

計算機を用いた空力解析システムの開発

Developing a Computational Fluid Dynamics (CFD) System

福島 達也*
Tatsuya Fukushima

宮島 保*
Tamotsu Miyajima

高村 明男*
Akio Takamura

要 旨

計算機を用いた車体外部流れの解析を行うシステムを開発した。

計算モデルはメッシュ形態をH型のマルチ・ブロックとする事によってタイヤ付の実車形状を高い精度で表現する事が可能となった。また既存のCADシステムと連結するとともに会話処理化する事によってメッシュ作成の効率を高めた。

流れ計算は非圧縮性流体の支配方程式に高精度差分スキームを適用し、風洞実験の結果と非常に良い一致が得られた。また微妙に形状の異なる2種類の車体の空力特性の違いを解析できるだけの分解能を有する事が確認された。

莫大な量の計算結果は会話処理型の可視化システムで解析される。特に、従来風洞実験では困難であった非定常流れの観察も動画処理によって初めて可能となった。また、数値解析の特色を生かした解析として、車体表面の圧力分布の空力特性への寄与解析を試み、現象解析の一手法として、その有効性を確認した。

ABSTRACT

A CFD system has been developed to analyze the airflow around an automobile body. Adopting an H-type mesh structure using the multi-block method has made it possible to precisely realize the profile of an automobile with tires. Interactive operations linking to CAD systems, have increased efficiency of the mesh generation. In order to get results comparable with wind tunnel experiments, the Navier-Stokes equations were calculated by using the third order upwind finite differential scheme. It was proved that the computation can respond to small differences in automobile profile. A large amount of computation results are analyzed by interactive graphic systems, which have made it possible to observe unsteady flow using motion pictures. This method of unsteady flow observation is much easier than using an experimental wind tunnel. The relationship between pressure distribution on the body surfaces and the aerodynamic characteristics was also investigated. This system was found to be an effective way to analyze automobile aerodynamics.

1. はじめに

近年、計算機の処理能力の大幅な向上により、数値流体力学はより身近なものとなり、複雑な乱流現象まで計算が可能になりつつある。そのため乱流現象のシミュレーションを自動車空力問題に応用する研究も盛んに行われている。^{(1)~(5)}

空力問題に関する高精度の乱流シミュレーション

* 栃木研究所

ンは処理にかなりの時間を要するものの、時間的および空間的な分解能の面で風洞実験を大きく上まわり、複雑な乱流現象の精密解析が可能である。実際の乱流解析はその複雑さ故に、まだまだ難しい面も多いが、空力研究においてシミュレーションは強力なツールとなる潜在能力を秘めている。

そこで今回、高精度の空力シミュレーション・

システムを開発し、実車形状への適用を試みたので、システムの紹介、適用例など以下の項目について報告する。

- ① 流れ場を支配する方程式を十分な高精度で計算する流体解析プログラムを開発した。
- ② 複雑な車体形状を含む流れ場において、形状再現性を著しく低下させることなく空間を離散化する計算メッシュ作成システムを開発した。
- ③ 乱流現象を高速に可視化し、アニメーション化できる可視化システムを導入した。
- ④ 本システムを複数のモデルに適用し、形状再現性と計算精度の高さを実証した。
- ⑤ 計算結果を精密に可視化処理や、空気抵抗力、揚力の寄与解析を行う事によって、風洞実験では困難な、空力シミュレーション独自の現象解析手法を例示した。

2. 空力シミュレーションシステムの開発

次の順序で空力シミュレーション技術とシステムについて説明する。

- ① 流れ場の数値解析手法
- ② 計算格子点の生成方法
- ③ 流れ場計算結果の可視化手法
- ④ 計算機環境

2.1. 流れ場の数値解析

自動車空力問題における流れは、熱を含まない非圧縮性粘性流体で、あり、圧力、流速を状態量とする流れ場は以下の方程式によって支配される。

$$\frac{\partial v_i}{\partial x_i} = 0 \quad (i=1,2,3) \quad (1)$$

$$\frac{\partial v_i}{\partial t} + v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 v_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (2)$$

ここで、(1)は連続の式、(2)式はナビエーストックス方程式である。変数 X_i は直交座標系における空間位置の i 座標、 t は時間、 P は圧力、 V_i は流速の i 成分である。また、 Re はレイノルズ数である。

取り扱う流れは、 $Re > 10^6$ の乱流であり、空力特性はこの乱流現象に大きく左右される。そのため空力シミュレーションにおいては乱流現象を高精度で計算する事が要求される。

本システムでは、(1)式、(2)式の支配方程式の解

法に非圧縮性粘性流体の代表的な数値解法であるMAC法を適用するとともに、(2)式左辺第2項を河村スキームと呼ばれる3次精度風上差分法の一手法を併用して支配方程式を高精度に離散化する。⁽⁶⁾以下に計算スキームの概略を延べる。

解くべき方程式は、時間変動、空間変動を伴う圧力場、流速場を記述する。ナビエーストックス方程式は圧力方程式と流速方程式に分離する事ができ、この2つの方程式を交互に解く事によって流れ場を陽的に求める事ができる。

圧力方程式は、ナビエーストックス方程式の発散によって得られる。つまり、

$$\frac{\partial^2 P^n}{\partial x_j \partial x_j} = \frac{1}{\Delta t} \frac{\partial v_i^n}{\partial x_i} - \frac{\partial v_j^n}{\partial x_i} \frac{\partial v_i^n}{\partial x_j} \quad (3)$$

