

高速走行軌道実験設備の高速・高加速度化

Faster and Larger Acceleration-G Rocket Sled System

中田 大将*, 西根 賢治**, 立桶 薫***, ムハマド ナビル***,

棚次 亘弘*, 東野 和幸*

*室蘭工業大学 **室蘭工業大学 院 ***室蘭工業大学 学

Daisuke Nakata, Kenji Nishine, Kaoru Tateoke, Muhammad Nabil,

Nobuhiro Tanatsugu and Kazuyuki Higashino

Muroran Institute of Technology

Key words: Rocket Sled, High Speed Test Track, anti-G test, Hybrid Rocket, Drag

Abstract

High Speed Rocket Sled Track Facility is in use from 2009 in Hokkaido prefecture. Fundamental study was carried out in order to extend its capability of maximum speed and acceleration G condition. Structure design guideline was established and verified by static load test. Running profile estimation tool was developed taking careful treatment especially in air drag and water drag calculation. Resultantly 405 km/h as its top speed was recorded within the coast distance of 275 m. The sled felt 7G during deceleration phase and no damage was recognized in its structure or electronic equipment.

1. はじめに

1.1 高速走行軌道実験設備とは

高速走行軌道試験はレール上に置かれた台車（スレッド）に供試体を乗せ、ロケットで地上滑走させるシステムで米国においてはロケットスレッドと呼ばれ、風洞試験と飛行実証の間をつなぐ存在としてその有用性が広く認識されている[1]. 我が国では過去に臨時の軌道が敷設されたことがあるが[2], 室蘭工業大学では我が国初の常設軌道（全長 300 m）を白老町に敷設し、2010 年度から実証試験を進めている. 300 m 軌道では最高時速 405km を達成しており、航空宇宙機器の耐 G 試験等の用途で他大学や民間企業の利用も行われている. 今後マッハ 2 程度での運用を目指した 3 km 軌道設備に向けた加速、減速、台車構造、運用体制に関する指針の確立を目的とした基盤研究を進めている[3-5].

1.2 軌道と試験環境

北海道白老町に敷設された軌道（図 1）は軌道幅 1.435 m, 全長 300 m であり、継ぎ目は全てテルミット溶接されている. スタート点から 156 m 地点以降には減速システムに用いる水路（0.2 m×0.2 m）

が設けられている。貯水された水路に走行台車の一部が突入することで水の抵抗により減速する仕組みである。この方式は空気ブレーキ、電磁ブレーキなどに比べて信頼性が高い。



図1 高速走行軌道実験設備（全長 300 m、軌道幅 1.435 m）

2. 走行台車の構造設計指針

2.1 設計指針

図2は2012年度から投入されたレール走行台車で、RS-702と呼ばれる。アルミ合金製であり、幅1590 mm、長さ2030 mmである（搭載品を除く台車本体の寸法）。推進・計測・ペイロードシステムを除く空虚重量は72 kgである。MSC Patran / NASTRAN 2012による構造解析を行うと共に、静荷重試験によって解析の正当性を評価した。加速時の台車負荷については、荷重伝達経路が比較的分散されていることもありクリティカルな問題とはならない。減速時には台車から下部に延びた水ブレーキ制動板（バケット）の狭い面積に大きな荷重がかかるため、全体のモーメントも含めた入念な構造設計が必要である。想定荷重12.7 kNに対して衝撃荷重の過渡応答を考慮した係数2.0と安全率1.2を乗じたものを設計点とした。



図2 ロケットスレッド台車（RS-702:全長2030 mm、幅1590 mm、重量72 kg）向かって左前部に取り付けられている透明防水ケースの中に測定機器類が収められている。奥に見えるSUS製箱は亜酸化窒素充填のための地上側電磁弁・計測機器BOXで、恒常的に設置されている。

