄からなる隅角部において一個の大きな渦として停留している。さらに、主桁の下流側においても、周期的な渦の放出を生じており、明確な2次元渦構造が後方まで保持されている。

橋梁の空力振動現象は、これらの渦配置と密接な関連を持っており、CFDから得られるこのような情報を風洞試験結果と対比することにより、現象のより合理的な説明や適切な耐風対策の提案が可能になる。

4.2 局所地形を対象とした流れ解析

構造物の建設地点が山間部など複雑な地形上に位置する場合、設計風速や風洞試験条件の設定を行う上で、地形固有の局所的な風速の増加や風向の変化を事前に把握しておくことが望ましい。

現地の風環境を予測する際には、長期間の風観測結果に基づく統計的手法の適用が一般的であるが、最近では比較的短期間で風況予測が可能なCFDの適用についても多くの検討事例¹⁰⁾が報告されている。本節では、このような局所地形を対象とした流れ解析に対して、本手法の基本的な適用性を検証する。

(1) 解析モデルの設定

解析の対象としたのは、**図7a)**に示すような山間地形であり、三つの谷筋が合流する谷間に橋長213.5 mの橋梁建設が進められている⁷⁾。

流れ解析の実施に際しては、国土地理院発行の数値地図をもとに地表面形状を再現し、**図7b)**に示すような全体メッシュを構築した。領域の大きさとして、主流方向の長さ12 km × 幅8 km × 高さ2 kmの空間を設定し、入口と上空面には以下の式で表される対数則に基づく風速分布を境界条件として与えている。

$$u(z) = u_G \times \left(\frac{z}{z_G} \right)^\alpha \quad (18)$$

ここに、 z は地表面からの高度であり、 u_G 、 z_G はそれぞれ上空境界面における無次元風速 ($u_G = 1.0$) と高度を表す。また、 α はべき指数であり、道路橋耐風設計便覧に

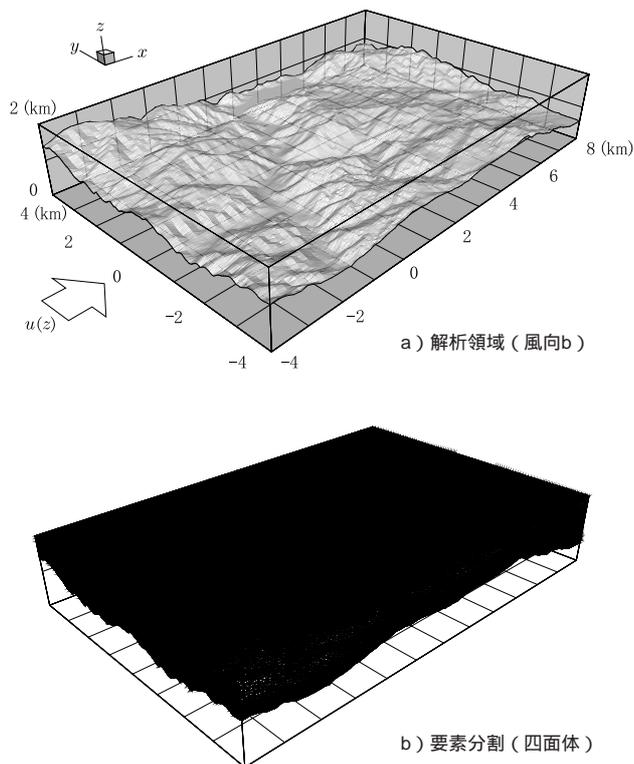
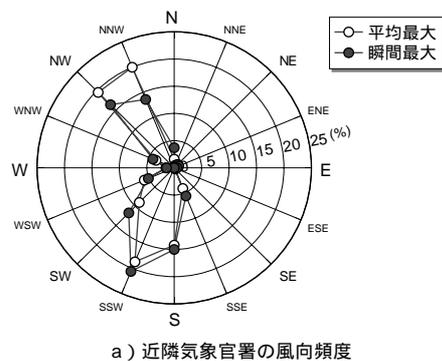
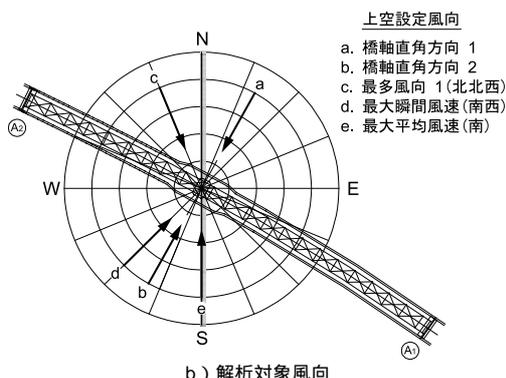