という圧力のポアソン方程式となる。ここで各状態量の右肩の添字は、状態量が時間によって離散化された事を示している。また、(3)式の導出過程において時間積分による誤差の累積を小さくするために、サイクル誤差自己調整法を用いて、

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \frac{\partial v_i}{\partial t} \approx \frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial v_i}{\partial x_i} = -\frac{1}{\Delta t} \frac{\partial v_i^n}{\partial x_i} \quad (4)$$

としている。

流速方程式はナビエーストックス方程式そのものである。ただし数値計算の便宜上、慣性項は時間について線形化され、時間微分には1次の後退差分が適用される。すなわち、

$$\begin{aligned} \frac{1}{\Delta t} (v_i^n - v_i^{n-1}) + v_j^{n-1} \frac{\partial v_i^n}{\partial x_j} \\ = -\frac{\partial P^{n-1}}{\partial x_i} + \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 v_i^n}{\partial x_j \partial x_j} \end{aligned} \quad (5)$$

従って先述のとおり、次の手順によって(4)式、(5)式より流れ場を陽的に求める事ができる。

- ① 時刻 n の既知の流速場から、圧力方程式を解く事によって同時刻 n の圧力場を求める。
- ② 時実 n の既知の流速場、圧力場から流速方程式を解く事によって時間発展した時刻 $n+1$ の流速場を求める。

(4)式、(5)式は境界形状の近似性を高めるために境界適合座標系において差分法によって離散化される。そのため(4)式、(5)式を境界適合座標系表示

に変換しなければならない。境界適合型座標を $i(i = 1, 2, 3)$ とすると、(3)式の圧力方程式は、

$$g^{jk} \frac{\partial^2 P^n}{\partial \xi_j \partial \xi_R} + \left\{ \frac{\partial}{\partial \xi_R} \left(\frac{\partial \xi_j}{\partial x_j} \right) \right\} \frac{\partial \xi_R}{\partial x_i} \frac{\partial P^n}{\partial \xi_j} \quad (6)$$

$$= \left(\frac{\partial \xi_R}{\partial x_i} \frac{\partial v_i^n}{\partial \xi_R} \right) \left(\frac{\partial \xi_\ell}{\partial x_j} \frac{\partial v_i^n}{\partial \xi_\ell} \right) + \frac{1}{\Delta t} \frac{\partial \xi_R}{\partial x_i} \frac{\partial v_i^n}{\partial \xi_R}$$

また、(5)式の流速方程式は、

$$\frac{1}{\Delta t} (v_i^n - v_i^{n-1}) + u_R^{n-1} \frac{\partial v_i^n}{\partial \xi_R}$$

$$- \frac{1}{Re} \left\{ \frac{\partial \xi_\ell}{\partial x_j} \frac{\partial}{\partial \xi_\ell} \left(\frac{\partial \xi_R}{\partial x_j} \right) \frac{\partial v_i^n}{\partial \xi_R} - g^{R\ell} \frac{\partial^2 v_i^n}{\partial \xi_R \partial \xi_\ell} \right\} \quad (7)$$

$$= - \frac{\partial \xi_R}{\partial x_i} \frac{\partial P^n}{\partial \xi_R}$$

のように変換される。ただし、

$$g^{iR} = \frac{\partial \xi_j}{\partial x_i} \frac{\partial \xi_j}{\partial x_i}, \quad u_R = \frac{\partial \xi_R}{\partial t} \quad (8)$$

支配方程式の境界適合座標系での離散化は、空間について、(7)式の慣性項に河村スキームによる3次精度風上差分を用いる他は2次精度の中心差分が適用される。時間については(7)式において既に1次の後退差分で離散化されている。

任意関数 f , ϕ に関する河村スキームによる3次精度の風上差分は次のように定式化される。

$$\left(f \frac{\partial \phi}{\partial \xi} \right)_{i,j,k}$$

$$= \frac{f_{i,j,k}}{12} \left(-\phi_{i+2,j,k} + 8\phi_{i+1,j,k} - 8\phi_{i-1,j,k} \right. \\ \left. + \phi_{i-2,j,k} \right)$$

$$+ \frac{|f_{i,j,k}|}{4} \left(\phi_{i+2,j,k} - 4\phi_{i+1,j,k} + 6\phi_{i,j,k} \right. \quad (9)$$

$$\left. - 4\phi_{i-1,j,k} + \phi_{i-2,j,k} \right) + \theta(\Delta \xi_1^3)$$

(7)式、(8)式を離散化した支配方程式は繰り返し解法としては非常に高効率なSORによって解かれる。莫大な計算時間を要する流れ場計算の殆どは、このSOR計算によって占められる。そこで、ベクトル処理機能、並列処理機能、大容量メモリー

を有する計算機の使用を前提に、次の点に注目して、計算速度の高速化を行った。

① 高ベクトル化を高並列化

② 実メモリー内のみの計算

境界条件は、境界面上の no-slip 条件

$v_i = v_i^{\text{body}}$ (10)
が基本である。また、圧力の境界処理は Navier-stokes 方程式の境界法線ベクトル成分に no-slip 条件を適用する事によって得られる。つまり、

$$\frac{\partial P}{\partial n} = \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 v_n}{\partial x_j \partial x_j} \quad (11)$$

