

## 車体付加物（リヤ・スポイラ）が車体周りの流れに及ぼす影響のシミュレーション

佐藤 和 浩\*    桑 原 邦 郎\*\*  
 増 田 幸 一\*\*\*    鈴 木 昌 弘\*\*\*

### Numerical Simulation of Aerodynamic Effects of the Rear-Spoiler on an Automobile

by

Kazuhiro SATOH  
*Fuji Heavy Industries, Ltd.*  
 Kunio KUWAHARA  
*Institute of Space and Astronautical Science*  
 Koichi MASUDA and Masahiro SUZUKI  
*Institute of Computational Fluid Dynamics*

#### ABSTRACT

In order to shorten a period of development of automobiles and induce the possibility of new technology, the necessity for numerical simulation of flow around an automobile has been rapidly increasing in recent years.

But, it was not easy to calculate the flow around an automobile with a separated flow, because of unstability of calculation.

The effects of the rear-spoiler on a 2-dimensional model of an automobile were simulated using the third-order upwind differencing scheme. The computational results show good agreement with results of wind tunnel tests.

This paper shows that the present method is effective as a design tool, in predicting the flow around an automobile with a separated flow.

#### 1. はじめに

自動車における空力開発は、その性能向上はもとより、オリジナル・デザインといかにマッチさせることが出来るかが大きなポイントとなる。

そのため、デザイン検討と並行した空力開発が必

要となるが、最近の自動車は、ユーザの自己主張の一つとなってきており、基本形状で高い空力ポテンシャルをもたせつつ、スポイラ等の付加物を用い、多様化するニーズに応えようとしているのが現状である。

しかし、現状の縮尺モデルを用いての検討にはいくつもの制約もあり、また、今後更に短縮化される開発期間に対応することも難しい状況になってきている。

\* 富士重工業(株)

\*\* 宇宙科学研究所

\*\*\* (株)計算流体力学研究所

それ故、最近では、デザインCADの普及にともない、数値シミュレーションによる車体周りの流れ解析が盛んに行われている。ただし、車体後方に付加したリヤ・スポイラ周りの流れは、航空機でいう大迎角時の剝離を伴う翼型周りの流れに相当し、その難解さから、必ずしも満足した結果を得ているとはいいがたかった。

そこで、今回は、2次元の車体後方に付加したリヤスポイラの影響を、3次精度の風上差分を用いて計算し、風洞試験の結果と比較・検討した。

## 2. 計算概要

### 2.1 基礎方程式と計算手法<sup>1,2)</sup>

2次元の車体周りの流れを支配する基礎方程式は、次の非圧縮・粘性流れのナビエ・ストークス方程式と連続の式である。

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} = -\nabla P + \frac{1}{R_e} \nabla^2 \mathbf{v} \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (2)$$

圧力に関する基礎方程式は、MAC法同様、式(1)の発散を取り、時刻  $n \Delta t$  では計算誤差のため、連続の式は満足されず、時刻  $(n+1) \Delta t$  で初めて  $\nabla \cdot \mathbf{v} = 0$  が満足されるとすることにより、次式のポアソンの方程式の形となる。

$$\nabla^2 P = -\nabla \cdot (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} - \frac{D^n}{\Delta t} \quad (3)$$

ここで、 $D = \nabla \cdot \mathbf{v}$  である。

式(1)と(3)を差分近似し反復計算を行うわけであるが、ここで、車体形状をより正確に表すため、各々の式を曲線座標系で記述する。そして、式(1)の時間方向に対し陰的後退オイラー法を、また、空間方向の非線形項に対し3次精度の風上差分法を用い、その他の項は全て2次精度の中心差分で近似し計算する。

### 2.2 格子生成<sup>3,4)</sup>

微分方程式を用いて格子生成を行う場合、楕円型偏微分方程式では境界付近の直交性や格子間隔を調整するのが若干面倒である。それに対し、双曲型や放物型を用いた場合、楕円型のように反復解法を用いる必要がない故、計算時間は非常に短い。ただし、

双曲型では内部境界での格子の直交性を調整しやすい反面、外部境界形状を規定しやすく、また、放物型では外部境界を規定しやすい反面、内部境界付近の直交性を調整しづらいという互いに相反する特徴を持っている。

そこで、これらの2つの異なるタイプの偏微分方程式を結合させることにより、互いの長所だけを引き出すという混合型偏微分方程式による格子生成が提案された。この方法は物体近傍で双曲型の割合を強くすることで物体近傍での格子の直交性を満足させ、外側に進むにしたがい放物型を強くし外部境界点を規定することが出来る、という両者のメリットを合わせ持たせたものである。また、反復解法を必要としない点は変わらないので、格子生成が非常に短時間で出来る。

次式はそのマトリックス表示である。

$$\alpha (B_0^{-1} A_0 \bar{\tau}_\xi + \bar{\tau}_\eta + \varepsilon \bar{\tau}_{\xi\xi}) + (1-\alpha) \cdot (\bar{\tau}_\eta - a \bar{\tau}_{\xi\xi} + b r) = \alpha B_0^{-1} \bar{f} + (1-\alpha) \bar{S}, \quad 0 \leq \alpha \leq 1 \quad (4)$$

ここで、

$$\bar{\tau} = (x, y)^T, \quad \bar{f} = (0, V + V_0)^T$$

$a, b$ : 定数

$$A = \begin{pmatrix} x_\eta & y_\eta \\ y_\eta & -x_\eta \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} x_\xi & y_\xi \\ -y_\xi & x_\xi \end{pmatrix}$$

である。また、 $\alpha$  は両者の方程式の割合を調整する係数であり、

$\alpha = 1$  の時は、双曲型方程式

$\alpha = 0$  の時は、放物形方程式 となる。

ここで、 $\varepsilon$  は拡散係数と呼ばれるもので、 $\varepsilon \bar{\tau}_{\xi\xi}$  の項は計算を安定させるため人工的に加えられたものである。尚、外部境界の座標は  $\bar{S}$  に含まれる。