図7 解析領域と要素分割



a) 近隣気象官署の風向頻度



b) 解析対象風向

図8 風向頻度と解析対象風向

おける地表粗度区分IVを想定して $\alpha = 0.29$ と仮定している。さらに、その他の境界条件として地表面にno-slip条件、側面にslip条件、出口に自由流出条件 ($p = 0$) を与えている。

解析領域は、もとの数値地図のメッシュ精度 (約50 m × 50 m) を極力損ねないように、全体を307万2000個の四面体要素で分割している。

(2) 解析対象風向について

解析対象風向を決定するに際しては、架橋位置からほど近い高山測候所の気象観測データに基づき、**図8a)**に示す同所の風向頻度特性を求めた。本結果を考慮し、かつ架橋地点と高山の十分上空における風がほぼ同じ風向風速特性を示すものと仮定した上で、最終的な対象風向を**図8b)**に示す5種類 (a~e) に絞ることとした。

(3) 解析結果

解析結果の一例として、橋軸直角方向 (風向b) について求められた架橋高度 ($z = 73$ m) における水平面の平均風速特性、および橋脚位置における鉛直方向の平均速度プロファイルをそれぞれ**図9**、**10**に示す。

図9a)を観察すると、流れは谷筋に沿って大きく2方向に分岐しており、この影響を受けて**図10b)**に示した速度 v 成分にも有意な変化が現れている。一方、**図10a)**、**c)**の速度 u 、 w 成分を比較すると、高度300 m付近において水平方向に対し $\cdot 2.2^\circ$ 程度に相当する吹き下ろしを生じている。**図10a)**の高度200 m以下において速度 u 成分の増加が認められるのは、この吹き下ろし風が谷あいの縮流効果によって増速したためと思われる。

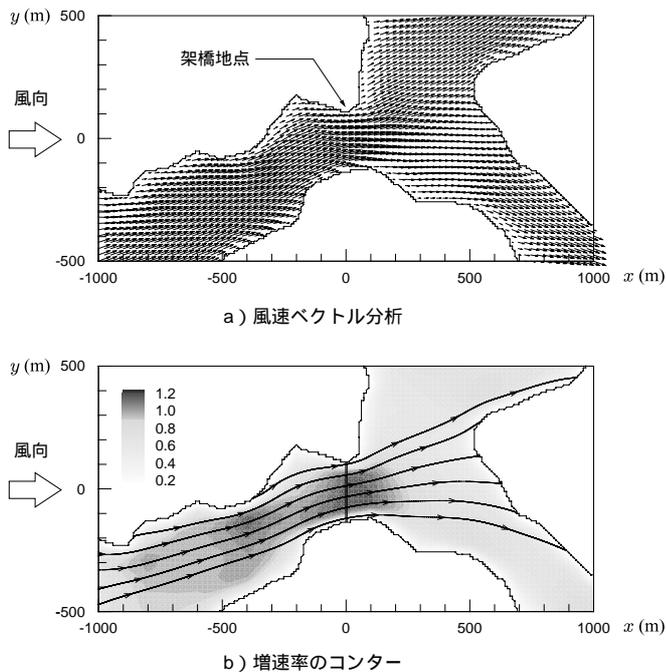


図9 路面高度における風速ベクトルと増速率

図9b)は、式(18)から算出した架橋高度における推定風速を1.0として、これに対する増速率をコンター図として示したものである。同図より、風の流れに対して谷間の間隔が狭まる架橋地点においては、推定値に対し風速がおおむね1.2倍程度増加する傾向が予想される。

以上の解析から得られた架橋地点の定性的な風向風速特性は、風洞試験における気流傾斜角(迎角)や風速範囲の設定に反映され、試験ケースの合理的な絞り込みを行う上で有用な情報となった。