これを境界適合座標系表示に変換し、離散化する事によって圧力の境界処理が行われる。

また遠方境界での境界条件は、

$P = \text{計算領域から外挿}$ (12)

$Vi = \text{流入速度}$ (13)

で与えられる。

2.2. 計算モデルの作成

2.1. 節で述べたように、車体まわりの流れ場は車体形状に適合した境界適合型座標系における差分方程式を解く事によって得られる。

自動車空力問題における $Re > 10^6$ の高レイノルズ数流れの数値計算では、その差分格子点数は容易に数十万～数百万点のオーダーとなり、大容量メモリーを有するスーパーコンピュータをもってしても、その計算は容易ではない。そのため、計算モデルを作成する際に、計算の精度を確保した上で差分格子点数を減らす事は最も重要な事である。そこで次の2点に注意して格子点数が極力増えないようにする。

① 物体形状を計算空間の中で再現する場合、解析する問題の必要精度を上まわる微小形状は無視して形状を単純化する。

② 物体より遠方の地点でのメッシュの大きさは計算が発散しない程度に十分に大きくする。

①は、車体全体形状の空力解析を例にとれば、実車の形状に対し、フロント・グリルの開口部をふさぐ、床下を平滑化する、窓の段差を埋める、タイヤ形状を単純化する、場合によってはタイヤを取り払い、ホイール・ハウスを埋める、等を行い

車体形状の基本的特徴を維持したまま、形状を単純化している。ただし、微少な凸凹であっても床下のように空力特性に大きな影響を及ぼす事もあるので、形状の単純化には十分注意する必要がある。②は高レイノルズ数の非圧縮性粘性流体は物体まわりの境界層と後流域を除けば、ポテンシャル流れとほぼ同様であり、計算メッシュを大きくとれることによる。境界層や後流域は乱流域であるので、渦の空間構造は非常に微細になり、この領域の差分格子点の分布は十分に細かくする必要があるが、ポテンシャル流れの空間的な変動は非常にゆっくりしているので、比較的粗い差分格子点分布でも計算が可能である。

自動車の車体形状は、基本形状にバンパー、タイヤ、ドアミラー、スポイラー等の付加物が付き、また、これらは流れ場に大きな影響を与える。従って、取り扱う問題によってその程度は異なるものの、一般に物体形状は非常に複雑になる。そのため、本システムでは境界適合座標系によって境界層の計算精度を高めた上で、複雑形状の再現が容易なマルチ・ブロック法⁽⁷⁾を採用している。これは、計算領域をいくつかの部分領域に分けて部分領域ごとに差分格子点の生成を行うとともに、物体内部も複数の部分領域に分割して、この部分領域単位で格子生成を行うものである。このマルチ・ブロック法により、計算領域、物体内部を曲線座標系において、複数の直方体に分割できるのであれば、かなり複雑な車体形状でも境界層の計算精度を維持したまま、その形状を再現する事が原理的に可能となる。また流れ場の計算において物体内部の格子点は、簡単なフラグ付けによって物体内部について、流速 = 格子点の移動速度、圧力 = 一定を与える事ができる。

計算格子点生成の実際は、ブロック単位で次の操作を繰り返す事によって行われる。

- ① ブロック境界面の形状を複数のスプライン・データにより近似する。
- ② ブロック・エッジ上の計算格子点の分布関数と複数のスプライン・データからの補間計算により、境界面上の計算格子分布を決定する。
- ③ ブロック境界面上の計算格子点分布より Trans-finite 法を用いて、ブロック内部の計算

格子点分布を決定する。

これらの手順は、全て会話処理化されているので格子点生成の柔軟性は高い。ブロック単位で格子点生成が行われた後に、これらのブロックは結合されて1つの計算空間になるが、ブロック境界面は不連続面となるので、ブロック境界面の近傍で格子点分布は平滑化される。

このように境界適合型座標系と、マルチ・ブロック法によって離散化空間での車体形状の高い再現性を得る事ができるが、マルチ・ブロック法には次のような弱点がある。(図1)

- ① ブロックは計算空間に於いて、構造的に形成されるために、少しの形状の複雑化が大幅なブロック数の増大を引き起こす。
 - ② ブロックは計算空間に於いて、構造的に構成されるために、境界層ブロックにおける密な格子点密度が、それに連なるポテンシャル流ブロックに伝播し、ポテンシャル流ブロックにおいて格子点を無駄に生成しなければならない。
- そのため、限られた計算機的能力の中で、格子点密度や形状再現性は少なからず制約を受ける事になる。また、そうした制限の下で計算精度や形状再現性を高めるために、格子点生成法は経験的かつ技巧的となり、自動化を困難にしている。

