

極短時間用多分力 free-flight 力計測法の研究開発

Research and development on multi-component free-flight force measurement technique within short test duration

総合技術研究本部

複合推進研究グループ 高温衝撃風洞セクション

丹野英幸、佐藤和雄、小室智幸、伊藤勝宏

Institute of Aerospace Technology

Combined Propulsion Research Group

High Enthalpy Shock Tunnel Section

TANNO Hideyuki, SATO Kazuo, KOMURO Tomoyuki, ITOH Katsuhiko

Abstract

Multi-component force measurement technique within short test period has been researched for the free-piston shock tunnel Hiest. With the technique, aerodynamic force was obtained as measured acceleration and mass of the model, which was weakly suspended with thin wires. To improve time resolution, digital signal recovery scheme with de-convolution calculation was also applied. For the force measurement in Hiest, time resolution of the measurement was expected to order of  $1 \times 10^{-5}$  sec. Feasibility of the measurement technique will be evaluated in near future through the wind tunnel test in Hiest with the standard hypersonic model HB-2.

1. はじめに

大気圏再突入流れに代表される高エンタルピ流れ場を地上で再現できる自由ピストン型衝撃風洞<sup>(1)</sup>は、従来型風洞を大きく上回る数千気圧、数千度のよどみ点条件を作り出すことが可能だが、その試験時間は極めて短く数 ms から数 10ms 程度しかない。この短い試験時間で空力計測を可能とするには、応答性の高い計測法が必要であり、過去から多くの計測法が研究されてきた。長秒時風洞で実績が高い空力天秤の発展型として、空力天秤の剛性を向上させ、応答速度を改善する方法については、過去いくつか報告がなされている<sup>(2)</sup>。宇宙航空研究開発機構においても、高温衝撃風洞設備を用いて、数 ms の試験時間内での HOPE 模型、円錐模型等の 3 分力空力計測試験がなされている<sup>(3-4)</sup>。

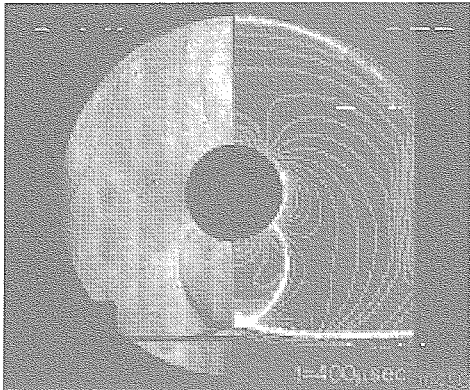


Fig.1 Shock wave ( $M_s=1.2$ ) has passed the sphere model ( $\phi$  80mm). Left hand side:Schlieren photograph. Right hand side: numerical simulation.

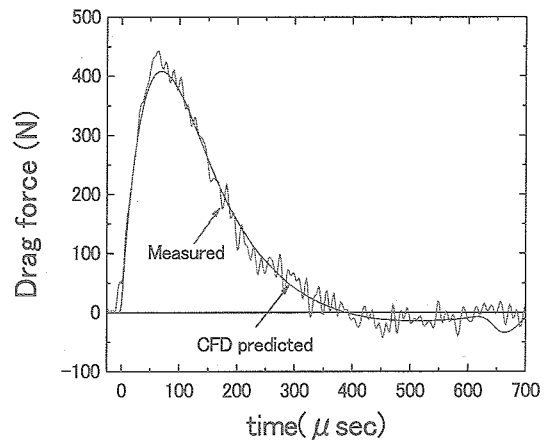


Fig.2 Drag force history of the sphere when a planner shock wave passed by. Measured drag and numerical simulation result were shown.

高剛性空力天秤を用いる方法は、空力天秤が極めて高価であること、ひずみゲージのメンテナンスが定期的に必要なことから、計測は高コストとならざるを得ない。また、6分力計測への発展は構造的な困難さが予想される。さらに、模型の支持剛性を確保するためスティングが極めて太く、模型ベース部の流れが飛行状態と大きく異なることが、模型形状によっては、計測信頼性に大きな影響を与える。

高温衝撃風洞チームでは、新たな空力計測技術として、高剛性空力天秤を用いた計測法に変わる力計測法の研究を続けて来た。ここでは、天秤計測法とは異なる原理を用いたフリーフライト極短時間力計測法の現状を報告し、高温衝撃風洞で計画されている空力計測試験について述べる。

## 2. 加速度計測法

新たな空力計測法として、高温衝撃風洞チームで研究が進められている方法は、一般にフリーフライト法と呼ばれる方法<sup>(5)</sup>で、模型にかかる空力負荷を計測された模型の加速度と模型重量の積によって算出する。模型支持は、ワイヤ等の支持剛性が無視できる方法によってなされる。模型の加速度計測は、模型内部に取り付けられた小型加速度によって直接計測する。模型内部に加速度計を設置することで、スティング等の影響を低減できるが、支持ワイヤの処理(空力的な影響、高温気流からのワイヤの保護)が必要である。また、静的検定が不可能となるため、計測信頼性を確保するために、動的検定方法の精度確保が重要となる。

フリーフライト法に限らず、極短時間力計測では、模型の固有振動の影響の回避が応答性を大きく左右する。筆者らは、H17年度までに、模型の固有振動を数値的に処理し、振動の影響を除去する方法を開発し、フリーフライト計測法の応答性を向上した<sup>(6)</sup>。この方法は、平面衝撃波が通過する際の球の極短時間抗力計測によって評価されている。図1は平

