

# 気象の影響が考えられる CARATSオープンデータの航跡の分析

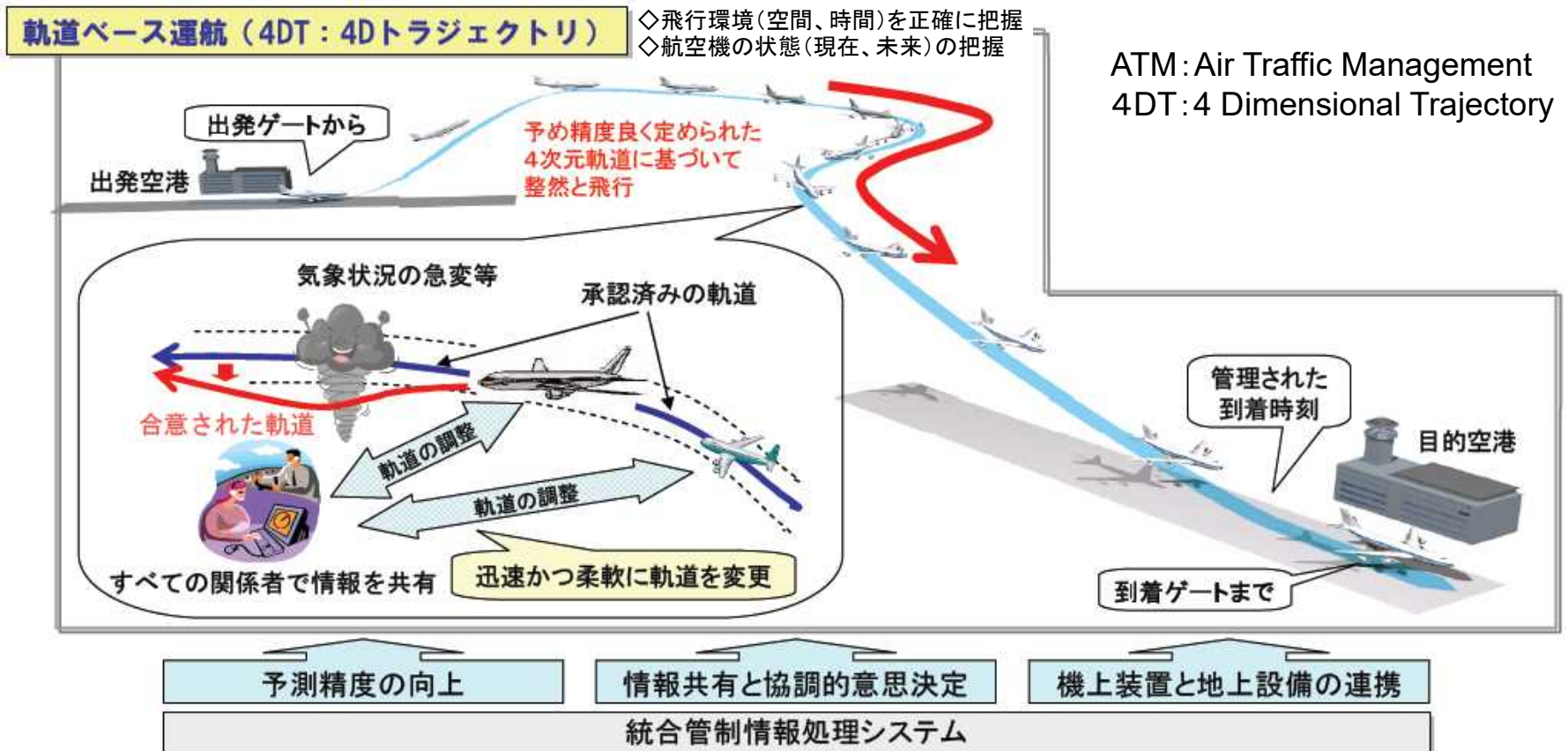
手塚亜聖(早大)