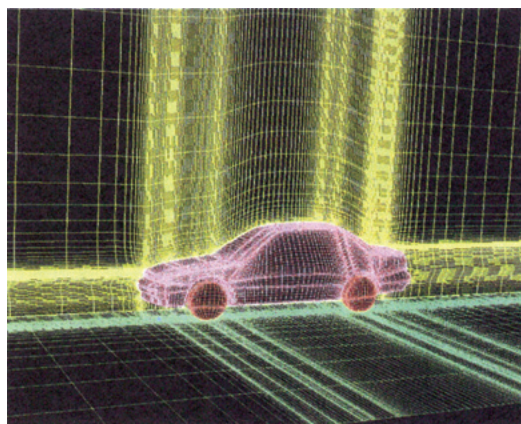


図1 計算メッシュ

しかし、高レイノルズ流れの数値計算では、格子点生成の簡便化は、境界形状の再現性を悪化させ、計算精度を大幅に低下させてしまう。また、計算機による乱流解析を高精度化すると、その現象解析能力は分解能において風洞実験を大きくしのぐ。そこで、本システムにおいては格子点生成の簡便さ、容易さよりも計算精度を重要視して、マルチ・ブロック法を採用し、高精度な乱流計算を可能としている。

2.3. 計算結果の可視化

自動車の空力シミュレーションの主な目的は現象解析にあり、そのため計算結果をいかに解析するかは、ある意味において計算モデルの作成や、流れ場の数値計算よりも重要である。特に本システムの様に高精度の計算を行う場合、得られる情報量は風洞実験に比べてはるかに莫大であり、観測点数は空間で 100 万点以上、車体表面で 1 万点以上、観測点の間隔は最小ではミリ・メートル単位となり、また、1kHz 程度までの時間変動を捉える事も可能である。従って、シミュレーションには計算精度の保証範囲内で風洞実験よりもかなり微細な現象解析を行う事ができる。

しかし流れ場計算の結果は数値データの長大な羅列になり、この状態は単に計算機の中に自然現象を作り出したに過ぎず、現象については何ら見

識を与えるものではない。そこで何らかのデータ処理が必要となるが、そのプロセスや方法は与えられた問題や着目点によって大きく異なり、包括的に述べる事は今回の目的ではない。

しかし現象解析の手始めとして計算機の中の再現された現象を観察する事は十分に有意義である。また計算状態、例えば収束状態等のチェックを行う場合も、計算結果の観察は非常に有効な手段である。従って流体解析システムにおいて可視化システムは必要不可欠なツールとなってきている。⁽⁹⁾

流れ場の状態量は圧力と流速を基本とし、問題の内容によって、この圧力と流速から可視化する状態量が求められる。一般的にこうした状態量はスカラー量、ベクトル量で、次のような可視化手法がある。⁽¹⁰⁾

- ① スカラー量
 - ・等高線 (図2)
 - ・等値面 (図3)
- ② ベクトル量
 - ・タフト・グリッド (図4)
 - ・パーティクル・パス (図5)

これらの方法は流体測定における可視化手法を数値解析に応用したものである。また非定常流れ場は必要に応じて動画処理される。

流れ場は空間的、時間的に非常に複雑であり、

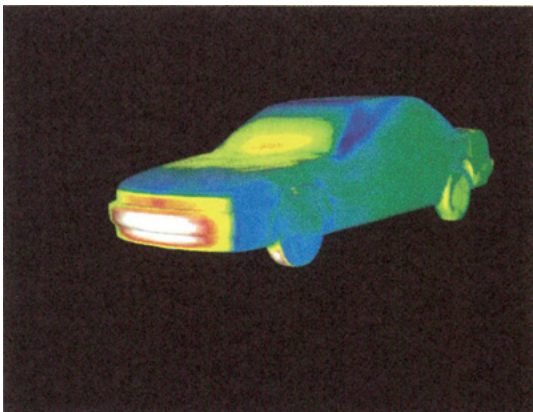


図2 圧力分布

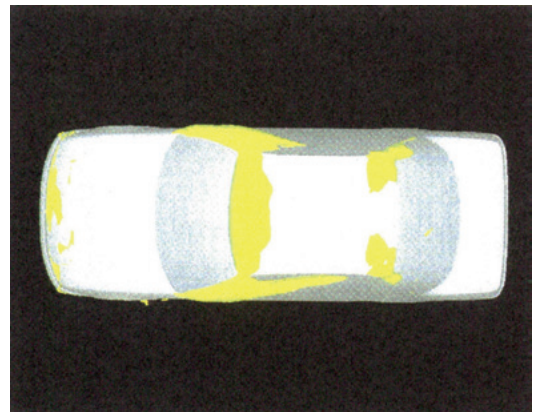


図3 等圧面

多角的な観察が必要である。そのため可視化システムには会話処理が可能となるだけのレスポンスが要求される。可視化イメージの計算は、その可視化イメージの1要素についてはさして高いものではないが、莫大な格子点数のために、1つの可視化イメージに費やす計算量は莫大なものになってしまう。そのため会話処理可能なレスポンスを得るために、高速CPU、大容量の高速メモリー、大容量かつ高速のディスクが必要となり、結果としてスーパー・コンピューター並の処理能力が要求される。同様にレンダリング処理を会話処理化する事も必要で、1万ポリゴン以上のレンダリングの実行も珍しくないためにグラフィックス・コンピューター、またはスーパー・コンピューターを用いて、レンダリング速度を高速化する必要がある。このように、たかが可視化処理であっても、かなり強力な計算機資源が必要である。本システムでは、今まで大型汎用機とUNIX系EWSを用いて可視化処理を行ってきたが、ネットワークの速度や、OSの不一致によって、会話処理が不可能であった。しかし今回、UNIX系のスーパーコンピューターの導入によって高速LANを介した可視化システムを導入し、会話処理とVTRを用いた動画処理を可能とした。

