

## 極超音速エンジン用三次元 エアインテーク形状に関する数値解析

○高橋 将大, M. Rizal Rosli(早大基幹理工・院), 小林 航, 佐藤 哲也(早大基幹理工)  
小島 孝之(IAT/JAXA), 丸 祐介(ISAS/JAXA)

### 1. はじめに

近年, 米国でのX-51スクラムジェット飛行試験, 欧州のLAPCAT計画やZEHST計画など, 空気吸込み式エンジン(ABE)を用いた極超音速輸送機研究が活発化している. JAXAにおいても, Fig.1に示すような, 予冷により低速から極超音速までの飛行を実現する予冷ターボジェットエンジン(通称Sエンジン)の研究開発が行われている. この極超音速ABEにおいて, 主流を直接取り込むエアインテーク(空気吸入口)はエンジンに流入する極超音速流を減速圧縮する役目を担っている. 取り込んだ空気が有するエネルギーがエンジン推力に影響してくるため, インテーク性能がシステム全体の性能を左右する. 従来の極超音速エンジン用エアインテークでは矩形または軸対称形の二次元形状を持ち, 衝撃波の組み合わせによる減速圧縮方式を採用しているが, 衝撃波損失, 非設計点での効率低下, 非定常振動現象(バズ)の発生等の課題を有し, エンジン性能低下に繋がっている.

そこでFig.2に示すように, 気流が等エントロピ圧縮された後, 円錐型衝撃波の発生によって更に減速, 圧縮される極超音速インテークが提案されている[1]. ここで円錐型衝撃波がインテークスロート壁面部に理想的に衝突した場合, 壁面において衝撃波の反射は発生せず, インテーク後流では減速圧縮された一様流が得られる. このBusemannインテークに代表される等エントロピ圧縮を主としたインテークは衝撃波による損失が少なく, 理論的に高い性能を得られることが証明されている一方で, 従来型に比べインテーク長増大, 極超音速境界層による損失, 非設計点での始動性低下等の問題を有する.

そのため過去の研究では, 圧縮特性を保持しつつ上記の問題を解消する高性能インテーク設計法として, 一般にStreamline tracing techniqueと呼ばれる設計法が用いられている. 設計されたインテークは本来の軸対称形状を基本として切り込みのあるカウル部を持った, 入口出口相似断面形状となる. 内部圧縮形態から混合圧縮形態の形状になることで, インテーク性能を損

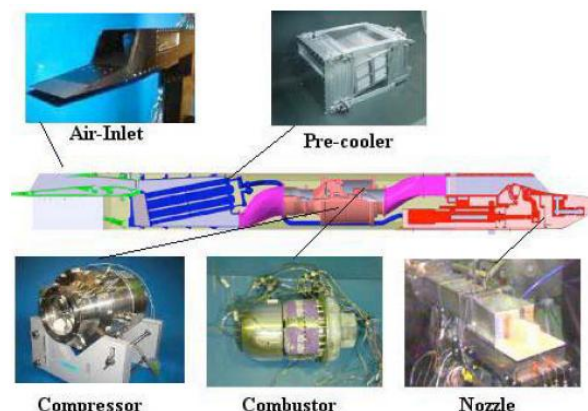


Fig. 1 予冷ターボジェットエンジン概略図

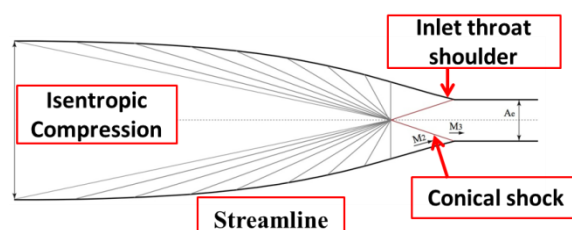


Fig. 2 Busemannインテーク

なうことなく自己始動性向上や短縮化が可能である. さらに近年では, SmartらによってREST (Rectangular-to-Elliptical Shape Transition)インテーク[2]と呼ばれる, 入口出口断面が遷移する形状を持つスクラムエンジン用インテークの設計検討, 実験が行われているなど, 三次元形状インテークの実機搭載への期待が高まっている.

