

軸対称型スクラムジェットエンジンのインレット始動方法の数値的研究

Numerical Investigation of Inlet Starting Methods for Axisymmetric Scramjet Engines

小川秀朗 (クイーンズランド大学) ラッセル・ボイス (クイーンズランド大学)

Hideaki OGAWA, Centre for Hypersonics, The University of Queensland, St. Lucia, QLD 4072, Australia
Russell R. BOYCE, Centre for Hypersonics, The University of Queensland, St. Lucia, QLD 4072, Australia

Hypersonic airbreathing propulsion, in particular, scramjets (supersonic combustion ramjets), is a promising technology that offers great potential for efficient and economical access-to-space and atmospheric transport. Reliable in-flight inlet starting is of critical importance for the successful operation of scramjet engines, particularly internal-compression configurations with high-contraction inlets. A wide variety of methods including diaphragm rupture and sliding doors (diaphragm erosion) have been contrived in order to address the inlet starting issue, which is inherent to hypersonic airbreathing systems with internal compression. This paper discusses the mechanism and causes of inlet unstart from aerodynamic viewpoints and assesses the effectiveness and viability of various starting methods, based on steady and transient simulations by means of high-fidelity computational fluid dynamics.

Key Words: Scramjet Propulsion, Inlet Starting, Hypersonic Aerodynamics

1. 緒言

大気中の酸素を利用して推力を得る空気吸込式エンジンは、効率的かつ経済的な宇宙輸送及び高速飛行を可能にする推進機関として期待されている。特にスクラムジェットエンジンは極超音速航行を実現する有望な技術として注目され、実用化に向けて地上実験や飛行試験が重ねられてきた。2002年7月に世界初のスクラムジェット技術による超音速燃焼⁽¹⁾に成功したクイーンズランド大学は、日欧米の主要な航空宇宙機関が参画する国際協力プロジェクトSCRAMSPACEを主導し、豪州の宇宙開発計画の一翼を担っている。

衝撃風洞試験で得られた優位な結果⁽²⁾を踏まえ、複雑な三次元形態に比べて耐熱性や製造面などで様々な利点を有する軸対象型(図1)の研究開発が進められている。これらの利点の一方で、内部圧縮式超音速エンジンには、インレット前方で生じる衝撃波のため飛行中の自発的な始動が困難で、始動後であっても内部で発達する衝撃波が流路を阻害し、エンジンの不始動に至るという固有の問題が存在する⁽³⁾。

本論文では、内部圧縮式軸対象型スクラムジェットエンジンの安全かつ効率的な運用にとって不可欠であるインレットの確実な始動を実現すべく、空気力学的な見地からインレット不始動の要因と始動のための方策を紹介し、数値流体力学(CFD)による有効性の調査結果を示す。

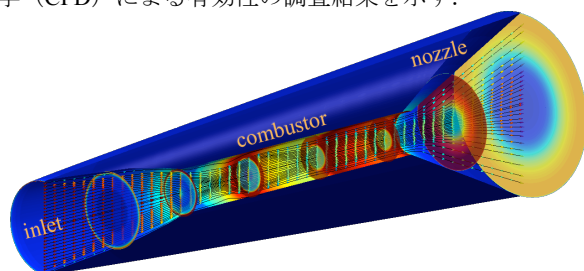


Fig. 1 Flowfield in an axisymmetric scramjet (premixed fuel / air)

2. 解析手法

本研究で扱う気流条件並びに数値的手法を以下に述べる。

2-1 計算条件 総圧一定(53.6kPa)の軌道上での運用を目指し、特にマッハ数8での高度30kmにおける飛行を想定する。一樣流の静圧は1197Pa、静温は226.5K、インレット出口半径(35mm)に基づくレイノルズ数は 1.06×10^5 である。

2-2 解析モデル 気流には熱力学的に完全な空気を仮定し、圧縮性ナビエ・ストークス方程式をMetacomp Technologies社

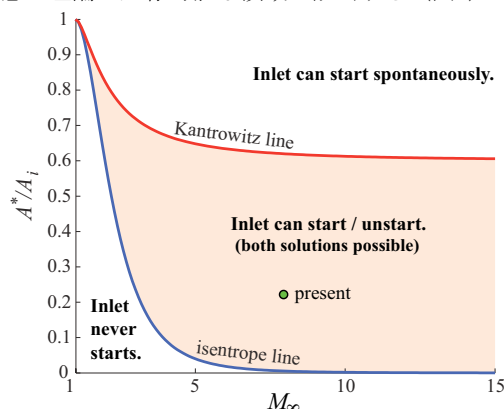
の解析コードCFD++を利用して解く。空間積分は2次精度で、時間積分には陰的解法を用い、多重格子法により収束を加速する。定常流の計算には局所時間刻みを用い、非定常流は50ステップの内部反復を含む0.01msの刻み幅で流れ場を計算する。エンジンの表面は300Kの等温壁を仮定して壁関数を適用し、乱流境界層には2方程式RANS型 $k-\epsilon$ モデルを用いる。

