

工業会活動

先進パイロット支援システムの研究

経済産業省による「航空機用先進システム基盤技術開発」のひとつとして、平成20年度より3年間の計画で先進パイロット支援システムの研究が開始された。先進パイロット支援システムは、今後大きな市場が期待される小型航空機を対象として「落ちない」、「快適な乗り心地」、「簡単な操縦」を実現するための先進技術を追求める革新的な研究である。その概要を以下に述べる。

1. 研究の目的

航空機は自動車、鉄道、船舶と並び、長距離・高速輸送手段のひとつとして、その地位を確立しているが、航空機の故障・事故は人々の安全性に直接関わる問題であり、社会的なインパクトも大きい。

特に、墜落事故の発生確率は下げ止まりの状態であるため、航空輸送量が增大すれば墜落事故の件数は確実に増加するので、墜落事故の発生確率を下げるのが航空安全を確保するために急務となっている。墜落の原因としては機体の故障やヒューマンエラーが多い

が、特にジェット化が進む小型航空機においては、飛行中に乱気流に遭遇する危険性が高くなっており、墜落原因のひとつとして注目されている。

また、小型航空機と定期旅客機の事故発生確率（10万飛行時間あたりの事故件数）を比較すると、小型航空機は定期旅客機に比べて致命事故では100倍以上、全事故でも50倍以上の発生確率となっており、小型航空機の安全性向上が急務である。（図1参照）

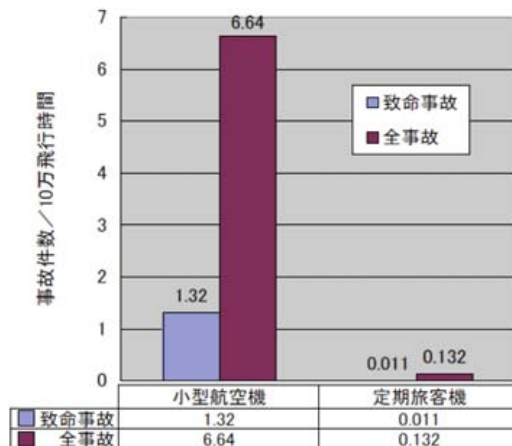


図1 事故発生確率

（出典：米国交通安全調査委員会）

本研究は、これらの社会的ニーズに対応し、気象レーダーでは探知できない突風領域を避けて飛行するとともに、仮に機体故障や突風等が発生しても安全に飛行を継続する知的な飛行制御システム（耐故障飛行制御システム、突風対応システム）、およびパイロットの操縦性をこれまで以上に向上させる操縦支援システム（知的操縦アシストシステム）の開発を行うことを目的とする。

2. 全体構想（研究テーマ）

本研究のテーマは次の3項目である。

- ・耐故障飛行制御システムで「落ちない」技術を実現する。
- ・突風対応システムで「快適な乗り心地」技術を実現する。
- ・知的操縦アシストシステムで自動車のような「簡単な操縦」技術を実現する。

(1) 耐故障飛行制御システム

ニューラルネットワーク^{*)}による知能化技術により、故障等による機体の特性変化を自律学習して、飛行の維持および操縦性の回復を可能とする制御技術を構築する。(図2参照)

(2) 突風対応システムの構想

気象レーダーではキャッチできない晴天乱気流等を、別途研究中のライダー^{**)}のレーザー光で検知し突風を回避する技術と、回避困難な場合は昇降舵を活用して自動的に突風の影響を軽減する技術を開発する。更に、マニュアル操縦により突風の影響を軽減する場合を考慮し、両方の制御系の出力が最適になるよう調整する協調制御技術を構築する。(図3参照)

