

# 気象による軌道予測の不確定性の研究

手塚亜聖・東山侑司(早稲田大学)

---

# 発表の流れ

## 1.はじめに

## 2.研究方法

SSR modeS システムの分析データ

フライト毎のデータへの変換

気象庁メソ数值予報モデル(MSM)の利用

航空機の運航モデル

## 3.研究結果

ISA, Non-ISA モデルの比較による気温の影響の調査

MSM 数值予報による気象条件での軌道計算

対地速度の比較による風速の影響の調査

## 4.まとめ

# 研究背景

- 現行の航空交通システムの課題
- 航空交通量の増加  
（国内：2027年までに2005年比1.5倍の予測）
- 安全性の確保
- 運航、管制の効率化
- 環境問題への対応など
- 将来の航空交通システムに関する長期ビジョン（CARATS）
- 航空交通量増大への対応など、2025年までの達成目標が定められ、様々な施策が検討
- 軌道ベースの航空管制

CARATS: Collaborative Actions for Renovation of Air Traffic Systems

項目	数値目標
安全性の向上	安全性を5倍に向上
航空交通量増大への対応	混雑空域における管制の処理容量を2倍に向上
利便性の向上	サービスレベル(定時制、就航率及び速達性)を10%向上
運航の効率性の向上	1フライトあたりの燃料消費量を10%削減
航空保安業務の効率性の向上	航空保安業務の効率性を50%以上向上
環境への配慮	1フライトあたりのCO <sub>2</sub> 排出量を10%削減
航空分野における我が国の国際プレゼンスの向上	(国際会議の開催、国際協力の案件等で評価)

