

乱流数値シミュレーションの Computer Graphics

—— 大規模多次元数値情報処理の応用 ——

Computer Graphics of Numerical Simulation for Turbulent Flow

村 上 周 三*・日 比 一 喜**・持 田 灯*

Shuzo MURAKAMI, Kazuki HIBI and Akashi MOCHIDA

Large Eddy Simulationによる3次元乱流の数値計算では、時々刻々の非定常な変化を追跡することが可能となる。このような数値シミュレーションではその膨大なデータ量を有効に活用するために大規模多次元数値情報処理の技術が重要な課題となる。本報ではSuper Computer HITAC S810-20とEngineering Work Station Apollo DOMAIN DN550を用いたComputer Graphics Systemにより数値シミュレーション結果の種々の可視化を試みた。特に16 mm MOVIEのコマ撮り技術を用いずに流れの動画像表示—High Speed Animation—をEngineering Work Stationの上で実現し、乱流現象の新しい観察手法を開発したので報告する。

1. 序

Large Eddy Simulation による 3 次元乱流の数値計算では、平均場を解析する手法とは異なり、乱流の時々刻々の非定常な変化を追跡することが可能である。このような乱流数値シミュレーションにおいて Computer Graphics は以下に述べるような理由から、研究を推進するうえで極めて重要な技法と考えられる。

(1) Large Eddy Simulation から得られるデータは通常の風洞実験に比較して膨大であり、人間がこの結果を的確に認識、理解するためには Computer Graphics による可視化が不可欠である。

(2) 乱流現象は本質的に非定常であり、シミュレーション結果を動きのある可視化像—アニメーション—として観察することは乱流の構造を理解するうえで、他の方法では得られない有益な情報を提供する。

本報では Super Computer で計算したデータを使って Engineering Work Station 上でいくつかの可視化を試みたので報告する。このような Computer Graphics は大規模多次元数値情報処理の典型例の 1 つであり今後の発展が強く求められている分野である。

2. Large Eddy Simulation の基礎式

流れ場が非圧縮性の粘性流体であるとしたときの Large Eddy Simulation の基礎方程式は、表 1 に示すとおりである。ここで各変数に付けられた (OVER BAR)

表 1 LES の基礎式

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_j \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\nu + \nu_{sgs}) \bar{e}_{ij} \quad (2)$$

$$\text{ただし } \nu_{sgs} = (C\Delta)^2 \cdot \left(\frac{\bar{e}^2_{ij}}{2} \right)^{1/2} \quad (3)$$

$$e_{ij} = \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \quad (i=1, 2, 3)$$

C : smagorinsky 定数

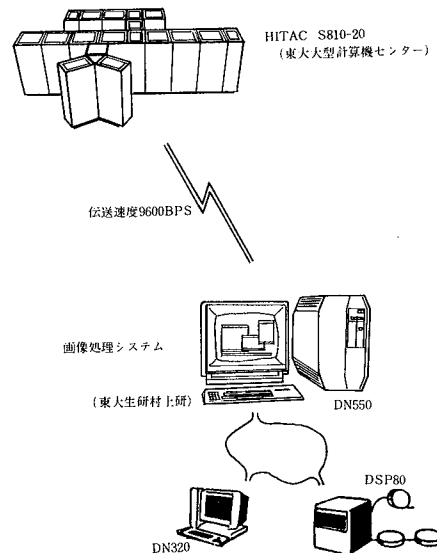


図 1 システム構成

* 東京大学生産技術研究所 付属計測技術開発センター

** 民間等共同研究員 清水建設(株)技術研究所

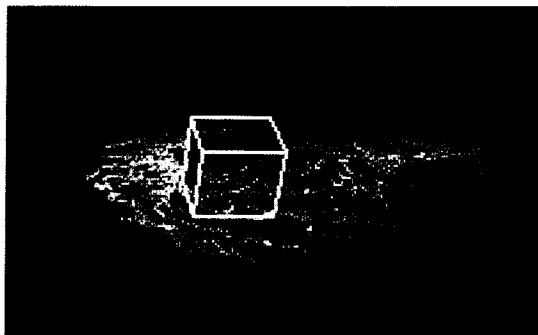


写真1 Markerの移動に関するHigh Speed Animation

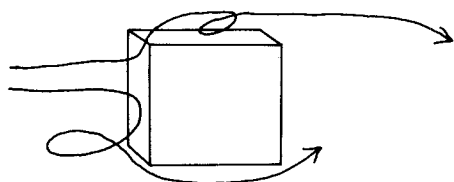


図2 建物風上壁面のdownflowによるMarkerの軌跡

は小さなスケールの渦をモデル化するための空間的平均操作としての Filtering である。Large Eddy Simulation の詳細については文献 1)～8)等を参照されたい。

