

宇宙航空研究開発機構研究開発報告

JAXA Research and Development Report

航空機地上走行モデルの高度化

新川 智子, 船引 浩平, 野嶋 琢也, 山路 拓郎

2008年2月

宇宙航空研究開発機構
Japan Aerospace Exploration Agency

宇宙航空研究開発機構研究開発報告

JAXA Research and Development Report

航空機地上走行モデルの高度化

Advanced Aircraft Ground-Roll Model

新川 智子^{*1}, 船引 浩平^{*2}, 野嶋 琢也^{*3}, 山路 拓郎^{*4}

Tomoko SHINKAWA^{*1}, Kohei FUNABIKI^{*2}, Takuya NOJIMA^{*3} and Takuro YAMAJI^{*4}

- * 1 航空プログラムグループ 国産旅客機チーム（現：三菱プレシジョン株式会社）
Civil Transport Team, Aviation Program Group (Mitsubishi Precision Corporation)
- * 2 航空プログラムグループ 国産旅客機チーム
Civil Transport Team, Aviation Program Group
- * 3 総合技術研究本部 飛行システム技術開発センター
Flight Systems Technology Center, Institute of Aerospace Technology
- * 4 三菱重工業株式会社
Mitsubishi Heavy Industries

2008年2月

February 2008

宇宙航空研究開発機構

Japan Aerospace Exploration Agency

目 次

1. はじめに	1
2. 地上走行モデル	2
2.1 概要	2
2.2 タイヤ特性モデル	2
(1) 地面反力.....	2
(2) 摩擦力.....	3
(3) 横力（コーナリング力）	3
2.3 ストラット特性モデル	3
2.4 ステアリング特性モデル	3
2.5 タイヤ回転運動モデル	3
2.6 計算結果	4
3. Do228機による地上走行実験	4
3.1 概要	4
3.2 実施時期／場所	4
3.3 実験内容	5
(1) 高速度カメラによる計測.....	5
(2) その他の計測.....	6
3.4 実験結果	6
(1) 離陸／着陸時の走行データ.....	6
(2) 接地時のタイヤ回転状況.....	6
(3) 減速時（ブレーキ使用）のタイヤ回転状況.....	11
(4) 得られた成果.....	11
4. おわりに	11
5. 参考文献	11
付録1 タイヤ特性モデル（抜粋）	12

航空機地上走行モデルの高度化*

新川 智子^{*1}, 船引 浩平^{*2}, 野嶋 琢也^{*3}, 山路 拓郎^{*4}

Advanced Aircraft Ground-Roll Model*

Tomoko SHINKAWA^{*1}, Kohei FUNABIKI^{*2}, Takuya NOJIMA^{*3} and Takuro YAMAJI^{*4}

Abstract

As a part of cooperative research program between Japan Aerospace Exploration Agency and Mitsubishi Heavy Industry for future civil transport program, authors have been developing display and control system application for ground handling quality improvement. For the research and development on this application, a precise ground roll simulation model was required. Therefore a real-time- simulation model including rotation motion of tire that is based on NASA TR-64, was developed. Furthermore, validation of the model, a series of ground-roll and flight test using a research airplane was conducted. Retrieved data of tire rotation and aircraft motion shows good correlation with the data from simulation model.

keywords: Ground-Roll Model, Flight Simulation

概 要

JAXAでは国産旅客機の開発を踏まえ、MHIとともに地上走行時の操縦性や安全性、経路の追従性を向上させる制御系・表示系システムの試作／評価を行ってきた。一方、本研究を進めるにあたって、開発及び評価フェーズにおいて、より模擬精度の高い地上走行モデルを組み込んだ航空機のリアルタイムシミュレーション環境が必要であった。そこで、本研究のため、さらには一般的な走行シミュレーションにおける数学モデル精度の向上のために、航空機のタイヤモデルを紹介したNASA TR R-64¹⁾をベースとし、タイヤの回転運動モデルを組み入れて模擬精度や汎用性を高めた新しい地上走行モデルを開発した。さらに、この地上走行モデルの評価／検証データを収集するためにJAXAの実験用航空機MuPAL- α (Dornier228-202) による地上走行実験を行い、速度、加速度などの走行データに加えて高速度カメラによるタイヤの高周波な挙動映像及びデータを計測した。これら一連の取り組み及び得られた成果について報告する。

1. はじめに

宇宙航空研究開発機構 (JAXA) では、民間航空機開発事業の進展及び国際競争力に資するため、環境適応型高性能小型航空機の研究開発の一環として、三菱重工との共同研究を実施している。この研究テーマの一つである先進地上走行システムに関する研究として、地上走行時の操縦性や安全性、経路の追従性を向上させる制御系・表示系の試作／評価を行い、従来の地上走行システムの向上に取り組んでいる。一方、本研究を進める

にあたって、開発及び評価フェーズにおいて、より模擬精度の高い地上走行モデルを組み込んだ航空機のリアルタイムシミュレーション環境が必要不可欠であった。しかし、航空機のリアルタイムシミュレーションに使用されている一般的な地上走行モデルは、Z方向の運動特性はタイヤ・脚特性を各脚ごとに1組のバネ・ダンパ系モデルで、X方向及びY方向の運動特性はタイヤ特性を考慮していない簡易モデルで処理していることが多く、使用する地上走行モデルの評価や高度化が要求された。

そこで、本研究のため、さらには一般的な走行シミュレーション

* 平成19年12月11日受付 (received 11 December 2007)

*1 航空プログラムグループ 国産旅客機チーム (現：三菱プレシジョン株式会社)
(Civil Transport Team, Aviation Program Group (Mitsubishi Precision Corporation))

*2 航空プログラムグループ 国産旅客機チーム (Civil Transport Team, Aviation Program Group)

*3 総合技術研究本部 飛行システム技術開発センター (Flight Systems Technology Center, Institute of Aerospace Technology)

*4 三菱重工業株式会社 (Mitsubishi Heavy Industries)

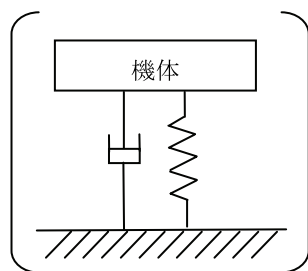


図1 一般的な脚モデル

シミュレーションにおける数学モデル精度の向上のために、航空機のタイヤモデルを紹介したNASA TR R-64¹⁾をベースとし、タイヤの回転運動モデルを組み入れて模擬精度や汎用性を高めた新しい地上走行モデルの開発に着手した。さらに、この地上走行モデルの評価／検証データを収集するためにJAXAの実験用航空機MuPAL- α (Dornier228-202) による地上走行実験を行い、速度、加速度などの走行データに加えて高速度カメラによるタイヤの高周波な挙動映像及びデータを計測した。計測結果より、タイヤの回転運動における振動周期や減衰係数等の特性データを得ることができた。さらに得られた走行時の機体応答データを使って開発した地上走行モデルの各パラメータ調整を行うことで、開発当時、発散傾向にあったタイヤの回転特性が安定し、実現象に近い応答性を得ることができた。これら一連の取り組み及び得られた成果について報告する。

2. 地上走行モデル

2.1 概要

今回開発した地上走行モデルは主にストラット部（ストラット特性モデル）、タイヤ部（タイヤ特性モデル／ステアリング特性モデル）で構成される。（図2）ストラット特性モデルは主にショック・アブソーバによる空気バネ特性と油圧ダンパ特性を処理し、タイヤ特性モデルは各タイヤ諸元及びNASA TR R-64によるタイヤモデルにより、歪み量に対する地面反力特性、タイヤ・ヨー角（進行方向とタイヤの回転方向とのなす角）による横力特性などを処理する。ステアリング特性モデルはSteer-by-Wireシステムにおけるパイロット操作に応じたステアリング角を処理する。