現在JAXAで研究中であるSエンジンインテークでは, 矩形断面形状を有する二次元形状インテークが採用されているが, 前述のような問題があり自己始動性低下, エンジン効率の低下等が生じる. そこで本研究では, Sエンジンへの適用を想定したラムジェット/ターボジェット用高性能三次元形状インテークの設計開発を進めてきたが, 従来の設計法であるStreamline tracing techniqueで設計された矩形入口-矩形出口型では, 軸対称型Busemannインテークに比べてインテーク長短縮が出来ないことが判明した. そのため, Rizalら[3]による入口出口断面が異なる三次元形状インテークの設計法を用いて, インテ

ーク長が短縮でき、過去に研究事例のない入口断面形状を持つインテークを設計している。

以上の背景から、本研究では入口出口断面がそれぞれ異なる三次元形状インテークを対象とした三次元数値解析を行い、インテーク設計理論の妥当性検討、断面形状遷移による流路圧縮特性の詳細解析を行うことを目的とした。

## 2. 解析対象および計算格子

### 2.1. 解析対象

本解析では、Sエンジン用インテークとして設計された、矩形出口形状に対して入口断面がそれぞれ異なるインテークを解析対象とした。具体的には、従来手法であるTaylor-Maccoll方程式を用いて二次元的に設計された軸対称型Busemannインテーク、ならびにそのインテークを基本としてStreamline tracing techniqueを用いて設計した矩形入口型、そして前述のRizalらの設計法によって設計した楕円入口型と、楕円形と矩形を組み合わせた半楕円半矩形入口型の四種類である。Table.1に各形状の諸元を、Fig.3(a)からFig.3(d)に形状の概形図をそれぞれ示す。ここで入口出口収縮比(Contraction Ratio : CR)はインテーク入口出口面積の比であり、カウルを有するインテークにおいてカウル切り込み部での面積を入口面積としてとったときのCRは、内部収縮比(Internal Contraction Ratio : CRin)と表せる。

Sエンジンのインテーク後部に位置する超音速ディフューザの断面形状が矩形であるため、各形状はSエンジンに適用できる形状として矩形出口断面を有するインテークとした。ここで楕円入口型と半楕円半矩形入口型は、入口出口相似形状を有する軸対称型と矩形入口型に比べて16.3%のインテーク長短縮が可能である。

### 2.2. 計算格子

形状が異なる各インテークにおいて、計算格子は全領域構造格子で作成した。Fig.4(a)(b)に軸対称型と矩形入口型の格子を示す。軸対称型の格子は断面が円形であるため、Stigler[4]のように内部に四角形状を有する断面を作成して格子を形成した。また、三次元形状インテークは正面から見て対称形状であるため、対称面で切断した半分形状を模擬し計算負荷を低減させた。格子セル数は各形状約600~700万であり、インテーク外部に流出する流れを模擬するため外部まで計算領域を設けている。

