



高速走行軌道実験設備

メタデータ	言語: jpn 出版者: 室蘭工業大学 公開日: 2015-03-25 キーワード (Ja): キーワード (En): High Speed Test Track, Rocket Sled, Water Drag, Hybrid Rocket, Anti-G Test 作成者: 中田, 大将, 棚次, 亘弘, 東野, 和幸, 小倉, 達也, 笹尾, 鎮矢, 立桶, 薫 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10258/3779

高速走行軌道実験設備

その他（別言語等） のタイトル	High Speed Test Track
著者	中田 大将，棚次 巨弘，東野 和幸，小倉 達也 ，笹尾 鎮矢，立桶 薫
雑誌名	室蘭工業大学紀要
巻	64
ページ	55-60
発行年	2015-03-13
URL	http://hdl.handle.net/10258/3779

高速走行軌道実験設備

中田 大将^{*1}, 棚次 亘弘^{*2}, 東野 和幸^{*1}, 小倉 達也^{*3}, 笹尾 鎮矢^{*3}, 立桶 薫^{*4}

High Speed Test Track

Daisuke NAKATA^{*1*2}, Nobuhiro TANATSUGU^{*2}, Kazuyuki HIGASHINO^{*1*2}, Tatsuya OGURA^{*3},
Shinya SASAO^{*3} and Kaoru TATEOKE^{*4}

(原稿受付日 平成 26 年 11 月 28 日 論文受理日 平成 27 年 1 月 22 日)

Abstract

Muroran Institute of Technology has constructed High Speed Rocket Sled Track Facility in 2009 and it is in use for many practical experimental tests with commercial companies and academic organizations. In this paper, fundamental studies on the propulsion system, the deceleration system, structure design, running profile estimation program and the onboard balance system are described.

Keywords : High Speed Test Track, Rocket Sled, Water Drag, Hybrid Rocket, Anti-G Test

1 はじめに

高速走行軌道実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もので、米国においてはロケットスレッドと呼ばれ超音速にての実レイノルズ数空力測定試験やフラッタ試験、射出シートやパラシュート開傘試験などの用途でその有用性が広く認識されている⁽¹⁾。

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⁽²⁻⁹⁾。300 m 軌道では最高時速 405 km 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⁽¹⁰⁻¹²⁾。将来的にマッハ 2 程度で運用可能な 3 km 軌道設備の建設を目指しており、各種基盤技術研究や実験機の離陸補助等に使用することを想定している。

2 軌道設備

室蘭工業大学白老実験場にされたフルサイズ軌道（図 1）は軌間 1.435 m、全長 300 m を有し新幹線規格で建設されており、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 159 m 地点以降には減速システムに用いる水路が設けられている。貯水された水路に走行台車に取り付けられた制動板が突入することにより減速する仕組みである。

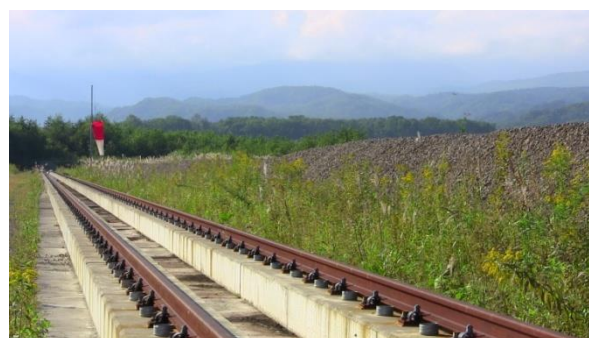


図 1 フルサイズ軌道（全長 300 m）

*1 室蘭工業大学 もの創造系領域
*2 室蘭工業大学 航空宇宙機システム研究センター
*3 室蘭工業大学 生産システム工学系専攻
*4 室蘭工業大学 航空宇宙システム工学専攻

この他、軌間 0.13 m、全長 100 m のサブスケール軌道 (図 2) も並行して敷設されており、フルサイズでの試験の前段階として、新しい台車設計指針の確認、制動システムの確認試験、エアデータセンサの精度確認など、各種基盤技術実証に用いている。



図 2 サブスケール軌道 (全長 100 m)

表 1 軌道設備諸元

	軌間, m	全長, m	最高速, km/h	完成年
フルサイズ軌道	1.435	300	405	2010 年
サブスケール軌道	0.128	100	130	2008 年