乱流の空間構造はかなり複雑であるので、多角的に可視化処理を用いて流れ場を観察しなければならないが、先述の可視化手法は空間構造の観察

においてかなりの労力を要する。つまり、

- ① 等高線の集合で空間構造を可視化する場合、多数の断面での表示が必要となる。
- ② 等値面の場合、多くのスカラー量について可視化しないと、空間構造の観察が難しい。
- ③ 多数の粒子放出点を用意してパーティクル・パスの可視化を行わないと渦などの空間内の流れの観察が難しい。

など、流れ場の空間的な全体構造、部分構造を観察するには、多くの断面での可視化処理を人為的に行われなければならないからである。そのため会話処理での手間が増えるとともに、計算負荷も高くなる。従って従来の可視化手法では流れの観察を効率よく行う事が難しい。これを解決するものとして期待されるのが、グラフィック・コンピューターの中でのレンダリング・データの構造を3次元化したボリューム・レンダリング法、可視化処理の基本データを画像データとして、画像処理技術を適用する事である。この技術は研究中であったり、まだあまり一般化されていないが、スカラー量の空間分布構造の可視化における潜在能力は十分高いものと思われる。

2.4. システム形態

本システムの形態図を図6に示す。空力シミュレーションの格子生成、流れ場計算、可視化はそれぞれの処理に適した計算機をLANにより分散

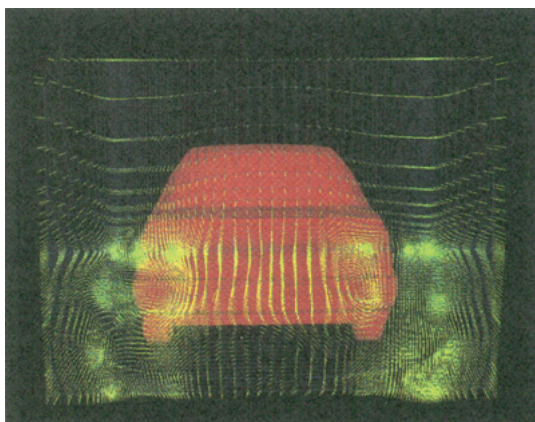


図4 タフトグリッド

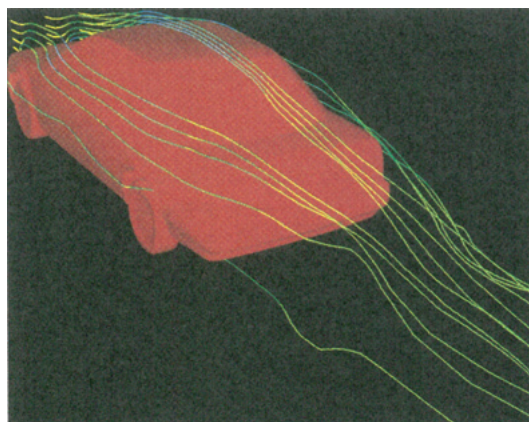


図5 パーティクルパス

処理化されている。つまり、

- ① 格子生成は、車体形状データが大型汎用機上のCADシステム内にあるので形状データのアクセス性を考えて、同じ大型汎用機上に会話が処理形式のシステムとして構築されている。
- ② 流れ場計算は、大型計算モデルの高速解法が要求されるのでスーパー・コンピュータCRAY YMPが使用される。計算結果は可視化処理にもこのスーパー・コンピュータを利用するのでスーパー・コンピュータのディスクに格納される。

- ③ 可視化処理は、可視化イメージの生成にCRAY YMPを用い、レンダリング処理にIRISを用い、この2つをLANで結合する事により会話処理が可能となり、さらにIRISとVTRを結合する事により動画処理の自動化を行っている。

このように各プロセスを分散処理化する事により複雑な形状の差分格子点を効率的に生成し、流れ場計算を高速で行い、多角的な可視化処理が可能となった。またそれぞれの処理を高速LANで結合する事によって、各システム間の大容量データの転送が十分耐えうる速度で実現された。