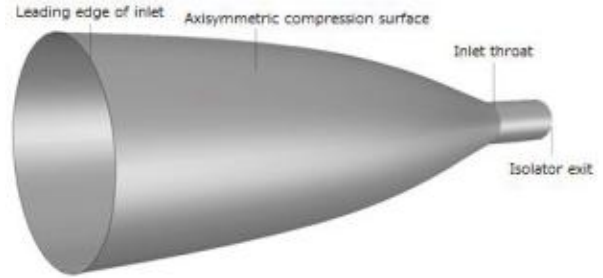


Fig.3(a) 軸対称型

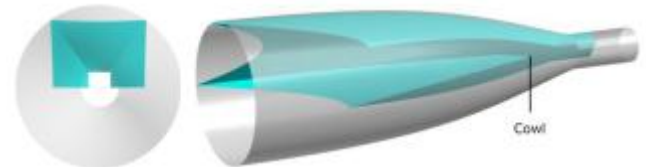


Fig.3(b) 矩形入口型

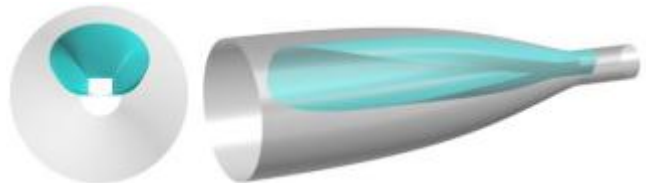


Fig.3(c) 楕円入口型

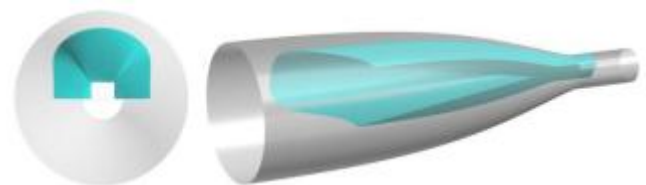


Fig.3(d) 半楕円半矩形入口型

Table.1 各形状諸元

形状	軸対称型	矩形入口型	楕円入口型	半楕円半矩形入口型
入口出口収縮比 CR	14.64	14.64	11.50	13.07
内部収縮比 CRin	-	2.633	2.611	2.619
インテーク長 mm	478.4	478.4	400.4	400.4
入口高さ H mm	172.9	70.50	70.50	70.50
入口幅 W mm	172.9	100.0	100.0	100.0
入口面積 Ain mm <sup>2</sup>	23,468	7,500.0	5,537.1	6,293.5

## 3. 解析手法

解析では独自に構築した解析コードを用い、三次元定常非粘性計算とした。圧縮性Euler方程式を有限体積法により離散化しており、非粘性流束はHLLCを用いて評価し、MUSCL法での高次精度化を行った。時間積分法としては、MFGS

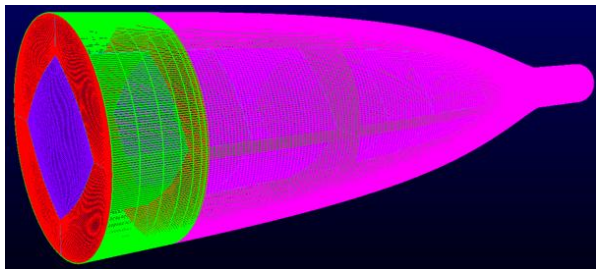


Fig.4(a) 軸対称型インテーク格子

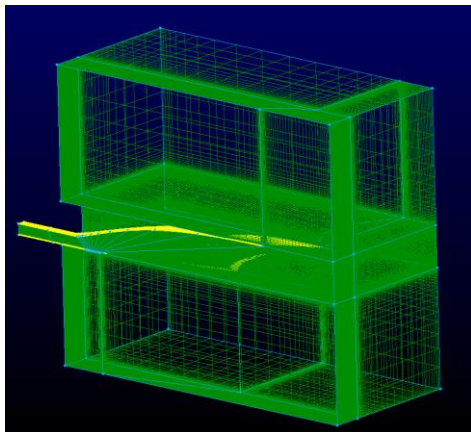


Fig.4(b) 矩形入口型インテーク格子

Table.2 主流条件

入口Mach数 $M_0$	5.0
主流全圧 $P_0$ MPa	1.0
主流全温 $T_0$ K	690.0
主流静圧 $P_{in}$ kPa	1.89
主流静温 $T_{in}$ K	115.0
主流密度 $\rho_{in}$ kg/m <sup>3</sup>	$5.73 \times 10^{-2}$
比熱比 $\gamma$	1.4

を用いた。また主流条件としてはTable.2に示す条件を用いて解析を行った。

#### 4. 解析結果と考察

##### 4.1. 各形状解析結果

Table.3に各形状での解析結果を示す。ここで、インテーク性能を表すパラメータとして流量捕獲率(Mass Capture Ratio : MCR)と全圧回復率(Total Pressure Recovery : TPR)があり、流量捕獲率はインテーク入口と出口の質量流量比、全圧回復率はインテーク入口と出口の全圧比である。また、Fig.5からFig.8に各インテークの解析結果である軸方向Mach数分布を示す。

##### 4.2. 軸対称型

Fig.9に軸対称型の解析で得られたインテーク先端からの距離と壁面Mach数分布の関係を、設計値と共に示す。Fig.5とTable.3から、この形状では等エントロピ圧縮と円錐型衝撃波という、