自動車の場合、車体と地面との間隔が極端に狭いため、車体上面に比べ下面の格子本数を少なくしたい。そこで、計算領域を車体上・下面の2つに分け、それぞれについて混合型偏微分方程式を三重対角式として解き基本格子を生成した。その後、ラプラス方程式を用いてスムージングした。また、車体下面領域については、等比数列を用い地面と車体の両方に格子を集中させ、最小格子間隔を境界層 ( $1/\sqrt{R_e}$ ) の約 1/10 に設定した。

図2-a), 3-a), 4-a), 5-a)は, 本手法で生成された格子であるが, 車体近傍への格子の集中と, 直交性を十分満足し, また, 凹部での格子の交わりもないなど, 本手法の長所がうまくいかされていることが分かる。

2.3 計算諸条件

今回の計算は,  $Re = 10^5$  の実走条件で行っており, 境界条件及び計算領域は, 図1の様に設定している。計算は, 急に一様流が流れるという, いわゆるインパルス・スタートで行い, 初期条件は全領域に於て,  $u=1, v=0, p=0$  とする。また, 時間刻み幅は  $\Delta t = 0.005$  とした。

2.4 計算モデル

今回, 計算に用いたモデルは, リヤ・スポイラ ( $R/S$ ) 有り・無し の2つのモデルであり, ルーフ以外全て直線であるため, 非常に剝離しやすく計算しづらいモデルである。

計算は, 格子点数や格子形状を変えた複数の格子

で行ったが, ここでは, 格子点数の異なる3ケースについてその結果を示す(表1)。

3. 計算結果と風洞試験結果との比較・検討

図2~5は,  $R/S$  有りのケースA, B, Cと,  $R/S$  無しのケースBにおける各々の a) 格子形状, b) 等圧力線図, c) 流線, 及び d) 車体表面の圧力係数分布であり, 格子以外は全て無次元時間10の間の時間平均値である。ここで, 圧力係数  $C_p$  は, 2次元風洞試験結果と比較しており, 試験は自動車技術部門の1/5スケール風洞で行った。尚, 計算は  $Re = 10^5$  で行っているのに対し, 風試は  $Re = 5.9 \times 10^5$  の地面盤固定で行っている。そのため, 車体先端での流れは若干異なってくる。ただし, フラットな車体下面の形状を持つモデルの場合, 地面との距離がある程度はなれると, フロント以外での車体表面での圧力は, 実走条件でも, 風洞試験条件でもさほど変わらないという報告もなされており<sup>5)</sup>, フロント以外では一致すると考えられる。

表1 計算モデル

ケース	格子点数	仕様
A	3000 × 1000	車体表面を均等に約3000分割した。
B	370 × 101	ルーフ先端からリヤ・スポイラトップ迄、及び下面の車体表面の分割数をケースAの2倍にした。
C	370 × 181	ケースBに加え、上面の車体から離れる方向の格子を約2倍にした。

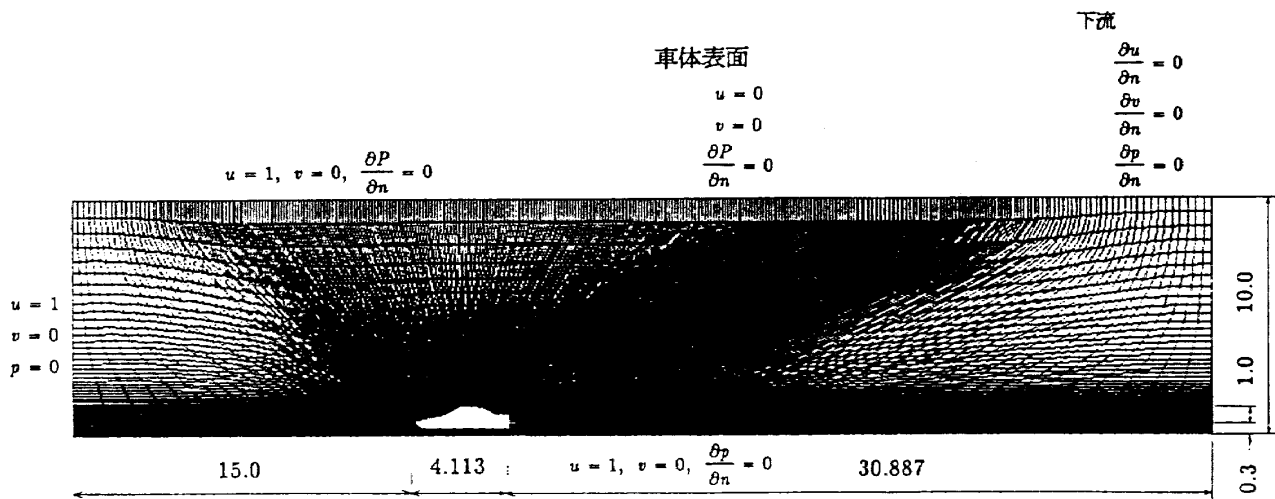


図1 計算領域全体の差分格子：ケースC (370 × 181)

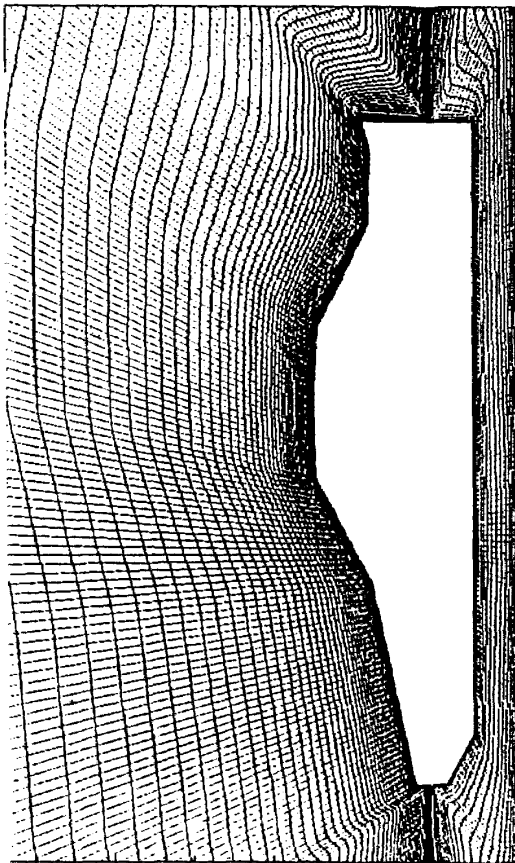


図 2 - a) 車体近傍の差分格子：ケース A (300×100)