CARATSオープンデータフォーラム  
2015年9月4日(金) 14:10~14:40



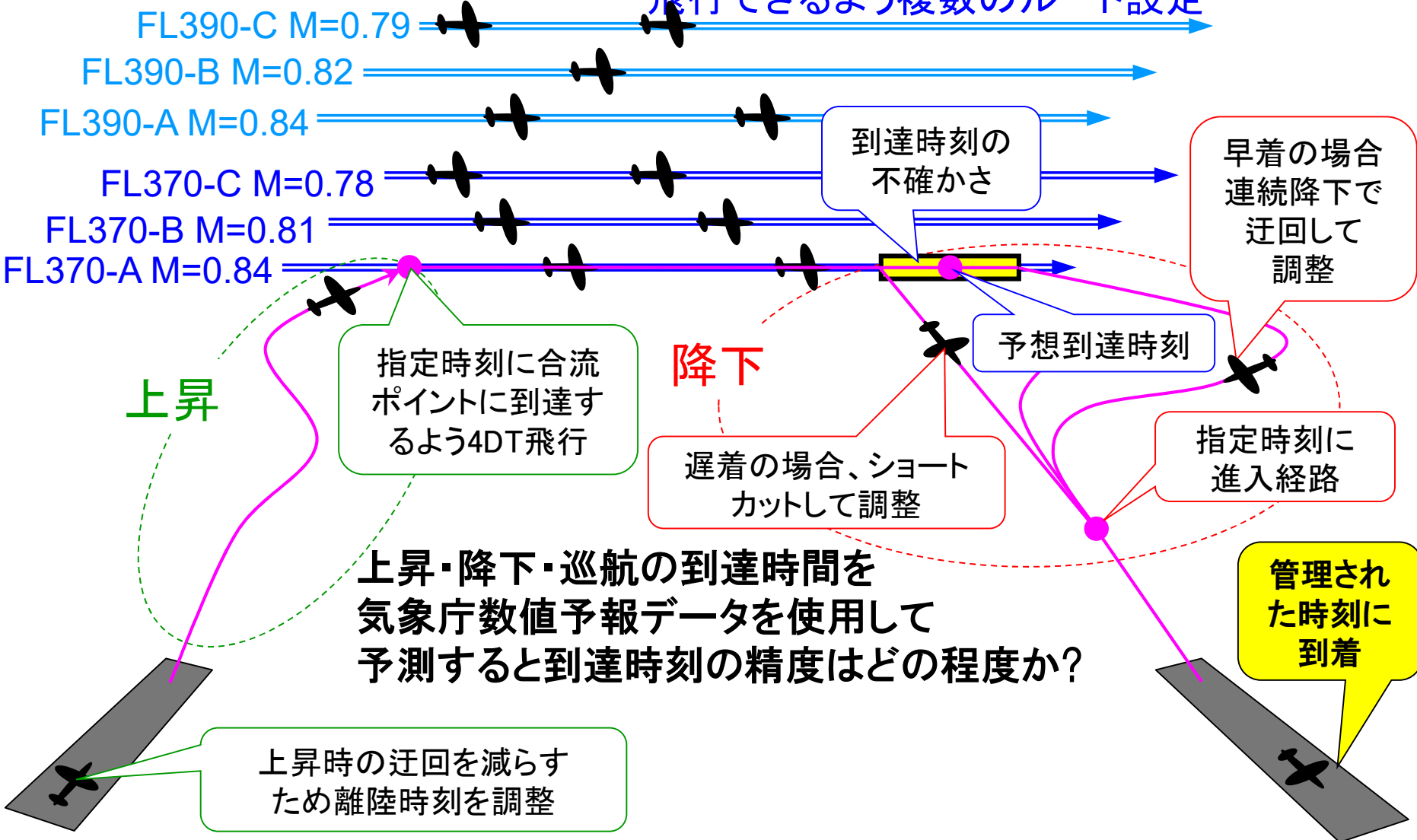
# 研究背景: 軌道ベース運航

- ・ 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



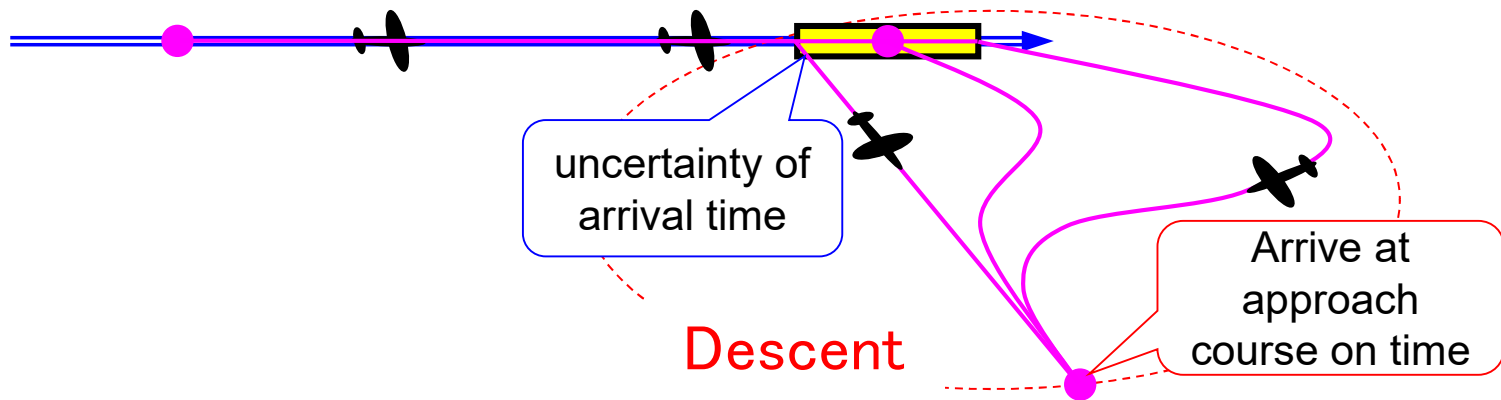
# 気象による軌道予測の不確定性を考慮した運航のイメージ

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



# 気象による不確かさと実際の到達時間の分散

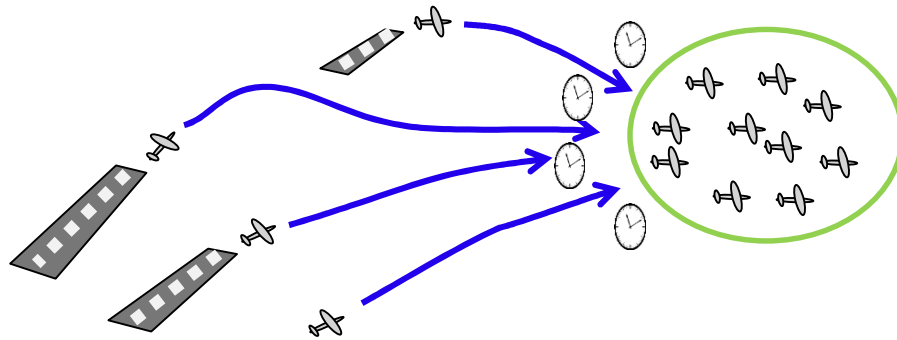
気象庁MSM数値予報モデルを用いた軌道予測が、  
気温と風の不確かさの影響により、到達時間にどの程度の  
不確かさが生じるかを明らかにしたところ  
1 $\sigma$ ~1%程度の不確かさ、1時間の飛行後は約70秒



離着陸が完全にコントロールされて  
到着時間の不確かさが生じる要因が気象のみに限定される  
状況下では、降下のルートで約70秒の時間調節が可能であれば  
到着予定時間通りに着陸することが可能と考えられる。

# Agenda

離陸段階で羽田空港手前のエンルート空域に航空機が集中することが予測できるのであれば、空港からの離陸時刻の調整や巡航速度の調整により、迂回を減らすことが可能と思われる。



MSM数値予報モデルを用いて羽田空港到着予定時刻を推算し、Carats Open Dataとの違いを調べる

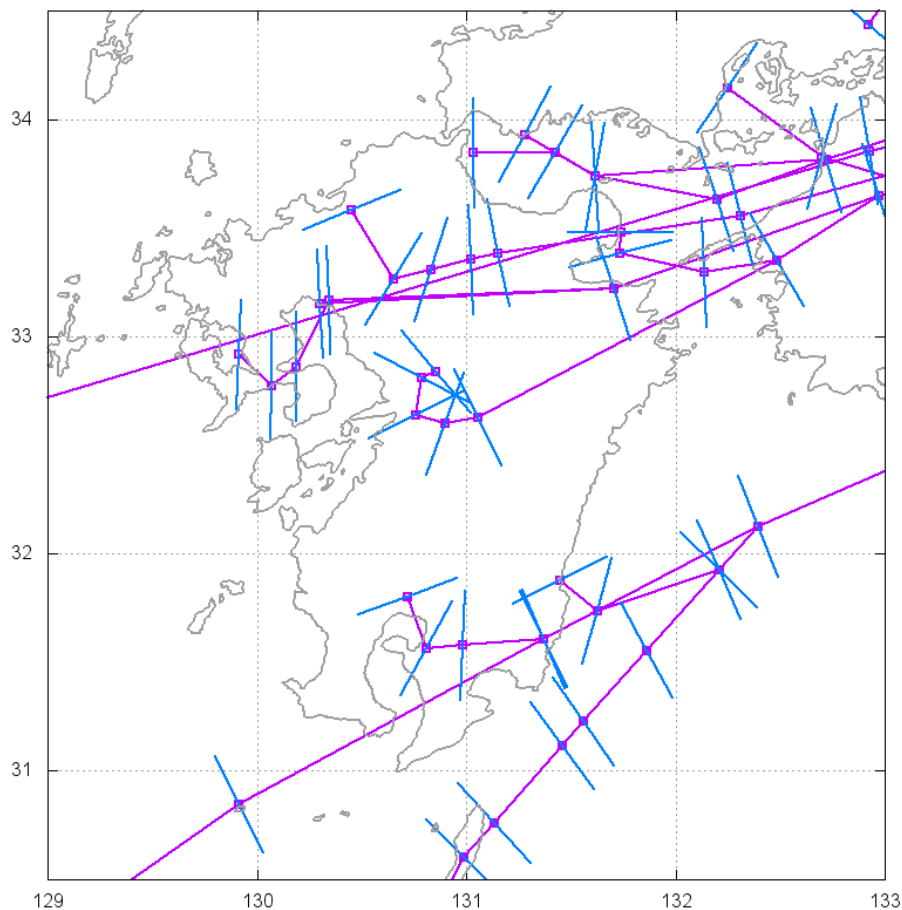
気象の影響が考えられるCARATSオープンデータの航跡を分析

宮崎→羽田便のB737型機に対し、偏西風の影響を調べる

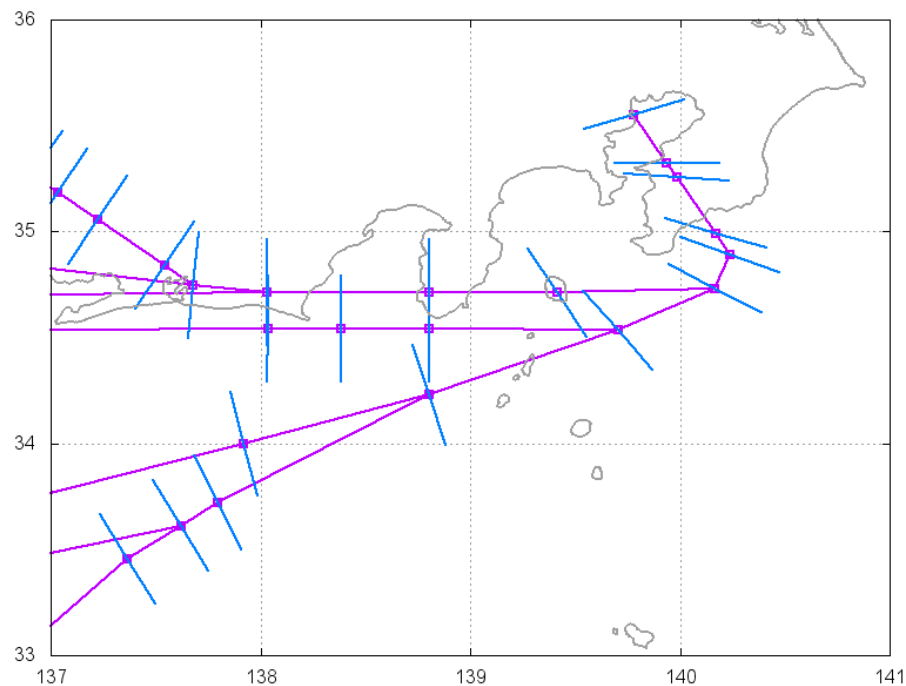
千歳→羽田便に対し、東日本に雷が発生した日のフライトを調べる

# 到着予定時刻とCarats Open Dataの比較

航跡の情報を2次元の図とするため、  
距離と時間のプロットにして表示  
航跡を標準ルートへ投影して  
羽田空港までの標準的な距離を求める



航跡が入る区間前後のウェイポイントの法線からの距離を内積により求め、絶対値の比に内分する標準ルート上の位置を算出し、航跡を投影.