さらに、各タイヤのスリップ比を算出するため、タイヤ、ホイール、ブレーキ等一式を円柱型剛体としたタイヤの回転運動モデルを組み入れている。この地上走行モデルの構成及び主な処理の流れを図3に示す。

2.2 タイヤ特性モデル

各航空機に装備されているタイヤの形状、構造、強度、タイヤ空気圧等は各機各様であるが、一般的に航空機に

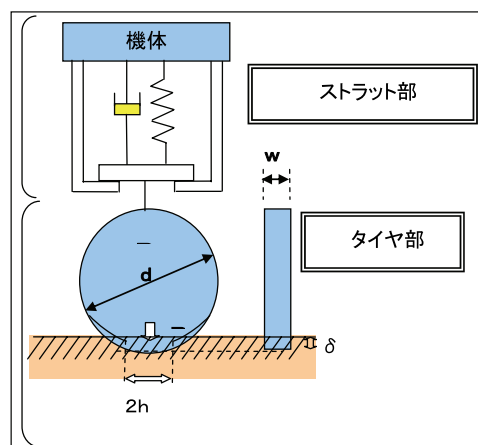


図2 開発した地上走行モデル

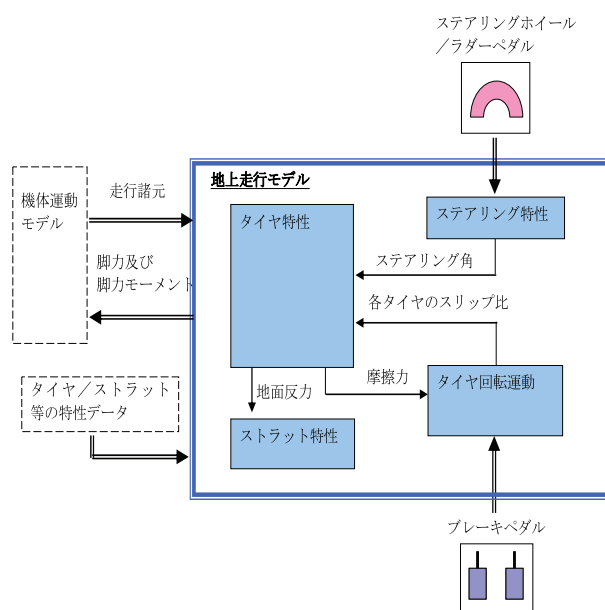


図3 地上走行モデルの構成

使用されているタイヤは数種のタイプ（Type I ～）に分類される。

NASA TR R-64¹⁾ではType I, III, VIIの各タイヤの特性モデル（ここではNASA TR R-64モデルと呼ぶ）が紹介されている。NASA TR R-64モデルでは各タイヤのタイヤ径、幅等の一般的なタイヤ諸元データを与えることで各タイプのタイヤ特性を得ることができるため、これをタイヤ特性モデルとして組み込むことで、航空機の機種に依存しない汎用性の高い航空機の地上走行モデルを構築した。以下に本モデルによる各模擬項目の処理概要を示す。（詳細は付録1を参照のこと）

(1) 地面反力

機体の位置、姿勢、タイヤ取り付け位置等からタイヤの縮み量を求め、各縮み量に対する地面反力を算出す

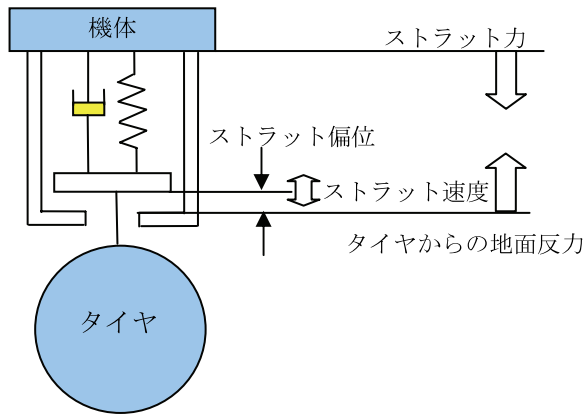


図4 ストラット特性モデル

る。なお、減衰特性は従来の簡易ダンパ・モデルとした。

(2) 摩擦力

静止時の摩擦モデルと回転時の摩擦モデルを各々生成し、機体の状況により切り替えて処理する。さらに回転時の摩擦力は動摩擦による項と、スリップにより発生する項に分けてモデル化している。

(3) 横力（コーナリング力）

機体の進行方向とタイヤの接地方向とのなす角度（ここではタイヤ・ヨー角と呼ぶ）からタイヤの横方向に発生する力を算出する。

従来の航空機では低圧タイプのTYPE III又は高負荷対応タイプのTYPE VIIが使用されていたが、最近の航空機では、新たに高負荷、高スピード対応として開発されたThree Part Typeが使用されている。本モデルにThree Part Typeのタイヤ特性を組み込むことは今後の課題である。

2.3 ストラット特性モデル

ストラット力はショック・アブソーバによる空気バネ力と油圧ダンパによるダンパ力からなり、タイヤ地面反力があるしきい値を越えた状況において作動する。ストラット特性モデルを図4に示す。

2.4 ステアリング特性モデル

ステアリング特性モデルにおいて、地上旋回時のパイロット操作デバイスはステアリングホイール及びペダルとし、電気信号によるステアリング制御システムを想定している。パイロット操作量に対するステアリング角のサーボ・コマンド値には、機体速度に対するスケジューリング制御則が組み込まれており、また、油圧サーボによるステアリング角の駆動速度に制限がかかる構造となっている。

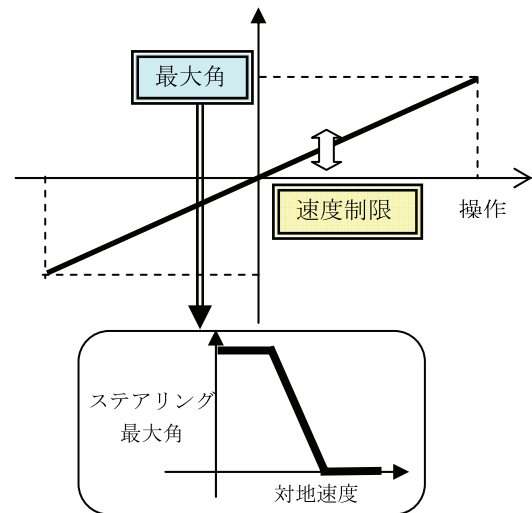


図5 ステアリング制御

r : タイヤ半径
 ω_0 : 機体速度（タイヤ回転速度に換算）
 ω : タイヤ回転速度
 I : タイヤの慣性モーメント
 T : 回転トルク

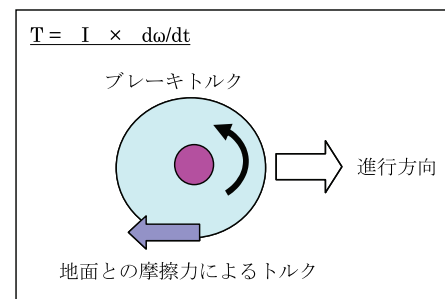


図6 タイヤの回転運動モデル

2.5 タイヤ回転運動モデル

タイヤ回転運動はタイヤを円柱型剛体としてモデル化している。（図6）

回転トルク T は地面との摩擦力（動摩擦／静摩擦）により発生するトルク（ここでは摩擦トルクと呼ぶ）とブレーキペダル操作による制動トルクからなる。慣性モーメント I はタイヤ諸元として設定する必要があるが、NASA TR R-64モデルにて各タイヤタイプの代表的な値がタイヤ径の関数として与えられているのでこれを使用することも可能である。

