

## スクラムノズル流の数値解析 (反応のない場合)

石黒 登美子\* 高木 亮治\* 三谷 徹\* 平岩 徹夫\*

Numerical Analysis of Scramjet Nozzle Flow (under Absence of Reaction)

by

Tomiko ISHIGURO, Ryoji TAKAKI, Tohru MITANI, and Tetsuo HIRAIWA

National Aerospace Laboratory

## Abstract

A proposal of numerical procedure is given for nonreacting flows of ideal N<sub>2</sub> gas through scramjet nozzles by using a multi-grid method and the 3-D Navier-Stokes equations with the Baldwin-Lomax algebraic eddy viscosity model. Here trailing edges of side-walls are assumed not to be perpendicular to a streamwise axis. The computational results of nozzle internal flow such as static pressure, skin friction coefficient, heat flux, thrust etc. are compared with experimental data for the under-expansion case with no effect of ambient condition. Both of them agree with uncertainties of 2-4% for the thrust of nozzle. Flowfields obtained by computations under various ambient conditions (flow of M<sub>∞</sub>=6 or still gas with pressure of under- or over-expansion) are also investigated.

## 1. まえがき

飛行マッハ数3-20の宇宙往還機の推進器として超音速燃焼ラムジェットエンジン (Supersonic Combustion Ramjet 略して スクラムジェット) の採用が考えられている。このエンジンの空気取入口、燃焼器、ノズルの3要素について個別に、又は、総合的に実験や数値解析による研究がなされている。既に筆者の一人は航技研・角田支所で行われている実験に合わせて空気取入口及び燃焼器の数値解析を行い当シンポジウムで報告したが<sup>1)2)</sup>、今回はスクラムノズルの数値解析を取り上げる。スクラムノズルは機体後部下面を膨張面として利用し、摩擦を成るべく小さくする一方、推力を成るべく大きく発生するように設計しなければならない。航技研ではモノメチルヒドラジンと四酸化窒素の燃焼ガスや常温窒素を用いたスクラムノズルの性能実験がなされている<sup>3)</sup>。ここでは、まず、反応のない後者について計算を行い実験と

の比較を試みる。更に、そのコードを利用して、外部の静止気体をマッハ数6の主流に変えたり、雰囲気圧を10倍することによって不足膨張を過膨張に変え、ノズル内部のみならず外部についても種々の流れ場を捕捉し検討する。既にLai<sup>4)</sup>や渡辺他<sup>5)</sup>によって気流軸に垂直な側板後縁をもつノズルについて、それぞれ、ノズル外部の計算や外部流れのある実験がなされているが、ここで対象とするものは垂直でなく大きく傾いた場合であるので、格子生成が複雑になるが、異なった流れ場についての知見を与えている。

## 2. ノズルモデル

実験に使用した供試ノズルは、燃焼器の下流に燃焼ガスをマッハ数2.5まで加速できる開口比4の対称な加速ノズルとその下流に非対称なスクラムノズルが結合され一体化されたものである。このマッハ数2.5は飛行マッハ数8におけるスクラムノズル入り口条件に相当する。このノズルには開口比3(略称EN3)と開口比5(EN5)の2種類があり、15°

の傾きをもつランプ、カウル、側板の3平板で構成されている。計算では、図1のようにランプ、カウルの側端すべてに渡って側板が付いている実験のノズルを使い、簡単のため平板厚みは無しと仮定した。計算は対称面を境に片側のみについて行う。

3. 数値解析手法

まず、マルチブロック法により物体適合格子を作るために、全壁面を4つの直方体A, B, C, Dの表面の部分に対応するように写像する(図2)。次いで各直方体に一樣格子を張る。総格子点数はEN3に対し約49万、EN5に対し約56万、壁隣接の最小格子幅は $4 \times 10^{-3} \text{ mm}$ とした。境界条件として、Aの左側面に流入条件(ノズル殿み条件から得られたマッハ数0.117に対応する準1次元定常流)、壁対応部分にnon-slip条件と断熱又は等温(285K)条件、A, B, Cの手前側面に対称条件、A, B, C, Dの右側面に流出条件(上流から外挿)、又、その他のB, C, Dの外部対応面に外部条件を、それぞれ、課す。基礎方程式としては一般曲線座標系表示の3次元非定常完全Navier-Stokes方程式を用いる。その対流項にはHarten-YeeタイプのTYDスキームを格子への依存性を少なくなるように改良したもの、又、時間積分には対角化IAP法を適用し、局所時間刻みの方法を用いて定常解を求める。粘性係数は窒素のSutherland公式、乱流モデルはBaldwin-Lomax代数渦粘性モデルを使う。

