

ICAO CRMにおける高さ損失モデルの評価

電子航法研究所 航法システム領域

※藤田征吾, 伊藤正宏¹, 福島荘之介, 山康博,
武市昇², 長井文宣³, 中西善信⁴

¹現 文部科学省研究開発局

²名古屋大学大学院工学研究科

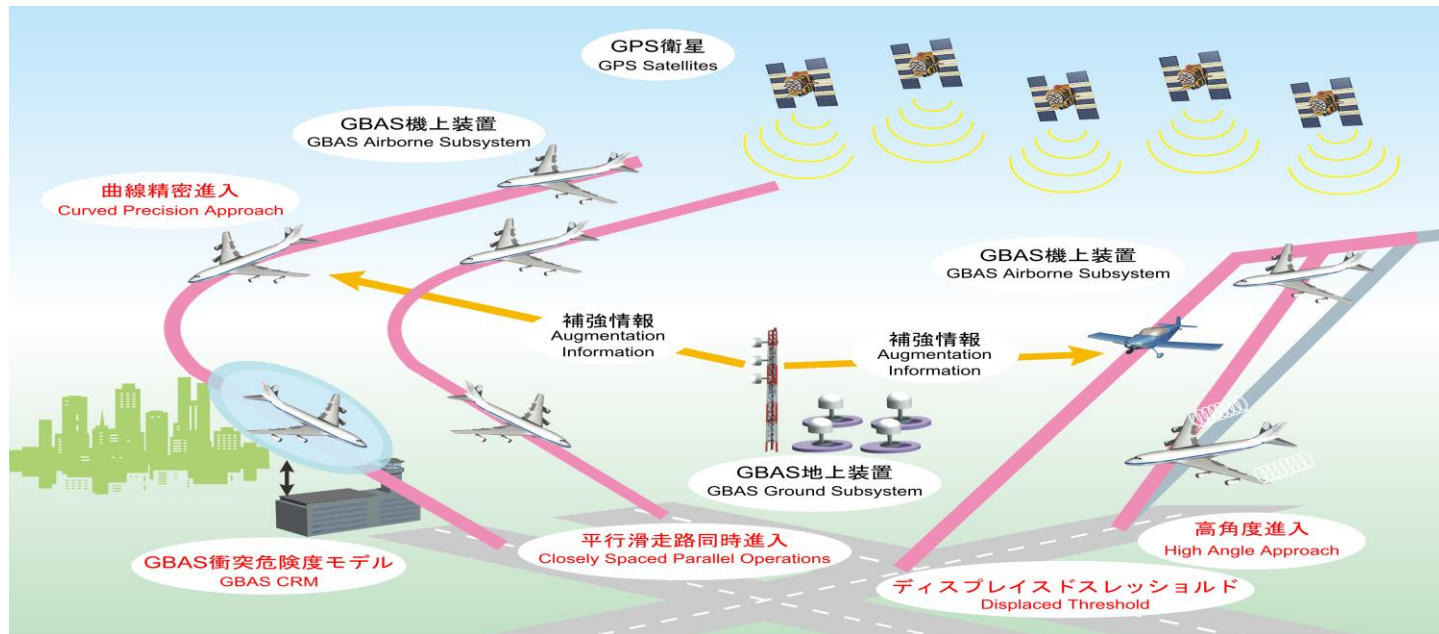
³全日本空輸株式会社

⁴株式会社 NTTデータ・アイ

- 背景と目的
- 進入復行中の高さ損失モデル(Pinskerモデル)
- 高さ損失モデルの評価
 - モンテカルロシミュレーション
 - B737-700フライトシミュレータ(B737-700 FFS)による進入復行模擬実験
- まとめと今後について