ここで走行実験による計測結果より、タイヤに外力（トルク）が発生すると弾性変形を起しながらタイヤは回転周期近傍の周期で回転振動し減衰することが確認された。これによりタイヤの回転運動モデルには、タイヤの弾性変形の影響として、接地点で発生した摩擦力が



図7 研究用飛行シミュレータFSCAT-A

タイヤの回転トルクとして作用するまでの時間遅れとトルク減衰の項を付加した。

ここで、同タイミングで前後方向に加速度変動（摩擦力変動）が発生しており、これは摩擦力がスリップ比の関数であることから、スリップ比自体が同様な周期で変動していることを意味している。従って、スリップ比の変動周期が計測データと同様にタイヤの回転周期近傍になるよう時間遅れとトルク減衰の項のパラメータ（時定数、減衰係数）を調整した。

なお、スリップ比は以下の式により計算され、タイヤ特性モデルにおける摩擦力及びコーナリング力の処理に使われている。

$$\text{スリップ比} = \frac{\mathbf{r}\omega_0 - \mathbf{r}\omega}{\mathbf{r}\omega_0} \quad (1)$$

2.6 計算結果

今回開発した地上走行モデルをFokker 100運動モデル（双発ジェット旅客機の非線形モデル）に組み込み、JAXAの研究用飛行シミュレータFSCAT-A（図7）を使って走行シミュレーション（計算周期：100Hz）を行った。なお、タイヤの種類及び形状、ストラット特性データ等の走行諸元データはFokker 100の実機データを使用しているが、厳密なモデルや特性データが得られないタイヤの回転運動特性や機体の弾性による影響などは、本モデルを評価／検証するために実施したJAXAの実験用航空機による走行実験より得た実機データにより改善を図っている。

このようなシミュレーション環境下において離着陸及び地上走行を行った結果、通常手順による離陸、着陸操作、地上におけるエンジンパワー及びブレーキ操作による速度制御、ステアリング・ホイール操作による方向制御など基本的な走行操作を違和感なく行うことができたことを確認した。主要な走行諸元の出力結果例を図8に示す。

本モデルでは、図8に示すとおり様々な走行状況にお

ける前輪及び左右主輪の各ストラット及びタイヤ偏位量を計算している。

各変位量は、離陸操作時の増速にともない徐々に減少し、着陸時の接地直後急激に増加して地面との衝撃を緩和したのち反動で一度減少し、その後減速にともない徐々に増加している。機体には、これらの変位量に応じた地面反力、摩擦力、各モーメントが生じており、これにより各走行状況に応じた加速度が発生している。

また、タイヤ回転運動の過渡応答特性はMuPAL- α による走行実験で得た、接地衝撃直後の走行データを分析した結果を反映し、応答周期はおおよそ接地速度でのタイヤの回転周期、減衰特性は衝撃後0.5～1.0秒程度で収束する特性としている。

3. MuPAL- α による地上走行実験

3.1 概要

今回開発した地上走行モデルの評価／検証データを得るため、及び地上走行時の操縦性や安全性、経路の追従性を向上させる制御系・表示系試作のための設計用データ収集のため、JAXAの実験用航空機MuPAL- α による地上走行実験を行い、接地時、減速時、走行時、停止時、始動時における各走行諸元データ及びタイヤの回転状況を計測した。タイヤの回転運動の過渡応答特性については、接地後タイヤの回転数が徐々に増加し機体速度に相当する回転数に収束する（図9）と考えられるが、そのときの応答周期、減衰特性など不明な点が多く、これらを特性を把握することを目的とした。

そのため、タイヤの回転運動の過渡応答特性を計測するために、高速な回転挙動が計測できるよう2台の高速カメラを接地点近辺に配置しタイヤの回転状況を撮影した。

なお、事前に計測した約70ktでの着陸接地時の走行データ（約20Hzで収集）では、接地直後、前後方向の加速度が、周期約60msで振動し、約0.5秒で収束していた。（図10）

これは、接地後タイヤの回転速度が変動し、路面に対して振動的にスリップしたことにより生じた摩擦力がこの加速度が発生させている可能性を示していた。そこで、本実験では録画速度が1000フレーム／秒の高速カメラを使って接地直後のタイヤの回転状況を撮影し、タイヤと路面との実際のスリップ状況及び摩擦力の発生状況などを計測した。