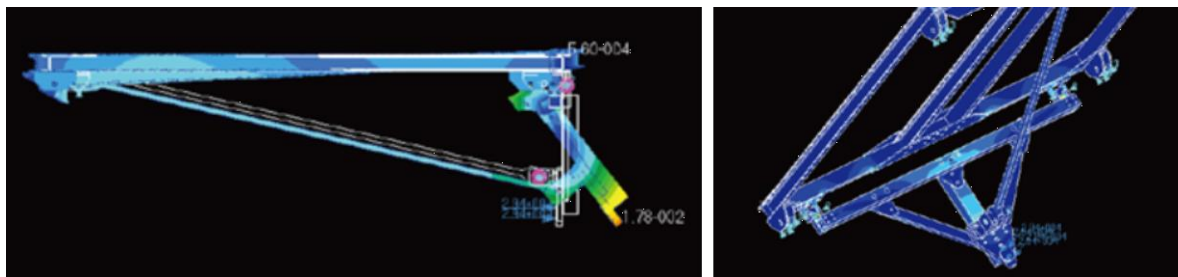


図3 減速時の全体構造解析 (Tet 要素 220 万ノード)

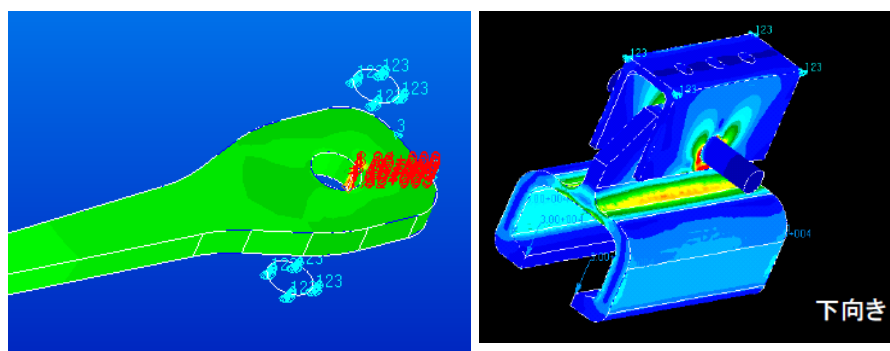


図4 斜め引っ張り部材および滑走脚（スリッパ）の要素構造解析

構造解析は全体を粗いメッシュで分割したモデルと、部材ごとの詳細解析を組み合わせ実施した。図3は制動板が30 kNの荷重を受けた際の3次元構造解析の結果である。トラス部材である斜めのバーは単純引っ張りを受け、台車先端は斜め部材に引っ張られて沈み込む。図4は斜め部材のピン穴周りの応力集中に主眼を置いた要素解析、及びスリッパと呼ばれる滑走脚部の解析結果である。このような構造解析を経て削りこみを行い、台車重量を可能な限り削減した。台車幅や台車長さ・桁の本数などについては搭載品の都合から削減には限りがあり、搭載スペースを確保しつつ構造強度を確保することとなる。

2.2 静荷重試験

構造解析の結果の妥当性を確認するため、図5のようなレイアウトで静荷重試験を実施した。重要と考えられる17箇所に歪ゲージを貼り、ジャッキによってバケット部分に荷重を加えた。