GBASによる高度な飛行方式

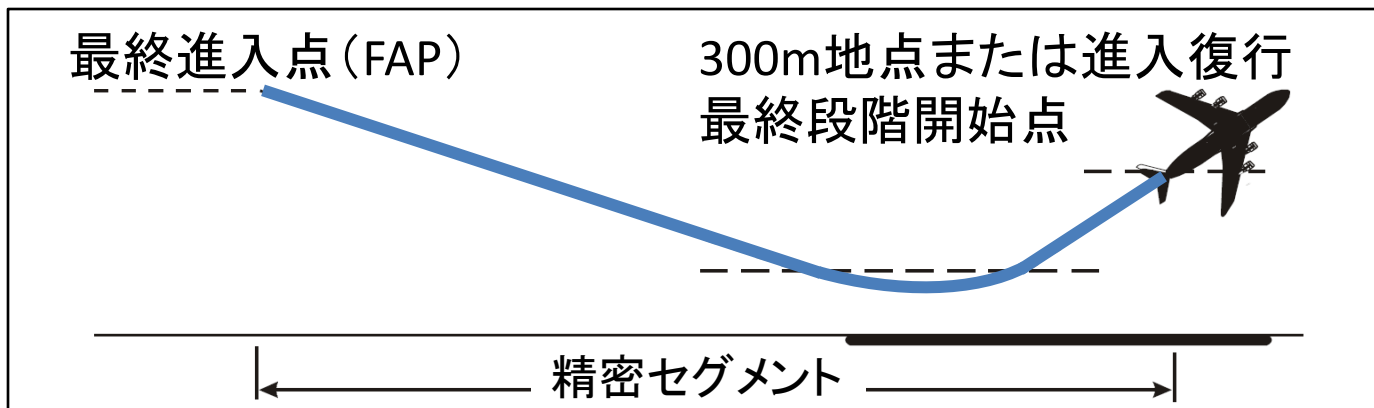
- GBASの特長を生かした高度な飛行方式
 - 空域，空港の処理容量拡大，騒音回避，燃料消費削減等の効率的な運航の可能性



- この実現には，飛行方式設定基準の検討が必要
 - 衝突危険度モデルのアップデート
→ 航空機偏位の定量的評価が必要

ILS衝突危険度モデル(CRM)

- ILS進入方式の精密セグメント(最終進入及び進入復行)における障害物間隔評価手法
 - 航空機偏位を確率分布で表現し, 障害物との衝突危険度を定量化(障害物との衝突確率を計算)
 - 航空機偏位(総合システム誤差($TSE = NSE + FTE$))
 - 航法システム誤差(NSE): 航法性能に関連
 - 飛行技術誤差(FTE): 航空機性能に関連



出典: PANS-OPS, Vol. II, Part II (Doc 8168-OPS/611)

背景

- ILS CRMは1960～1970年代に収集した飛行データ(実機, フライトシミュレータ)に基づき開発
- 既存のCRMは, 現在の航空機や地上型衛星航法補強システム(GBAS)の性能が反映されていない

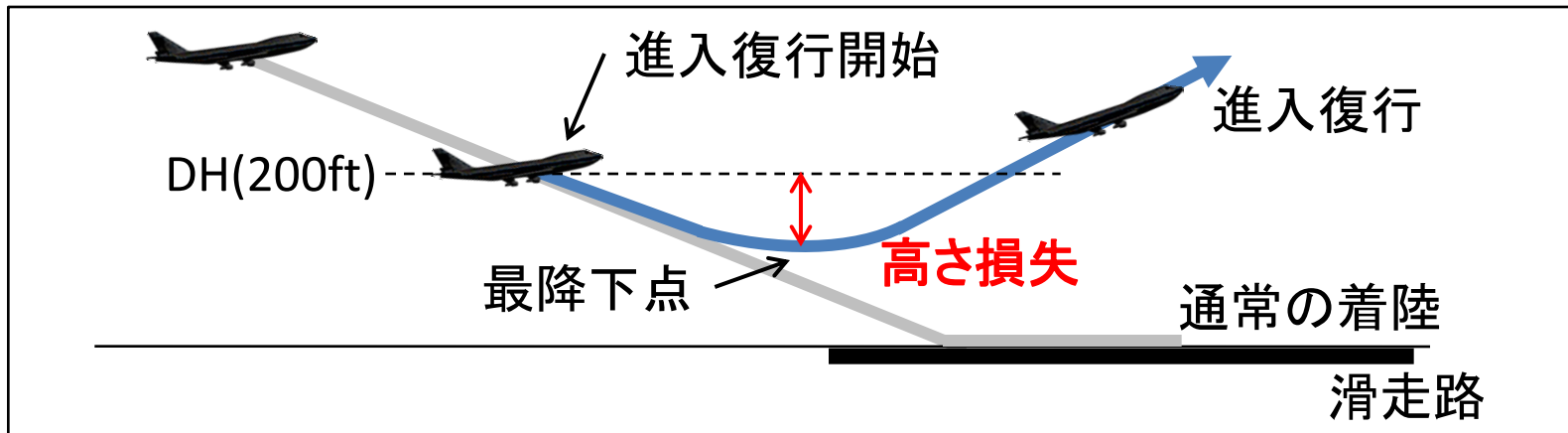
航空機性能の向上, GBASによる航法性能向上に伴う
既存CRMの改善・拡張の必要性
(計器飛行方式パネル(IFPP): CRMの改善を検討中)



