室蘭工業大学
学術資源アーカイブ
Muroran Institute of Technology Academic Resources Archive

高速走行軌道装置の加減速特性に関する研究

メタデータ	言語: jpn 出版者: 室蘭工業大学航空宇宙機システム研究センター 公開日: 2016-04-26 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 中田, 大将, 神津, 亜実, 矢島, 淳, 西根, 賢治, 東野, 和幸, 棚次, 亘弘 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10258/00008747

室蘭工業大学
学術資源アーカイブ
Muroran Institute of Technology Academic Resources Archive

高速走行軌道装置の加減速特性に関する研究

著者	中田　大将，神津　亜実，矢島　淳，西根　賢治，東野　和幸，棚次　亘弘
雑誌名	室蘭工業大学航空宇宙機システム研究センター年次報告書
巻	2010
ページ	68-73
発行年	2011-09
URL	http://hdl.handle.net/10258/00008747

高速走行軌道装置の加減速特性に関する研究

○ 中田　大将（航空宇宙機システム研究センター　博士研究員）
神津　亜実（航空宇宙システム工学専攻　M2）
矢島　淳（航空宇宙システム工学専攻　M1）
西根　賢治（機械システム工学科　B4）
東野　和幸（航空宇宙システム研究センター　教授）
棚次　亘弘（航空宇宙機システム研究センター　特任教授）

1. 緒言

高速走行軌道実験設備は，高リスク・高コストである飛行試験に替わって高速環境下における飛翔体の性能を安全に，低コストで地上試験するための装置である[1,2]. この装置では走行スレッドと呼ばれる台車に供試体を搭載し，ロケットやジェットエンジン等の加速装置を用いて地上に敷設したレール上を加速する. 本装置のメリットは，摩擦抵抗や翼の弾性変形，地面効果といった実機スケールでの検証が必要な空力測定項目を安価に低リスクで行えることが挙げられる.

室蘭工業大学航空宇宙機システム研究センターでは，これまで 100 m 級のサブスケール軌道装置を用いた走行実験を行い，基本的な走行データを蓄積してきた[3,4]. 2010 年度は 300 m 級フルサイズ軌道装置（図 1）を用いた走行実験を開始したのでその概要について述べる. 主な達成項目は，1)加速・減速システムの確立，2)加減速予測ツールの作成，3)運用手順の効率化とターンアラウンド短縮，である.



図1：300m 級フルサイズ軌道装置の概観（白老実験場）

2. システム概略

2.1 加速装置

サブスケール装置では小型ジェットエンジンを用いて加速を行っていたが，フルサイズでは一桁大きなレベルの推力が必要であるため，ロケットエンジンを搭載することが必須となる. 候補としては固

体・液体・ハイブリッドの 3 種類が考えられるが，価格と運用安全性の観点からハイブリッドロケットを導入した．手始めに，入手性がよい量産品であるカナダ cesaroni 社 Hyper　TEK[5]を採用した．L 型モーターを用いた場合の諸元[5,6]を表 1 に示す．

表 1　HyperTEK ハイブリッド諸元

型式	HyperTEK L625
燃料	熱可塑性プラスチック
酸化剤	亜酸化窒素（N_2O）
推力	ピーク 1189 N，平均 625 N
燃焼秒時	8 秒
総インパルス	4951 Ns
燃焼前重量	5189 g
燃焼後重量	2587 g

酸化剤である亜酸化窒素(N2O)は，常温で液体であり，自身の蒸気圧（20℃で 5.85MPa）で自己加圧される性質があるため，予冷・加圧システムを必要とせず，取り扱いが容易である．民間のスペースプレーン SpaceShip1 で採用されている他[7]，JAXA/ISAS でもエタノール=N2O エンジンの研究が徳留らによって進められている[8]．N2O の蒸気圧は温度に対して顕著な依存性を持つ[9]ため，供給元の N2O タンクをヒーターで加温して一定温度としている．参考までに，ヒーター加温をせずに取得された推力データの一例を図 2 に示す．表 1 の公称値と比べ，ピーク推力 740N，平均推力 415N，燃焼秒時 12 秒となっており，低い推力が長時間続く．

