

## プラズマトーチによる超音速燃焼強制着火

小幡茂男<sup>\*1</sup>

## Forced Ignition Effect by Plasma Torch on Supersonic Combustion

Shigeo Obata <sup>\*2</sup>

## Abstract

The most effective plasma injection state, atomic oxygen in diffuse mode, is applied for forced ignition within a two-dimensional supersonic shear flow, constructed between supersonic air and sonic gas hydrogen. Under a condition out of combustion limit by cold air, the effect of plasma forced ignition has been investigated by molecular gas dynamical numerical approach. The Direct Simulation Monte Carlo (DSMC) method based on the Boltzmann equation has been employed with reactive inelastic molecular collision model (IE Model) as a numerical analysis method. It is clarified that plasma torch is able to act as an ignitor for supersonic combustion with a low temperature condition.

## 1. 序論

燃焼反応に参加する各種化学活性基を巨大な熱流束と共に集中的に供給することが可能なプラズマトーチは、超音速燃焼場における着火装置として期待され、実験的<sup>1)</sup>にも、解析的<sup>2,3)</sup>にもその効果が確認されつつある。本研究では、これまでにプラズマトーチの最も効果的な運転条件を探るべくDSMC解析法<sup>4)</sup>を用いて気体分子運動論的な立場から、二次元超音速剪断流中の初期燃焼過程にプラズマ活性基が及ぼす影響を数値的に解析してきた結果、単原子酸素成分の多いプラズマを超音速空気中へなるべく広範囲に拡散噴射させる形態の使用法を推薦した。今回は、そのような条件のプラズマ活性基による低温超音速空気中の強制着火性能について報告する。

## 2. 数値解析手法と計算条件

本研究で使用している数値計算手法は、これまで同様、定常解のための時間平均操作、衝突判定のためのMODIFIED NULL-COLLISION法<sup>5)</sup>、衝突断面積一定の剛体球分子モデル、回転自由度のみを考慮したBorgnakke-Larsenの並進-内部エネルギー平衡モデル<sup>6)</sup>、内部エネルギー参加型の反応分子非弾性衝突モデル<sup>7)</sup>による反応発生判定法、これらを組み合わせたDSMC解析法である。最も重要な、燃焼反応の解析には、水素-酸素系の主要な8つの反応化学種(H, O, OH, H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, HO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O)が参加する表1の16 Reaction System<sup>8)</sup>を採用し、微弱な初期着火問題の解析にも十分耐え得る精度を持たせた。

対象とする超音速剪断流は、音速噴射の低温水素ガスを上下にはさんで流れる超音速の空気により、図1のように上下対称な二次元的に形成される。計算領域は、水素噴流の中心線を対称境界として上半分だけを用いた。プラズマは、空気流と水素噴流を

表1 : 16 Reaction System

1:H+OH=H <sub>2</sub> +O:2	3:O+OH=O <sub>2</sub> +H:4
5:H <sub>2</sub> +OH=H <sub>2</sub> O+H:6	7:OH+OH=H <sub>2</sub> O+O:8
9:OH+OH=H <sub>2</sub> +O <sub>2</sub> :10	11:H+HO <sub>2</sub> =H <sub>2</sub> +O <sub>2</sub> :12
13:H+HO <sub>2</sub> =OH+OH:14	15:H+HO <sub>2</sub> =H <sub>2</sub> O+O:16
17:HO <sub>2</sub> +O=O <sub>2</sub> +OH:18	19:HO <sub>2</sub> +OH=H <sub>2</sub> O+O <sub>2</sub> :20
21:H <sub>2</sub> +HO <sub>2</sub> =H <sub>2</sub> O+OH:22	23:H+H+M=H <sub>2</sub> +M:24
25:O+O+M=O <sub>2</sub> +M:26	27:H+O+M=OH+M:28
29:H+O <sub>2</sub> +M=HO <sub>2</sub> +M:30	31:H+OH+M=H <sub>2</sub> O+M:32

