

航空宇宙技術研究所資料

TECHNICAL MEMORANDUM OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TM-632

超音速二次元翼列風洞用空気エゼクターの実験
(第一報・二次流量が零の場合の性能)

高 森 晋 ・ 坂 口 一

1991年2月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

超音速二次元翼列風洞用空気エジェクターの実験*

(第一報・二次流量が零の場合の性能)

高 森 晋^{*1} ・ 坂 口 ー^{*1}

Air Ejector Experiments Using the Two-Dimensional Supersonic-Cascade Tunnel (1st Report, Zero-Secondary-Flow Performance)

By

Susumu TAKAMORI and Hajime SAKAGUCHI

ABSTRACT

The air ejector has almost limitless application possibilities in engineering practice due that is to its simplicity. To determine the feasibility of using an ejector as a suction pump for boundary-layer air removal in the Two-Dimensional Supersonic Cascade Tunnel, especially when a portion of the tunnel's air supply is used for its primary flow, both subsonic and supersonic air ejector tests were conducted. The tested ejector was axially symmetrical and a center-jet type, with its geometrical configuration being varied, i.e., the primary nozzle to mixing tube throat area ratio, and the straight mixing space (mixing tube) and diverging passage section (diffuser) lengths. These configuration changes enabled geometrical effects on ejector performance to be obtained.

In the present report, the following experimental results using a zero-secondary-flow air ejector are discussed;

- (1) The effects of the straight mixing and diverging passage section lengths on the relationship between secondary pressure (secondary vacuum chamber pressure) and primary stagnation pressure (primary pressure characteristics) during a zero-secondary-flow condition.
- (2) The effect of throat area ratio of primary nozzle to mixing tube on primary pressure characteristics.
- (3) The relationship between the minimum secondary pressure and throat area ratio.
- (4) The optimal operating conditions for a zero-secondary-flow subsonic ejector.
- (5) The effect of primary Mach numbers on a zero-secondary-flow supersonic ejector performance.

Keyword : Compressible Flow, Subsonic Ejector, Supersonic Ejector, Experiment, Zero-Secondary-Flow, Optimal Geometrical Configuration.

* 平成2年12月5日受付 (received 5 December 1990)

* 1 原動機部 (Aeroengine Division)

概 要

二次元減速翼列実験では、翼列設定部における気流の剥離を防ぐ目的で抽気を行う必要がある。超音速翼列風洞の抽気用低圧源としての使用を目的として、全長が 2.5 m、直管型混合管内直径が 155.5 mm の Center-jet Type の空気エゼクターを製作し、一次ノズル・スロート対混合管の断面積比、混合管長、ディフューザー長、ノズル・マッハ数などの、エゼクターの構成要素が、一次側（駆動流）全圧と二次（吸込み）側圧力との関係、流量比対二次側圧力との関係、などのエゼクター性能に及ぼす影響について系統的に調べた。本報告では零二次流における、エゼクターの真空特性と、上に述べた、エゼクターの構成要素との関係について示し、最適作動点について考察する。

1. はじめに

二次元減速翼列実験では、翼列設定部における気流の剥離を防ぐ目的で抽気を行う必要がある。翼列風洞の抽気用低圧源として、エゼクターを使用することは、実験用に供給される空気の一部を利用することで、専用の排風機が不用となり、また構造が簡単で操作が容易である、などの利点がある。しかし、一方、翼列の実験条件が変化すると、必要とされるエゼクターの二次側（吸込み）圧力や流量は大きく変化する。これに対応するには、エゼクターの最適作動点外での作動が必要となる。翼列実験時の比較的低い全圧の空気を一次側の駆動流体として用いなければならないにも拘らず、二次側における、かなり高い真空度と流量が必要となり、かなり高いエゼクター性能が要求される。

一方、エゼクターの研究報告については、二次流量が大で低真空の場合や、零二次流で高真空の場合、を内容とするものが多く、我々が必要とする領域（低い一次流全圧、中流量比）のものが少ないように思われる。超音速翼列風洞の抽気用低圧源としての使用を目的として、全長が 2.5 m、直管型混合管内直径が 155.5 mm の Center-Jet Type の空気エゼクターを製作し、一次ノズル・スロート対混合管の断面積比、混合管長、ディフューザー

長、ノズル・マッハ数などの、エゼクターの構成要素が、一次側（駆動流）全圧と二次（吸込み）側圧力との関係、流量比対二次側圧力との関係、などのエゼクター性能に及ぼす影響について系統的に調べた。本報告では零二次流における、エゼクターの真空特性と、上に述べた、エゼクターの構成要素との関係について示し、最適作動点について考察する。

記 号

AR	：一次ノズル・スロート対混合管断面積比（略して、面積比） $AR = (D_{MIX} / D_{NTH})^2$
CRT	：ノズル入口対出口面積比（絞り比）
D	：直径
L	：管の長さ $(L/D)_{MIX}$ ：混合管の長さとの内直径の比
M	：マッハ数
P_A	：大気圧
P_o	：全圧
P_s	：静圧
P_w	：混合管とディフューザーにおける、壁面圧力（静圧）
X	：混合管入口よりの距離

添 字

DF	：ディフューザー部
EX	：出口
EN	：入口
i	：局所値
MIN	：最小二次側圧力点（AR をパラメーターとして、 P_{o2} / P_A 値が極小値をとる点）
MIX	：混合管部（直管）
N	：一次ノズル部
NTH	：一次ノズル・スロート
OPT	：最適作動点
1	：一次流または一次側
2	：二次流または二次側

2. 実験装置と実験方法について

実験に用いたエゼクターの概略を図 1 に示す。

表1 圧縮機要目

型 式	軸流5段
空 気 流 量	13 kg / sec
全圧圧力比	3.1
吐出空気温度	110 ~ 150 °C

圧縮機の諸元を表1に示す。実験時における、使用可能な最高全圧力比は、一次側貯気槽内で、約2.6である。本圧縮機によって、一次側貯気槽に供給された空気は、一次側導入管を経て一次ノズルにおいて加速され、混合管部(直管)に放出される。次いで、ディフューザー部で大気圧にまで減速され、実験室内の消音室を経て大気に放出される。

2.1.2 一次ノズル、および、ノズル・スロート対混合管断面積比 (AR) について

ノズル(軸対称ノズル)は、一次側貯気槽内に設けられた、入口縮合部のある一次流導入管(内直径130 mm)に取付けられる。一次ノズルと導入管端部との間に、同一内直径の直管を挿入することによって、ノズル出口と混合管入口との間の距離 L_N (図1)を調節することが出来る。面積比、AR値の変化は、混合管直径(155.5 mm)は一定に保ち、一次ノズルを交換して、一次ノズルのスロート・直径を変えることで得られる。亜音速ノズルでは、ノズル・スロート(D_{NTH})はノズル端部にある。表2に本実験における、亜音速ノズル(Convergent Primary Nozzle)のAR値を示す。超音速ノズル(Convergent-Dive-

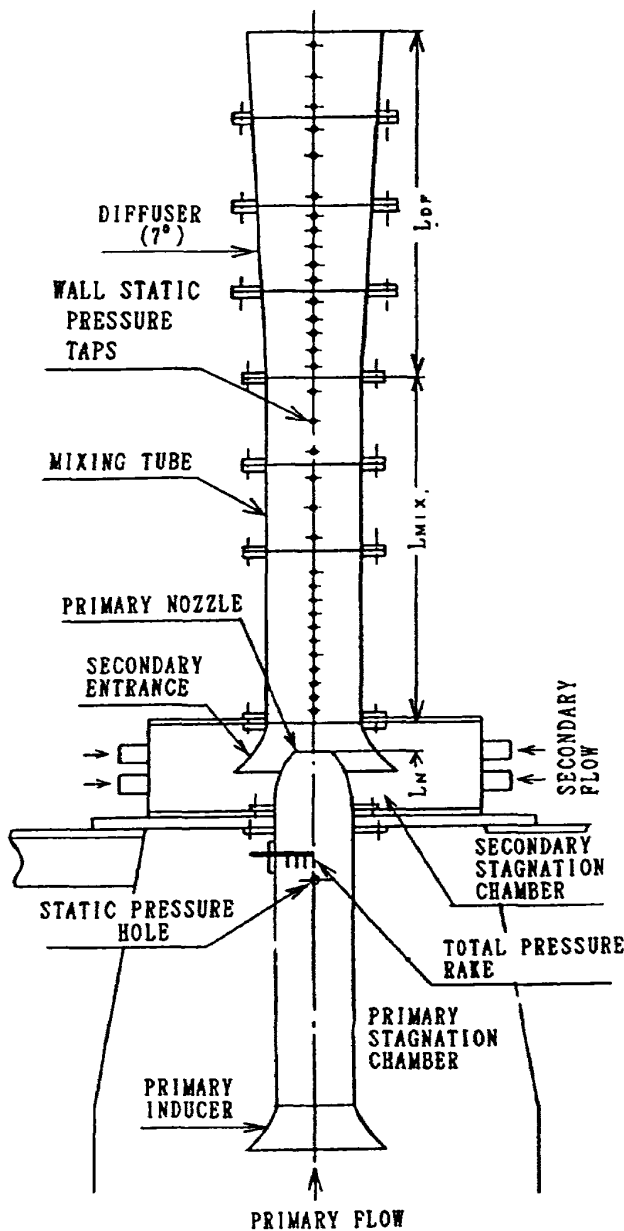


図1 実験装置の略図

供試エゼクターは、中心部に一次ノズルを配する、中心噴出型 (Center-Jet Type) の軸対称エゼクターであり、標準全長(高さ)は約2.5 mである。作動流体は、一次側(駆動側)、二次側(吸込み側)ともに空気である。エゼクターの主要諸元、空気源などの実験装置、および、圧力、温度の計測など、実験方法の概要について示す。なお、本エゼクターは、現在、遷・超音速二次元翼列風洞・抽気用低圧源として稼働している。

2.1 空気源

一次流を供給する、共用空気源設備での、軸流

表2 亜音速ノズル

(Convergent Primary Nozzle)

$$AR = (D_{MIX} / D_{NTH})^2$$

$$\text{絞り比 } CRT = (D_{NTH} / D_{N,EN})^2$$

$$D_{NTH} = D_{N,EX}$$

単位 mm

AR	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	5.0	7.0
D_{NTH}	127	110	98	90	83	78	70	59
$D_{N,EN}$	130	130	130	130	130	130	130	130
CRT	0.95	0.72	0.57	0.48	0.41	0.36	0.29	0.21

rgent Primary Nozzle) は内面が円錐形状である。その AR 値を表 3 に示す。なお、ノズル・スロート対混合管断面積比を、省略して、面積比 (AR) と略記する。

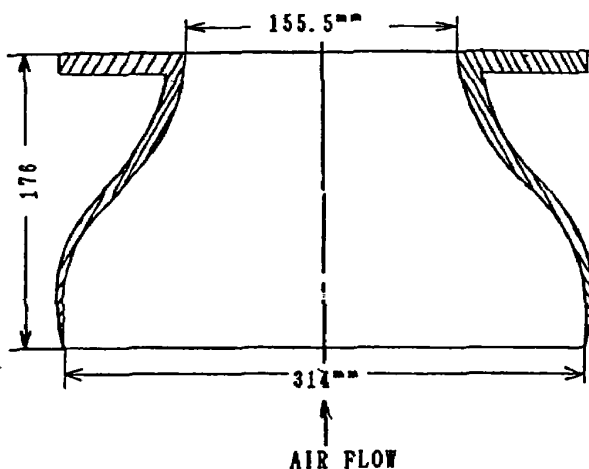
表 3 超音速一次ノズル
(Convergent-Divergent Primary Nozzle)