3.2 実施時期／場所

時期：2006年5月22日～25日

場所：大樹町多目的航空公園

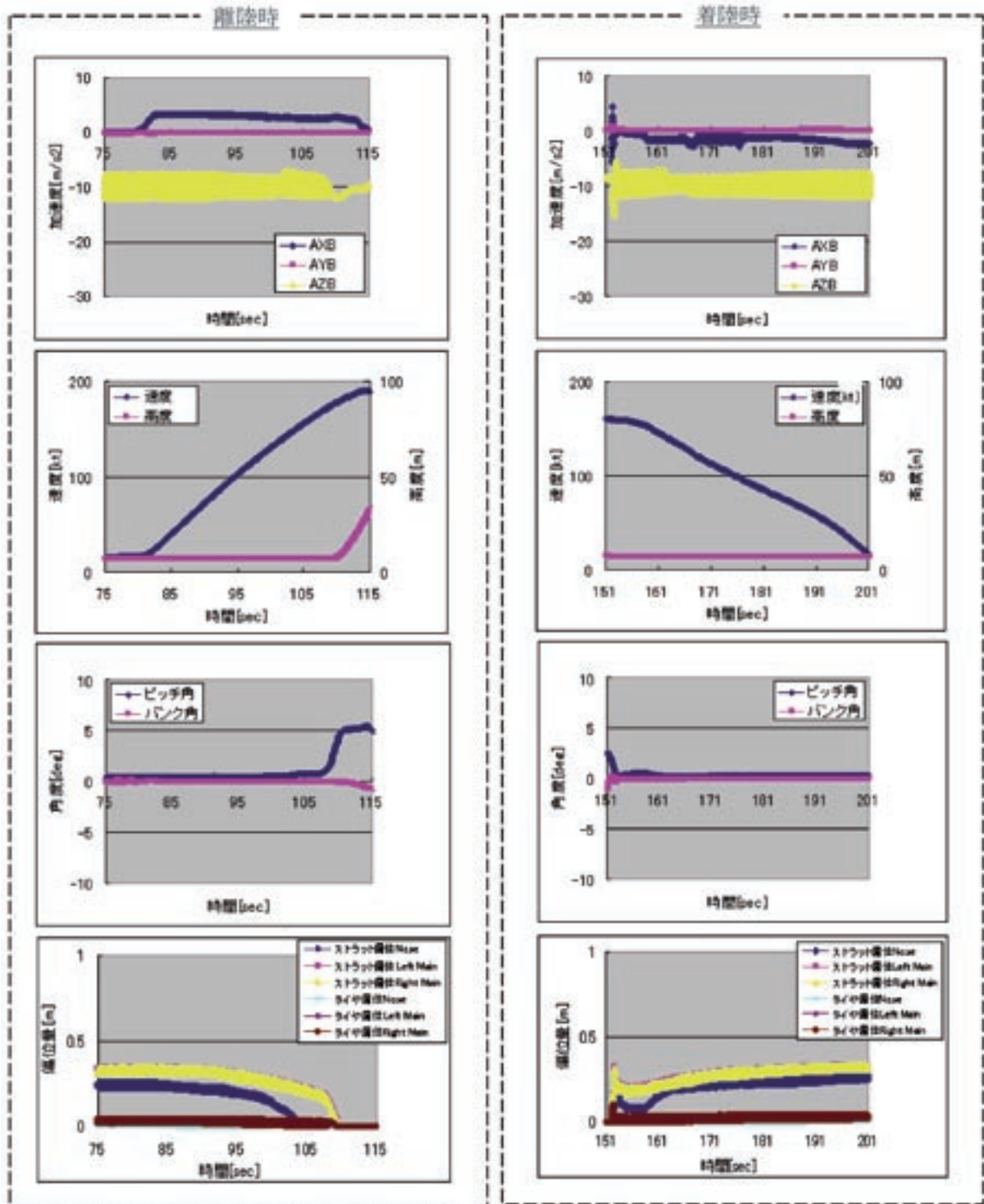


図8 地上モデルによる離陸／着陸時の走行データ例（計算結果）

3.3 実験内容

(1) 高速度カメラによる計測

着陸接地時、減速時（約20kt近辺）及び停止時における機体の動き及びタイヤの回転状況を高速度カメラで撮影する。なお、予め高速画像解析用マーキングを左右のメインタイヤ、重心位置等にペイントしておく（図

11）。実験の状況を図12に示す。

使用した高速度カメラの性能は以下のとおり。

高速度カメラの性能

製品名：MotionXtra HG-100K

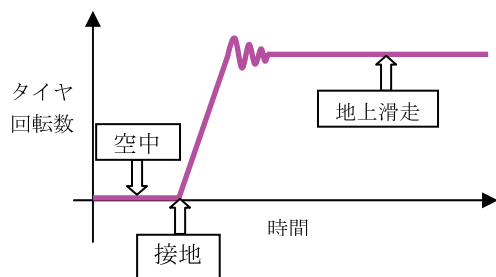


図9 接地時のタイヤ回転状況（イメージ図）

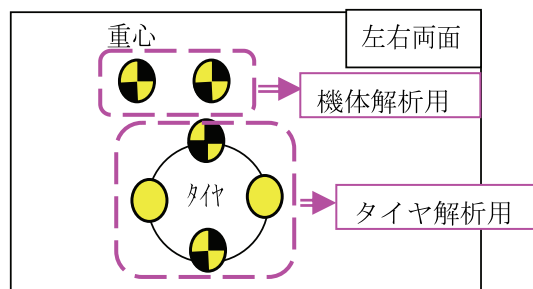


図11 高速画像解析用マーキング

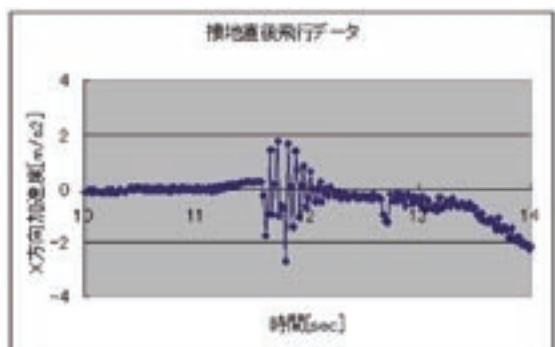


図10 接地時のX方向加速度

解像度：1504×1128ピクセル

録画時間：2秒（設定による）

録画速度：1000フレーム／秒（フルフレーム）

(2) その他の計測

機体に搭載されている飛行／走行データ計測システムによる加速度、速度、姿勢などの走行諸元データ計測、ワイヤーエンコーダ及び踏力計によるブレーキペダル操作量／操作力計測を行った。

3.4 実験結果

(1) 離陸／着陸時の走行データ

機体に搭載されている計測システムにより収集した、離陸／着陸時の高度、速度、加速度及び姿勢データを図13に示す。加速度データ（ A_x , A_y , A_z ）より、接地の衝撃は約0.5sec程度で収束していること、接地直後前後左右に50～60msec程度の周期をもつ振動的な力が加わっていることがわかる。