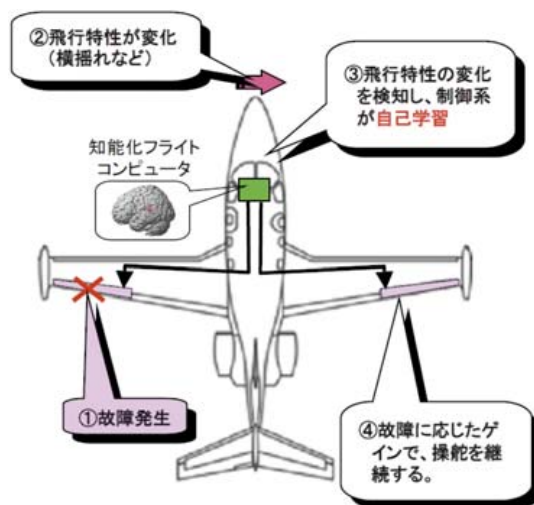
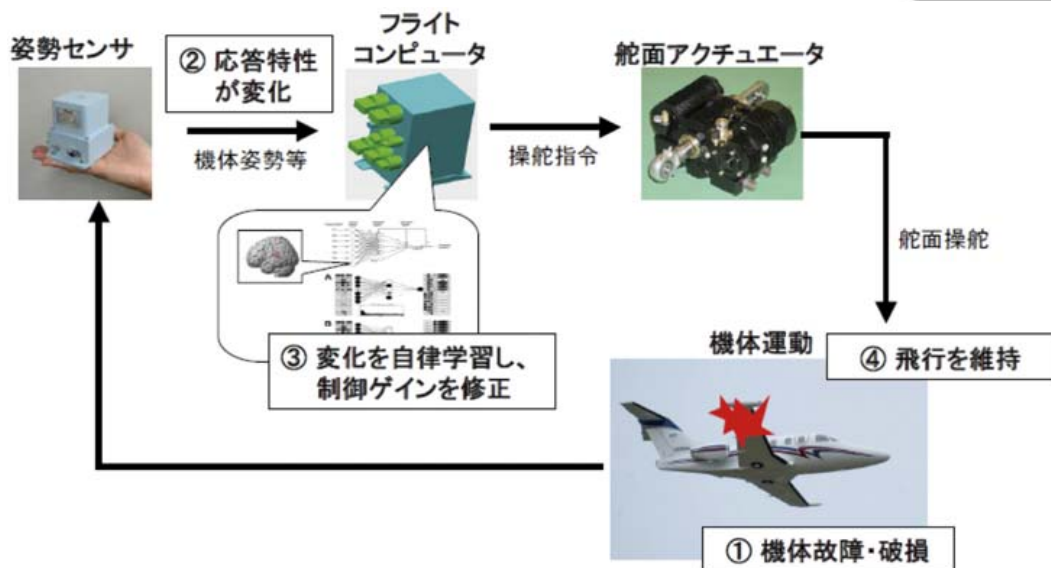


図2 耐故障飛行制御システムの構想

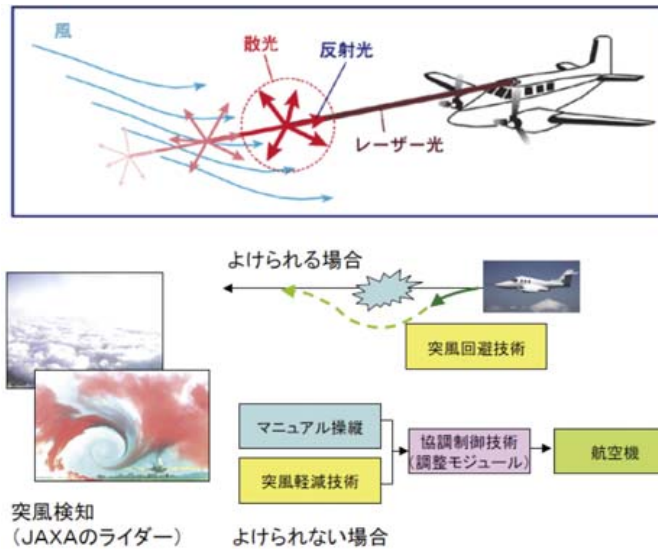


図3 突風対応システムの構想

(3) 知的操縦アシストシステムの構想

操縦桿と舵面が直接機械的に連結されている通常の小型航空機において、目標経路からの逸脱を防ぎ、危険な飛行状態に陥らないよう操縦反力を負荷することで操縦を支援するシステムを構築する。具体的には、経路から

の逸脱に応じて修正のための操舵反力を付加する経路保持アシスト、およびパイロットの意図的な操作に対応し適切な飛行モードを選択するモード選択アシストの構築である。(図4参照)

