

9. 中期コンフリクト検出技術 の高度化に関する考察

航空交通管理領域

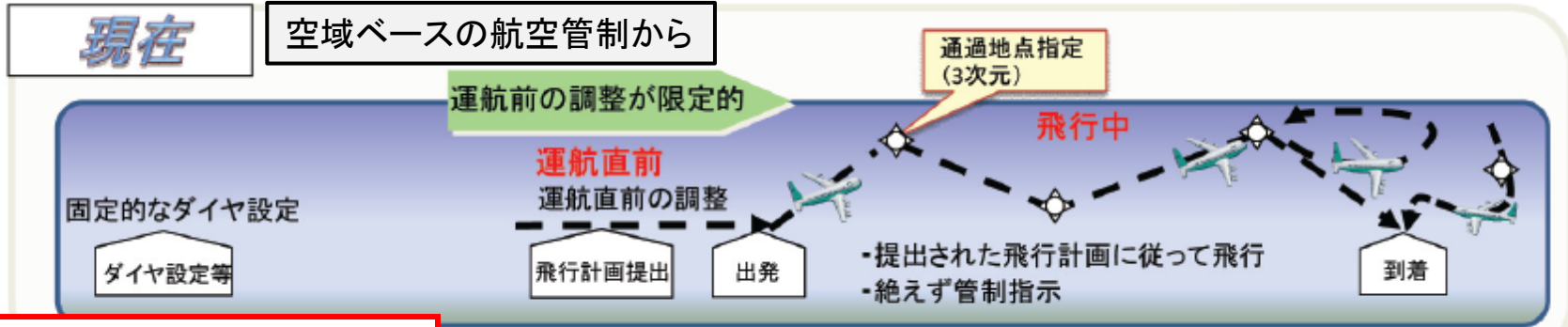
瀬之口 敦, 平林 博子, 白川 昌之

内容

- はじめに
- 中期コンフリクト検出(MTCDD)技術
 - 概要
 - 技術的課題
- 軌道予測精度と中期コンフリクト検出数の分析
 - 中期的な軌道予測の特性
 - 予測誤差, 検出間隔とコンフリクト検出指数の関係
- データリンクを活用したMTCDDの高度化に関する考察
- まとめ

軌道ベース運用 (TBO*)

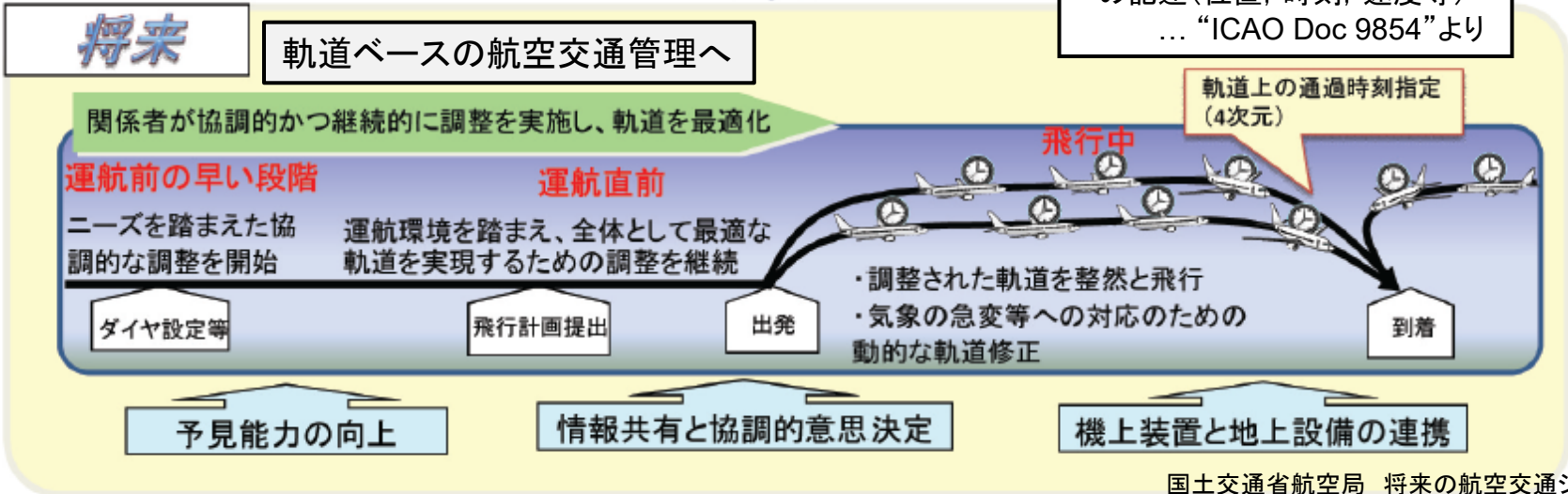
* Trajectory-based Operation



- ・ 中期コンフリクト検出
- ・ データリンク



○ 軌道(トラジェクトリ)とは、航空機の空中・地上での運動の記述(位置, 時刻, 速度等) ... “ICAO Doc 9854”より



協調的かつ段階的な軌道調整のイメージ

国土交通省航空局 将来の航空交通システムに関する研究会, “将来の航空交通システムに関する長期ビジョン～戦略的な航空交通システムへの変革～”, 2010年2月.

