

論文内容の要旨

論文題目 膜面エアロシエルの超音速空力特性と低弾道係数型再突入システムへの
応用に関する研究

氏名 山田和彦

近い将来、人類は宇宙に日常的に滞在する時代になると考えられる。そのため、今後は、軌道上と地上間の人や物資を輸送するシステムへの要求が一層大きくなることが予測される。宇宙輸送システムに関して、現在、技術的に最も深刻な課題は、再突入時の空力加熱である。従来の宇宙輸送システムは、機体表面を高温まで耐えることのできる材料やアブレータなどによって覆うことによって、機体を空力加熱から守っていた。しかし、より安全でより安価なシステムを開発するためには、空力加熱を避けてしまうことが有効な手段の1つであると考えられる。空力加熱を避ける手段としては、再突入体の弾道係数（機体質量 / 抵抗面積）を小さくすることが考えられる。低弾道係数を実現するには、軽量で大面積のエアロシエルを再突入体にとりつければよいが、そこで必要となる巨大なエアロシエルは、打ち上げ時は必要なく、むしろ邪魔となる。そこで、この矛盾した要求を満たすコンセプトとして、収納・展開が可能な膜面構造をエアロシエルとして利用することが考えられる。膜面構造物は、構造重量が軽く、さらに、その柔軟性により打ち上げ時は小さく折りたたむことが可能なため、低弾道係数の飛行体を実現するために有利である。よって、膜面エアロシエルを利用した低弾道係数型再突入システムは今後の宇宙輸送システムを革新的に進歩させる可能性を持っているといえる。

本研究では、図1に示すように、膜面エアロシエルを再使用宇宙輸送システムに応用することを提案し、その再突入時に着目し、フレア型の膜面エアロシエルを展開したカプセル型の特性を調べることを目的としている。このシステムにおいては、一般的に再突入技術で克服すべき最重要課題である空力加熱は、膜面エアロシエルによる低弾道係数化の効果で大幅に低減できることが期待されるため、注目すべきは、1)膜面が再突入時の飛行環境に耐えられるか、2)膜面エアロシエルは顕著な振動を発生せずに安定して空気を発生できるか、3)膜面エアロシエルの変形が減速性能に及ぼす影響など、膜面エアロシエルの挙動や空力特性に関する点である。よって、本研究では、超音速風洞実験により膜面エアロシエルを有する飛行体の変形や全機空力特性について基本的な特性を把握した上で、超音速流中での膜面エアロシエルの挙動や特性を解析する方法を構築し、実験結果と比較、検討することによって、それらに関して、より詳細で正確な知見を得る。最後に、そこで得た知見や解析方法を利用して、膜面エアロシエルを利用した低弾道係数型の再突入システムの実現可能性について議論する。

第2章では弾性変形するフレア型（六角錐台形状）の膜面エアロシエルを有する鈍頭カプセル模型を用いた超音速風洞試験について述べる。

膜面の材料、一様流動圧、迎角などを変化させ、膜面エアロシエルの変形形状の観察、シュリーレン法による模型周りの流れ場の可視化、内装型天秤による6分力測定を行った。本実験結果

より、膜面エアロシエルの変形は、主に空気力と弾性力の比を表す無次元パラメータ C_{AE} ((基準長さ×一様流動圧) / (膜の厚さ×膜の弾性係数)) によって支配されており、本実験で用いたフレア型の膜面エアロシエルは、超音速流中で空気力をうけて図2に示すように凹面状に変形し、後方に引き伸ばされるが、顕著な振動などは生じず、安定して空気力を発生することがわかった。 C_{AE} が大きくなると変形が大きくなり、エアロシエルの有効な開き角が小さくなるため、抵抗係数が小さくなる。また、膜面エアロシエルを有する機体では、迎角に対する空力係数の感度が鈍く、特に抵抗係数は迎角にはほとんど依存しないことが明らかになった。

ただし、本実験では実験設備の特性や実験模型の制約より、1) 模型本体が迎角をとった場合、模型本体と膜面エアロシエルが接触するため、力の伝わり方が実際の飛行体とは異なっている、2) 風洞始動時の衝撃荷重が定常状態の2倍以上となり、膜面の物性に影響を及ぼしている可能性があるなど、正確な情報を得るには限界があった。そのため、実験方法に起因する要素の影響を調べ、詳細かつ正確な膜面エアロシエルの超音速空力特性を理解するために、以下の章では数値解析によるアプローチを行う。