3. 本システムにおける解析例

本システムを使用しての解析例として、モデルAとBの比較を行った。両者は4ドアセダンとい

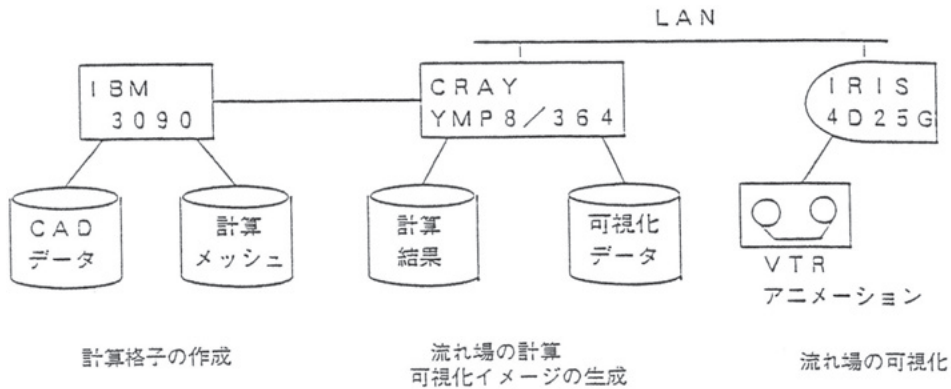


図6 システム図

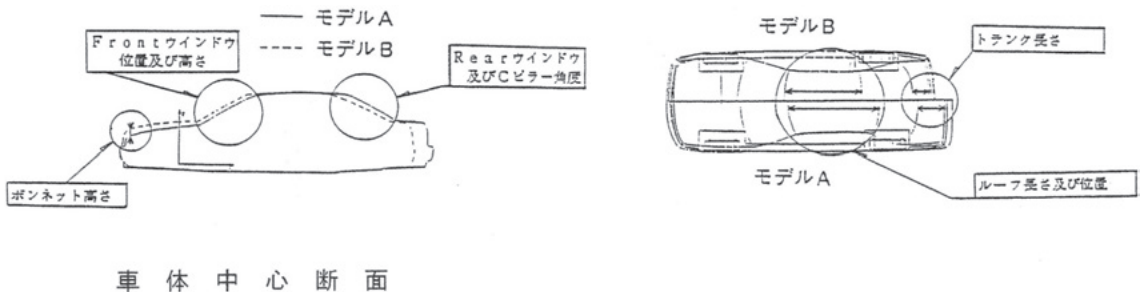


図7 モデル比較図

表1 計算モデルの条件

	モデルA	モデルB
レイノルズ数 (Re数)	2.6×10^6	←
(車速10m/s, 車体長4.0m, 動粘性係数 $1.51 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$)		
CPU計算時間	500時間	←
格子点数	159万点	152万点
フロント形状	開口なし	←
ウィンドウ段差	なし	←
ドアミラー	なし	←
フロアまわり	フラット	←
サス, ドライブシャフト	なし	←

うカテゴリーにあり、細部形状に若干違いがある(図7)。これらの微妙な形状の違いが流れ場にどのような影響を与えるかを分析した。またこの解解を通じて計算結果の分析方法をいくつか試みた。

3.1. 計算諸条件の設定

解析の諸条件は表1の通りである。計算モデルは車体形状の特徴を損なわない程度に単純化し、かつ風洞実験用のモデルと同一の仕様となっている。

3.2. 解析結果

(1) C_d , C_l の検証

シミュレーションにおける時間分解能の高さは図8に示すような時間変動をとらえることを可能とする。但し、初期条件が物理的な現実性に乏しいので計算初期の変動は実際の現象と合致しない。この計算における時間刻み幅は 1.0×10^{-4} 秒であり、計算精度を考慮しなければ原理的には2kHz程度の変動までとらえる事が可能である。

図9より、シミュレーションと実験の間に高い相関性がある事がわかる。ここでの相関性のバラツキは計算メッシュの密度や分布状態の違いによって生じており、計算メッシュの密度と分布を適切にすれば、かなり高い精度で C_d , C_l 値を予測する事ができる。この事より本システムの計算精度の高さを実証することができた。

(2) 可視化手法による流れ解析

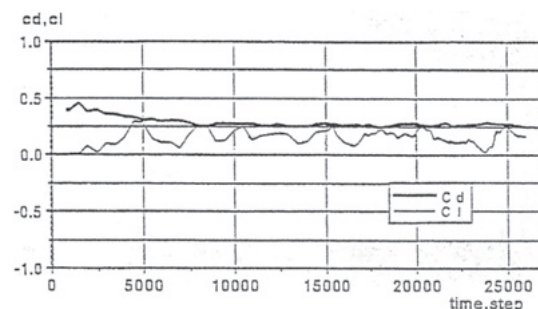
図10に車体表面の圧力分布の可視化をした一例

を示す。モデルA、B共にAピラー直後に大きな負圧分布が認められる。特にモデルAでは負圧分布、大きさがBに比べ広範囲である。また動画処理を行うとモデルAの方が圧力の時間変動が大きく、激しい事が観察される。ちなみにこの部分の負圧領域は、空力騒音に大きく影響を及ぼしていることが風洞実験により知られている。⁽¹¹⁾

このような可視化による解析ではあくまでも定性解析であるがためのあいまいさがつきまとうものの、乱流現象によって決定される空力特性や空力騒音等の解析を行う上で重要な情報を与えてくれる。乱流場の構造は複雑でありその解析の中でこのような情報を得る事は問題を明確化する上で非常に大切である。

(3) 車体各部別寄与解析

本システムでは車体全体の C_d , C_l だけではなく、各部別に寄与率を求めることが可能である。

図8 シミュレーションにおける C_d , C_l の時間変動グラフ

これにより車体各部分の圧力分布がそれぞれどの程度全抵抗に影響を及ぼすかがわかる。図 11 は抵抗抗力における各部の寄与である。モデル A、B 共にフロント面での抵抗が大半を占めている。また、ボンネットからリアウインドウにかけての車体上部に大きな寄与の差が両者の間に認められることからこの部分での形状差が全体の抵抗の差に影響していることがわかる。

(4) 車体各部位内の寄与解析

前述(3)を更に細分化し、各部位内の寄与度を分析する。車体の部分領域について、抗力を圧力について分類したものを図 12 に示す。この図においてグラフの面積は、注目している部分領域に働く全抗力を表す。また圧力分布と抗力分布の比較が可