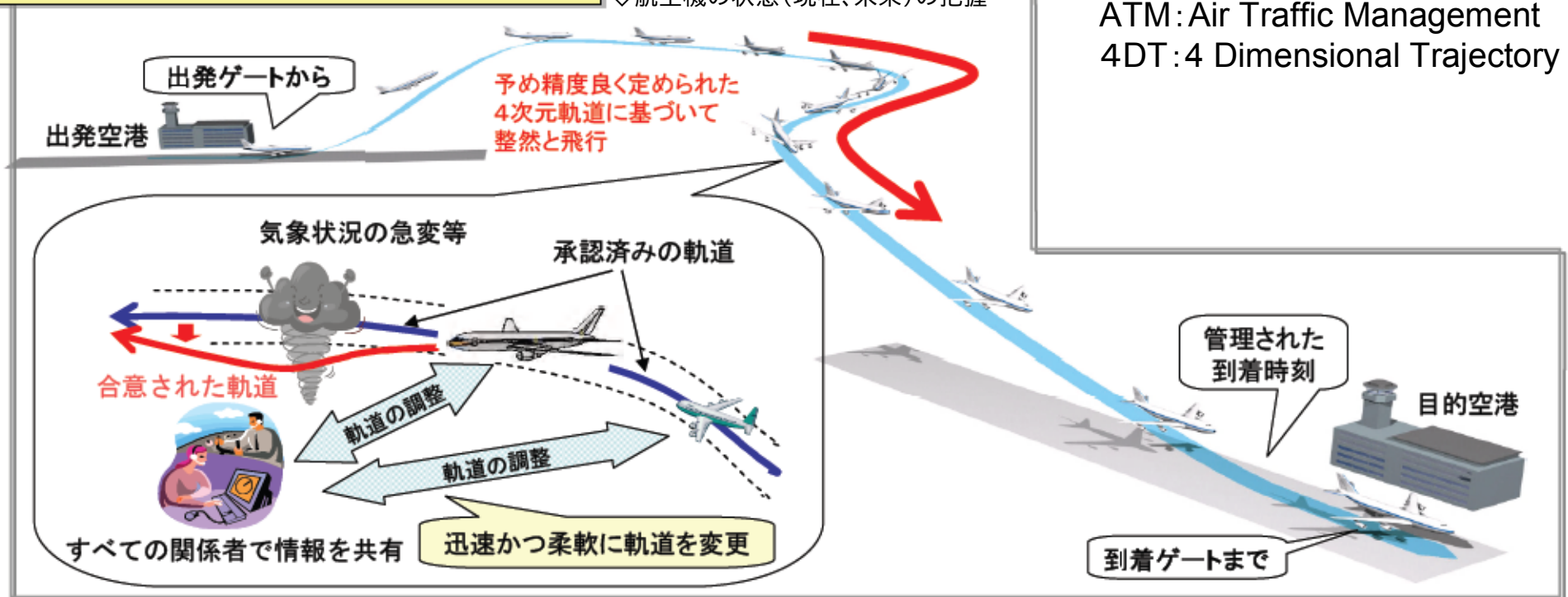
# 軌道ベース運航

- ・ 空域ベースから軌道ベースのATM運用への移行
- ・ 全飛行フェーズにおいて時間管理を導入した4次元軌道に沿ったATM運用

## 軌道ベース運航 (4DT: 4Dトラジェクトリ)

- ◇ 飛行環境 (空間、時間) を正確に把握
- ◇ 航空機の状態 (現在、未来) の把握

ATM: Air Traffic Management  
4DT: 4 Dimensional Trajectory



予測精度の向上

情報共有と協調的意思決定

機上装置と地上設備の連携

統合管制情報処理システム

# 燃料消費をなるべく抑える軌道ベース運用

## 軌道ベース運用の実現

出発段階において将来の軌道を予測する必要  
気象の影響により軌道予測にはある程度の不確かさ

軌道予測の不確かさを明らかにするとともに、  
その不確かさを小さくする方策の検討が必要

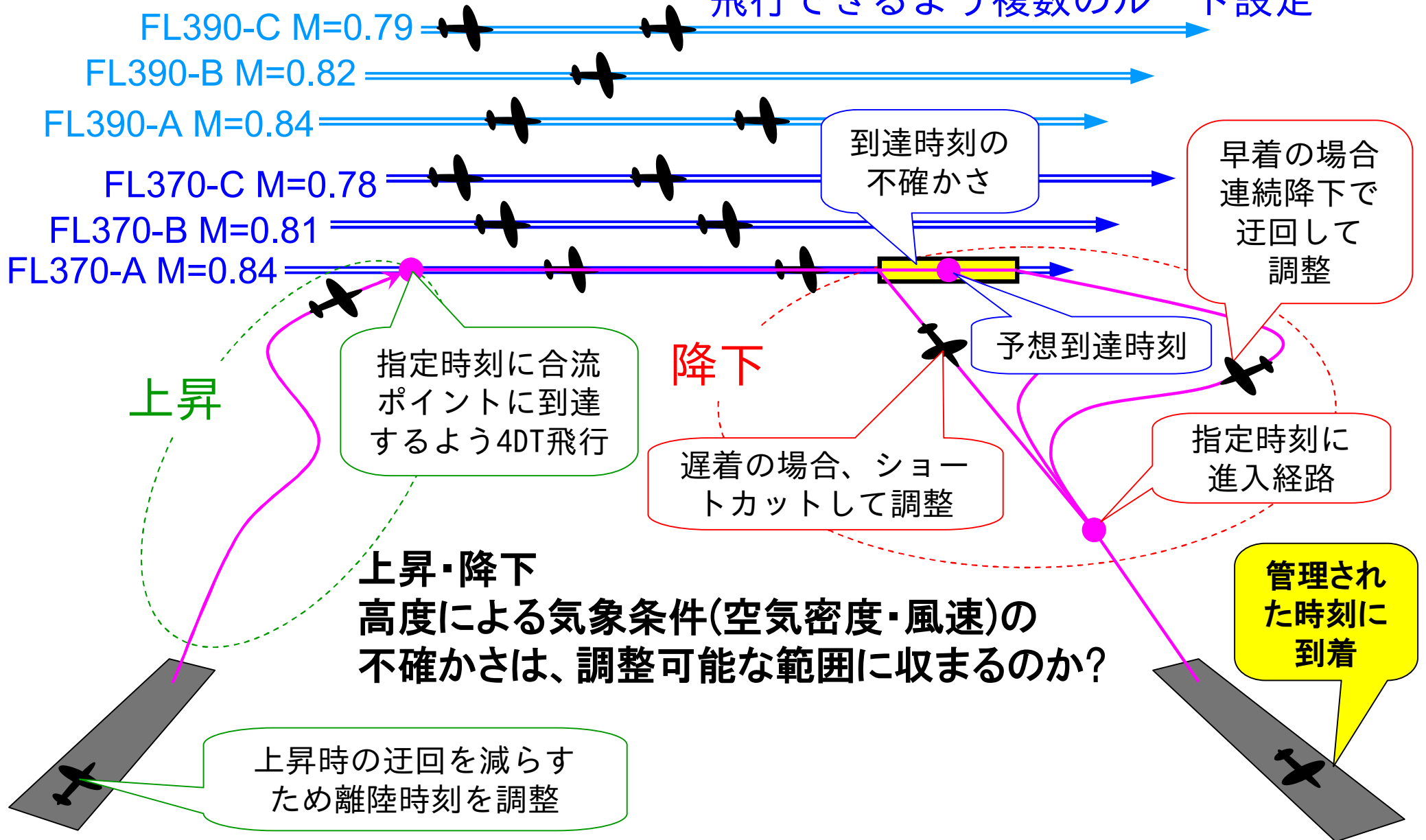
## 燃料消費をなるべく抑える運航

巡航状態では、効率の良い巡航マッハ数で飛行  
レーダーベクターによる迂回は燃料を消費  
このような時間調整は行わないことが望まれる。

巡航マッハ数を最適な値とすると、気象条件の不確かさは  
積分されていく。

# 気象による軌道予測の不確定性を考慮した運航のイメージ

巡航状態: 各々の機体の最適なマッハ数で飛行できるように複数のルート設定



# 研究目的

最適な巡航マッハ数での飛行により積分された気象条件の不確かさを、連続降下方式による経路に、迂回・ショートカットが可能な冗長性を持たせることで、打ち消すような航路設定が可能かどうかを検討することを目指す。

本研究では、SSRモードSで取得した実運航データを分析  
ICAO標準大気及び気象の数値予報データを基にした計算により、気象の影響によりどの程度の不確かさが生じるかを明らかにする。

# 発表の流れ

## 1.はじめに

## 2.研究方法

SSR modeS システムの分析データ

フライト毎のデータへの変換

気象庁メソ数值予報モデル(MSM)の利用

航空機の運航モデル

## 3.研究結果

ISA, Non-ISA モデルの比較による気温の影響の調査

MSM 数值予報による気象条件での軌道計算

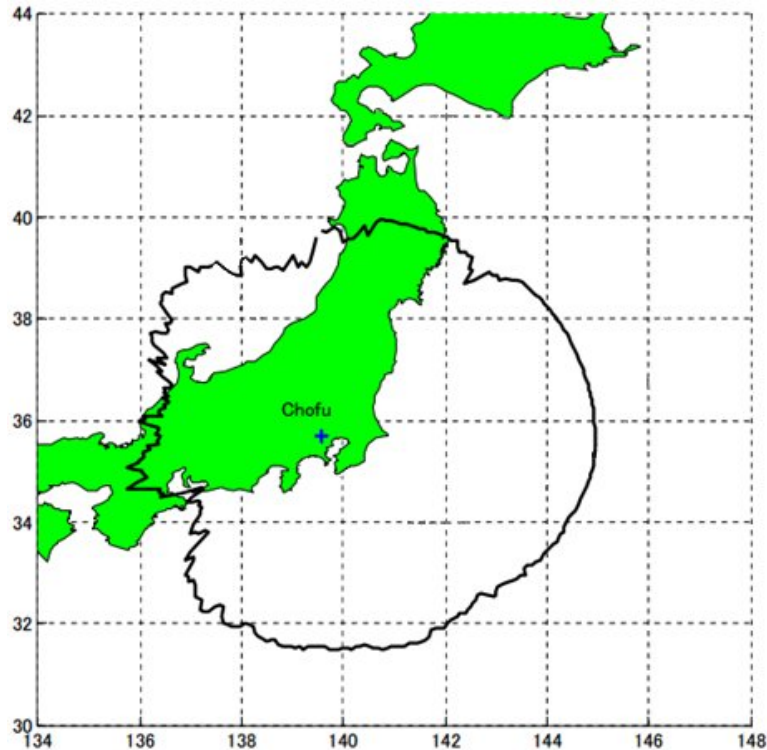
対地速度の比較による風速の影響の調査

## 4.まとめ



# SSRモードSシステムのデータ

- SSRモードSシステムから取得したデータを利用  
(SSR:Secondary Surveillance Radar)



調布局の監視覆域

- 取得できるデータ
  - 時間
  - 緯度, 経度
  - 気圧高度
  - 対地速度(Ground Speed)
  - 真対気速度(TAS: True Airspeed)
  - 指示対気速度(IAS: Indicated Airspeed)
  - マッハ数
  - 真航跡角(True Track Angle)
  - 機首磁方位(Magnetic Heading)
  - 大気圧の設定状態および設定値

レーダの測位誤差(緯度, 経度)  
距離方向のRange誤差  $\sigma_R = 25$  [ft]  
方位角方向のAzimuth誤差  $\sigma_\theta = 0.06$  [deg]  
実験局から300kmの位置の場合,  
Range誤差が7.6m, Azimuth誤差が314m