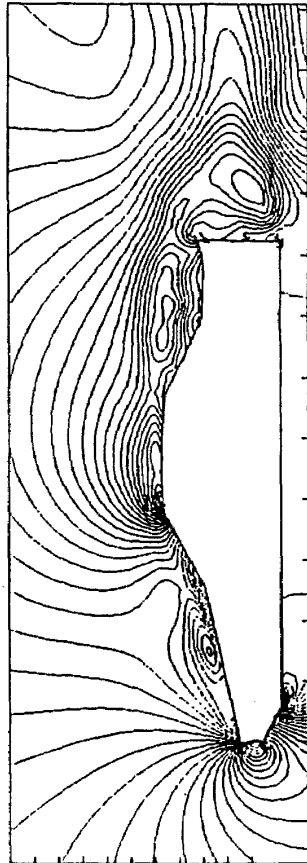


図 2 - b) 時間平均した等圧力線図：ケース A (300×100)

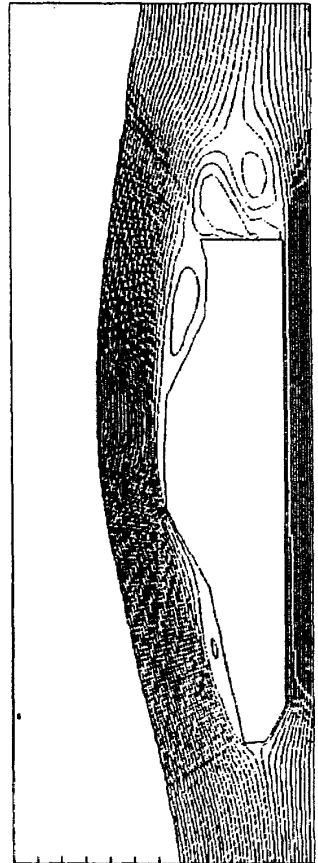


図 2 - c) 時間平均した流線：ケース A (300×100)

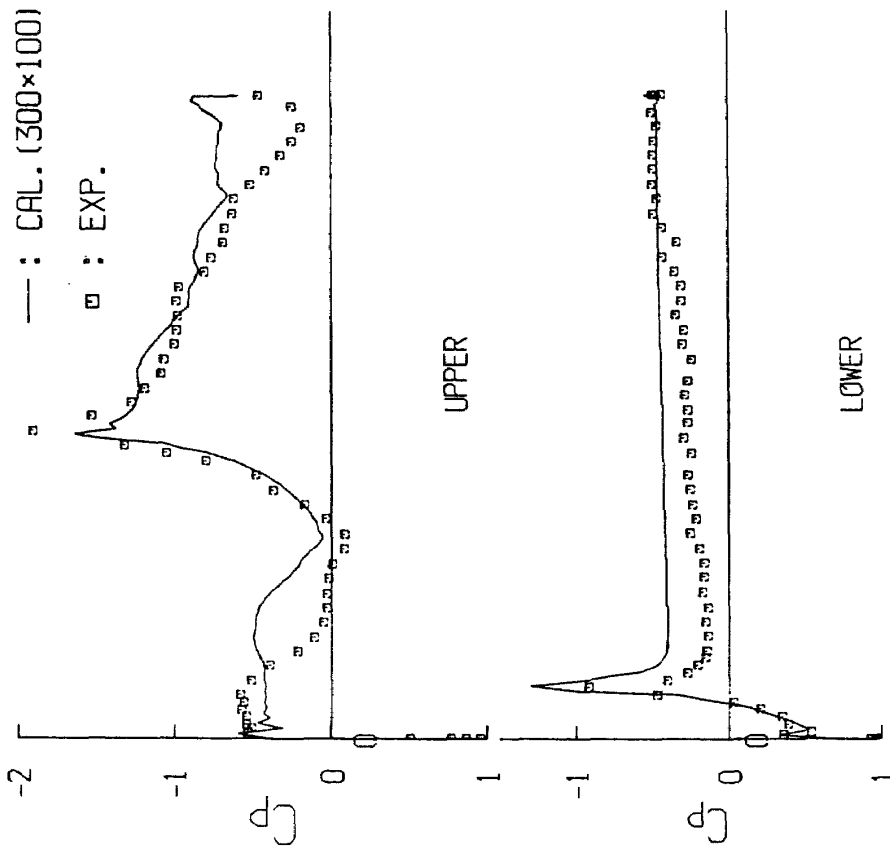


図 2 - d) 時間平均した車体表面の圧力係数：ケース A (300×100)