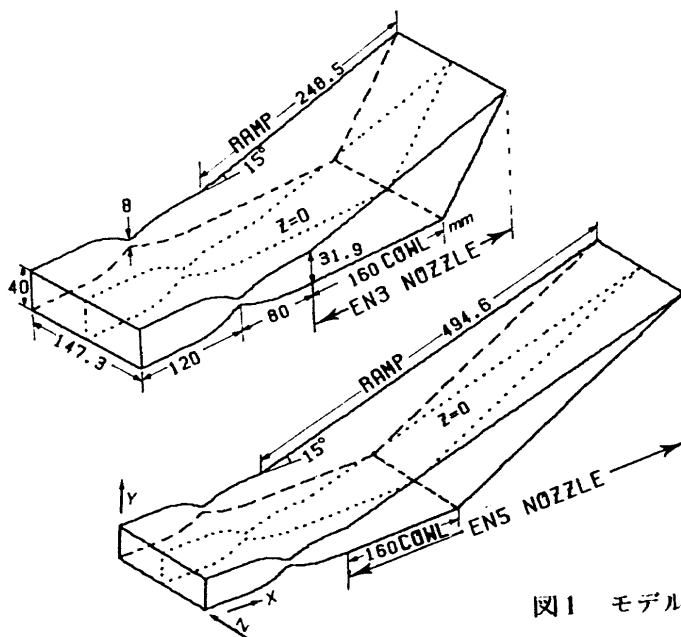


図1 モデル

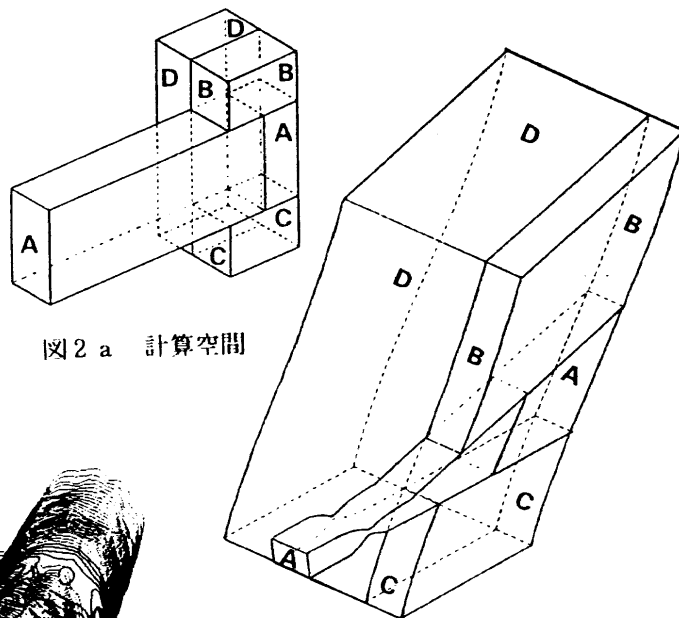


図2 a 計算空間

図2 b 物理空間

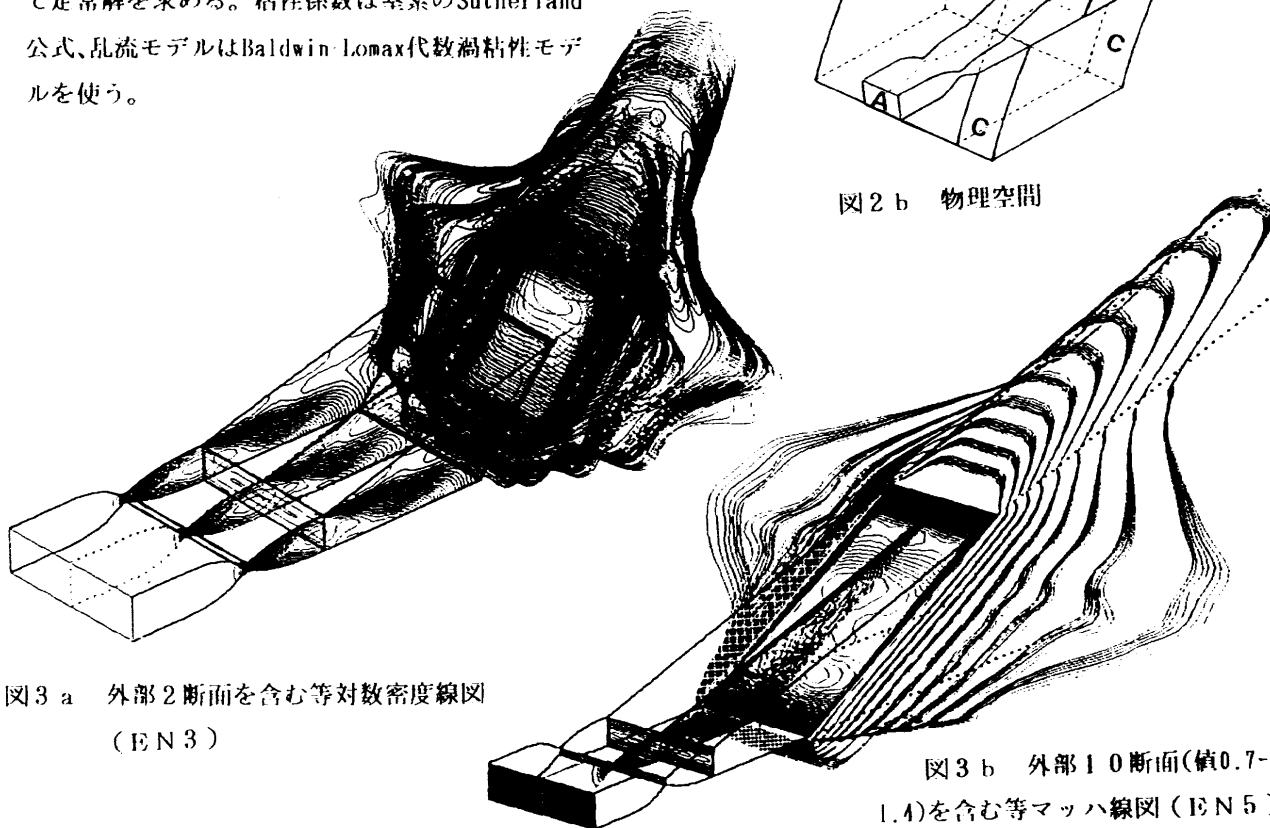


図3 a 外部2断面を含む等対数密度線図 (EN3)

図3 b 外部10断面(値0.7-1.4)を含む等マッハ線図 (EN5)

4. 数値計算

1) ノズル内部流の実験比較 流れ計算の条件は、常温窒素の実験に合わせて、流入条件はノズル入り口10ata(0.9806MPa)、入り口温度293K、外部条件は静止気体で0.01気圧(1013Pa)、温度293Kとして、3ケース(A3;EN3,断熱壁, A5;EN5,断熱壁, A;EN5,等温壁)についての不足膨張下の計算を行った。図3に、A3の外部2断面を含む等対数密度線図とAの