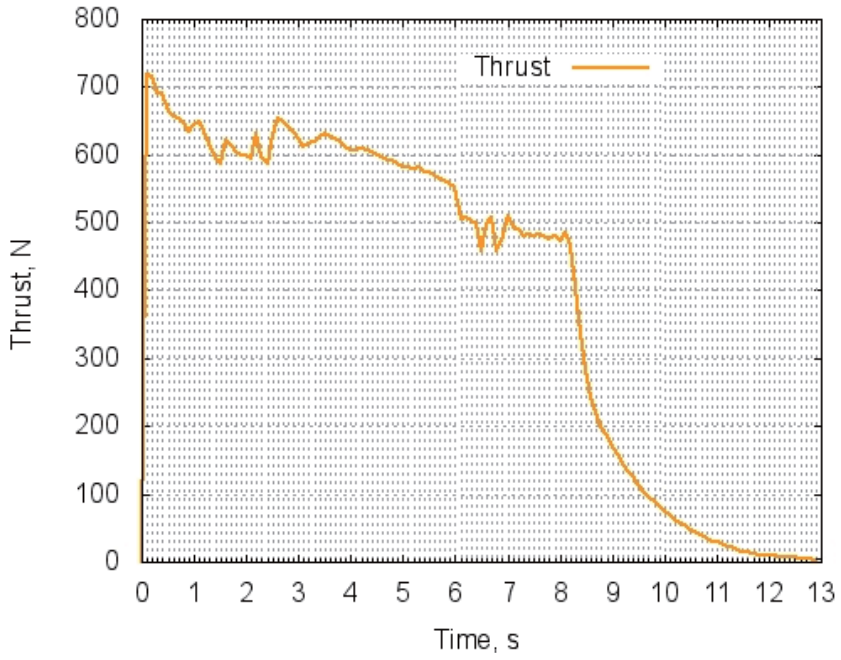


図2：実測した推力カーブ
（外気温 11℃，充填圧 3.0MPa）



図3：スレッドに搭載されたロケット

ロケットは2本ないし4本をクラスターとして使用する．点火時には別系統から燃料グレーン内に酸素ガスを吹き込み，9kV 高圧トランスを用いたアーク放電で点火する．点火のずれは 2 秒以内である．

2.2 減速装置

減速装置としては，サブスケール試験で基盤技術を確立した[3]水ブレーキを採用した．スタート地点から 160 m～300 m の区間において走行軌道間に SUS 製水路を設置し，所定の水位まで水を貯める．走行台車には主軸から水制動板（バケット）を垂らし，これが水路に突入すると，水の抵抗によってブレーキがかかる仕組みである（図 4）．この方式は故障の心配がほとんど無く，大きな制動力を与えられるため米国の超音速ロケットスレッドでは広く用いられている．



図4：水路とバケット

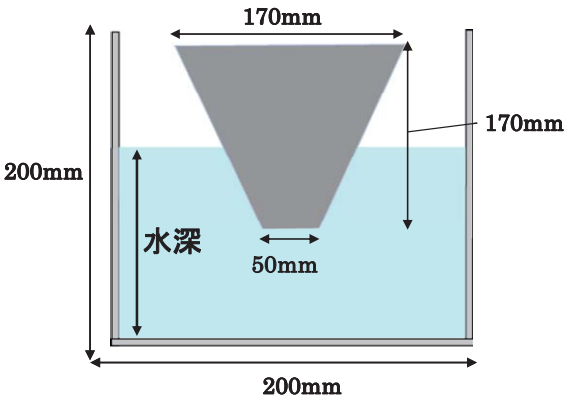


図5：水路とバケットの断面図

水制動力を予測するモデルとしては，サブスケール軌道における試験により，基本的には水の運動量変化で説明されることが分かっている．即ち，水制動力を F_W，バケットが水に浸っている面積を

A, 水の流速を u, 水の密度を ρ, 水の抗力係数を C_D, とすると

$$F_W = -\rho C_D A u^2 \quad (1)$$

となる. サブスケール軌道における実験[3]により, 一般的な平板バケットの場合, C_Dは 0.54(標準偏差±0.09)で速度依存性はごく低速(数 m/s 以下)の場合を除いて小さいことが分かっている[4].

これまで用いてきた水制動では水位は始めから終わりまで一定であり, このような場合, 速度は式(2)に示すように(M はスレッド重量, u_{max}は初期速度)移動距離 x に対して指数関数的に減少する. 結果として, だらだらと長い制動距離が必要になる.

$$u = u_{\max} \exp\left(-\frac{\rho C_D A}{2M} x \right) \quad (2)$$

出来るだけ短い距離で減速するにはスレッドの耐許容加速度を一定値で与えるべきである. 具体的には Au^2を一定に保つように, 減速するにつれて水位を増加させればよい. しかしながら水位を連続的に増加させることは現実問題としては難しいので, 次善策として多段階の水路区間を設け, それぞれの区間に突入する際に許容最大 G となるように水位を設定する. 許容最大 G は搭載する模型に依存するが, 基本構造部分は耐 10G を目安に強度設計を行っている.