# フライト毎のモードSデータ分割

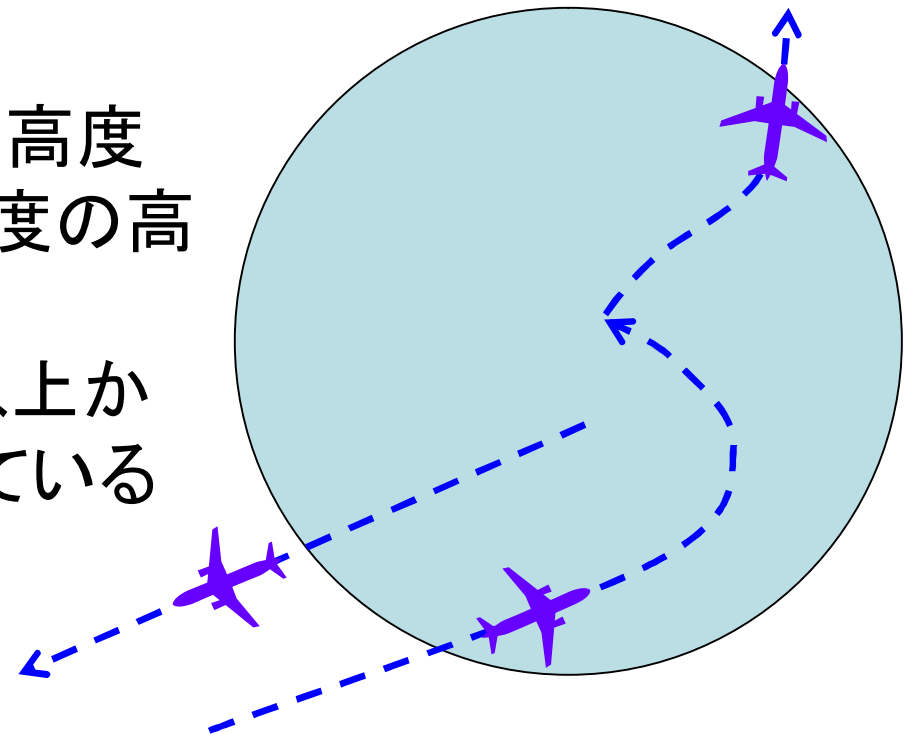
## SSRモードSシステム

覆域内を飛行する航空機に対し約10秒間隔にて信号を送信してデータ取得

航空機が実験局から離れて覆域から外れた場合や、航空機が建築物や山脈などの陰に入ると通信が途絶える。

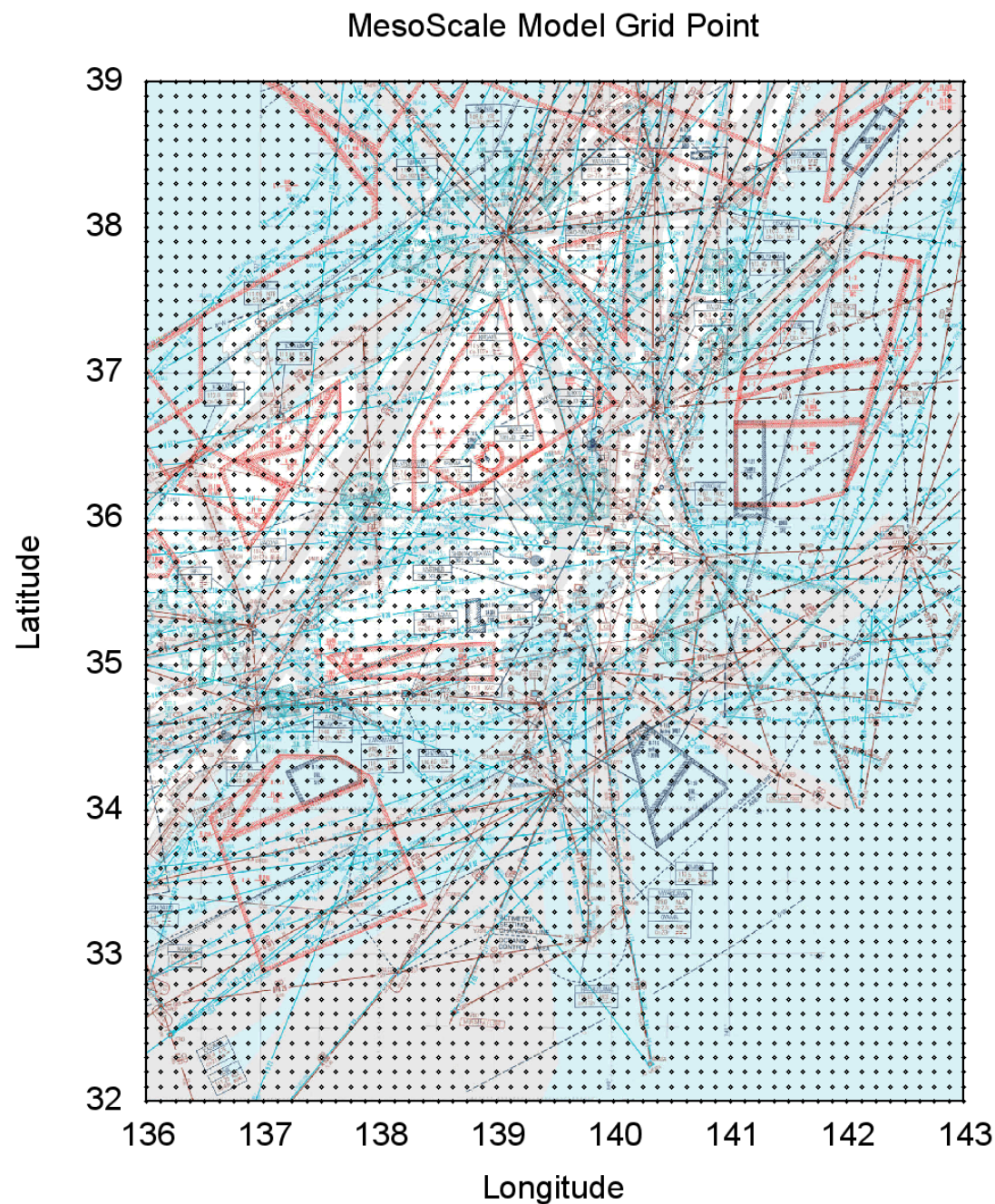
空港に着陸する航空機はある程度の高度以下で通信が途絶え、離陸後ある程度の高度以上で通信が再開。

空港でのターンアラウンドには20分以上かかること考慮、20分以上間隔が空いているデータは別のフライトとみなして整理。



# 気象庁 メソ数値予報モデル

- ・ 気象データ:  
気象庁 MSM  
(メソ数値予報モデル)
  - 3時間間隔の予報  
初期値は3時間毎に更新  
一番確からしい値として,  
MSMデータの初期値を使用
  - 指定の緯度・経度・高度・時間における気温・風速の予測値は,  
緯度・経度・高度・時間に対して  
線型補間で算出。
- ・ 解析対象のデータ:
  - 2012年2月20日～24日  
27日～29日
  - 2012年8月22日～29日



# 運航モデル

- ・ ユーロコントロールのBADA (Base of Aircraft Data) を利用
  - 各航空機の性能データ、運航データ  
(翼面積, 抗力係数, エンジン推力, 燃料消費量など)
- ・ Total-Energy Model
  - 質点モデル、エネルギー保存式
  - 航空機に働く仕事量の変化率と、位置エネルギー・運動エネルギーの変化率

$$(Thr - D) \cdot V_{TAS} = mg_0 \frac{dh}{dt} + mV_{TAS} \frac{dV_{TAS}}{dt}$$

# 発表の流れ

## 1.はじめに

## 2.研究方法

SSR modeS システムの分析データ

フライト毎のデータへの変換

気象庁メソ数值予報モデル(MSM)の利用

航空機の運航モデル

## 3.研究結果

ISA, Non-ISA モデルの比較による気温の影響の調査

MSM 数值予報による気象条件での軌道計算

対地速度の比較による風速の影響の調査

## 4.まとめ

# 標準運航モデルに基づく降下

## 計算条件

降下時のCASが各高度区間ごとに一定  
遷移高度より上空ではマッハ数一定  
CASと降下推力を与える

高度33,000ftから1,000ftまで降下  
(10058mから305m)

大気:

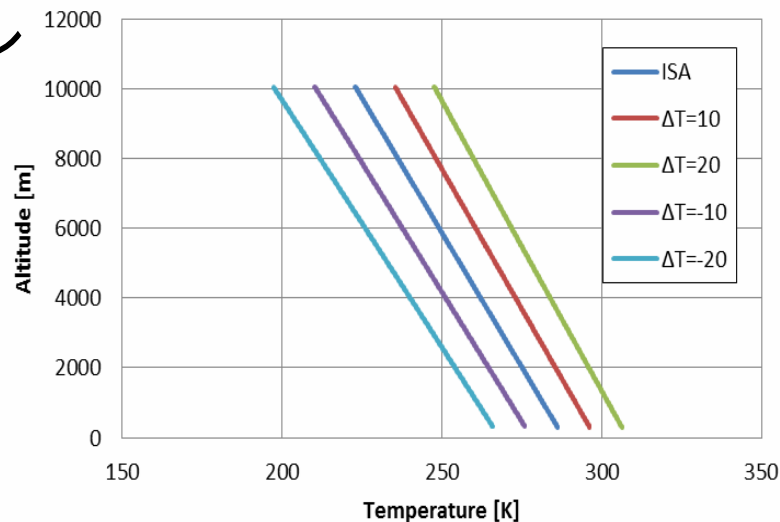
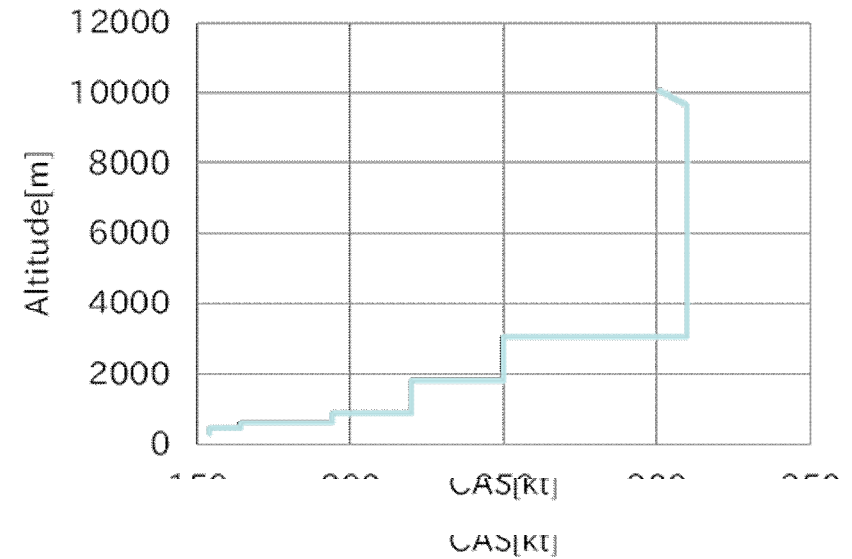
国際標準大気 (ISA) モデル