3. 計算モデル

(1) 計算領域

X 方向 (44, 流れの主流方向, U 成分), Y 方向 (36, 流れの横断方向, V 成分), Z 方向 (21, 地上面の鉛直方向, W 成分) の不等間隔差分を用いた計 33,264 メッシュの 3 次元モデルである。建物は $6 \times 6 \times 6$ メッシュで構成され建物後流には建物高さ H_b の 8 倍の領域を設けた。

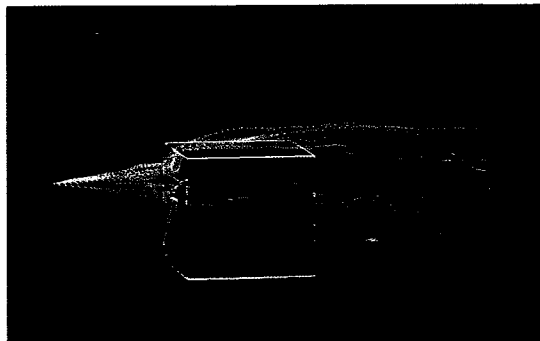
(2) 差分スキーム

時間差分に Adams Bashforth スキーム, 空間に 2 次精度の中心差分を用いた。時間差分間隔は無次元時間で 0.005 である。計算領域やスキームの詳細については文献 5) を参照されたい。

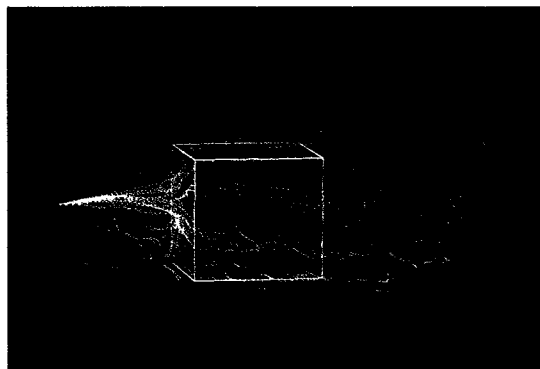
4. Computer Graphics System の概要

(1) システム構成

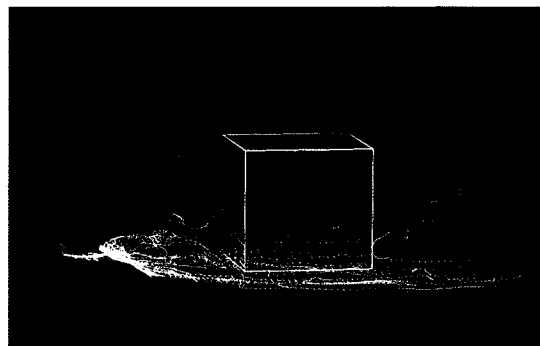
システム構成を図 1 に示す。Large Eddy Simulation を中心とする数値計算は東京大学大型計算機センターの Super Computer HITAC S 810-20 を使用している。また, Engineering Work Station Apollo DOMAIN DN 550 は東大生研村上研究室の環境風洞実験室に設置され, Marker の High Speed Animation などの Computer Graphics に使用されている。両者は 9600 bps の非同期通信回線で接続され, データ転送が可能となってい