中期コンフリクト検出 (MTCD*) 技術

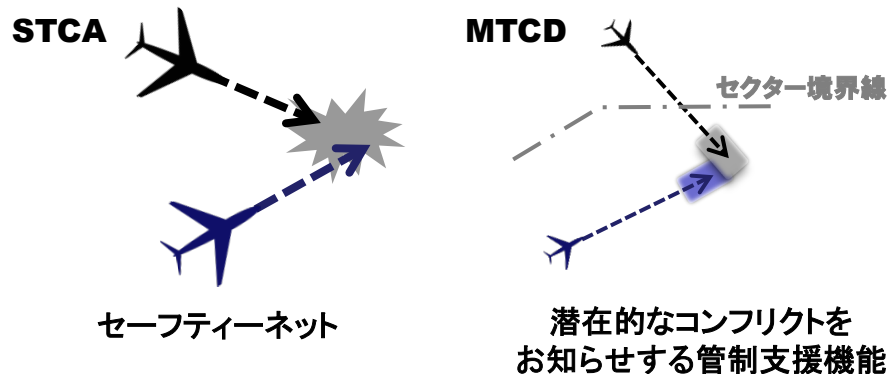
* Medium-term Conflict Detection

• セパレーションとコンフリクト

- セパレーション (Separation): 航空管制官が航空機間に適用する最小の安全間隔 (管制間隔)
- コンフリクト (Conflict): 管制間隔が満たされない状態
- 航空機の空中衝突を防ぐため, 航空管制では管制間隔を行使

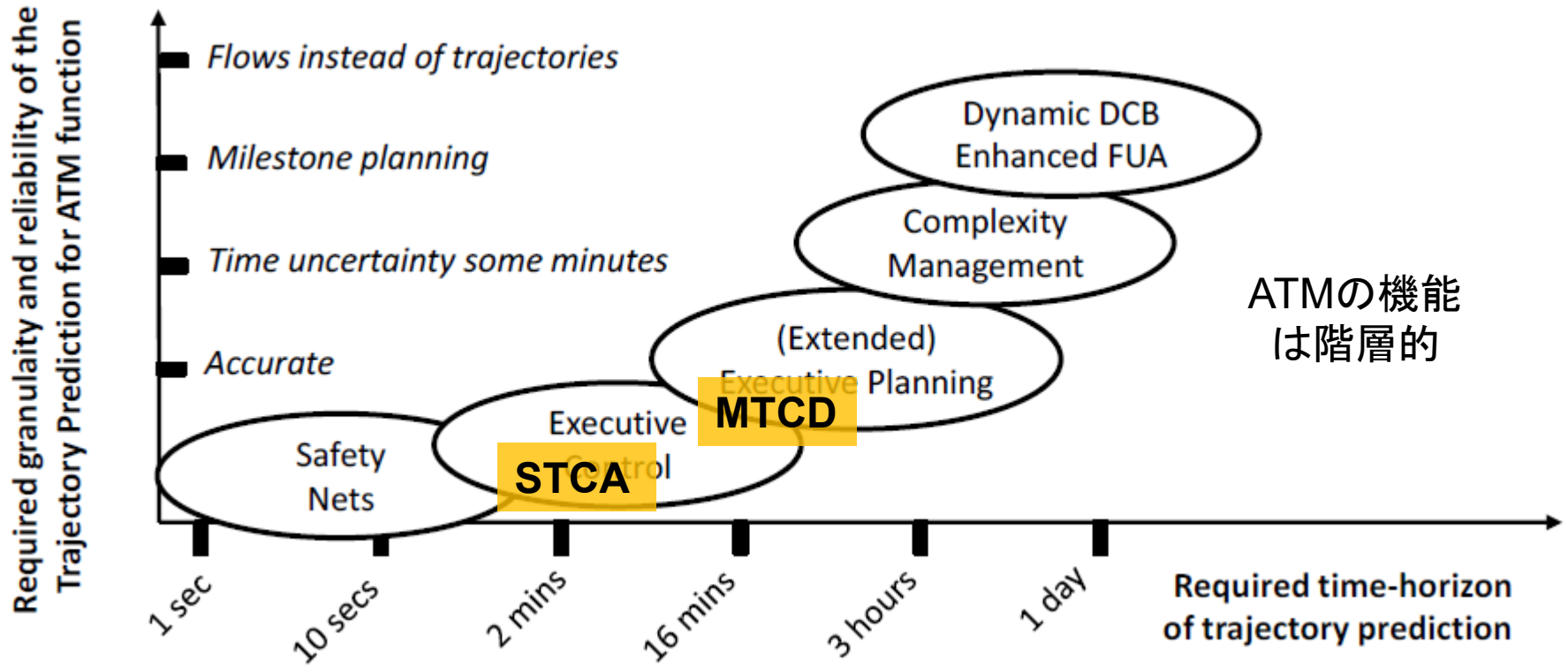
• コンフリクト検出 / 解決

- セパレーション管理の一環
- 短期コンフリクト警報 (STCA*): 猶予時間は2~3分 * Short-term Conflict Alert
- 中期コンフリクト検出 (MTCD): 20分程度先までの潜在的なコンフリクト検出



平林 博子, 瀬之口 敦, 白川 昌之,
“中期コンフリクト検出技術の必要性
と課題”, 第16回電子航法研究所研
究発表会, No.4, 2016年6月.