Non-ISAモデル

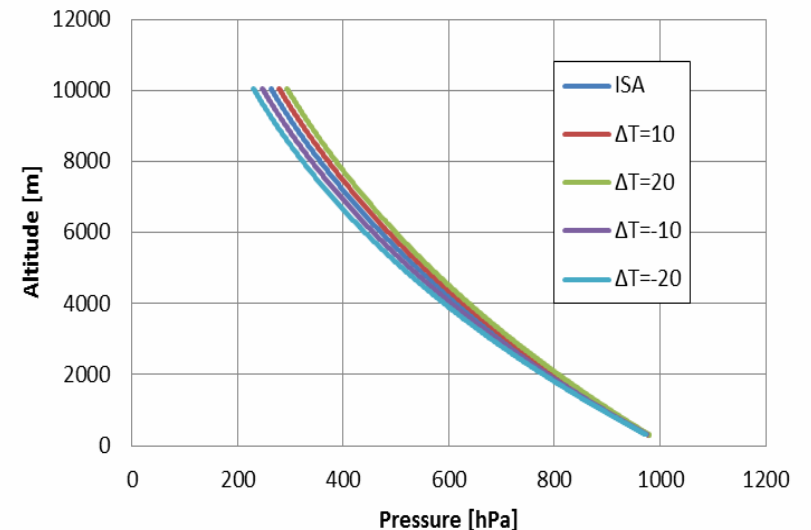
無風

機体: B777-300

重量: 237.6トン



## 標準運航モデルに基づく降下速度

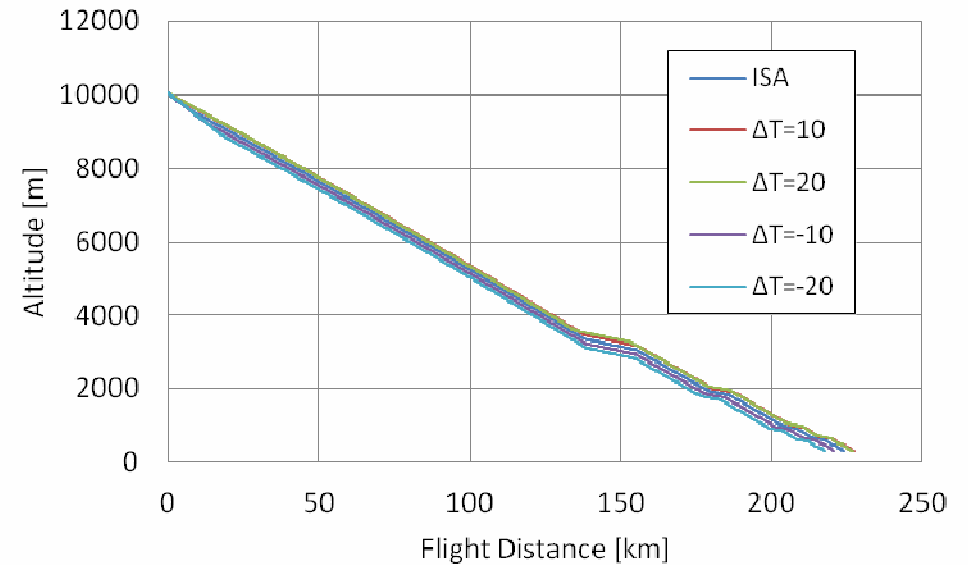
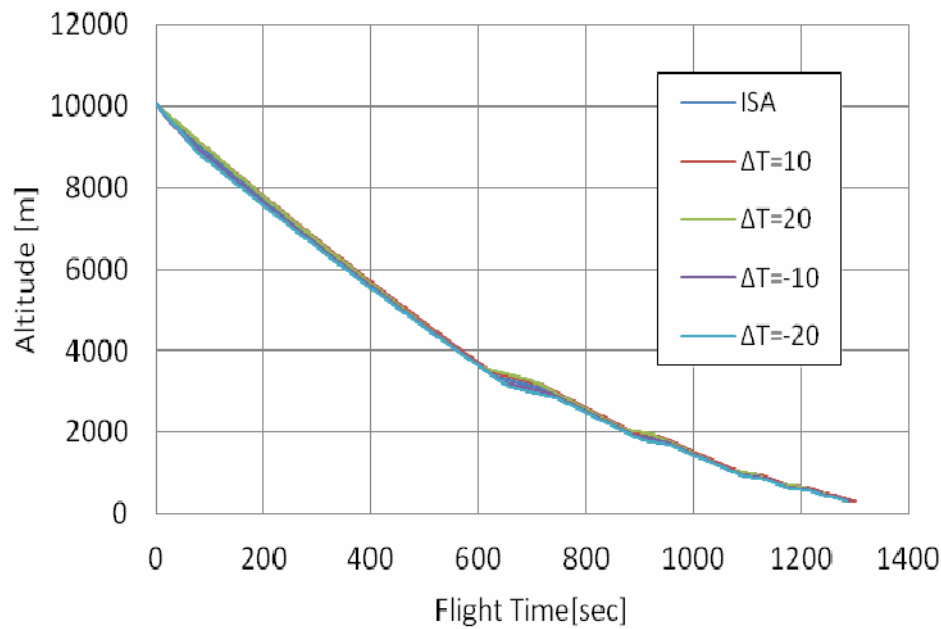


CAS: 較正対気速度 (Calibrated Air Speed)