第3章では、流体解析と連成させるための膜面解析モデルの構築と検証について述べる。

本研究では、膜面解析モデルとして、計算コストが小さく、形式化が単純なため様々な効果を容易に入れることができ、発展性があることを考慮して多粒子系膜モデルを採用した。過去の多粒子系モデルを改良し、弾性力として、伸縮力、せん断力、面外曲げによる力を、外力として空気力を考慮した新しい多粒子系膜モデルを構築し、そのモデルによって、さまざまな検証問題を解き、解析解と比較を行った。図3に多粒子系膜モデルの概念図を示す。

本研究で構築した多粒子系膜モデルは、従来の多粒子系膜モデルに比べ、1) せん断力に相当するバネを考慮したため等方性が改善されている、2) 曲げ剛性を考慮しているため、ある程度厚さのある膜面の解析や座屈、皺の発生を捉えることができる、3) 粒子間距離によってバネの力を変化させているので、粒子配置に自由度があり、円板なども特別な処理なしで解析が可能である、という特徴がある。また、本法は等方性を完全に保証するものではないが、ここで扱うようにあらかじめ変形や応力パターンに関する予測ができる場合は、粒子の配置を主応力方向に一致させることができ、ポアソン効果や皺の形状なども正しく解析ができる。

第4章では第3章で構築した多粒子系膜モデルと流体解析の連成方法の説明と数値解析による超音速風洞試験のシミュレーションの結果について述べる。結果の一例を図4に示す。

膜面流体連成解析において、その支配方程式中に、パラメータ C_{AE} が表れ、超音速風洞試験において膜面の形状がパラメータ C_{AE} によって支配されていた事実が数式の上でも確認された。本研究では、流体解析としてニュートン流近似(ニュートン流連成解析)とCFDによるナビエ・ストークス解析(NS連成解析)を用いる。数値解析結果と実験結果との比較により、ニュートン流連成解析は、膜面の変形に関してよい推算となり、その計算コストの小ささから考えると初期の設計段階に用いるには有用な方法であるといえる。ただし、空気力に関しては膜面上の圧力分布が正しく得られないため信頼性の高いデータを得るのは難しいことがわかった。一方、実験結果とNS連成解析結果を比較することにより、風洞始動時の衝撃の影響は、弾性ゴムの変形の

時間遅れとも関連し、膜面の実効弾性係数を約半分にしている可能性があることが明らかになった。それを考慮にいと、NS 連成解析は、膜面の変形、空気力に関して妥当な結果が得られた。よって、計算コストは大きい、マッハ数やレイノルズ数など一様流条件の影響も考慮できることを考えると、膜面飛行体の性能評価など詳細検討の際に有効な手段であるといえる。

また、数値解析によって、膜面エアロシェルを有する飛行体について、風洞試験では得ることが難しかった知見が得られた。膜面エアロシェルと本体が干渉しない場合は、膜面エアロシェルから本体に機軸に垂直な力やモーメントはほとんど伝わらず、揚力は軸力の流れに垂直な方向成分として発生するため、 C_{AE} と揚力係数の関係は C_{AE} と抵抗係数の関係と同様になり、 C_{AE} が大きくなるとその絶対値は小さくなる。また、ピッチングモーメントは剛体エアロシェルに比べ非常に小さくなる。また、 C_{AE} が小さい条件では、実験結果とは逆に外枠が初期位置より前方に移動することがあり、剛体のエアロシェルより抵抗係数が大きくなる可能性があることがわかった。さらに、数値解析により、膜面飛行体を設計する際に重要な情報である膜面上の応力分布の解析が可能になり、フレア型のエアロシェルの場合、応力は本体との接合部で最大となることが明らかになった。風洞試験で一様流動圧が大きい場合に、膜面は本体との取り付け部から破断しており、実験結果と比較しても妥当な結果であるといえる。

第 5 章では、膜面エアロシェルを垂直離着陸型の再使用宇宙輸送システムへ応用することについて検討を行った。

軌道計算により、再使用宇宙輸送システムに適切な大きさの膜面エアロシェルをとりつけることによって、空力加熱を低減し、熱防御材として再使用性のよい金属 TPS を使用することが可能になることが示された。また、システム全体の重量推算によって、膜面エアロシェルを取り付けることによって、熱防御材や軟着陸用の逆噴射燃料の重量が低減できるため、機体の全重量の面からも有利になる可能性があることが明らかになった。