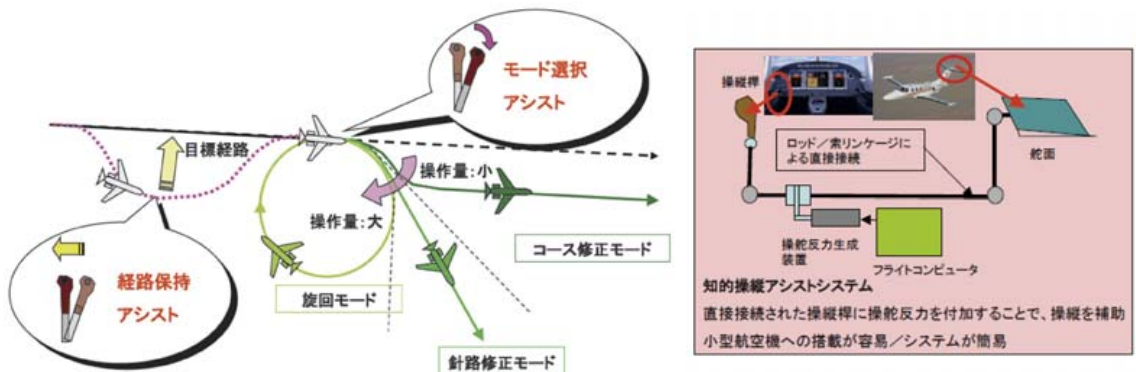


図4 知的操縦アシストシステムの構想

(4) 実証試験の構想

本テーマは実機採用を目指すものであり、その有効性を実飛行環境で実証する必要がある。飛行安全に十分な配慮を行い研究の各フェーズに適した実証試験を行い、着実なステップで研究を進める。3年間にわたる研究

は次の方法にて実証試験を行う計画である。

a. 耐故障飛行制御システム

FHIで設計、東京大学で製作した実証試験用無人機（全長×全幅＝約1.4m× 約1.4m）により、実故障時の飛行実証を実施する。(図5参照)



図5 実証試験用無人機
(FHI設計、東京大学製作)



図7 反力生成装置付きシミュレータ
(FHI製作中)

b. 突風対応システム

JAXA保有の多目的実証試験機 MuPAL- α ^{*)}により、突風回避技術および突風軽減技術に関する飛行実証を実施する。ただし、突風軽減技術に協調制御技術を組み込んだシステムについては、MuPAL- α での飛行実証はまだ困難であり、シミュレータによる地上実証を実施する。(図6参照)



図6 多目的実証試験機 MuPAL- α
(JAXA保有)

c. 知的操縦アシストシステム

FHIで製作中の反力生成装置を組み込んだシミュレータにより、地上実証を実施する。(図7参照)

3. 研究体制

本研究は、産・学・官連携により、SJACが研究を取りまとめ、東京大学、FHI、JAXAが次の分担で作業を行う。なお、本研究の特徴はその実施形態にあり、産・学・官が個々のシーズを持ち寄り、トータルなシステムとしてより高度で先進的な技術レベルを達成することにある。

(1) 東京大学

- a. 「突風対応システム」の突風回避技術及び協調制御技術に関する研究を実施する。
- b. 「耐故障飛行制御システム」の飛行維持機能に関する検討及び実証試験用無人機の製作、飛行試験を実施する。(図5参照)

(2) FHI

- a. 「耐故障飛行制御システム」の操縦性回復機能に関する検討及び実証試験用無人機的设计を実施する。
- b. 「知的操縦アシストシステム」の検討及び地上実証用のシミュレータの設計・製作を実施する。(図7参照)

(3) JAXA

- a. 「突風対応システム」の突風軽減技術に関する研究を実施する。
- b. MuPAL- α による飛行実験を実施する。(図6参照)

4. 研究の進捗状況

(1) 耐故障飛行制御システム

a. 平成20年度の成果

耐故障飛行制御システムは、フィードバック誤差学習法を用いる飛行維持機能とダイナミックインバージョン法を用いる操縦性回復機能に関する研究を実施した。

① 飛行維持機能

フィードバックシステム⁴⁾にフィードフォワード⁵⁾回路としてのニューラルネットワークを付加するフィードバック誤差学習による方式 (FEL ; Feedback Error Learning) である。既存のシステムに簡単に追加が可能であり、線形ニューロンを用いるので反応が早い特徴を生かし、本格的な耐故障飛行制御に移行するまでの飛行維持機能として用いる。平成20年度は、エルロンが完全に固着した状況を想定し、エルロン固着の学習、およびラダーによる代替操縦への自動切り替え機構を考案した。数値シミュレーション、既存の研究用無人機による飛行実験、MuPAL- α による地上エミュレーション試験および予備的な飛行試験により有効性を確認した。