ISA: International Standard Atmosphere

大気モデル

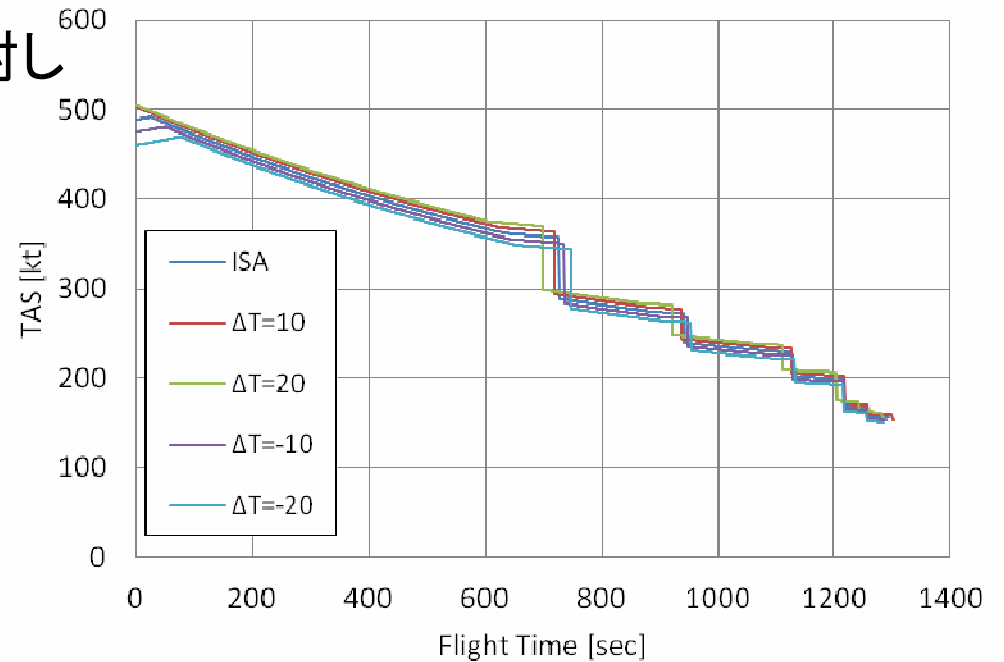
# ISAモデルとNon-ISAモデルの軌道



海水面でのISAとの温度差  $\Delta T$  が  $\pm 20K$  に対し  
飛行時間は最大17.6秒差  
飛行距離は最大9.8km差

年間変動を考慮しても  $\Delta T = \pm 20K$  の範囲  
内に収まり、飛行時間に与える影響は  
 $\pm 1\%$  未満

1日単位で考えると、気温の違いによる  
到達時刻予測への影響はほとんどないと  
考えられる

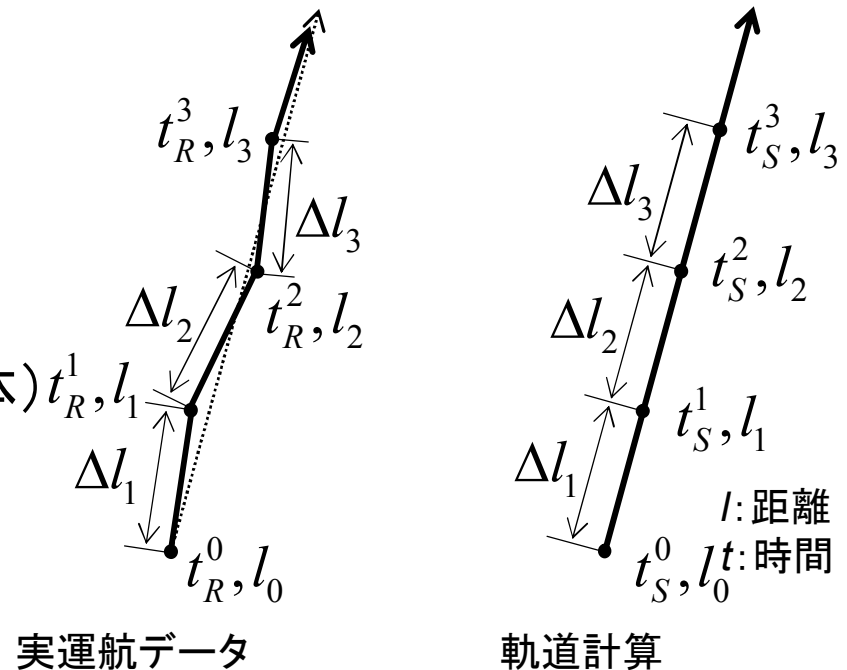


# 実運航データと数値予報を用いた軌道計算

## ・ 計算条件

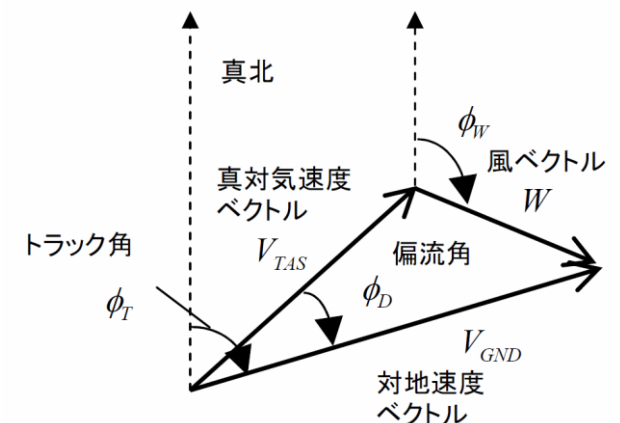
- 実運航データのCAS、降下率、経路角
- 気象データ: 気象庁MSM  
同時刻・同位置の値を線形補間で求める
- 解析を行ったデータ数: 1139 (降下中の機体)

レーダ測位による緯度・経度 真値からのずれ  
軌道計算 航跡角を与えて積分  
実運航の航跡とのずれにより、数値予報の  
参照位置に違いが出る可能性があるが、  
飛行距離は同じであり飛行時間の結果に  
与える影響は小さいと考えた。



実運航データと同じ飛行距離での  
パラメータを計算で使用

風の影響を考慮し、対地速度ベクトルが実運航の  
航跡角と同じ向きになるよう対気速度ベクトルの向  
きを定める。また、降下角が等しくなるように対地速  
度に応じて降下率を変更





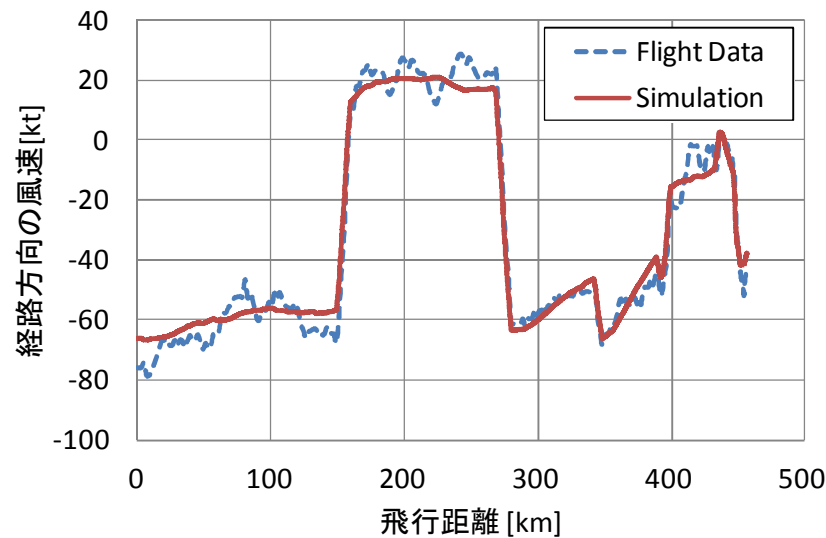
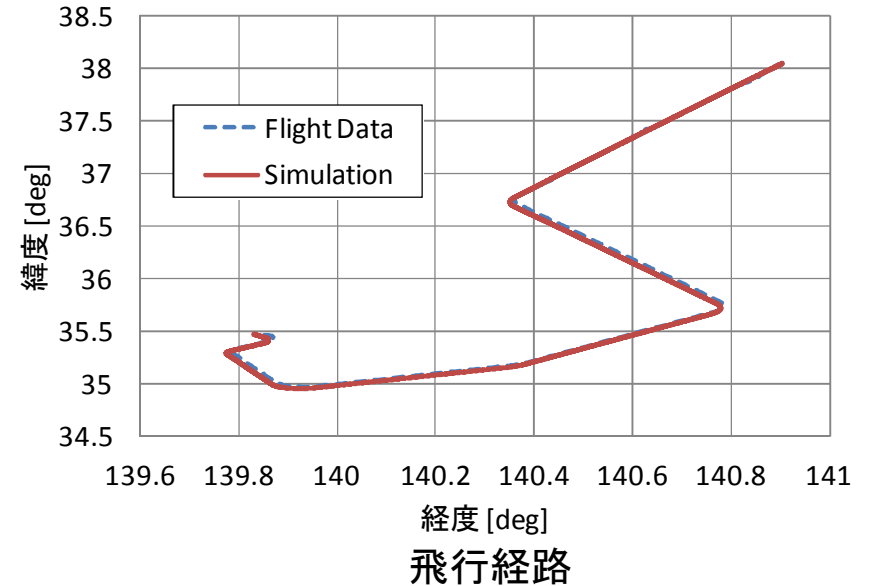
# 風速と飛行時間の比較

軌道計算の飛行時間が実運航に近いケース  
飛行時間(飛行時間の比:1.006)

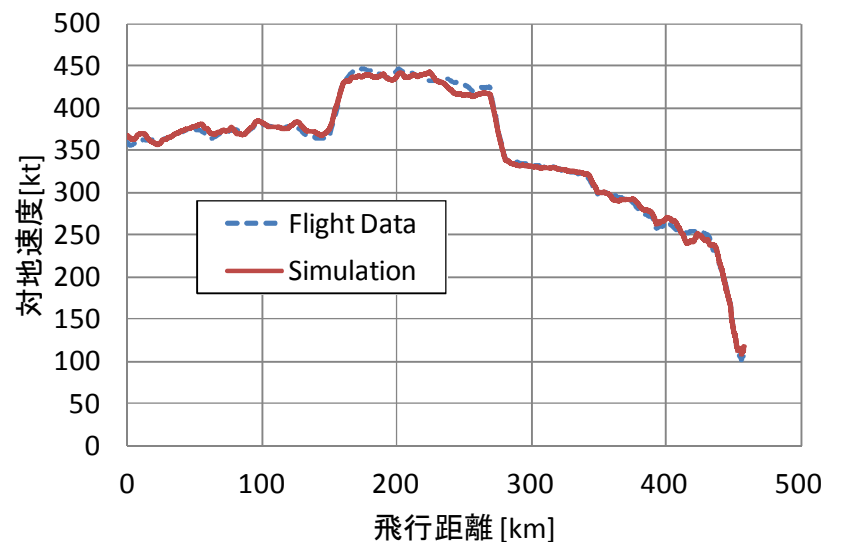
実運航:2674秒

軌道計算:2689秒

経路方向の風速値に違いがある区間も見られるが平均するとMSMの値に近い



飛行時間に対する経路方向の風速



飛行時間に対する対地速度

# 実運航データと数値予報モデルによる軌道計算の比較

飛行時間の比(計算/実運航)