2.2 加減速予測ツール

300m の限られた区間で最大速度を達成するためには, 1)多段階水路により, 許容最大加速度に近い減 G を与えること, 2)必要最小限の減速区間の他は全て加速区間に用いること, 3)上記を達成するための水位設定, および加速・減速区間の配分を的確に行うこと, が必須である. このための計算を行うツール SMAT(Sled Motion Analysis Tool)を製作し, 実験との比較を行ってパラメタのすりあわせを行っている. 最も不確定なものがレール摩擦であり, フォースゲージを搭載したワゴン車による牽引試験で実測している. バケットが水制動力を受けるとスレッドに大きな前のめりのモーメントが発生し, レールからの垂直抗力が増大する効果も考慮している.

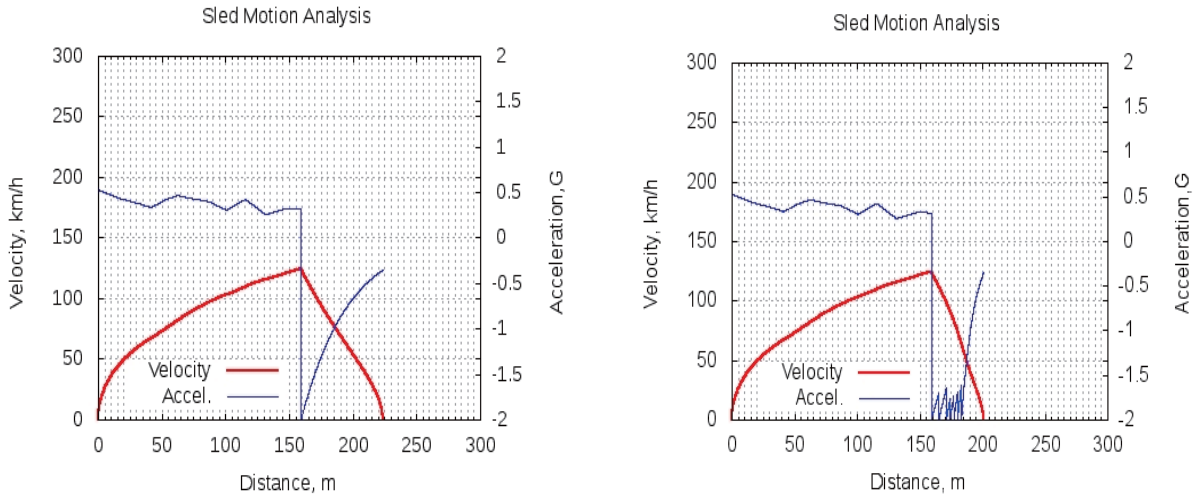


図6:SMAT によるプロファイル予測(拘束条件 2G, 左:単段階水路による制動, 右:7 段階水路による制動)

3. 走行試験

地上機材は窒素，酸素，亜酸化窒素タンク，点火用高圧トランス，温度・圧力モニタ用センサ類である．電力は全て 12V バッテリから供給される．配置を図 7 に示す．酸化剤充填・点火・走行シーケンスは全て 150m 離れた計測室から行われる．運用手順の簡素化のため実験手順の見直しを繰り返した結果，4 名×2 時間程度での配備を実現している．

