

特集 : Virtual Testing

5

空力・風騒音シミュレーションの開発への適用 Application of Aerodynamics and Wind Noise Simulation into Product Development

中村 貴樹*¹ 農 沢 隆 秀*² 岡 本 哲*³
Takaki Nakamura Takahide Nouzawa Satoshi Okamoto
大 平 洋 樹*⁴ 李 曄*⁵
Hiroki Oohira Ye Li

要 約

短期間に空気抵抗と空力騒音の小さな商品を開発するには、開発後期における後退や滞留を最小にさせることが必須要件であり、開発前半に充実した検討を行い図面の完成度を高めることが重要である。しかし、開発前半では試作車が存在しない。そこで、この段階で充実した検討を行うため、空力・風騒音シミュレーション技術を確立し、シミュレーションと風洞実験が強力に連携した開発プロセスを構築した。本稿では、その開発プロセスの概要、および空力・風騒音シミュレーションの開発への適用事例を紹介する。

Summary

To achieve high aerodynamic performance and low wind noise level in production vehicles, drawing quality should be improved by making a substantial study in the first half of the development period because it is essential that the setback or residence which could occur in the second half of a development period should be minimized. No prototypes exist in the first half of the development period. For this purpose, we have developed aerodynamics and wind noise simulation technology and established a development process with great linkage between the simulation and a wind tunnel test. This paper shows the outline of the development process and applicable examples of the aerodynamics and wind noise simulation to the product development.

1. はじめに

地球温暖化に対する関心が高まり、燃費に対する法規制や優遇税制が強化されるといった状況の中で、低燃費化の要求から空気抵抗低減への取り組みが重要となってきた。一方で、高速走行時の車両静粛化の要求も高まり、高速時における風騒音の騒音源である空力騒音低減への取り組みも重要となってきた。これらの要求を満足させた製品を短期間に開発するには、開発前半の充実した検討が重要である。この実現のため、空力・風騒音シミュレーション技術を構築し、シミュレーションと風洞実験が強力に連携した開発プロセスを構築した。

2. 開発プロセスへの適用

2.1 適用の方針

開発プロセスの中で効果的にシミュレーションを適用するには、シミュレーション・風洞実験のそれぞれの長所を生かし、短所を補完したプロセスを構築しなければならない。空力・風騒音シミュレーションの長所は、試作車が不要なことと計算結果から流速・圧力といった車体まわりの詳細な流れの様子を知ることができることである。一方の風洞実験の長所は、短時間に数多くの仕様について評価が可能であることと、詳細な形状について評価検討が可能なことである。

*1~5 車両実研部
Vehicle Testing & Research Dept.



Fig.1 Aerodynamics Testing Laboratory of Mazda

マツダでは、実車風洞を保有しており (Fig.1), 風洞実験と空力・風騒音シミュレーションを、同一の組織で行っている。開発担当者は、風洞実験にてクレイモデルを使い空力改善を行うとともに、シミュレーションも自ら実施し、この二つを連携させ開発を進めている。

空力・風騒音シミュレーションを開発に適用するにあたり、風洞実験との連携重視という方針で、以下に示す開発プロセスを構築した。

2.2 プロセス概要

開発前半のプロセスは、車体の基本構造を決定する①レイアウト段階、デザインの方向性を決定する②デザインテーマ育成段階、詳細デザインを決定する③デザイン育成段階に大別される。

レイアウト段階では、おおまかな空力性能をケーススタディするため簡易空力性能予測ツールを用いて評価を行い、基本骨格と空力性能目標との整合を取る。

次のデザインテーマ育成段階では、デザイン形状データを用いて空力シミュレーションを実施し空力性能の予測を行うとともに、車体まわりの流れ解析結果を元に空力性能悪化要因を特定する。この目で見える形になった流れの様子をデザイナーと協議しながら、デザインテーマの空力的改善を行うとともに空力性能目標との整合を取る。