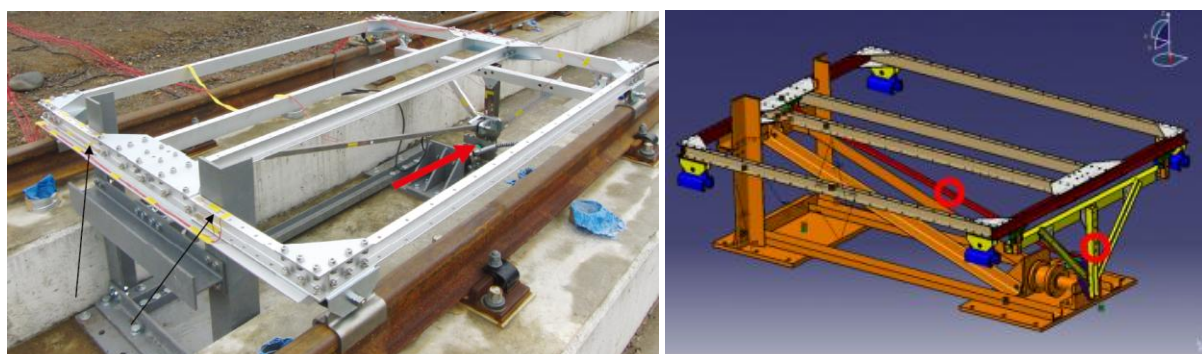


図5 静荷重試験レイアウト。左図において黒い矢印で示した箇所が拘束点。赤い矢印で示した箇所が荷重作用点である。右図赤丸の位置は表1における歪ゲージ Ch.2 および Ch.9 の貼り付け点である。

表 1 解析および実測された歪の比較（荷重 15 kN 負荷時）

Ch. #	解析	実測
Ch.2	225 $\mu\epsilon$	189 $\mu\epsilon$
Ch.9	415 $\mu\epsilon$	428 $\mu\epsilon$

図 5 において赤丸で囲った箇所（Ch.2 および Ch.9）の解析および実測された歪量を表 1 に示す。このように、実測された値は概ね解析値の 80% から 105% の範疇に収まった。但し静荷重試験では拘束部としてスレッド前部桁の 2 点でジャッキの反作用を受けるレイアウトとせざるを得ず、この点において局所的に大きな歪が現れたため、本来かけるべき 30 kN に達する前に試験を終了した。走行スレッドが減速する際にはバケットで受けた力の反作用はスレッド全体の体積力（減 G）となるため、このような局所的な集中荷重は静荷重試験特有のものであると考えられる。なお、表 1 に示した解析値は静荷重試験と同じ拘束条件で行ったものであるが、走行時と同じ拘束条件（スレッド全体が減 G を受ける）での構造解析を別途行い、静荷重試験拘束点以外の箇所における応力分布にクリティカルな箇所が現れないことを確認した。

3. 走行プロファイルの推定

3.1 プロファイル推定概要

限られた距離で台車および搭載品の耐 G を上回ることなく加速・減速を行うためには正確な運動予測ツールの確立が必須である。現在のところ、走行距離 275 m に対して ± 5 m 程度での予測が可能である。停止位置の予測精度は、300 m の軌道をどこまで使用してよいかという問題に直結するため重要な指標である。加速区間についてはロケットの推力カーブから上限となる G や最高速度の推定が可能であるため、大きな問題にはならないが減速区間については水位の設定誤差が伝搬し当初の想定値から大きく外れた制動 G を与える恐れがあるため、正確な計算が必要である。

$$M \frac{d^2 x}{dt^2} = T(t) - C_f N - \frac{1}{2} C_{da} \rho_a A_{sled} u^2 - \frac{1}{2} C_{dw} \rho_w A_{bucket} u^2 \quad (1)$$

スレッドの運動は直線的であり、基本式は(1)の通りである。右辺第一項は推力、第二項は摩擦係数と垂直抗力の積、第三項は空気抵抗、第四項は水制動力である。ここで、推力はハイブリッドロケットの場合気温変化による影響があり[3]、その補正モデルが重要となる。完全に理論推定することは難しく、現在は様々な気温における実測値をデータベース化して参照している。第二項では推力作用線および水制動作用線は必ずしも重心を通らないため、台車回りに働くモーメントを考慮する必要がある。例えば、水制動時には台車の下部に取り付けられたバケットに大きな力が働くため、台車は前のめりとなる。前部スリッパはレールを上から強く抑える状態となり、後部スリッパはレールから浮き上がろうとするが、レールからは外れない構造となっているため（図 4 右図参照）レールの下面で摩擦を受ける状態となる。第三項では空気抵抗係数の正確な把握が必要である。第四項では水制動に関する抗力係数 C_{dw} が水路閉塞率の影響を受けるため、この観点での補正が重要となる[6]。第一、二、四項についてはこれまでもモデル化されており多数回の実証を済ませているが、今回は特に第三項の空気抵抗の影響が(1)式において支配的となるため、この要素の推定誤差が全体に大きく影響する。時速 400km における空気抵抗は 4 kN 程度に達する。