ATM機能と必要とされる予測精度



“Accuracy of the flight trajectory”, ICAO ATM RPP, WP601, SESAR, Toulouse, Mar. 2017.

MTCDの技術的課題

- TBOにとって
 - MTCDのように、解決すべき予測されたコンフリクトの発生時点からかなり前の、解決までに時間的な余裕のある早い段階の航空管制を支援する機能が重要
 - MTCDは飛行中の航空機だけでなく、計画段階の航空機とのコンフリクトや不可侵空域への侵入なども検出対象
- MTCDが有効に機能するためには
 - 技術の核となる軌道予測の精度向上
 - 受容できる潜在的なコンフリクトの検出数
 - 管制官への情報提供方法の検討, などが必要
- 潜在的なコンフリクトの検出数は検出間隔などによって変化するため、軌道予測精度と中期コンフリクト検出数の関係进行分析した

平林 博子, 瀬之口 敦, 白川 昌之,
“中期コンフリクト検出技術の必要性和課題”, 第16回電子航法研究所研究発表会, No.4, 2016年6月.

中期的な軌道予測の特性

- 予測誤差 -

- 中期的な軌道予測
 - 8分先および20分先までの軌道を予測
 - レーダデータ(実航跡)と飛行計画情報を使用
 - 実航跡との差を計算することで予測誤差を求めた
- 予測手法
 - ① 実航跡を平滑化補間して1便毎に時間と位置の4次元連続関数を求める
 - ② 連続関数から対地速度を求め、8分先および20分先の位置を予測するために用いる
 - ③ 飛行計画情報から飛行経路を抽出し、予測した各フィックスの通過時刻をもとにした4次元軌道を生成する

	8分先		<	20分先	
	along-track	cross-track		along-track	cross-track
平均	-1.15 NM	-0.03 NM	飛行経路のズレ	-0.31 NM	-0.31 NM
標準偏差	5.76 NM	4.71 NM		12.74 NM	8.73 NM

白川 昌之, 瀬之口 敦, 平林 博子, “中期的軌道予測についての一考察”, 第55回飛行機シンポジウム, 2C02, 2017年11月.

中期的な軌道予測の特性

- 飛行状態の分類 -

- 飛行状態の分類
 - 直行: 特定のフィックスに0.05 rad以内で向かう場合
 - 通過: 特定のフィックスを5 NM以内で通過する場合
 - 他: 「直行」および「通過」以外
- 標本数: 予測軌道の計算時点毎の総数
- 「直行」「通過」が大部分を占めている ⇒ 中期的な軌道予測においては直行先などの将来の飛行経路を正確に把握し、予測に活用できることが重要

	直行	通過	他	合計
標本数	493,522	121,332	52,868	667,722
割合	73.9 %	18.2 %	7.9 %	100.0 %

予測誤差，検出間隔とコンフリクト検出指数の関係

- コンフリクト確率とコンフリクト検出指数 -

• コンフリクト確率

$$P(x) = 2 \int_{\frac{x}{2}}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma^2}\right) dt$$

$$= \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{2}\sigma}\right)$$

予測誤差に対する
コンフリクト発生の感度
を表すようなパラメータ

• 相補誤差関数

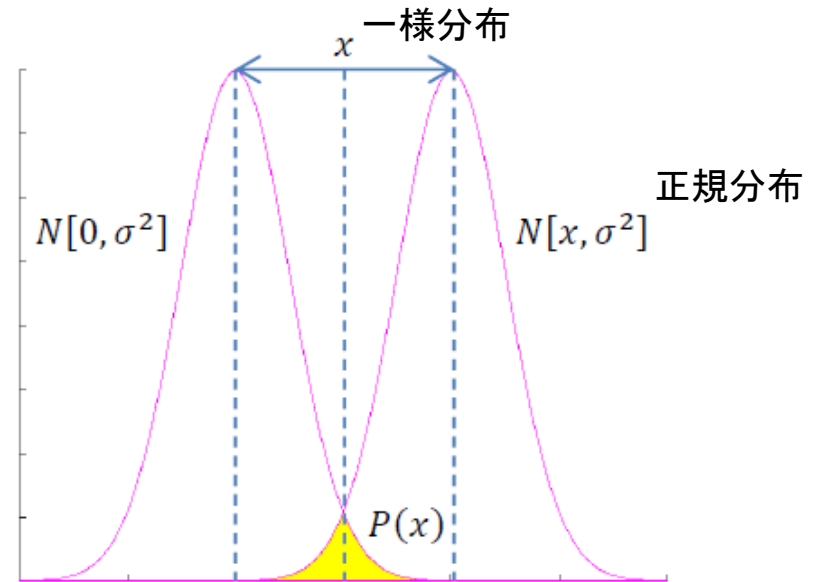
$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} \exp(-z^2) dz$$