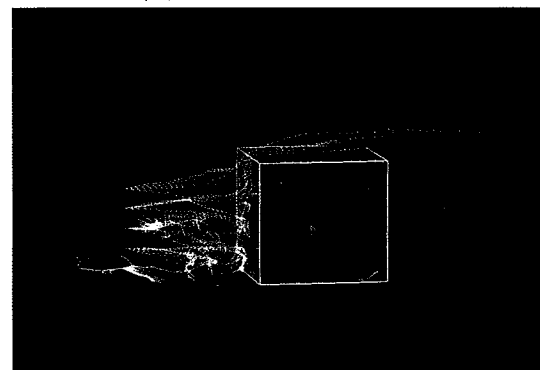
(1) Marker 発生高さ 0.96 H



(2) Marker 発生高さ 0.56 H



(3) Marker 発生高さ 0.15 H



(4) 5点の位置でMarkerを同時に発生

写真2 Streaklines (H: 建物高さ)

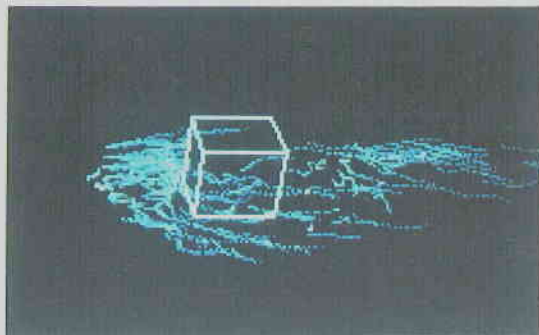


写真1 Markerの移動に関するHigh Speed Animation

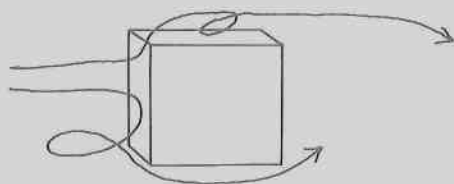


図2 建物風上壁面のdownflowによるMarkerの軌跡

は小さなスケールの渦をモデル化するための空間的平均操作としての Filtering である。Large Eddy Simulation の詳細については文献1)～8)等を参照されたい。

3. 計算モデル

(1) 計算領域

X 方向 (44, 流れの主流方向, U 成分), Y 方向 (36, 流れの横断方向, V 成分), Z 方向 (21, 地上面の鉛直方向, W 成分) の不等間隔差分を用いた計 33,264 メッシュの 3 次元モデルである。建物は $6 \times 6 \times 6$ メッシュで構成され建物後流には建物高さ H_b の 8 倍の領域を設けた。

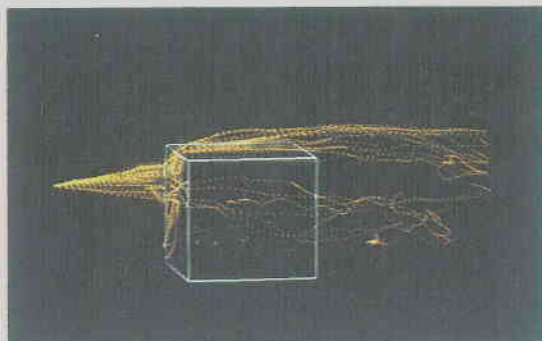
(2) 差分スキーム

時間差分に Adams Bashforth スキーム, 空間に 2 次精度の中心差分を用いた。時間差分間隔は無次元時間で 0.005 である。計算領域やスキームの詳細については文献5)を参照されたい。