3.2 空気抵抗係数の推定

走行スレッドはフレーム構造物であり，軌道面との地面効果や剥離した流れが再度台車後部で抵抗要素となる影響も考えられ，形状から C_{da} を推定することは難しい．米国では風洞にスレッド全体の縮小模型を入れて空気抵抗を推定したケースが報じられているが[7]，納得できるレベルでの一致を見ない．今回のケースでは単に空虚台車を予備走行させ，ロケット燃焼停止・水制動開始前（即ち第一項と第四項が無く，レール摩擦と空気抵抗しか無い状況）の空走区間から空気抵抗係数を逆算した．フィッティングには(2)式を用い，レール摩擦係数 C_f と空気抵抗係数 C_{da} の両者を可変パラメタとして最良推定を行った（図 6）．今回のセッティングでは搭載品も含め，投影面積 $A_{sled}=0.6\text{m}^2$ に対して $C_{da}=0.95$ 程度と考えられる．なお， C_f については台車単体での牽引試験等によりドライコンディションのレール面では 0.30-0.35 の範疇であることが予めわかっているため，この範疇で取り扱う．

$$M \frac{du}{dt} = -C_f N - \frac{1}{2} C_{da} \rho_a A_{sled} u^2$$

一般解は

$$u = -\frac{k}{b} \tan\left(\frac{k(t-t_0)}{M} - \arctan \frac{bu_0}{k}\right) \quad (2)$$

ここで

$$b = \frac{1}{2} C_{da} \rho_a A_{sled}$$

$$k = \sqrt{b C_f M}$$

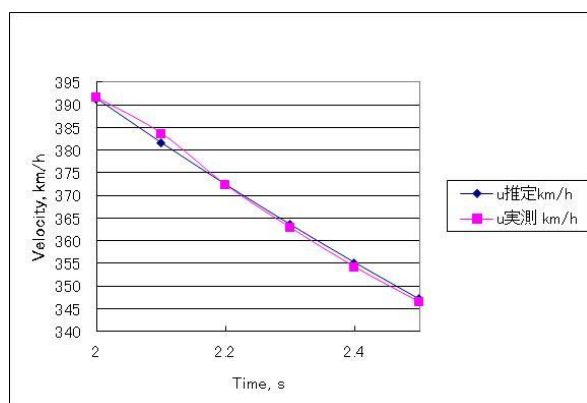


図 6 空気抵抗係数のフィッティング

さらなる高速度化を目指す場合には空気抵抗予測精度の重要性はますます増大する．ロケット等の一般的な飛翔体と異なり，ロケットスレッドは地上において，かつ空力的に抵抗が大きい物体が滑走するためその動圧は凄まじく，速度 500 m/s では約 200 kN 程度の推進器が必要となる．遷音速域・超音速域に達するケースでは衝撃波の地面反射の影響など完全に解明されていない要素もあり，今後予測ツールの精度向上を決める上で課題になると考えられる．

3.3 水位誤差が及ぼす影響

水ブレーキの概要についての詳細は参考文献[3-6]を参照されたい．スレッドが高速度・高加速度化するにつれて水位の設定誤差が及ぼす影響については慎重な検討が必要である．例えば，時速 350km で走行するスレッドを 6G で停止させるためには初期ゲートの水位はわずかに 18mm 程度でなければならない．この場合わずか 3mm の水位誤差が 1G の狂いとなって現れる．現在設置されている水路は W20 cm×H20 cm×L3.0 m のものを 47 個つないで全長 141 m としたものであるが，水路継ぎ目部分のシリコン製シールは完全ではなく，冬季の寒冷期には劣化するため漏れが生じる箇所がいくつか存在す