$$= 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-z^2) dz$$

• コンフリクト検出指数

$$C(d) = \int_0^d P(x) dx$$

$$= d \operatorname{erfc}\left(\frac{d}{2\sqrt{2}\sigma}\right) + \frac{2\sqrt{2}\sigma}{\sqrt{\pi}} \left(1 - \exp\left(-\frac{d^2}{8\sigma^2}\right)\right)$$



問題の単純化:

飛行経路に沿った方向の1次元で考える
相対的な大小比較に着目:

絶対値のコンフリクト検出数ではなく
コンフリクト検出指数を用いる

予測誤差，検出間隔とコンフリクト検出指数の関係

- 予測誤差とコンフリクト確率，検出指数 -

- 予測誤差 σ

- 水色: 0, 2, 4, ..., 16, 18, 20 NM
(σ が大きくなるにつれて上方向へ変化)
- 桃色: 5.76 NM(8分先), 12.74 NM(20分先)
- 青色: 1.6 NM(8分先), 4 NM(20分先)
(EUROCONTROLの仕様: 0.2 NM/min)

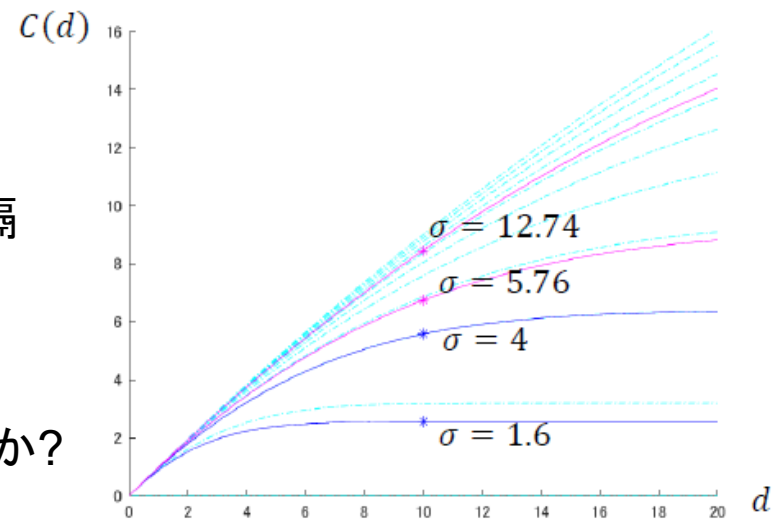
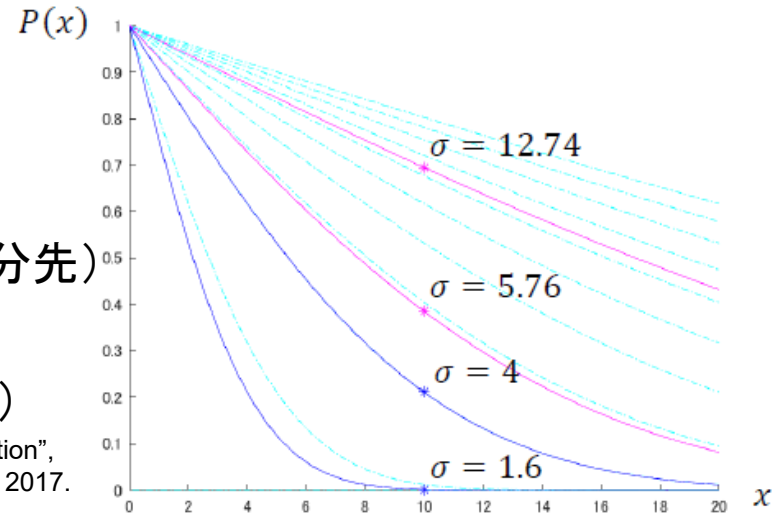
"EUROCONTROL Specification for Trajectory Prediction",
EUROCONTROL-SPEC-0143, Edition 2.0, pp.21-22, 2017.

- 結果

- 予測誤差が小ならば
⇒ コンフリクト確率，検出指数も小
- コンフリクト検出指数を同程度に収めたい
⇒ 大きな予測誤差に対して小さな検出間隔

- 結論

- 中期的な軌道予測の精度向上が重要
- データリンクにより予測精度を改善できるか?

