

スライディングモード制御理論による 航空機用 ABS 制御に関する研究

指導 小林 邦夫 教授 山崎 大生 准教授
0781111 川野 裕介

A study on Aircraft Anti-skid Brake System based on Sliding Mode Control Theory

by
Yusuke KAWANO

ABSTRACT

The frictional force, which is caused from between tire and runway, occupies a great part of the braking force of the aircraft at landing. The engine failure or the runway which is not improved or covered with snow at the landing become invitations about the sharp fall of a coefficient of friction between tire and runway. Moreover, their factors may cause big accidents, such as runway overrun. In order to prevent big accidents on the runway, Anti-skid Braking System (ABS) is carried with the aircraft. In the design of anti-skid system, it is quite important to model the controlled systems and to consider the robustness because there are model uncertainties, which result from nonlinear characteristics for adhesion of tire model and an electro-hydraulic pressure control valve of dynamic characteristic. Therefore, it is effective to introduce the anti-skid control by the sliding mode control theory that has outstanding robustness. This paper presents that the brake performance designed by sliding mode control theory via the computer simulation.

Key words: Aircraft brakes, Anti-skid, Anti-lock, Oil Hydraulic, Robust Control, Sliding Mode Control,

1. 緒言

航空輸送の現状は、アジアを中心に需要の拡大が顕著であり、世界の航空輸送量は最近 20 年で年間 5% ずつ増加している。今後も年 5% で増加し、20 年後には現在の 2 倍以上にも達すると見込まれおり、この航空輸送の需要を満たすために、更なる航空輸送の多様化が進むと予想されている。航空輸送は公共交通機関の一つであり、安全性、信頼性に対する社会的ニーズは非常に高い。そのため、設計開発段階から信頼性を保証し、安全性を確保することが強く求められている。しかし、飛行回数当たりの死亡事故率、距離当たりの死亡率の値は年々減少しているが、総死亡者数は横ばいとなっているのが現状である⁽¹⁾。

航空機事故の状況を見てみると、着陸時が最も多く、事故の発生要因としては、人的要因、自然要因が多い。また、パイロットにとっては着陸行程が最も難しいと言われており、エンジン故障、整備されていない滑走路や滑走路上の雪が存在する滑走路への着陸はタイヤ-路面間の摩擦係数の大幅な低下を招き、制動時の航空機のオーバーランなどから大事故をまねく可能性がある⁽²⁾。

航空機の着陸時は、法規上の着陸距離の算定によると、逆推力装置による制動効果は含まれておらず、自動車の制動時と同様に、タイヤと路面間の摩擦から得られる制動力が大部分を占めている。

そこで本研究では、航空機事故が起こる可能性の高い着陸時に着目し、安全に着陸できる性能を機体自身が確

保することで、十分な制動力を発揮することが出来るブレーキシステムの検討を行った。

航空機着陸時に重要となるタイヤ、機体、油圧システムの 3 部分のモデル化を行った。タイヤモデルには悪天候時などの横滑り着陸を考慮し、タイヤが横滑りした状態で制動力を求めることができるブラッシュモデルを採用した。着陸滑走時の機体モデルには、揚力、抗力が作用することを考慮した。ABS を含む油圧システムは、電気信号にて弁を開閉する ON-OFF 圧力制御弁について検討した。

航空機のブレーキシステムでは、タイヤモデルはブレーキ力によって発生する粘着力による非線形性、油圧モデルは圧力制御弁の動作に強い非線形性を有している。また、ブレーキ摩擦材の摩擦係数などの変動などがある。制御系の設計には、着陸環境が悪い場合であっても、優れたロバスト性を有し、高い制動性能を得ることができると言われているスライディングモード制御理論を適用し、その有効性をシミュレーションによって検討した。

2. 主な記号

A_C : 圧力制御弁バルブ断面積, a : 動摩擦係数の速度依存係数, b : タイヤ接触幅, C_d : 流量係数, D : 抗力, d_p : ブレーキピストン径, F_Z : タイヤにかかる重量, F_x : 制動力, F_b : ブレーキ力, K_x : トレッドラバー縦方向剛性, K_y : トレッドラバー横方向剛性, L : 揚力, l : タイヤ接地長さ, l_h : タイヤと路面の接地面においてすべり始める