3 推進装置

フルサイズ軌道の推進装置には低コストで保管・運用上安全性の高いハイブリッドロケット (Cesaroni 社 HyperTEK L970) を主として採用している。図 3 は推力 1 kN クラスのものを 4 本クラスタ化した例である。酸化剤には常温で自己加圧により液化する亜酸化窒素を用いており、外気温によってタンク圧は 2 MPa~5 MPa 程度まで変化する⁽²⁾。複数本のロケットの着火タイミングのばらつきは事前走行プロファイルの予測精度に影響を与えるため、斉時着火を目指すための基礎研究を進めている。



図 3 フルサイズ軌道用推進装置 (ハイブリッドロケット)

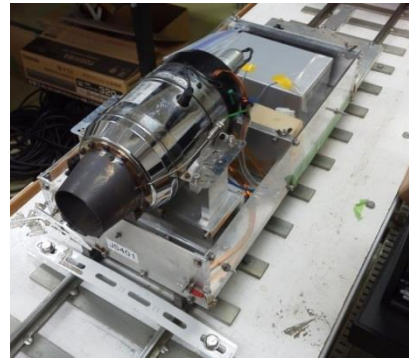


図 4 サブスケール軌道用推進装置 (小型ジェットエンジン)

サブスケール軌道では推進装置として RC 機用の小型ジェットエンジン (Jet Munt 社 Merlin 160G) を使用している (図 4)。定格推力は 160 N (外気温 15°C、回転数 116000 rpm における) であり、エンジン重量は 1.45 kg、全長は 30 cm である。ジェットエンジンはイニシャルコストはやや高いものの、ランニングコストはごく小さい。ロケットと比べて推重比は小さいため、耐 G 試験等の用途には不向きである。

4 制動装置

フルサイズ軌道の推進高速のスレッドを安全に停止するにはレール間に設けられた水路にスレッドに取り付けられた制動板 (バケット) を浸す水ブレーキが用いられている (図 5、6)。水の抵抗は(1)式で表わされる通り速度の二乗に比例するため、一定水位では最初に大きな減速 G がかかるものの、その制動力は急激に低下する。

$$F_w = \frac{1}{2} C_{dw} \rho_w A_{bucket} u^2 \quad (1)$$

限られた距離で最適な減速を行うため図 7 に示すように水位を多段階 (3~10 段階) としている。図 5 に見られるようにバケットは先端にゆくほど幅の狭い台形平板となっているため、浸水面積は最初の区間と最後の区間では大きな差があり、速度の二乗で減衰する制動力をほぼ一定に保つことが出来る。式(1)において水の抵抗係数 C_{dw} は開水路断面におけるバケット平板が占める閉塞率に依存傾向があることが知られており、この観点からサブスケール軌道において閉塞率と C_{dw} の関係を 50 回以上にわたる実験および CFD 計算から推定している⁽¹²⁾。



図5 減速水路に浸された制動板（バケット）



図6 時速 350 km で水路に突入する走行スレッド

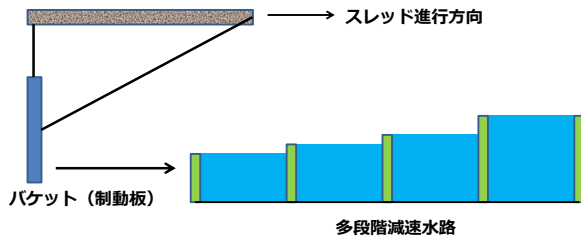


図7 多段階水路の概念図。各閉塞区間を仕切る緑の仕切板はスチロール製であり、バケットが突入することで破碎される。

5 走行プロフィール解析

JAXA リファレンス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が必須である。現在のところ、300 m 軌道では±5 m 程度で停止位置の予測が可能である。加速区間についてはロケットの推力カーブの再現性が良好である限り精度の高い予測が可能であるが、減速区間については前節で述べた水ブレーキの抵抗係数の誤差や水位設定誤差

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、上下限のオフノミナル推定が必要である。図8、図9は最高速 400 km/h に達するスレッドに対してノミナル推定された多段階水路の減速プロフィールと、実測のプロフィールである。