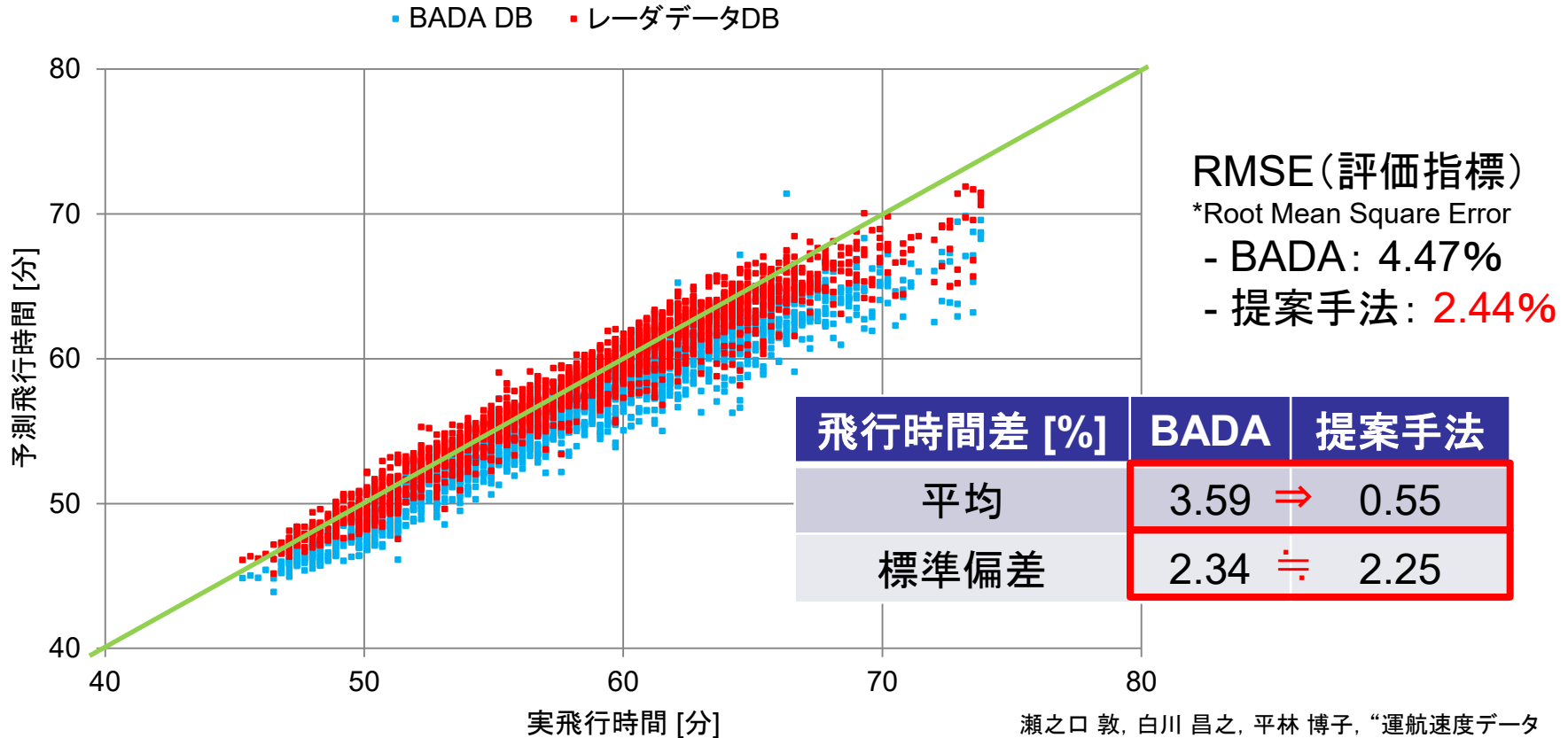


データリンクを活用したMTCDの高度化に関する考察 - 改善策の検討 -

	飛行計画段階(離陸前)	飛行中
航空機の速度推定誤差の改善策	対気速度のデータベース化 (上昇・降下の速度に影響する重量のデータベース化も有効)	Conformance Monitoring (速度などの他, 飛行モードの把握も重要) + 速度指定等
風の予測誤差の改善策	気象予報の精度向上 ← 航空機からの風情報を 数値予報モデルの一観測 データとして取り込む	<ul style="list-style-type: none"> ・ 先行機の風情報の利用 ・ Tailored Wind Forecast (風情報を最適化してアップリンク)
飛行経路に伴う誤差の改善策	飛行経路のデータベース化 <ul style="list-style-type: none"> - 標準経路 - 混雑回避経路 - 悪天回避経路, 等 	飛行経路のダウンリンク／アップリンク <ul style="list-style-type: none"> - ADS-B - SSR Mode S DAPs - ADS-C EPP, 等

データリンクを活用したMTCDDの高度化に関する考察

- 対気速度のデータベース化 -



レーダデータ期間: 2012年11月～2013年9月

評価対象: 1,857便(福岡発羽田行, B738/B772/B763/A320/B773)

