

表面格子自動生成法を用いた車両周りの流れ解析

佐藤和浩^{*} 柴崎秀樹^{*} 高橋峰生^{*} 田野一也^{**}

Numerical Simulation of Flow around an Automobile
using an Auto Grid Generating System on Body Surface

by

Kazuhiro SATOH, Hideki SHIBASAKI, Mineo TAKAHASHI

Subaru Research Center CO.,LTD.

Kazunari TANO

Fuji Heavy Industries,LTD.

ABSTRACT

A Numerical simulation system of flow around an automobile has been developed, in which an auto grid generating system on body surface is used. Advantage of this system is that the grid of body surface is generated quickly, and grid distribution is controlled easily. Comparison with results of wind tunnel tests shows that this system is effective for predicting the flow around an automobile. The auto grid generation can be useful CFD tool for development of an automobile.

1. はじめに

CFDによる車両周りの流れ解析技術は、適用範囲の拡大、解析精度の向上、それに解析期間の短縮と目を見張るものがある。特に、解析精度では、直進時の空気抵抗を数%の誤差で予測できるようになってきており^{(1) - (5)}、新型車開発初期段階に十分適用できるレベルにまでなってきた。しかし、風洞試験のように頻繁な形状変更に対応できるとは言いがたい。それは、格子生成作業の煩雑さが大いにネックになっているからである。また、流れのメカニズム解明が困難な揺角特性を十分なレベルで予測できていないのも現状である。

今回、表面格子形状とその間隔を容易にかつ、短時間で調整できる表面格子自動生成手法を開発し、その有用性を検討した。その結果、本手法は揺角特性予測も実用レベルにあり、商品開発に十分適用できることを確認できたので報告する。

2. 格子生成

2. 1. 表面格子生成

滑らかな車両表面を多角形で表現する表面格子では、格子点数や間隔の粗密によって角部が強調され、流れの剝離位置が変化してしまうこともある。非構造格子を用い表面格子を生成する手法⁽⁶⁾などいくつかの方法⁽⁷⁾が提案されているが、実用例のほとんどがCADを使用している。この場合、対話的作業が必要となり、これが格子生成の自動化を阻害している。我々の開発したシステムは、デザインCADデータやクレームモデルから計測した座標値等を取り込み、表面格子を自動的に生成するシステムである。これにより格子点数や間隔の粗密調整等、表面格子形状を数分のオーダーで変更できるようになっている。表面格子生成手法の概要を以下に示す。

車両表面上の複数の補助線（Bone line：図1-aの実線）を利用し、主流方向（図の左下から右上に向かって）の格子線（図1-aの点線）を設定することを考える。基本手順は次のようになる。

* (株)スバル研究所

** 富士重工業(株)

(1) 第1ライン分割

車両先頭に相当する線分ABを n 分割（任意間隔）し、それぞれの格子線の出発点とする（図1では、 $n=4$ 、それぞれの格子点間隔を L_i 、 $i=1, 4$ とする）。

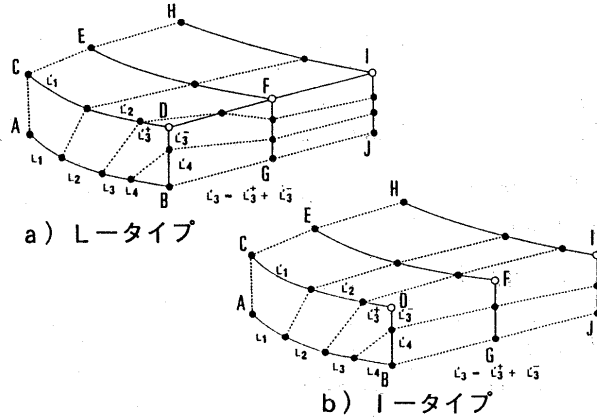


図1 表面格子生成概要

(2) 第2ライン分割

線分CDB上の交点座標を線分AB上の交点座標間隔（ L_i 、 $i=1, 4$ ）より求める。例えば、 $L'_i = (CDB/AB) \times L_i$ 、 $i=1, n$ ここで、線分CDBを線分ABの誘導線と呼ぶ。