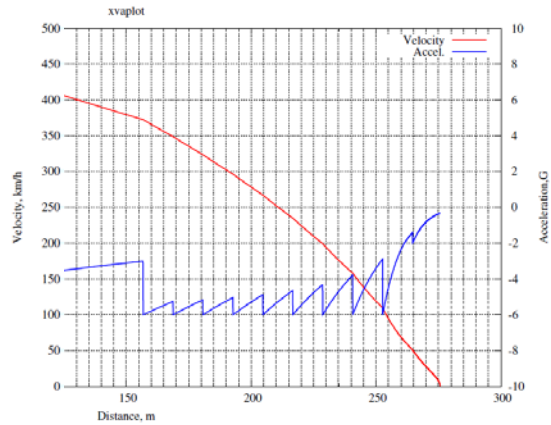


図8 多段階水路による減速プロフィール予測の例。赤線は速度（左軸）、青線は加速度（右軸）。

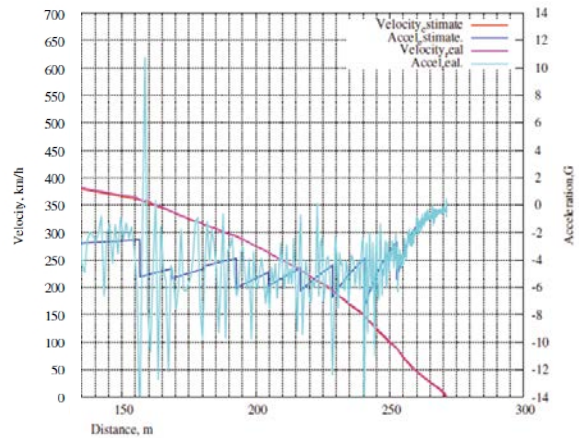


図9 上記のノミナル予測に対応する実走行データ。水色線が加速度センサより得られた加速度（右軸）、ピンクの線は加速度の積分値として得られる速度プロフィール（左軸）である。ピンクの線に速度プロフィールが一致するよう各水路区間での水制動係数を再フィッティングして得られた速度カーブと加速度カーブが赤線・青線。

図8は10段階の水位による制動により6Gでの準定常減速を狙った事前解析の例である。ノミナル推定他、水位誤差や空気抵抗・水抵抗係数誤差によるオフノミナル推定も行い、スレッドが300 mの軌道区間において許容 G の制約内で安全に停止

することを確認する。図9は走行後の事後解析であるが、加速度は振動成分を多く含むものの、積分・二回積分を行うと速度はほぼゼロになり、位置は実測の停止位置と誤差1 m程度ではほぼ一致する。図9の青線は水制動係数を再フィッティングして得られる加速度プロファイルであるが、初段～3段目での水位が狙いよりもやや小さめであったために減速Gが6 Gよりも小さくなったことが読み取れる。一方で、7～8段目では7 G程度の減速力がかかっている。

直線軌道であるため解析モデルは(2)式のようにごくシンプルであり、係数の正確な推定が重要である。

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

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。推力についてはハイブリッドロケットの場合には温度依存性があり、その補正が重要となる。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⁽²⁾。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5参照)レール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⁽¹²⁾。これについては前節で述べたとおりである。以下第三項について詳細に述べる。

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、先端形状や投影面積から空気抵抗係数 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、納得できるレベルでの一致を見ない。本学ではダミーペイロードを搭載した状態で台車を空走行させ、ロケット燃焼終了後・水制動区間突入前(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てプロファイル予測を行い本試験に臨んでいる⁽⁸⁾。フィッティングには(3)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ータとして最良推定を行った(図8)。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。図10の例では $C_{da}=0.95$ 程度と推定された。

$$M \frac{du}{dt} = -C_f N - \frac{1}{2} C_{da} \rho_a A_{sleed} u^2 \quad (3-1)$$

その一般解は

$$u = -\frac{k}{b} \tan \left(\frac{k(t-t_0)}{M} - \arctan \frac{bu_0}{k} \right) \quad (3-2)$$