M _N	AR	AR	AR	AR	M _N	AR	AR	AR	AR
1.3	3.0	3.5	4.0		1.8	2.0	2.5	3.0	4.0
1.6	2.5	3.0	3.5	4.0	2.0	2.5	3.0	3.5	5.0

$$AR = (D_{MIX} / D_{NTH})^2$$

2.1.3. 混合管

本実験では、便宜上、混合部の断面一定の直管部を混合管、拡大管部をディフューザーと呼ぶ。混合管は内直径 ($D_{MIX} = 155.5 \text{ mm}$) が一定である。異なる長さの混合管を組合せることで、混合管部全長 (L_{MIX}) を変えることが出来る。 L_{MIX} が、 $0 \leq (L/D)_{MIX} \leq 8$ 、の範囲の実験を行った。混合管入口部に設けられた、二次流用の入口縮合部の断面形状および絞り比を図 2.1 に示す。図 1 に示すように、側壁面圧力 (壁面静圧) を測定する静圧孔が設けられている。



CONTRACTION RATIO=0.245

図 2.1 混合管入口集合部

2.1.4. ディフューザー

ディフューザーは、開き角 = 7 (Deg) (一定)、

であり、流れ方向に 4 分割されており、1 ブロックの長さは、 $L = 2 \cdot D_{MIX} = 311 \text{ mm}$ である。ディフューザー長さ (L_{DF}) は、 $0 \leq (L_{DF} / D_{MIX}) \leq 8$ 、の範囲で調整が可能である。図 1 に示すように、側壁に静圧孔群が設けられている。

2.1.5. 二次側貯気槽

二次側貯気槽は、縦・横・高さが $500 \times 500 \times 318 \text{ mm}$ の諸元をもつ箱形状 (六面体) である (図 1, 図 2.2)。下面は、一次流貯気槽と隣接しており、上面部で混合管と接続している。側面に、図 2.2 に示す二次流吸入配管 (4 本; 直径 = 130 mm) が接続している。吸入管のない側面に二次貯気槽圧力 (P_{02}) を測定する静圧孔とタップが設けられている。二次流吸入配管の中間部に設けられた電動バルブによって二次流吸入を調整する。

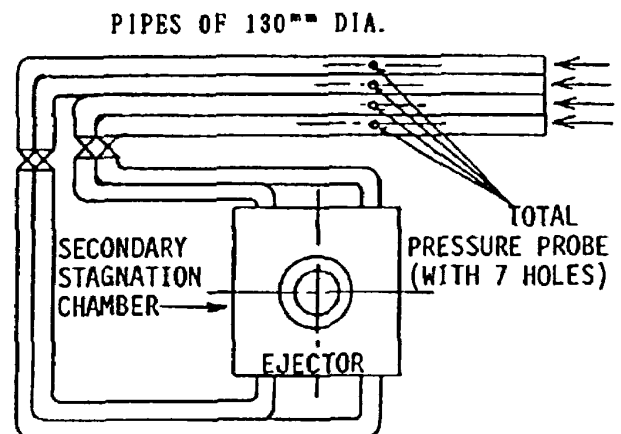


図 2.2 配管系統図

2.2 温度、圧力の計測

2.2.1 一次流全温、全圧、静圧の測定

(A) 一次流全温 (T_{01}) は、一次流貯気槽内にある、一次流導入管 (一次流入口縮合管 (Primary Inducer) よりノズル入口までの直管部をいう。内径 130 mm, 全長 1.2 m である (図 1)) の上流に設置した抵抗温度計を用いて測定した。

(B) 一次流全圧 (P_{01}) は次の方法で測定した。ノズル入口部より 120 mm 上流の一次流導入管中に設置された楕形ピトー管 (全圧管が 4 点) のピトー圧

($P_{01.i}$, $i = 1, 2, 3, 4$) の相加平均値,

$$P_{01} = (1/4) \sum_{i=1}^4 P_{01,i}$$

を一次流全圧とした。

4点の全圧管は、図2.3に示すように、導入管（内径130 mm）の断面積を4等分する半径（ R_1 , R_2 , R_3 ）の中間（ r_1 , r_2 , r_3 , r_4 ）に位置している。

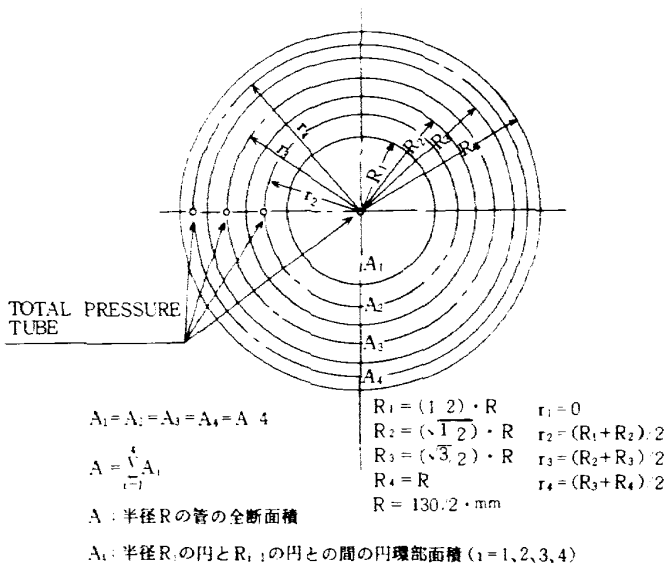


図 2.3

(C) 一次流静圧（ P_{s1} ）は、全圧管近傍位置で、導入管壁面にあけられた壁面圧力を使用した。

2.2.2 二次側圧力（真空圧； P_{02} ）の計測

二次側圧力 P_{02} は、二次側貯気槽（Secondary Stagnation Chamber；図2.2）の側面に設けられた、壁面静圧孔（4点）の圧力の平均圧力、

$$P_{02} = (1/4) \sum_{i=1}^4 P_{wi},$$

を用いた。二次流配管（図2.2）の影響を考慮して、管が接続されていない2側面に間隔をあけて計2×2点の静圧孔を設けてある。それぞれの圧力値のバラツキは、平均値に対して、二次流が最大の場合でも、3%以下であった。

2.2.3 測定データの処理

これらの圧力は、多点圧力変換器を用いたマイクロコンピュータによる自動計測システムにより計測され、オンラインのデータ処理を行って

いる。

3. 実験結果

本報告では、二次流量（ W_2 ）が零の場合について述べるので、エゼクター性能は、二次側の真空特性を示すことになる。圧力については、一次（ P_{01} ）、二次（ P_{02} ）側ともに大気圧との比、 P_{01}/P_A , P_{02}/P_A , で示す。混合管長（ L_{MX} ）、ディフューザー長（ L_{DF} ）は、混合管内直径（ D_{MIX} ）との比をとり、無次元化して、それぞれ、 L_{MIX}/D_{MIX} , L_{DF}/D_{MIX} で示す。なお、混合管長比、 L_{MIX}/D_{MIX} については、省略して $(L/D)_{MIX}$ の記号を用いる。3.1.4節、3.1.5節で示すように、混合管長、ディフューザー長が、エゼクターの二次側真空性能に及ぼす影響について調べた結果に基づいて、それぞれ、 $(L/D)_{MIX} = 8$, $L_{DF}/D_{MIX} = 8$, で実験を行った。本報告では、一次ノズル形状が、いわゆる軸対称先細ノズル（Convergent Nozzle）である、亜音速エゼクターの性能と、一次ノズルが軸対称の超音速ノズル（Convergent-Divergent Nozzle）である、超音速エゼクターの性能について検討する。一次ノズル形状として、先細ノズルを用いた場合、ノズル端部（出口）での一次流マッハ数（ M_1 ）は、 $M_1 \leq 1.0$ となる。詳細に言えば、 $M_1 = 1.0$ となる場合や、ノズル出口直後で、一次流が超音速になる場合もある。この場合、遷音速エゼクターの名称が適当とも考えられるが、本報告では、超音速ノズルを用いた場合と区別する意味で、亜音速エゼクターの名称を用いる。なお、図3.4, 5に示した、 $M_N = 1.0$ の記号はノズル設計マッハ数を示し、ノズル出口マッハ数、 $M_1 = 1.0$ の意味ではない。一次ノズルが Convergent Nozzle であることを示す目的とともに、超音速の性能と区別して表示し、混同を防ぐ目的で、示したものである。

3.1 亜音速エゼクターの二次側真空性能について

図3.1に、亜音速エゼクターの零二次流における、一次流全圧比対二次側圧力比の関係について

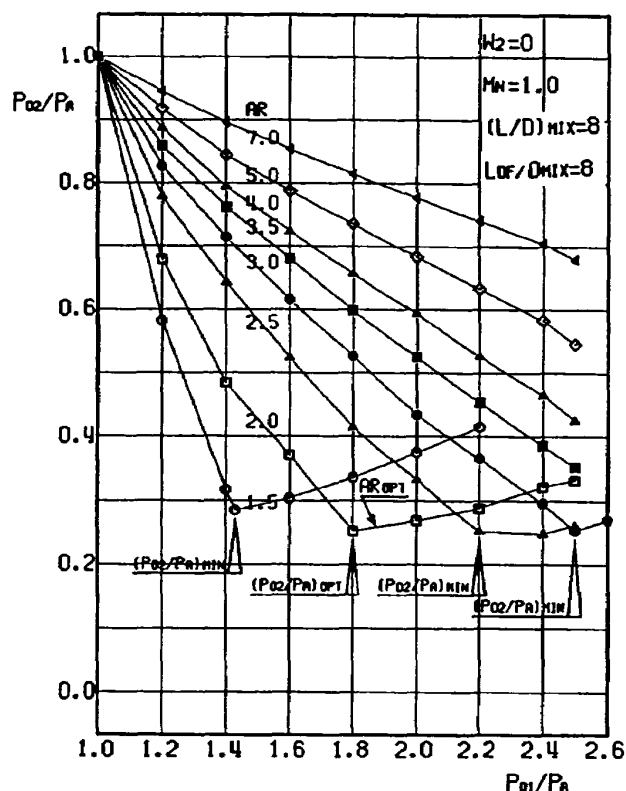


図 3.1 亜音速エゼクターの
二次側真空性能 (P_{02}/P_A)

示す。面積比, AR をパラメーターにとり, AR の影響について考察する。

3.1.1 最小二次側圧力点, と最適作動点について

図 3.1 において, $1.5 \leq AR \leq 3.0$, の範囲では, 一次流全圧比, P_{01}/P_A が増加すると, 二次側圧力比 P_{02}/P_A は, 次第に, 減少し, ある P_{01}/P_A 点で, 最低点, $(P_{02}/P_A)_{\text{MIN}}$ に達する。さらに, P_{01}/P_A 値が増加すると, P_{02}/P_A 値は, 上昇する。この $(P_{02}/P_A)_{\text{MIN}}$ に対応する P_{01}/P_A 値を $(P_{01}/P_A)_{\text{MIN}}$ と記する。この最小二次側圧力点 $[(P_{01}/P_A)_{\text{MIN}}, (P_{02}/P_A)_{\text{MIN}}]$ を MIN 点と呼ぶ。MIN 点は, それぞれの AR 値における, 最適作動点と考えられる。一方, AR 値が増加すると, 順次, $(P_{01}/P_A)_{\text{MIN}}$ 値は増加するが, $(P_{02}/P_A)_{\text{MIN}}$ 値は減少し, ある AR 値以降は, はぼ一定となる。すなわち, 図 3.1 においては, 以下のようなである。

$AR=1.5$, $(P_{01}/P_A)_{\text{MIN}}=1.43$, $(P_{02}/P_A)_{\text{MIN}}=0.29$ 。
 $AR=2.0$, $(P_{01}/P_A)_{\text{MIN}}=1.80$, $(P_{02}/P_A)_{\text{MIN}}=0.25$ 。