能となり、正圧、負圧が抗力に対し正、負どのような影響を及ぼすのか知る事ができる。このグラフでは両モデルとも負圧が抗力を増加させ、正圧が抗力を減少させている事がわかる。またモデル Aの方がモデル B に比べ抗力が大きい、これは主に負圧部分の影響が大きいことによる。この様にして圧力分布と抗力分布の相関を比較的定量的に知る事ができる他、このグラフと実際の圧力分布図を比較する事によって図 13 の様に抗力への影響領域を示す事ができる。

(3)、(4)におけるこうした寄与解析はシミュレーションの空間分解能の高さの賜物である。ボディ表面の測定点数は3～4万点もあり、風洞実験における測定点数が数百点が限界である事を考えれ

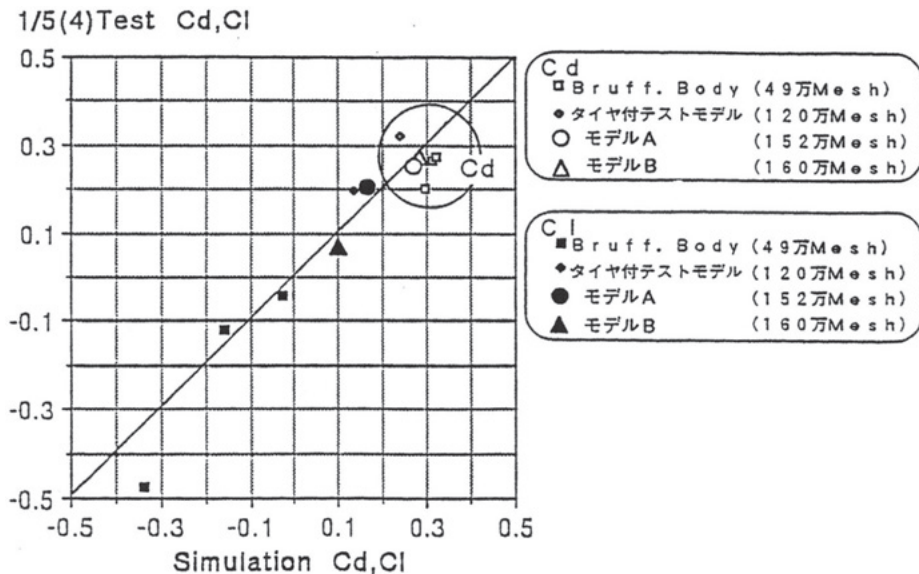


図9 シミュレーションと実機テストの C_d 、 C_l 比較グラフ

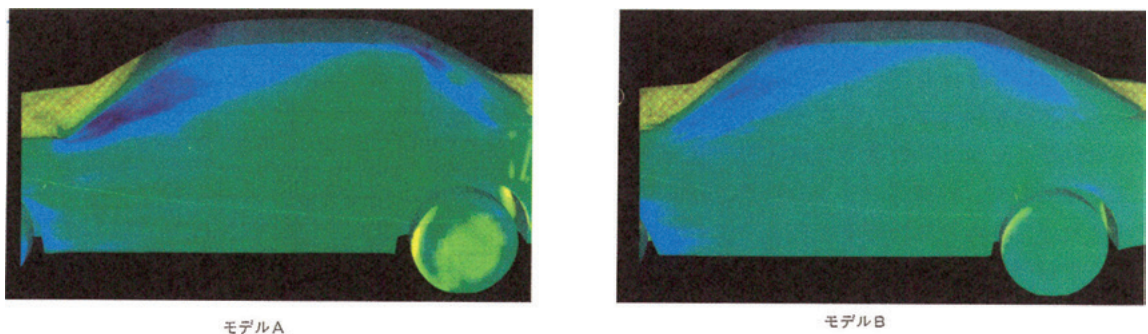


図 10 表面圧力分布 (赤: 正圧、青: 負圧)

ば、この寄与解析はシミュレーションの特徴を生かした解析手法であり、実験で同様の結果を得る事は不可能である事がわかる。

4. まとめ

空力シミュレーション・システムを開発し、風洞実験結果との比較から、現象解析のツールとして十分実用的な精度がある事が実証された。

また、複雑な車体形状も、その基本的な特徴を損なう事なくモデル化する事ができるようになった。さらに、シミュレーションの分解能の高さを生かして、実験では困難だった非定常流れや、より微細な渦を可視化する事ができ、乱流現象の解析を行う上で、強力なツールとなりえる事がわかった。

その反面、無視できない問題点もある。まず、高精度計算ゆえに計算モデルの作成、流れ計算、可視化のすべてにおいて膨大な時間を要する。そのため迅速なフィード・バックが要求される、商品開発システムへの組込は、ソフト、ハード両面での大幅な高速化が達成されないと困難である。また、現在のシステムはまだ計算機の中で作られた現象を観察する事にとどまっている。シミュレーションの潜在的な現象解析能力は非常に高いものの、実用例は少なくまだ研究段階にあるのが実状である。

つまり、現状の空力シミュレーション・システムでは、高い形状再現性と高い計算精度は達成されたものの、処理効率、活用技術は今後の課題として残されている。今後ともこの両面について、