デザイン育成段階では、空力シミュレーションに加え、風騒音シミュレーションも実施し、空力・風騒音性能の予

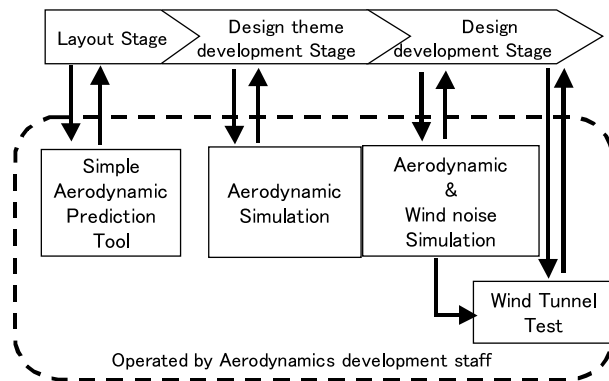


Fig.2 Aerodynamic Developing Process

測および解析を行い細部形状についてデザイン部門へフィードバックする。シミュレーションにより明確になった車体まわりの流れの情報を、風洞実験へもフィードバックし、これを基に風洞実験で空力改善を行っていく。

これにより、以下の三点が可能になり、デザイン要件を満足させながら、高い空力・風騒音性能を短期間に実現することができる (Fig.2)

- ① レイアウト・デザインテーマ育成段階でレイアウトやデザインと空力性能目標の整合取りが可能
- ② 実験モデルなしでデザインテーマについて空力性能の育成が可能
- ③ デザイン育成段階で、効率的に風洞実験を行い短い期間で空力・風騒音性能の育成が可能

このプロセスを実際に運用するには、シミュレーション・風洞実験の長所を把握していることに加え、車体まわりの流れを熟知し、シミュレーションで出た流れの結果の妥当性を判断するとともに、これに考察を加え車体形状の改善箇所を見出すことが必要である。我々は、こうした技術者の育成に注力し、シミュレーションを開発に適用することに成功した。

Table 1 Comparison of Applied FDM, FEM and FVM

	Finite Difference Method (FDM)	Finite Element Method (FEM)	Finite Volume Method (FVM)
Governing Equations	Unsteady Incompressible Navier-Stokes Equations	Filtered Unsteady Incompressible Navier-Stokes Equations	Time-averaged Navier-Stokes Equations
Turbulent Model	K-K scheme	Smagorinsky SGS Model	K-ε Model
Model Structure	Structured Hexahedron	Unstructured Tetrahedrons	Unstructured Hybrid (Mainly Hexahedron)
Model Size	10 Million Grids	6.3 Million Mesh Elements	2 Million Mesh Elements
Minimum Spacing	4.0 mm	0.44 mm	2.0 mm
Adaptive mesh	N/A	H-refinement	N/A
Inflow / Outflow	Fixed Value / Zero Gradient		
Body Surface	No Slip		Wall Law
Time Step	1 msec	3.2 μsec	---
Computation Time	30 CPU Hours	70 CPU Hours	50 CPU Hours

3. シミュレーション手法

車体まわりの流れの計算には、計算流体力学の代表的な手法である有限差分法(FDM : Finite Difference Method), 有限要素法(FEM : Finite Element Method), 有限体積法(FVM : Finite Volume Method)の三つの手法を適用し、

Table 2 Characteristic of FDM, FEM, FVM

	FDM	FEM	FVM
Computation Time	Short	Long	Relatively short
Shape Reproducibility	Difficult	Easy	Relatively easy
Unsteady Simulation	Available	Available	Not Available
Temperature Calculation	Not Available	Not Available	Available
Applied area	Aerodynamics Wind Noise	Wind Noise	Climate Control