$AR=2.5$, $(P_{01}/P_A)_{\text{MIN}}=2.2$, $(P_{02}/P_A)_{\text{MIN}}=0.25$ 。
 $AR=3.0$, $(P_{01}/P_A)_{\text{MIN}}=2.5$, $(P_{02}/P_A)_{\text{MIN}}=0.25$ 。

図 3.1 においては, $AR=1.5$ での MIN 点の $(P_{02}/P_A)_{\text{MIN}}$ 値は, $AR=2.0$ の $(P_{02}/P_A)_{\text{MIN}}$ 値より高い値となっている。 AR 値をさらに減少させると, 上述のように, $(P_{02}/P_A)_{\text{MIN}}$ 値が, 順次, 増加すると考えられる。 AR 値が $3.5 \leq AR$ では, $(P_{01}/P_A)_{\text{MIN}}$ 値が, 実験可能な P_{01}/P_A 値よりも大きいために, MIN 点 $[(P_{01}/P_A)_{\text{MIN}}, (P_{02}/P_A)_{\text{MIN}}]$ が得られていない。一方, AR が, ある値以上になると (図 3.1 では $AR \geq 2.0$), AR 値が増加するに従って, それぞれの MIN 点における, $(P_{02}/P_A)_{\text{MIN}}$ 値は一定であるが, $(P_{01}/P_A)_{\text{MIN}}$ 値は, 増大する。図 3.1 において, $AR=2.0$ で, 最初に $(P_{02}/P_A)_{\text{MIN}}=0.25$ の最低圧力 (比) 値に達した。この $AR=2.0$ での, MIN 点 $[(P_{01}/P_A)_{\text{MIN}}, (P_{02}/P_A)_{\text{MIN}}]$ での $(P_{01}/P_A)_{\text{MIN}}$ 値は, $AR=2.0$ より大きい AR 値の $(P_{01}/P_A)_{\text{MIN}}$ 値と比較して, 最も低い値である。このように, 最小の一次流全圧比で, 二次側真空圧力比を最小にする AR が唯一存在する。この AR 値は, この亜音速エゼクターでの最適の作動条件といえる。この点を OPT 点と呼び, AR 値を AR_{OPT} と表し, 最適面積比と呼び, 対応する P_{01}/P_A , P_{02}/P_A 値を $(P_{01}/P_A)_{\text{OPT}}$, $(P_{02}/P_A)_{\text{OPT}}$ と表記する。

亜音速エゼクターでは, OPT 点は, AR 値を除く, エゼクター要素 (混合管長比, ディフューザー構造, ノズル形状などのエゼクター性能に影響を与える構造因子) が一定の場合, 唯一定まる。しかしエゼクター要素を変化させればそれに対応して新たに AR_{OPT} 点が唯一定まる (3.1.4。3.1.5 参照)。しかし, これらの要素を最適にすれば, OPT 点は, 亜音速エゼクターの, 要素形状によらない, 唯一の最適作動点として, $AR=AR_{\text{OPT}}$ において決定される。すなわち, それぞれの AR 値における最適作動点としての, MIN 点 $[(P_{01}/P_A)_{\text{MIN}}, (P_{02}/P_A)_{\text{MIN}}]$ と最適面積比 AR_{OPT} に対応する最適作動点としての, OPT 点 $[(P_{01}/P_A)_{\text{OPT}}, (P_{02}/P_A)_{\text{OPT}}]$ が存在する。図 3.1 より, 本実験の OPT 点は以下の値となる。

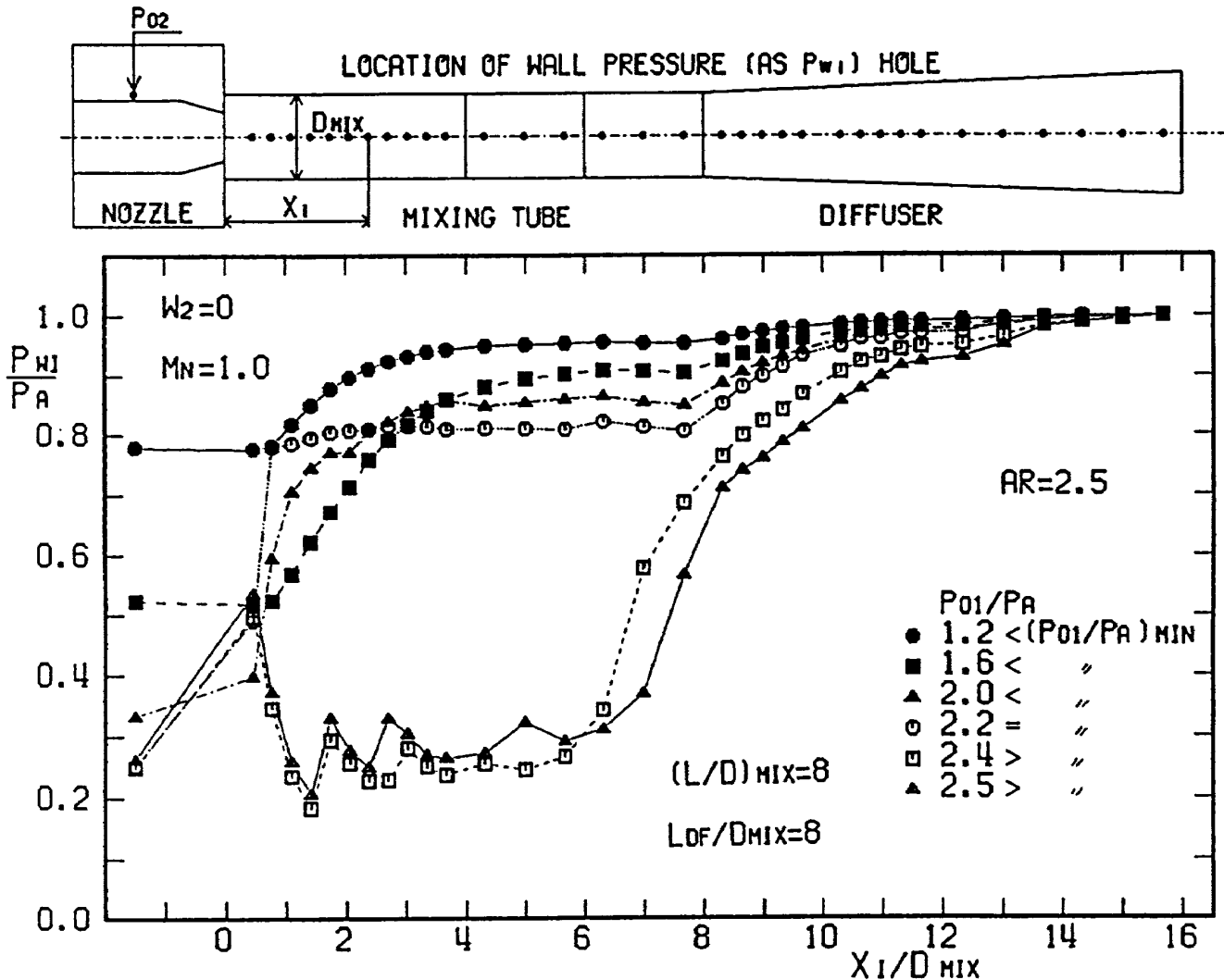


図 3.2 混合管，ディフューザー壁面（静圧）圧力分布

$AR_{OPT} = 2.0$ ，（最適面積比）

$(P_{01}/P_A)_{OPT} = 1.8$

$(P_{02}/P_A)_{OPT} = 0.25$ 。

3.1.2 混合管，ディフューザー壁面圧力分布

図 3.2 に， $AR = 2.5$ における，混合管，ディフューザーの壁面圧力（ P_{wi} ）分布を示す。 P_A との比を取り，無次元化して示す。図 3.1 の， $AR = 2.5$ における真空特性（ P_{01}/P_A VS P_{02}/P_A ）と対応できるように，一次流全圧比， P_{01}/P_A をパラメーターにとっている。図中の P_{wi}/P_A 点は，図の上に示す。静圧孔位置と対応している。なお， X_i/D_{mix} 軸の 0 点より左側の点（ $X_i/D_{mix} = -1.5$ ）は，二次側貯気槽壁面圧力， P_{02}/P_A 値を示している。図 3.2 において， $AR = 2.5$ における MIN 点の $(P_{01}/P_A)_{MIN}$ 値（ $(P_{01}/P_A)_{MIN} = 2.2$ ）に対して，パラメーターの P_{01}/P_A 値が，

$P_{01}/P_A < (P_{01}/P_A)_{MIN}$ の場合（図 3.2 では， $P_{01}/P_A = 1.2, 1.6, 2.0$ ），一次ノズル出口直後の壁面静圧比， P_{wi}/P_A は P_{02}/P_A に近い値を示し，次いで，混合管中間点附近の， $X_i/D_{mix} = 4$ ，まで P_{wi}/P_A は放物線状の増加を示している。

混合管入口近傍での， P_{wi}/P_A の立上がり（勾配）は， P_{01}/P_A 値が増加するに伴って，順次，急となっており， P_{01}/P_A 値の増大とともに，一次流の混合管内での拡がり角の増大を示している。次いで，ディフューザー出口まで， P_{wi}/P_A 値はなだらかな上昇を示し，ディフューザー終端で， $P_{wi} = P_A$ となる分布形状を，共通して，示している。一方， P_{01}/P_A 値が， $(P_{01}/P_A)_{MIN} < P_{01}/P_A$ の場合は（図 3.2 では， $P_{01}/P_A = 2.4, 2.5$ ）， $P_{01}/P_A < (P_{01}/P_A)_{MIN}$ の場合と異なり， P_{wi}/P_A 値はノズル出口直後で，急激な上昇を示すが，その後，再び減少し，ノコギリ目状の波形で，低い

P_{wi}/P_A 値のまま、上下して推移し、次いで、混合管終端部近傍で急速な P_{wi}/P_A 値の上昇を示す。

この P_{wi}/P_A の分布形状は、 M_1 (ノズル出口マッハ数) = 1.0 に達した、一次噴流が、混合管内で膨張、圧縮の過程を繰返し、最終的には、混合管端部近傍で疑似衝撃波によって減速し、急激な圧力上昇の後に、ディフューザー内でさらに減速する。二重チョーク現象を示していると考えられる。文献 1、文献 2 にも同様な現象が報告されている。図 3.2 において、 $P_{01}/P_A = 2.2$ は $AR = 2.5$ の MIN 点に対応する $(P_{01}/P_A)_{MIN}$ 値である。

$P_{01}/P_A = 2.2$ に対応する P_{wi}/P_A 分布をみると、混合管入口に最も近い、 P_{wi}/P_A 値の、急激な上昇がみられ、以後、混合管内での P_{wi}/P_A 値はほぼフラットに推移しており、特徴的な分布を示している。これは、ノズル出口で膨張した直後

に、垂直衝撃波によって圧縮され、完全に亜音速となった一次流が、断面積一定の混合管内を減速せずに通過し、ディフューザー内の拡大通路で出口大気圧まで減速するものと理解される。超音速エゼクター (3.2.1 参照) の MIN 点における、一次流の流動過程とは異なる形態を示しており、亜音速エゼクターの MIN 点特有の混合管壁面圧力分布の形状と考えられる。

図 3.3 は、一次流圧力比を $P_{01}/P_A = 2.0$ (一定) として、面積比 (AR) パラメーターにとった場合を示す。それぞれの AR 値での MIN 点における一次流全圧比、 $(P_{01}/P_A)_{MIN}$ を示すと、