飛行速度は機種毎のBADAモデル  
風は気象庁MSM数値予報モデル  
を用いて標準的な飛行時間を計算  
Carats Open Dataと比較する

# Carats Open Dataのダイヤグラム表示

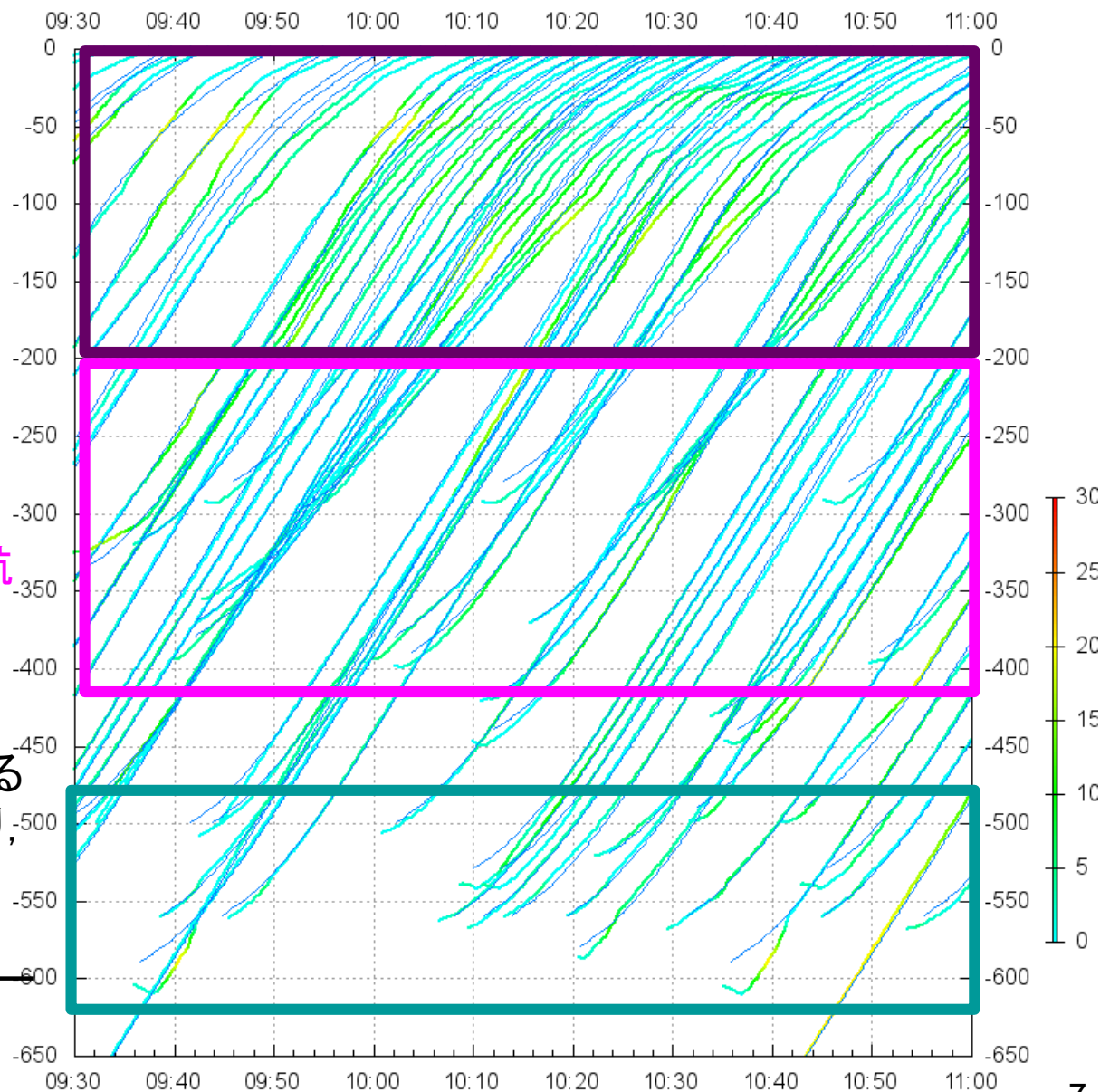
標準的な飛行時間: 細い青線  
Carats Open Data: 太い色相  
色相は標準ルートからのずれ

羽田空港まで200NM以内の  
航跡のCarats Open Dataは、  
標準飛行より傾きが緩い。

羽田手前のエンルート空域での  
レーダ誘導を行い、順番に降下  
させていると思われる。

羽田空港から200NM以上の巡航  
飛行ではCarats Open Dataと  
標準飛行の、傾きがかなり一致

離陸後巡航状態までは、離陸する  
滑走路の向き、などの要因により、  
乖離することがあるため  
離陸後100NMの位置でCarats  
Open Dataと標準飛行の時間が  
一致するように図を作成。



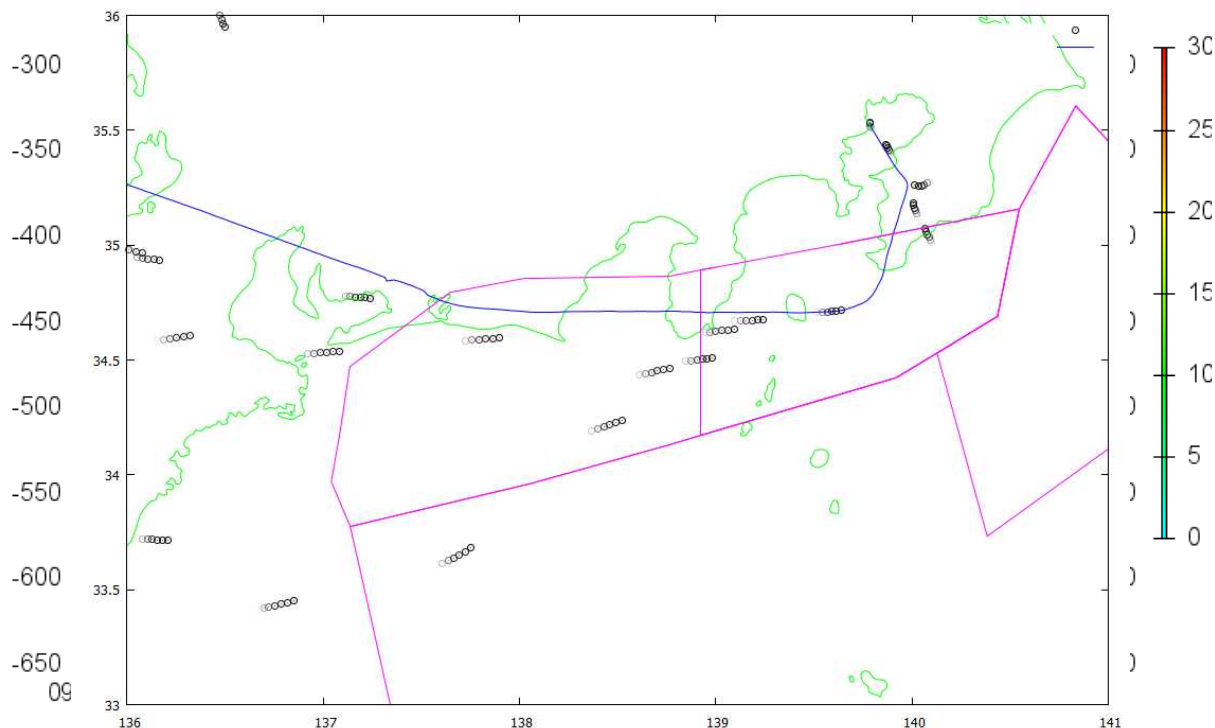
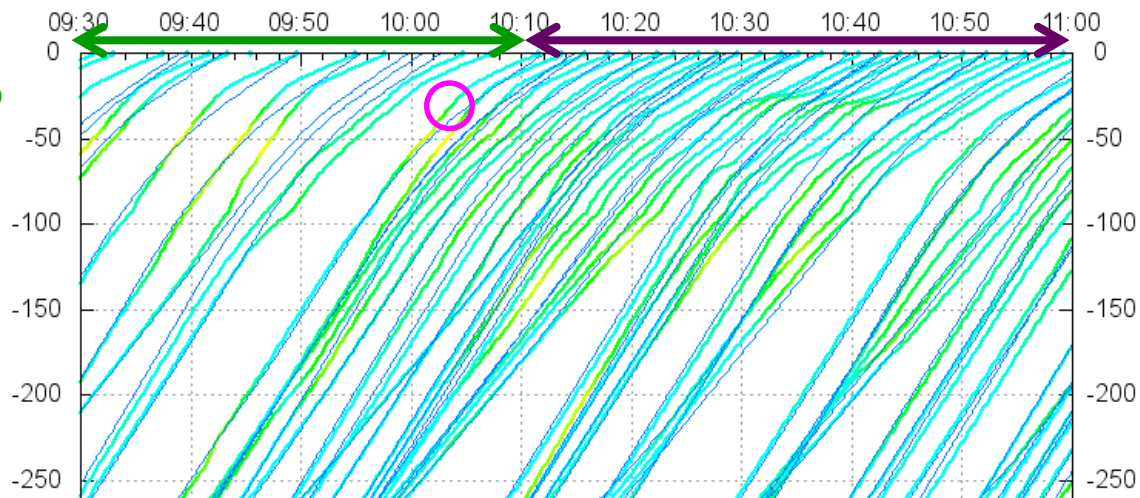
# 34L滑走路に到着したとみられる航跡