- 進入復行中の**高さ損失**に着目(航空機性能に関連)
 - ILS CRMの高さ損失モデルは飛行特性に基づき生成
 - 航空機性能向上による改善の可能性がある
 - IFPPでは高さ損失モデルの検証が行われている

目的

- 進入復行における高さ損失モデルの評価
 - モンテカルロシミュレーション
 - 高さ損失モデル(既存入力パラメータ利用)
 - B737-700 FFSによる進入復行模擬実験
 - 高さ損失モデルとシミュレーションデータの比較
- **高さ損失モデルの検証・アップデートの検討**

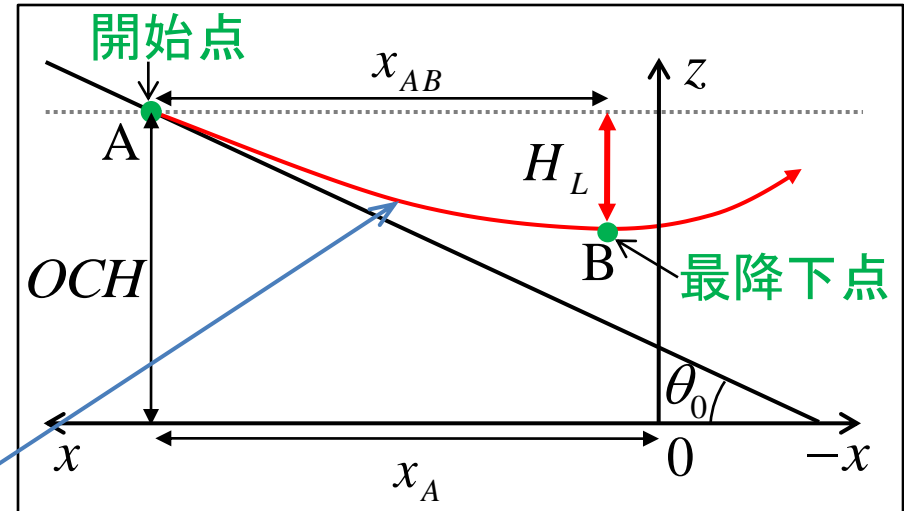


進入復行中の高さ損失

進入復行モデル(鉛直方向)

進入復行モデル(鉛直方向)

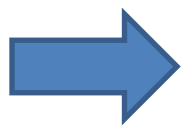
- 主にフライトシミュレータで取得したデータに基づき生成
- 進入復行パス(OCA/H以降の沈み込み上昇を開始するまでの間)は放物線と仮定



$$z = z_A - \underbrace{H_L + H_L}_{\text{高さ損失}} \left[\frac{x - x_A + x_{AB}}{x_{AB}} \right]^2$$