② 操縦性回復機能

ダイナミックインバージョン⁶⁾にニューラルネットワークを付加する方式 (DI-NN ; Dynamic Inversion - Neural Network) である。アルゴリズムが複雑であり非線形ニューロンを用いるので、移行するまでに時間がかかるが、前述の飛行維持機能の後の操縦性回復機能として用いる。平成20年度は、机上シミュレーションにより基本設計の妥当性を確認するとともに、平成21年度以降の検討への足がかりを得た。今後の課題としては、ノイズや風等の外乱が加わった場合にも制御性能を維持するロバスト (安定) 性の向上、および実故障に対応するために

更なる非線形への適応性の向上等が挙げられる。

③ 実証試験用無人機

外形状設計、成立性検討の結果をもとに、機体形状、推進系統設計、システム検討および機器配置設計を行って無人機仕様を設定した。また、炭素繊維強化プラスチック (CFRP ; Carbon-Fiber Reinforced Plastic) による胴体、バルサによる主翼、水平尾翼を製作した。2基の電動ダクトドファン (エンジン)、スピードコントローラ、バッテリー、受信機等を搭載し、機体として組み立てた。

実証試験用無人機の自律飛行に関して、同種形状の小型模型飛行機による飛行実験を実施し、自動離陸、自動上昇、自動ウェイポイント旋回、自動アプローチが可能であることを確認した。また、実証試験用無人機の風洞試験模型を製作し、空力特性データの取得準備を進めた。

b. 平成21年度の計画

アルゴリズムの詳細設計を行うとともに、MuPAL- α による模擬故障時の飛行試験を実施する。平成20年度に引き続き、実故障時の飛行実証を目指し、実証試験用無人機の風洞試験、自律飛行試験および故障機構の設計及び試作を実施する。

c. 平成22年度の計画

アルゴリズムの維持設計を行うとともに、MuPAL- α による飛行試験を実施する。故障機構付の実証試験用無人機による実故障時の飛行試験を行い、その有効性の実証を実施する。

d. 海外の最新状況

2008年4月に、米国のロックウエルコリンズ社が、F-18のスケールモデル機を用いて、

飛行中に右主翼の60%を損失させてもASAC (Automatic Supervisory Adaptive Control) により飛行維持が可能であることを飛行実証した。軍用機を対象とした実破損による飛行試験は世界初である。(図8参照)

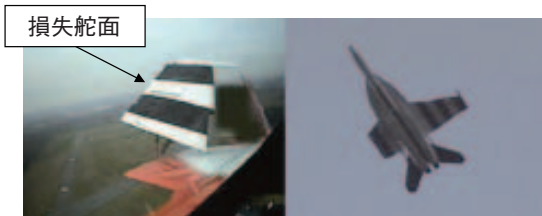


図8 F-18スケールモデルによる飛行実証

(2) 突風対応システム

a. 平成20年度の成果

突風回避技術、協調制御技術に関して、アルゴリズムの調査と検討を実施した。突風軽減技術に関しては、MuPAL- α による地上エミュレーション試験と予備的な飛行試験を実施し基本的な機能・性能を確認した。

b. 平成21年度の計画

突風回避技術および突風軽減技術に関するアルゴリズムの詳細設計を行うとともに、MuPAL- α による突風回避技術の飛行試験を実施する。協調制御技術に関しては、システムの基本設計を実施する。

c. 平成22年度の計画

MuPAL- α に搭載された突風検知装置と突風回避技術を統合するとともに、MuPAL- α による統合飛行試験を実施する。平成21年度に領域を拡大した突風軽減技術について、MuPAL- α による飛行試験を実施する。協調制御技術に関しては、突風軽減技術と統合、シミュレータによるシステム統合試験を実施し、その有効性を実証する。

d. 海外での最新状況

(含 国内の他プロジェクト)

米国で、突風検知装置、突風荷重軽減などに関する研究が進められているが、本研究で目指すトータルシステムとしての突風対応は世界初である。

JAXAでは、独自研究としてライダーの計測レンジを着実に伸ばし、飛行実験で前方の乱気流を検知している。現在は、計測レンジ10kmのライダーの飛行実証を目指して、MuPAL- α への搭載作業を進めている。(図9参照)