平均:1.012

標準偏差:0.010

軌道計算の約95%において  
飛行時間が実運航に対して  
±3%の範囲内

季節による比較

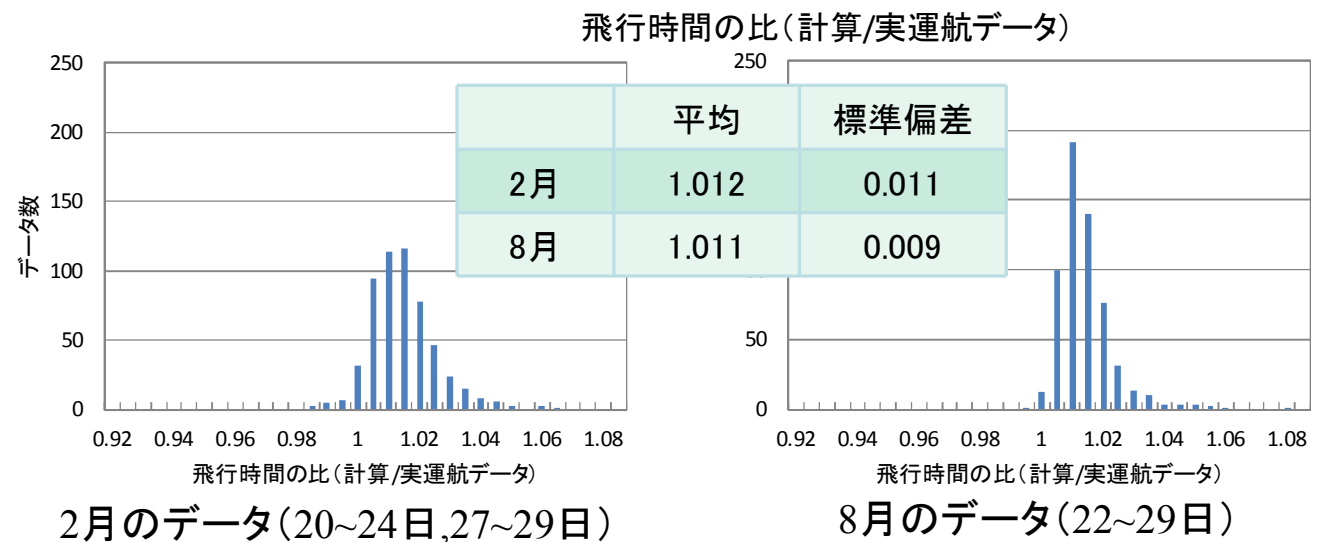
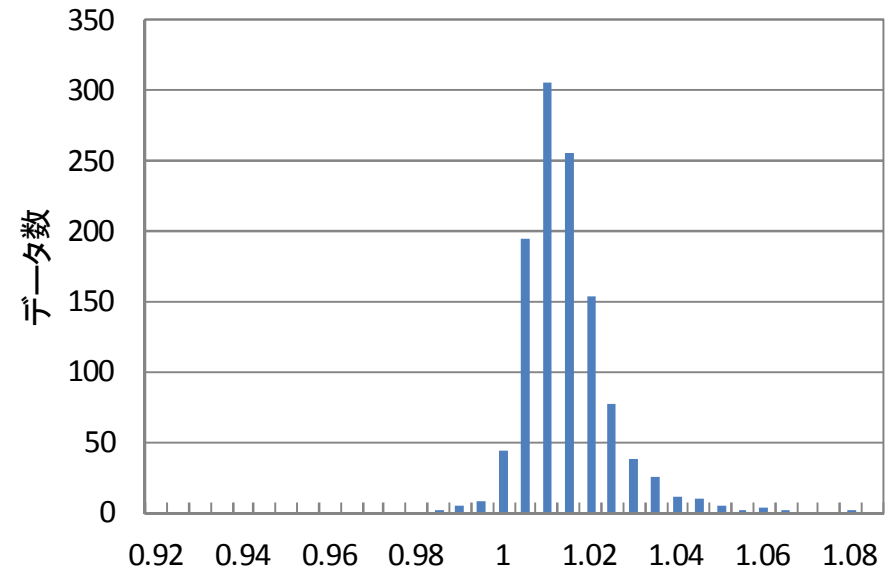
風速が大きい2月は

対地速度に与える

影響が大きい

→飛行時間の

ばらつきも大きい



数値予報を用いた軌道計算の方が飛行時間は長くなっている。この傾向が分析データの気象の影響によるものか、計算方法によるものか検討

# 真対気速度の比較による整合性の検証

気温の算出  $a = v_{TAS} / M$       $T = a^2 / (\gamma R)$

空気密度の算出  $\rho = p / (RT)$

CASとTASの関係

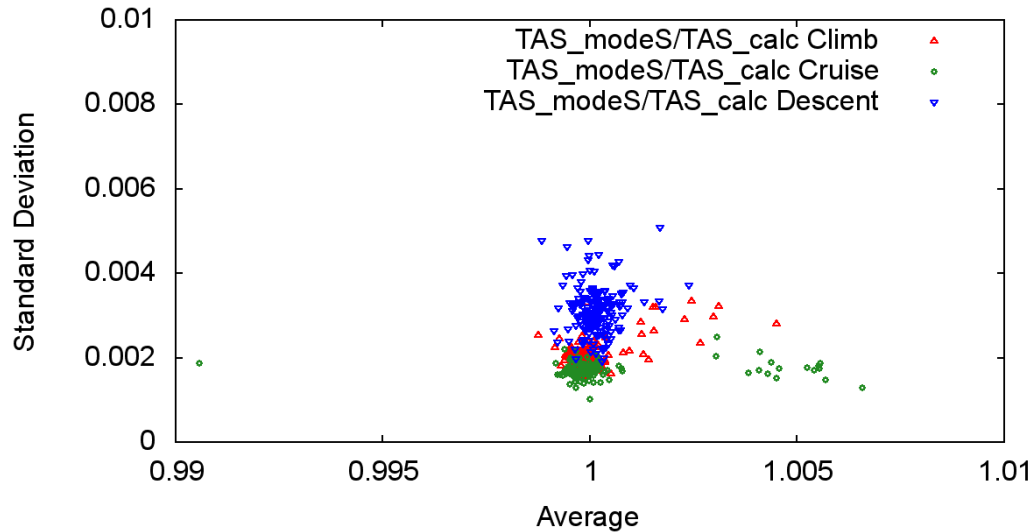
$$v_{TAS} = \left[ \frac{2\gamma}{\gamma-1} \frac{p}{\rho} \left\{ 1 + \frac{p_0}{p} \left[ \left( 1 + \frac{\gamma-1}{2\gamma} \frac{\rho_0}{p_0} v_{CAS}^2 \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} - 1 \right] \right\}^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right]^{\frac{1}{2}}$$

管制の速度指示に用いられる指示対気速度は較正対気速度とほとんど同じと考えると、IASからTASを計算可能。

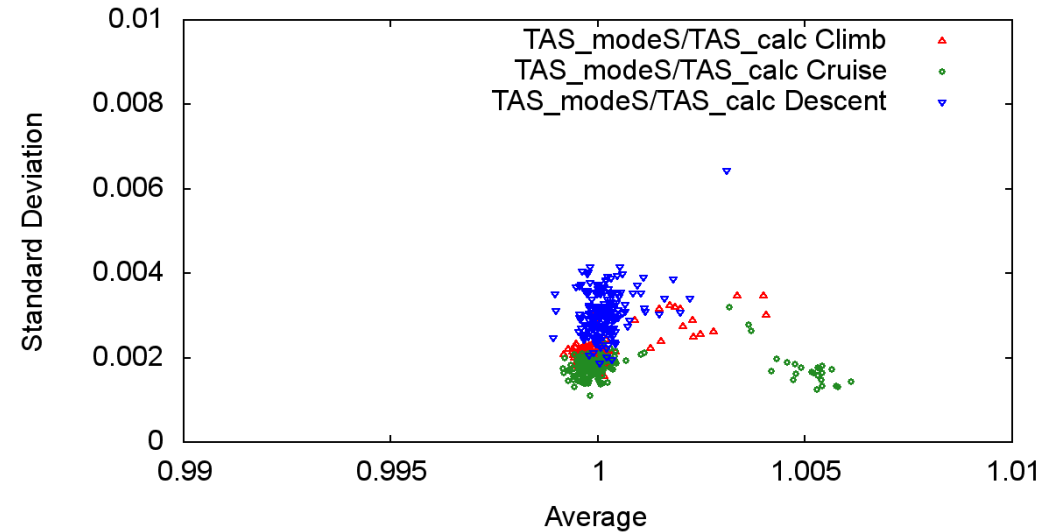
モードSデータのTASを $TAS_{modeS}$ 、モードSデータのIASの値に補正をかけて算出したTASを $TAS_{calc}$ と表記して比較を行う。