分けているリップの後縁よりも上流地点で超音速空気中へと噴射され、空気とプラズマが均一に混合した状態で計算領域へと流れ込んで来るものとした。

超音速剪断流を構成する二流には表2に示す通り、空気流の温度を変化させた三条件を与えた。図2は水素-酸素系の着火特性<sup>9)</sup>を示したものであるが、前報まで使用してきたケースAが着火可能条件であるのに対し、ケースBおよびケースCはそれぞれ弱着火条件と非着火条件に相当し、プラズマ活性基の導入が無い自発着火条件下の解析においては、計算領域内部に反応の発生は確認されなかった。

表2 : 超音速剪断流流入条件

	Supersonic Air	Sonic Hydrogen
Pressure [N/m <sup>2</sup> ]	1.01 × 10 <sup>5</sup>	1.01 × 10 <sup>5</sup>
Mach Number	2.44	1.00
Temperature [K]	Supersonic Air	Sonic Hydrogen
Case A	1500	250
Case B	1000	250
Case C	750	250

プラズマ活性基は単原子酸素のみから成り、空気流中へ十分に拡がった拡散条件(O-W-r)で使用した。プラズマ活性基には表3に示す通り、超音速空気と比べて非常に小さな流束値を与え、計算領域へ流入させた。

矩形の計算領域は、ケースAの空気条件の平均自

<sup>\*1</sup> 防衛大学校 <sup>\*2</sup> National Defense Academy

表3：プラズマ活性基流束条件

Inlet Flux Ratio ( Plasma Flow / Air Flow )	
Number Flux Ratio	Heat Flux Ratio
$1.72 \times 10^{-3}$	$1.23 \times 10^{-3}$

由行程の半分の一辺長を持つ立方体形の衝突試行用セルを横(x)方向640個、縦(y)方向160個並べた大きさとした。流入境界の超音速空気流路はセル130個から成り、このうちリップ寄りの120個分単原子酸素が空気流に混入して流入する。リップには厚み無し、滑り条件、断熱境界と共に、セル10個分の長さが与えられる。水素噴射口の対称全高さ(h、セル60個分)を代表長さとするヌーゼン数は $Kn=0.017$ 、レイノルズ数は $Re=21433$ である。他の三境界は、それぞれ、上側境界が超音速空気流と同じ条件に保たれ、下側境界は対称境界、出口境界にはx方向に物理量変化の無い連続条件を与えて真空流出を避けた。以上のケースAを基準とする計算領域全サイズは、残りの二ケースでもそれぞれ同じとし、流入空気温度の低下に伴う空気流平均自由行程の減少に対しては、構成セルの数を増加させて対応している。

### 3. 超音速燃焼初期過程

前記したように活性基導入の無い場合、ケースBとCには自発燃焼は起こらず、また、ケースAの自発着火の燃焼規模も非常に小さかったので、以下、三ケースそれぞれの混合過程に注目して結果を示してゆく。図3～図6に載せたのは、いずれも上からケースA、B、Cであり、各ケースの右端括弧内の数字は等高線間隔を示し、図中の小文字のHおよびLはそれぞれ計算領域中で各物理量の最大値、最小値を有する位置を表す。

図3に等圧力線図を示す。いずれのケースもリップ後縁から圧縮と膨張の対になった弱い波が超音速空気流中へと伸びている。二流の運動量の違いにより混合が流れの加減速を引き起こし、また、気体分子の熱運動による粒子の遡上に伴い、これらの圧力波が生ずる。よって、二流の速度差が小さく、気体温度の低いケースCでは非常に弱い波となっている。

図4は、等水素濃度線図である。全てのケースで、リップ後縁直後における濃度剪断層が空気流側へ大きく広がっていること、および、計算領域出口にまで亘って水素噴流の中心部では水素濃度がほぼ100%に保たれていることから、混合の物質輸送が水素の空気中への浸透により支配されていることが分かる。しかし、その混合過程も空気温度の低下に伴い進行度を落とし、濃度剪断層の幅が狭くなると共に、水素噴流中心の純粋水素領域が大きくなり、空気温度の影響を大きく受けていることを示している。

図5は、紙面下向き右ねじ方向の等焓度線図であるが、いずれのケースにも特徴的なのはリップ後縁で形成された渦の拡散帯が水素噴流側へ引きずられるように、渦剪断層を水素噴流の内部に形成している点である。実際、渦剪断層の中心と水素濃度90%の線は出口境界までほぼ一致している。これから、混合による運動量の交換が水素の空気中への浸透の初期段階において行われていることが分かる。また、空気流側に渦帯が見られないことは、空気流と比べて噴射速度の小さな水素も一旦空気流中へ浸透した後には速やかに空気流速に乗って高速度で流れ始めることを示している。三ケースのそれぞれの比較では、温度の低下による空気の運動量の減少に伴い、渦の強さと渦の拡散速度も小さくなっている。