$AR = 2.0$, $(P_{01}/P_A)_{MIN} = 1.8$

$AR = 3.0$, $(P_{01}/P_A)_{MIN} = 2.5$

$AR = 3.5$, $(P_{01}/P_A)_{MIN} > 2.5$

$AR = 4.0$, $(P_{01}/P_A)_{MIN} > 2.5$

$AR = 7.0$, $(P_{01}/P_A)_{MIN} > 2.5$ 。

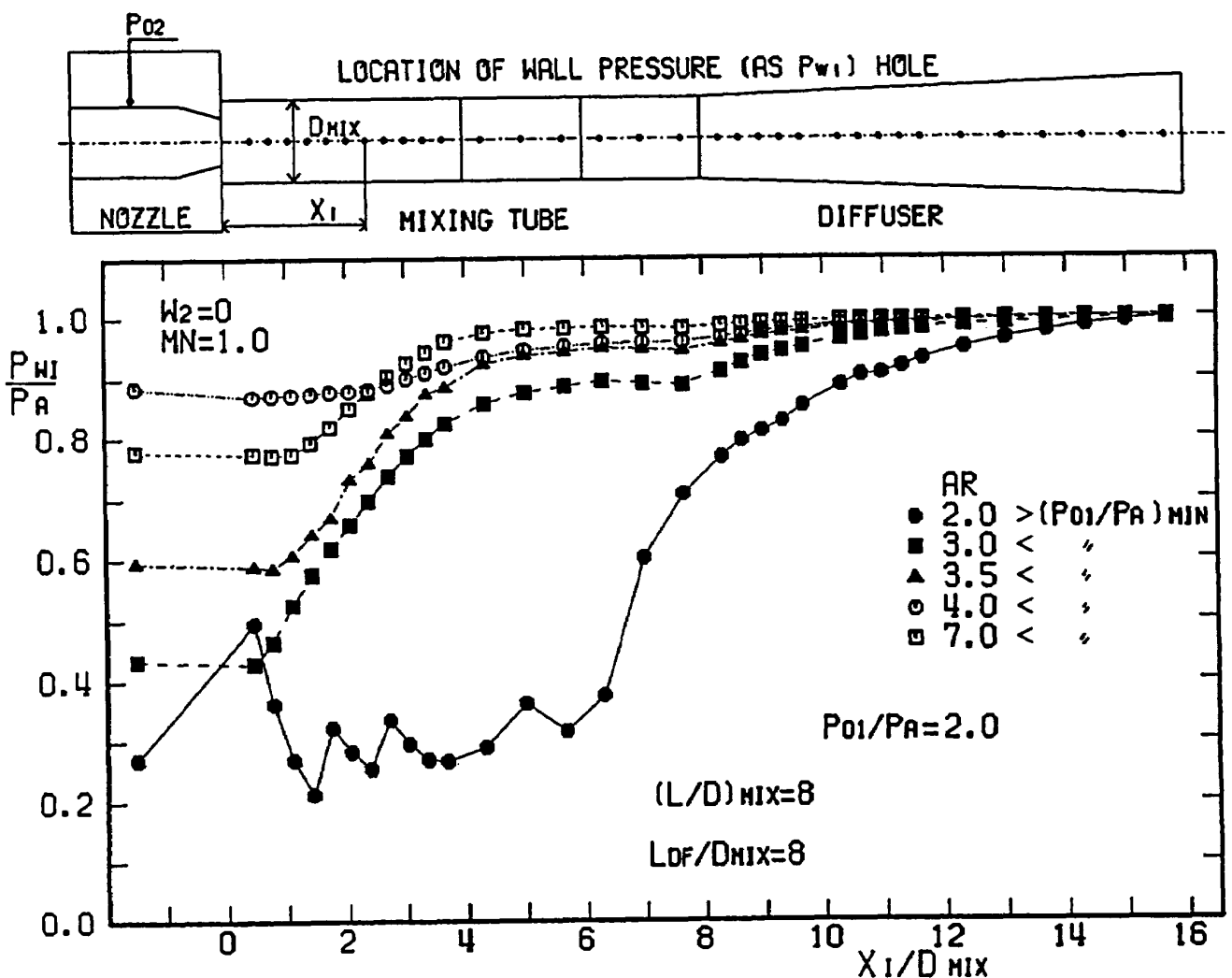


図 3.3 混合管、ディフューザー壁面 (静圧) 圧力分布

となり、 $AR = 2.0$ の $(P_{01}/P_A)_{\min}$ 値のみが、指標の $P_{01}/P_A = 2.0$ に対して、 $2.0 > (P_{01}/P_A)_{\min}$ となっている。 $AR = 3.0, 3.5, 4.0, 7.0$ では、それぞれの $(P_{01}/P_A)_{\min}$ 値は、 2.0 より大である。この $AR = 2.0$ (図 3.3, ● 点) の P_{w1}/P_A 分布の形状は、図 3.2 での $P_{01}/P_A > (P_{01}/P_A)_{\min}$ の条件をみたす P_{01}/P_A 値である、 $P_{01}/P_A = 2.4, 2.5$ の P_{w1}/P_A 分布と類似な形状を示している。一方、図 3.3 の P_{01}/P_A において、 $(P_{01}/P_A)_{\min}$ 値が、 2.0 を越える AR 値は、 $AR \geq 3.0$ である。図 3.3 での $AR \geq 3.0$ に対応する P_{w1}/P_A 分布の形状は、図 3.2 の、 $P_{01}/P_A \leq 2.0$ の場合の P_{w1}/P_A 分布と類似な形状を示しており、 $(P_{01}/P_A)_{\min}$ を基準にして比較すると、図 3.2 と 3.3 はよい対応をみせている。すなわち、 $(P_{01}/P_A)_{\min}$ を基準にすると、 P_{w1}/P_A の分布形状が 3 種のパターンに分類され、その物理的意味が明確になることがわかる。

3.1.3 面積比と二次側圧力比との関係

図 3.4 に、 P_{01}/P_A をパラメーターにとった、

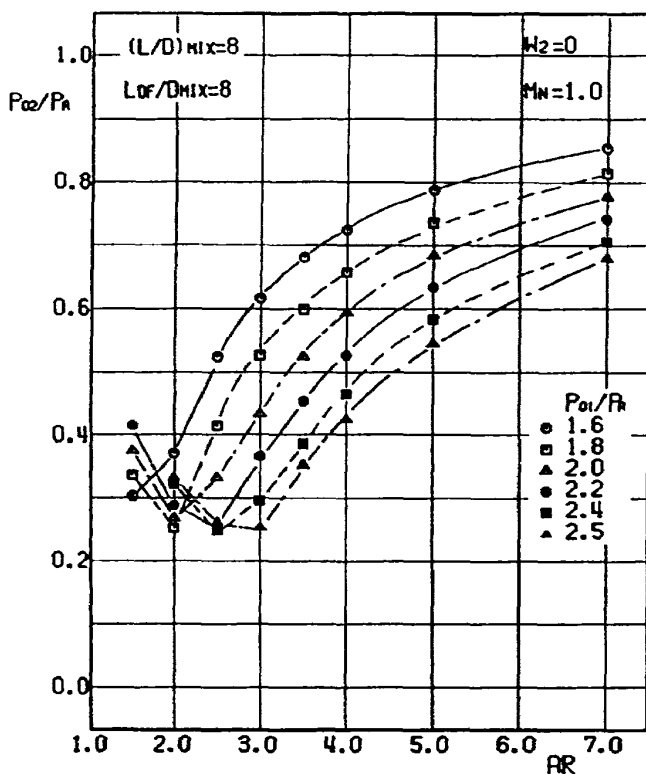


図 3.4 断面積比 (AR) と二次側真空圧 (P_{02}/P_A) との関係

面積比、 AR と二次側圧力比、 P_{02}/P_A との関係を示す。

3.1.1 において述べたように、二次側圧力比の最低値は、 $(P_{02}/P_A)_{\text{OPT}} = 0.25$ である。一方、 MIN 点として、 $(P_{02}/P_A)_{\min} = 0.25$ が実現可能な AR 値は、実験可能な P_{01}/P_A 値が、 $P_{01}/P_A \leq 2.6$ であるので、 $2.0 \leq AR \leq 3.0$ の範囲に限定される。図 3.4 では、このことが明確に示されている。使用可能な一次側全圧比、 P_{01}/P_A と必要とする二次側圧力比、 P_{02}/P_A が決れば、最適の AR 値が、本図より決定できる。

3.1.4 二次側真空性能に及ぼす混合管長比の影響

図 4.1 ~ 4.9 に、エゼクターの二次側真空性能に及ぼす混合管長比、 $(L/D)_{\text{MIX}}$ の影響について示す。なお、図 4.1 ~ 4.9 では、ディフューザー長 L_{DF} は、 $L_{DF}/D_{\text{MIX}} = 8$ である。

(1) P_{01}/P_A 対 P_{02}/P_A の関係に及ぼす $(L/D)_{\text{MIX}}$ の影響 (図 4.1 ~ 4.5) について。

図 4.1 は、 $AR = 2.0$ の場合を示しており、

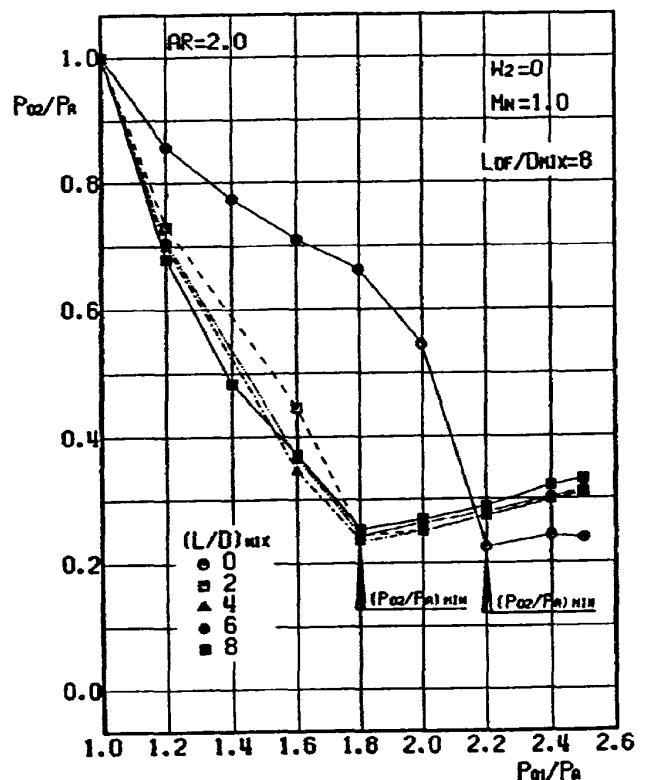


図 4.1 エゼクターの二次側真空性能に及ぼす混合管長比の影響 ($AR = 2.0$)

$2 \leq (L/D)_{\text{MIX}} \leq 8$ の範囲では、(3.1.1) で述べた、 $(P_{01}/P_A)_{\text{MIN}}$ は一定となっており、それぞれの $(L/D)_{\text{MIX}}$ における $(P_{02}/P_A)_{\text{MIN}}$ 値も大きな変動はない。しかし、 $(L/D)_{\text{MIX}} = 0$ の場合は、図 4.1 に示すような、特徴的な変化を示している。 $(L/D)_{\text{MIX}} = 0$ における、MIN 点、 $(P_{01}/P_A)_{\text{MIN}} = 2.2$ 、に対して、 $P_{01}/P_A < (P_{01}/P_A)_{\text{MIN}}$ では、二次側真空圧、 P_{02}/P_A は、混合管長比が $(L/D)_{\text{MIX}} \geq 2$ と比較して、大きく上昇しており、真空性能の大きな低下がみられる。ノズル出口直後の混合管形状が零二次流エゼクターの真空性能に強く影響することを示している。しかし、MIN 点での性能を、 $(L/D)_{\text{MIX}} = 4$ の場合と比較すると次のようになる。