ここで

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

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

である。

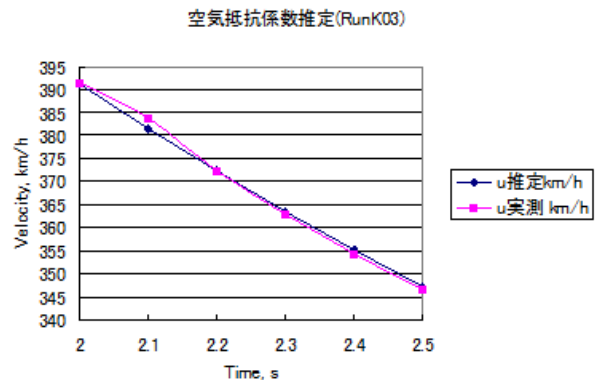


図10 空気抵抗係数のフィッティング推定

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、100 m/s で走行するスレッドを6 Gの減速加速度で停止させるためには初期ゲートの水位はわずかに18 mm程度でなければならないが、この場合わずか3 mmの水位誤差が1 Gの狂いとなって現れる。水路にはつなぎ目のリーク等もあるため、走行直前の実水位の正確な把握が不可欠である。

加速度センサにはCrossbow社CXL04GP3を用いており、データロガーにはMSR165または日置電機

メモリハイロガー8023 を用いている。データ収録系自身が 20 G 程度の加速度に耐える必要があり、加振試験によって事前に確認している。データは現在 100 Hz 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。

6 台車設計

図 1 1 は 2012 年度から投入された RS-702 型走行台車で幅 1590 mm、長さ 2030 mm のアルミ合金製である（搭載品を除く台車本体の寸法）。推進系・計測系を除く空虚重量は 72 kg であり初号機よりも大幅な軽量化を達成している⁽⁶⁾。MSC Patran / NASTRAN により構造解析を行い、静荷重試験によって解析の正当性を評価した。推進系の荷重伝達経路については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が、減速時にはバケット先端部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。設計当時の最大想定荷重 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 を乗じた荷重に耐える構造となっている。



図 1 1 RS-702 走行台車。全長 2 m、空虚重量 72 kg、耐加速度 10 G、制動板耐荷重 32 kN。

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 1 2 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。このような構造解析を経て削りこみを行い台車の軽量化を進める。台車幅や台車長さ・桁の本数などについては搭載品取り付けの観点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。

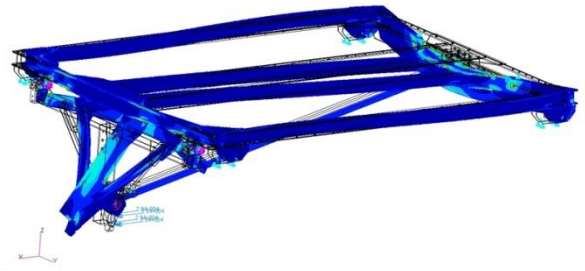


図 1 2 NASTRAN による構造解析の結果。カラーマップは左下部に水制動時の荷重が負荷された場合の Mises 応力。

構造解析の結果の妥当性を確認するため、図 1 3 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。実測値は解析による推定値の 80%~105%の範疇に収まり、ほとんどの箇所に必要な強度が確保されていると判断された。許容応力を上回ると判断された部分（上記の例では前部ビームと背後の垂直部材）は補強を行った。

また、1 シーズンの複数回の走行を経て各ビーム部やトラスピンの非破壊検査（探傷試験）を実施し、より疲労による亀裂等が無いか確認している。

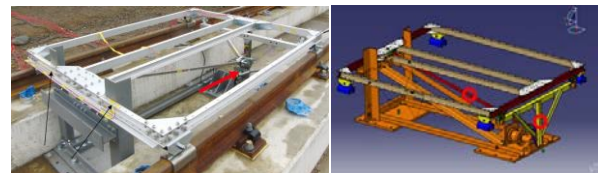


図 1 3 油圧ジャッキによる静荷重試験。左図の赤い矢印の部分に 1.5 トンの荷重を負荷した。

7 機上搭載天秤

スレッドに搭載し、空気抵抗を測定可能な機上天秤の開発と実証を進めている⁽³⁾。加速度により大きな慣性力の働く機上でこれに耐える秤量のロードセルを搭載すると微小な空気抵抗を測定する場合の測定精度が悪化する。そこで、空気抵抗を測定したい供試体と同重量のカウンターウェイトを搭載し、差分として検出される空気抵抗のみを測定できるような仕組みにしている。図 1 4 に示すような平行四辺形のリンク機構を有したロバーバル型についてサブスケール軌道での実証を重ねて