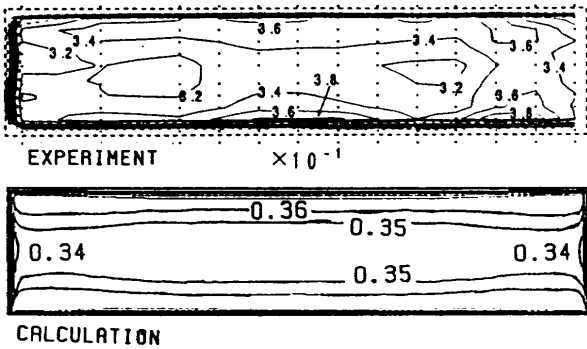


図4 ノズル入口におけるピトー圧/P/C

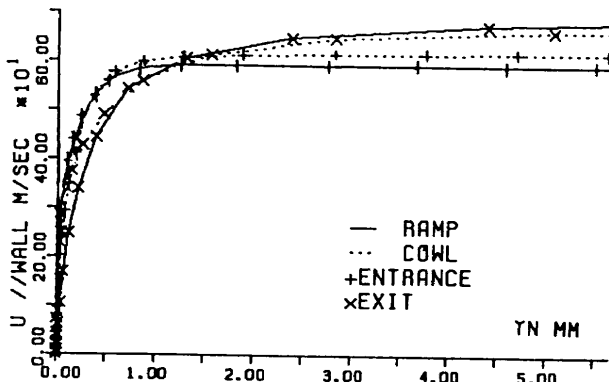


図8 対称面における入口と出口からの垂線距離に対する壁平行速度成分

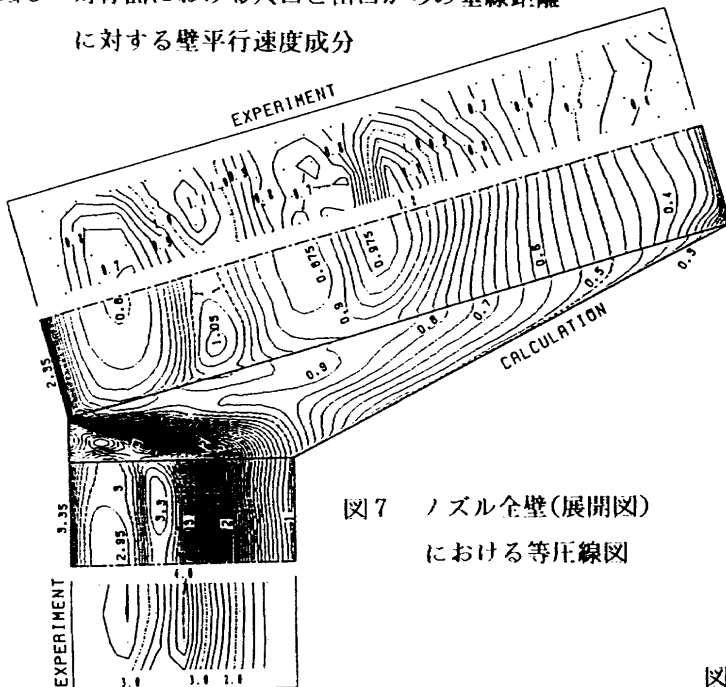


図7 ノズル全壁(展開図)における等圧線図

外部10断面(値0.7-1.4)を含む等マッハ線図を3次的に示す。図よりEN3とEN5の内部の弱い衝撃波や膨張波の流れ場、及び、外部の自由剪断層の形状等を概観できる。AとA5では境界層外ではほぼ一致した解を得た。Aのノズル内部結果と実験の両者を比較するために、圧力は燃焼室圧(9.67atm)で無次元化して示す。図4は入口(Y-Z面)のピトー圧分布を示し計算の方が変化がやや少ない。図5は入口の対称面と側壁のY方向の静圧で、Yの正の端で膨張波発生により低くなり、両者は大部分で一致している。図6は、ランプとカウルの対称面におけるX(スロート半幅で無次元化)に対する静圧分布、図7と図13は、それぞれ、全壁(展開図)と対称面の等圧線図を示す。ランプ入口で発生した膨張波が