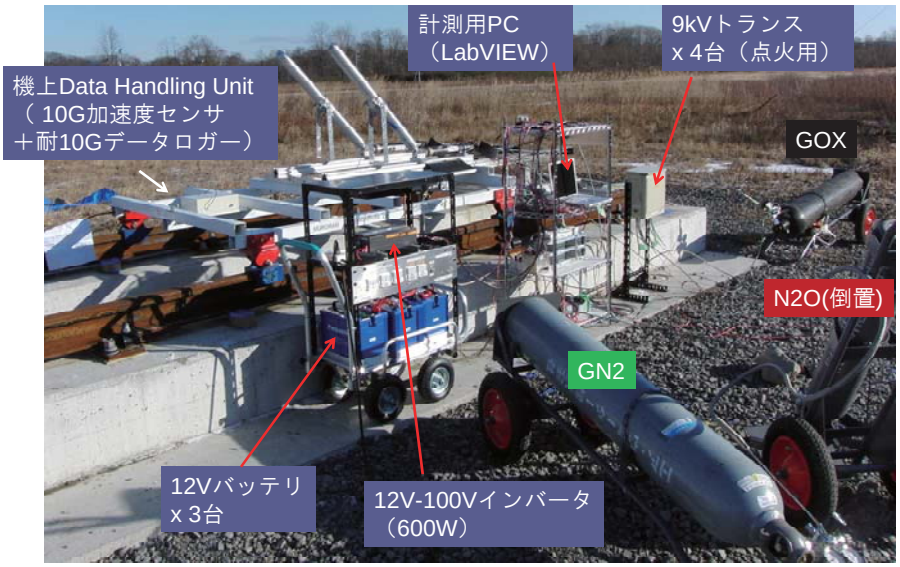


図7：地上側機材配置

ターンアラウンドとしてはインジェクタの清掃や O リングの点検交換など再利用ロケットならではの作業工程があり，この観点からも作業手順の効率化が求められる．機上には加速度センサ(Crossbow CXL10GP3)とデータロガー(MSR165)を防水箱に収めたものが搭載されている．耐加速度は±15G で，100Hz・4ch の収録を 1 時間程度行うことが可能である．実際の走行における 7 段階水路加減速プロファイルの例を図 8 に示す．計算での予測と異なり，3 段階目で最大制動 G を発生した．

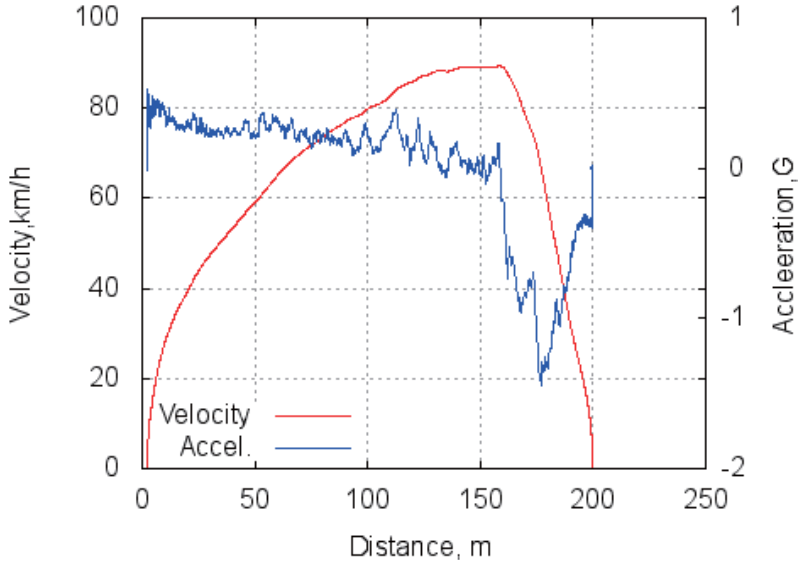


図 8：7 段階水路における加減速プロファイル

この原因としては，水位の的確な調整が出来なかったことが挙げられる．300m 級軌道ではレールの水平面は極めて正確に作られているが，コンクリート基礎部分は必ずしも水平ではなく，水路底面の高さにばらつきがあった．これについても計算ツールに反映したところ，実際の制動プロファイルを正しく予測出来るようになった．現在は，搭載ロケット 2 本(推力約 100kg)，最高時速 100km，絶対停止位置を250m に制限している．予測値と実測値が様々な条件できちんと合うようになるまで繰り返し実験・比較を行った後，ロケットを 4 本に増強して時速 300km 程度での走行を目指す．

4. 走行試験

フルサイズ高速走行軌道実験装置の加速・減速システムと走行実験手順の概略について述べた．

- 加速装置として，安全・コスト面からハイブリッドロケットを選定した．
- 減速装置として多段階水位による水制動について実証した．
- 4 名 ×2 時間程度で走行準備が出来るような運用手順を確立した．

参考文献

1. H. J. McSpadden： The History of Hurricane Mesa Test Facility, AIAA Paper 2004-3336
2. D. J. Krupovage：Wind-Tunnel and Full Scale Forces on Rocket Sleds, Journal of Spacecraft, 1967
3. 安田，他：高速走行軌道装置の加減速に関する研究，平成 21 年度宇宙輸送シンポジウム，2010
4. 神津，他：高速走行軌道実験装置における水ブレーキの最適化，第 54 回宇宙科学技術連合講演会，2010
5. http://www.hypertekhybrids.com/
6. http://www.thrustcurve.org/
7. http://www.scaled.com/projects/tierone/
8. 徳留，他：N_2O/エタノール推進系の実証研究について，平成 20 年度宇宙輸送シンポジウム，2009
9. http://encyclopedia.airliquide.com/