図9 MuPAL- α へのライダー搭載

(3) 知的操縦アシストシステム

a. 平成20年度の成果

知的操縦アシストのコンセプトを明確にし、従来の機能にはない目標管理機能及び反力生成機能を含めたハードウェア構成およびソフトウェア構成の仕様を設定した。

この仕様に基づき、反力生成装置を組み込んだシミュレータの基本部分を製作した。

別途、ゲーム用のジョイスティックと汎用ソフトを用いた簡易型シミュレータを構築し、目標推定機能および目標管理機能の評価を実施し、有効性を確認した。

b. 平成21年度の計画

システムの詳細設計を実施する。20年度に

引き続き、地上実証を目指し反力生成装置付きシミュレータの機能拡充および予備試験を実施する。

c. 平成22年度の計画

システムの維持設計を行うとともに、反力生成装置付きシミュレータによる地上試験を実施し、その有効性を実証する。

d. 海外の最新状況

米国で小型航空機に関する計画の中で、コックピット技術のひとつとして類似のハプティック（操縦感覚）を用いた技術が提言されているが、2015～2020年頃の実用化を想定している模様。世界的に見て、ハプティック技術は、まだ概念検討段階であり、シミュレータを用いて本技術の有効性を実証することにより、世界最先端の技術となる。

5. 成果の活用

「先進パイロット支援システム」の研究、実証、採用には安全性が直接絡むので、各段階での適切な検証が必要であり、少なくともその研究の方向性について明確な展望を有しておくことが重要である。国産ジェット旅客機の開発がスタートした現状において、機体の開発のみならず、本研究で扱うような「航空機用先進システム」の研究を推進することが重要である。

先進パイロット支援システムは飛行機の頭脳というべき機能であり、高い付加価値を有するため、将来の国産航空機の差別化技術となりうるとともに他の技術分野への波及効果も大きい。小型航空機は、米国や欧州において様々な企業が参入しつつあるエアタクシー事業に用いられること、および我が国でも今後の規制緩和の流れ如何によってはエアタクシー事業が興る可能性が高いことを考慮する

と、公共交通機関であるエアタクシーを中心とした墜落事故率の低減は急務である。その意味でも先進パイロット支援システムの研究を世界に先駆けて日本発の技術として実施することには大きな価値がある。本研究の成果により期待される効果例を次に示す。

(1) 墜落の発生確率低減

a. 墜落に伴う社会的不安、経済的損失の防止（落ちない飛行機の実現）

(2) 個人所有機の安全性向上

a. 習熟度の低いパイロットでも、より安全な操縦が可能となる。

b. 最高水準の整備が期待できない個人所有機でも、より安全な運用が可能となる。

(3) 乱気流への対応

a. 機体への負担を軽減する。

b. 機内サービスや乗客の乗り心地などの快適性を確保する。

c. 乗客・乗員の身体・生命への安全性を確保する。

(4) コンピュータ・パイロットへの可能性

a. ワンマン・パイロットの定期運航への道を切り開く。

b. 将来実用化が予想される無人航空機への可能性を示す。

(5) その他

a. 自動車産業等の他産業への技術波及効果による安全性向上寄与。

具体的には、障害物を自動回避する自動車や船舶の自動操縦技術、人間のマニュアル操縦を知的に補助できる知的操縦アシストシステム、走行中のパンクなどの事故に対しても安全走行を補償する耐故障自動運転システム等への寄与が期待できる。

6. その他

最近になり、本研究に関連すると思われる航空機事故がいくつか発生している。

「先進パイロット支援システム」はこのような事故への対応を目指しており、飛行安全の更なる向上に役立つことが期待される。

(1) 5人乗り小型双発機（平成21年4月12日）

飛行中に突然死したパイロットに代わり、乗客が管制官の指示に従い無事に小型双発機を着陸させた。なお、この乗客は20年前に単発機の免許を取得し操縦経験があった。

⇒ 知的操縦アシストシステム、耐故障飛行制御システムを活用したコンピュータ・パイロットとしてシステムが確立すれば、免許を持った乗客と同様の作業を行うことが可能と考える。