H_L : 高さ損失
 x_{AB} : X偏位(A→B)
 x_A : OCHのx座標

高さ損失モデル(Pinskerモデル)を利用



進入復行モデルを用いて進入復行時の航空機偏位の確率分布を生成

↑ ILS CRMの改善・拡張のために見直しが必要
 → 高さ損失モデルの検討

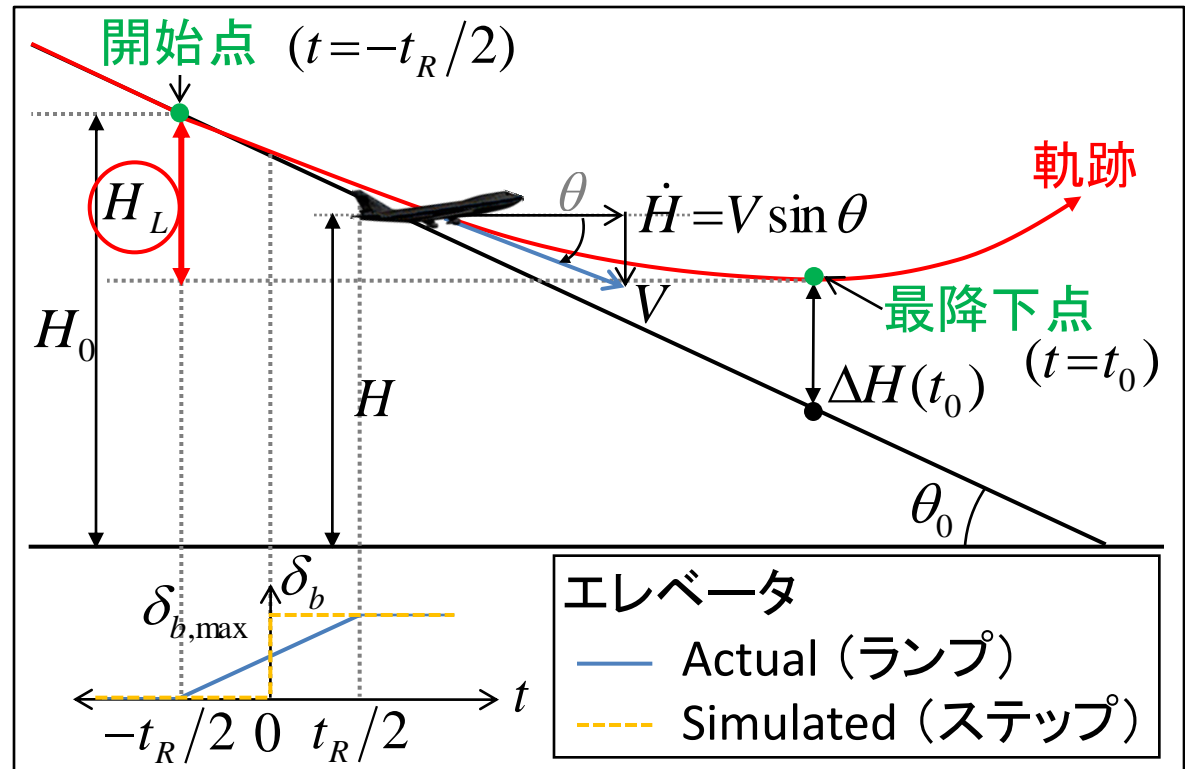
高さ損失モデル

高さ損失モデル

$$H_L = -\dot{H}_0 \left(t_0 + \frac{t_R}{2} \right) - \Delta H(t_0)$$

経過時間
(開始点 → 最降下点)

→ H_L の計算のために
 $t_0, \Delta H$ が必要



\dot{H}_0 : 初期垂直速度
(negative value)

V : 進入復行中の速度

θ_0 : フライトパス角

δ_b : 昇降舵偏向

t_R : パイロットがエレベータ操作を開始し、エレベータがフル状態になるまでの遅延時間 (エレベータ操作開始までのパイロット反応時間はゼロと仮定)

t_0 : 最降下点に達するまでの経過時間

ΔH : $t=t_0$ での高度と $t=0$ での速度で決定される直線上での高度との差分

高さ損失モデル

- 高さ損失モデル (Pinskerモデル)
 - 縦系線形微分方程式から導出されたパラメータの関係式により高さ損失をモデル化 (1950～1960年代に開発)
(導出過程で初期垂直加速度・初期垂直躍度を無視)
 - 入力パラメータ (主に確率分布で表現)
 - 初期垂直速度, 垂直加速度増分, ダンピング係数, エレベータ遅延時間, 短周期ピッチ振動期間
 - 高さ損失の計算
 - パラメータ関係式から経過時間と高度差分をニュートン法により求め, **高さ損失**を算出

IFPPでは, 現在, 高さ損失モデル (Pinskerモデル) の検証が行われている.

モンテカルロシミュレーション

– 高さ損失モデル(Pinskerモデル)