る。このため、注水後に水の元栓を閉めると水位は時間と共に次第に減少してしまうし、走行時まで注水し続ける方式では注水部と水路末端までの区間に開水路圧損による水位勾配が生ずるので、3mmの誤差を狙った水位を141mの区間に渡って実現することは難しい。運用形態としては漏れを補う最小限のトリクル注水が望ましいが、担当者の判断能力で精度が決まる。

このような事情から、高速で突入する初期段階のゲートでは供試体の上限加速度ぎりぎりを狙わないような水位設定とすべきである。初期段階の水位設定誤差は後段のゲートにも影響を及ぼすため、この観点からも検討が必要である。図7左図は最高速が400 km/hのスレッド台車を6Gの上限加速度で制止させることを目的としたノミナルでの走行予測プロファイルである。12mおきに10段階の水位ゲートを設け、準定Gでの減速を実現している。図7右図は初段～3段目において水位が5mmマイナス側にずれていた場合のプロファイルである。初段～3段目で十分に減速されないスレッドはより大きな速度で後段に突入し、7Gの加速度を受けてしまう。あるところまでマイナス誤差で、次段ではプラス誤差があった場合にはさらに大きな加速度がかかってしまう。

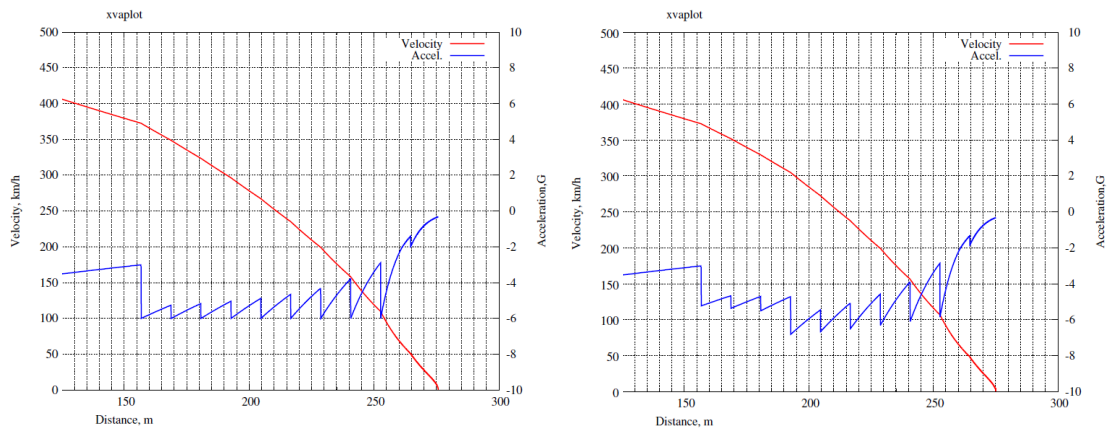


図7 左) 最高速400km/hのスレッドを6G上限として減速する際のノミナル予測プロファイル。右) 上記において1-3段目の水位が5mm低下した場合の減速プロファイル。いずれも赤線が速度(左軸)、青線が加速度(右軸)である。

水制動係数 C_{dw} についてはサブスケール軌道における実験および数値解析[6]により時速100km程度までの範疇では速度依存性は小さいことが確認されているが、高速度になると大幅に低下する傾向があることがわかった。実測した加速度・速度データに対してフィットするよう(図8)各 C_{dw} を逆算したものが表2である。初段と最終段では水制動係数が倍程度異なる。なお、加速度センサのデータは現在100Hzで取得されているが、精度の高い検証のためにはサンプリングレートの向上が必要である。