図6に等温度線図を示す。渦剪断層がより水素噴流側へ寄った位置に現われるのに対し、三ケースとも、リップ後縁で温度勾配の大きな領域を空気流側へ大きく広げ、そのまま下流に向かってもやや空気流寄りに温度剪断領域を形成している。これは、渦剪断層を通過し、運動量交換を終わった水素と空気の間でエネルギー交換が行われ、冷たい水素が自らの温度を上昇させていることを示している。また、二流の温度差が小さくなるにつれ温度剪断層の幅と勾配も小さくなっていくことが分かる。

図7の様な流れと垂直な断面内部で、次式により定義される混合効率を用いて、混合過程に及ぼす空気温度の影響を評価したのが図8である。これからも、空気温度の低下により混合が大きく阻害されている様子が見て取れる。また、流れ場と関連づけて、リップ直後の領域において渦を発生しながら急激に混合が進み、水素の空気中への輸送を行った後、熱エネルギーの交換によるゆっくりとした混合が進んでゆくことが確認できる。

$$\eta = \frac{\int_0^{y_{\max}} \left( \frac{n(y)}{\bar{n}} \right) dy}{\left( \frac{n(y)}{\bar{n}} \right)_{total}} : \begin{cases} \Phi(y) > 1 \rightarrow \Omega = \Phi(y) \\ \Phi(y) < 1 \rightarrow \Omega = 1 \end{cases}$$

図3～図6および図8から、超音速剪断流の混合過程の特徴を以下の様にまとめることができる。

- ・物質輸送は水素から空気へと行われる
- ・混合の第一段階は運動量交換による渦形成
- ・第二段階は浸透水素の温度上昇
- ・空気温度の低下に伴う混合の抑制

### 4. 強制着火効果

単原子酸素プラズマによって活性化される起鎖反応は16 Reaction Systemの反応番号2であり、そこから一次生産物質の水酸基(OH)を経由して、分

枝反応である素反応5により大発熱と共に水蒸気(H<sub>2</sub>O)を生産する。しかしながら、本研究で用いた小さな計算領域内部においては流れ場に擾乱を引き起こす様な巨大な発熱を供給出来るほどの反応頻度は得られなかった。そこで、以下の図9、10では、反応生成物質の中でも主として水酸基と水蒸気とに注目して、その生成状況から、プラズマ活性基による強制着火効果を明らかにしてゆく。図は前節同様、上から順にケースA、B、Cである。

図9に等水酸基数密度線図を示す。自発着火の不可能なケースB、Cにおいても単原子酸素拡散プラズマにより流れ場中に水酸基の存在が認められる。しかし、空気温度の低下が強制着火性能に強い影響を与えていることは明らかであり、ケースB、Cと空気温度の低下に従って、水酸基生産量の減少のみならず、生産開始地点が流れ方向に後退してゆくことが分かる。三ケースに共通しているのは、水素濃度が高く、領域温度の低い水素噴流中心近傍に全く水酸基が見られないことと、やや空気噴流側に寄った位置から反応が開始している点であり、これからも反応進行に及ぼす熱的影響を見て取れる。また、混合過程と関連のある特徴として、図4の濃度剪断層の幅に応じて各ケースの水酸基帯の中心が移動している点が上げられる。ケースAと比べてケースCでは、水酸基帯の中心がより空気流側へ近づいて形成され、わざわざ水素濃度がさほど高くない領域を主反応場としている。空気温度の低いケースCにおいては、高水素濃度領域はそのまま低水素濃度領域であるために、単原子酸素プラズマといえども十分に反応2を加速させることが出来ない。よって、不利を承知で水素濃度の低い領域で起鎖反応を進めざるを得ないのだと考えられる。