点, M : 機体重量, m : 車輪重量, n_1 : ブレーキピストン数, n_2 : ブレーキピストン数, P : ブレーキピストン圧力, P_S : 供給圧力, P_L : 排出圧力, P_{ref} : 目標圧力, p : タイヤ接地圧力, R_w : タイヤ半径, r_w : ブレーキ有効半径, s : スリップ比, s_{ref} : 目標スリップ比, T_b : ブレーキトルク, u_1 : 供給側圧力制御入力信号, u_2 : 排出側圧力制御入力信号, V : ブレーキピストン体積, V_b : 機体速度, V_w : 車輪速度, V_{wref} : 目標車輪速度, x' : タイヤ接触面からの距離, β : 横すべり角, η : ブレーキ効率, θ : 接地面のすべり方向, κ : 作動油の体積弾性係数, μ_d : ディスクブレーキの表面摩擦係数, μ_x : すべり摩擦係数, μ_0 : 粘着係数, ρ : 作動油密度, σ_{x1} : 粘着域摩擦応力, σ_{x2} : すべり域摩擦応力,

3. 制御対象のモデリング

3.1 タイヤモデル^{(3), (4)}

自動車が「走る, 曲がる, 止まる」といった基本性能を発揮することができるのは, 自動車の制動力や駆動力をタイヤが路面にしっかりと伝達しているからである. 路面に伝達される力は, 摩擦力によるものであり, タイヤと路面間の摩擦力は重要であるといえる.

自動車のタイヤと同様, 航空機の場合も離陸, 着陸, 空港での駐機中など, タイヤの基本特性は同じであると考えられる. 特に, 航空機の場合は着陸時に重要な役割を果たす. それは, 着陸重量 200ton を超える航空機が速度約 270km/h で滑走路に進入し, 2km 程度の範囲で安全に着陸させなければならないからである. そのため, 着陸時におけるタイヤ-滑走路路面間の摩擦制御は非常に重要である.

タイヤ特性はスリップ比と滑走路路面摩擦係数に依存している. 航空機が横風を受けた状態での着陸を横滑り着陸といい, このときのタイヤの向きは滑走路路面に対して若干ではあるが傾いていると考えられる. そこで, 本研究では, 制動時におけるタイヤに作用する力が前後方向のみだけでなく, 横方向にも作用するコーナリング特性を持ったブラッシュモデルを採用した.

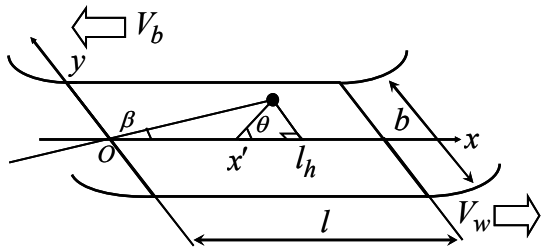


Fig.1 Tire Brush Model

Fig.1 に制動時に横滑りによる接地面でのトレッドラバーの変形を示す. 左方向に機体が滑走しており, タイヤは反時計回りに回転しているものとする.

制動時におけるスリップ比 s は次式で定義される.

$$s = \frac{V_b - V_w}{V_b} \geq 0 \quad (1)$$

タイヤの接地圧力分布は横方向に一樣, 周方向に放物線で表されると仮定する.

$$p = 4p_m \frac{x'}{l} \left(1 - \frac{x'}{l}\right) \quad (2)$$

接地圧力を接地面全体について積分したものと, 荷重 F_z が等しくなることから次式が導かれる.

$$F_z = \frac{2}{3} p_m l b \quad (3)$$

タイヤ接地面には, 粘着域と滑り域が存在し, タイヤによる制動力は両方に生じる力の和で表される. タイヤと路面間のすべり摩擦係数は, 次式で表される.