$(L/D)_{\text{MIX}} = 4$, $(P_{01}/P_A)_{\text{MIN}} = 1.8$, $(P_{02}/P_A)_{\text{MIN}} = 0.23$ 。

$(L/D)_{\text{MIX}} = 0$, $(P_{01}/P_A)_{\text{MIN}} = 2.2$, $(P_{02}/P_A)_{\text{MIN}} = 0.22$ 。

すなわち、MIN 点では、 $(L/D)_{\text{MIX}} = 0$ の $(P_{01}/P_A)_{\text{MIN}}$ 値は増加するが、 $(P_{02}/P_A)_{\text{MIN}}$ 値

は、 $(L/D)_{\text{MIX}} = 0$ の場合と、 $(L/D)_{\text{MIX}} = 4$ の場合とを比較して、ほぼ等しいか、わずかに低く、真空性能が変わらないことが認められる。

管路中の噴流の拡散の問題として、興味ある現象である。すなわち、ノズルを出た一次流が直管部のない、拡大流路中に流入する場合の拡散の特徴を示している。

図 4.2 は、 $AR = 2.5$ の場合であるが、 AR 値の増大に伴って、直管部の効果がより強調されて現れている。図 4.1 と同様に、 $(L/D)_{\text{MIX}} = 0$ の $(P_{02}/P_A)_{\text{MIX}}$ 値は、混合管がある場合よりも低い値を示しており、 $(P_{01}/P_A)_{\text{MIN}}$ 点の移動幅も小さい。

図 4.3 は、 $AR = 3.5$ の場合である。 $(P_{02}/P_A)_{\text{MIN}}$ 点は得られていないが (P_{01}/P_A) が不足)、 $P_{01}/P_A = 2.5$, $(L/D)_{\text{MIX}} = 6, 8$ の点では、まだかなり高い真空値 (P_{02}/P_A) を示している。 $AR = 3.5$ では、混合管長比の影響が判然と示されており、 $6 \leq (L/D)_{\text{MIX}} \leq 8$ が適用値とみられる。

図 4.4 は、 $AR = 5$ であるが、 $4 \leq (L/D)_{\text{MIX}}$

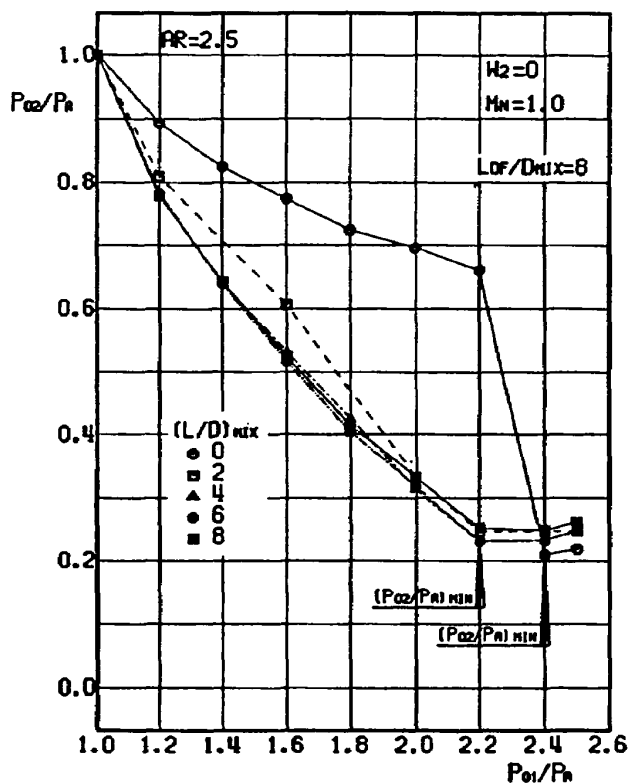


図 4.2 エゼクターの二次側真空性能に及ぼす混合管長比の影響 ($AR=2.5$)

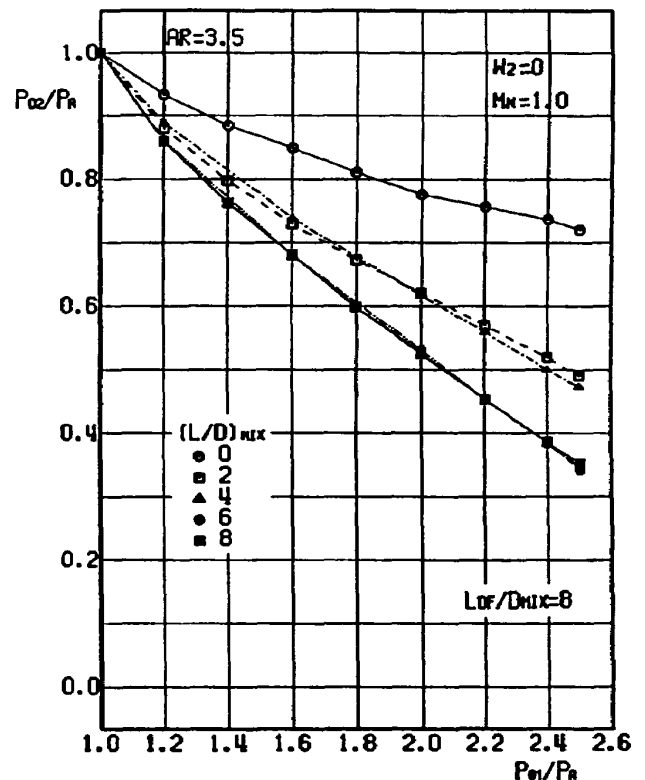


図 4.3 エゼクターの二次側真空性能に及ぼす混合管長比の影響 ($AR=3.5$)

≤ 8 , では $AR=2.0, 2.5$ の場合と同様に, $(L/D)_{MIX}$ の影響がほとんどない。

図 4.5 は, $AR=7$ であり, $(L/D)_{MIX}=2.0$ で, $(L/D)_{MIX}$ の影響が現れている。

結論としては, P_{01}/P_A 値に余裕があり, 混合管がない場合の MIN 点 $[(P_{01}/P_A)_{MIN}, (P_{02}/P_A)_{MIN}]$ での作動が可能な場合は, 混合管(直管部)を用いずに, ディフューザー部のみの場合でも真空度は変らない。しかし, $(L/D)_{MIX}=0$ の場合には, 騒音が大きく, また, $P_{01}/P_A < (P_{01}/P_A)_{MIN}$ で作動する場合を考えると, $6 \leq (L/D)_{MIX} \leq 8$, の直管形混合管を使用するのが適当と考えられる。

(2) P_{01}/P_A が一定の場合の $(L/D)_{MIX}$ の影響

図 4.6 ~ 4.9 では, P_{01}/P_A を指標として, 二次側真空圧に及ぼす, $(L/D)_{MIX}$ の影響を示す。指標の P_{01}/P_A は, 必ずしも, パラメーターに示す, それぞれの AR 値での MIN 点, $(P_{01}/P_A)_{MIN}$ ではないが, P_{01}/P_A が一定の場合の, MIN 点以外での $(L/D)_{MIX}$ の影響と AR 値との関係を示している。

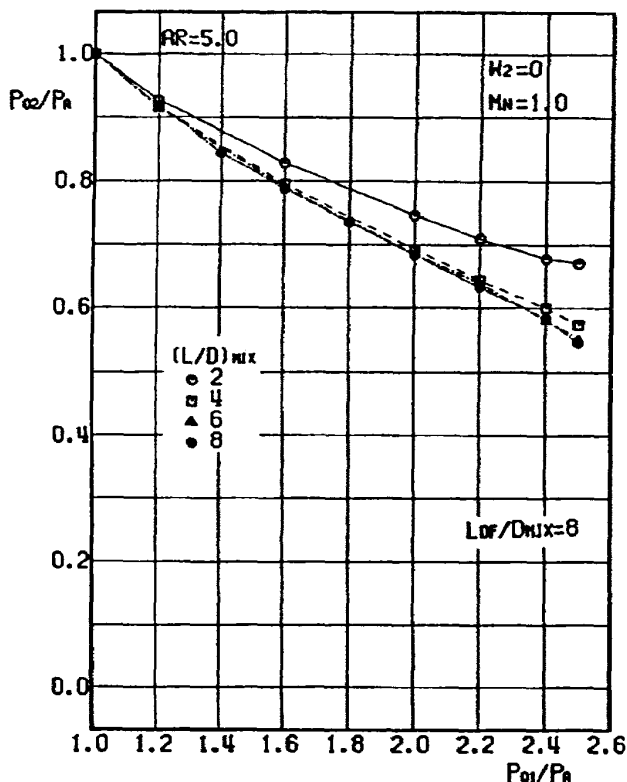


図 4.4 エゼクターの二次側真空性能に及ぼす混合管長比の影響 ($AR=5.0$)

図 4.6 ~ 4.9 から, $2.0 \leq AR \leq 7.0$, の範囲で, $(L/D)_{MIX}$ 値として, $6 \leq (L/D)_{MIX} \leq 8$, が適当と認められる。

3.1.5 二次側真空性能に及ぼすディフューザーの影響

図 5.1, 図 5.2 に真空性能に及ぼすディフューザーの影響について示す。図 5.1 では, P_{01}/P_A 対 P_{02}/P_A の関係 (零二次流エゼクターの真空特性) に及ぼす, ディフューザーの効果についてみるために, ディフューザーのある場合とディフューザーのない場合について比較して示した。さらに, AR 値を指標として ($AR=2.3, 7$), AR 値の変化によるディフューザーの効果について示した。

図 5.1 において, MIN 点, $[(P_{01}/P_A)_{MIN}, (P_{02}/P_A)_{MIN}]$ が存在し, 高い真空度を示す, $AR=2.0, 3.0$ の場合では, ディフューザーの影響が大きく現れており, $AR=2.0$ では, ディフューザーなしの場合, 次に示すように, $(P_{01}/P_A)_{MIN}$ 点が大きく高圧力比方向に移動し, $(P_{02}/P_A)_{MIN}$ 値も上昇している。

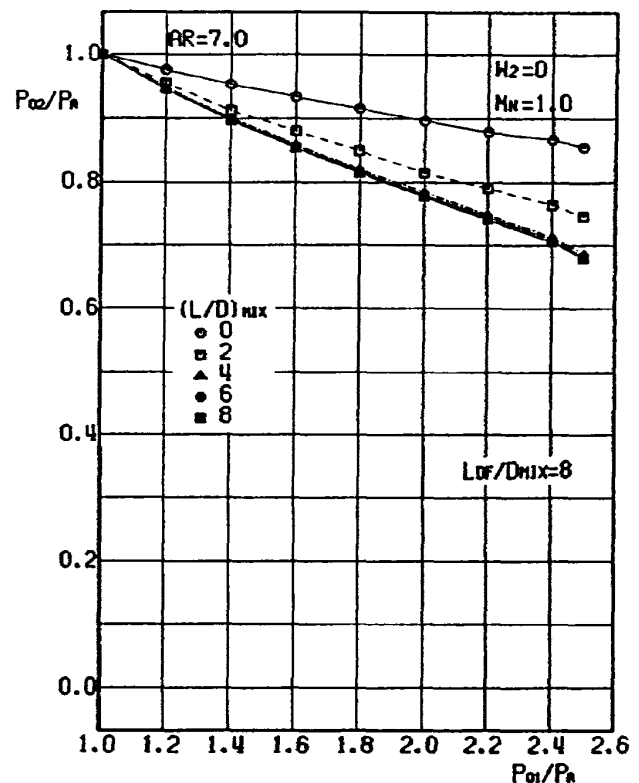


図 4.5 エゼクターの二次側真空性能に及ぼす混合管長比の影響 ($AR=7.0$)