(3) 第3上面ライン分割

線分EFD上の交点座標を線分CD上の交点座標間隔より求める。

(4) 第3側面ライン分割

線分FG上の交点座標を線分FDB上の交点座標間隔より求める。

(5) 第 n 上・側面ライン分割

線分HIFと線分IJ上の交点座標を（3）、（4）と同様に求める。

(6) 主流方向に交わる格子線生成

主流方向の格子線を新たな補助線とし同様な

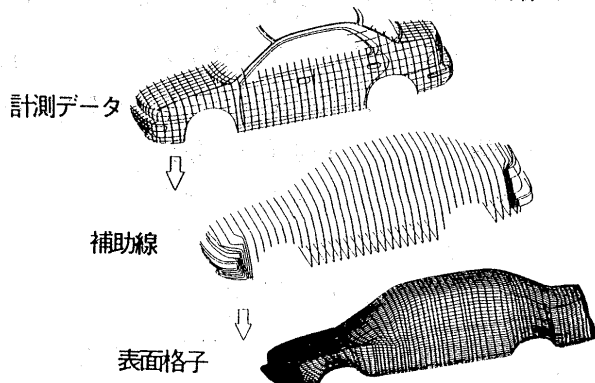


図2 表面格子生成手順

手順で主流方向に交わる格子線を生成し、その交点を格子点とする。

手順（3）において、線分CDに対する誘導線を線分EFD（逆L型）とする代わりに線分EF（I型）とすれば、流れ方向のラインは側面に回り込まず、車両上面に生成できる（図1-b）。更に、誘導線上に制御点（＝肩ポイント、例えば誘導線EFDの場合、点F上におく）を設け、この位置と線分の分割法を調整することで格子間隔の粗密調整も容易にできる。図2に計測座標から表面格子を生成する手順を、図3に補助線と肩ポイントを変更し、格子形状を調整した例を示す。また図4に車幅方向および主流方向に疎密調整した例を示す。

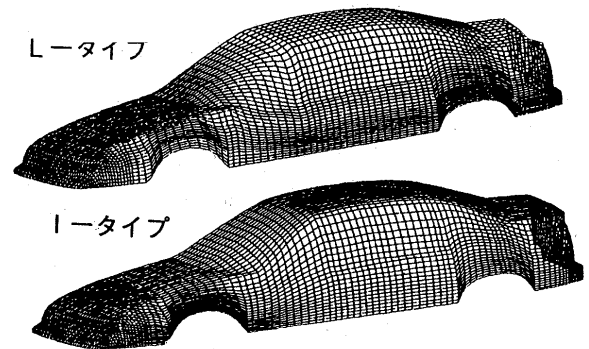


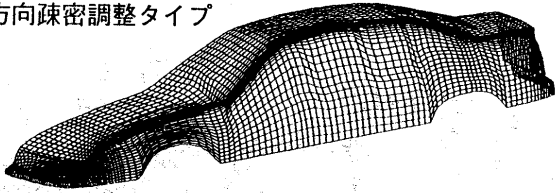
図3 表面格子形状調整例-1

本手法の特徴は以下の通りである。

- a) 補助線と肩ポイントの制御だけで表面格子形状を容易に調整できる。特に、フロントピラー付近で側面に回り込むように格子を張ることができる。
- b) CADデータからでも、計測データからでも、表面格子を生成できる。
- c) 格子生成時間が非常に短い（汎用機で数秒）。
- d) パラメータの変更だけで、格子間隔の調整が瞬時にかつ自動的にできる。そのためパラメータを流れ場の情報とリンクすることで、表面の格子点間隔を自動的に変更することができ、解適合格子法等に応用できる。

更に本システムでは、車両表面を複数のブロックに分け、それぞれに表面格子を生成し最後に一体化する。これにより、各部での格子間隔の粗密調整を容易にかつ、部分的に行えることになる。

車幅方向疎密調整タイプ



流れ方向疎密調整タイプ

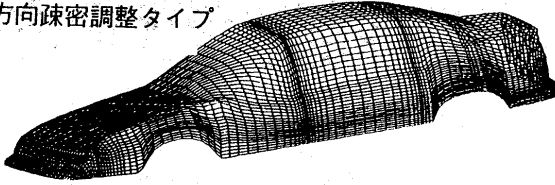


図4 表面格子形状調整例-2

2. 2. 空間格子生成法

車両周りの流れ解析にはL型のマルチブロック法が一般的に使われている⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾。この手法は、複雑な三次元形状に対応し易いが、車両内部にも格子点を配置し格子点が無駄になることや、丸い物体でも計算上では仮想角 (fictitious corner) を持ってしまう等、不利な面もある^{(4), (8)}。本システムでは、これらの問題が無い上に、計算効率の高いH-H型格子を採用した。計算領域は、車両先端 (フロントバンパ先端) と後端 (リヤバンパ後端) を結んだ面 (カッティング面) で上下に二分割し、それぞれに格子を生成する。ここで、タイヤ表面は地面の一部の凹凸としてあわす。