$$\mu_x = \mu_0 - \frac{asV_b l}{l - l_h} \quad (4)$$

粘着域 ($0 \leq x' \leq l_h$) とすべり域 ($l_h \leq x' \leq l$) での摩擦応力は, それぞれ

$$\sigma_{x1} = K_x b \frac{s}{1-s} x' \quad (0 \leq x' \leq l_h) \quad (5)$$

$$\sigma_{x2} = \mu_x b p \cos \theta \quad (l_h \leq x' \leq l) \quad (6)$$

で表われ, 接地面に働く力の分布力を見ても以下のようにになっている.

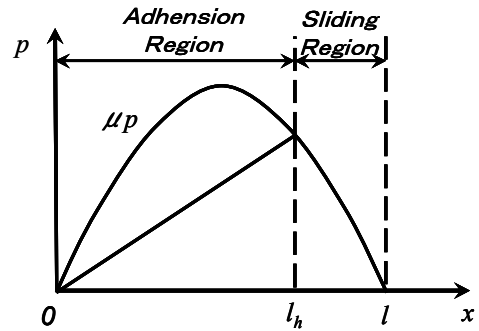


Fig.2 The distribution of contact pressure between tire and road

ここで, 粘着域から滑り域に移行する点 l_h を無次元化したものを ξ_h とすれば,

$$\xi_h = \frac{l_h}{l} = 1 - \frac{K_s}{3\mu F_z} \frac{\lambda}{1-s} \quad (7)$$

である. ただし,

$$\lambda = \sqrt{s^2 + \left(\frac{K_\beta}{K_s}\right)^2 \tan^2 \beta}, K_s = \frac{bl^2}{2} K_x, K_\beta = \frac{bl^2}{2} K_y \quad (8)$$

である. 以上より, タイヤ接地面全体に働く制動力 F_x は接地面が粘着域と滑り域からなるとき ($\xi_h > 0$) には,

$$F_x = b \left(\int_0^{l_h} \sigma_x dx' + \int_{l_h}^l \mu p \cos \theta dx' \right) \quad (9)$$

接地面がすべて滑り域になるとき ($\xi_h < 0$) には,

$$F_x = \int_0^l \mu p \cos \theta dx' \quad (10)$$

したがって、式(3)~(10)より、 $\xi_h > 0$ のときの制動力は

$$F_x = \frac{K_s}{1-s} \xi_s^2 - 6\mu_x F_z \cos \theta \left(\frac{1}{6} - \frac{1}{2} \xi_s^2 + \frac{1}{3} \xi_s^3 \right) \quad (11)$$

$\xi_h < 0$ のときには、

$$F_x = \mu_x F_z \cos \theta \quad (12)$$

となる。滑り力の方向 θ は、滑り開始点での方向で近似するものとし

$$\tan \theta = \frac{K_y \frac{\tan \beta}{1-s} x'}{K_x \frac{s}{1-s} x'} = \frac{K_\beta \tan \beta}{K_s s} \quad (13)$$

$$\cos \theta = \frac{s}{\lambda}, \quad \sin \theta = \frac{K_\beta \tan \beta}{K_s \lambda} \quad (14)$$

となる。

3.2 機体モデル⁽⁶⁾

本研究では機体の一輪モデルを用いてシミュレーションを行う。モデルは、機体の前後方向直進運動と車輪の回転運動の計2自由度である。その概略図を Fig. 3 に示す。着陸時に航空機の翼に作用する揚力と抗力を考慮し、制動時における一輪モデルの前後方向、回転方向の運動方程式と制動力を以下に示す。