図10は、等水蒸基数密度線図である。図9と同様、ケースCの燃焼が非常に弱いことがよく分かる。このような微弱な反応の発生を一回一回カウントできるのもD SMC解析法の特徴の一つである。三ケースのいずれもが、水酸基と比べて水蒸気生産が多少の時間遅れをもって行われることを示している。また、図9と同様に水素噴流中心部では水蒸気生産が行われていない。分枝反応である反応5は水素と水酸基との間で進行するため、多量の水素が存在しても水酸基の無い領域に於て、その発生は不可能である。

図11は混合効率同様、流れと垂直な断面内部で次式により定義される水蒸気生産効率の流れ方向変化

$$\eta = \frac{\int_0^{y_{\max}} \left( \frac{n(y)}{n(y)_{\text{ref}}} \times \Omega \right) dy}{\int_0^{y_{\max}} \Omega dy} : \begin{cases} \Phi(y) > 1 \rightarrow \Omega = \frac{1}{\Phi(y)} \\ \Phi(y) < 1 \rightarrow \Omega = \Phi(y) \end{cases}$$

である。比較のため、プラズマ活性基導入の無い自発着火条件のケースAの結果を同時に載せた。弱着火条件以上の空気温度を持つケースA、Bが共に混合開始から全く時間遅れなく水蒸気を生産開始を行うことが出来ているのに対して、非着火条件のケースCには、自発着火のケースAよりも大きな時間遅れが認められる。しかしながら、出口境界付近の最終的な燃焼効率はケースCの方が2桁以上高い値を獲得しており、単原子酸素プラズマが持つ良好な強制着火・燃焼促進能力を示している。

## 5. 結論

1. 単原子酸素プラズマの使用により着火限界外の低温空気を用いた超音速剪断流においても燃料水素の強制着火が可能となる。
2. プラズマジェット強制着火により、自発着火よりも二桁以上大きな水蒸気生産効率が達成可能となる。

## 参考文献

1. 堀沢, 木村, 佐山 "スクラムジェットの着火・保炎機構に関する研究" 日本航空宇宙学会誌, 40巻, 460号, 1992
2. 小幡, 長島 "D SMC法による燃焼反応流解析" NAL SP-27, p63-68
3. 小幡ら "並列計算機を用いた超音速燃焼初期過程のD SMC解析" NAL SP-30, p59-64
4. G.A.Bird "Molecular Gas Dynamics" Oxford Univ. Press, London, 1976
5. K.Koura "Null-Collision technique in direct-simulation Monte Carlo Method" Phys. Fluids 29 November 1986 3509-3511
6. C.Borgnakke and P.S.Larsen "Statistical Collision Model for Monte Carlo Simulation of Polyatomic Gas Mixture" J. Comp. Phys. 18 405-420, 1975
7. 小幡, 長島 "D SMC法における反応分子非弾性衝突モデル" Thermal Science and Engineering, Vol.3 No.1, 1995, pp13-19
8. J.S.Evans and C.J.Schexnayder Jr "Influence of Chemical Kinetics and Unmixedness on Burning in Supersonic Hydrogen Flames" AIAA Journal, vol.18 no. 2, 1980, pp188-193
9. V.V.Voevodsky and R.I.Soloukhin "On The Mechanism and Explosion Limits of Hydrogen-Oxygen Chain Self-Ignition in Shock Waves" Proceedings of Tenth Symposium (International) on Combustion, 1965, pp279-283