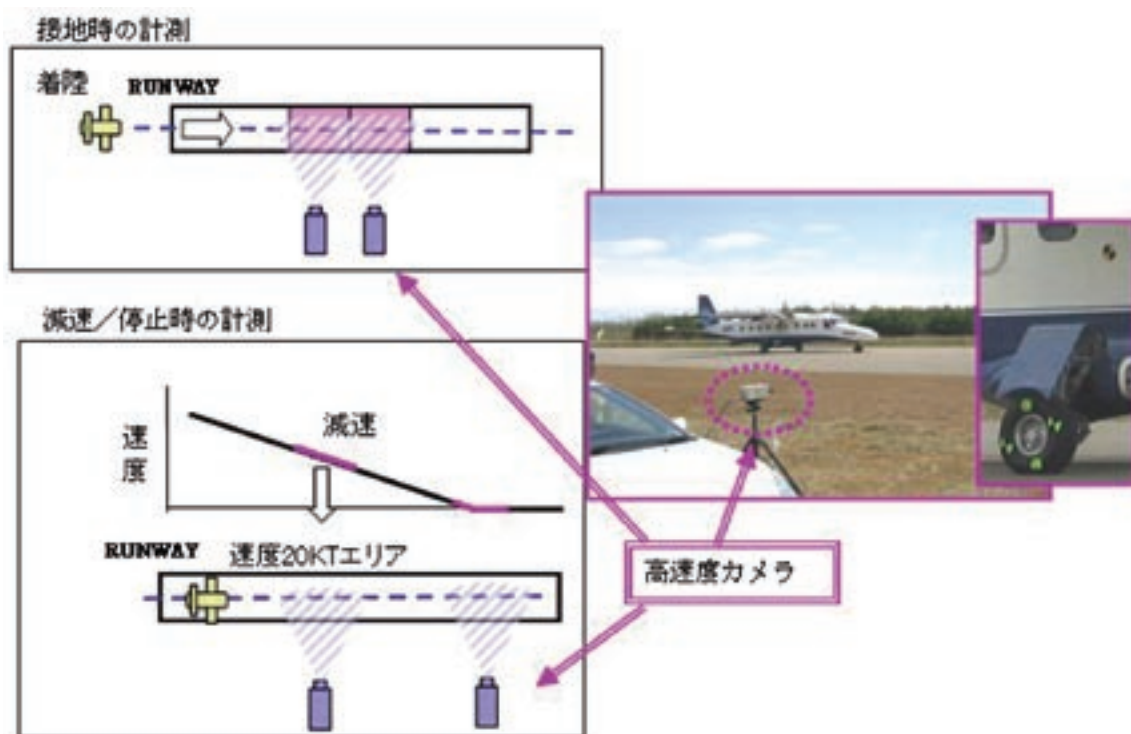


図12 高速カメラによる撮影

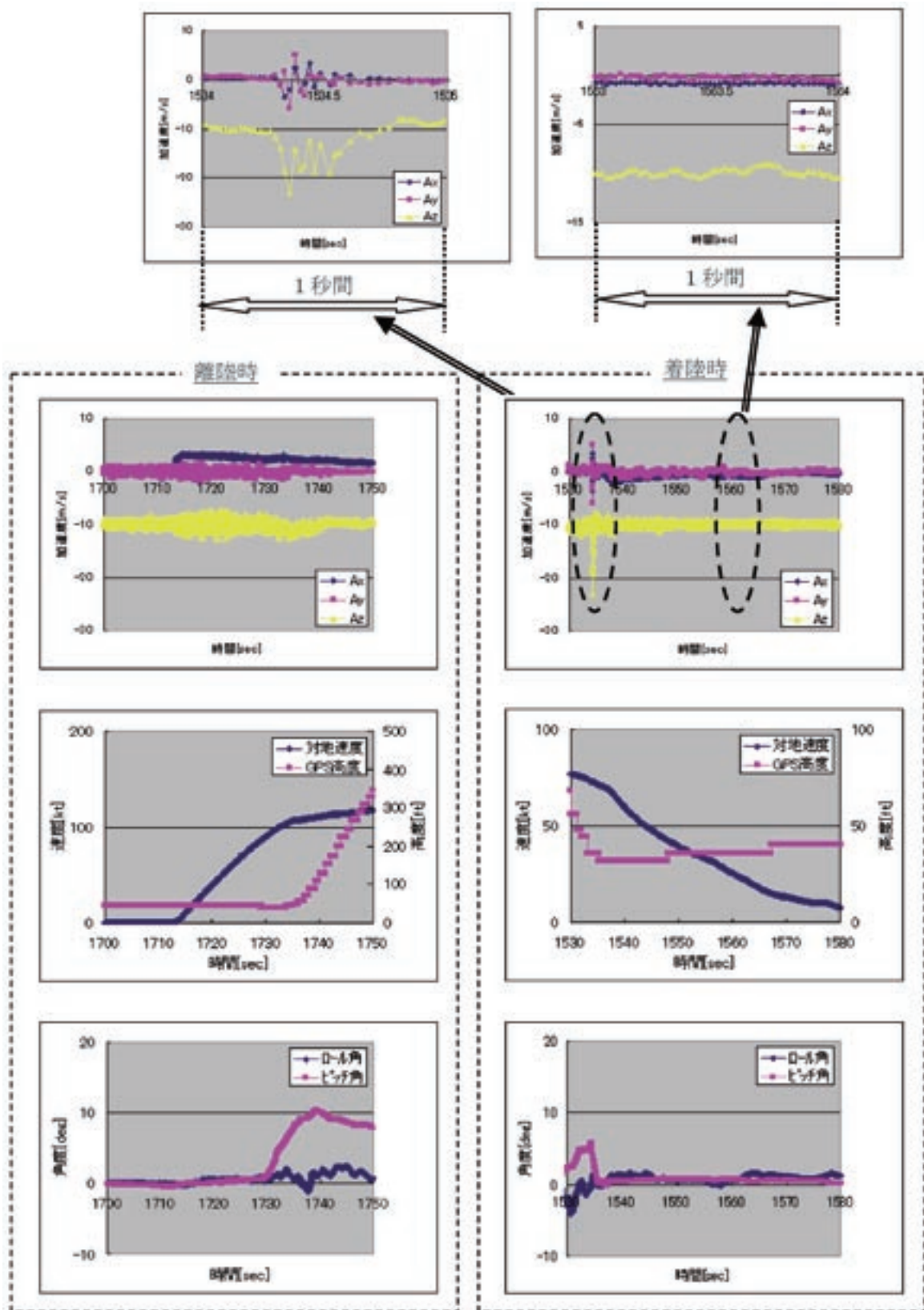


図13 MuPAL-α 離陸／着陸時の走行データ例

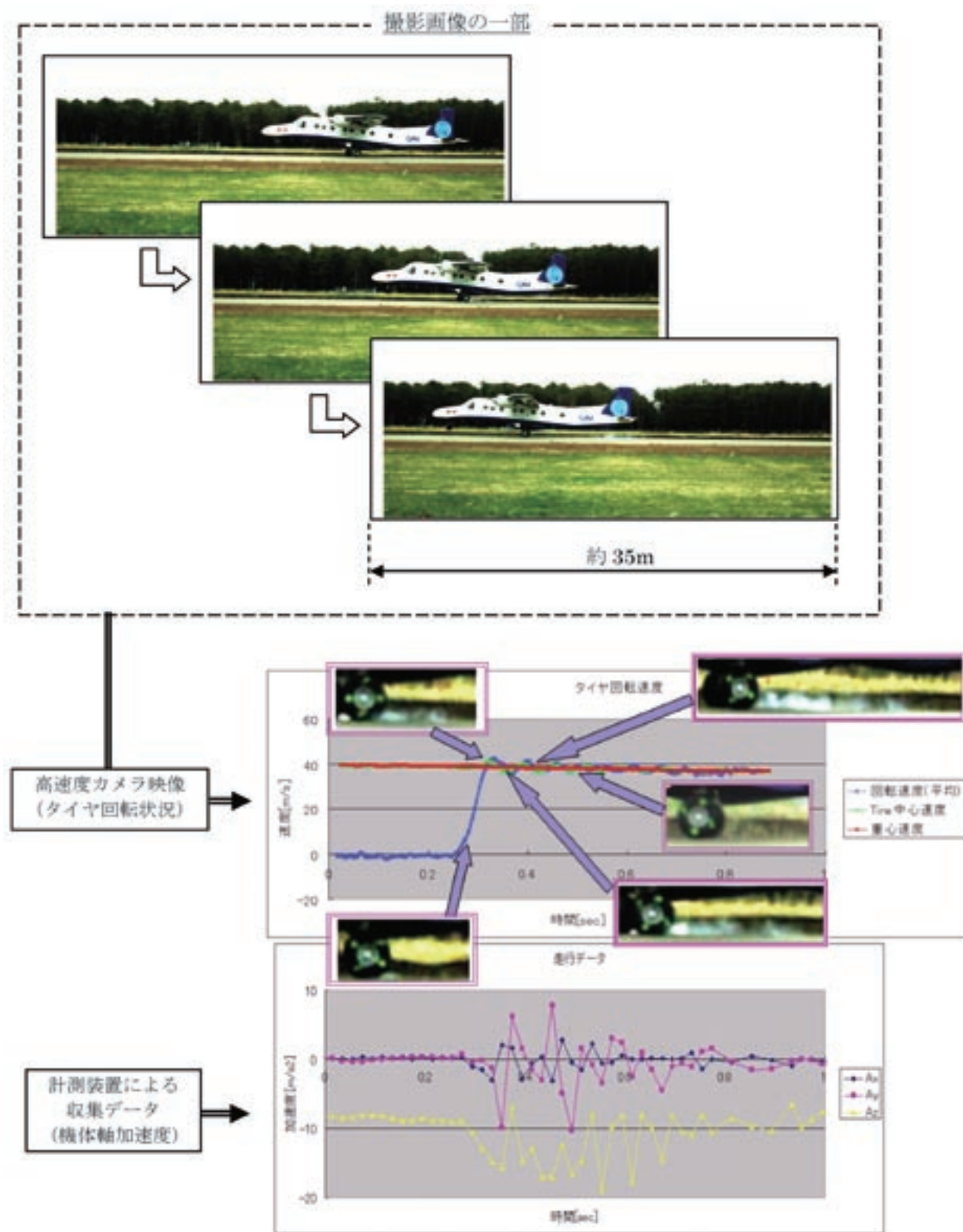


図14 接地時のタイヤ回転状況1

(2) 接地時のタイヤ回転状況

約80ktで接地時、約1秒間のタイヤの回転状況を高速カメラ(1000Hz)で撮影した画像及び計測システムから収集した走行データを解析した結果を図14及び図15に示す。

高速カメラによる撮影画像より、接地後タイヤは回転を徐々に増加させながら0.5秒程度、数回のオーバーシュート(振動)したのち機体速度に収束していることが確認でき、さらに計測システムにより収集した加速度データより、このタイヤの回転状況と連動して前後方向