$$M \frac{dV_b}{dt} = -F_x - D \quad (15)$$

$$\frac{J}{R_w} \frac{dV_w}{dt} = F_x R_w - T_b \quad (16)$$

$$F_x = \mu F_z \quad (17)$$

$$F_z = Mg - L \quad (18)$$

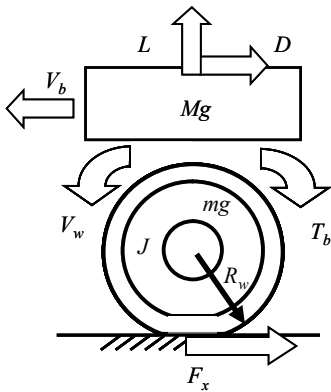


Fig. 3 1-Wheel model of Aircraft

3.3 ABS (Anti-skid Braking System)

3.3.1 圧力制御弁⁽⁶⁾

圧力制御弁は供給側電磁弁、排出側電磁弁からなり、ブレーキシリンダ管より作動油を供給され、ON-OFF 信

号で駆動する。圧力 P_s で供給された作動油は、供給用電磁弁に流れ込み、タイヤが滑った場合、

(1)ブレーキシリンダ管からブレーキピストンへの圧力供給を止め、排出ポートを開放し、ブレーキピストンの圧力を排出する($u_1=1, u_2=0$)。

(2)ブレーキシリンダ管からブレーキピストンへの圧力供給を止めた状態で、排出ポートを遮断し、ブレーキピストンの圧力を保持する($u_1=0, u_2=0$)。

(3)排出ポートを遮断した状態で、ブレーキシリンダ管からブレーキピストンへの圧力を供給する($u_1=0, u_2=1$)。

以上、3つの動作を順次繰り返すことによって、ブレーキピストンへかかる圧力を調整して滑走を防止する。

圧力制御弁に関する圧力と作動油流量の関係式を以下に示す。

$$\frac{dp}{dt} = \frac{\kappa}{V} C_d A_c \left(\sqrt{\frac{2|P_s - P|}{\rho}} u_1 - \sqrt{\frac{2|P - P_L|}{\rho}} u_2 \right) \quad (19)$$

本研究で検討する航空機用 ABS の概略図を Fig.4 に示す。

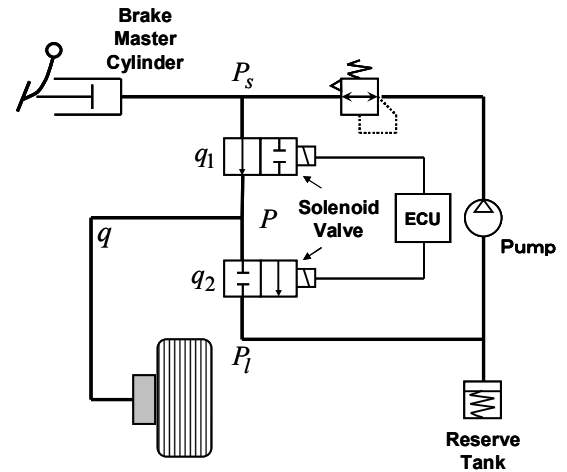


Fig.4 Oil hydraulic model for ABS of Aircraft

3.3.2 ブレーキトルク⁽⁷⁾

航空機用ブレーキには通常マルチプル・ディスクブレーキ(多盤式ディスクブレーキ)が用いられている。ブレーキ力はブレーキピストン圧力×ピストン数×ピストン断面積で表わされる。ブレーキトルクは、ディスクブレーキの表面摩擦係数×ブレーキ力×ステータとロータの摩擦面数×有効半径×ブレーキ効率で表わされる。以下にそれぞれの関係式を示す。

$$F_b = P n_1 \frac{\pi}{4} d_p^2 \quad (20)$$

$$T_b = \mu_b F_b n_2 r_w \eta \quad (21)$$

4. スライディングモード制御系設計^{(6), (8)}

タイヤモデルや油圧モデルの非線形性やパラメータ変動に対して優れたロバスト性を有する制御系設計を行えば、タイヤによる粘着力をピーク位置で保持することができ、その結果ブレーキ性能の向上を期待できる。そこで本研究ではスライディングモード制御によって滑走制御系を設計する。

制御系設計及びシミュレーションのための状態方程式を導出する。制御系の状態変数を次のようにとる。

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} V_{wref} - V_w \\ \int (V_{wref} - V_w) dt \\ P_{ref} - P \end{bmatrix}^T \quad (22)$$