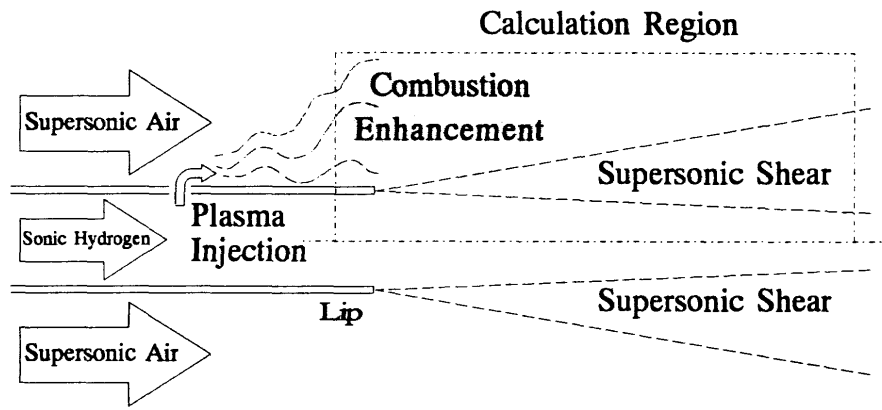


図1：二次元超音速剪断流とプラズマ噴射モデル

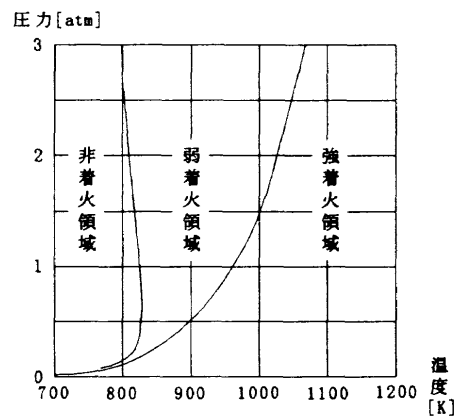


図2：水素-酸素系自発着火限界

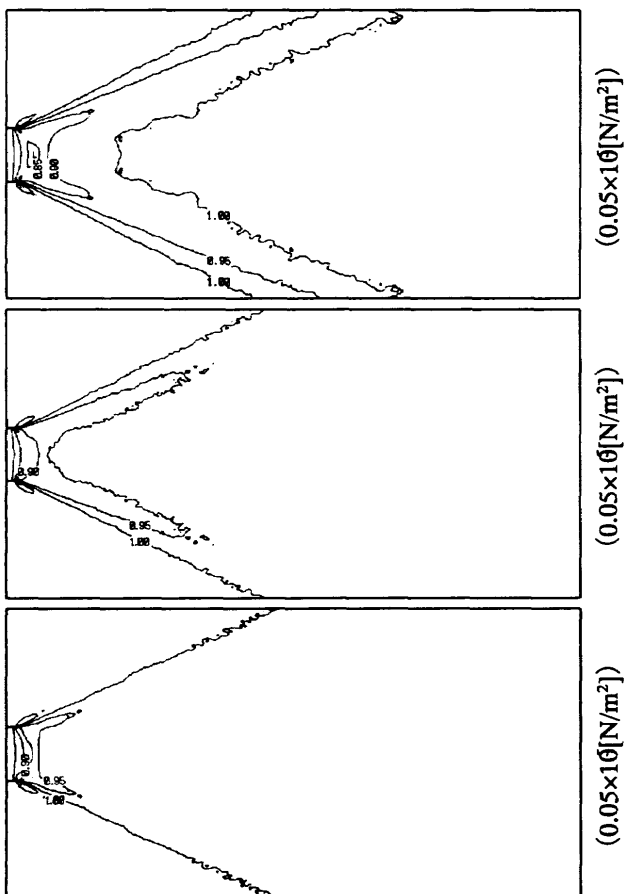