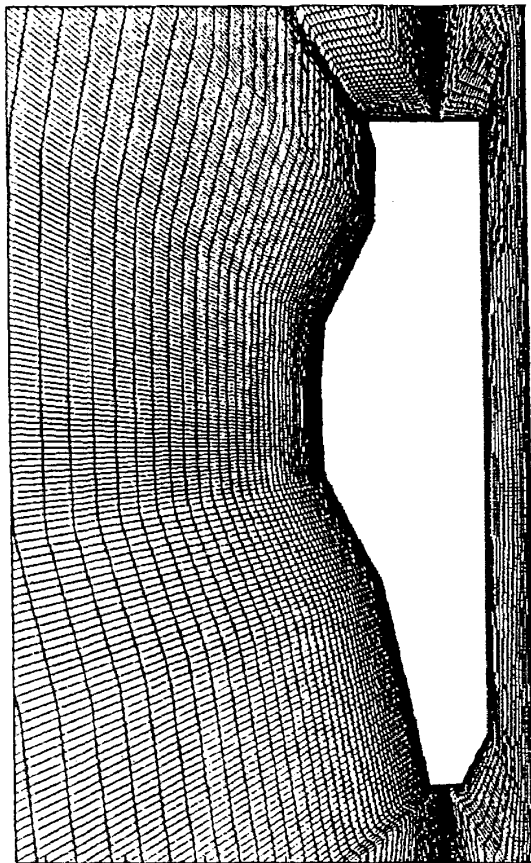


図3-a) 車体近傍の差分格子：ケースB (370×101)

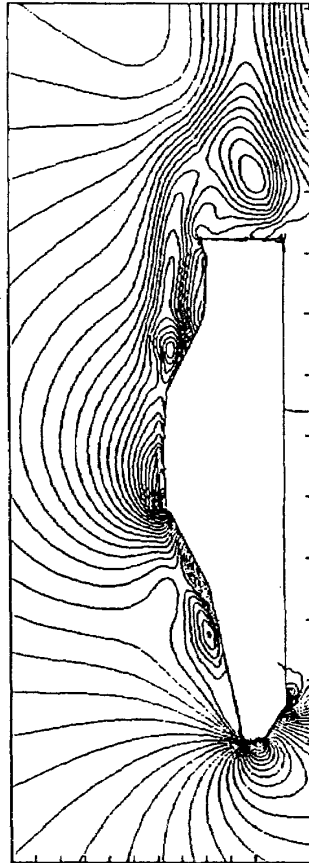


図3-b) 時間平均した等圧力線図：ケースB (370×101)

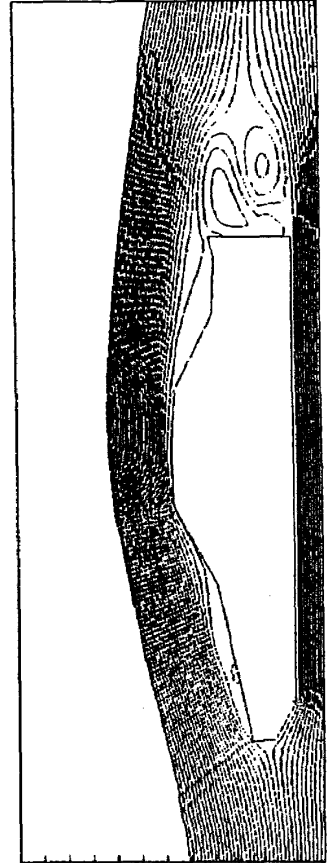


図3-c) 時間平均した流線：ケースB (370×101)

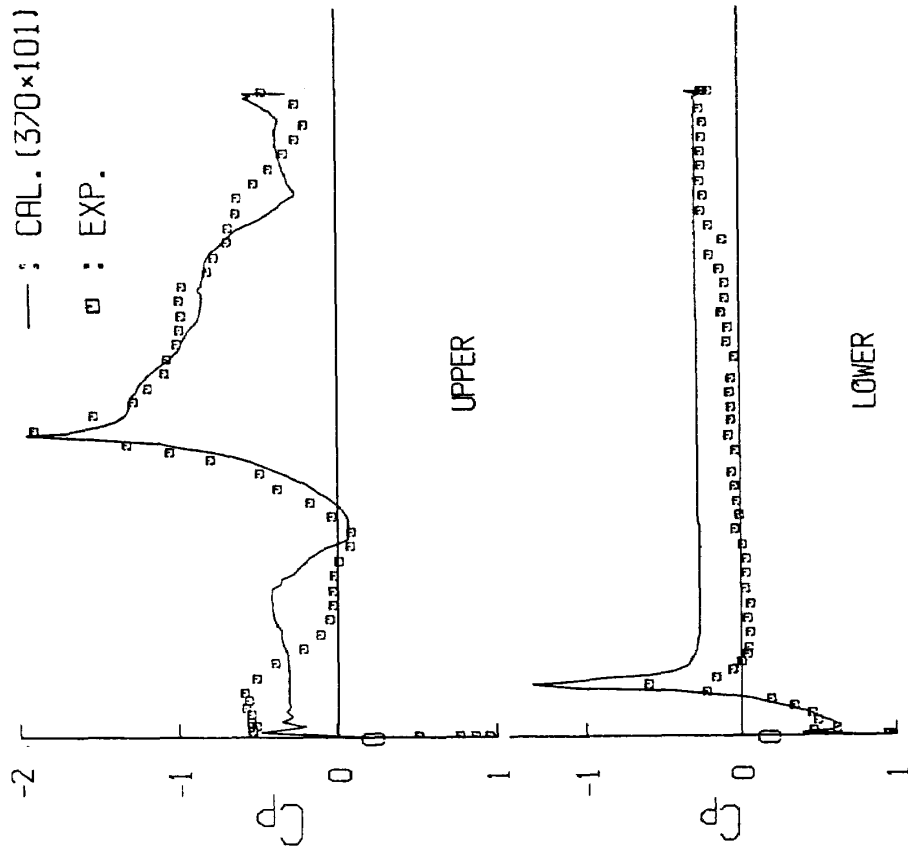


図3-d) 時間平均した車体表面の圧力係数：ケースB (370×101)