空間格子生成には、双曲型と放物型からなり、それぞれの長所を活かした混合型偏微分方程式の手法⁽⁹⁾を用いた。これは、車両近傍では双曲型により格子の直交性を満足させ、外側の境界では放物型により境界を規定し、途中の空間ではそれぞれの方程式の割合を適度に調整する手法である。また、前進法で解くため繰り返し計算を必要とせず短時間で格子生成ができる点も大きな特徴である。

3. 数値解析方法

3. 1. 解析手法

本解析手法は疑似直接解法である" NAGARE" ((株) 計算流体力学研究所で開発) をベースに改良を加えたものであり、概要は以下の通りである。

車両周りの流れは、非定常・非圧縮・粘性流の連続の式とナビア・ストークス (N-S) 方程式

で記述され、静止流体中を速度 V_B で走行する車両では次式であらわされる。

$$\operatorname{div} V = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial t} + (V \cdot \operatorname{grad}) V \\ = -\operatorname{grad} P + \frac{1}{R_e} \Delta V \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 $V = V_u - V_B$ であり、 V_u は一様流である。圧力に関する方程式は、MAC法同様、式 (2) の発散をとり、時刻 $n \times \Delta t$ ではまだ計算が収束していないため連続の式が満足されず、 $(n+1) \times \Delta t$ で初めて連続の式が満足されるとし、次式の Poisson の方程式が誘導される。

$$\Delta P = -\operatorname{div} (V \cdot \operatorname{grad}) V + \frac{D^n}{\Delta t} \quad (3)$$

ここで、 $D = \operatorname{div} V$ であり、 D^n は n ステップに D の値を示す。式の離散化は、N-S 方程式の間微分項である非線形項 (対流項) に三次精度風上差分の K-K スキーム⁽¹⁰⁾、それ以外の空間微分項に二次精度の中心差分、時間微分は一次精度の陰的オイラー法を用いる。連立方程式の解法には SOR 法を用いている。

3. 2. 境界条件と初期条件

境界条件は、車両表面、地面、それにタイヤ表面に車両速度を与え (ディリクレ条件)、それ以外では、各面の垂直方向に流速及び圧力が変化しない (ノイマン条件) とした。なお、タイヤ表面に回転速度を与えることでタイヤの回転をあらわすことができるが、今回は風洞試験条件 (タイヤ回転無し、地面固定) に合わせるため車両と同じ条件とした。初期条件は、速度と圧力を 0 とし、無次元時刻 3 で最終速度になるように徐々に加速させた (加速スタート)。

4. 解析システムの有用性

本システムの有用性を示すために、実際の商品開発で用いた検討モデルでの検証例を示す。モデルは 1/5 クーペモデルと 1/5 および、1/1 セダンモデルである。

図5は解析に用いたクーペモデルの補助線と車両表面格子である。フロントグリルは塞ぎ、アウターミラーは外している。またセダンモデルの表面形状を図6に示す。床下は図7のように主要部品を車両の凹凸で表現し、より実車形状に近いシミュレーションを可能にしている。タイヤは地面格子の一部として表現している。車両表面は11ブロックで構成され、格子点数は約16,200点、空間格子は $151 \times 129 \times 80$ の約156万点である。表面格子と空間格子生成では、様々なノウハウをシステムに織込み自動化しており、数分のオーダーで生成できるが、格子生成全体の作業時間は25人・時間程度である。この時間の大半は補助線の生成であり、現在はその生成の自動化を進めている。

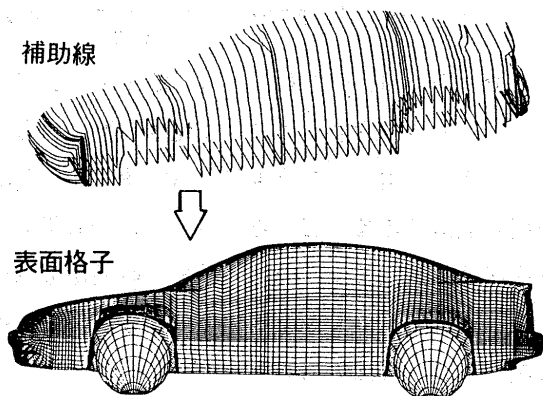


図5 補助線と表面格子形状 (クーペ)