図3：等圧力線図

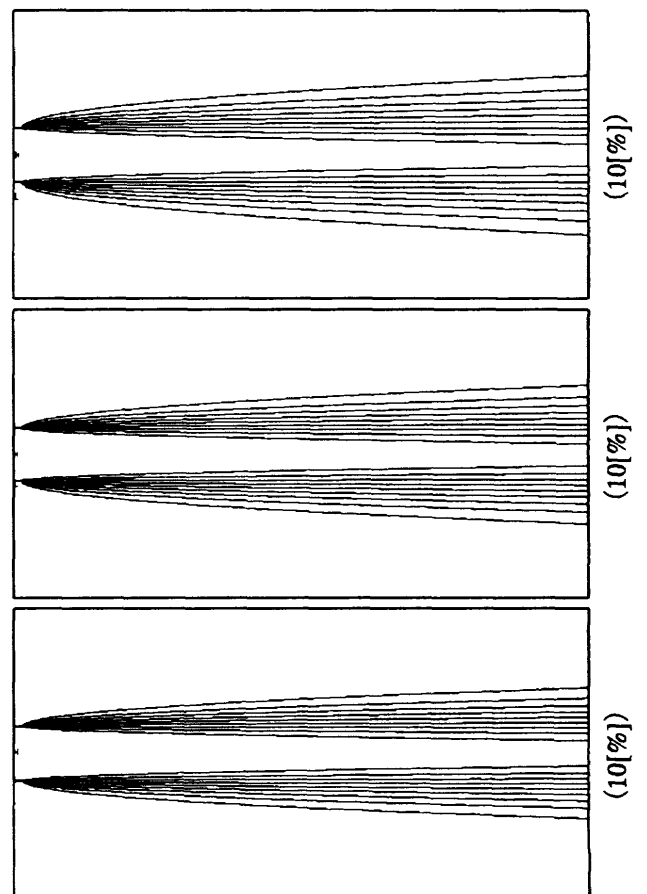


図4：等水素濃度線図

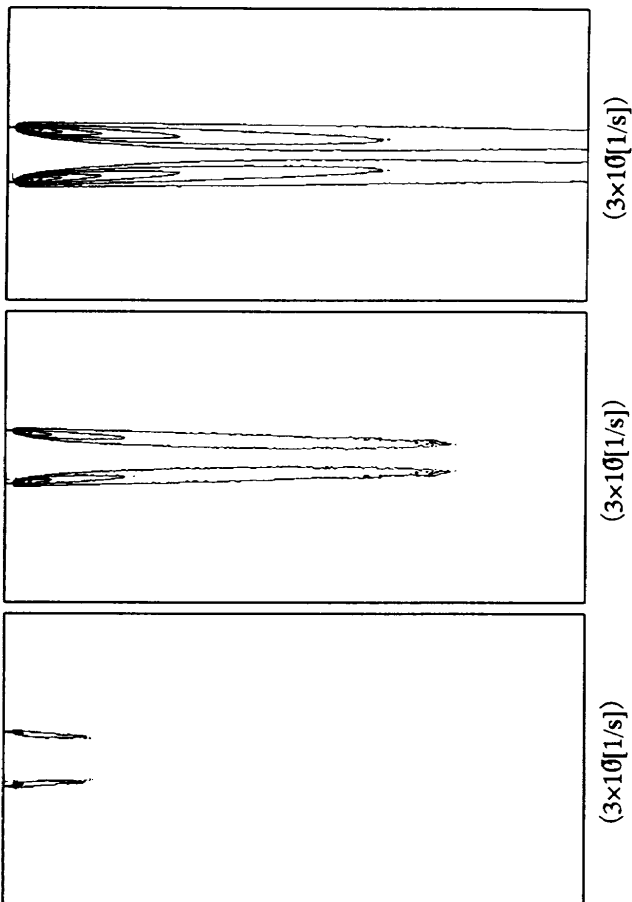


図5：等渦度線図