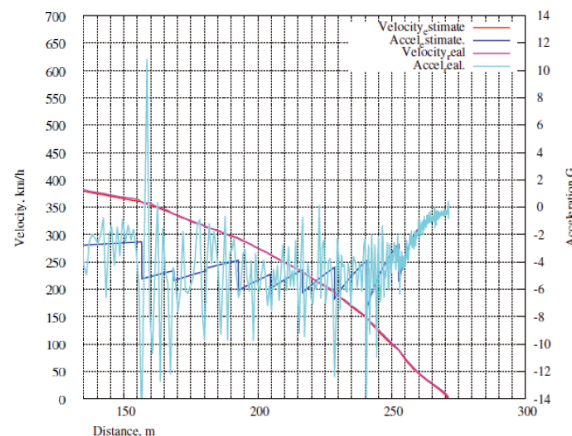


図8 水制動係数 C_{dw} 決定のための実験データからのフィッティング。水色は加速度センサ生データ、ピンクはその積分値としての速度。青色はフィッティングされた加速度カーブ、赤はその積分値としての速度である。

表2 図8のフィッティングによって得られた水制動係数 C_{dw}

水路#	位置, m	C_{dw}
1	156.6	0.4
2	168.6	0.42
3	180.6	0.38
4	192.6	0.6
5	204.6	0.6
6	216.6	0.64
7	228.6	0.7
8	240.6	0.75
9	252.6	0.75



図9 減速水路に時速 350km で突入する走行スレッド

4. まとめ

- ・ 高速走行軌道実験装置の高速・高加速度化を行い、7G 程度の加減速と最高速 405km/h を達成した。
- ・ 高加速度に耐える台車の設計について解析手法を確立し、静荷重試験にて検証を行った。
- ・ 走行予測ツールを整備し、停止位置を±5m の誤差で予測した。
- ・ 空気抵抗係数を空走時データから $C_d=0.95$ 程度と見積もった。
- ・ 水制動係数について速度依存性があることが示唆された。

謝辞

構造解析および静荷重試験治具の設計においては樋口健教授に、また水路の設計および運用において古屋善章氏の多大なるご協力をいただきました。ここにお礼申し上げます。

参考文献

- [1] Dornheim, H. J. McSpadden “The History of Hurricane Mesa Test Facility,” AIAA Paper 2004-3336

- [2] Wikipedia ロケットスレッド,
<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%AD%E3%82%B1%E3%83%83%E3%83%88%E3%82%B9%E3%83%AC%E3%83%83%E3%83%89>
- [3] Daisuke Nakata, Ami Kozu, Jun Yajima, Kenji Nishine, Kazuyuki Higashino and Nobuhiro Tanatsugu, *Predicted and Experimented Acceleration Profile of the Rocket Sled*, Aerospace Technology Japan, Vol. 10, No. ists28, Ta_1-Ta_5, 2012
- [4] Daisuke Nakata, Jun Yajima, Kenji Nishine, Kazuyuki Higashino and Nobuhiro Tanatsugu, *Research and Development of High Speed Test Track Facility in Japan* AIAA Science Meeting, January 6-9, 2012.
- [5] 中田大將, 矢島淳, 西根賢治, 森木嵩人, ムハマドファクルラー, 東野和幸, 棚次亘弘, 「高速走行軌道実験設備の基盤技術について」平成 23 年度宇宙輸送シンポジウム, 2012 年 1 月 19-20 日
- [6] 友常雄太郎, 姫野武洋, 渡辺紀徳, 中田大將, 棚次亘弘, 東野和幸, "高速走行軌道実験の水制動特性に関する数値解析," 平成 23 年度宇宙輸送シンポジウム, 2012 年 1 月, 相模原市
- [7] D. J. Krupovage, "Wind Tunnel and Full Scale Forces on Rocket Sleds," *Journal of Spacecraft* Vol.4 No.10, 1967