# 真対気速度の比較による検証

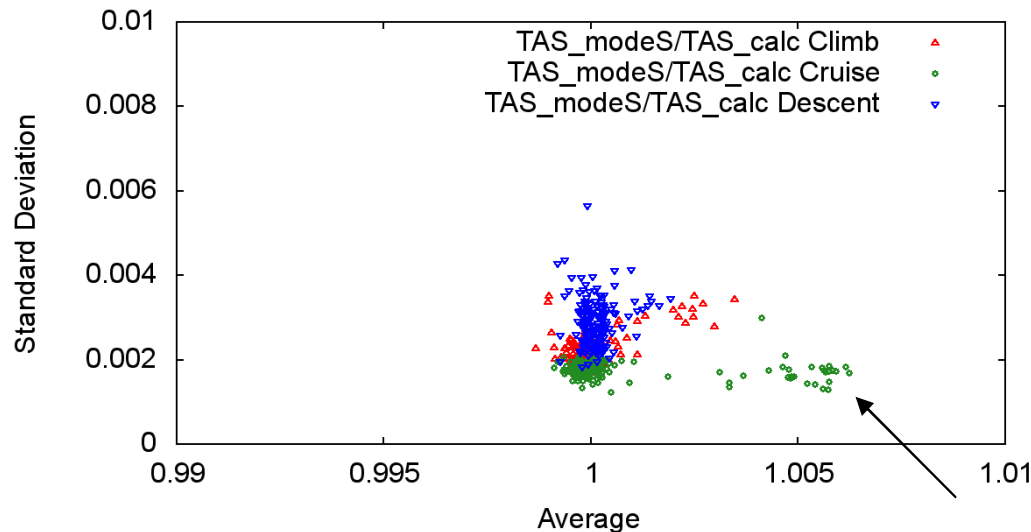
Year 2012, Month 02, Day 20



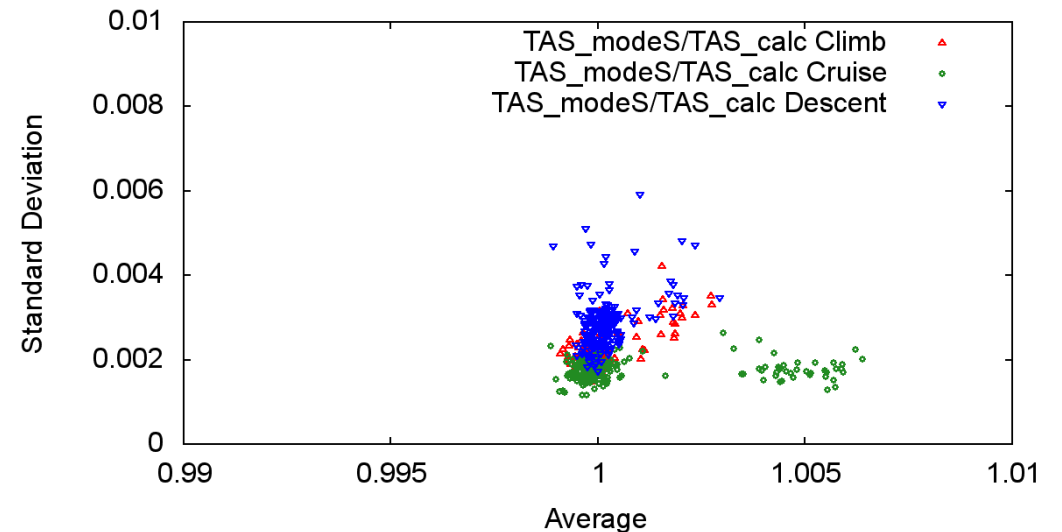
Year 2012, Month 02, Day 29



Year 2012, Month 08, Day 22



Year 2012, Month 08, Day 29



巡航フライト: 平均値が1.005程度に分布の塊  
TAS, IAS, マッハ数の値は整合性がとれている

# 対地速度の比較による風速の影響の調査

modeS システムのレーダ計測により得られた緯度・経度を繋いだ軌道に沿ってフライトを積分していく場合、計測の不確かさにより緯度・経度の値はゆらぐため、滑らかな軌道に対して経路長が長くなってしまいます。

この問題を回避するため、対地速度(GS)の逆数を距離で積分したものが所要時間となることから、modeS システムで得られた実運航の飛行距離は、対地速度  $GS_{\text{modeS}}$  を飛行時間で積分することで推算する。

対地速度の比の逆数から到達時間の比が推算できる。

# 対地速度の比較による風速の影響の調査

## 解析したmodeS データの日時(2012 年)

### 初回データ (JST 以下同)

2月20日0時～2月24日17時	2月27日10時～2月29日24時
8月22日0時～8月29日24時	

### 追加データ

1月	5～8, 13～16, 22～24	7月	1～4, 13～14, 16, 28～31
2月	1, 3～4	8月	9
3月	5～8, 21～24, 28～31	9月	1～4, 17～20, 27～30
4月	2～4, 9～12, 25～28	10月	1～4, 16～19, 27～30
5月	1～4, 9～12, 25～28	11月	1～4, 19～20, 25～28
6月	5～8, 18～20, 27～30		

## 上昇、巡航、降下飛行の分類

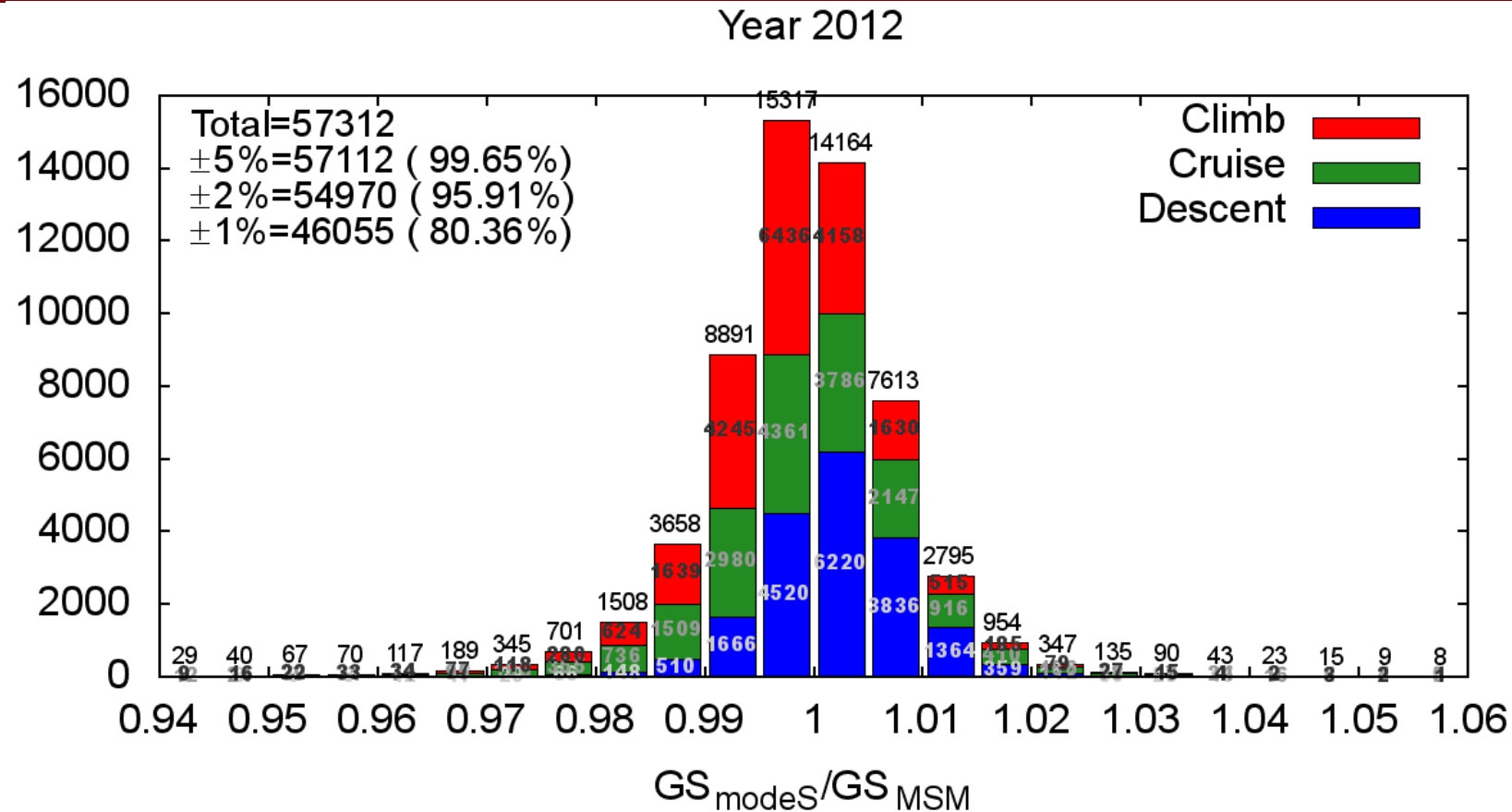
常に気圧高度が14000m 以上のデータを巡航飛行(Cruise)