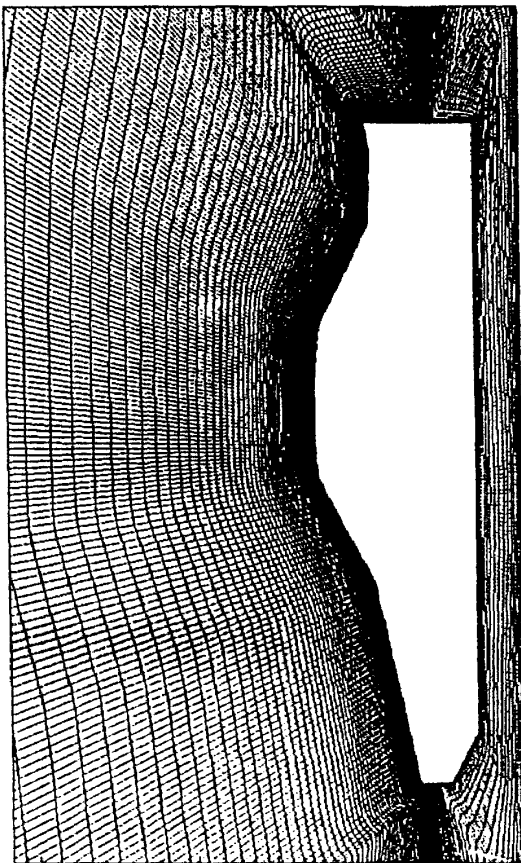


図4-a) 車体近傍の差分格子：ケースC (370×181)

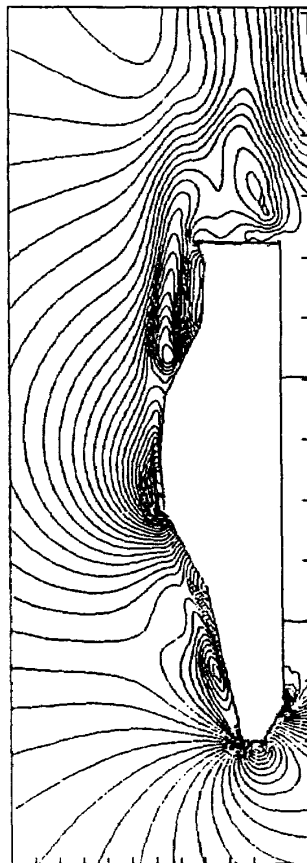


図4-b) 時間平均した等圧力線図：ケースC (370×181)

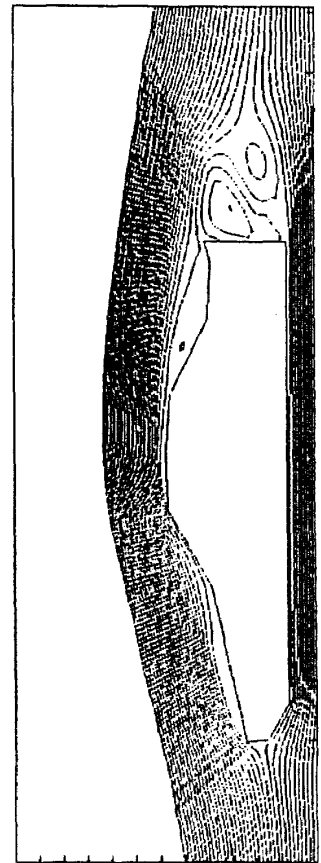


図4-c) 時間平均した流線：ケースC (370×181)

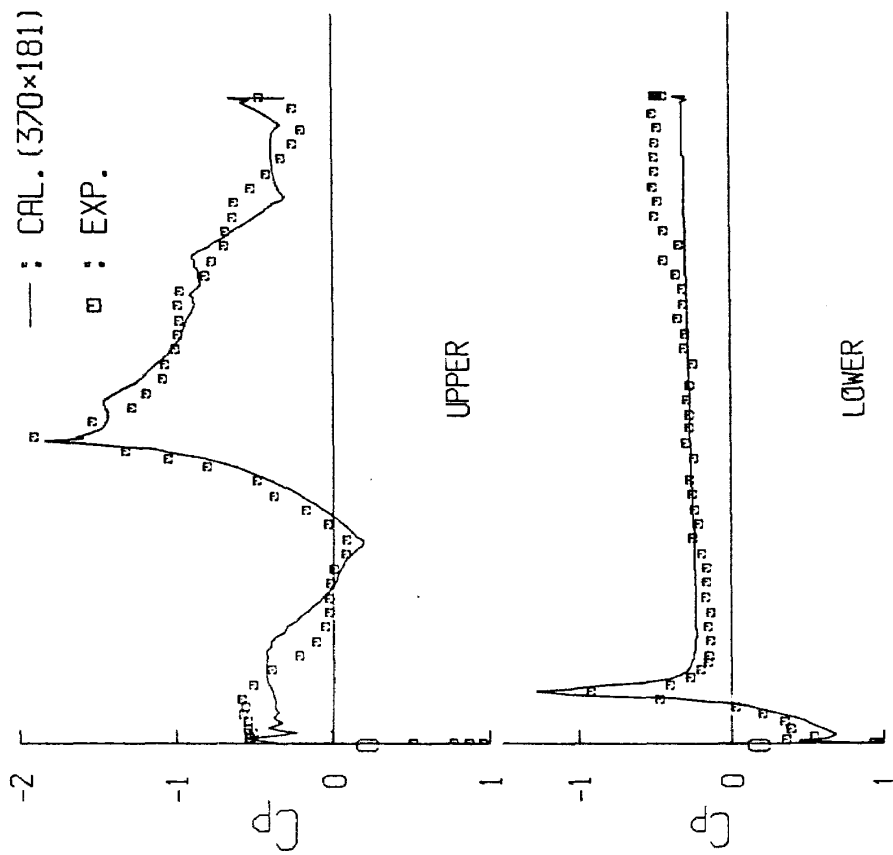


図4-d) 時間平均した車体表面の圧力係数：ケースC (370×181)