V_{wref} は目標車輪速度、 P_{ref} は目標ブレーキ圧力である。目標車輪速度に関しては次式で表される。

$$V_{wref} = (1 - s_{ref}) V_b \quad (23)$$

ここでは s_{ref} 目標スリップ比である。したがってシステムの状態方程式は (15)~(18), (22), (23) より以下のようになる。

$$\dot{x} = Ax + Bu + E_r \dot{V}_{wref} + Fd + GP_{ref} \quad (24)$$

ただし、以下である。

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\frac{R_w r_w}{J} K_b \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\kappa \frac{q}{V} \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$E = F = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, G = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, d = \frac{r_w^2}{J} F_x$$

$$q = C_d A_C \sqrt{\frac{2|P_S - P_L|}{\rho}} \quad (26)$$

右辺の3項は非線形特性を表わしており、これを外乱と考えると、制御系のノミナルモデルは

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (27)$$

となる。制御系設計には式(27)を用いる。

切換え関数は次式で表わされる。

$$\sigma = Sx \quad (28)$$

切換え超平面を設計する方法にはシステムの零点を利用する設計法の安定余裕を指定する設計法を用いた。システム行列の零点の実部を $-\varepsilon$ 以下になるようにとるように行列 A_ε を与える。任意の $Q > 0$ を与えて、以下のリカッチ方程式の解で評価関数 J を最小にするようなフィードゲインを求め、切換え面を設計する。

$$J = \int_0^\infty (x^T Q x + u^T R u) dt \quad (\because Q > 0) \quad (29)$$

$$\begin{aligned} A_\varepsilon &= A + \varepsilon I \quad \varepsilon \geq 0 \\ P A_\varepsilon + A_\varepsilon^T P - P B B^T P + Q &= 0 \\ S &= B^T P \end{aligned} \quad (30)$$

制御対象が切換え超平面に拘束させる等価制御入力力は次式となる。

$$u_{eq} = -(SB)^{-1} SAx \quad (31)$$

次に、切換え超平面に到達させるコントローラの設計を行う。コントローラは、システムの状態を超平面に到達する時間が短く、優れたロバスト性を持ち、チャタリング現象の防止も可能な自由階層法である。加速率到達則を用いた。加速率到達則は次式で表わされる。

$$\dot{\sigma} = -k |\sigma|^\alpha \text{sgn}(\sigma) \quad 0 < \alpha < 1 \quad (32)$$

この加速率到達則が切換え制御入力となる。したがって制御則は次式で表わされる。

$$u = -(SB)^{-1} \{ SAx + k |\sigma|^\alpha \text{sgn}(\sigma) \} \quad (33)$$

5. シミュレーション結果

5.1 タイヤモデル⁽⁹⁾

タイヤ特性はスリップ比と滑走路路面摩擦係数に依存している。航空機が着陸時に横滑りを起こしながら滑走路に進入してくることを想定し、本研究ではブラッシュモデルを用いた。

滑走路の摩擦に関しては、ICAO : International Civil Aviation Organization と JAA : Joint Airworthiness Authority(現 EASA : European Aviation Safety Authority) がそれぞれ発行している滑走路における性能基準値を参考にした(Table.1)。しかし、各機関とも滑走路の摩擦係数の値に若干のずれが見て取れる。そこで本研究では Table.2 のデータを用いた。

Table.1 Friction coefficient of runway

	Runway condition	ICAO	JAA			
Braking μ	Dry	No description	No description			
	Wet	Varying with speed	$0.5 \times \text{Dry} \mu$			
	Snow	<table border="1" style="display: inline-table; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>Dry Snow</td> <td>0.25</td> </tr> <tr> <td>Compacted Snow</td> <td>0.18</td> </tr> </table>	Dry Snow	0.25	Compacted Snow	0.18
Dry Snow	0.25					
Compacted Snow	0.18					