(2) エールフランス航空276便

（平成21年3月5日、B777-300）

新潟空港の上空を飛行中に乱気流に巻き込まれ、2名の客室乗務員が骨折の重傷。

⇒ 突風対応システムで乱気流を回避するか、巻き込まれても被害をより軽減することが可能と考える。

(3) ノースウエスト航空2便

（平成21年2月20日、B747-400）

成田空港上空で着陸待機中に乱気流に巻き込まれ、機体が急降下し約40名が怪我。

⇒ 突風対応システムで乱気流を回避するか、巻き込まれても被害をより軽減することが可能と考える。

(4) フェデックス80便

（平成21年3月23日、MD-11F）

強風の中を成田空港A滑走路に着陸しようとしたが、ハードランディングとなり、接地と縦揺れを繰り返すポーポイズ現象が発生し、

2回バウンドした後に横転・爆発・炎上し、運航乗務員2名の死亡が確認された。事故原因は調査中であるため断言はできないが、ウインドシア⁷⁾によるものと言われている。事故機のような大型機ではポーポイズ現象はまれな現象である。（図10参照）

⇒ 突風対応システムでウインドシア回避の可能性はある。着陸時に強いウインドシアに巻き込まれると墜落は免れないが、ポーポイズ現象がパイロットの操縦ミスによる場合は、耐故障飛行制御システムにより、事故の被害をより低くする可能性があると考ええる。



図10 フェデックス機の事故

(5) コンチネンタル航空3407便

（平成21年2月12日、DHC8-Q400）

着陸予定時刻の5分前にバファロー空港の手前約10キロで墜落し、乗員・乗客49人全員と民家の住民1名が死亡した。事故当時、現場は雪で風があった。

雪や寒さで飛行中に翼などが氷結するアイシングにより飛行特性が変化した。氷結の危険性がある場合は禁止されている自動操縦であったために変化に気付かず、対応できなかったのが原因かと報道されている。

⇒ 耐故障飛行制御システムで、飛行特性の変化への対応が可能と考える。

(6) USエアラインズ1549便

(平成21年1月15日、A320)

ニューヨークのラガーディア空港を離陸した直後、機長が管制当局に「両翼のエンジンが鳥を巻き込んだ」と連絡した直後にハドソン川に不時着水した。乗員・乗客は全員無事救助され、ハドソン川の奇跡と言われている。(図11参照)

⇒ 耐故障飛行制御システムにより、ベテランのパイロットと同様に近くの空港への着陸を目指すことは可能と考える。空港への着陸が不可能な場合の発展形として、河川などを着陸候補地として選ぶことが可能なシステムとして育てていく必要性を認識した。



図11 USエアラインズ機の着水

【補足説明】

1) ニューラルネットワーク

生物の脳内神経系をモデル化した情報処理方式、神経素子（ニューロン）の結合（ネットワーク）を、外部環境に応じて、自動的に調整する自己学習が特徴である。

2) ライダー

現状は、気象レーダーを用いて雨雲の様子を観察することにより風の様子を予測しているので、雨雲のない晴天時には風の様子を予測することは困難である。そこで、レーザー光を活用し大気中に存在する細かい水滴やチリなどの散乱光を受信することにより風の計測を行う方式がライダーである。

3) MuPAL- α

航空機の誘導制御やヒューマンファクタ等に関する先進技術を飛行実験で実証することを目的に、ドイツのドルニエ社Do228-202双発ターボプロップ機を母機として開発された。様々な航空機の運動を空中で模擬する、インフライト・シミュレーション機能が特徴である。

4) フィードバックシステム

与えた操作量の結果を見て（フィードバックして）から修正する制御である。

そのため、修正動作が後追いとなってしまうので、外的要因が生じると必ずその影響を受けてしまう。

5) フィードフォワード

外的要因などの影響が現れる前に、前もってその影響を極力抑えるように修正動作を行う制御である。通常はフィードバック制御と組み合わせて用いる。

6) ダイナミックインバージョン

プラントに関する正確な情報を基に、その逆モデルを導出し望ましい応答を実現する制御である。この理想応答を明示的に制御ブロックに組み込むことが可能であり、その実現が容易である特徴を有する。実運用時にはプラントの正確な逆モデルを必要とするため、このままでは故障時のモデル変動には対応できない。

7) ウインドシア

大気中の垂直方向または水平方向の異なる2点間で、風向や風速が劇的に異なることをいう。また、地面近くで発生するウインドシアはダウンバーストと呼ばれる強い降下気流を伴うことが多く、離着陸中の航空機にとって非常に脅威となる。

〔(社)日本航空宇宙工業会 技術部部长 柳田 晃〕