気圧高度の最小値が14000m 未満のデータの内

高度の変化率が正のものを上昇飛行(Climb)

高度の変化率が負のものを下降飛行(Descent) と分類

# 実運航とMSM数値予報を用いた対地速度の比の分布



80.36%のフライト 到達時間比±1%以内

95.91%のフライト 到達時間比±2%以内 標準偏差は概ね $1\sigma \sim 1\%$

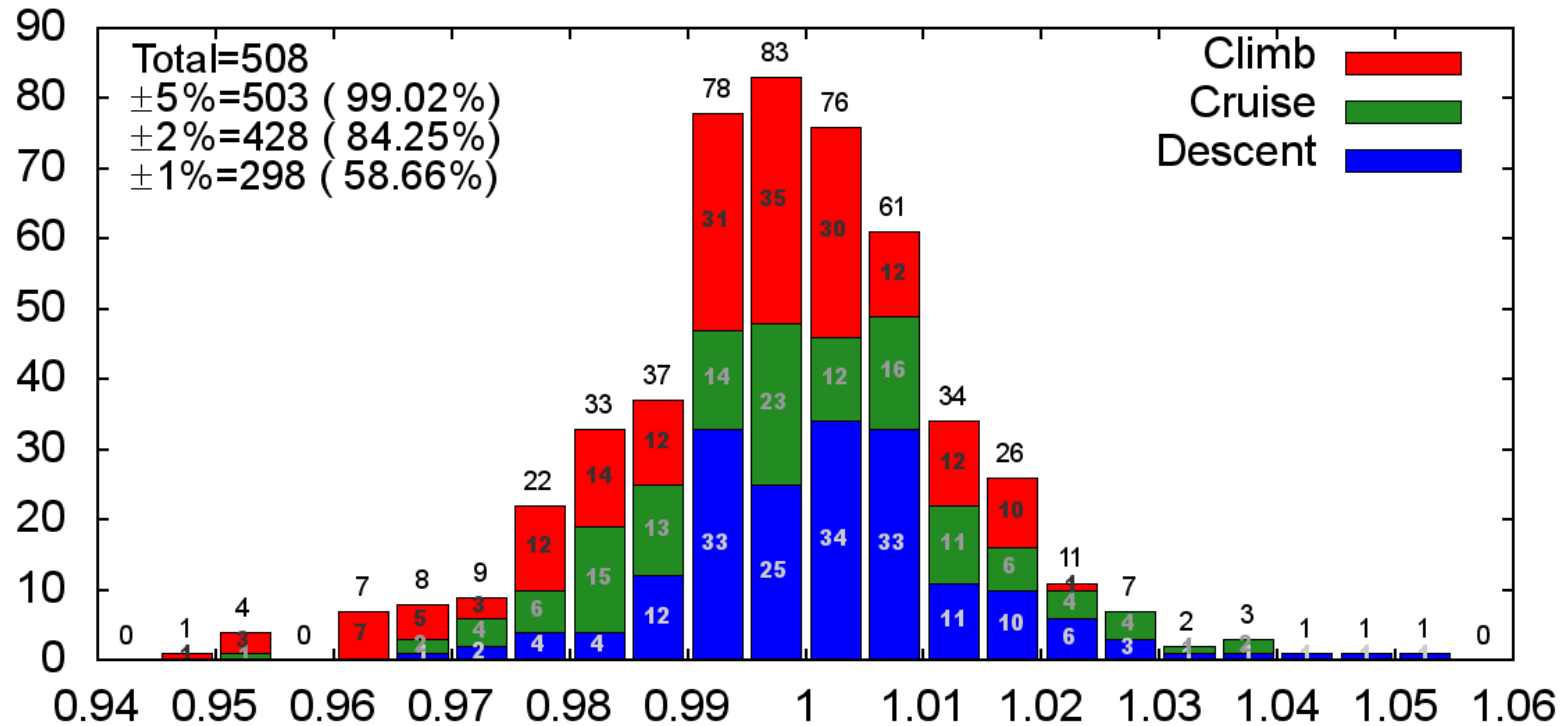
Descentの $GS_{modeS}/GS_{MSM}$ の平均の分布は1より少し大きい値に偏る

先の議論同様 実運航に比べ気象データによる飛行時間が長い傾向

一方、Climbは1より少し小さい値に偏り、全体は中心が1に近い分布

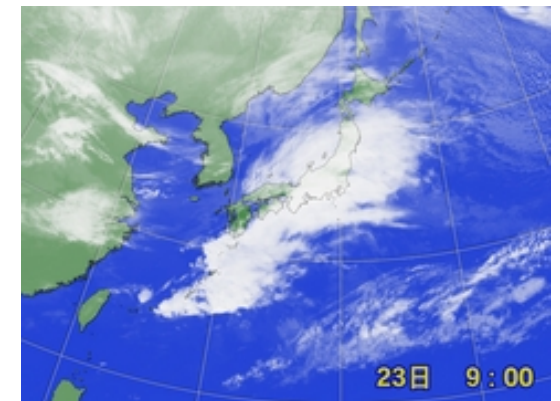
# 対地速度の比の分散が最大となった日

Year 2012, Month 02, Day 23



日付毎の度数分布は概ね同様の分布  
 2月23日 ±1%以内のデータが6割弱  
 データの分散が一番大きい  
 この日は発達中の低気圧が通過し  
 全国で雨や雪

$GS_{modeS}/GS_{MSM}$





# 発表の流れ

## 1.はじめに

## 2.研究方法

SSR modeS システムの分析データ

フライト毎のデータへの変換

気象庁メソ数值予報モデル(MSM)の利用

航空機の運航モデル

## 3.研究結果

ISA, Non-ISA モデルの比較による気温の影響の調査

MSM 数值予報による気象条件での軌道計算

対地速度の比較による風速の影響の調査

## 4.まとめ

# まとめ

ISA モデル、Non-ISA モデルで軌道計算 気温の影響を調査  
 $\Delta T = \pm 20K$  の海面温度の影響は 約1300秒の飛行時間に対し  
17.6 秒差、約225km の飛行距離に対し9.8km 差  
年間変動を考慮しても飛行時間に与える影響は±1%未満

気象庁の数値予報(MSM)で軌道計算 実運航データと比較  
降下中1139 機の結果:約95%が実運航に対し±3%の範囲内

MSM とmodeS データの対地速度比から到達時間比を求める方法を  
提案 通年にわたるデータの度数分布を計算  
80.36%のフライトは、到達時間の比が±1%以内  
95.91%のフライトは、到達時間の比が±2%以内  
分布の標準偏差は $1\sigma \sim 1\%$   
日付毎の度数分布も概ね同様の分布  
2月23日は、±1%以内のデータが6割弱で分散が一番大きい