Table.2 Friction coefficient of runway in this study

Braking μ	Dry	0.8
	Wet	0.4
	Snow	0.2

以下に、横滑り角($\theta=0, 5$ 度)での滑走路面が乾燥、湿潤、雪の状態のスリップ比と制動力係数の関係を示す。Fig.5, Fig.6 に示す。

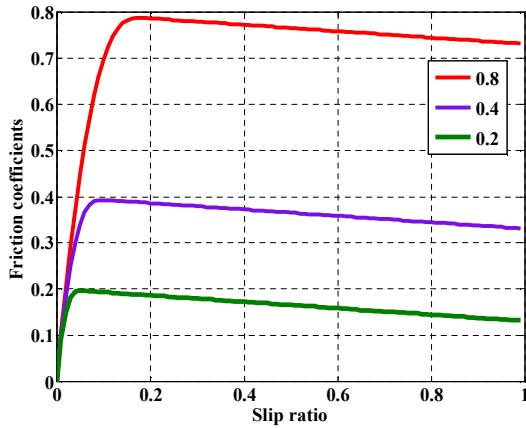


Fig.5 Friction coefficient characteristics
between tire and runway
(Slip ratio characteristics, Skid angle: 0 degree)

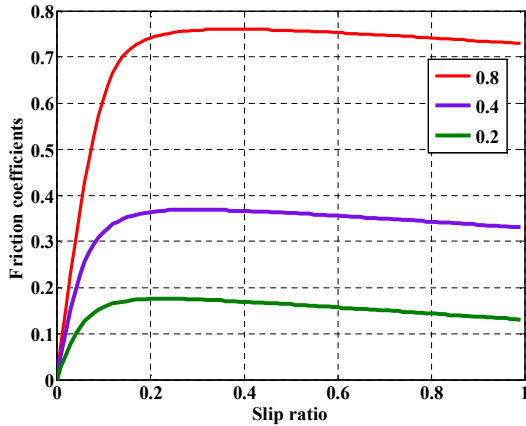


Fig.6 Friction coefficient characteristics
between tire and runway
(Slip ratio characteristics, Skid angle: 5 degree)

横滑り角が0度のときは、スリップ比は0~0.2近傍で最大値をとることが知られている。また、滑り角が増大するにしたがい、最大値が右に移動していくことも知られている。Fig.5, Fig.6よりその傾向がつかめる結果が得られた。したがって制動力を表わすタイヤのモデル化ができていと考えられる。

5.2 スライディングモード制御に基づくABS制御結果

以下にシミュレーションパラメータを示す。

$$\begin{aligned}
 M &= 15675 \text{ [kg]} & m &= 700 \text{ [kg]} & l &= 0.4699 \text{ [m]} \\
 b &= 0.3235 \text{ [m]} & R_w &= 0.635 \text{ [m]} & r_w &= 0.135 \text{ [m]} \\
 C_d &= 0.611 & \rho &= 860 \text{ [kg/m}^3\text{]} \\
 \kappa &= 1843650200 \text{ [N/m}^2\text{]} & A_c &= 1.26 \times 10^{-5} \text{ [m}^2\text{]} \\
 V &= 3.93 \times 10^{-5} \text{ [m}^3\text{]} & d_p &= 50 \times 10^{-3} \text{ [m]} \\
 P_S &= 3000 \text{ [psi]} (=20.6 \text{ [MPa]}) \\
 P_L &= 0 \text{ [Pa]} & n_1 &= 6 \text{ [個]} & \mu_d &= 0.2 \\
 n_2 &= 9 \text{ [枚]} & \eta &= 1
 \end{aligned}$$

前節より、スライディングモード制御設計で必要となるパラメータは $Q, R, \varepsilon, k, \alpha$ である。

切換え超平面を設計するために必要な重み係数行列 Q, R ならびにシステムの零点の実部を指定する ε は、以下のように設定した。

$$Q = \begin{bmatrix} 10^{15} & 0 & 0 \\ 0 & 10^8 & 0 \\ 0 & 0 & 10^{13} \end{bmatrix} \quad R = 1 \quad \varepsilon = 0.001 \quad (34)$$