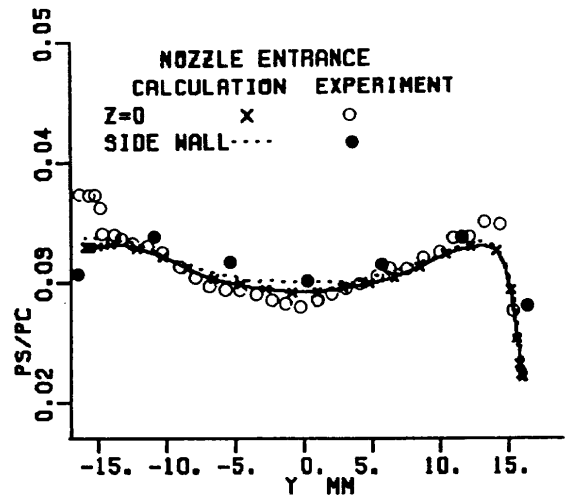


図5 ノズル入口の対称面と側壁のY方向の静圧

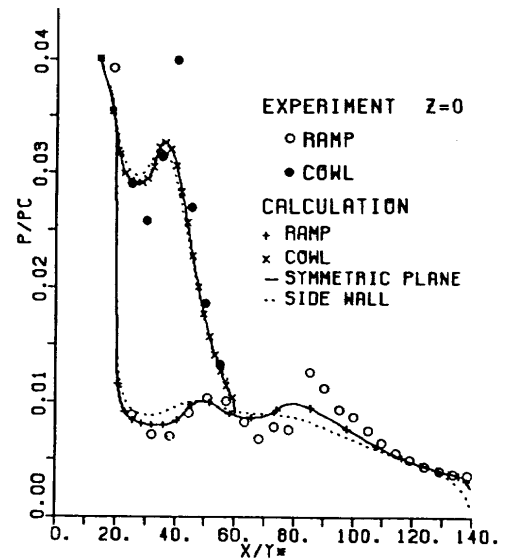


図6 ランプ、カウルの対称面、側壁における静圧

カウルに達し反射してランプに達するような経路に沿って粒状の波が途切れ圧力が急に低くなっている。定性的に両者は一致するが、実験の方が凹凸の度合が大きく、その位置も計算よりやや下流にある。しかし、ランプの圧力積分は1.6%の差で両者はよく一致している(表1)。次にランプとカウルの境界層を調べる。図8は対称面における入口と出口からの垂線距離に対する壁平行速度成分分布を示し、入口に比べ出口ではかなり大きく境界層が発達していることがわかる。図9と図10は、それぞれ、対称面や $Z=30\text{mm}$ における壁面長に対する熱流束と表面摩擦係数であり、曲線の凹凸位置は等圧分布のものとはほぼ一致する。実験は等温壁と言えないので図のように両者が近い程度が妥当なのかもしれない。

2) 外部条件を変えた計算 Aではランプ出口で静圧は約0.03気圧、カウル出口で約0.08気圧である。このAを基準にして外部条件を変える。

外部流の有( $M_\infty=6$ ,カウルに平行)と無(静止)、雰囲気圧の低( $P_\infty=0.01$ 気圧)と高( $0.1$ 気圧)を取り合わせた4ケース(A:無,低, B:有,低, C:無,高, D:有,高)の流れ場を計算によって調べた。

図11は、全壁面のオイルフロー図(重ね合わせ部分はAに一致)、図12は各ケース共、同出発点をもつ対称面の流線、更に、図13(全片同一縮尺)は、対称面の等圧線と等マッハ線、同面の壁面とその延長線上の静圧分布、及び、ノズル出口面の等圧線とその下流切断面(図に位置指示)の等マッハ線の $Y-Z$ 面への射影図を示す。内部流と外部の境界を示す剪断層の界面は流線や等マッハ線図から分かる。

ここでは、便宜上、外部流のあるB,Dで、上側の外部上流端でカウル平行の主流を与えたためランプの外壁でコーナ衝撃波が発生し、背後で圧力が上昇している。Aは不足膨張に相当し、内部流は各後縁からPrandtl-Meyer fanにより、窪んだ4隅をもつ切断面形で外部に広がって行く。Bの場合ノズ

ケース	ノズル	外部条件		壁	a 比推力	b ランプ 圧力積分	摩擦損失			a-b 計
		$M_\infty$	$P_\infty$ atm				ランプ	カウル	側面	
実験	EN3	0	0.01		2.54	3.06				-0.52
A3	EN3	0	0.01	断熱	2.588	3.249	-0.112	-0.265	-0.283	-0.660
実験	EN5	0	0.01		4.84	5.49				0.65
A5	EN5	0	0.01	断熱	4.569	5.376	-0.164	-0.252	-0.391	-0.807
A	EN5	0	0.01	等温	4.628	5.399	-0.165	-0.249	-0.357	-0.771
B	EN5	6	0.01	等温	4.631	5.401	-0.167	-0.245	-0.358	-0.770
C	EN5	0	0.1	等温	5.180	5.933	-0.164	-0.253	-0.336	-0.753
D	EN5	6	0.1	等温	4.719	5.485	-0.160	0.251	-0.354	-0.765

表1 比推力の成分

unit sec.