次に、一様流条件(マッハ数、レイノルズ数、 C_{AE})と膜面の変形、全機抵抗係数の関係のデータベースを NS 連成解析(軸対称)によって作成し、再突入軌道に沿った解析を行った。その結果、既存の耐熱織物材料(厚さ 0.1mm 程度の ZYLON[®] 繊維)を使用した膜面エアロシェルは、強度的にも再突入環境に耐えうることがわかった。また、膜面が変形することによる空力特性への影響は、織物材料は曲げ剛性が小さく、かつ、伸びにくいいため、膜面エアロシェルは大きく凹面状に変形し、剛体エアロシェルより抵抗係数が大きくなる。つまり、変形によって、有効な弾道係数はさらに小さくなる可能性があることがわかった。

これらの検討・解析から、本研究で提案する膜面のエアロシェルを有する飛行体は、既存の膜面技術で十分実現可能であり、金属 TPS の使用が可能になる、全機重量が小さくできるなどのメリットがあり、次世代の宇宙輸送システムの 1 つとして大きな可能性があることが示された。

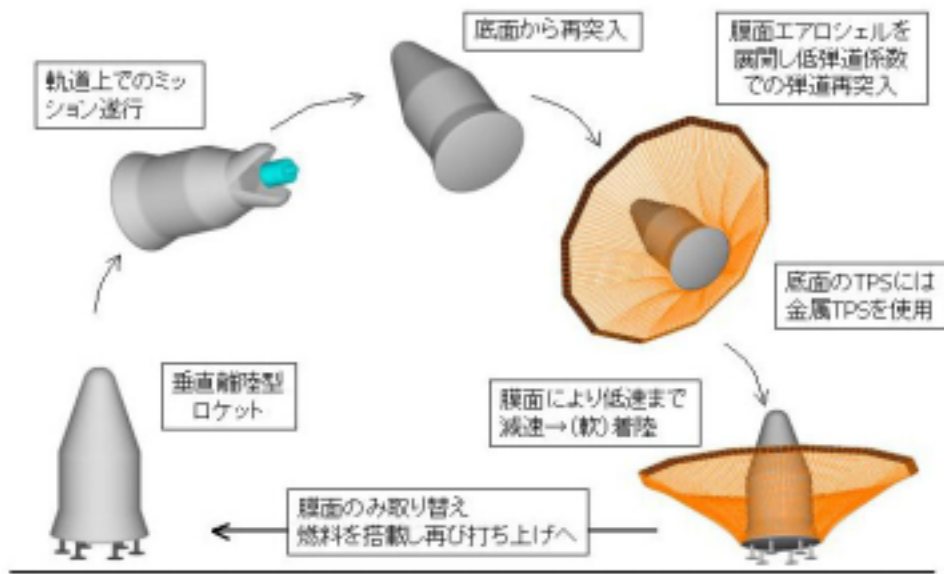


図1：本研究で提案した膜面エアロシェルを利用した再使用宇宙輸送システムの概念図

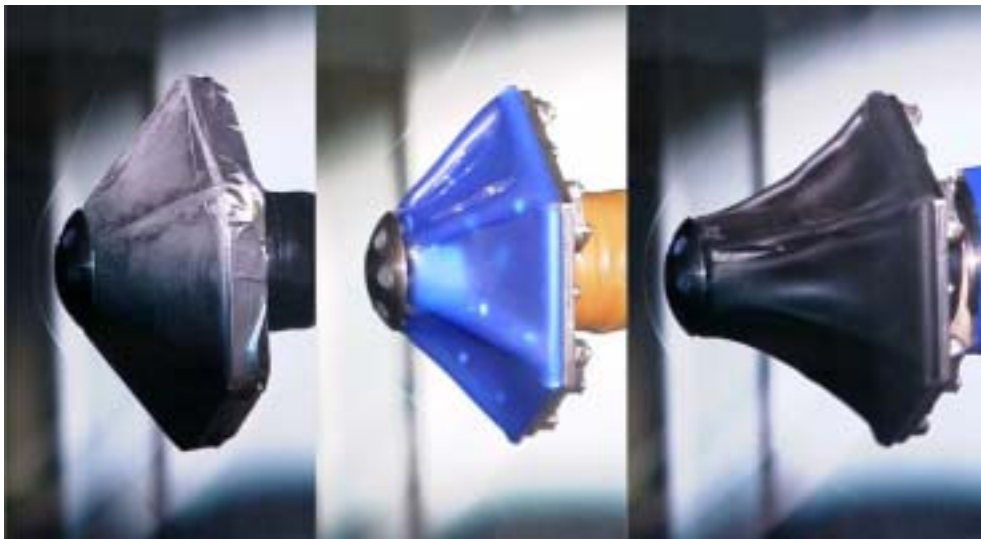


図2：超音速気流中の膜面エアロシェルを有する模型の様子（マッハ数 3.02、動圧 37.7kPa）
 (左) 剛体エアロシェル、(中) 硬質ゴムエアロシェル、(右) 軟質ゴムエアロシェル