いる。風洞試験の如く 0.01 %クラスの精度は望めないが、1%程度の精度を有した天秤が実現すれば飛行試験前に簡便な実機搭載試験が可能であり、空力弾性効果や実レイノルズ数効果などの確認を行う上で有効である。サブスケール軌道では図 1 4 に示すような 10 cm 角平板を用い、風洞試験で得られる抗力係数とよい一致を見ている⁽¹³⁾。またフルサイズ軌道では胴体径 15 cm、全長 1.4 m 程度の AGARD-B モデルを用いた空力測定実験を実施している⁽³⁾。

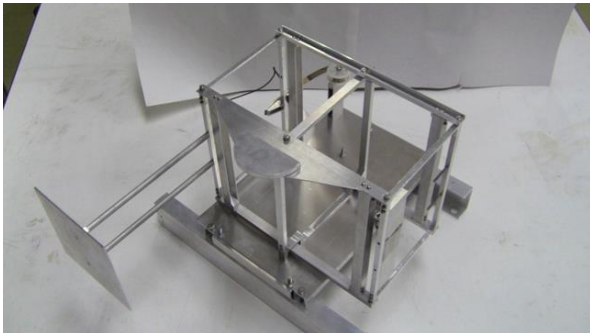


図 1 4 加速度補償型機上搭載天秤

8 まとめ

室蘭工業大学で敷設し、運用している高速走行軌道実験設備の概要と基盤技術実証について述べた。とりわけ、ハイブリッドロケットの採用、多段階水位による最適制動、加速度補償型天秤などは我が国独自の取り組みである。民間企業や他大学との共同利用も実施されており学内外で活用されている。

参考文献

- (1) Dornheim, H. J. McSpadden “The History of Hurricane Mesa Test Facility,” AIAA Paper 2004-3336
- (2) Daisuke Nakata, Ami Kozu, Jun Yajima, Kenji Nishine, Kazuyuki Higashino and Nobuhiro Tanatsugu, “Predicted and Experimented Acceleration Profile of the Rocket Sled,” JSASS Aerospace Technology Japan, Vol.

- 10, No. ists28, pp. Ta_1-Ta_5, 2012.
- (3) Daisuke Nakata, Kenji Nishine, Kaoru Tateoke, Kazuyuki Higashino, Nobuhiro Tanatsugu, “Aerodynamic Measurement on the High Speed Test Track,” Transactions of JSASS Aerospace Technology Japan, Vol. 12, No. ists29, pp. Tg_5-Tg_10, 2014.
- (4) Daisuke Nakata, Nobuhiro Tanatsugu, Kazuyuki Higashino, Ken Higuchi, Takeshi Tsuchiya and Takehiro Himeno, “Rocket Sled Track Facility as a Test Platform and Launch Assist of Space Planes,” Ground Based Space Facility conference, Paris, France, 2013.
- (5) 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 2012, Nashville, Tennessee, U.S.A., 2012.
- (6) 中田大将, 樋口 健, 棚次亘弘, 東野和幸: ロケットスレッドの構造設計について, 日本航空宇宙学会・日本機械学会共催 第 55 回構造強度に関する講演会, JSASS-2013-3012, 2013.
- (7) 棚次亘弘, 東野和幸, 樋口 健, 中田大将, 姫野武洋, 渡邊力夫: 高速走行軌道試験設備, 日本航空宇宙学会第 44 期年会講演会, 2013.
- (8) 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: 高速走行軌道実験設備の高速度化, 高加速度化, 平成 24 年度宇宙輸送シンポジウム, 2013.
- (9) 中田大将, 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.
- (10) 側原圭太, 加藤優一, 松岡健, 笠原次郎, 松尾亜紀子, 船木一幸, 中田大将, 東野和幸, 棚次亘弘: 高速走行軌道装置における回転デトネーションエンジン滑走試験に関する研究, 平成 25 年度宇宙輸送シンポジウム, 2014.
- (11) 渡辺豪, 渡邊力夫, 中田大将, 東野和幸, 棚次亘弘: 高速走行軌道装置を用いた水/液体窒素ロケットの稼働試験, 第 56 回宇宙科学技術連合講演会, 2012.
- (12) 友常雄太郎, 姫野武洋, 渡辺紀徳, 中田大将, 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.
- (13) 小倉達也: ジェットスレッド搭載用加速度補償型抗力測定天秤の設計と精度評価, 第 52 回飛行機シンポジウム, 2014.