$(P_{01}/P_A)_{\text{MIN}} = 1.8$, $(P_{02}/P_A)_{\text{MIN}} = 0.25$
(WITH DIFFUSER)

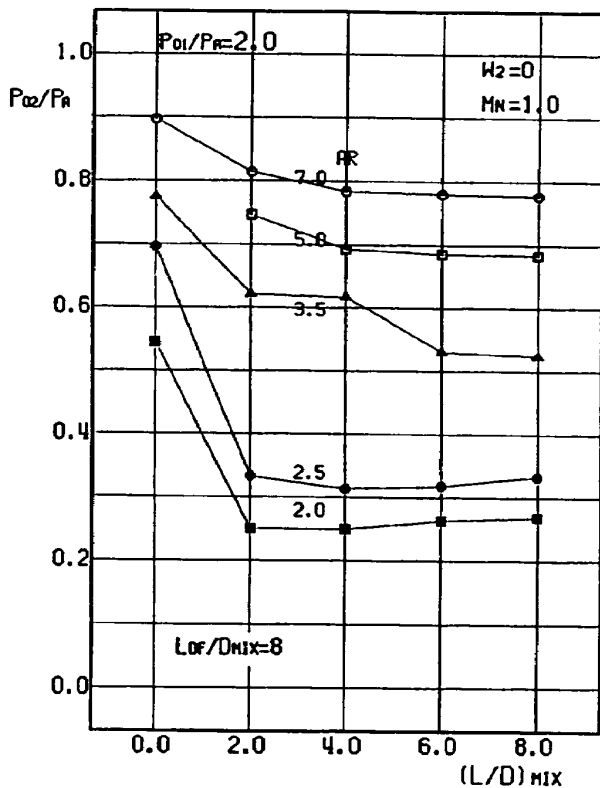


図 4.6 混合管長比と二次側真空圧との関係
($P_{01}/P_A = 2.0$)

$(P_{01}/P_A)_{\text{MIN}} = 2.3$, $(P_{02}/P_A)_{\text{MIN}} = 0.31$
(WITHOUT DIFFUSER)

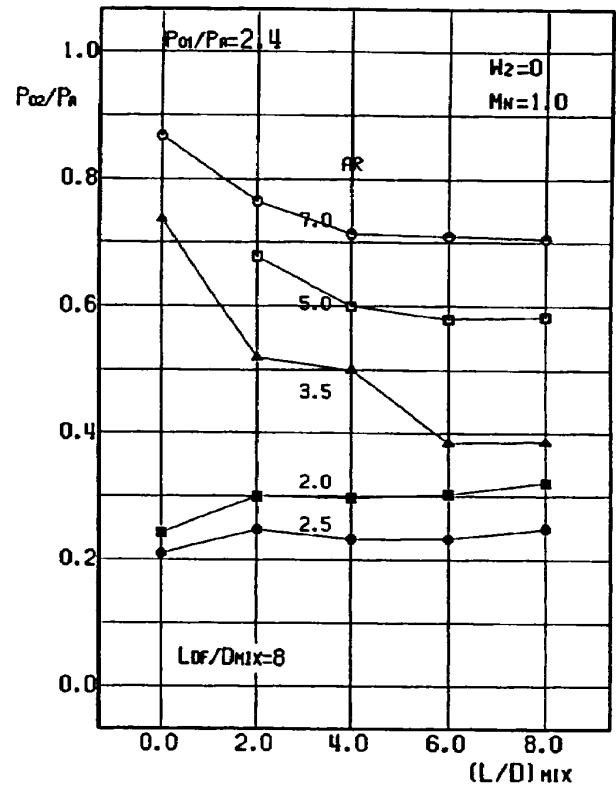


図 4.8 混合管長比と二次側真空圧との関係
($P_{01}/P_A = 2.4$)

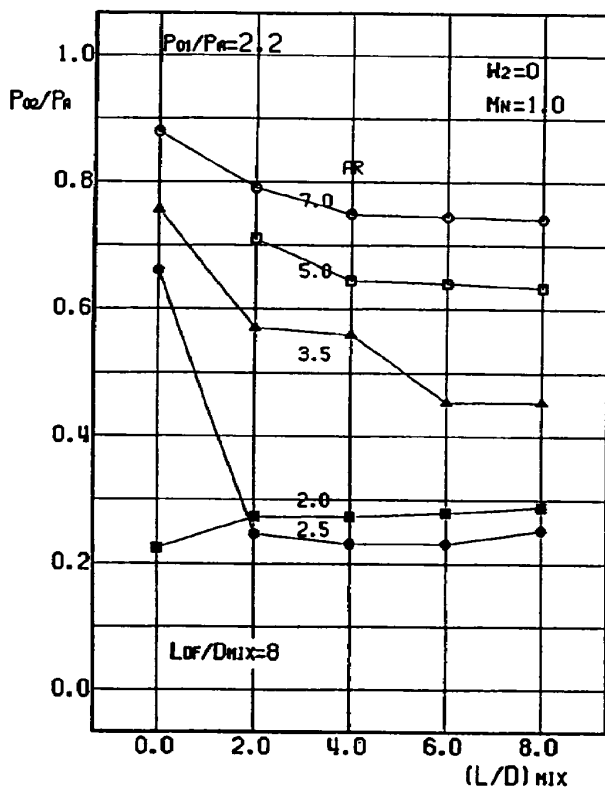


図 4.7 混合管長比と二次側真空圧との関係
($P_{01}/P_A = 2.2$)

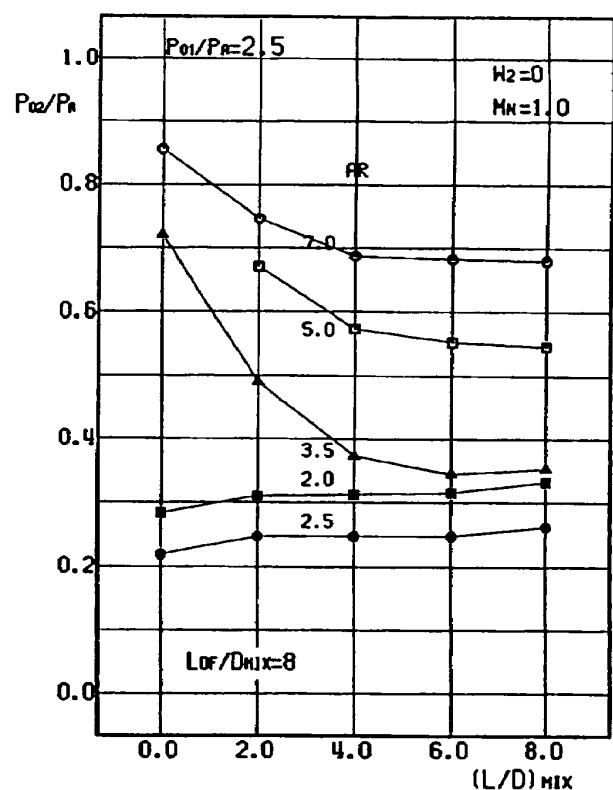


図 4.9 混合管長比と二次側真空圧との関係
($P_{01}/P_A = 2.5$)

一方, MIN 点の現れていない, 低真空性能を示す, $AR = 7$ では, ディフューザーの影響は小

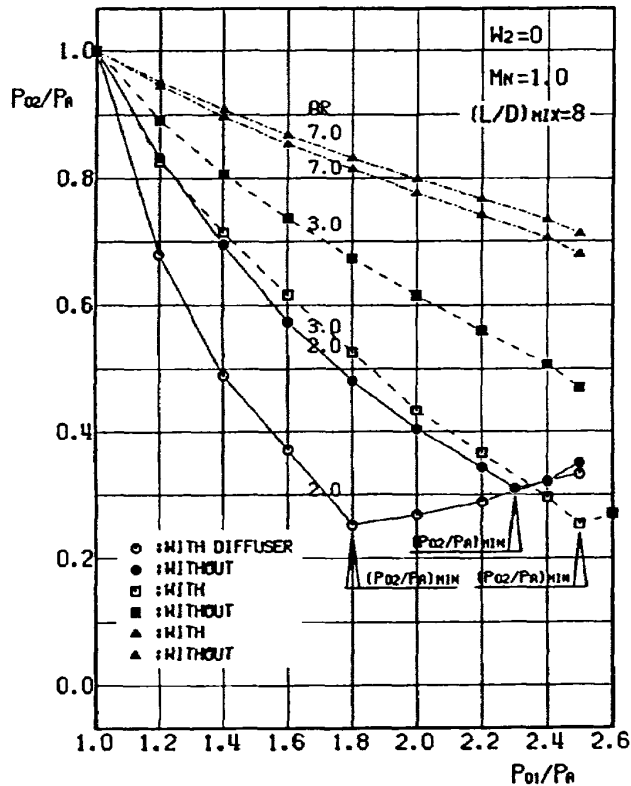


図 5.1 二次側真空性能に及ぼす
ディフューザーの影響

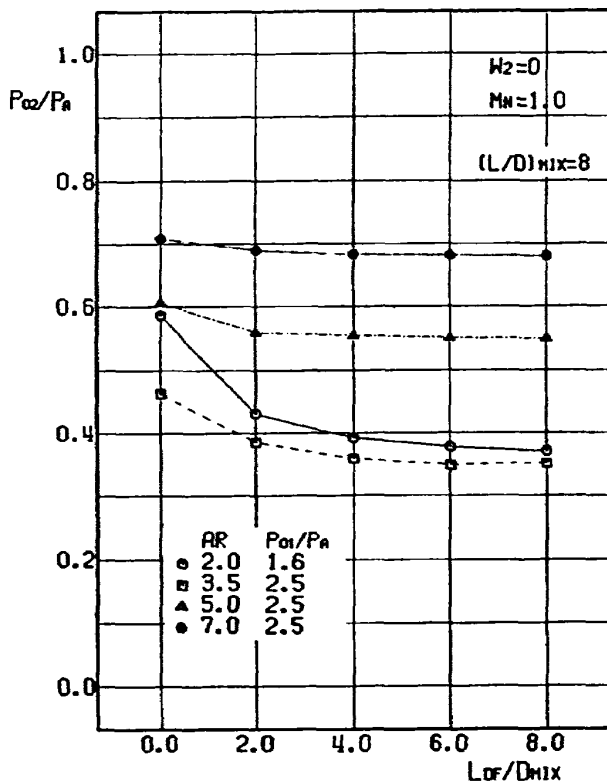


図 5.2 二次側真空性能に及ぼす
ディフューザーの影響

さい。

図 5.2 は, 指標とする AR のそれぞれで, P_{01}/P_A 値を一定として, ディフューザー長比, L_{DF}/D_{MIX} と二次側真空圧との関係をしめす。 $AR = 2.0, 3.5$ に注意すると, $6 \leq L_{DF}/D_{MIX} \leq 8$ が, ディフューザー長比として, 適用値と考えられる。すでに述べたように, 本実験では, 混合管長比, ディフューザー長比として, $(L/D)_{MIX} = 8$, $L_{DF}/D_{MIX} = 8$, を採用した。なお図 5.1, 5.2 では, $(L/D)_{MIX} = 8$ である。

3.2 超音速エゼクターの零二次流性能について

ノズル・マッハ数, $M_N = 1.3, 1.6, 1.8, 2.0$ の超音速エゼクターの実験を節 2.1 の表 3 に示す AR 値について行った。超音速エゼクターでの混合管長比, $(L/D)_{MIX}$, とディフューザー長比, L_{DF}/D_{MIX} は, 一定で, $(L/D)_{MIX} = 8$, $L_{DF} = 8$ である。