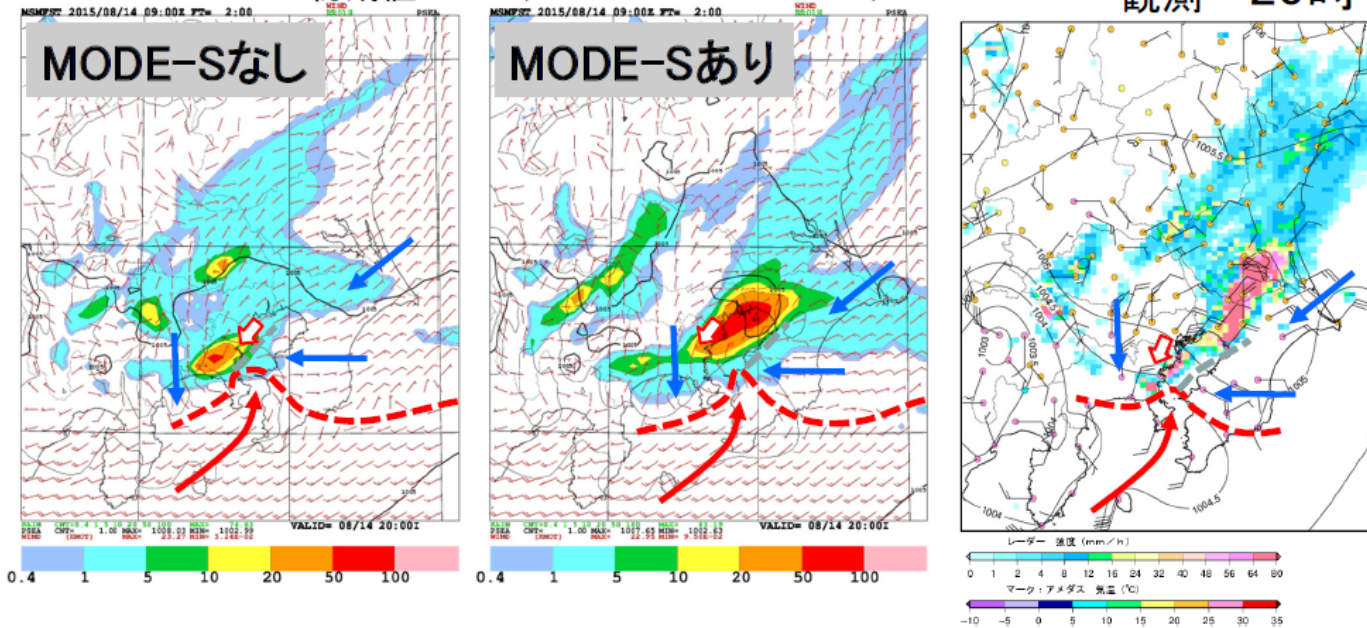
平均飛行時間59分+15分以上を例外処理(42便)

瀬之口 敦, 白川 昌之, 平林 博子, “運航速度データベースに基づく軌道予測の評価”, 第15回電子航法研究所研究発表会, No.1, 2015年6月.

データリンクを活用したMTCDDの高度化に関する考察 - 気象予報の精度向上 -

同化実験結果 (MODE-Sの効果)

2015.8.14 09UTC 初期値 FT=2 (valid: 2015.8.14 20JST)



- ・ 気象庁の現業で用いられている同化システム「メソNAPEX」を使用(気象研究所に移植したシステムを利用)。
- ・ MODE-Sデータを利用すると、発達した積乱雲の分布が実況により近い。
- ・ 東風と北東風のシアライン(青い破線)の位置も、より実況に近い。