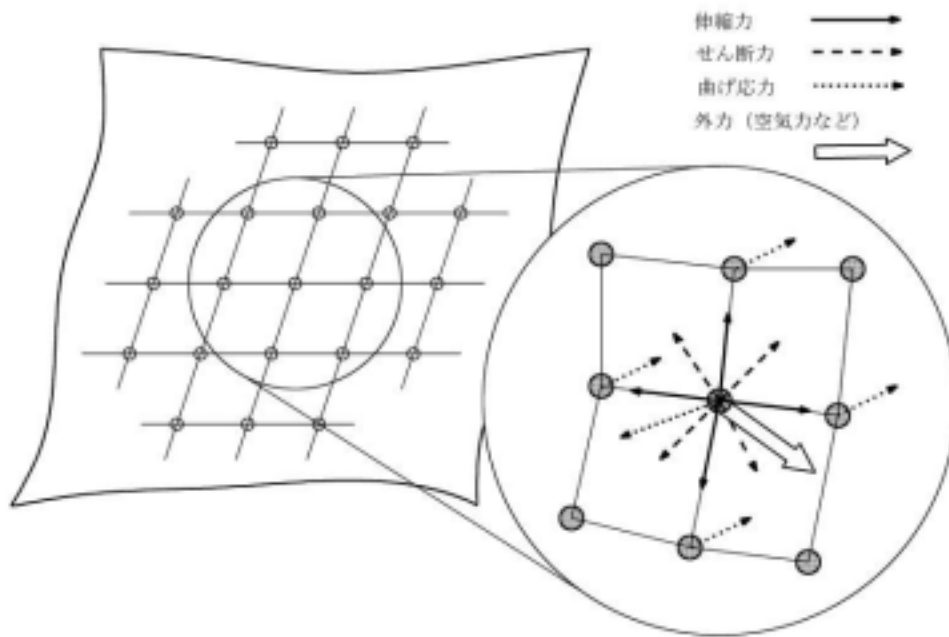


図3：本研究で構築した3次元多粒子系膜モデルの概念図

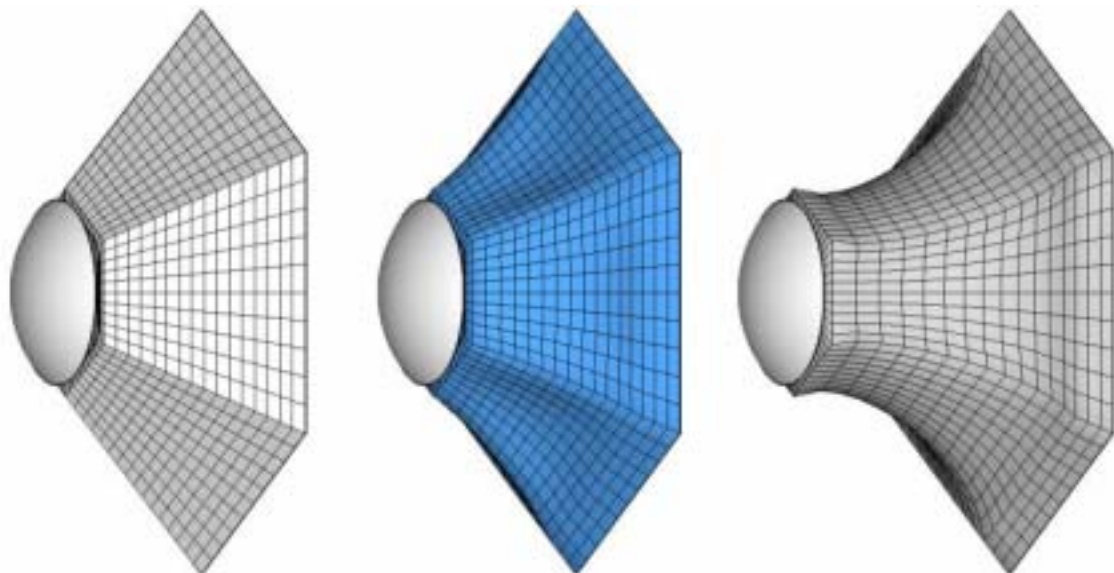


図4：膜流体連成解析（NS連成解析）によって求めた膜面エアロシエルの形状