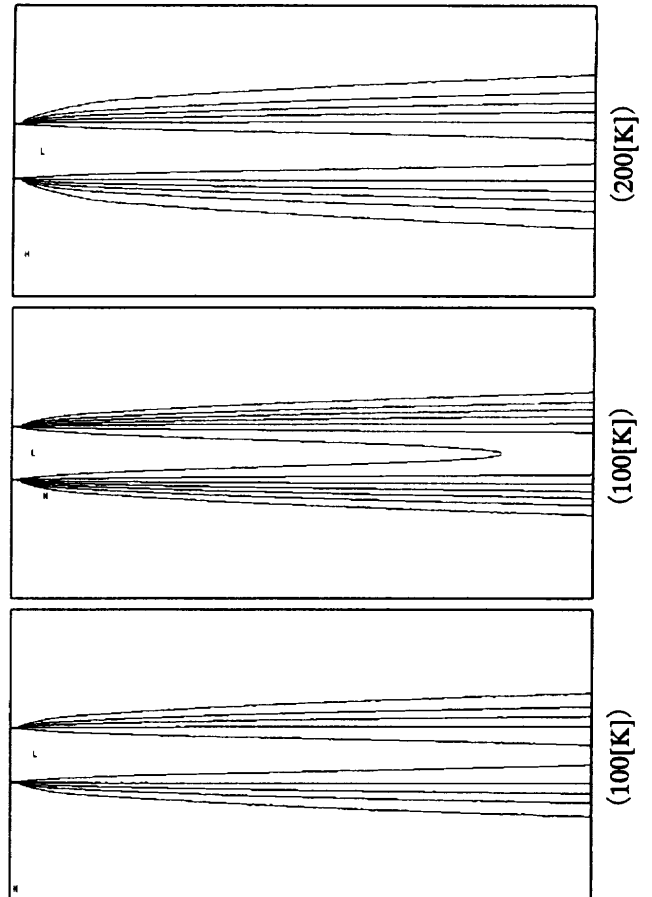


図6：等温度線図

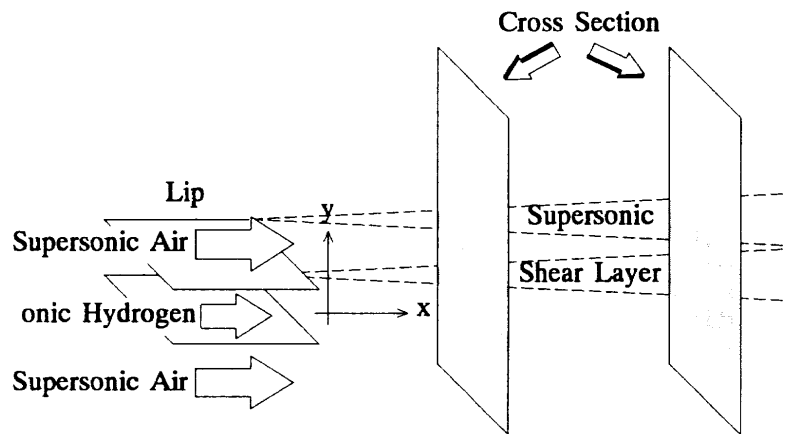


図7：効率算出断面図

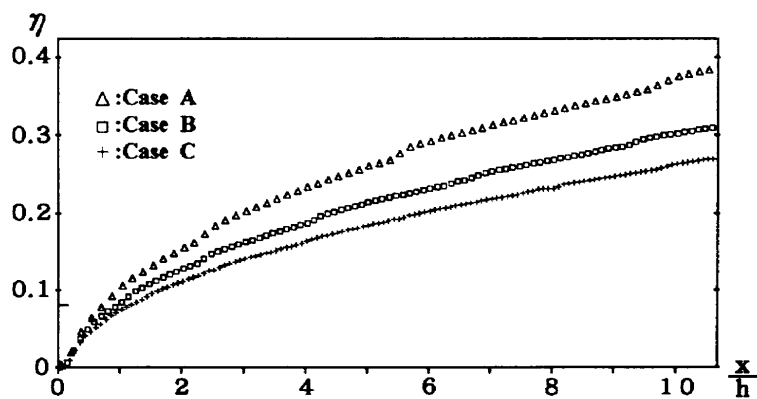


図8：混合効率