Table.3 各形状解析結果

形状	設計値	軸対称型	矩形入口型	楕円入口型	半楕円半矩形入口型
流量捕獲率 MCR	1.00	1.00	0.996	1.00	1.00
全圧回復率 TPR	0.960	0.948	0.934	0.823	0.912
出口 Mach数 M	1.978	1.948	1.935	2.036	2.022

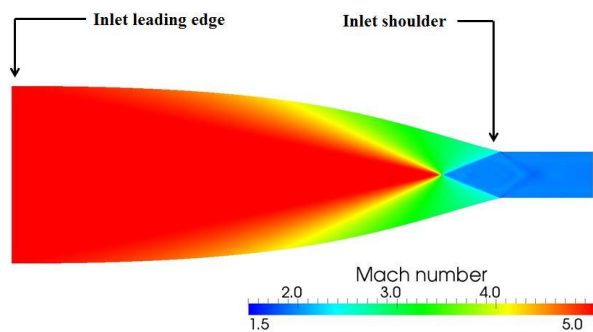


Fig.5 軸対称型解析結果(軸方向Mach数分布)

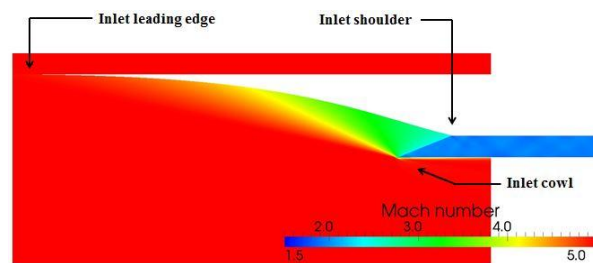


Fig.6 矩形入口型解析結果(軸方向Mach数分布)

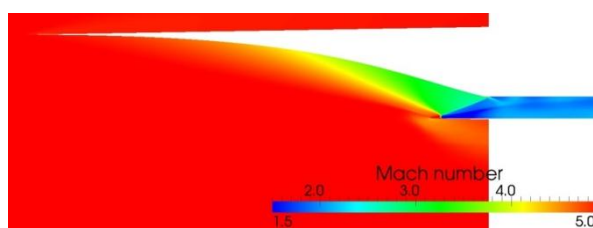


Fig.7 楕円入口型解析結果(軸方向Mach数分布)

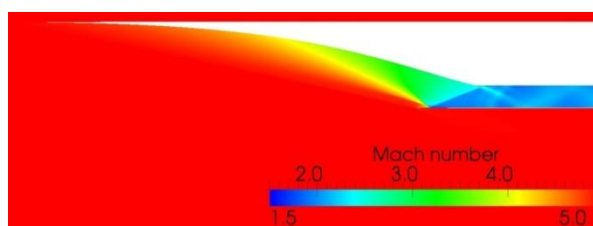


Fig.8 半楕円半矩形入口型解析結果(軸方向Mach数分布)

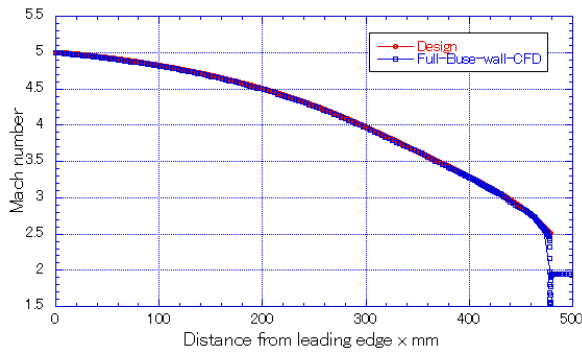


Fig.9 設計理論値と解析結果のインテーク先端からの壁面Mach数分布

理論的な圧縮特性が再現されており、設計値と解析でほぼ等しい結果が得られることが分かった。またFig.9より、壁面でのMach数分布が設計理論値と数値解析結果で良い一致を示した。このことから、本解析で用いた計算手法が妥当であることが示された。