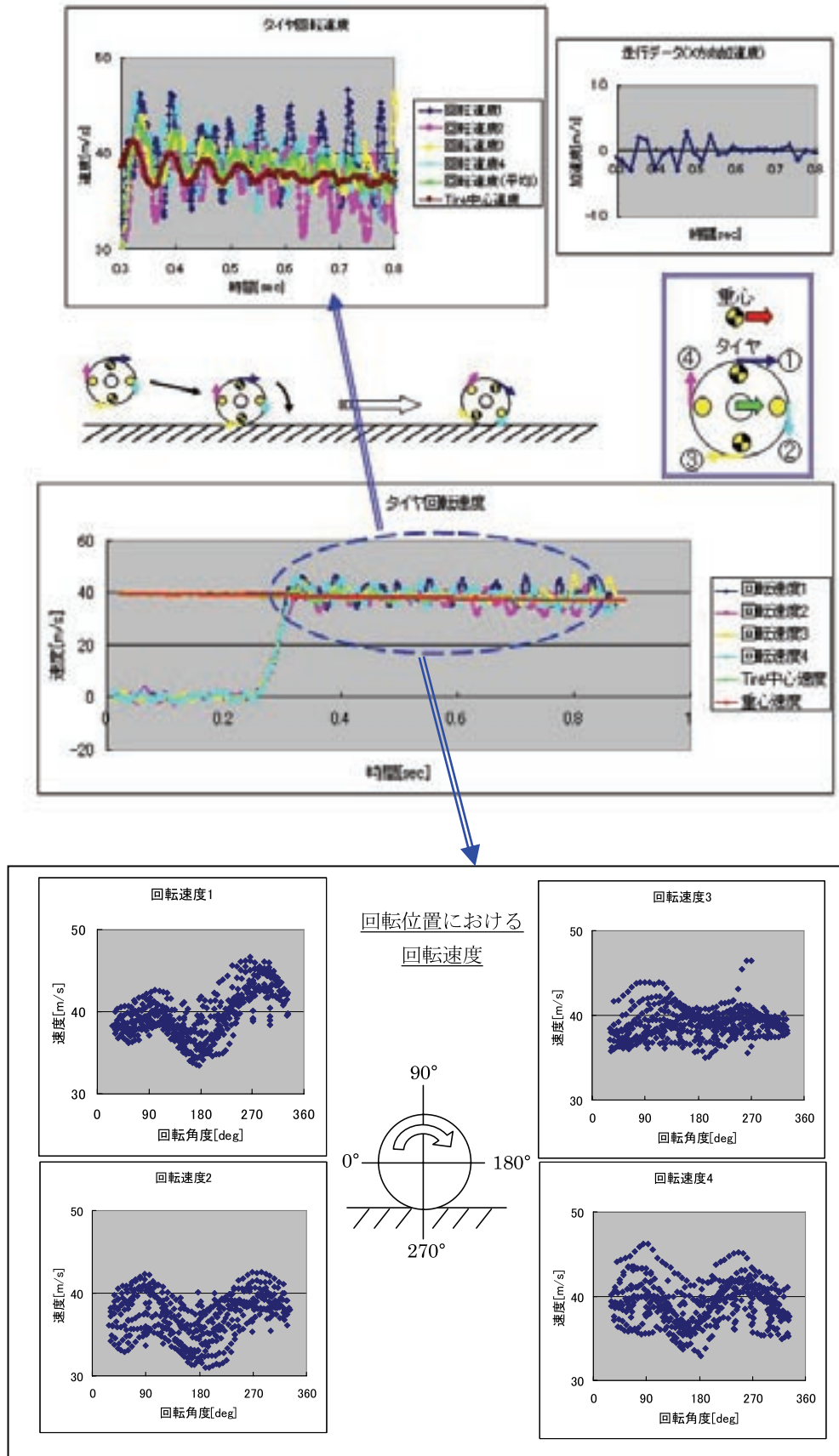


図15 接地時のタイヤ回転状況2

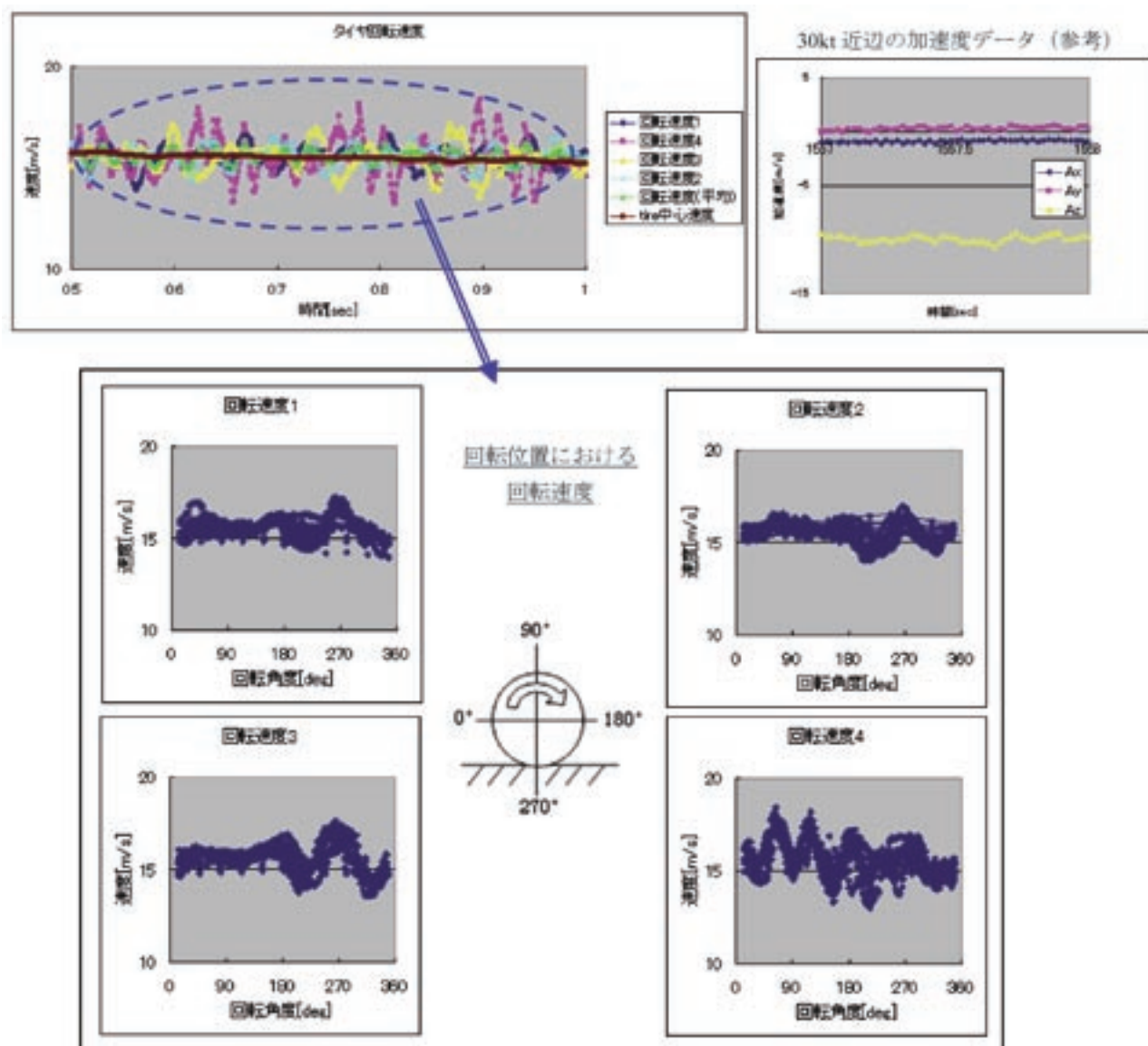


図16 減速時（ブレーキ使用）のタイヤ回転状況

に加速度が発生していることがわかった。従って、接地後タイヤは地面に対して前後にスリップし、これにより振動的な摩擦力が発生していると考えられる。これは、同タイミングで、タイヤと路面との接触面において断続的に白煙が発生していることから言える（図14）。