9時30分から10時10分までは到着機の間隔が空いて余裕がある

一方、  
10時10分から11時00分までは到着機の間隔が狭くなり、傾きが緩くなることから時間調整が行われていると考えられる。

10時12分に到着した飛行機の傾きが50NMより羽田寄りになる理由

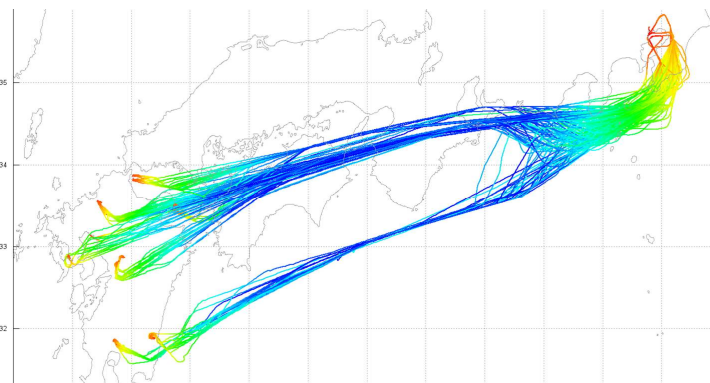
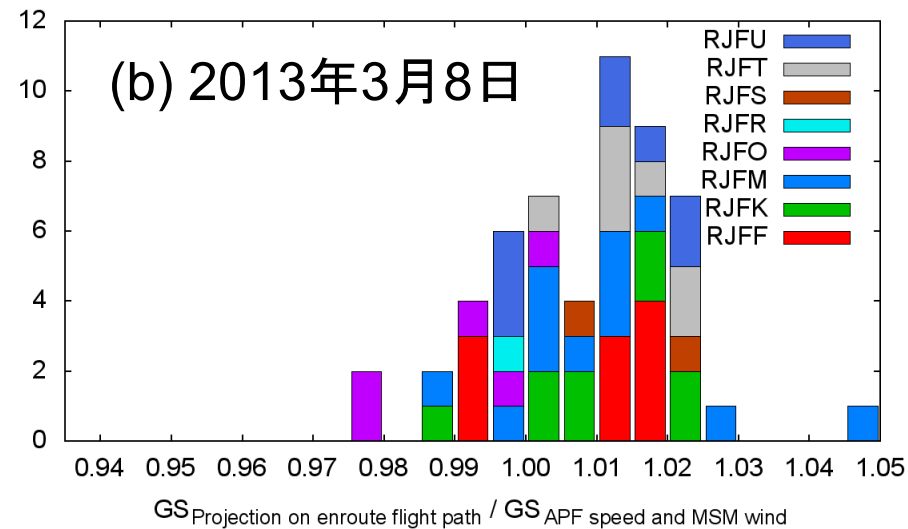
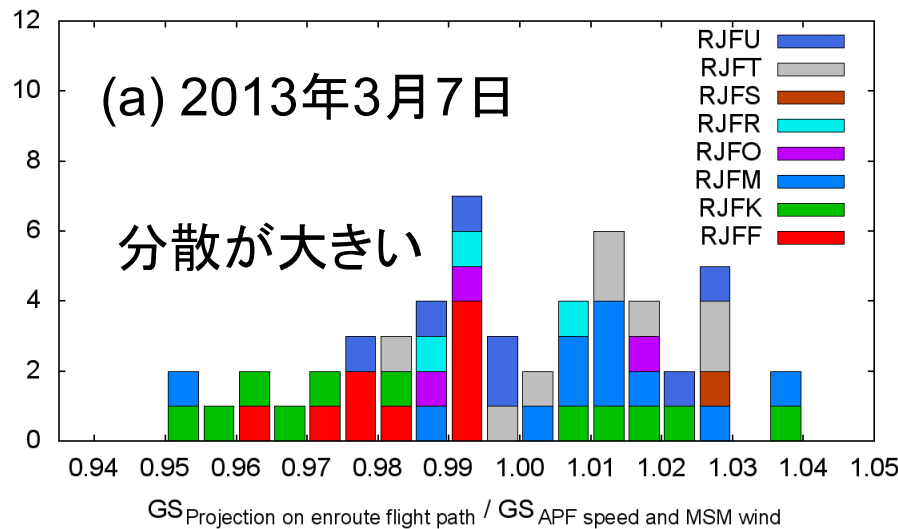
到着機のターミナル空域進入地点ADDUMを通る標準的なルートを通らずにショートカットしているため。



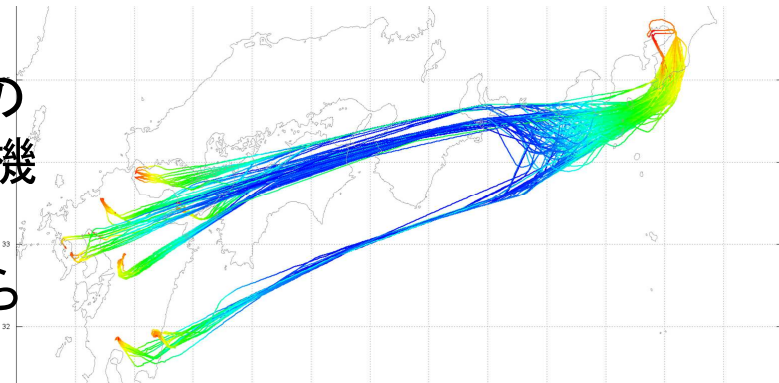


# Carats Open Dataと標準的な飛行時間の違い

巡航飛行区間において、Carats Open Dataの飛行時間と標準的な巡航マッハ数から算出した飛行時間の違いを調査  
航空機の型式により標準的な巡航速度が違うことを考慮し、  
B737-800型機のデータに注目