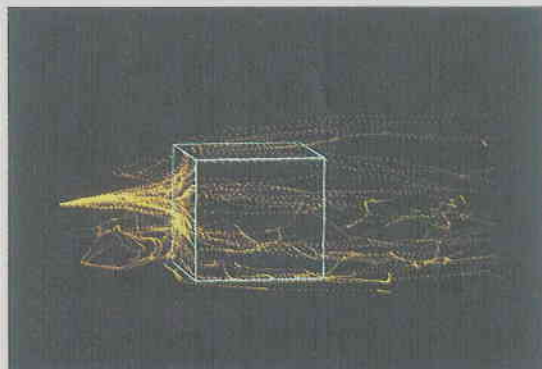
4. Computer Graphics System の概要

(1) システム構成

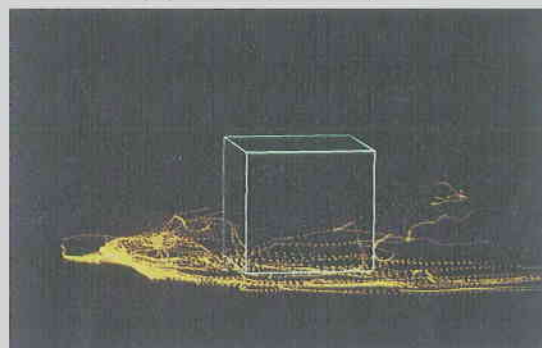
システム構成を図1に示す。Large Eddy Simulation を中心とする数値計算は東京大学大型計算機センターの Super Computer HITAC S 810-20 を使用している。また, Engineering Work Station Apollo DOMAIN DN 550 は東大生研村上研究室の環境風洞実験室に設置され, Marker の High Speed Animation などの Computer Graphics に使用されている。両者は 9600 bps の非同期通信回線で接続され, データ転送が可能となってい