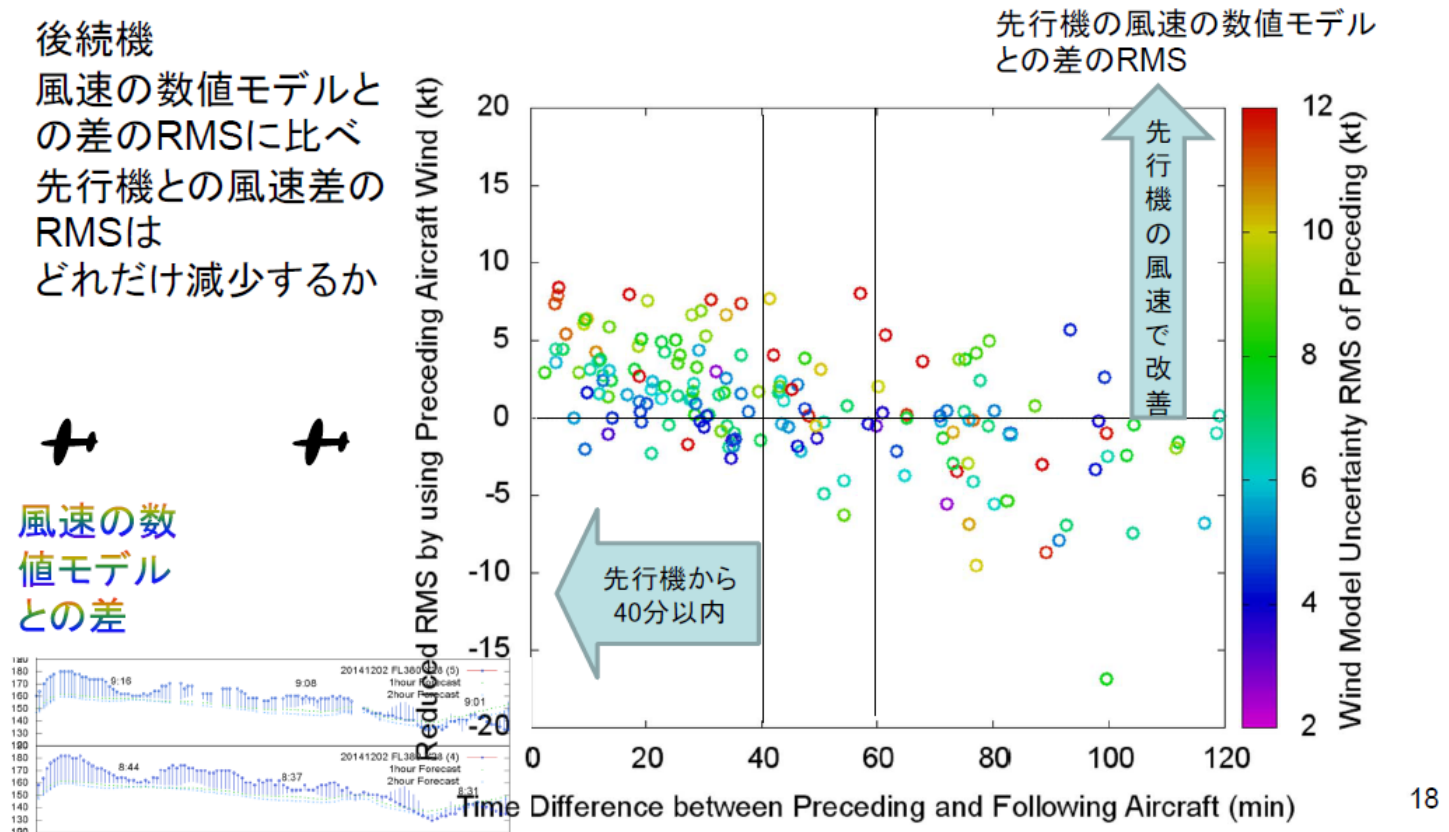
瀬古 弘, 小泉 耕, 瀬之口 敦, 吉原 貴之, 古賀 禎, “航空機からのSSRモードSダウンリンクデータの同化実験(その3)”, 日本気象学会2018年度春季大会, 2018年5月。

データリンクを活用したMTCDDの高度化に関する考察

- 先行機の風情報の利用 -

前刷り提出後の分析結果 Y28(赤石山脈横断)

実際、何分くらいまでなら先行機の風の方が精度が良いのか

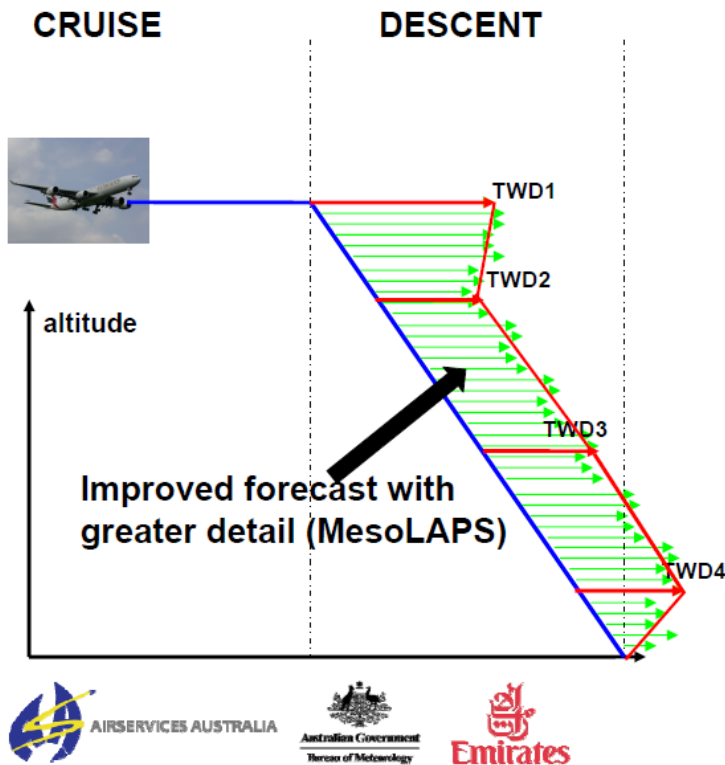


手塚 亜聖, “先行機のモードSデータを用いた予測風速補正と前線通過時の飛行分析による悪天候モデル作成”, 第6回TBOアドホック, 2015年12月.