九州方面からの  
羽田空港到着機  
の航跡  
特異な差は見ら  
れない



# CARATS Open Dataから対地速度の算出

対地速度の算出: 隣り合うデータの緯度経度から算出した移動距離を隣り合うデータの時間間隔で割る。レーダの計測時刻の精度が1秒単位であり問題

$$GS = \frac{DL}{Dt}$$

隣り合うデータの時間間隔が8秒以下(赤), 9秒(黄), 10秒(緑), 11秒(水色), 12秒以上(青)を, それぞれ括弧内の色別で表示

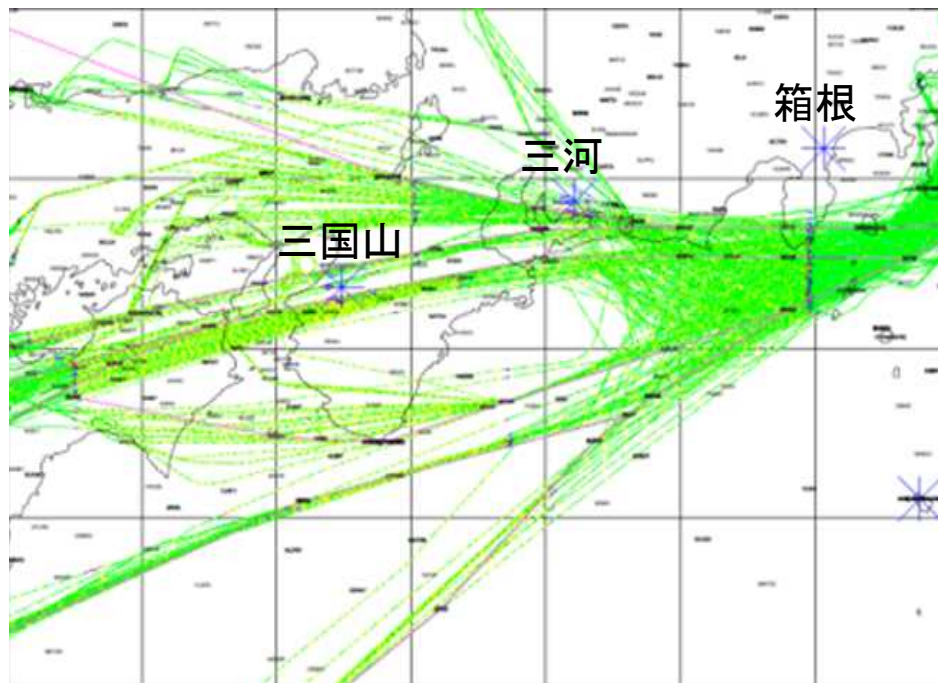
計測が不連続なところでは赤や青が混ざる

三国山周辺は黄色と緑

箱根周辺はほとんど緑

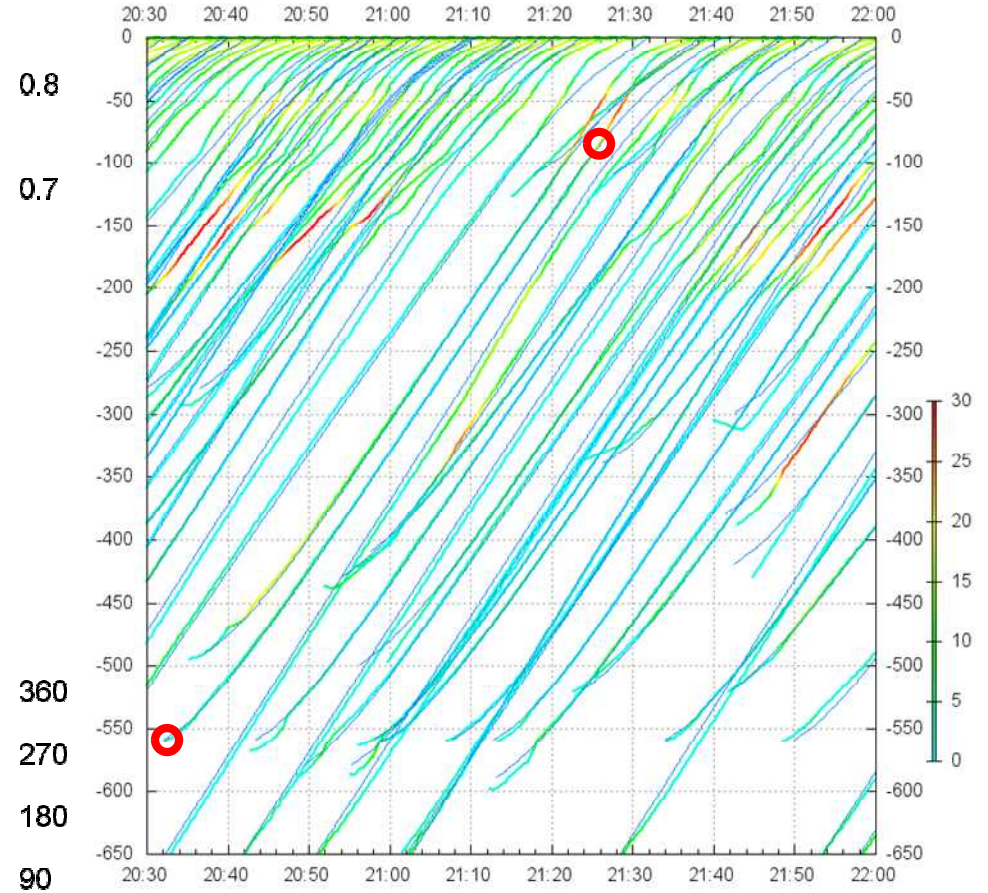
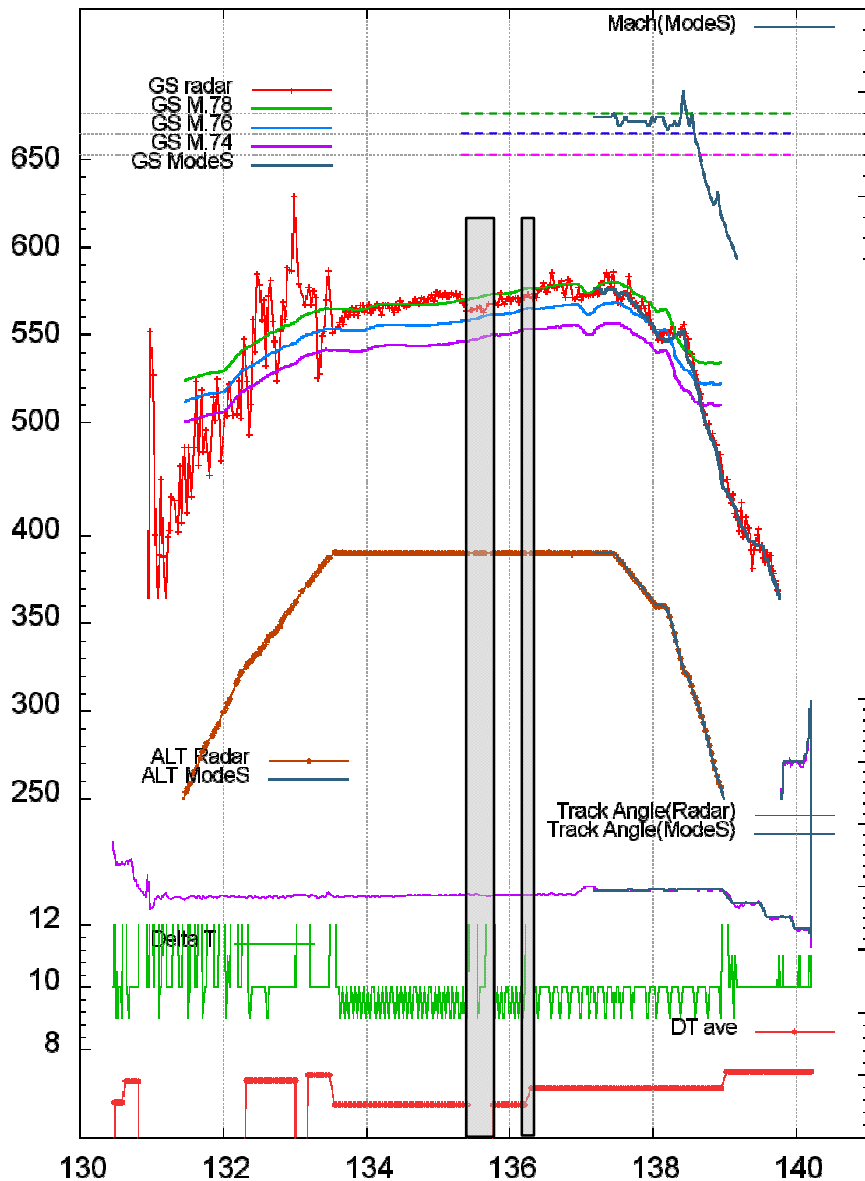
時間間隔が8秒以下もしくは12秒以上と計測が不連続となるところを自動的に抽出して, その範囲の平均の時間間隔を求めた

不連続なところでは緯度と経度の値が大きく変わる. 約10秒間に50kt以上対地速度が変化した場合は除外



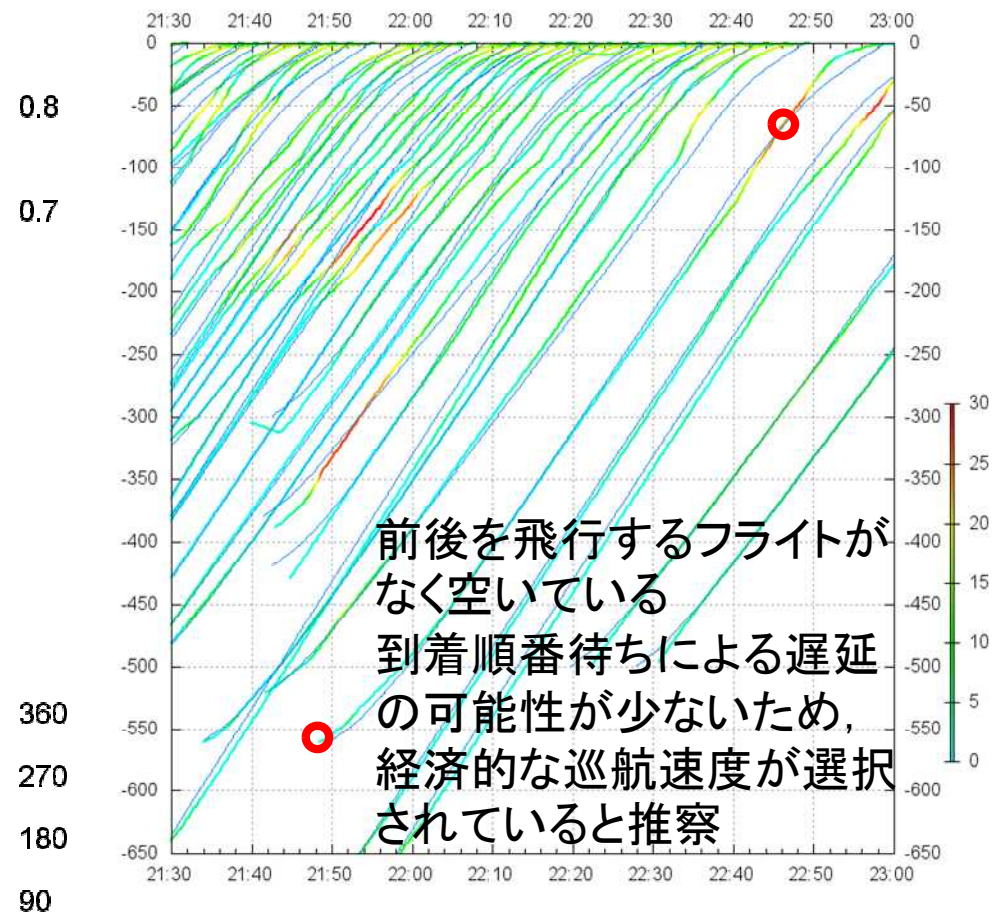
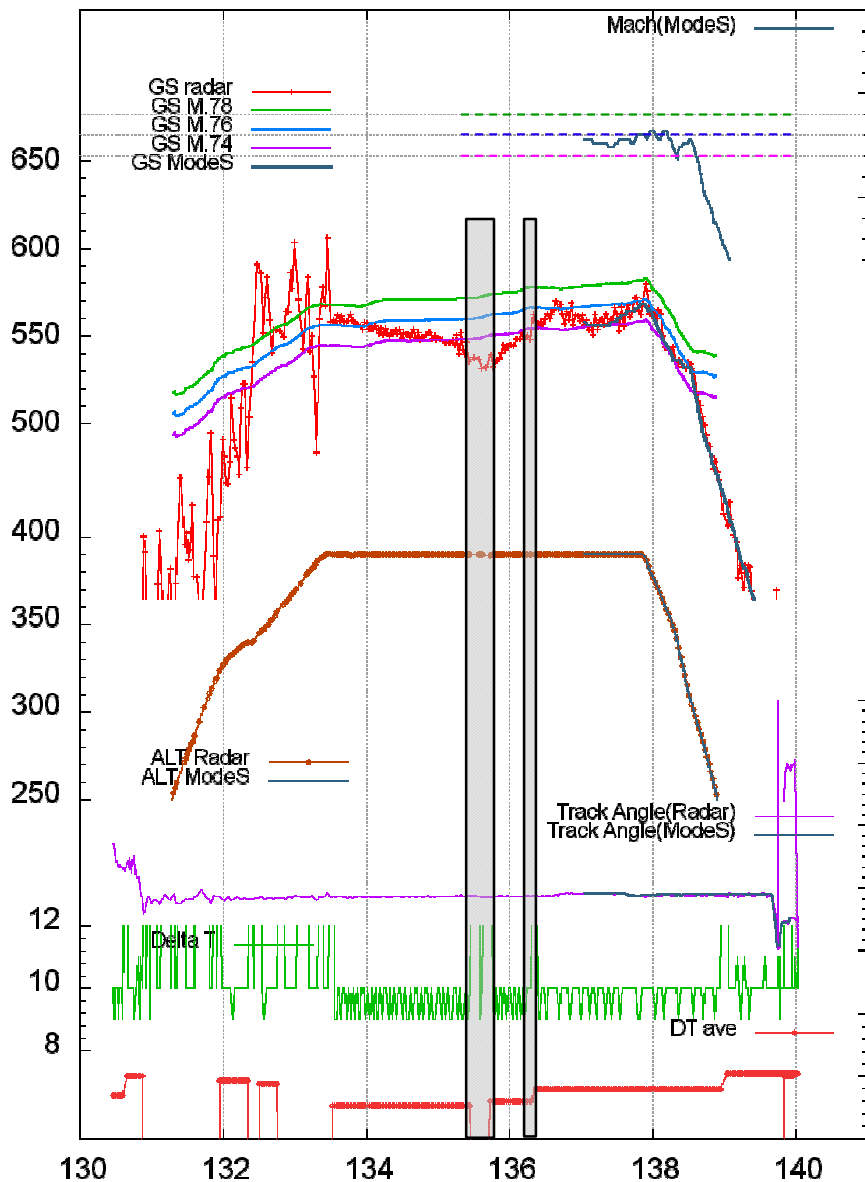
管制レーダ計測時間間隔と航跡及び航空路監視レーダとの関係