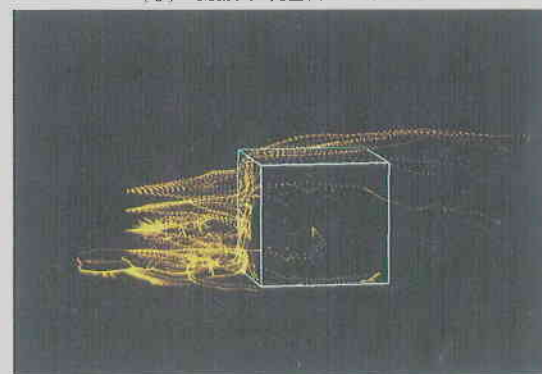
(1) Marker発生高さ 0.96 H



(2) Marker発生高さ 0.56 H

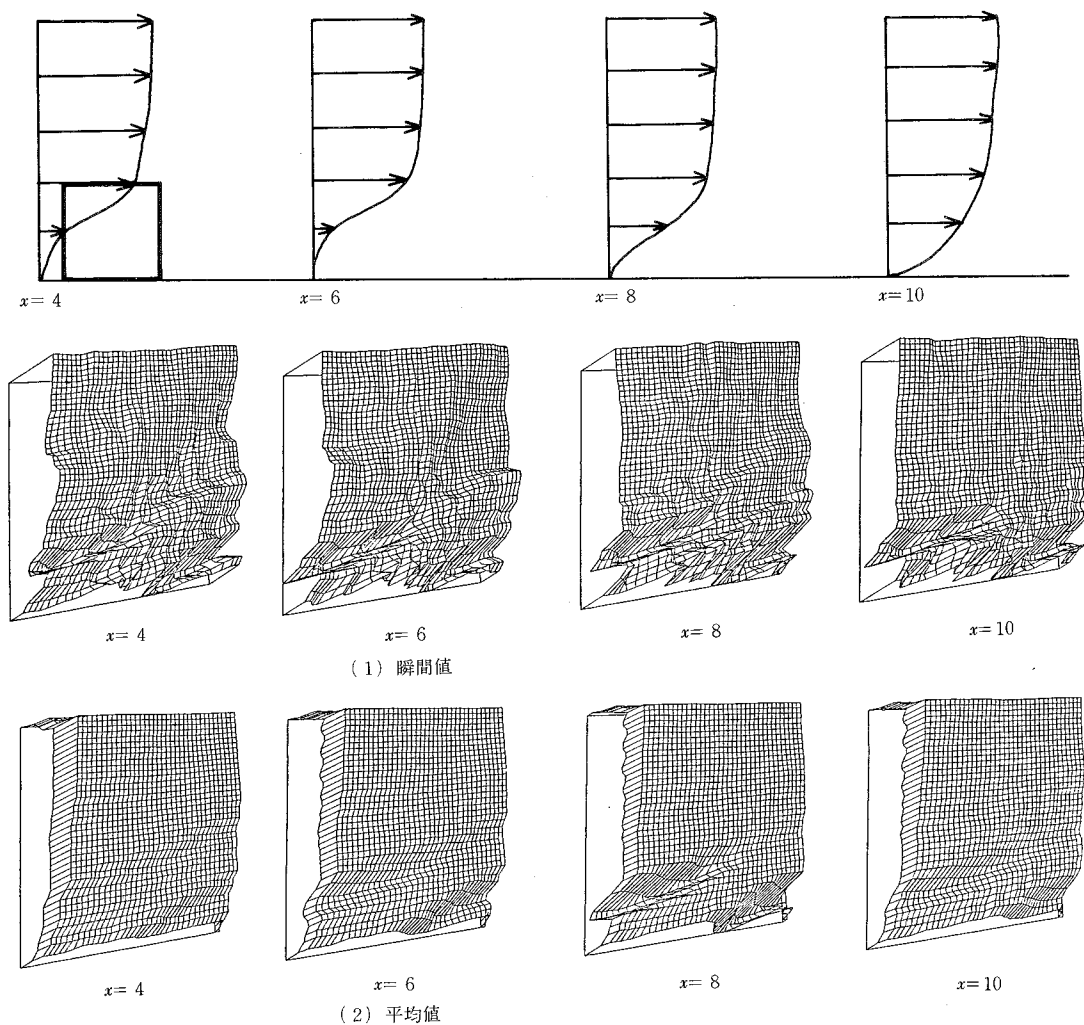


(3) Marker発生高さ 0.15 H



(4) 5点の位置でMarkerを同時に発生

写真2 Streaklines (H:建物高さ)

図3 風速 U 成分の3次元コンター表示 (Y-Z平面)

る。ただし、データ量が非常に多くなった場合は磁気テープを使ってデータを受け渡す場合もある。

(2) Work Station Apollo DOMAIN DN 550 の仕様

- CPU Motorola 68010
- 主記憶 1.5 Mbyte
- CRT 19 inch Color ブラウン管
解像度 1,024×800
- Hard Disk 50 Mbyte
(RING NETWORK により
500 Mbyte のファイルサーバ
にアクセス可能)
- Display Memory 2 Mbyte

以上の仕様を持つ UNIX ベースの Graphics Work Station である。特に High Speed Animation に必要とされる機能として以下の点がある。

1) 高速の Display Processor および Display

Memory

- 2) 主記憶と Display Memory 間的高速データ転送
- 3) Memory 内の柔軟な Bit Block Transfer 機能
- 4) Hardware Zoom 機能

この DN 550 は DOMAIN RING NETWORK で接続された DN 300 (カラー表示は不可能な Work Station), DSP 80 (500 Mbyte HARD DISK および MT を接続したファイルサーバ) と共に風洞実験データ処理システムを構成している。また DSP 80 には高速 A/D 変換器が接続され、各 Work Station から自由にデータを読み取ることが可能でありネットワーク全体で1つの中規模から大規模の計算機システムと見なすことが可能である。

(3) Large Eddy Simulation における大規模多次元数値情報処理について

表-1 に示された式を計算しながら、各時間ステップごとに流れ場の U, V, W 風速成分を磁気 DISK へ格納す

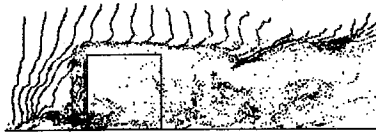
(1) $t^*=2.5$ (2) $t^*=5.0$ (3) $t^*=7.5$ (4) $t^*=10.0$

図 4 Timelines (鉛直断面)

る。しかし、計算は 3 次元であるため全時間ステップ、全空間データ（たとえば $44 \times 36 \times 21$ のメッシュで風速 U, V, W を 10,000 ステップ保存すると約 4,000 Mbyte のデータ量となる）を格納することは困難であり、今回の例では 10 計算ステップ間隔に保存する。また空間的には建物近傍に限定したデータを保存し次節以降に示す Graphics 作成のための入力データとしている。現段階では Work Station の DISK 容量の制限から保存された約 40 Mbyte のデータを扱うことにより Animation などを作成しているが、将来増設された 500 Mbyte のファイルサーバを利用することによりさらに大容量のアニメーションを行うことが可能となる。しかし、この 40 Mbyte のデータ量を、東大計算機センターとの間の 9600 BPS 通信回線を使ってデータ転送を試みると単純に計算しても十数時間以上はかかることになり、今後より高速の通信回線のサービスの提供が望まれるゆえんである。