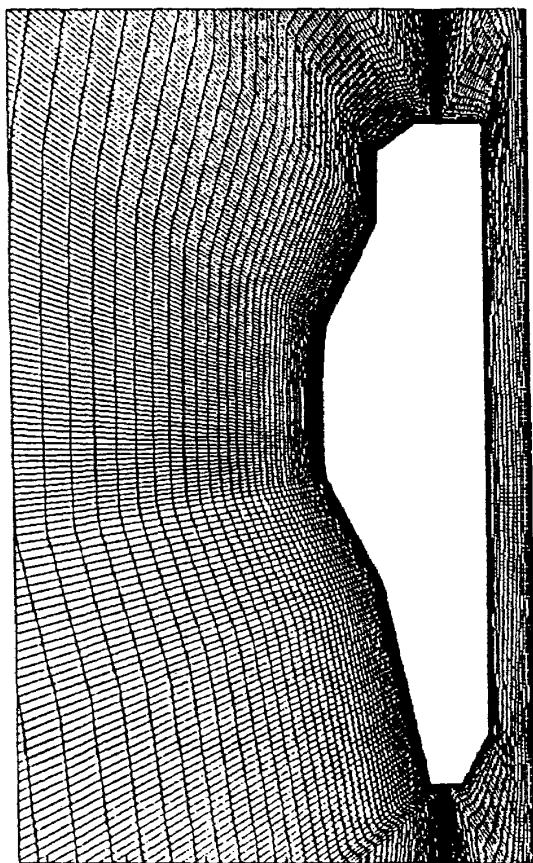


図 5 - a) 車体近傍の差分格子：ケース B (370×101)

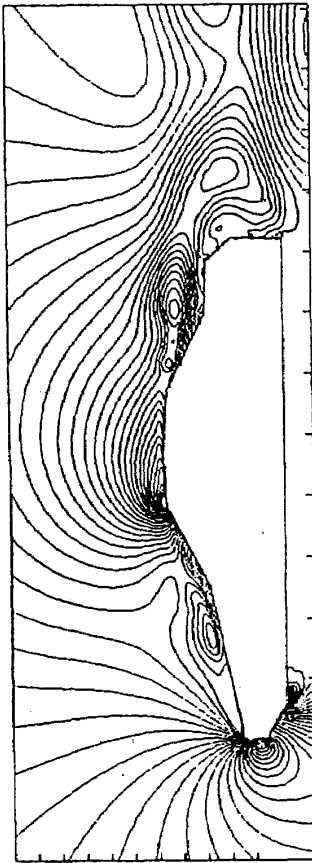


図 5 - b) 時間平均した等圧力線図：ケース B (370×101)

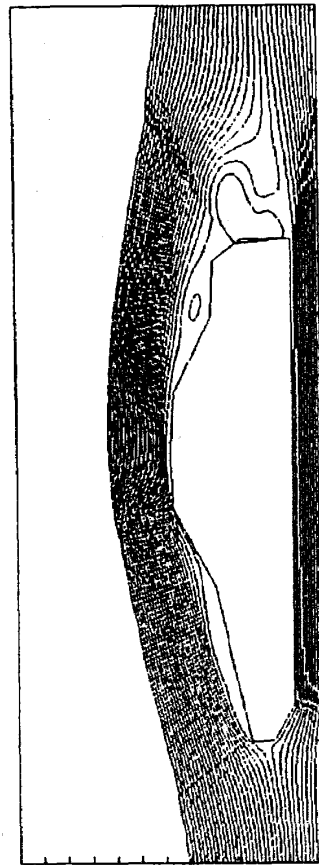


図 5 - c) 時間平均した流線：ケース B (370×101)

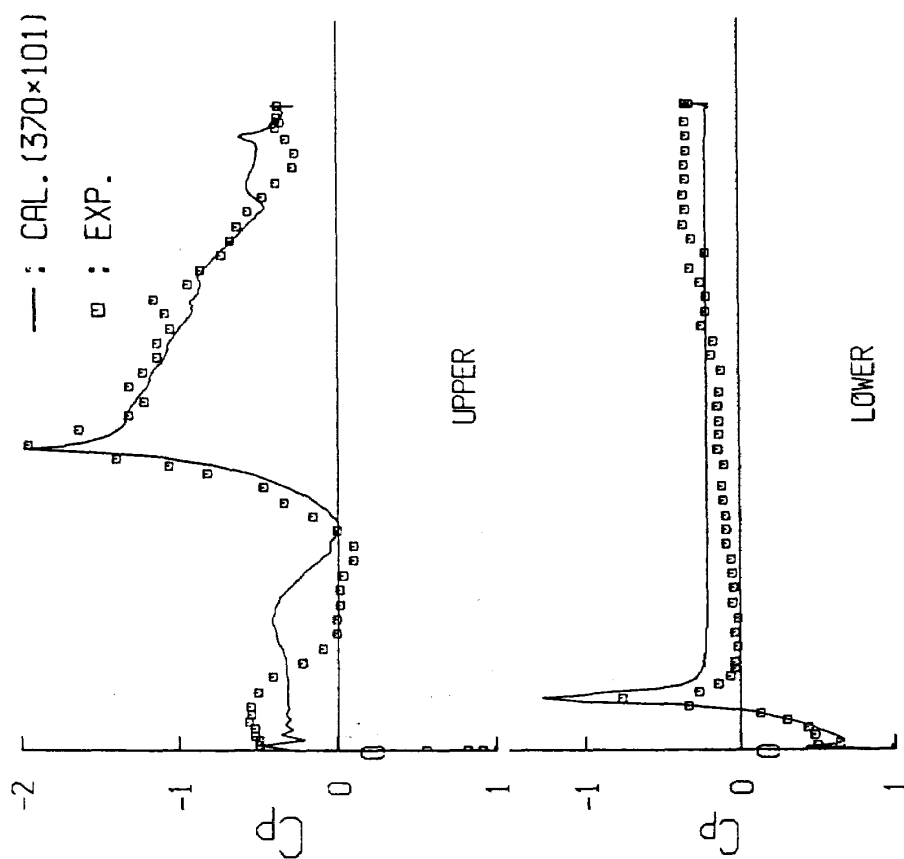


図 5 - d) 時間平均した車体表面の圧力係数：ケース B (370×101)