# 対地速度比0.994 差がほとんどないケース



0 M=0.78においてMSMの風を加味して算出した対地速度から大きく外れることはなく、差のゆらぎは小さい

# 対地速度比0.964 実運航が遅いケース



前後を飛行するフライトがなく空いている  
 到着順番待ちによる遅延の可能性が少ないため、  
 経済的な巡航速度が選択されていると推察

ModeSのデータから飛行マッハ数は0.76と推察される。  
 M=0.78→M=0.76 速度は2.5%程度低下  
 0.76で算出した対地速度を下回っている

# 標準的飛行時間とCarats Open Dataとの違い まとめ

## Carats Open DataとMSMの風を用いて算出した標準的な飛行時間を比較

2013年3月7日は飛行速度の比が1を下回るデータが多く、5%程度遅いものも散見された。

## Carats Open Dataのレーダ計測周期を補正して対地速度を算出対地速度の比較から飛行速度の差が生じた要因を考察

ModeSのレーダが捉えた時点での巡航マッハ数が  
差が小さいケースは0.78付近のマッハ数であった一方、  
差が大きいケースは0.76付近のマッハ数で飛行。

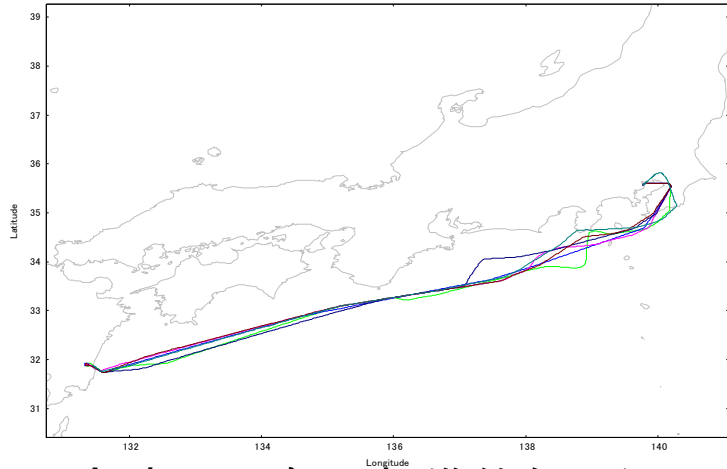
前者は前後に羽田到着機が飛行している

後者は、空いている時間帯を飛行

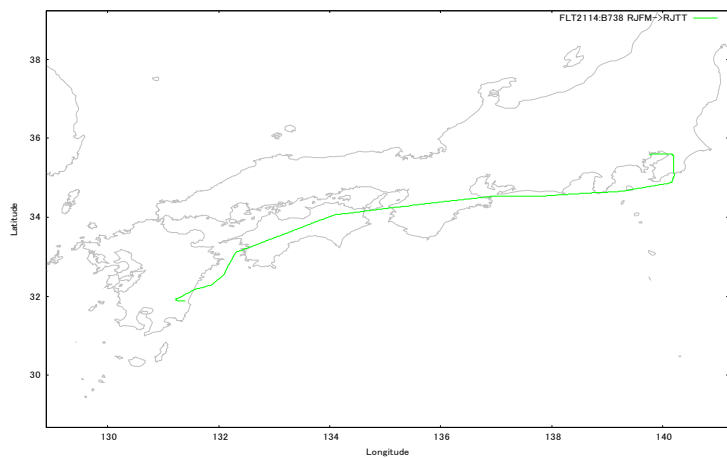
空いている場合、速度を抑えた経済的な巡航速度が選択されたと推察。

# 宮崎→羽田便のB737型機 偏西風の影響

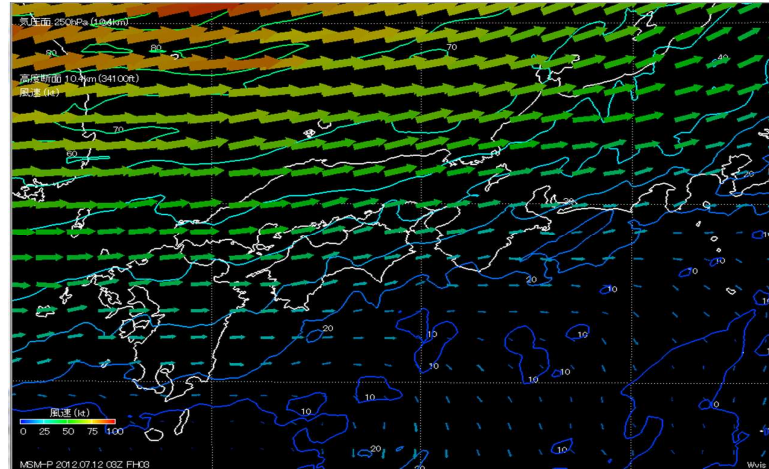
標準的な飛行ルートよりも偏西風が強いルートを行飛行したケースの分析 宮崎-羽田便で最も多いB738に絞って調査