計算は、1/5および、1/1モデルの風洞試験条件に合わせ、それぞれ $Re = 6.6 \times 10^5$ 、 2.7×10^6 (車高を代表長さ) で行った。時間刻み幅は0.002、無次元時刻7~13の間の時間平均で計算結果を評価した。計算時間は、富士通VP-2600で約14時間、計算容量は約172MBを要した。

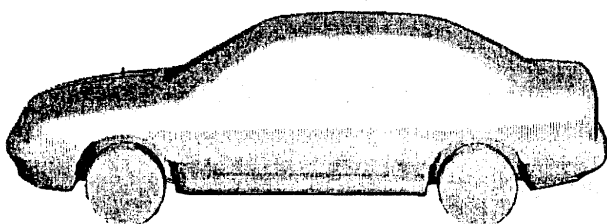


図6 解析モデル (セダン)

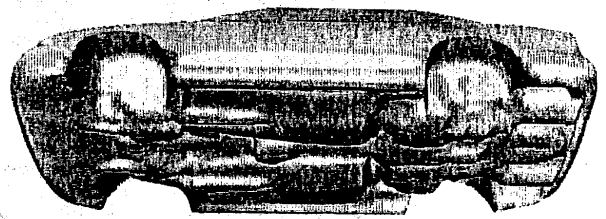


図7 解析モデル：床下形状

図8は1/5クーペモデルの表面における圧力係数 C_p を風洞試験値と比較したものである。上の2つは車両中央断面 (S1)、下の2つはフロントビラー付近断面 (S2) での比較であり、何れも左側が直進時で右側が揺角 30° の時の比較である。解析値と試験値は良く一致していることがわかる。図9は1/5セダンモデルで同様な比較を行ったものであり、車両中央断面に平行で窓肩近くの断面 (S3) とリヤビラー付近断面 (S4) での比較である。何れも揺角 0° 、 10° 、 30° で比較している。負圧の高い部分では若干の差はあるものの、全体的に良い一致を示している。図10に空気抵抗係数 C_d を、図11に揺角に対する6分力の変化を、計算値と試験値を比較して示す。

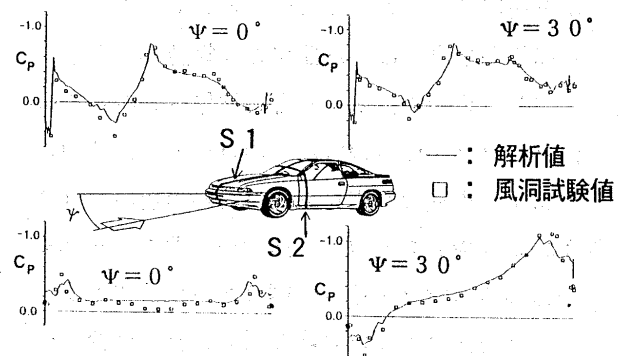


図8 表面圧力分布 (1/5クーペ)

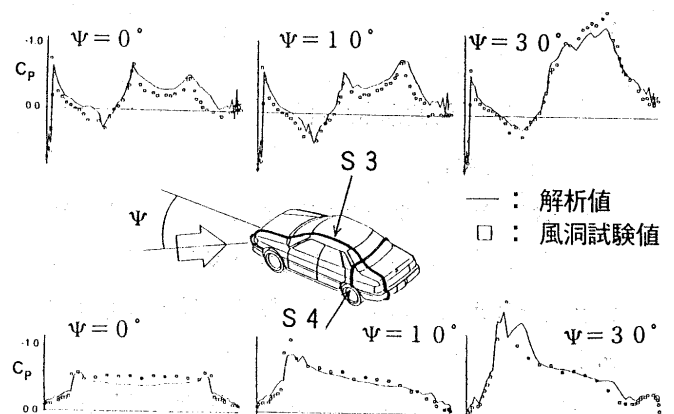


図9 表面圧力分布 (1/5セダン)