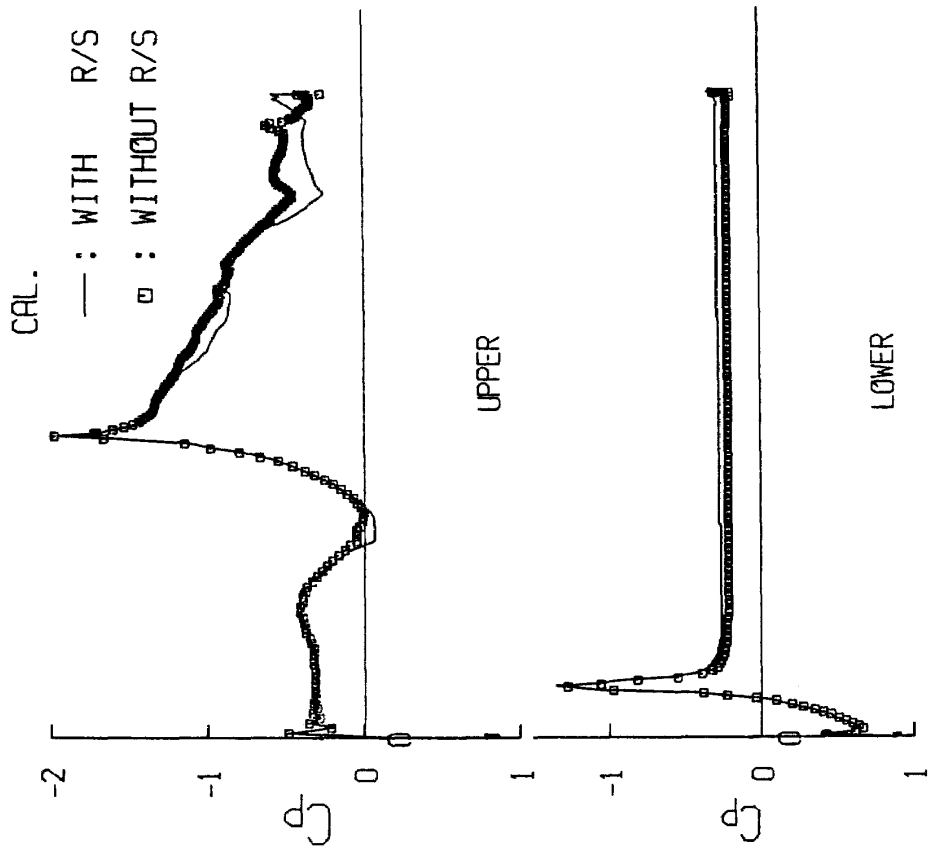


図7 R/S有り・無しの車体表面の圧力係数の違い(計算結果)

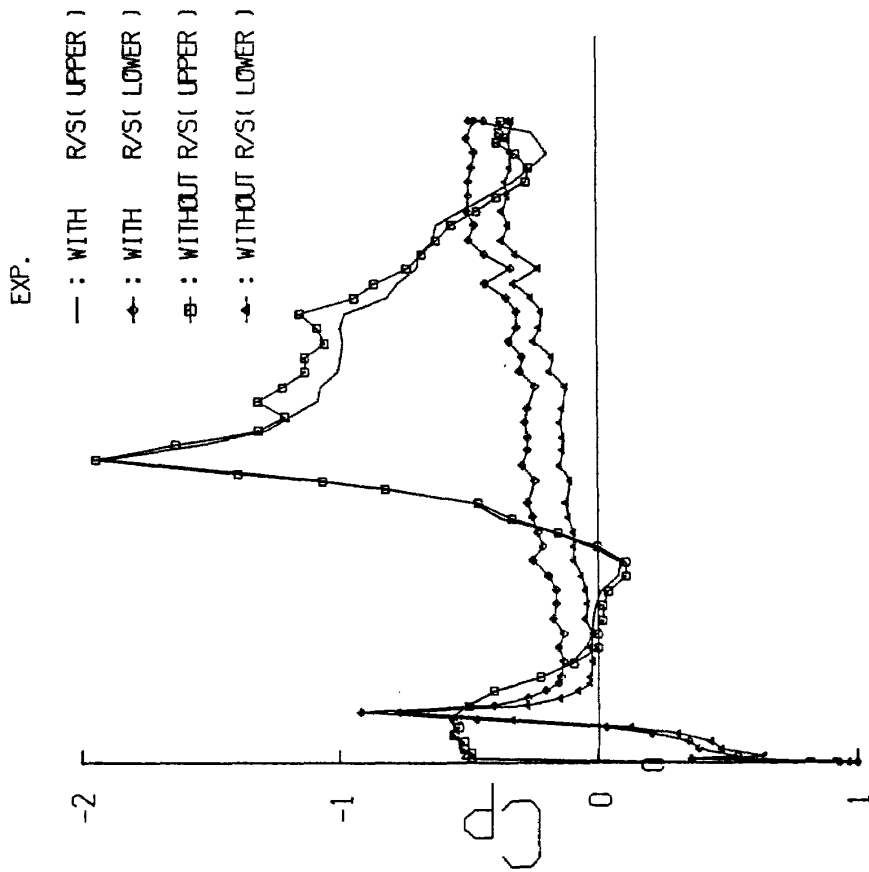


図6 R/S有り・無しの車体表面の圧力係数の違い(風洞試験結果)



図2は、 $300 \times 100$ の格子数を用いたケースAの計算結果である。車体先端では風試結果と異なる圧力分布を示し、若干の振動も起きている。また、フード上での再付着点も後方へずれ、ルーフ先端の圧力ピーク値及び、 $R/S$ による圧力回復もうまくシミュレートできていない。また、風試結果では、車体下面の後方に行くにしたがって圧力が減少しているが、この計算ではその傾向が非常に小さい。