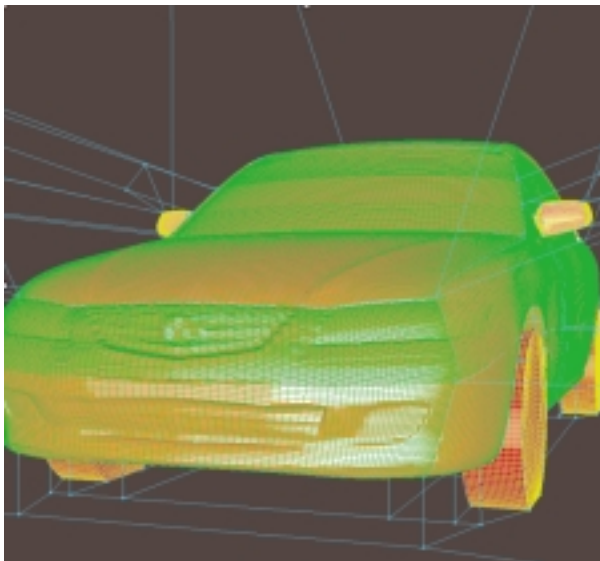


Fig.3 Computational Grid of Finite Difference Method

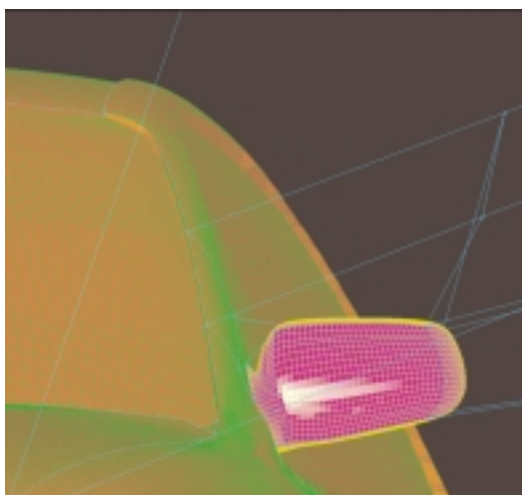
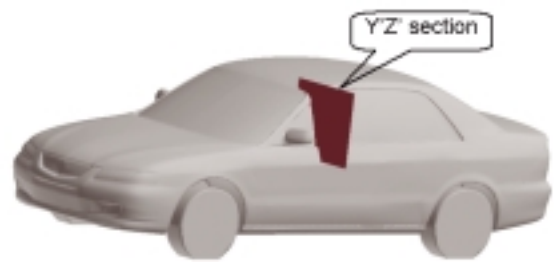
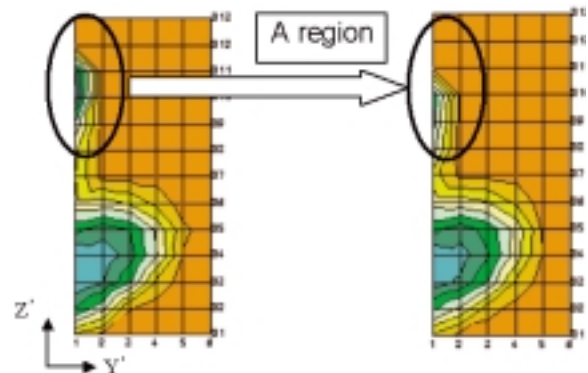


Fig.4 Computational Grid of Finite Difference Method (Front-pillar and Door Mirror)

それぞれTable 1に示した計算手法を採用している。これらの三つの手法には、Table 2に示したような特徴がある。空力シミュレーションには、流れの計算精度の高いFDMを用いている。風騒音シミュレーションには、詳細形状の再現が容易なFEMと計算精度が良いFDMに風騒音が計算できるように手を加えて、これら二つを併用している。また、壁面温度の計算に影響を与える温度場モデルに、壁面からの距離の影響を考慮した工夫を入れることで温度場計算精度を上げ、FVMの車室内空調への適用に成功した⁽¹⁾。なお、FVMについては、適用分野が車室内空調であるため、本稿では詳述しない。以下にFDMとFEMの概要と適用事例について紹介する。

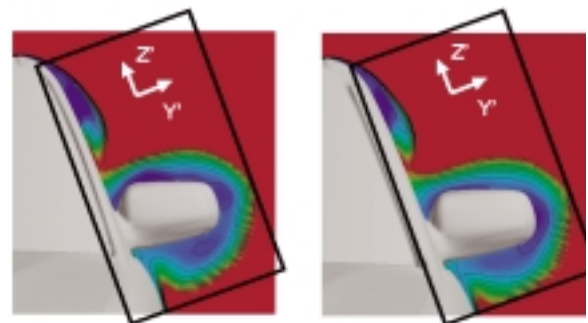


(a) Definition of YZ section



Original Model Modified Model

(b) Experiment



Original Model Modified Model

(c) FDM

Fig.5 Pressure Distribution at Y-Z Section (Section is at 300mm behind Door Mirror)

4. 空力シミュレーション

4.1 計算手法

前章で述べたように空力シミュレーションには、流れの計算精度が良いという点で、FDMを用いている。この計算格子は、六面体で作成されており、タイヤ・ミラー・床下がついた状態を表現し計算を行っている (Fig.3, 4)。