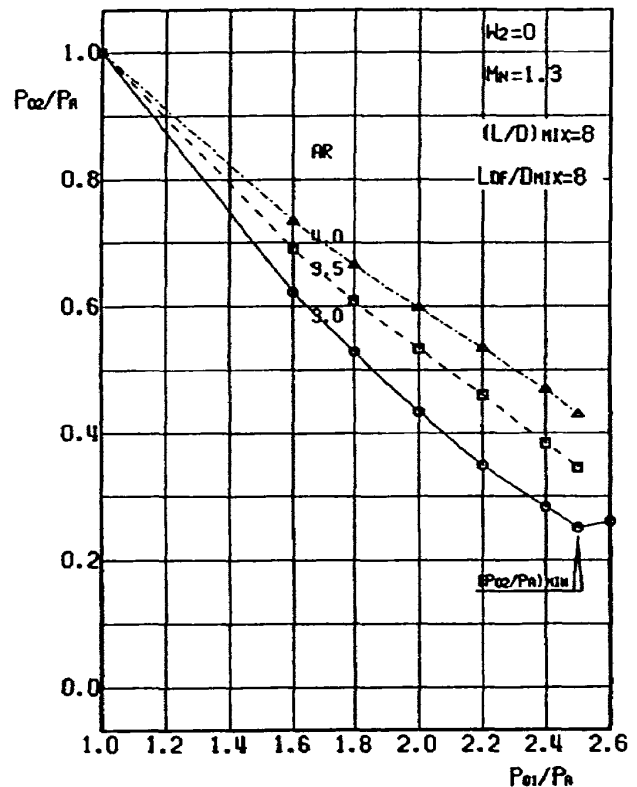


図 6.1 超音速エゼクターの二次側真空性能
($M_N = 1.3$)

3.2.1 超音速エゼクターの二次側真空特性

図 6.1 は、 $M_N = 1.3$ における、 P_{01}/P_A 対 P_{02}

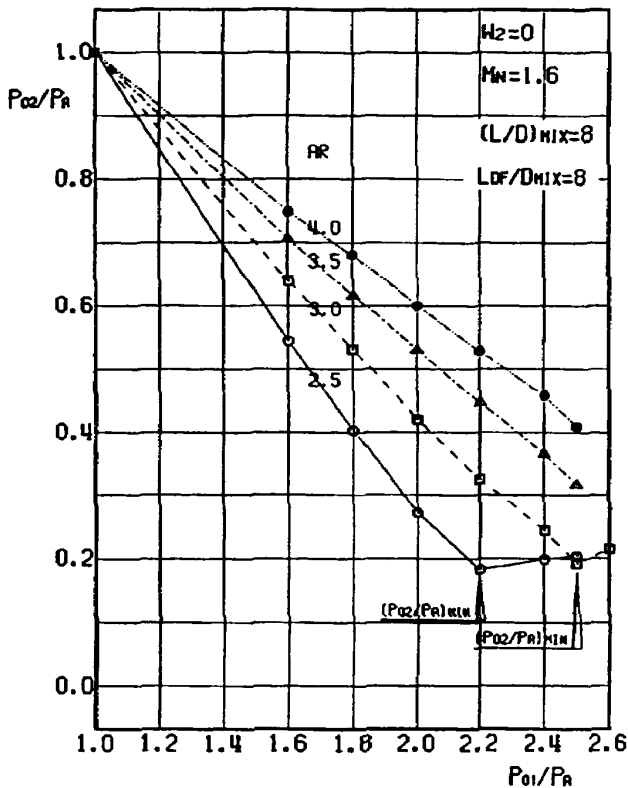


図 6.2 超音速エゼクターの二次側真空性能
($M_N = 1.6$)

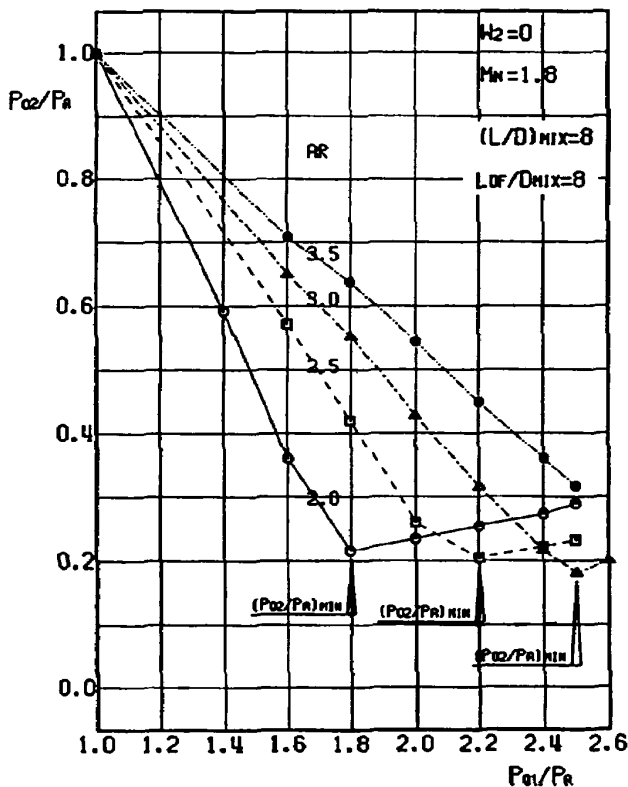


図 6.3 超音速エゼクターの二次側真空性能
($M_N = 1.8$)

$/P_A$ の関係 (二次側真空特性) について示す。図示の $AR = 3.5, 4.0$ において、MIN 点は得られていない。 $M_N = 1.0$ での、対応する AR 値における性能 (P_{01}/P_A VS P_{02}/P_A) と比較すると、ほぼ同一であり、図示の AR 値の全域で、 M_N 値の影響は認められない。図 6.2 は、 $M_N = 1.6$ における、真空特性を示しており、図示のように、 $AR = 2.5, 3.0$ において、MIN 点が得られている。 $M_N = 1.0$ の場合と比較すると、以下のように、 $(P_{01}/P_A)_{MIN}$ 値は同一であるが、 $M_N = 1.6$ の場合の MIN 点 (近傍を含めて) での真空性能が $M_N = 1.0$ よりも良好である。 $M_N = 1.8$ (図 6.3)、 2.0 (図 6.4) についても同様である。

$AR = 2.0$

$M_N = 1.0$; $(P_{01}/P_A)_{MIN} = 1.8$, $(P_{02}/P_A)_{MIN} = 0.25$ 。

$M_N = 1.8$; $(P_{01}/P_A)_{MIN} = 1.8$, $(P_{02}/P_A)_{MIN} = 0.22$ 。

$AR = 2.5$

$M_N = 1.0$; $(P_{01}/P_A)_{MIN} = 2.2$, $(P_{02}/P_A)_{MIN} = 0.25$ 。

$M_N = 1.6$; $(P_{01}/P_A)_{MIN} = 2.2$, $(P_{02}/P_A)_{MIN} = 0.18$ 。

$M_N = 1.8$; $(P_{01}/P_A)_{MIN} = 2.2$, $(P_{02}/P_A)_{MIN} = 0.21$ 。

$M_N = 2.0$; $(P_{01}/P_A)_{MIN} = 2.2$, $(P_{02}/P_A)_{MIN} = 0.21$ 。

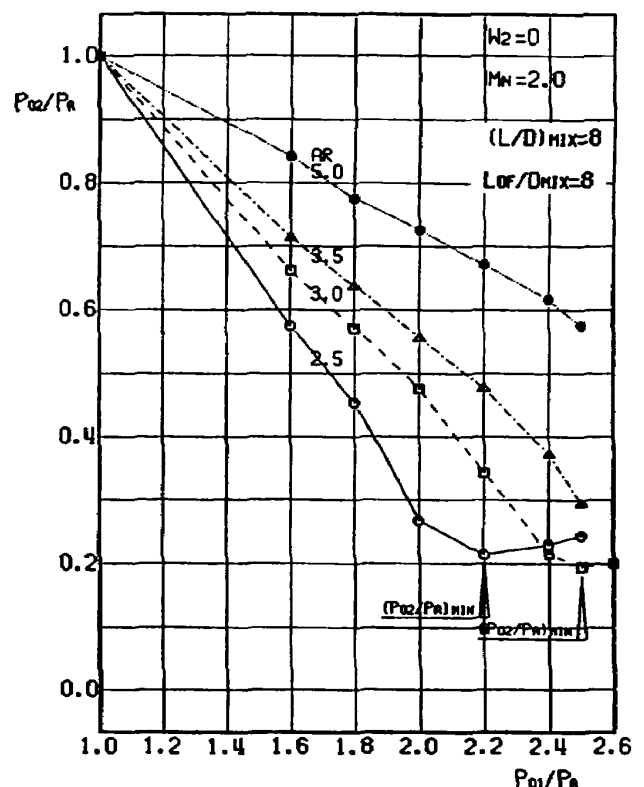


図 6.4 超音速エゼクターの二次側真空性能
($M_N = 2.0$)

AR=3.0

$M_N=1.0$; $(P_{01}/P_A)_{\text{MIN}}=2.5$, $(P_{02}/P_A)_{\text{MIN}}=0.25$ 。

$M_N=1.3$; $(P_{01}/P_A)_{\text{MIN}}=2.5$, $(P_{02}/P_A)_{\text{MIN}}=0.25$ 。

$M_N=1.6$; $(P_{01}/P_A)_{\text{MIN}}=2.5$, $(P_{02}/P_A)_{\text{MIN}}=0.19$ 。

$M_N=1.8$; $(P_{01}/P_A)_{\text{MIN}}=2.5$, $(P_{02}/P_A)_{\text{MIN}}=0.18$ 。

$M_N=2.0$; $(P_{01}/P_A)_{\text{MIN}}=2.5$, $(P_{02}/P_A)_{\text{MIN}}=0.19$ 。

AR=2.5, 3.0 において, MIN点近傍でのみ, $M_N=1.0$ と $M_N \geq 1.6$ との P_{02}/P_A 値における, 有意の差が認められる。

AR=3.5, 4.0 の場合のように, MIN点より, はなれた P_{01}/P_A 点では, その差がほとんどない。

要約すると, 以下の結果が得られた。

(1) $M_N=1.0$ における, 各 AR 値に対応する, MIN点は, $M_N > 1.0$ においても MIN点である。

(2) MIN点に対応する $(P_{01}/P_A)_{\text{MIN}}$ 値近傍で, $M_N=1.0$ と比較して, $M_N=1.6, 1.8, 2.0$ では, 二次側真空性能, $(P_{02}/P_A)_{\text{MIN}}$ が向上した。

(3) MIN点における, $(P_{01}/P_A)_{\text{MIN}}$ 値は, AR 値のみで決定され, M_N 値は関係しない。

図 7.1 ~ 7.3 に, 二次側真空性能に及ぼす一次

ノズル・マッハ数の影響を示す。

図 7.1 は, AR=2.5 の場合を示す。 $M_N=1.0, 1.6, 1.8, 2.0$, において, MIN点の $(P_{01}/P_A)_{\text{MIN}}$ 値はすべて, $(P_{01}/P_A)_{\text{MIN}}=2.2$ であり, 先に述べたように, MIN点の $(P_{01}/P_A)_{\text{MIN}}$ 値が M_N 値の影響を受けないことを示している。

また, 二次側圧力比 (P_{02}/P_A) に及ぼす M_N 値の影響は, MIN点近傍で大きく, $M_N \geq 1.6$ ではやや高い真空性能を示す。MIN点より低い P_{01}/P_A 域では, $M_N=1.0$ の性能が良いことを示している。AR=3.5 (図 7.2), 4.0 (図 7.3) では, その P_{01}/P_A の作動域 ($1.6 \leq P_{01}/P_A \leq 2.6$) が, MIN点より低いために, $P_{01}/P_A \leq 2.2$ では, $M_N=1.0$ の真空特性が $M_N \geq 1.6$ の性能をわずかに上まっている。