また、加速率到達則の各定数は

$$k = 10^{10} \quad \alpha = 0.98 \quad (35)$$

とした。

前節のタイヤモデルを用いて、以下にスライディングモード制御を適応した、滑走制御のグラフを以下に示す。横滑り角0度、5度のときの各滑走路面状況での機体速度、目標車輪速度、車輪速度のシミュレーション結果を示す。

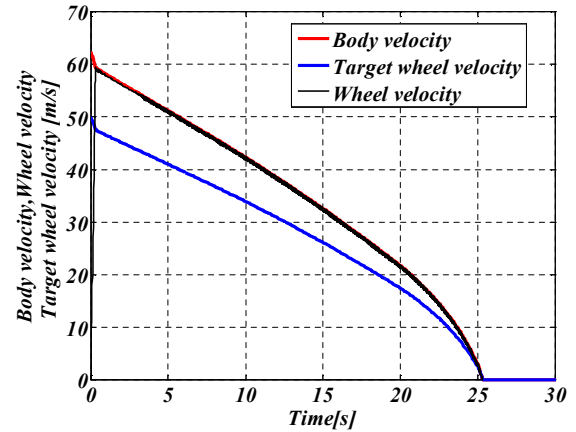


Fig.7 Simulation result of dry runway condition
($\mu_0=0.8$, Skid angle : 0 degree)

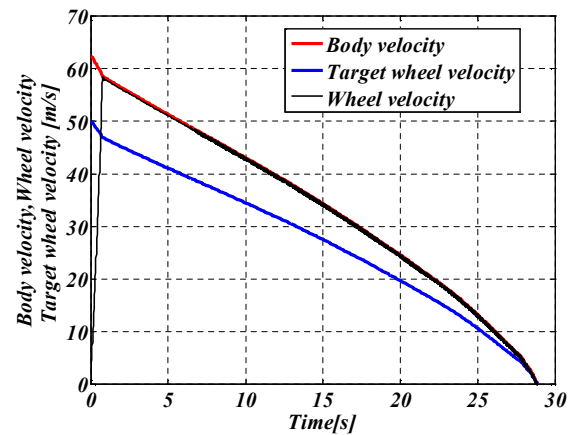


Fig.8 Simulation results of wet runway condition
($\mu_0=0.4$, Skid angle : 0 degree)

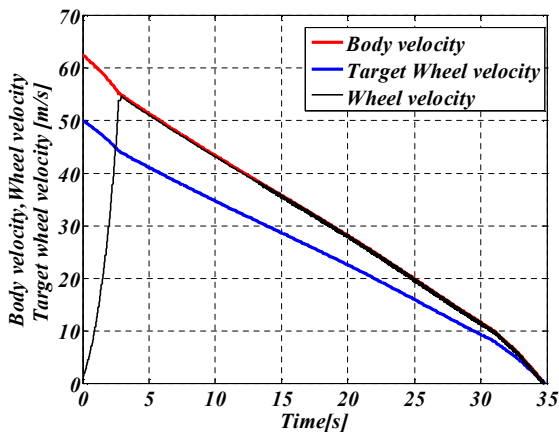


Fig.9 Simulation result of snow runway condition ($\mu_0=0.2$, Skid angle : 0 degree)

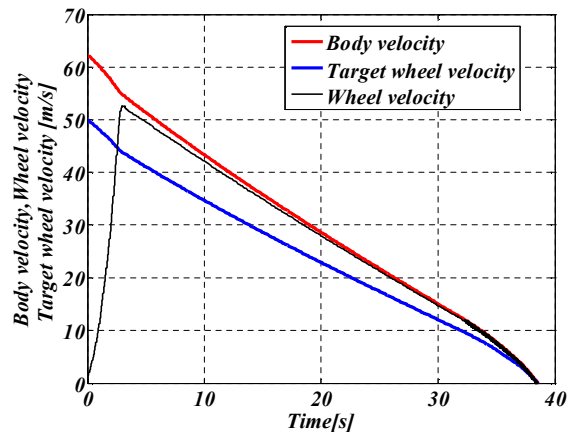


Fig.12 Simulation result of snow runway condition ($\mu_0=0.2$, Skid angle : 5 degree)