4.2 計算精度

FDMでは、車体後流だけでなくフロントピラー・ドアミラー等の車体各部に生じる複雑な流れの様子を精度よく捉えることができる。Fig.5cは、シミュレーションによるフロントピラー・ドアミラー後方におけるYZ断面圧力分布を示しており、風洞実験で見られるフロントピラー近傍とドアミラー後方に発生している渦の様子 (Fig.5b) を、シミュレーションでも再現している。また、フロントピラー形状を修正しフロントピラーの渦を小さくしたような微妙な変化でも、シミュレーションで捉えることができる。

このように流れを精度良く捉えることが可能であるため、シミュレーションの空気抵抗の実車予測精度は97%以上を実現しており、デザインデータからの空力性能予測は、十分実用レベルにある。

4.3 開発への適用例

(1) RX-8開発における空気抵抗低減

RX-8の開発において、デザインを悪化させずに効果的に空気抵抗を低減するため、デザインデータからシミュレーションを実施し最適形状を検討した事例を紹介する。シミュレーションで車体まわりの流れを解析した結果、リアコンビランプ付近で車体側面の境界層が厚くなっていることがわかり、この部分で空気抵抗が増大していることをつきとめた (Fig.6)。実際にこの部分の形状をコンピュータ上で改善しシミュレーションを実行した所、車体後流の渦が弱くなることが確認できた (Fig.7)。この結果をもとに風洞実験で、デザイナーを交えて詳細形状の検討を行い、デザインを悪化させないよう透明部品であるコンビランプハウジング形状を車体外側に張り出すことにより、空気抵抗の低減を行った (Fig.8)。

5. 風騒音シミュレーション

5.1 計算手法

風騒音シミュレーションには、詳細な形状の再現性が容易であるという点でFEMを用いている。FEMの計算格子は、四面体で作成されており、タイヤ・ミラー・床下等の詳細車体形状を再現し計算が可能である (Fig.9, 10)。また、ミラー後方のような複雑な流れについては、詳細形状の再現は容易ではないが、計算精度の高い前章で述べたFDMを用いている。

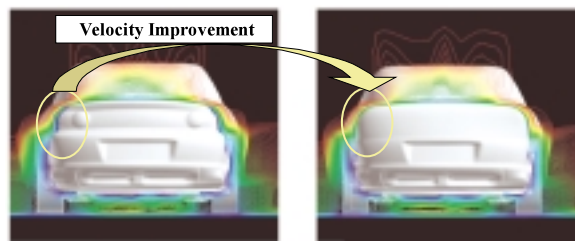


Fig.6 Velocity Distribution of RX-8

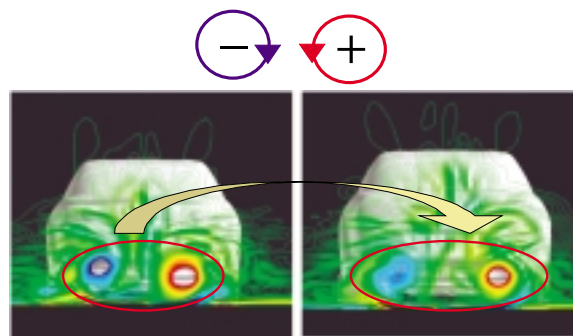


Fig.7 Vorticity Distribution of RX-8



Fig.8 RX-8 Rear Combination Lamp

5.2 計算精度

風騒音シミュレーションの精度を検証するため、風騒音の大小に影響の大きいフロントピラー形状の異なる二つの車体形状について、風洞実験と風騒音シミュレーションの比較を行った。Fig.11aは、風洞実験にてサイドウインド表面にマイクロホンを埋め込み、音圧変動を計測したものである。フロントピラー形状の違いにより、サイドウインドのフロントピラー付近の音圧が変化しているのがわかる。自動車における空力騒音は二重極音源が主であり、圧力変動を積分した値を音圧として用いることで、風騒音シミュレーションでも、風洞実験と同様にサイドウインドフロントピラー付近の音圧変化を捉えることができた⁽²⁾。