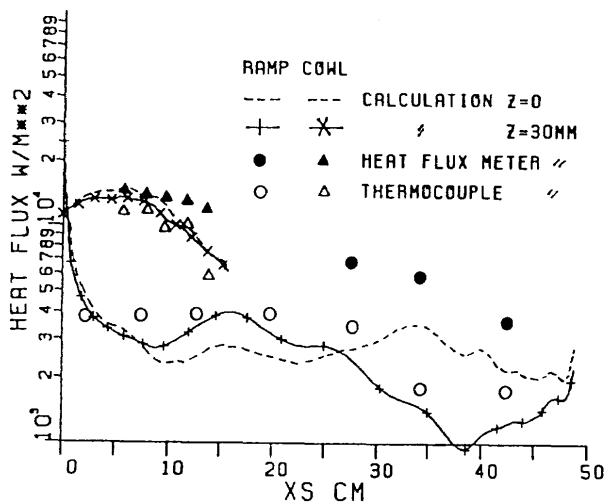


図9 壁面長に対する熱流束

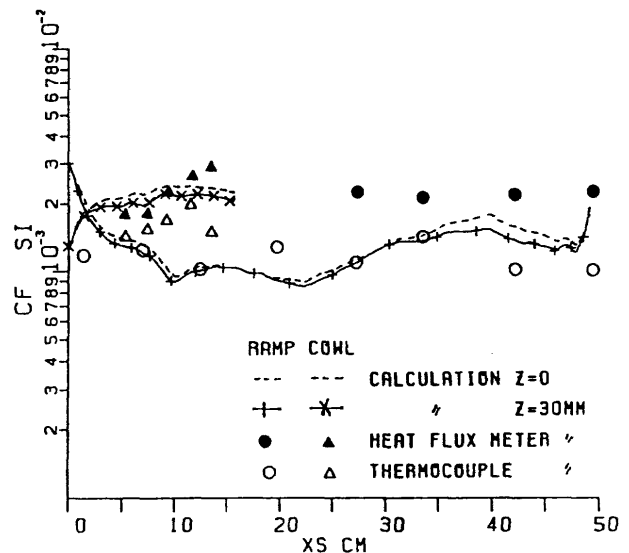


図10 壁面長に対する表面摩擦係数

ル内部ではAと同じ解を持つが、外部では、界面の外側に外部衝撃波がカウルや側板の両後縁から発生し、その背後の圧力上昇により内部流の膨張が抑制されて、茸型切断面の衝撃波面に覆われた、角張った剪断層の切断面をもつ。

Cは過膨張に相当し、スリムな切断面をもつ剪断層の界面の内側に、ノズル出口の蓋のような内部衝撃波面をもつ。これは側板ではノズル内部に落ち込み、対称面では外部に飛び出しそこでスパン方向下流にレギュラー反射する。又、対称面近辺でランプ内壁付着の外部からの小逆流域をもつ。Dでは、外部流の影響でCのような内部衝撃波面が側板後縁からノズル外部に飛び出て、ランプ後縁下流域で界面に衝突する。ランプ後縁付近に剥離や再付着線がある。強いコーナ衝撃波の背後にある界面外部では複雑な流れ場をもつ。

3) 推力について 各ケースに対し、X方向の比推力(推力を断面流量と重力加速度で割ったもの)の内訳を表1に示す。比推力では、実験とA3で1.9%、実験とAで4.3%の差をもつ。カウル・ランプの全側縁を側板で覆っているため外部条件の影響が比較的少ないと言えるが、過膨張で外部流のないCの場合ノズル出口内部にできる衝撃波の高圧部分により比推力がAより12%高くなっている。

5. あとがき

本論文ではノズル内外の流れの解析手法を示し、種々の外部条件に対してもこの手法が適用可能であることを計算によって確かめた。このコードはノズル設計のためのパラメトリックスタディに使用することができる。ここでは反応なしの場合についての計算を行ったが、スクラムノズル燃焼流を解くのが今後の課題である。