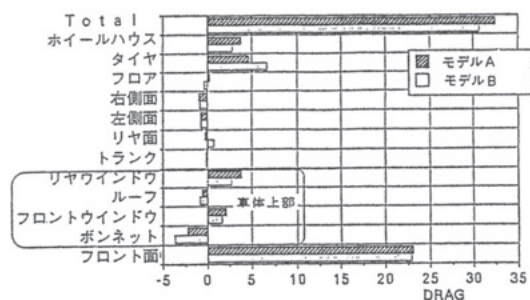


図 11 車体各別 Drag

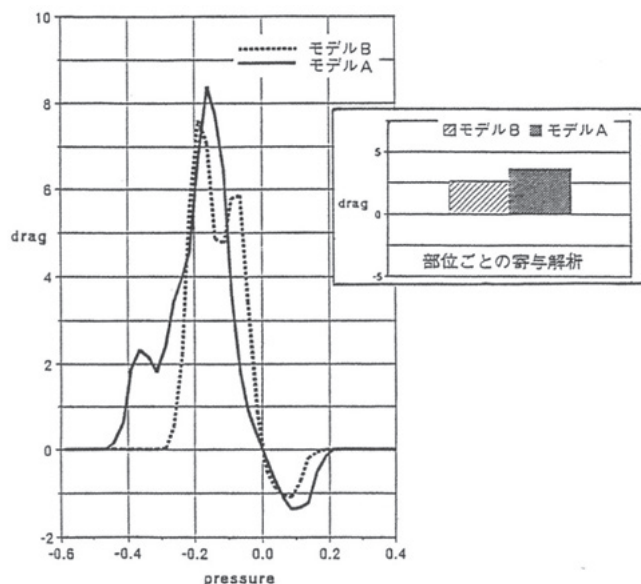


図 12 部位内圧力の効力への寄与解析

〔-ピーク 負の寄与大〕
〔+ピーク 正の寄与大〕

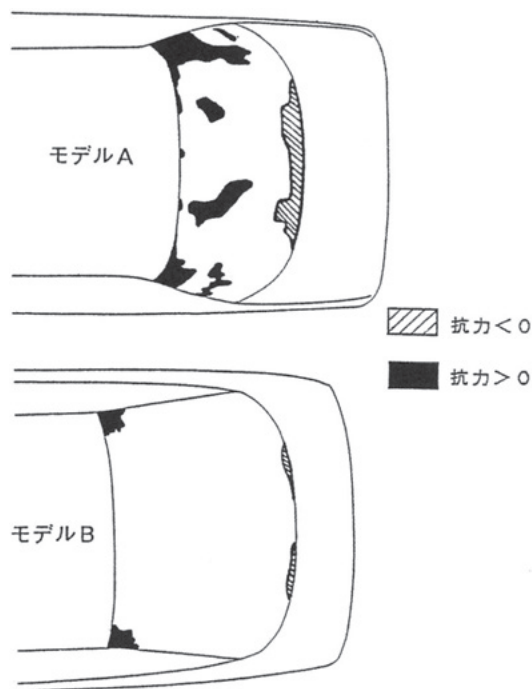


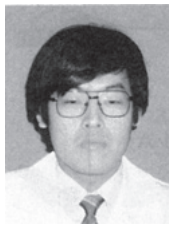
図 13 圧力分布と寄与解析の比較

さらに研究、開発を進めていく必要がある。

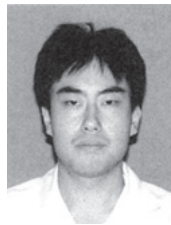
参 考 文 献

- (1) 中川邦夫、柳本憲男、片岡拓也、栗山和幸、
椎名 敏：アクティブエアロコントロールシス
テムの開発、自動車技術会学術講演会前刷集
902(1990)、P153～155
- (2) 堀之内成明、小林信雄、前田和宏：空力基礎
実験モデルまわりの流れ解析、自動車技術会学
術講演会前刷集 902(1990)、P157～160
- (3) 河口健二、橋口真宜：タイヤ付き3次元車体
回りの空力シミュレーション、自動車技術会学
術講演会前刷集 902(1990)、P161～164
- (4) 藤谷克郎、姫野龍太郎、佐藤早苗、西川省吾：
動画による自動車周りの流れの可視化、流れ
の可視化 Vol. 9、No.34(1989)、P107～110
- (5) 野本祐春、福島達也、鵜沢 潔：空力性能解
析におけるコンピュータ利用技術、自動車技術
Vol. 42、No.4(1988)、P445～450
- (6) T. Kawamura, K. Kuwahara: Computation of
High Reynolds Number Flow around a
Circular Cylinder with Surface Roughness,
AIAA 22nd Aerospace Sciences Meeting (1984)
- (7) 中橋和博：格子形成の基礎、日本機械学会
関西支部第 153 回講習会 (1987)、P37～48
- (8) Joe F. Thompson, Z.U.A. Warsi, C. Wastin:
Numerical Grid Generation, North-Holland
(1985)
- (9) 白山 晋、桑原邦郎：計算流体力学における
流れの可視化、第4回航空機計算空気力シンポ
ジウム論文集
- (10) 姫野龍太郎：数値流体力学における流れの可
視化、日本機械学会関西支部第 153 回講習会
(1987)
- (11) 春名 茂、神本一郎、岡本 哲：空力騒音の
実験的研究、自動車技術会学術講演会前刷集
902 1990-10

■ 著 者 ■



福 島 達 也



宮 島 保



高 村 明 男