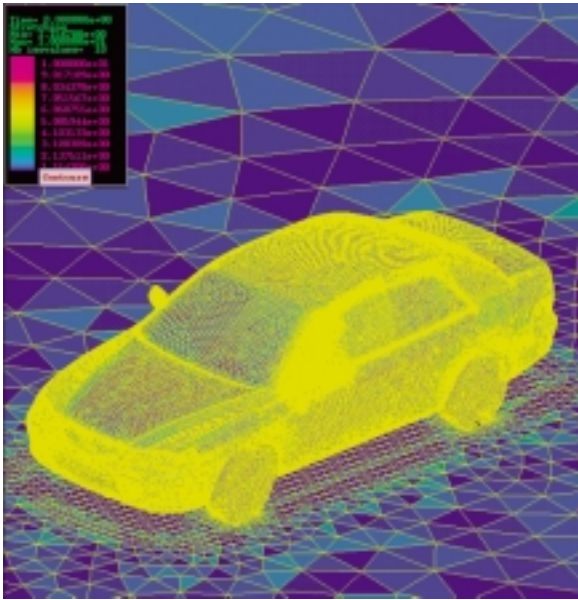


Fig.9 Computational Grid of FEM

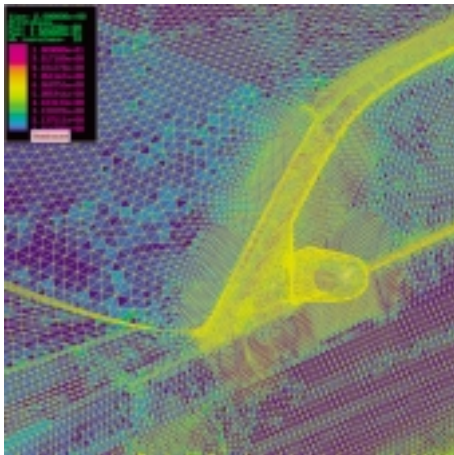


Fig.10 Computational Grid around Door Mirror

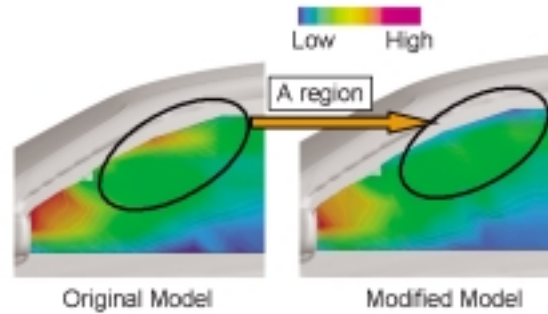
Fig.11bに、FEMを用いてフロントピラー付近の音圧を計算した例を示す。FEM・FDMの両者ともに、フロントピラーの形状変化のような微妙な形状の違いについても、音圧の大小が検討可能なレベルの予測精度を確保した。

5.3 開発への適用例

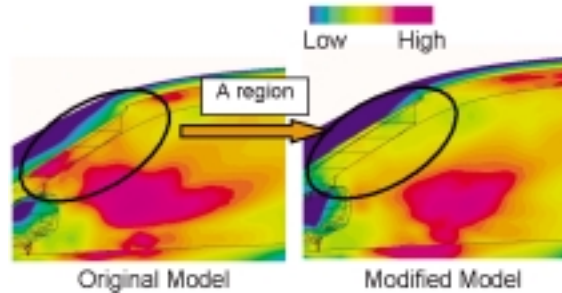
(1) フロントピラーまわり空力騒音低減

風騒音への影響の大きい車体まわりの空力騒音は、車体形状に大きく左右される。このため空力騒音の大小は、デザイン段階でほぼ決定する。空力騒音を定量的に把握するには前節の風洞実験のように、マイクロホンを実車に埋め込みサイドウィンド表面の音圧を計測する手法もあるが、デザイン段階では、実験モデルにマイクロホンを埋め込むことは実用効率の面から困難である。