さらに、接地直後のメインタイヤの円周まわりの4点位置（90deg間隔）の回転速度及びタイヤ中心位置の前後方向速度の変動は、接地後タイヤの回転速度が増加し数回オーバーシュートするまで、各位置はすべてほぼ同じ位相で振動しているが、その後各4点位置での回転速度は各々位相のずれを起こしながら振動し続けており収束傾向は見られない。しかしタイヤ中心位置の速度は機体速度に収束しており、さらに4点位置の平均速度はタイヤ中心位置の速度とほぼ同タイミングで振動しながら収束している。そしてこの変動が機体の加速度デー

タの振動とほぼ一致していた。また、路面に対する相対位置（接地位置を270°とし、回転方向に0°、90°、180°）とタイヤ回転速度の関係を分析すると、接地位置（270°）で速度が最大、接地直前位置（180°）で速度が最小になる傾向があり両者には明らかに相関が見うけられる（図15）。

これらの分析結果より、タイヤは路面からの摩擦力により1サイクル／1回転の弾性変形を起こしながら回転しており、この状況下でタイヤ全体が機体に対して前後方向に振動しているため、この振動周期はタイヤの回転周期に近いと考えられる。実際に接地直後のタイヤの回転変動の周期は約50～60msecであり、タイヤの回転周期（回転半径0.3m、速度40m/sで約50msec）とほぼ一致している。

(3) 減速時（ブレーキ使用）のタイヤ回転状況

ブレーキを使用して減速中の約30ktでのタイヤの回転状況を高速カメラ（1000Hz）で撮影した。この画像を分析した結果を図16に示す。路面に対する相対位置とタイヤ回転速度の関係を分析すると、接地時のタイヤ回転状況と同様に接地位置（270°）で速度が最大、接地直前位置（180°）で速度が最小となる傾向はあるが、各位置での回転速度のバラツキは接地時の状況と比較すると小さいことがわかる。この状況ではタイヤに地面からの摩擦力により発生するトルクと、ブレーキ操作によって発生する制動トルクが作用していると考えられる。地面からの摩擦力は接地点で作用するが、ブレーキ力は車輪と一緒に回転するディスクロータをブレーキパッドにより押さえつけることによって発生する摩擦力により作用しており、タイヤの円周方向に均一にブレーキトルクが発生するため、接地直後の状況と比較するとタイヤの弾性変形が小さい。このため、回転変動、すなわち路面に対するスリップ変動が小さく、前後方向の摩擦力（加速度）の変動も小さいと考えられる。

(4) 得られた成果

今回実施した地上走行実験により、厳密なモデルや特性データが得られない走行運動の特性について次に示すようなデータを得ることができた。

- (1) タイヤの回転数は、接地後増加し50～60msec程度で機速に達する。なお、この過渡時間はタイヤの回転周期（約50msec）と概ね一致している。
- (2) オーバーシュート時の最大変位量は機速に対して10%程度である。
- (3) オーバーシュート後、3,4回程度の振動の後、または接地後0.5秒程度経過後に収束する。なお、振動周期はタイヤの回転周期（約50msec）と概ね一致している。
- (4) 接地直後、前後方向に振動的な力（加速度）が発生しており、この振動状況と、タイヤの回転数と機体速度から算出されるスリップ比の振動状況は概ね一致している。
- (5) 接地直後、左右方向にも振動的な力（加速度）が発生しており、その振動周期はタイヤの回転周期（約50msec）と概ね一致している。
- (6) 接地直後、垂直方向に最大2G程度の加速度が発生しており、最大加速度に達するまでの経過時間は70msec程度。その後数回振動したのち、0.5秒程度経過後1Gに収束する。そのときの振動周期は50～60msec程度と推定される。
- (7) ブレーキを使用した減速時には、タイヤの回転数の変動及び前後方向の力（加速度）変動は小さい。

4. おわりに

今回開発した地上走行モデルは、NASA TR R-64^{*1)}で紹介されているタイヤモデルやタイヤの回転運動モデルを組み込むことで、比較的基本的なタイヤ形状データやストラット特性データ等を設定するだけで、航空機の走行シミュレーション環境を提供することができる。また、実験用航空機による地上走行実験より得たタイヤの回転状況に関する高周波な撮影画像や走行データより、不確定要素が多かったタイヤの回転運動特性（過渡応答特性）や摩擦力に対する機体応答等に関する特性についても改善されている。

さらに、本モデルを実験用飛行シミュレータFSCAT-Aに組み込み、地上走行時の操縦性や安全性、経路の追従性を向上させる制御系・表示系システムの試作／評価を実施するための、従来より高精度で汎用性の高い地上走行リアルタイムシミュレーション環境を提供している。

ただし、特定の機体の走行性能及び特性を厳密にシミュレートするためには各設定パラメータを実機データに合わせて調整する必要がある、またモデル自体の改善が必要となる可能性もある。

今後は、地上走行に関する各研究において、さらには様々な用途でこの地上走行モデルによる地上走行シミュレーション環境を提供しながら、本モデルを継続して改善するべきだと考えている。

なお、地上走行実験にあたり、高速カメラの運用と解析、ならびに実験実施について航空プログラムグループ運航・安全技術チームの、実験用航空機の運用と計測について総合技術研究本部飛行システム技術開発センターの支援をそれぞれ受けたことを付記する。

5. 参考文献

- [1] Robert F. Smiley and Walter B. Horne, 1960, Mechanical Properties of Pneumatic Tires with Special Reference to Modern Aircraft Tires. TR R-64, NASA
- [2] Steve H. Goldthorpe, Alan C. Kemik, Larry S. McBee, and Orv W. Preston, 1995, Guidance and Control Requirements for High-Speed Rollout and Turnoff (ROTO) CR-195026, NASA
- [3] FSF ALAR Briefing Note, 2000, 8.5-Wet or Contaminated Runways
- [4] ICAO, 2004, Aerodromes, Annex 14