- 高さ損失モデルの既存入力パラメータ(確率分布)
- サンプル数: 500

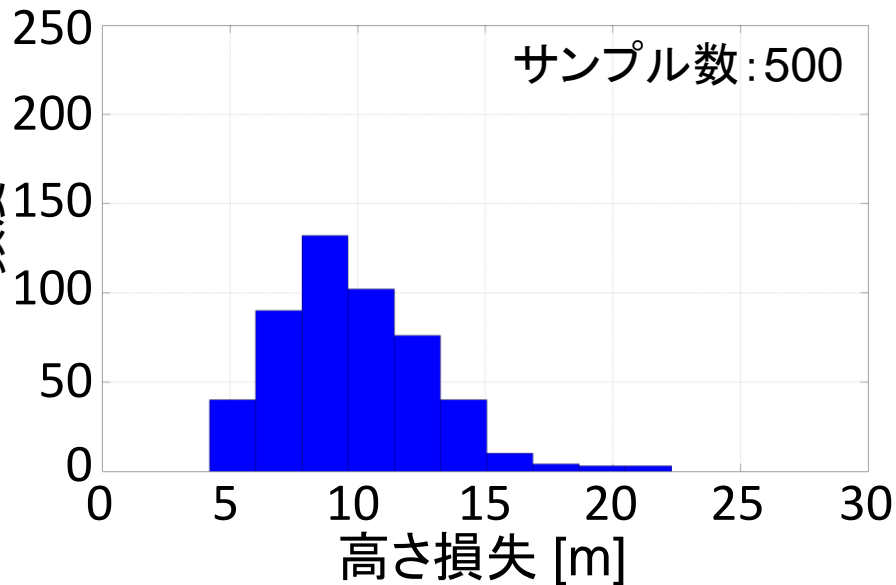
高さ損失モデルの既存入力パラメータ

入力パラメータ	単位	分布型	平均	標準偏差	最小	最大
初期垂直速度	m/s	対数正規分布	3.66	0.61	1.58	5.60
垂直加速度増分	g	正規分布	0.20	0.07	0.07	0.50
ダンピング係数	-	一定	0.5	0	0.5	0.5
エレベータ遅延時間	s	一定	0.5	0	0.5	0.5
短周期ピッチ振動期間	s	一定	8	0	8	8

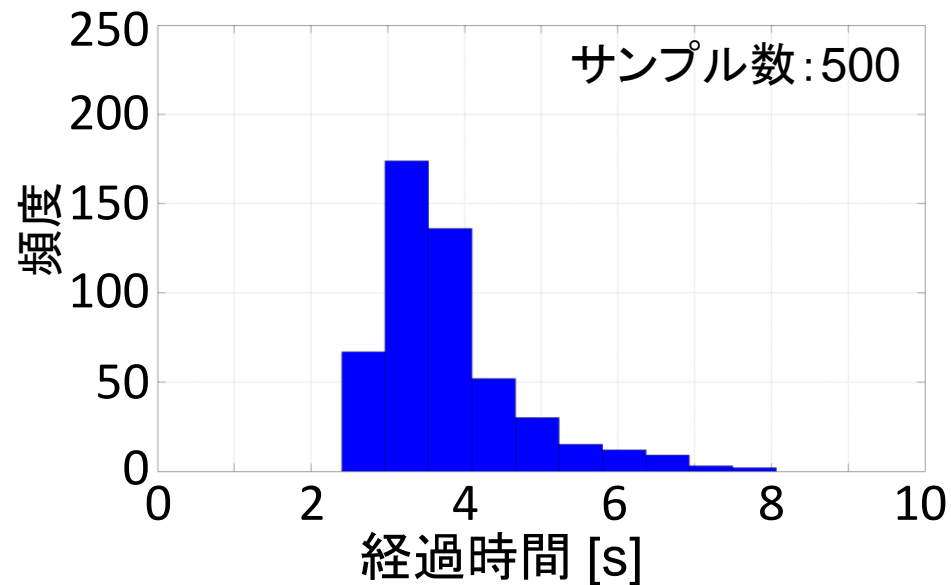
※B737-700(Cat C)を想定し, 140 kt VAT_{max} のパラメータを利用

シミュレーション結果

高さ損失



経過時間



統計量	高さ損失 [m]	経過時間 [s]
平均	9.81	3.78
標準偏差	2.93	0.93
最小	4.19	2.40
最大	22.30	8.06



本実験結果とフライトシミュレータ実験における高さ損失の比較を行う。

既存入力パラメータの最悪な組み合わせが要因

高さ損失モデルの評価(2)

フライトシミュレータ実験

- フライトシミュレータにより, 進入復行を模擬し, 高さ損失を評価

機材: B737-700 (航空機区分: C)