そこで、デザインデータを用いて風騒音シミュレーションを行うことにより、デザイン段階での空力騒音低減の検討を可能にした。RX-8ではFEMによる風騒音シミュレー



(a) Experiment



(b) FEM

Fig.11 Intensity of Acoustic Source on Side Window

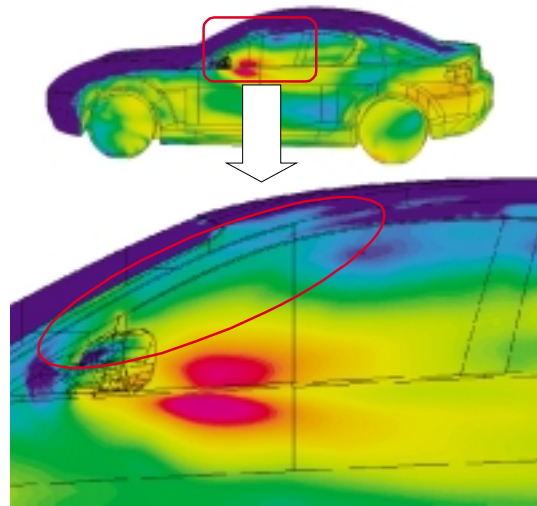


Fig.12 Intensity of Acoustic Source on RX-8

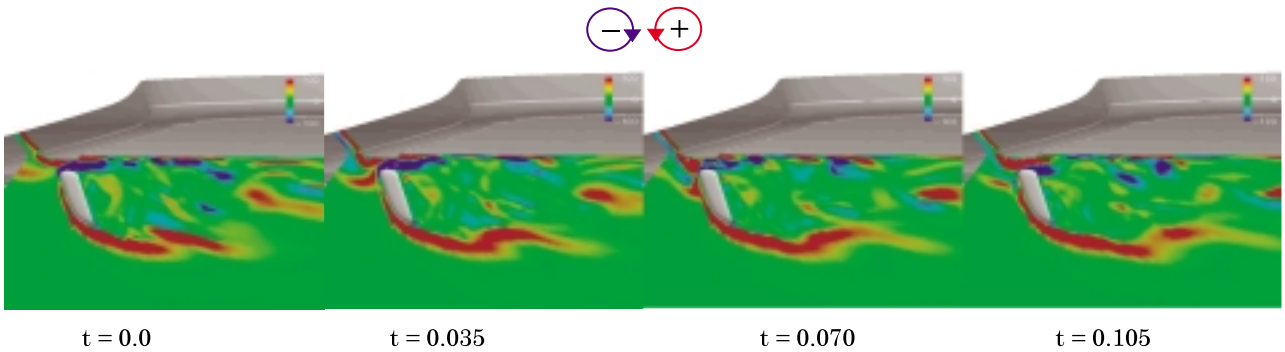
ションを実施し、空力騒音への影響の大きいフロントピラー形状について検討を行い、サイドウィンド表面の音圧を低減した (Fig.12)。

(2) ドアミラーまわり空力騒音低減

ドアミラーまわりの乱れの大小は、車室内の静粛性に寄与する空力騒音に影響を与える。流れの時間的な変化で発生する音であるドアミラーからの空力騒音を低減し、空気抵抗低減と両立させるためには、その圧力変動を解析する必要があり、非定常でのシミュレーション解析が有効な手段となる。セダン形状を供試体として車体まわりの流れを、複雑な流れでも計算精度の高いFDMによる非定常のシミ



(a) Location of XY section used in fig.



(b) Vorticity ω_z distribution around Door mirror on the XY section

Fig.13 Unsteady Flow Simulation

シミュレーションを実施し、ミラー後方の渦の時間的変化を解析した例を示す (Fig.13)。各時刻の渦度を見てみると、フロントピラーからの流れとドアミラー内側部分の流れが干渉しあい、渦の時間的な変化が起きている。この渦の時間的変化が、ドアミラーまわりの圧力変動を引き起こし、空力騒音を悪化させていることがわかった。この結果をもとにドアミラー形状を最適化し、ドアミラー空力騒音を低減することができた。

6. おわりに

空力・風騒音シミュレーションを開発に適用することにより、短期間に空力・風騒音性能を育成するプロセスを構築することができた。今後、シミュレーションを用いて車体各部形状パラメータを決定していくというような、シミュレーションを核としたプロセスを構築するためには、デザインデータを受け取ってから結果が出るまでの時間を短縮する必要があり、格子作成時間の更なる短縮に取り組んでいきたい。

参考文献

- (1) 岡田ほか：車室内空調風の数値シミュレーションによる予測，自動車技術会論文集，Vol.31，No.2，p.29-34 (2000)

- (2) Y.Li et al : Evaluation of Aerodynamic Noise Generated in Production Vehicle Using Experiment and Numerical Simulation, SAE Paper, No.2003-01-1314 , p.1-8 (2003)

著者



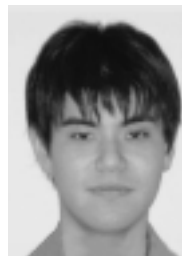
中村貴樹



農沢隆秀



岡本 哲



大平洋樹



李 曄