2-3 計算対象 2次元の計算空間を用いて軸対称の流れ場を解析する。3つの傾斜角で段階的に気流を圧縮・減速する方式の圧縮比4.8のインレット形状を用いる(寸法は図4に記載)。定常流の計算には 432×200 ノード、最小格子幅 10^{-5} mの構造格子($y^+=0.32$)、非定常の流れ場にはハイブリッド非構造格子並びに非構造重合格子を適宜採用して計算を行う(詳細は文献(4)・(5)を参照のこと)。

3. 結果及び考察

軸対称型スクラムジェットエンジンのインレット不始動の主たる要因を挙げ、それを踏まえた上で種々の原理を応用した始動方法を紹介し、実用性の検討結果を記す。

3-1 エンジン不始動の原因と回避 超音速インレット始動の可否は、質量流量保存則と衝撃波理論に基づくKantrowitz基準⁽⁶⁾で一般的に判定される。実用的なスクラムジェットの気流マッハ数及びインレット圧縮比は概ね、始動・不始動の両状態が理論上共存可能な領域に該当する(図2)。

Fig. 2 Kantrowitz diagram⁽⁴⁾

Kantrowitz基準が非粘性の理論に依拠する一方で、粘性による境界層がインレット性能に及ぼす影響を追究した。層流境界層を仮定した場合と、インレット前縁から10mmと15mm下流の位置で半径0.2mmの半円ワイヤーで乱流遷移を行っ

た場合の定常流れ場の比較を図3に示す。層流の場合、逆圧力勾配で境界層が剥離し、不始動に極めて近い状況に陥るのに対し、境界層を遷移させた場合、径路が全域的に超音速となる始動状態が得られ（図3下）、乱流粘性がインレット始動の過程で非常に重要な役割を果たすことを示唆している。

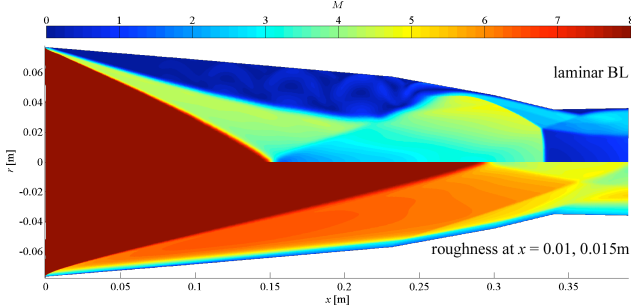


Fig. 3 Inlet flowfields with laminar boundary layer and turbulence trip (Mach number distributions)

3-2 インレットの(再)始動方法 軸対称型スクラムジェットエンジンの様々な始動方法を考案し、非定常流れ場を数值的に解析して有効性を検討した結果を以下に記す。

A. 薄膜の瞬間的破裂

図4に示すように、インレット前方を円錐型の薄膜で覆って空気の流入を遮蔽し、瞬間的に隔膜を取り除くことにより発生する非定常な空力作用を利用してエンジン始動を図る。

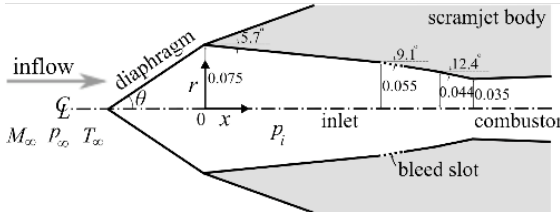


Fig. 4 Inlet with a conical diaphragm (and bleed slot)

圧力差で瞬発的に運動量を励起する方法では、破断前に隔膜下流の圧力 (p_i) を十分に下げおかねばエンジン不始動状態に陥ってしまう（図5上）¹が、最初の圧縮コーナーにおいて境界層吸出し（図4）を併用すれば、 p_i が一樣流と同圧でもインレットを始動させることができる（図5下）。

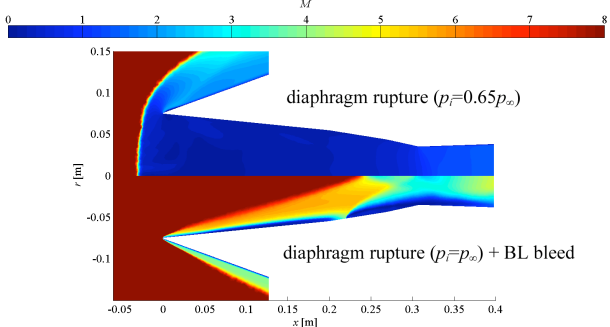


Fig. 5 Inlet flowfields with diaphragm rupture and bleed addition (Mach number distributions)