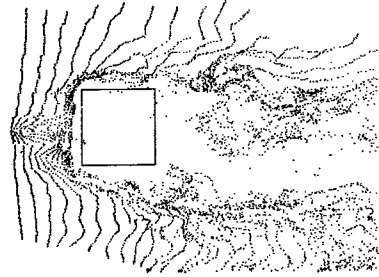
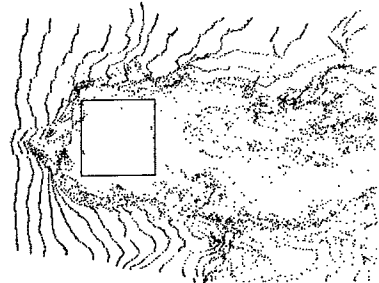
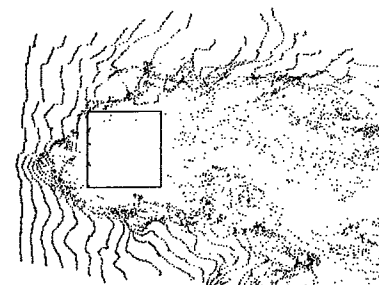
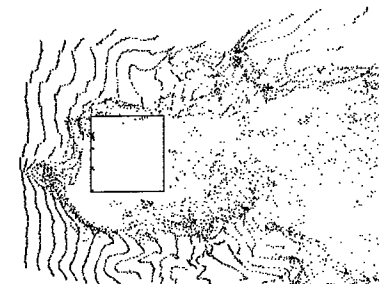
(1) $t^*=2.5$ (2) $t^*=5.0$ (3) $t^*=7.5$ (4) $t^*=10.0$

図 5 Timelines (水平面)

5. Computer Graphics の各種の手法と出力例

(1) High Speed Animation (写真-1)

建物前方約 H_b において Marker を発生させる。発生位置は 6 点で高さ方向に (風速) \propto (高さ) $^{1/4}$ の鉛直分布に従う線上にセットし一定時間間隔ごとに発生させている。データ量および計算時間の制約から Marker の移流計算は大型計算機センターの HITAC M 280 H で行っている。各 Marker の時々刻々の座標値が Apollo DOMAIN へ転送され、3 次元透視変換を行ったうえで画像表示される。

高速化のために、1024×1024 の Display Memory を 200×200 の小画面に分割し、Hardware Zoom 機能を使って画面全体に拡大したうえで Animation を行っている。この手法を用いれば 16mm movie のコマ撮りの技術を用いなくともかなりハイスピードの動画(たとえば 30 画面/秒)を作成することが可能となる。

このような表示法を用いることにより、Marker 個々の動きに着目した観察をすることができるだけでなく、流体全体のマクロな動きを観察することも可能となる。また、早送り、遅送り、逆転など自由な操作が可能であり乱流現象の詳細な構造に立ち入ることが可能となる。

(2) Streaklines (写真-2)

前節の High Speed Animation と同じデータを使って Streakline (流跡線) を Hardware Zoom 機能を使わずに 1024×1024 の精度で動画表示を行っている。ここでは

1) Marker の位置座標に 3 次元透視変換を行ったうえで視点から Marker までの距離に応じて徐々に輝度を落す Intensity Depth Queing の手法

2) 建物背面を通過する Marker の陰点処理などの種々の手法を用いて 3 次元効果を出すことを試みた。この表示法を使うことにより各時点で発生した個々の Marker の通った径路を詳細に観察することが可能となる。たとえば図 2 のように地面に近い位置から発生した Marker が建物風上面に生じる downflow により上流に向かって逆流したのち再び下流に向かう流れや、屋根面で一度剝離領域にまき込まれる Marker が再び主流に乗って後流に向かう様子などが明確に観察される。

(3) 3 次元コンター表示 (図-3)

東大大型計算機センターのライブラリ DYNAPLOT を利用して風速 U 成分の主流に垂直で地面に鉛直な平面における 3 次元コンター表示を試みた。ここでは建物前方から後方に至る主流方向の変化を表示し、建物の流れに対する 3 次元的影响を観察することを可能とした。

図 3 の (1) は、瞬時値、図 3 の (2) は平均値を示してい

る。

(4) Timelines (図-4, 5)

無次元時間間隔 $t^*=0.5$ の間隔で建物前方 H_b の位置から同時に 200 個の Marker を発生させている。図 4 の (1)-(4) は Marker を建物中心軸上で鉛直線に沿って発生させ、横から見たもの、図 5 の (1)-(4) は高さ $H_b/2$ で水平線に沿って Marker を発生させ、上から眺めたものである。