宮崎-羽田便の標準的な飛行ルート



2012/7/12 14:52発 宮崎-羽田便

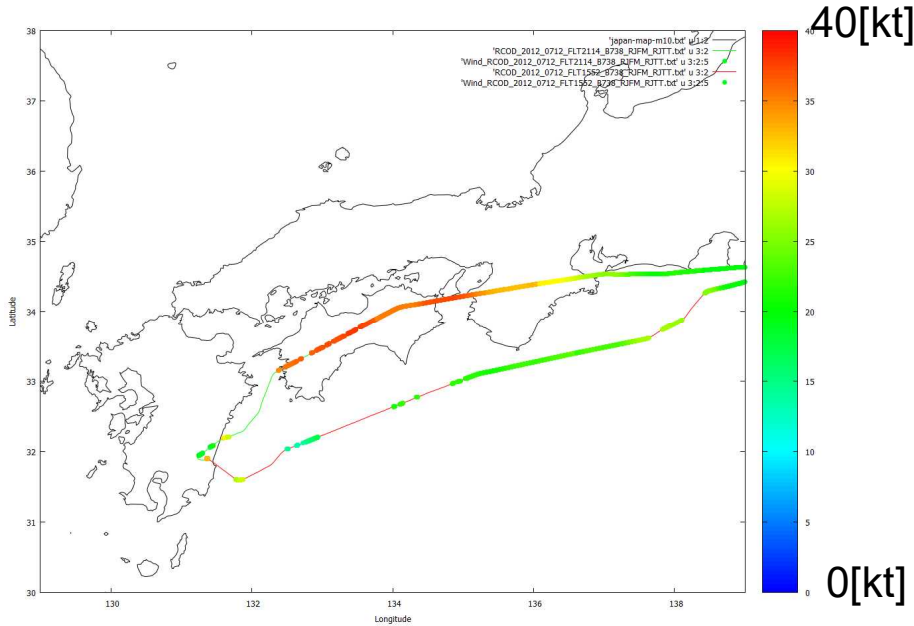


MSM 7/12 15時予報(12時初期値)  
上空34100[ft]の風向・風速

標準的な飛行ルート: 10[kt]から20[kt]の追い風  
実際の飛行ルート: 30[kt]から40[kt]の追い風

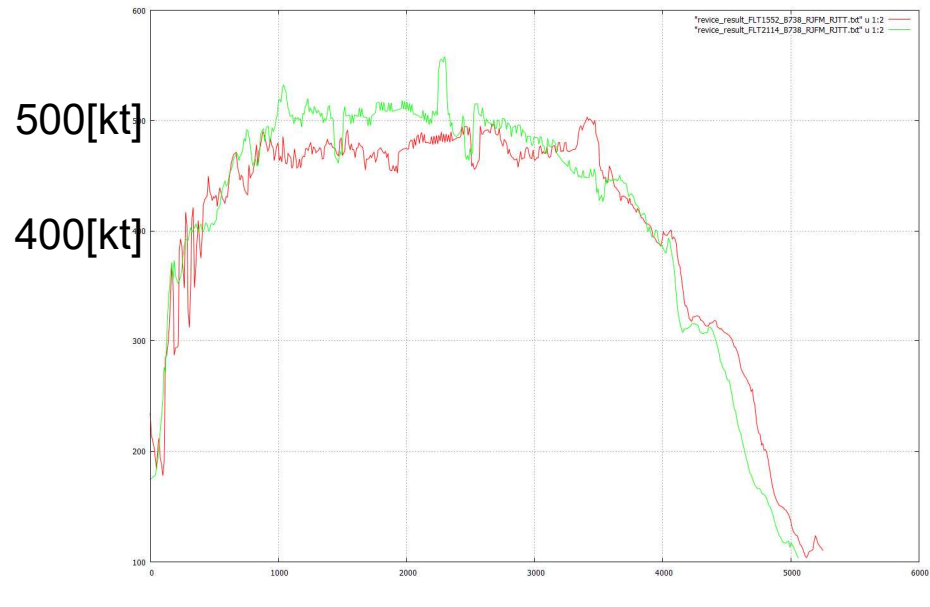
偏西風の追い風を利用できるルートとなる

# 標準ルートより偏西風の強いルートの飛行ケース



MSM気象モデルから算出した  
機体が受けた追い風(色相で表示)

ルートを変えることにより20[kt]程度  
強い追い風を受けている

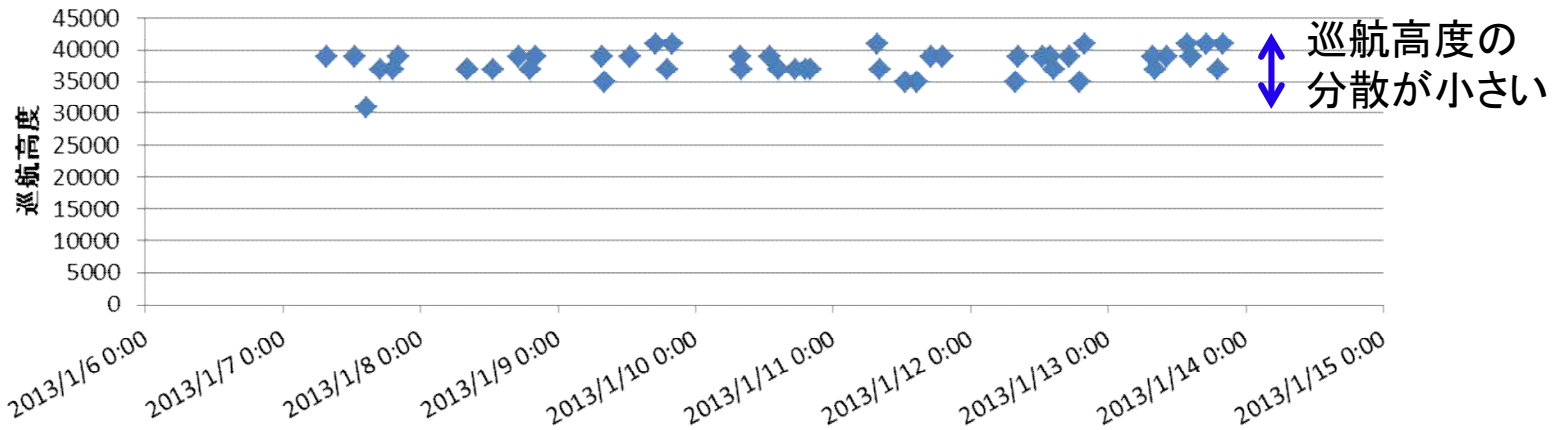


標準ルートを飛行したケース(赤線)とルート  
を変更したケース(緑線)の  
対地速度の比較

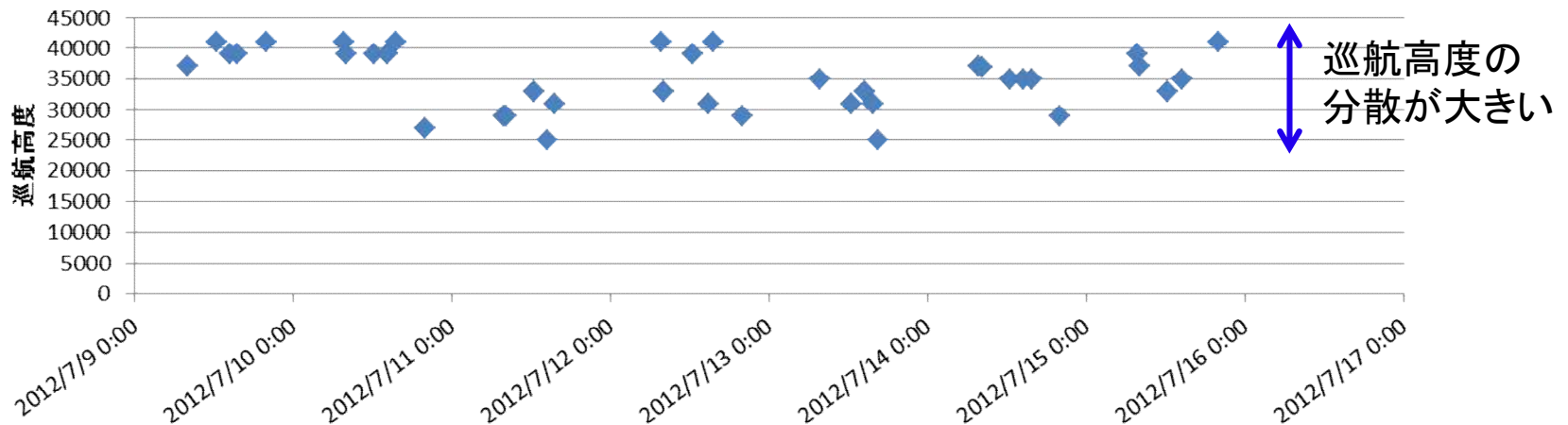
ルートを変えることにより強い追い風を受け  
ることで対地速度が速くなったと  
推察

# 飛行高度と偏西風の蛇行の関係

1月の巡航高度(ジェット気流が卓越し偏西風の蛇行が見られない)