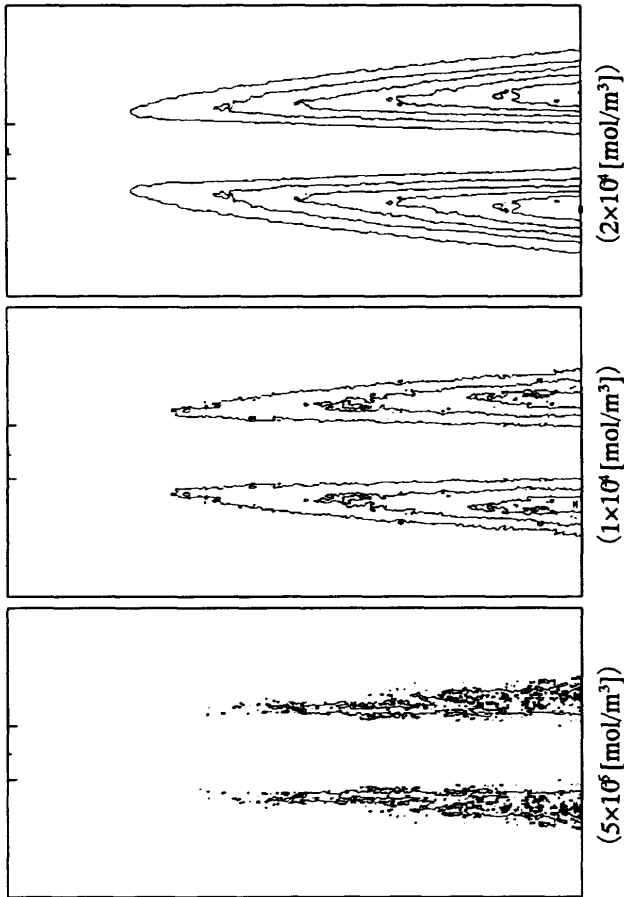


図9：等水蒸基数密度線図

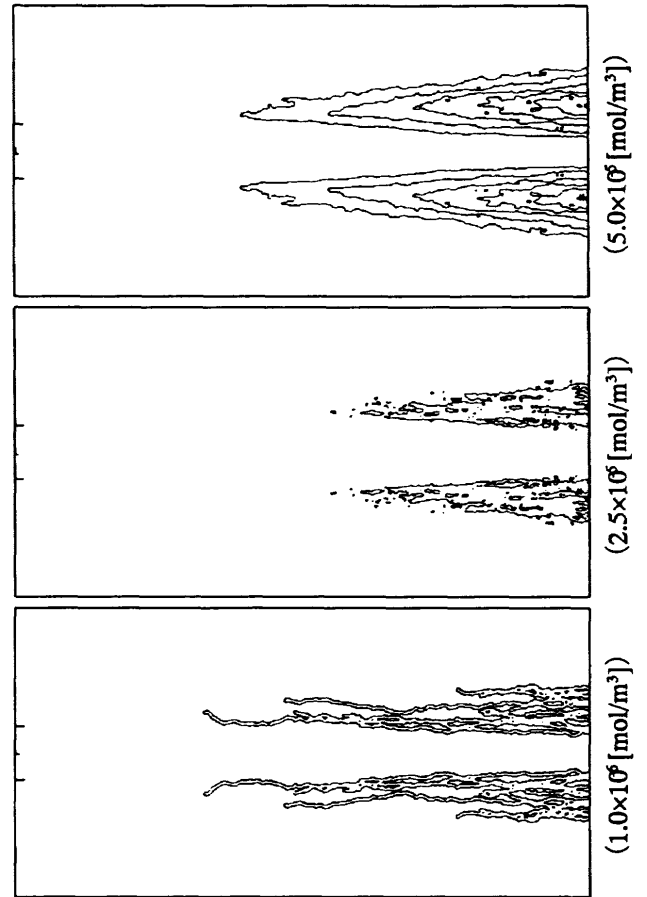


図10：等水蒸基数密度温度線図

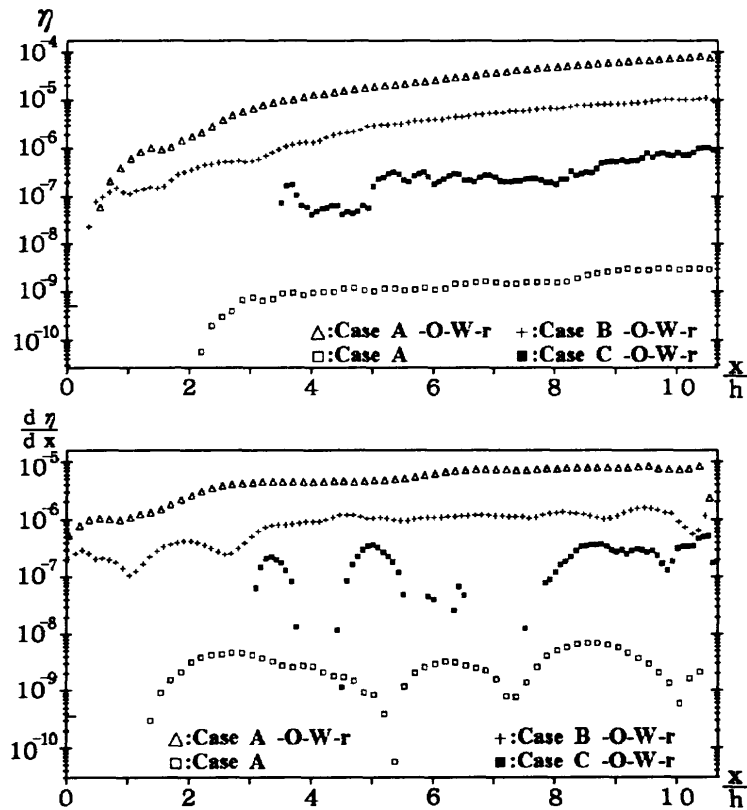


図11：水蒸気生産効率