図3は、ルーフから $R/S$ トップまでの車体表面の分割数をケースAの約2倍にしたケースBの結果である。フード上での流れはケースAと変わらないものの、ルーフ先端での圧力ピークと、 $R/S$ による圧力回復を非常によくシミュレートしているのがわかる。また、下面でもフラットな圧力分布は変わらないものの、その値は、ケースAに比べ風試結果に近づいてきているのが分かる。

図4は、ケースBの車体上面のみ、車体からはなれる方向の格子を約2倍にしたときのケースCの結果である。ただし、図3-a)と図4-a)の各々からわかるように、車体上面領域に均等に格子を増したのではなく、そのかなりの数を車体近傍に集めている(ただし、最小格子間隔は変えていない)。ルーフ後方の流れはケースBとほとんど変わっていないものの、フード上での再付着点位置が前進しており、風試結果に近づいているのが分かる。

尚、ケースBのフード上の表面分割数を増やした計算も行ったが、これによる変化はほとんどなく、

フード上では表面分割数よりも表面からはなれる方向の分割が大きく影響することが分かった。

図5は、ケースBの格子数で計算した $R/S$ 無しの結果である。 $R/S$ 有りに比べ、トランク上での圧力回復が小さいことを表しており、風試結果との比較は、格子点数が同じ図3とほとんど同じ傾向を示している。

この車体形状の場合、 $R/S$ の有り・無しによる車体表面の圧力分布の違いは風試により図6のようになることがわかっている。つまり、 $R/S$ をつけることにより、車体中央部での上・下面の圧力差が減少し、また、 $R/S$ 付近では上・下面の圧力が逆転する領域が増している。その結果、車体全体に働くリフトは低減され、車体後方では下向きに力が働くことになる。

図7は、同一格子数(ケースB)で比較した $R/S$ 有り・無しの車体表面上の圧力分布である。風試結果の図6と同じ様に、 $R/S$ をつけることによるリフトの減少を示している。

図8は、ケースBの格子を用いたときの $R/S$ 有り・無しによる $C_D$ 、 $C_L$ の値を風試結果と比較している。 $C_D$ に関しては、風試結果と計算結果の間に若干の開きがあるものの、 $C_L$ では非常に近い値を示している。また、 $R/S$ による $C_D$ 、 $C_L$ の変化の傾向が風試結果と一致している点は特に注目したい。

風洞試験は2次元性を満足するように十分な注意を払って行った。ただし、剝離が生じているところ

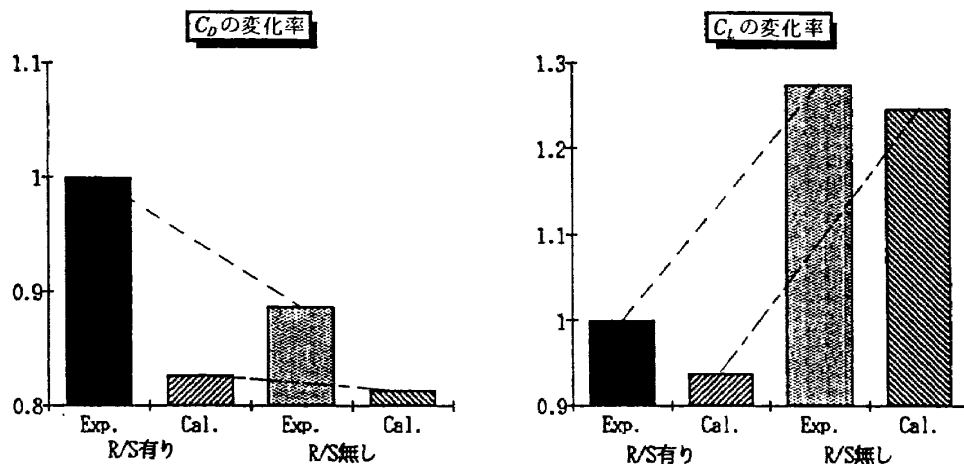


図8  $R/S$ 有り・無しの $C_D$ 、 $C_L$ の比較

では完全な2次元剥離が起きていると考えるよりも、3次元構造をもつ剥離が生じていると考えるべきであろう。そのために、今回の計算で剥離域での計算結果と風試結果の間に若干のずれが生じていると考えることが出来る。

#### 4. ま と め

今回の計算から次のことが言える。

- 1)  $R/S$ による車体上・下面の圧力差の減少、及び $R/S$ 付近での圧力回復の傾向をシミュレート出来、風洞試験結果と定性的に良好な一致を見た。
- 2) その結果、本 $R/S$ による、 $C_D$ の悪化、及び、 $C_L$ の低減の傾向が得られ、風洞試験結果との良好な一致を見た。
- 3) 格子形状が計算結果に大きく影響することが確認された。

#### 5. あとがき

今回の計算により、3-BOX車に取り付けられた $R/S$ の効果を、本手法で計算可能であることを明確に出来た。また、今回用いられた格子生成法も含

め、この一連の解析手法が今後の車体開発に、十分有効なツールであることが確認できた。ただし、格子形状が計算結果へ大きく影響する点等を考えると、設計ツールとしてどこまで汎用化が可能なのかは今後、更に検討を要するところである。

#### 参 考 文 献

- 1) T. Kawamura, and K. Kuwahara: Computation of High Reynolds Number Flow Around a Circular Cylinder with Surface Roughness, AIAA-84-0340 (1984).
- 2) 桑原：乱流のシミュレーション，日本物理学会誌，第40巻，第11号(1985)。
- 3) M. Nakamura, and M. Suzuki: Noniterative Three-Dimensional Grid Generation Using a Parabolic-Hyperbolic Hybrid Scheme, AIAA-87-0277 (1987).
- 4) 中村：格子形成法の最近の進歩について，航空宇宙技術研究所特別資料SP-5，(1985)，pp.185-195。
- 5) 吉田，今泉，土田：ムービングベルト法による風洞試験，自動車研究，第10巻，第3号，(1988)。