飛行モード: Autopilot

飛行方式: ILS 24L@関西国際空港

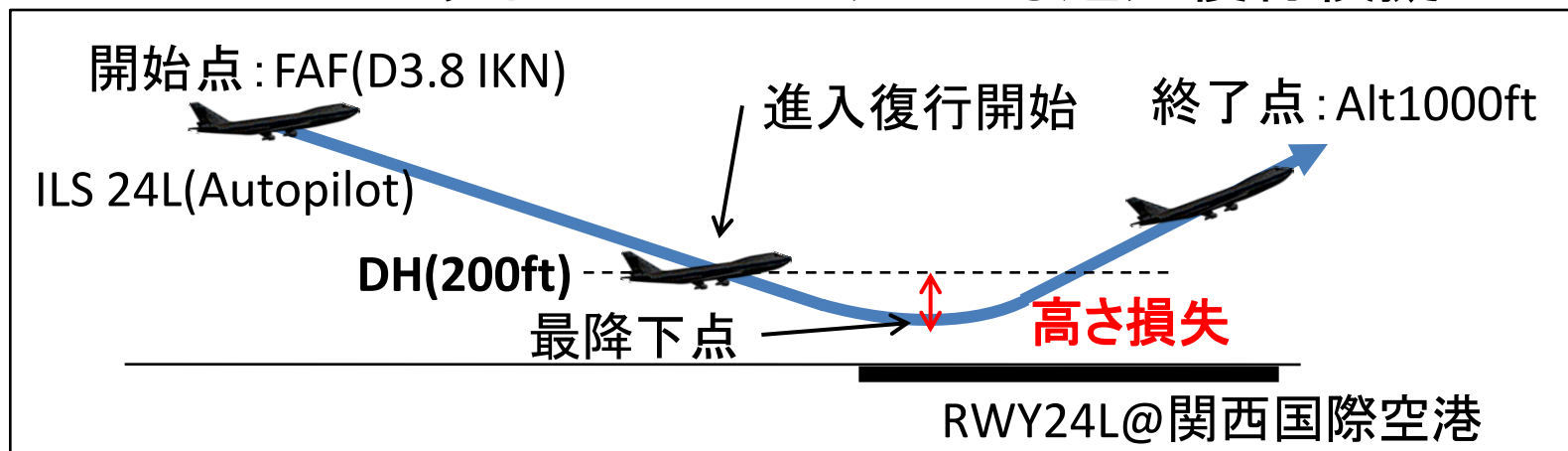
開始点: FAF (D3.8 IKN)

終了点: Alt1000ft

B737-700 FFS



B737-700フライトシミュレータによる進入復行模擬



フライトシミュレータ実験

進入復行模擬における条件設定(合計30フライト)

総重量	フライト数	風 [kt]	気温 [deg]
Normal (111000lb)	9	-10, 0, +10	5, 15, 25
Heavy (129000lb)	11	-10, 0, +10	-20, 5, 15, 25, 40
(154800lb)	1	+15	-20
Light (93000lb)	9	-10, 0, +10	5, 15, 25

※ 風の「-」は追風, 「+」は向い風を意味する。

取得データ(小数点以下4桁まで出力, 更新間隔: 0.2s)

パラメータ	単位	パラメータ	単位
Time(H,M,S)	-	Roll, Pitch, Yaw(Rate)	[deg/s]
Position(Lat, Lon)	[deg]	Roll, Pitch, Yaw(Acc.)	[deg/s ²]
Altitude(Pressure, Radio)	[ft]	Angle of Attack	[deg]
Velocity (TAS, IAS, CAS, GS)	[kts]	Flight Path Angle	[deg]
Acceleration(X, Y, Z)	[ft/s ²]	TOGA SW Flag	-
Roll, Pitch, Yaw(Angle)	[deg]	...	

進入速度(取得データ)

進入速度(IAS)