参考文献

- 1) 石黒登美子ほか：“スクラムジェットエンジンの流れの3次元Navier-Stokes解析(ストラット付空気取り入れ口)”，第9回航空機計算空気力学シンポジウム論文集，航技研特別資料SP-16, 1991.
- 2) 石黒登美子ほか：“スクラムジェットエンジンの流れ計算”，第8回航空機計算空気力学シンポジウム論文集，航技研特別資料SP 14, 1990.
- 3) 宮島博ほか：“スクラムジェットノズルの研究 その1 2次元ノズルの性能”，航技研報告 TR-1149(1992).
- 4) H.lai: "3D Computation of Hypersonic Nozzle," AIAA Paper 90-5203.
- 5) 渡辺重哉ほか：“スクラムジェット非対称ノズル流れの極超音速風洞実験”，流体力学講演会講演集(1991), pp.233-236.

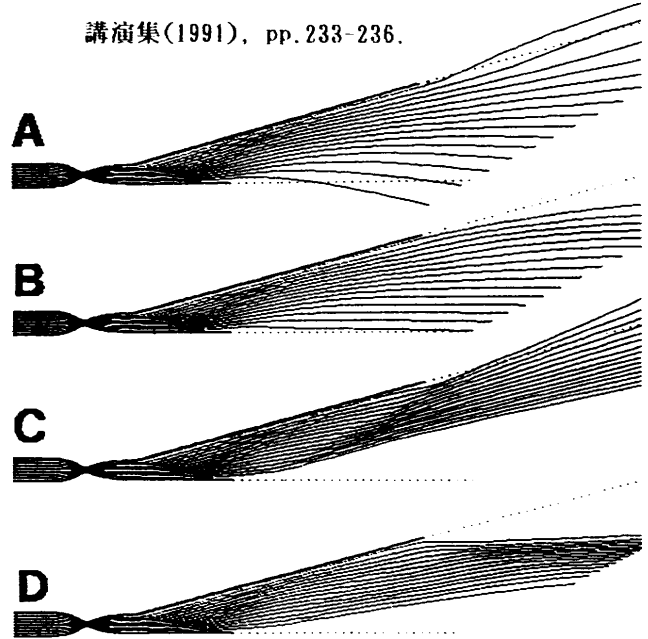


図12 対称面における流線図

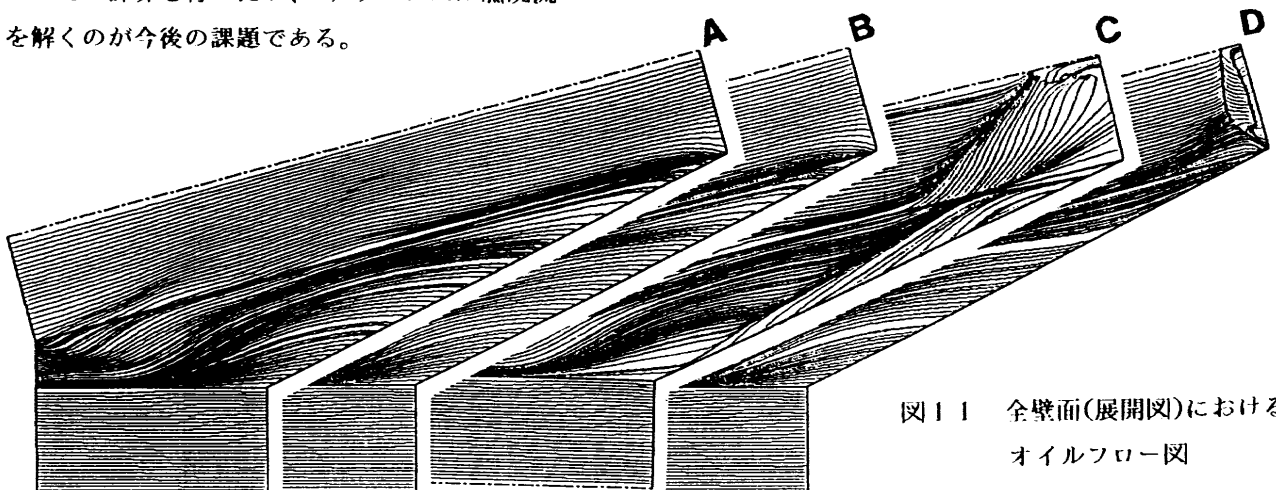


図11 全壁面(展開図)におけるオイルフロー図

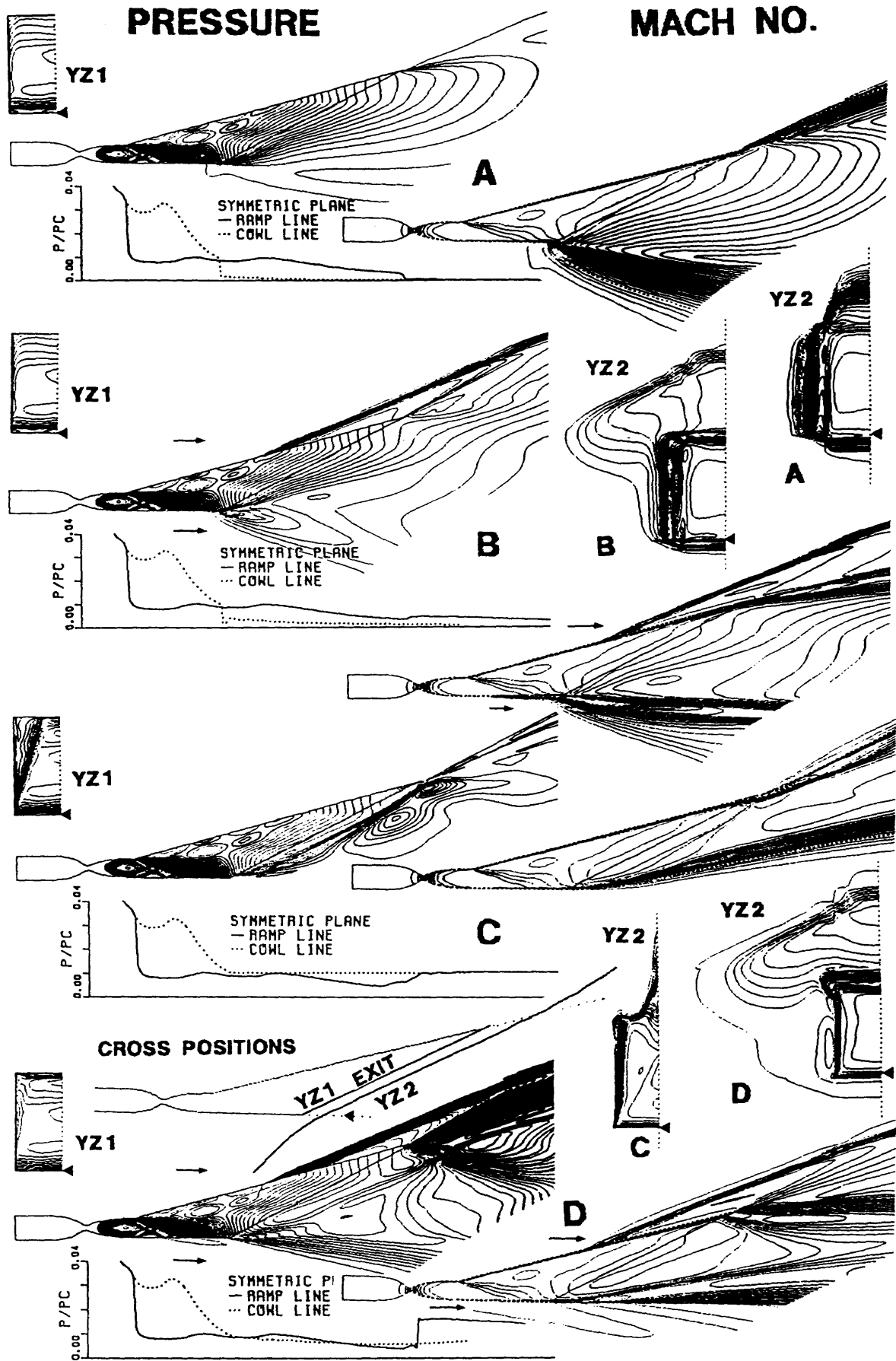


図13 対称面の等圧線と等マッハ線、同面の壁面とその延長線上の静圧分布、及び、ノズル出口面の等圧線とその下流切断面(図に位置指示)の等マッハ線のY-Z面への射影図