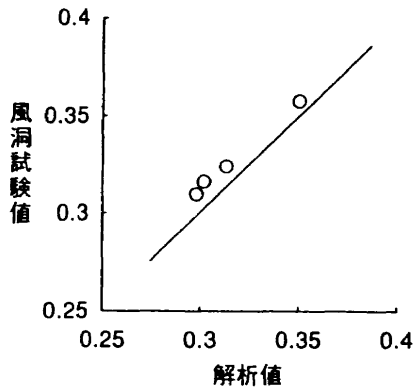


図10 空気抵抗係数 C_D
○: 解析値
□: 風洞試験値

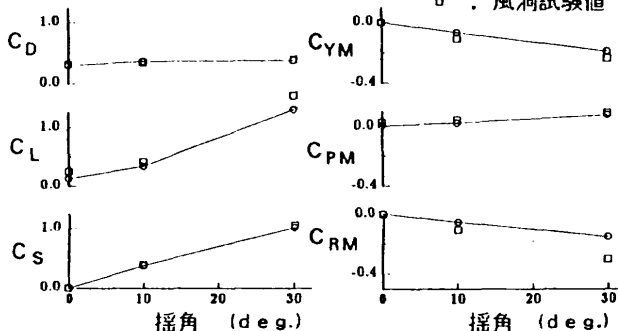
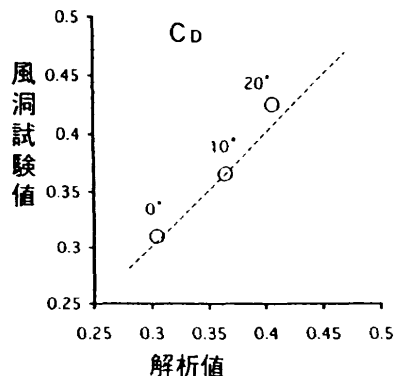


図11 揺角特性 (1/5クーペ)

図12は1/1セダンモデルでの揺角に対する C_D と C_{YM} の変化を示したものである。これらの結果より、1/5および1/1モデルの各空力値の変化を定性的にとらえており、実用レベルにあることがわかる。

5. 商品開発への応用

2-BOX車の場合、リヤゲート傾斜角によって車両に働く空気抵抗が大きく変化し、一般に30°付近（臨界角）の時最大になることが知られている。図13は比較に用いた2つのモデルのリヤ形状と車両後方（リヤバンパ後方120mm）での平均速度ベクトルの計算結果である。図14は車両中央断面における平均流線である。これら



の図より、モデルBはAに比べ車両後方での下向きの流れが強くなり、その結果、空気抵抗が悪化していることがわかる。この結果は風洞試験でも確認されている。

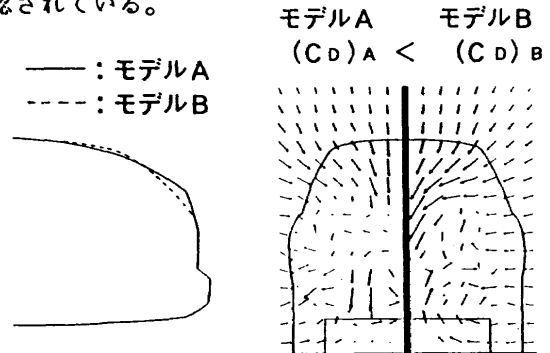


図13 リヤゲート角による流れの変化

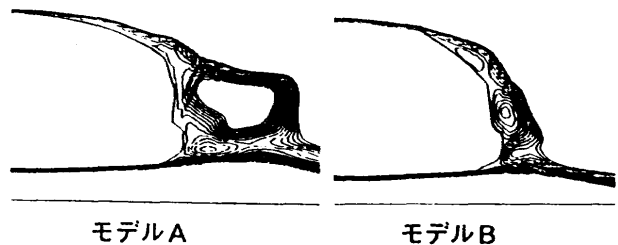


図14 平均流線（車両中央断面）

車両の場合、空気抵抗の1割程度が床下の凹凸によると言われ、市販車でも床下形状の改善が多く試みられている。図15に床下がフラットな場合と排気管等による凹凸がある場合の計算で求めた流れの違いを示す。フラットな場合、流れは、ほぼ真後ろに向かって行くが、床下に凹凸がある場合、流れはフレームやフロアトンネルに妨げられ、大きく乱れている様子がわかる。またそれに伴い、後流形状も異なっている。この結果から床下形状の変更が後流の制御に強く関係することがわかる。実際にはエンジン房内からの流れがあるため、この結果だけを単純に引用することはできないが、初期検討には十分活用できる。

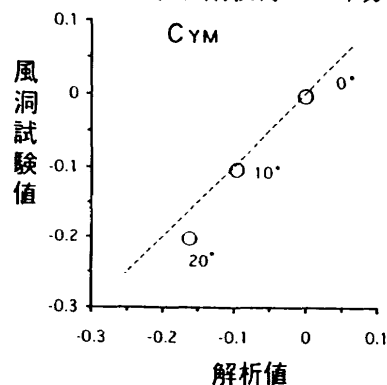


図12 揺角特性 (1/1セダン)