データリンクを活用したMTCDの高度化に関する考察 - Tailored Wind Forecast -

9th USA/Europe ATM R&D Seminar

TDW: How it works



Fix upper level at cruise altitude for FMS to be able to accurately place TOD

- 3 free levels remaining that are chosen such that prediction error is minimised (The line is a better fit).
- Animation shows only one degree of freedom (level). TDW algorithm also tailors wind speed and wind direction to find the best fit.
- Still not perfect but will provide better information to the FMS about the descent wind profile and enable it to calculate a better geometric path for an efficient CDA

Q. How will we know if it is a better solution?

A. By reduced use of speedbrake or throttle on descent.

Greg McDonald, Jesper Bronsvort, "Enhanced Descent Wind Forecast for Aircraft", 9th USA/Europe ATM R&D Seminar, Berlin, June, 2011.

データリンクを活用したMTCDDの高度化に関する考察 - 飛行経路のデータベース化 -

新規研究

気象要因による運航制約条件を考慮した軌道調整に関する研究

目的

将来、TBO導入の際には、気象情報を考慮した精度の高い軌道情報が必要となる。

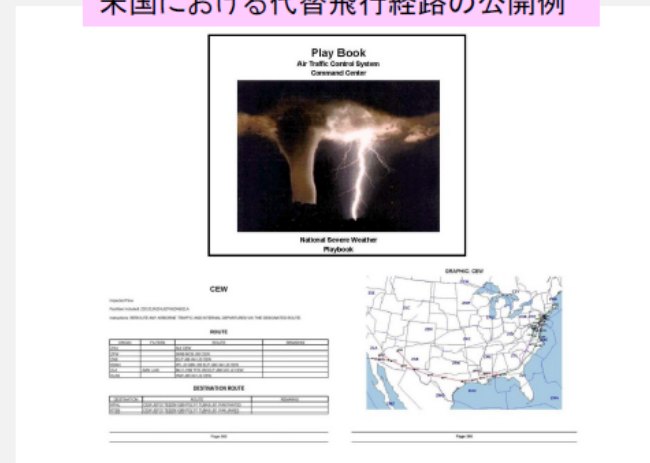
本研究においては、気象が航空機の運航や交通流に及ぼす影響を分析し、悪天の発生と航空機の回避行動、それらに起因する交通流の関係を明らかにする。また、悪天発生時において、それを回避する代替飛行経路の飛行時間や燃料消費、関連空域の管制処理容量等を算出可能とし、代替飛行経路の良し悪しを判断できるようにする。

これにより、悪天発生時の航空機の運航や航空交通流管理の判断が容易となり、また、将来のTBO導入の際、軌道調整を行うにあたっての非常に有効な情報となる。

研究内容

- ・悪天と交通流の関係を明らかにする
 - 研究開発に必要な各種データの収集を行う。
 - 悪天の発生状況や回避状況の分析とモデル化を行う。
- ・実験用評価システムの開発
 - 個別の飛行軌道に係る飛行時間や燃料消費、悪天遭遇状況等のほか、空域の管制作業用や取扱機数が算出可能で、かつ現行の交通流制御を模擬できる実験用評価システムの開発を行う。
- ・代替飛行経路の評価
 - 悪天発生時の代替飛行経路を評価する指標の検討を行う。

米国における代替飛行経路の公開例



成果・効果

- ・気象情報等を活用した交通流管理や高精度な軌道情報の具体例の提案を行う。
- ・気象情報による交通流管理への影響度を定量的に示す手法の開発を行う。
- ・航空交通流管理センターが実施する交通流管理の支援情報として活用されることでCDMの高度化に資する。

データリンクを活用したMTCDDの高度化に関する考察

- 飛行経路のダウンリンク／アップリンク -

	ADS-B	SSR Mode S DAPs	ADS-C EPP
通信メディア	1090ES	1030/1090MHz	VDL Mode 2
データ通信頻度 (参考値)	◎ 約0.5秒毎 (上記は発信頻度)	○ 約10秒毎 (SSRの質問周期 に依存)	△ 約14分毎 (既存のADS-C定期 通報の設定値例)
データ内容 (飛行経路関連)	△ ・ BDS 0,9: airborne velocity	○ ・ BDS 4,1 - 4,3: next waypoint details ・ BDS 5,4 - 5,6: waypoints 1, 2 and 3	◎ ・ up to 128 waypoints $ETA_{min/max}$, $V_{min/max}$, 等を含めることが可能 (オプション設定)
通信コスト	なし	なし	あり

- いずれの手段も十分に活用できるほど機上対応および地上整備が進んでいないので実用化はもう少し先になると思われる
- それぞれの利点を組み合わせて運用することが望ましい

まとめ

- MTCDD技術の高度化における中期的な軌道予測の重要性を示した。
- 予測精度の向上に有効な飛行経路の取得について、データリンクと絡めて考察した。
- 今後は飛行計画段階のような早い段階における航空交通管理を支援するための研究開発に取り組みたい。

謝辞

レーダデータおよび飛行計画情報のご提供等を通じて本研究にご協力いただきました国土交通省航空局の関係各位に深く感謝いたします。