5. おわりに

本報告では、気泡関数要素を用いた有限要素法の概要とその耐風検討への適用性について述べた。

一般に土木建築分野でわれわれが対象とする流れは、広範囲なスケールの渦を含む乱流である。前章の計算においては、有限要素サイズよりも小さい渦の効果は考慮しないいわゆる直接シミュレーションによる結果を提示したが、現在ではこのような微細渦による効果をモデル化して計算に取り入れる手法についても様々なアプローチ¹¹⁾が検討されている。また、地形風解析のように、流入風自体に速度の変動と勾配を有する場合には、より適切な境界条件¹²⁾の導入が望ましい。

今後は、これらの点を課題として、さまざまな風環境を評価する局面において、CFDの有用性がより高まるよう改善を図っていく所存である。

参考文献

- 1) 道路橋耐風設計便覧, 日本道路協会, 1991.7.
- 2) 山田, 上島, 枝元, 台原, 澤田, 篠原: 少数主桁橋梁

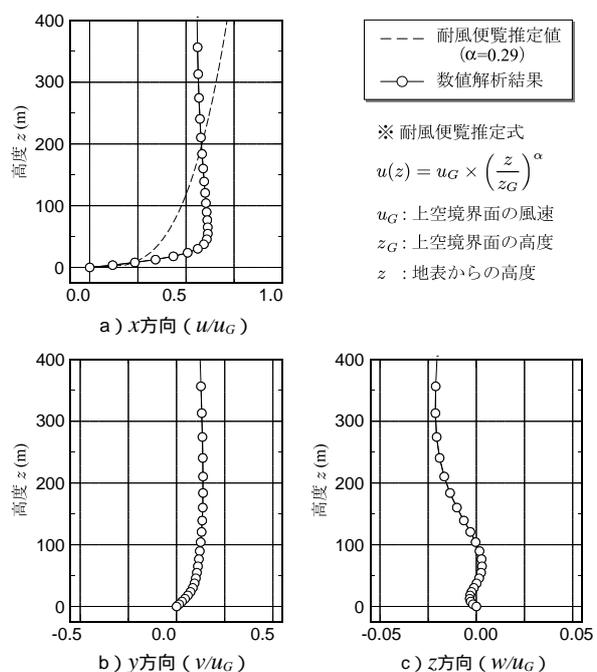


図10 架橋位置における各風速成分の鉛直プロファイル

の耐風性, 橋梁と基礎, Vol. 36, No.2, pp.37-42, 2002.2.

3) 富永, 持田, 村上, 大岡, 佐脇: 各種改良k-モデルによる高層建物周辺気流のCFD解析, 第16回風工学シンポジウム論文集, pp.155-160, 2002.11.

4) 風工学における数値計算の応用と評価研究小委員会成果報告会資料集, 土木学会構造工学委員会, 1999.12.

5) 奥村, 川原: 気泡関数要素を用いた非圧縮Navier-Stokes方程式に対するPetrov-Galerkin有限要素法, 応用力学論文集, Vol.4, 2001.8.

6) 廣安, 三木: PCクラスタの作り方, 計算工学, Vol. 5, No. 3, pp. 134-139, 2000.

7) 枝元, 忽那, 奥村, 谷中, 米田, 川原: 江黒橋架橋地点における地形風解析について, 土木学会第56回年次学術講演会概要集, I-B379, 2001.10.

8) Fortin, M. and Fortin, A.: Newer and newer elements for incompressible flow, *Finite Elements in Fluids*, Vol. 6, John Wiley & Sons Ltd., pp. 171-187, 1985.

9) Brooks, A. N. and Hughes, T. J. R.: Streamline upwind/Petrov-Galerkin formulations for convection dominated flows with particular emphasis on the incompressible Navier-Stokes equations, *Comp. Meth. Appl. Mech. Engng.*, 87, 1991.

10) 例えば, 石原: 複雑地形における局所風況の測定と数値予測, 日本風工学会誌, 第91号, pp. 3-8, 2000.4.

11) Hughes, T. J. R., Mazzei, L. and Jansen, K. E.: Large Eddy Simulation and the variational multiscale method, *Computing and Visualization in Science* 3, pp. 47-59, 2000.

12) 近藤, 持田, 村上: LESのための流入変動風の生成に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第501号, pp.33-40, 1997.11.