#### 4.3. 矩形入口型

この形状は入口出口相似形状であり、軸対称型と同一のインテーク長を有している。この形状の解析結果から、矩形入口型では軸対称型の圧縮特性を保持したまま圧縮が行われているという結果が得られた。またインテーク全圧回復率は軸対称型に比べて約1%の低下であり、ほぼ等しい性能を有していることが分かった。

#### 4.4. 楕円入口型

楕円入口型は入口出口が異なる形状であり、これと同じく矩形出口形状を持つ矩形入口型より16.3%のインテーク長短縮が可能である。しかし解析の結果、矩形入口型と比較して11.9%の全圧回復率低下が生じることが分かった。そして、楕円入口型のインテークカウル付近を拡大したFig.10に見られるように、局所的な流れの加速から生じたカウル部付近での減速が存在していた。

ここで、Fig.11に設計値、矩形入口型、楕円入口型におけるインテーク壁面Mach数と中心軸からの距離の関係を示す。Table.3とこの結果より、楕円入口型では流路全域に渡って設計Mach数よりも高い壁面Mach数、出口Mach数をとっていることが分かった。ゆえに、この形状では設計で想定した内部圧縮が十分になされていなかったと考えられる。またFig.12からも見て取れるように、主流Mach数 $M=5.0$ に対してインテーク底面部で $M=5.0$ 以上に加速される領域が存在していた。これは、楕円入口から矩形出口に遷移

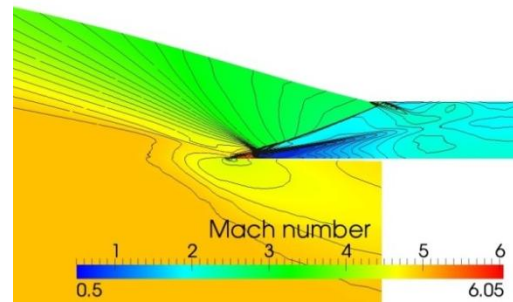


Fig.10 楕円入口型解析結果(カウル部拡大)

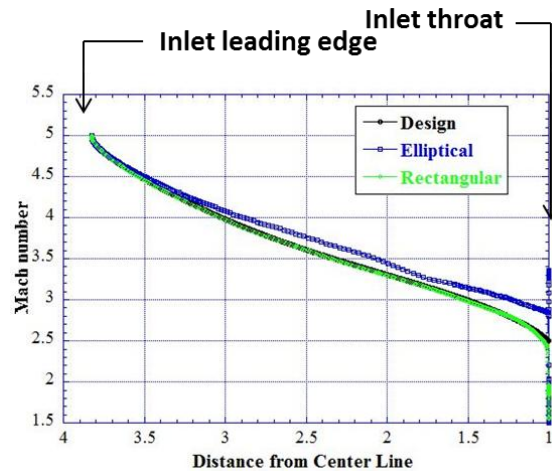


Fig.11 インテーク壁面Mach数と中心軸からの距離の関係

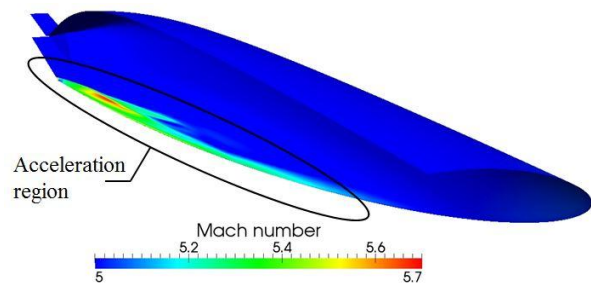


Fig.12 楕円入口型解析結果(カウル部加速領域)

する流路において、Fig.13(a)に示したようにカウル部が入口よりも拡大する形状を有していたために発生したものであると考えられた。

以上より、楕円入口型では内部での不十分な圧縮と形状に起因する二次流れが生じたことにより、大きな全圧損失が発生したと考えられる。

#### 4.5. 半楕円半矩形入口型

このインテークはFig.13(b)に見られるように、楕円入口型で見られたカウル部での拡大領域が存在しない、矩形入口型と楕円入口型を組み合わせた形状である。この形状においても矩形入口型より16.3%のインテーク長短縮が可能である。解析の結果、Fig.8に示したように楕円入口