付録1 タイヤ特性モデル（抜粋）

NASA TR R-64モデルをベースとして開発したタイヤ特性モデル（抜粋）を以下に紹介する。使われている主なパラメータを図A1に示す。

タイヤモデルの座標系は回転方向をX方向，地面に対して垂直方向をZ方向とした直交座標系である。

（図2）

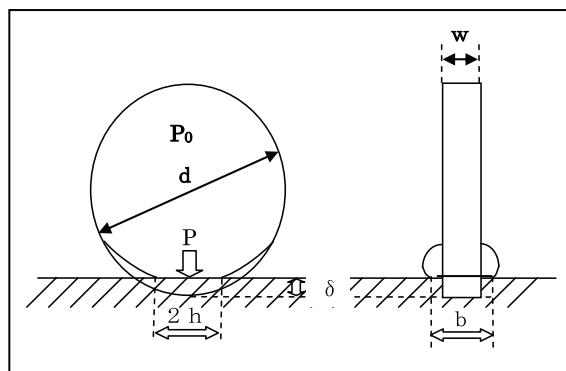
（1）主なタイヤ諸元

タイヤ接地面寸法は以下のように表される。

$$h = 0.85 \sqrt{(\delta/d - (\delta/d)^2) d} \quad (A1)$$

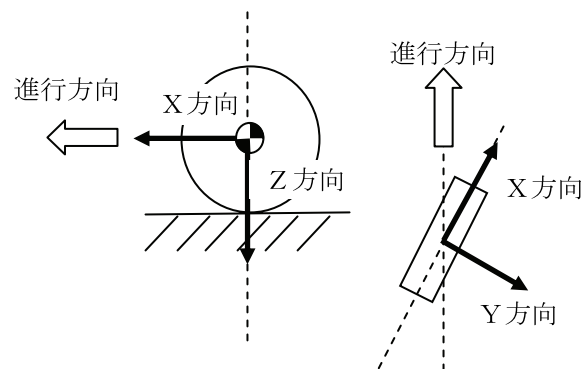
$$b = 2.0 \sqrt{(\delta/w - (\delta/w)^2) d} \quad (A2)$$

$$A_g = 2.3 \delta \sqrt{w d} \quad (A3)$$



- P_0 : 垂直荷重なしでのタイヤ圧
- P_r : タイヤ圧の微分値
- P : タイヤ圧
- P_g : 総接地面圧
- P_n : 平均ベアリング圧
- d : タイヤ外径
- h : タイヤ接地長さの半分
- b : タイヤ接地幅
- w : 変形なしでのタイヤ最大幅
- v : 垂直方向速度
- δ : 垂直方向タイヤ変位
- A_g : 総接地面積
- A_n : 基本接地面積
- a : 接地面積比 A_n/A_g
- C_z : 垂直荷重係数
- C_c : コーナリング力係数
- Ψ : ヨー角
- Φ : ヨー角パラメータ $N/(\mu_\psi * F_z)^* \psi$
- N : コーナリング力
- K_{sd} : バネ係数
- μ_{sd} : 回転の動摩擦係数
- μ_{sr} : 滑り係数
- μ_ψ : ヨー摩擦係数

図A1 タイヤ特性のパラメータ



図A2 タイヤモデルの座標系

$$A_n = A_g a \quad (A4)$$

垂直荷重係数 C_z およびコーナリング力係数 C_c は以下の値を取る。

タイヤ圧力は以下の式で表される。

$$P = P_0 + \Delta P \quad (A5)$$

ここで

$$\begin{aligned} P_0 &= 1.0 P_r \\ \Delta P &= k P_0 (\delta/w)^2 \\ k &= 1.5 w/d \end{aligned}$$

これから総接地面圧 P_g は

$$P_g = \left(0.6 + \frac{81}{1000 C_z} \frac{\delta}{w} \right) (P + 0.08 P_r) \quad \left(\frac{\delta}{w} \leq \frac{40}{9} C_z \right) \quad (A6)$$

$$P_g = \left(1.05 - C_z \left(\frac{\delta}{w} \right)^{-1} \right) (P + 0.08 P_r) \quad \left(\frac{\delta}{w} \geq \frac{40}{9} C_z \right)$$

基本接地面圧 P_n は

$$P_n = \frac{P_g}{a} \quad (A7)$$

表A1 タイヤ係数

Tire type	I	III	VII
C_z	0.02	0.03	0.03
C_c	1.1	1.2	1.0

(2) Z方向の力 (F_z)

$$F_z = F_{zs} + F_{zd}$$

ここでバネ力 F_{zs} は

$$F_{zs} = (P + 0.08P_r)w\sqrt{wd}f_1 \quad (A8)$$

ただし

$$f_1 = 0.96 \left(\frac{\delta}{w} + 0.216 \left(\frac{\delta}{w} \right)^2 \right) \frac{1}{C_z} \quad \left(\frac{\delta}{w} \leq \frac{10}{3} C_z \right) \quad (A9)$$

$$f_1 = 2.4 \left(\frac{\delta}{w} - C_z \right) \quad \left(\frac{\delta}{w} \geq \frac{10}{3} C_z \right)$$

また、粘性力 F_{zd} は

$$F_{zd} = -K_{zd}v \quad (A10)$$

(3) X方向の力 (F_x)

X方向力 F_x は以下の式で表される。

$$F_x = F_{xs} + F_{xd} + F_{xr} \quad (A11)$$

ここで静摩擦力 F_{xs} は以下の式で表される。

$$F_{xs} = C_s d(p + 4p_r)^3 \sqrt{\delta/d} \quad (A12)$$

ここで C_s は以下の値をとる。

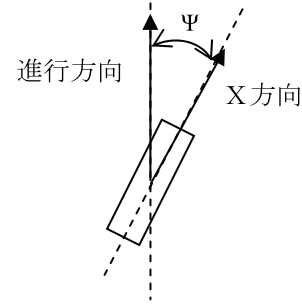
また、動摩擦力 F_{xd} は

$$F_{xd} = \mu_{xd} F_z \quad (13)$$

スリップによる摩擦力 F_{xr} は

$$F_{xr} = \mu_{xr} F_z \quad (14)$$

であらわされる。ここで μ_{xr} は速度、路面状態の関数であり文献 (1), (2) 等より数値として求めた。



図A3 ヨー角の定義

(4) Y方向の力 (F_y)

Y方向力 F_y は以下の式で表される。

$$F_y = F_{yn} \quad (A15)$$

F_{yn} は以下の式でもとめられる。

$$F_{yn} = (\phi - 4/27\phi^3)(\mu_w F_z) \quad (\phi \leq 1.5) \quad (A16)$$

$$F_{yn} = (\mu_w F_z) \quad (\phi \geq 1.5)$$

ただし、ここで、

$$\phi = \frac{N}{\mu_\psi F_z} \quad (A17)$$

ヨー角 Ψ は進行方向とタイヤのX軸方向とのなす角を示す。(図A3)

コーナリング力 N は以下の式で表される。

$$N = \left(1.2 \frac{\delta}{d} - 8.8 \left(\frac{\delta}{d} \right)^2 \right) (C_c (P + 0.44P_r) w^2) \quad \left(\frac{\delta}{d} \leq 0.0875 \right) \quad (A18)$$

$$N = \left(0.0674 - 0.34 \left(\frac{\delta}{d} \right)^2 \right) (C_c (P + 0.44P_r) w^2) \quad \left(\frac{\delta}{d} \geq 0.0875 \right)$$

μ_ψ は速度、路面状態、スリップ率の関数とし、文献 (1), (2), (3) 等より得た。

なお、路面状況が良好 (GOOD) でありスリップ率0の場合、以下の式で表される。

$$\mu_\psi = (0.93 - 0.0011P_n)(1.0 - 0.00013V_g) \quad (A19)$$

ここで V_g は対地速度 (kt), P_n (lb/inch²) である。

表A2 係数 C_s

Tire Type	II	VII	その他
C_c	0.53	0.6	0.6

宇宙航空研究開発機構研究開発報告 JAXA-RR-07-046

発行 平成20年2月29日

編集・発行 宇宙航空研究開発機構

〒182-8522 東京都調布市深大寺東町7-44-1

URL: <http://www.jaxa.jp/>

印刷・製本 株式会社 実業公報社

本書及び内容についてのお問い合わせは、下記にお願いいたします。

宇宙航空研究開発機構 情報システム部 研究開発情報センター

〒305-8505 茨城県つくば市千現2-1-1

TEL: 029-868-2079 FAX: 029-868-2956

©2008 宇宙航空研究開発機構

※本書の一部または全部を無断複写・転載・電子媒体等に加工することを禁じます。