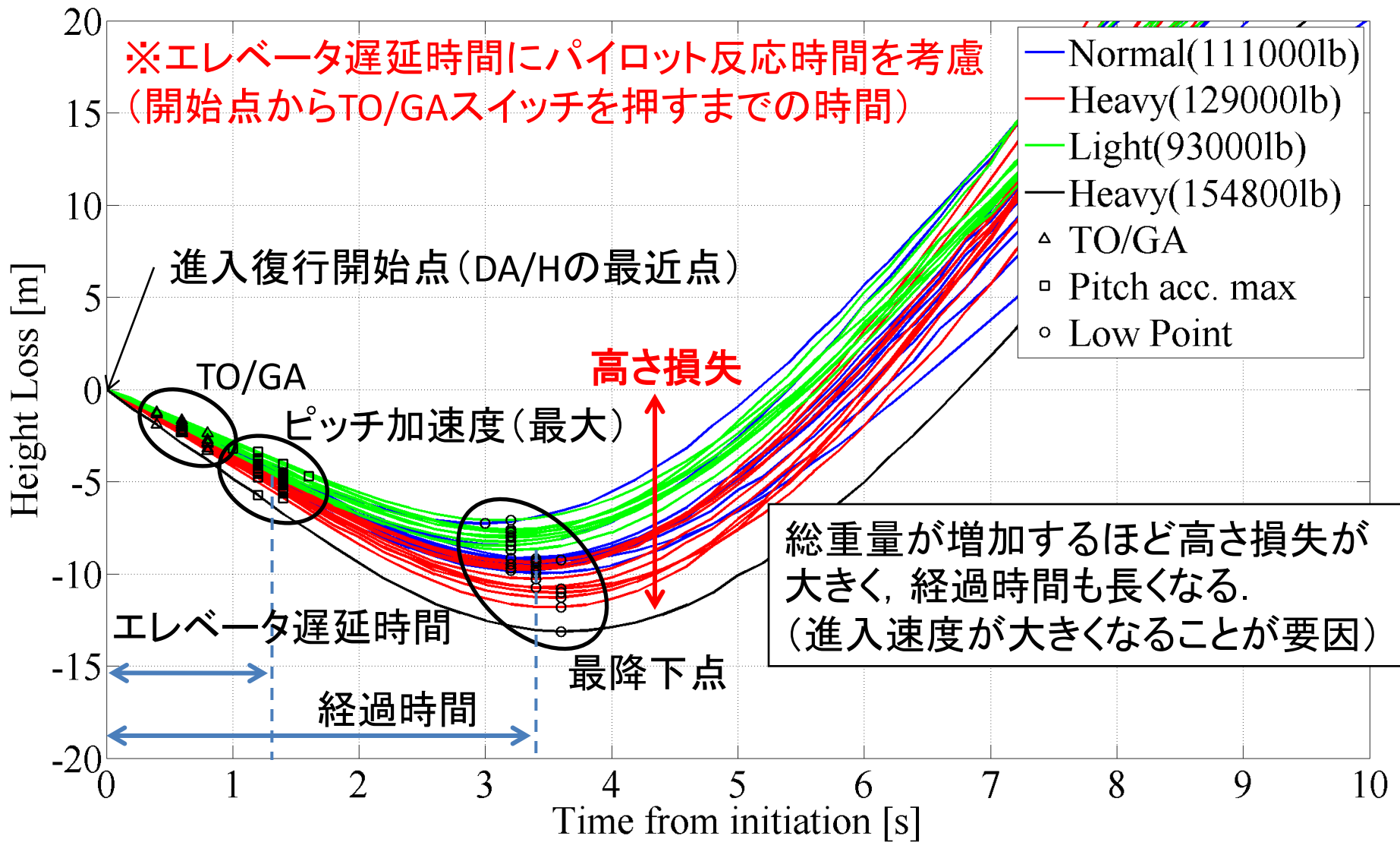
総重量	平均 [kt]	最小 [kt]	最大 [kt]
Normal (111000lb)	128.80	124.68	130.76
Heavy (129000lb)	137.87	131.46	138.60
(154800lb)	(151.40)	(151.40)	(151.40)
Light (93000lb)	117.46	114.75	117.80
All	129.48	114.75	151.40

初期垂直速度

総重量	平均 [m/s]	最小 [m/s]	最大 [m/s]
Normal (111000lb)	3.47	3.14	3.80
Heavy (129000lb)	3.83	3.56	4.26
(154800lb)	(4.77)	(4.77)	(4.77)
Light (93000lb)	3.17	2.85	3.50
All	3.55	2.85	4.77

CRMの入力パラメータ: 平均3.66[m/s], 最小1.58[m/s], 最大5.60[m/s]
 → CRMの方が初期垂直速度の最小～最大の幅が大きい。

実験結果 (高さ損失)



高さ損失モデルとの比較

高さ損失，経過時間，遅延時間の比較

統計量	高さ損失モデル (モンテカルロシミュレーション)			B737-700 FFS		
	高さ損失 [m]	経過時間 [s]	遅延時間 [s]	高さ損失 [m]	経過時間 [s]	遅延時間 [s]
平均	9.81	3.78	0.5 (入力値)	9.34	3.33	1.31
標準偏差	2.93	0.93	-	1.41	0.17	0.13
最小	4.19	2.40	0.5	7.09	3.0	1.0
最大	22.30	8.06	0.5	13.12	3.6	1.6

既存入力パラメータの最悪な組み合わせが要因

- 高さ損失・経過時間の平均値に大きな違いはなく，高さ損失モデルのモデル構造としては概ね妥当と考えられるが，B737-700 FFSの方が最大値が明らかに小さいことから入力パラメータの検討が必要と考えられる。
- エレベータ遅延時間の平均は1.3秒であり，高さ損失モデルの0.5秒(入力値)に比べ，大きな値であった。

- 高さ損失モデルの入力パラメータ
 - 既存入力パラメータは当時のフライトデータに基づき設定
 - 入力範囲が大きく、最大値は最悪な組み合わせが要因
 - エレベータ遅延時間にパイロット反応時間は考慮されていない
(フライトシミュレータ実験ではパイロット反応時間を考慮)