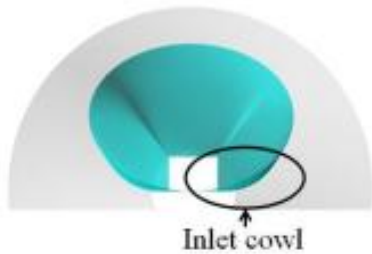


Fig.13(a) 楕円入口型正面図



Fig.13(b) 半楕円半矩形入口型正面図

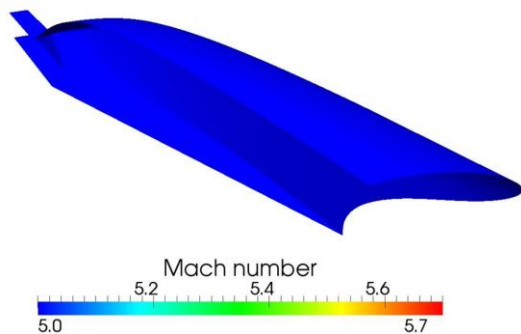


Fig.14 半楕円半矩形入口型解析結果  
(カウル部加速領域なし)

型で見られた内部二次流れは発生せず、矩形入口型に比べ2.4%の全圧回復率低下に抑えられた。そして半楕円半矩形入口型の壁面Mach数を示したFig.14から、平坦なカウルを有するこの形状では加速領域が発生しないことが分かった。これより、楕円入口型で発生した二次流れの要因がカウル形状にあると結論付けることができる。

ここで、半楕円半矩形入口型における各流線での壁面Mach数分布を矩形入口型、楕円入口型と比較した図をFig.15(a)からFig.15(c)にそれぞれ示す。各部名称はFig.16のように設定しており、楕円入口型の側面下部でのMach数のみ比較できないため除いている。Fig.15で得られた結果より、半楕円半矩形入口型(Half-Ellipt-Half-Rect)ではインテーク上部壁面と側面上部において、  
 (1) インテーク先端から内部中域にかけて、楕円入口型に近い圧縮特性を示す。  
 (2) 内部中域からインテークスロートにかけては、矩形入口型に近い圧縮特性を示す。  
 ということが考えられた。一方で、矩形入口型と同一形状を有しているインテーク側面下部では、上記の圧縮特性とは異なり、