Marker の位置座標を計算するとき、Marker の近傍の 3 点の風速値を使って 3 次元線形補間を行っている。しかしこの補間法を使った場合、たとえば建物ぐう角部において建物風上の早い流れの風速を推定するに際して、建物ぐう角部の剝離域内部の遅い流れの風速も同時に用いて Marker 位置の風速を推定することになり、物理的には不合理と考えられる。したがってこの場合例外として、剝離領域内部の風速を用いないという処理を行っている。

同様のことは建物前面のぐう角部に限らず流れ場の中の剝離線近傍にも言えることであるが、本報ではこの部分の例外処理は行っていない。

図 4 では任意の 4 時点での Timeline を示している。建物上部の剝離、建物後流の渦の巻きこみなどの時々刻々の流れ場が詳細に観察できる。

6. CFD における Computer Graphics の今後の方向

乱流の数値シミュレーションにおける Computer Graphics は今後の数値計算技術の進歩、Super Computer の発達、実験による検証などに裏付けされた CFD (Computational Fluid Dynamics) の実用化と共にますます重要性を増すであろう。これらの技術は実験における流れの可視化と同じ立場で、計測の難しい流体现象の把握と言う意味でますます重要になる。また、このような Compute Graphics は数値シミュレーションの出力手段としてばかりでなく風洞実験結果の Display 技術としても重要であり、風洞実験、数値シミュレーションを統合化したシステムにおけるマンマシンインターフェイスとして位置付けていくべきものと考ええる。また、現段階でのシステムはまだプロトタイプ的なものであり速度、容量など不十分なのである。今後、技術開発やサービス改善の望まれる項目は下記のようなものが挙げられるであろう。

(1) Work Station の 3 次元処理速度の向上

3 次元座標変換専用の Hardware による高速化

(2) 大型計算機との高速データ転送のサービスの向上

1 Mbyte/sec 程度の転送レートが望ましい

(3) Graphics 手法の改良、開発

Marker 移流計算方法の改良等

(4) 画像入力および画像処理

実験の可視化像の処理等

またこのような乱流の Computer Graphics に代表されるような大規模多次元情報処理は今後の理工学の研究に欠くことのできない技術となりつつある。

7. お わ り に

現状のシステムはハード、ソフト共に不十分なものであり、今後の改良、開発に多方面の御教示をお願いしたい。

謝 辞

今回の数値シミュレーションに当たりまして、東大生研 NST (乱流数値シミュレーション) 研究グループの吉沢徹助教授, 同 小林敏雄助教授, 同 加藤信介講師ら諸氏の多大な助言をいただきました。また, Animation Soft 開発に当たり, 日本アポロコンピュータ(株)の伊藤明雄, 同 永島道夫両氏の援助をいただいたことにここに感謝します。 (1985 年 11 月 12 日受理)

参 考 文 献

- 1) 村上: 「風工学における乱流の数値シミュレーション」, 風工学会誌, Vol. 20, 1984
- 2) 村上, 日比, 持田: 「LES による建物周辺気流数値のシミュレーション (その 1), (その 2)」, 日本建築学会大会, 1984.10
- 3) 村上, 持田, 日比: 「Large Eddy Simulation による建物周辺気流の数値解析 (3 報), 特に風向 45° の周辺気流に関する数値解析と野外実験, 風洞実験の比較」, 日本建築学会大会, 1985. 10
- 4) S. Murakami, K. Hibi, A. Mochida: "Visualization of Computer-generated turbulent flowfield around cubic model", FLUCOM 85, 1985. 9
- 5) S. Murakami, A. Mochida, K. Hibi: Numerical Simulation of Air Flow around Cubic Model, ISCFTD' 85, 1985. 9
- 6) J. W. Deardorff: J. Fluid Mech., 41, pp. 453-480, 1970
- 7) P. Moin, J. Kim: J. Fluid Mech., 118, pp. 34-377, 1982
- 8) 吉沢: 「乱流の Large Eddy Simulation」, 生産研究 36, 175, 1984
- 9) 稲岡: 「アポロ DOMAIN」, Computer Today, No. 8, 1985. 7