面衝撃波(衝撃波マッハ数 1.2)が球模型(直径 80mm)を通過したときの Schlieren 写真(図 2 左半分。右半分は同条件の CFD)を示す。衝撃波は図上方より下方に伝播している。このときの球模型の抗力履歴を図 2 に示す。衝撃波の到達と共に急激に増加した抗力が、通過後減少する過程を高い時間解像度で捕らえられている。数値的処理では、あらかじめ行った打撃試験等の動的検定試験で得られた、模型の応答周波数特性を用いて、逆畳み込み演算を行い、時間応答性を改善する。この計測では、最終的な Low path filter の周波数を 125kHz に設定し、 $8\mu\text{s}$  の時間応答性を確保した。

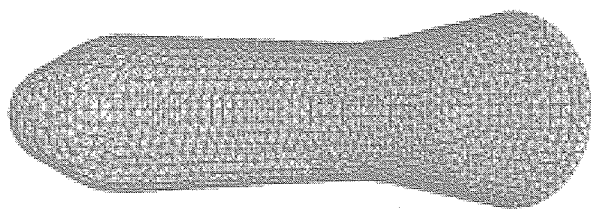


Fig.3 HB-2 model mesh image used for finite element analysis

モード	周波数(kHz)
曲げ(1次)	1.8
ねじり(1次)	3.0
曲げ(2次)	4.5
縦(1次)	5.1
ねじり(2次)	7.3
曲げ(3次)	7.8
縦(2次)	11.0

Table.1 Vibration modes and frequencies estimated by the ABAQUS FFA.

### 3. 高温衝撃風洞への応用

HIEST の空力計測では、フリーフライト計測法の信頼性・精度評価を目的として、超音速風洞試験の検定に広く用いられる HB-2 標準模型を供試体とした。HB-2 標準模型は過去多くの風洞試験結果が存在する<sup>(7)</sup>。JAXA では、H17 年度までに、調布極超音速風洞(HWT1)での3分力空力計測<sup>(8)</sup>、HIEST での高剛性空力天秤を用いた抗力計測試験<sup>(9)</sup>を実施し、評価用データの取得を行ってきた。

HIEST でのフリーフライト空力計測では、模型の固有振動が計測精度に大きな影響を与えるため、模型設計段階での模型振動特性の把握が必要となる。そこで、模型製作に先立って構造解析を実施し、模型の動的特性を評価した。使用した構造解析コードは ABAQUS/CAE で、28594 要素での解析を行った(図 3)。動的解析結果から、今回風洞試験に用いる HB-2 形状模型は、曲げモードの振動が優位であり(表 1)、模型内部に設置する加速度計の位置を詳細に検討する必要があると認められる。

また、フリーフライト計測法では、衝撃風洞特有の風洞始動時の過大な空力加重、模型ワイヤの支持法、計測用ケーブルの取り扱い等のハンドリングに注意を払う必要があり、それら周辺機器等の改修も併せた試験準備が進められている。

### 4. まとめ

空力天秤による計測法とは原理の異なるフリーフライト計測法を高温衝撃風洞 HIEST での空力計測に適用することを計画中である。評価用標準模型として、HB-2 形状模型を用い、過去の極超音速風洞試験結果との比較・評価を予定している。現在、HB-2 形状模型の

設計を行うと共に計測精度を左右する模型剛性の評価として、有限要素解析を実施し、模型の基本的な振動特性を取得した。HB-2 形状模型を用いた HIEST 風洞試験は H18 年度中に実施する計画である。

#### 参考文献

- (1) Itoh K, Ueda S, Tanno H, Komuro T, Sato K (2002) Hypersonic aerothermodynamic and scramjet research using high-enthalpy shock tunnel, *Shock Waves*, 12:93-98.
- (2) Jessen C, Gronig H (1993) A six component balance for short duration hypersonic facilities, *New trends in instrumentation for hypersonic research*, NATO ASI series E: applied science Vol.224.
- (3) Itoh K, Komuro T, Sato K, Takahashi M, Tanno H (1997) HOPE-X aerodynamic tests in the HEK shock tunnel, *Proc.21th Int. Symp. On Shock Waves*.
- (4) Tanno H, Itoh K, Komuro T, Sato K, Ueda S (2005) Design and evaluation of a strain gauge force balance within a short test duration, *Trans JSASS*, Vol.48, No.159
- (5) Bernstein L(1995) *Force measurement in short-duration hypersonic facilities*, AGARDograph AGARD-AG-214.
- (6) Tanno H, Itoh K, Saito T, Abe A, Takayama K(2003) Interaction of a shock with a sphere suspended in a vertical shock tube, *Shock Waves*, 13:191-200.
- (7) Gray JD, Summary report on aerodynamic characteristics of standard models HB-1 and HB-2, AEDC-TDR-64-137.
- (8) Kuchi-ishi S, Watanabe S, Nagai S, Tsuda S, Koyama T, Hirabayashi N, Sekine H, Hozumi K, Comparative force/heat flux measurements between JAXA hypersonic test facilities using standard model HB-2 (Part 1: 1.27m hypersonic wind tunnel results), JAXA-RR-04-035E.
- (9) HB-2 形状標準模型を用いた高温衝撃風洞(HIEST)空力測定試験、佐藤和雄、伊藤勝宏、小室智幸、丹野英幸、植田修一、平成 14 年度衝撃波シンポジウム講演論文集