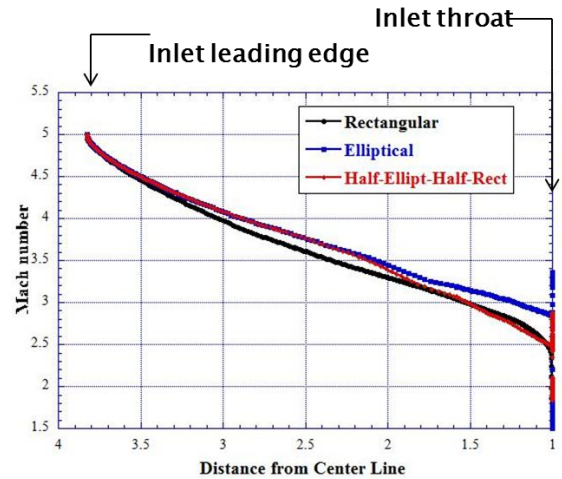


Fig.15(a) インテーク上部壁面Mach数

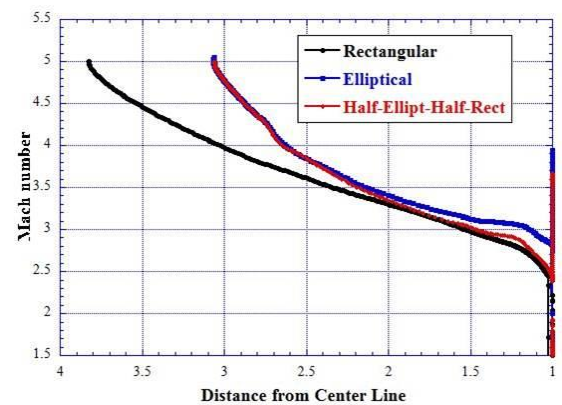


Fig.15(b) インテーク側面上部Mach数

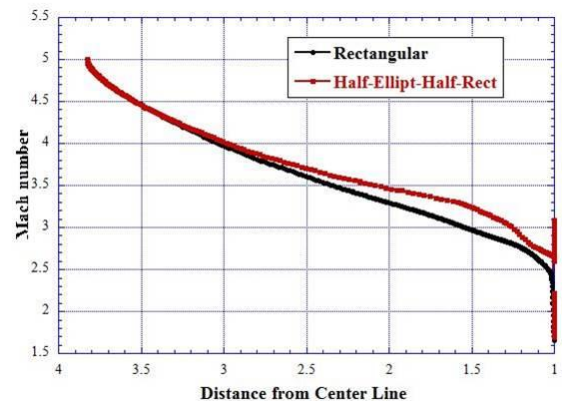


Fig.15(c) インテーク側面下部Mach数

- (3) インテーク先端から内部中域にかけては、矩形入口型に近い圧縮特性を示す。
  - (4) 内部中域からインテークスロートにかけては、楕円入口型の圧縮特性に影響されたと考えられる圧縮特性を示す。
- という圧縮になっていることが考えられた。

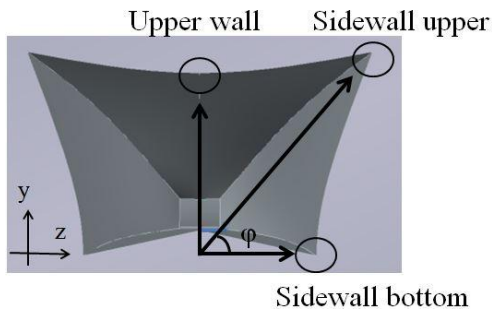


Fig.16 各部名称

## 5. 結論

従来手法によって設計された軸対称型インテーク，ならびにStreamline tracing techniqueとRizalらの設計法にて設計した，矩形出口形状に対して入口形状がそれぞれ異なるインテークに関する数値解析を行い，以下の結論が得られた。

- 矩形入口型の解析結果から，従来型である軸対称型を基本として設計された相似断面形状を有するインテークはほぼ等しい性能を有する
- 矩形入口型に比べてインテーク長が16.3%短縮できる楕円入口型では，カウル形状に起因する内部二次流れが生じ，11.9%の全圧回復率低下が生じる
- 楕円と矩形を組み合わせた入口形状を有する半楕円半矩形入口型では，インテーク長を短縮しつつ全圧回復率低下を2.4%に抑えることができる
- 半楕円半矩形入口型は，楕円入口型と矩形入口型の圧縮特性を非線形に組み合わせた，新しい圧縮特性を有している

## 6. 今後の展望

今後の研究課題として，数値解析においては粘性を考慮した場合のインテーク性能の推算と実験結果との比較，迎角や横滑り角等，飛行を模擬した条件での解析などが挙げられる。また数値解析と並行し，風洞試験を行うことによる設計点 $M=5.0$ ，非設計点での性能取得や，可変カウル機構を用いた，通風中のインテーク入口面積変化による自己始動特性調査といったことが挙げられる。

## 7. 参考文献

- [1] Sannu Mölder and Edward J. Szapiro., “Busemann Inlet for Hypersonic Speeds” *Journal of Spacecraft and Rocket*, Vol.3, No.8, pp.1303-1304, 1966.
- [2] M. K. Smart., “Design of Three-Dimensional

Hypersonic Inlets with Rectangular-to-Elliptical Shape Transition” *Journal of Propulsion And Power*, Vol. 15, No. 3, pp.408-416, 1999.

- [3] M.Rizal Rosli, Masahiro Takahashi, Tetsuya Sato, Takayuki Kojima, Hideyuki Taguchi, Yusuke Maru., “Streamline Tracing Technique Based Design of Elliptical-to-Rectangular Transitioning Hypersonic Inlet” 31<sup>st</sup> AIAA Applied Aerodynamics Conference, AIAA-2013-2665, 2013.
- [4] Jaroslav Stigler., “Optimal Mapped Mesh on the Circle” *Konference ANSYS 2009*, 2009.