亜音速エゼクターとの比較において, 零二次流超音速エゼクターを採用する場合には, その作動点が, AR 値で定まる最適作動点としての MIN点近傍で, 二次側真空性能の向上が期待できることがわかった。

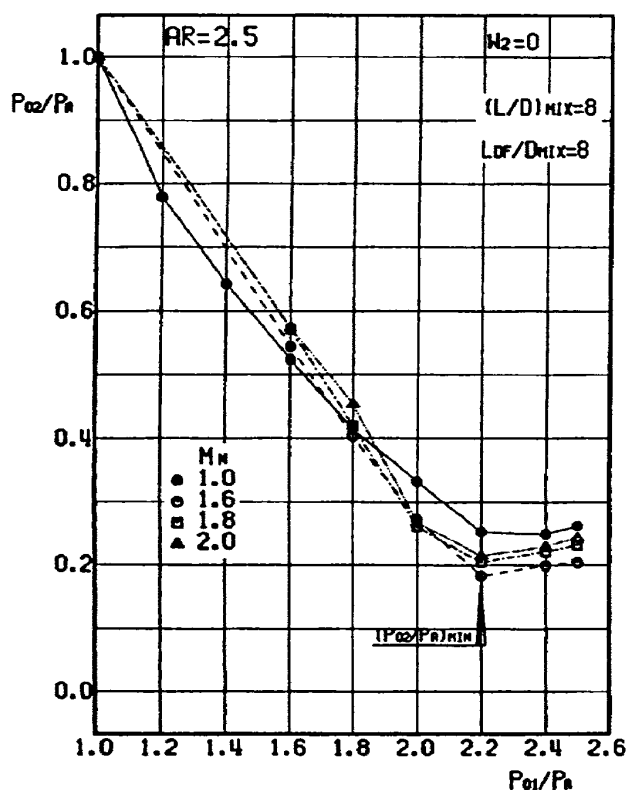


図 7.1 二次側真空性能に及ぼすノズルマッハ数の影響 (AR=2.5)

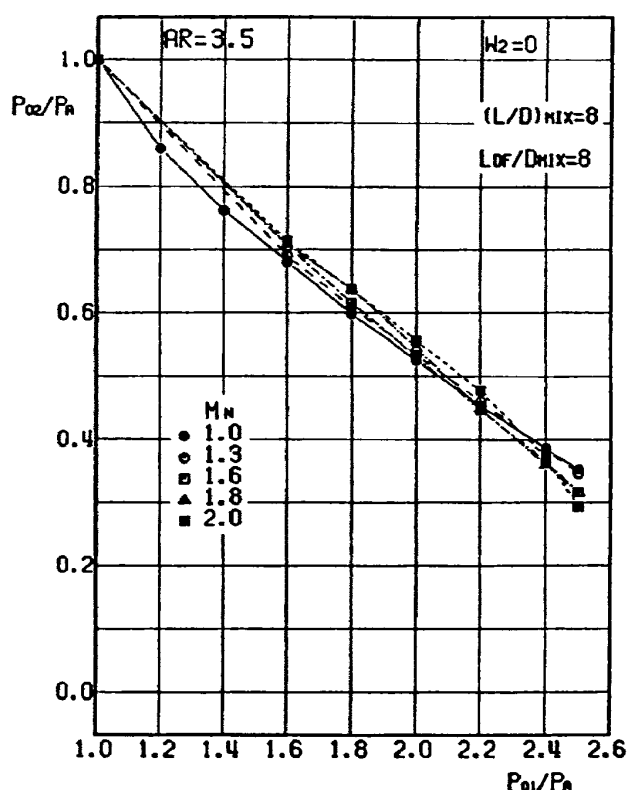


図 7.2 二次側真空性能に及ぼすノズルマッハ数の影響 (AR=3.5)

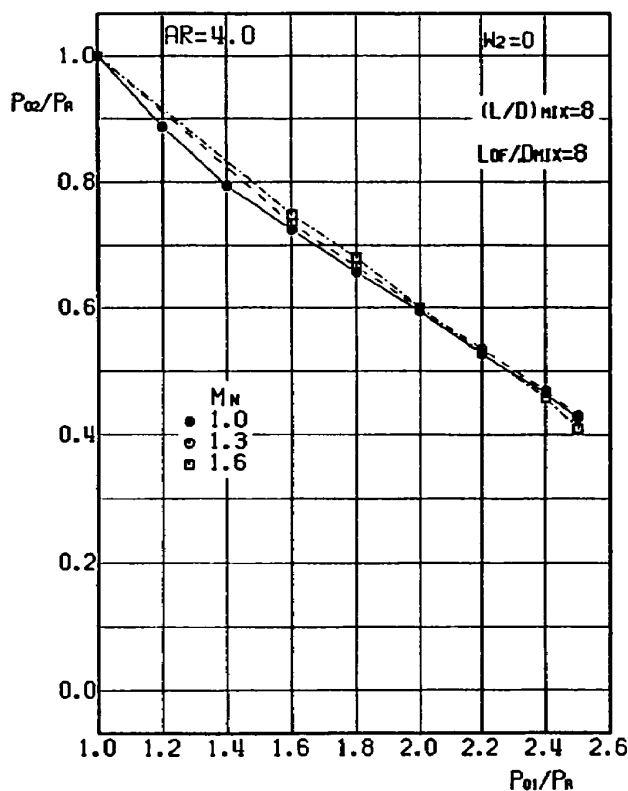


図 7.3 二次側真空性能に及ぼすノズルマッハ数の影響 (AR = 4.0)

4. む す び

超音速二次元(減速)翼列風洞用空気エゼクター実験の第一報として、零二次流性能について述べた。すなわち、一次ノズルスロート対混合管断面積比(面積比)、混合管長、ディフューザー長、一次ノズル・マッハ数などのエゼクター要素がエゼクターの真空特性に及ぼす影響について調べ、実験結果を系統的に提示し、検討、考察した。それらについて、要約して以下に示す。

(1) 零二次流における、基本的性能である、一次流全圧 (P_{01}/P_A) 対 二次側圧力比 (P_{02}/P_A) との関係において、それぞれの面積比 AR に対応して定まる、最小二次側圧力点(MIN)点が存在する。すなわち、AR をパラメーターとして、 P_{02}/P_A が極小値、 $(P_{02}/P_A)_{\text{MIN}}$ 、をとる P_{01}/P_A 値、 $(P_{01}/P_A)_{\text{MIN}}$ 、が認められた(亜音速および超音速エゼクターにおいて)。MIN 点は、最適面積比に対応する、最適作動点 (OPT 点) とは別に、AR 値のそれぞれに対応する最適作動点と考えられる。

(2) 亜音速零二次流エゼクターにおいて、最小

の一次流全圧比で二次側真空圧力比を最小にする面積比の最適値(最適面積比; AR_{OPT})が唯一存在することが認められた。この点は、亜音速エゼクターの最適作動点(OPT 点)である。本実験では、 $AR_{\text{OPT}} = 2.0$ 、 $(P_{01}/P_A)_{\text{OPT}} = 1.8$ 、 $(P_{02}/P_A)_{\text{OPT}} = 0.25$ であった。

(3) 各 AR における、MIN 点での、混合管壁面圧力(静圧)分布を検討し、MIN 点での $(P_{01}/P_A)_{\text{MIN}}$ 値を基準に、 P_{01}/P_A 値を次のように区分、 $P_{01}/P_A < (P_{01}/P_A)_{\text{MIN}}$ 、 $P_{01}/P_A = (P_{01}/P_A)_{\text{MIN}}$ 、 $P_{01}/P_A > (P_{01}/P_A)_{\text{MIN}}$ 、すると、AR 値に関係なく、それぞれが、 P_{01}/P_A 域に対応する特徴的な混合管壁面圧力分布の形状を呈することを明らかにした。次いで、このような一次流の流動過程の物理的意味について考察した。

(4) 混合管長比 $(L/D)_{\text{MIX}}$ が、二次側真空圧力比、 P_{02}/P_A に及ぼす影響について調べ、一次流全圧比、面積比、によって、 $(L/D)_{\text{MIX}}$ の影響が異なることを示した。

直管形混合管を欠き、ディフューザー部のみ ($(L/D)_{\text{MIX}} = 0$) の場合、特徴的な真空特性を示すことがわかった。すなわち、MIN 点よりはずれた、一次流全圧比の低い領域では P_{02}/P_A 値が大きく上昇するが、MIN 点では、 $(P_{01}/P_A)_{\text{MIN}}$ 値は上昇するものの、 $(P_{02}/P_A)_{\text{MIN}}$ 値は、混合管のある場合よりも、わずかではあるが、低下しており、真空性能が、ほぼ等しいことを示した。

一方、この場合の作動は騒音が大きくなり、MIN 点以外の作動を考慮すると、直管形混合管の使用が適当であり、 $6 \leq (L/D)_{\text{MIX}} \leq 8$ が適用基準であると考えられる。

(5) ディフューザーがエゼクターの真空性能に及ぼす影響について調べた結果、 $P_{01}/P_A < (P_{01}/P_A)_{\text{MIN}}$ の領域で影響が大きく現れることが認められた。 $6 \leq L_{\text{DF}}/L_{\text{MIX}} \leq 8$ が、適用値と考える。

(6) 超音速エゼクターの性能について調べ、 $M_N = 1.0$ における、各 AR 値に対応する最小二次側圧力点である MIN 点は、 $M_N > 1.0$ においても、MIN 点であることがわかった。すなわち、それぞれの AR 値の MIN 点において、 $(P_{01}/P_A)_{\text{MIN}}$

値は、 M_N 値に関係なく、 AR 値によって定まる。 $M_N \geq 1.6$ の場合に、 $(P_{02}/P_A)_{MIN}$ 値は、 $M_N = 1.0$ の $(P_{02}/P_A)_{MIN}$ 値よりも低い値を示し、超音速エゼクターの二次側真空性能が、亜音速エゼクターのそれよりも良好であることがわかった。 $AR = 2.5$ の場合について、 $M_N = 1.6$ 、 $M_N = 1.0$ の MIN 点での性能を比較すると、以下となる。 $M_N = 1.0$; $(P_{01}/P_A)_{MIN} = 2.2$, $(P_{02}/P_A)_{MIN} = 0.25$ 。 $M_N = 1.6$; $(P_{01}/P_A)_{MIN} = 2.2$, $(P_{02}/P_A)_{MIN} = 0.18$ 。超音速エゼクターの真空性能が30%程度の向上を示している。しかし、超音速エゼクターの二次側真空性能が、亜音速エゼクターと比較して、高い領域は、 MIN 点とその近傍であり、超音速エゼクターの適用に際して留意すべき点である。

文 献

- 1) J. Fabri, R. Siestrunk ; Supersonic Air Ejector, Advance in Applied Mechanics
- 2) 松尾一泰, 笹口健吾, 田崎耕一, 望月博昭; 超音速空気エゼクターの研究 (第一報), 日本機械学会論文集 No 47-416, 1981
- 3) 高島洋一, 長谷川正行; 空気エゼクターの研究, 化学工学 第18巻 9号, 1954
- 4) 坂口 一, 高森 晋; 超音速二次元翼列風洞用空気エゼクターの実験 (第一報), 機械学会講演論文集 No 810-15, 1981

航空宇宙技術研究所資料 632 号

平成 3 年 2 月発行

発行所 航空宇宙技術研究所
東京都調布市深大寺東町 7 丁目 44 番地 1
電話三鷹 (0422) 47-5911 (大代表) 〒182
印刷所 株式会社 セイコー社
東京都調布市西つつじヶ丘 1 丁目 5 番地 15