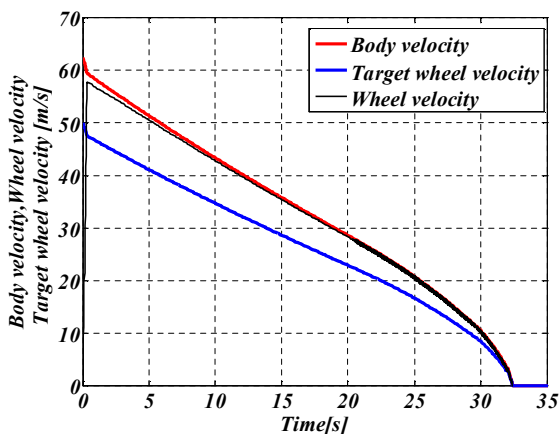


Fig.10 Simulation result of dry runway condition ($\mu_0=0.8$, Skid angle : 5 degree)

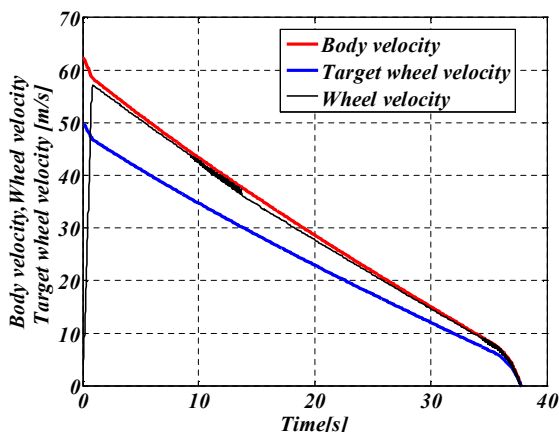


Fig.11 Simulation result of wet runway condition ($\mu_0=0.4$, Skid angle : 5 degree)

Fig. 7~12 の全てのグラフにおいて、車輪速度は接地直後に急速に立ち上がり、機体速度付近まで上昇した後、機体速度に沿う形状で減少していることが確認できる。滑走路面の摩擦係数が低いほど、停止時間が長いことが分かる。また、横滑り着陸の場合 (Fig. 10~12) と通常時着陸の場合 (Fig. 7~9) とを比較しても停止時間は明らかに長い。滑走路が雪に覆われている場合 (Fig.9, Fig.12) は滑走路面の摩擦力低下のために、車輪速度の立ち上がりが遅れていると考えられる。

6. 結言

スライディングモード制御理論に基づき航空機の ABS の制御を検討した。悪条件の滑走路面においても、制動力を確保することができ、良好なシミュレーション結果を得ることができた。

参考文献

- (1) 文部科学省：航空科学技術を取り巻く現状について
- (2) 社団法人航空宇宙工業会：平成18年度版，世界の航空宇宙工業
- (3) 安部正人：自動車の運動と制御，山海堂(1992)
- (4) 酒井秀男：タイヤ工学，グランプリ出版(2002)
- (5) 東昭：航空工学(Ⅱ)，裳華房(1989)
- (6) 山崎大生，狩野泰，鎌田崇義，永井正夫：非線形ロバスト制御を用いた車両の滑走制御の効果，RTRI REPORT Vol.20, No.7, (2006.7) pp.11-16
- (7) J.-J.Sinou, O.Dereure, G.-B.Mazet, F.Thouverez, L.Jezequel : Friction-induced vibration for an aircraft brake system, International Journal of Mechanical Sciences 48 (2006) pp.536-554
- (8) 野波健蔵，田宏奇；スライディングモード制御；コロナ社(1994)
- (9) 井川寛隆，神田淳：航空機の雪氷滑走路摩擦係数研究の方向性について，宇宙航空研究開発機構(2006)