B. 円錐状隔壁の開閉（空力加熱による隔膜の溶解）

インレット前方を塞ぐ円錐状の隔壁を先端から徐々に開放する方法を試行した。初期段階では狭い開口部で制限された気流の流入量がKantrowitz基準を満たし、インレットは自発的に始動する。その後も隔壁の開放に対して流れ場が準定常的に順応し、始動状態を維持したまま全開に至った（図6）。大気中を高速で飛行する際に生じる空力加熱により先端から隔壁が溶解する場合にも同様の流れ場の変遷が見られる。

¹ 半頂角 $\theta = 35^\circ$ 、薄膜の破裂のみを利用する場合、下流圧 $p_i = 0.65 p_\infty$ では図に示されるように始動しないが、 $0.6 p_\infty$ まで下げると始動する（文献(4)参照）。

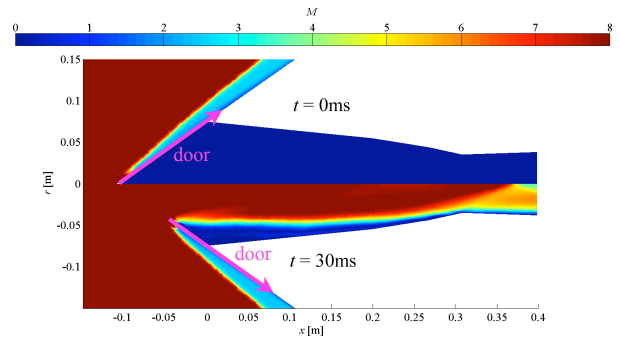


Fig. 6 Snapshots of transient inlet flowfield with sliding doors (or diaphragm erosion)

C. その他の方法

上述した以外にも、インレット入口を塞ぐ円盤状の隔壁を前縁ヒンジ周りに回転式に開く方法や、入口に込められたロケット状のプラグを前方に射出する方法などを試みたが、これらの方法では始動には至らなかった（文献(7)を参照）。

4. 結言

内部圧縮式軸対称型スクラムジェットエンジンを極超音速流中で安全に運用するために不可欠であるインレットの確実な始動の実現を目指し、境界層の剥離や衝撃波の生成といった始動阻害要因を踏まえた上で、考案された種々の方法について、数値流体力学を用いてその有効性を検討した。

インレット前部を覆う円錐型隔膜を瞬間的に除去する方法は、実用上一度のみの使用に限られるが、誘起される非定常な空力現象を利用してエンジンを始動させることができ、境界層の吸出しを併用すればさらに始動を容易にし、確実性が高められる。また円錐状の可動隔壁を用いた方法では、運航中でも状況に応じて開閉することにより、流入する質量流量を限定することで準定常的にKantrowitz基準を満たし、安定したエンジンの作動を実現できる（再利用はできないが、空力加熱で先端から溶解する隔壁も同様の流れ場を呈する）。

いずれの場合も模擬された動作を再現するための機構の意匠と風洞実験や飛行試験による実証が必須であるが、数値的手法による本研究で示された有用性を踏まえ、実装に向け検討する価値とさらなる研究の余地を十分有ると言える。

参考文献

- (1) Boyce, R. R., Gerard, S. and Paull, A., "The HyShot Scramjet Flight Experiment - flight data and CFD calculations compared", AIAA Paper 2003-7029 (2003).
- (2) Hunt, D. C., Paull, A., Boyce, R. R. and Hagenmaier, M., "Investigation of an axisymmetric scramjet configuration utilising inlet-injection and radical farming", *Proceedings of 19th International Symposium on Airbreathing Engines* (2009).
- (3) Tahir, R. B., "Starting and Unstarting of Hypersonic Air Inlets: An illustrated guide to flow starting phenomena in the axisymmetric Busemann geometry and other perforated diffusers", VDM Verlag, ISBN: 978-3639058888 (2009).
- (4) Ogawa, H., Grainger, A. L. and Boyce, R. R., "Inlet Starting of High-Contraction Axisymmetric Scramjets", *Journal of Propulsion and Power*, in press (2010).
- (5) Ogawa, H., Grainger, A. L. and Boyce, R. R., "Numerical Investigation of Viscous Effects on Scramjet Inlet Starting", *Proceedings of 2009 Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology* (2009).
- (6) Kantrowitz, A., "The Formation and Stability of Normal Shock Waves in Channel Flows", NACA TN 1225 (1947).
- (7) Ogawa, H., Grainger, A. L. and Boyce, R. R., "Inlet Starting of High-Contraction Axisymmetric Scramjets", AIAA Paper 2009-7401 (2009).