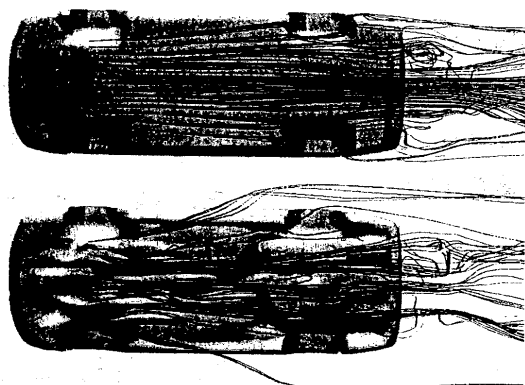
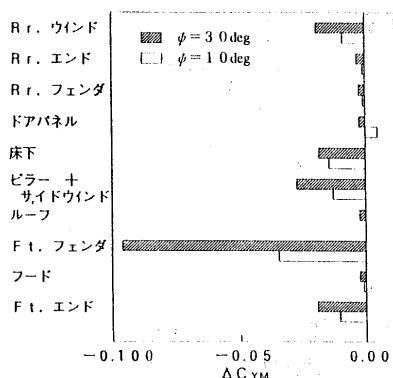


図15 床下形状による流れの変化

抗力だけでなく車両に働くモーメントの発生メカニズムを把握し改善することが走行安定性にとって重要である。特に、横風に対する安定性に影響する C_{YM} は重要視されている。図16に各揺角による各部位の C_{YM} の変化を示す。モーメント中心はホイールベース中心であり、各部位の風上、および、風下側の成分の和をとっている。この図からFt. フェンダが全体のほぼ半数を占めており、この部位の C_{YM} 低減が最も効果的であることがわかる。ただし、すべての形状が影響しあっているため単純にこの部位だけの改善を行うことは難しく、流跡線やオイルフロー等の他の結果と合わせて検討し、改善する必要がある。

6. まとめ

表面格子自動生成法を開発し、格子形状を短時間で容易に調整できるシステムを開発した。これと、三次精度風上差分法を用いた非定常・非圧縮・粘性流解析を組合せ、揺角特性を含む車両周りの流れを解析できた。この結果は、風洞試験と良い一致を示し、特に、揺角特性においては、定性的な予測を可能とした。これにより、本システムの有用性と商品開発への実用性を示すことができた。

図16 各部位の C_{YM} 揺角特性

7. おわりに

現在、表面格子形状を容易に変更できる特徴を活し、表面格子形状が解析結果に与える影響を検討している。収束状況に変化がみられることを確認しているが、格子形状の歪みやアスペクト比等が複雑に絡み合う様々な影響をどの様にして分離するか今後の課題である。

参考文献

- (1) 藤谷：空力解析技術の空力性能設計への適用，自動車技術，Vol.46,NO.11(1992),PP.56-61
- (2) 山田，伊東，岡本：車体まわり流れの計算解析，自技会学術講演会前刷集，921004(1992)
浮田，知名：床下エンジンルームを含む車体まわり流れの特性の数値解析，自技会学術講演会前刷集，921003(1992)
- (4) 福島，宮島，高村：計算機を用いた空力解析システムの開発，HONDA R & D Technical Review Vol.3(1991)
- (5) 河口，橋口：タイヤ付き3次元車体周りの空力シミュレーション，自技会学術講演論文集，Vol.1.23, NO.3(1992),PP.97-102
- (6) 鈴木：非構造格子に基づく構造格子形成法について，航空宇宙技術研究所特別資料SP-100(1989),PP.185-187
- (7) S.Nakamura, M.L.Spradling, D.P.Fradl, and K.Kuwahara: A Grid Generating System for Automobile Aerodynamic Analysis, SAE paper 910598(1991)
- (8) 保原，大宮司：数値流体力学-基礎と応用-，東京大学出版(1992)
- (9) S.Nakamura, and M.Suzuki: Noniterative Three Dimensional Grid Generation Using a Parabolic-Hyperbolic Hybrid Scheme, AIAA-87-0277(1987)
- (10) T.Kawamura, and K.Kuwahara: Computation of High Reynolds Number Flow around a Circular Cylinder with Surface Roughness, AIAA-84-0340(1984)