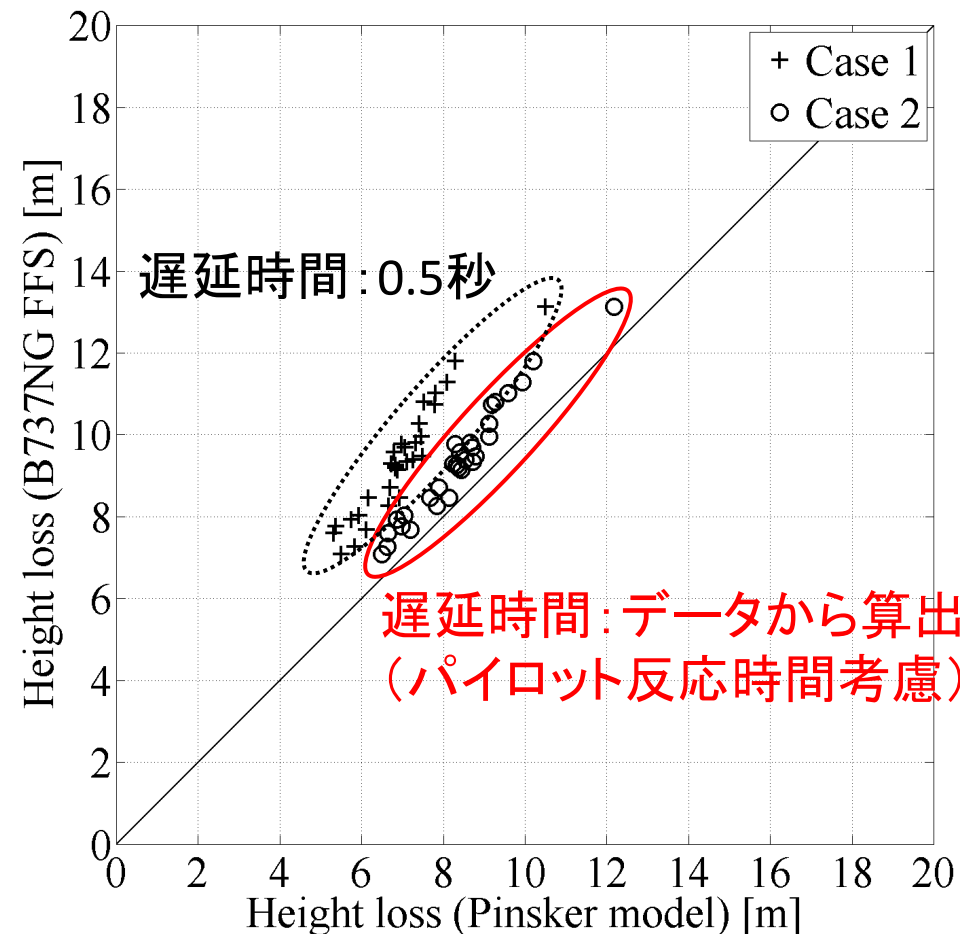
各フライトにおける適切なパラメータ設定が必要

- 高さ損失モデルの妥当性評価
 - 入力パラメータはできる限り各フライトデータから算出
 - 初期垂直速度, 垂直加速度増分: 各フライトデータ
 - ピッチ振動時間, ダンピング係数: 既存入力パラメータ
 - パイロット反応時間の有無により評価
 - Case 1: エレベータ遅延時間を0.5秒に設定
 - Case 2: エレベータ遅延時間にパイロット反応時間考慮

高さ損失モデルの妥当性評価

Case 1: エレベータ遅延時間を0.5秒に設定

Case 2: エレベータ遅延時間にパイロット反応時間考慮



統計量	モデル誤差 [m]	
	Case 1	Case 2
平均	2.39	0.96
標準偏差	0.54	0.34
最小	1.44	0.32
最大	3.52	1.61

Case 2の方がより正確な高さ損失が得られた。ただし、若干過小評価する傾向がみられる。

→ 入力パラメータの改善が必要 (モデル構造は概ね妥当)

まとめと今後について

- ILS CRMの進入復行中の高さ損失モデルの評価
 - モンテカルロシミュレーション
 - B737-700 FFSによる進入復行模擬実験
 - 高さ損失モデルの妥当性評価

高さ損失モデルのモデル構造は概ね妥当であるが、
入力パラメータの適切な設定が必要。
(入力パラメータを適切に設定すれば新たな機体でも
利用可能と考えられる)

- 今後について
 - 入力パラメータの詳細な解析
 - GBASの航法誤差を考慮した場合の障害物評価表面との
関係性を評価する。