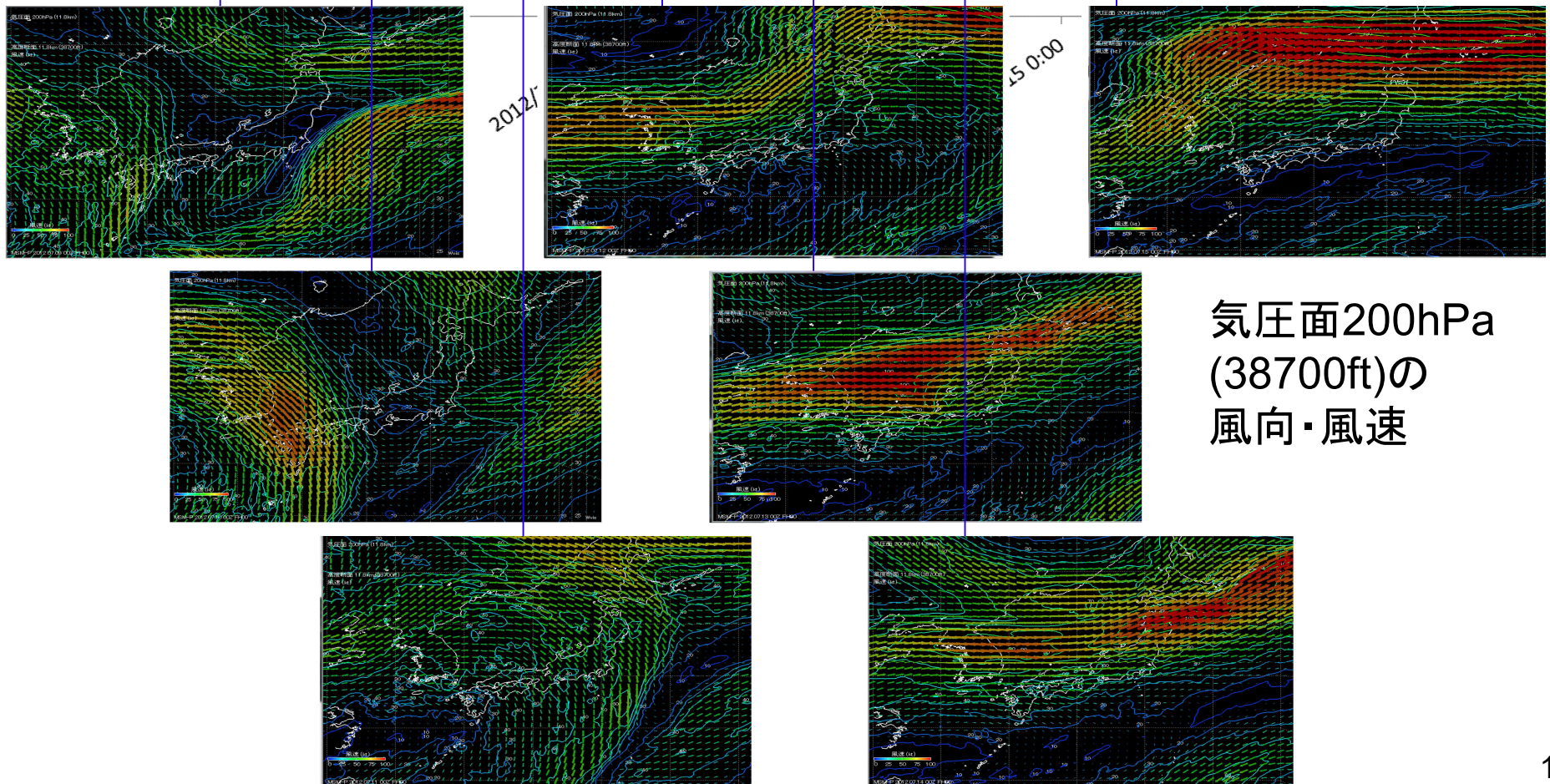
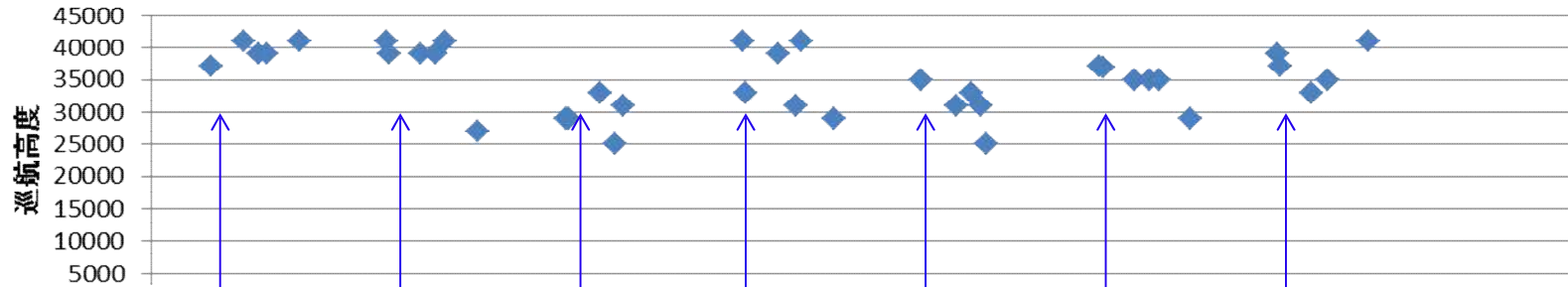


7月の巡航高度(偏西風の蛇行がみられる)





# 飛行高度と偏西風の蛇行の関係



気圧面200hPa  
(38700ft)の  
風向・風速

# 宮崎→羽田便のB737型機 偏西風の影響 まとめ

標準的な飛行ルートよりも偏西風が強いルートを飛行したケースの分析

MSM気象モデルから算出した機体が受けた追い風はルートの変更により強くなっている。

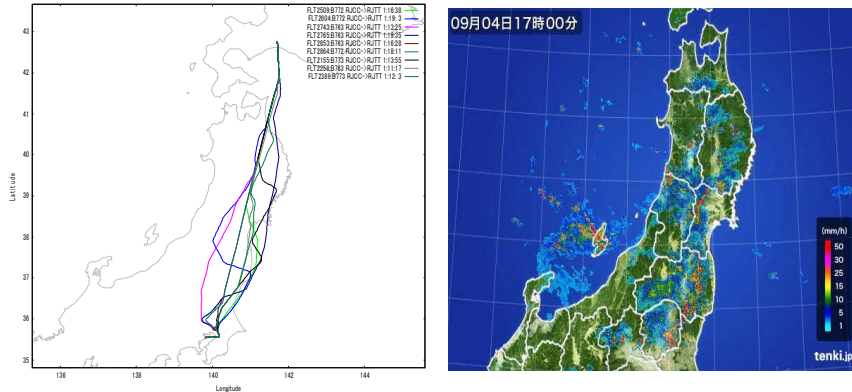
CARATS Open Dataの対地速度は速くなっている。

ルートを変えることにより強い追い風を受けることで対地速度が増加したと推察

ジェット気流が卓越する1月ではほぼ同じ高度を巡航しているが7月に通常より高度を下げて運航しているケースがみられる。  
偏西風の蛇行の影響か？

# 千歳→羽田便 雷が発生した日の分析

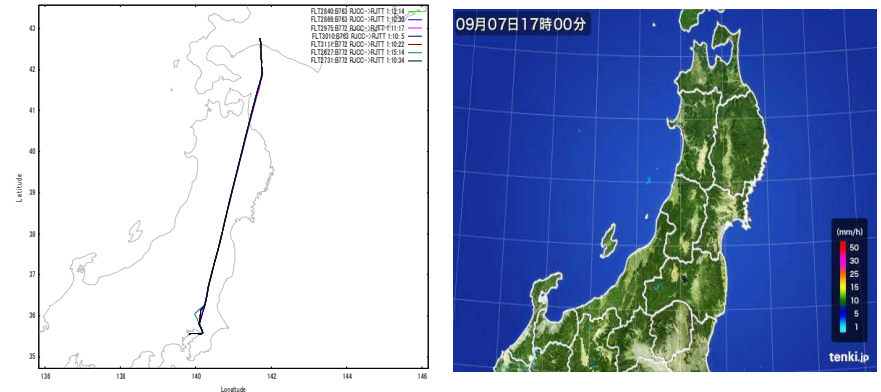
2012年9月4日(雷)



雷の観測された時間帯(15:00～19:00)の航跡と雨雲レーダー

- ◆ 低気圧や気圧の谷の影響を受けた東～北日本で雨や雷
- ◆ 仙台18時の天気: 雷
- ◆ レーダエコーが強い地域を避けるように経路を変更

2012年9月7日(晴天)



晴天の時間帯(16:00～19:00)の航跡と雨雲レーダー

- ◆ 東日本は雲もほとんどなく一日中晴天が続いた
- ◆ 千歳～羽田間の飛行経路は一日を通してほぼ変化が無く、同じ航跡を描いている

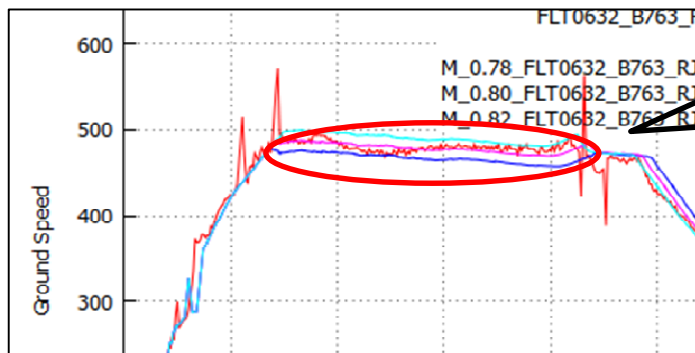
# BADAモデルの飛行速度による飛行時間との比較

CARATS Open Data  
実運航時間

BADAモデルによる  
標準的な飛行時間

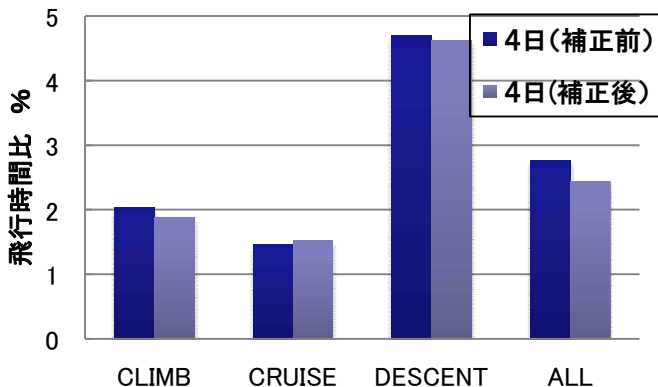
巡航時のMach数は各機体ごとのBADAモデルに合わせる  
飛行距離は実運航に合わせる

## ◆ 実際の航空機とBADAの標準的な巡航Mach数の違いの補正

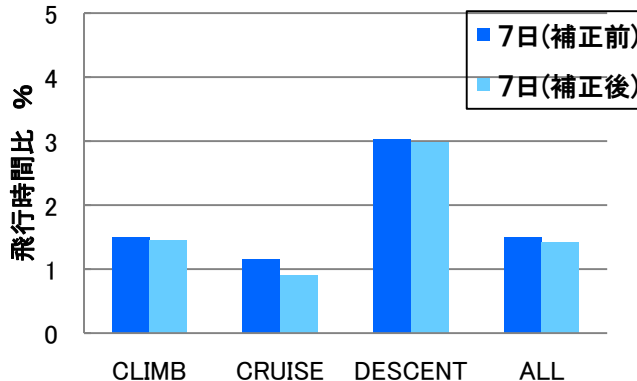


実運航データとMach数を変えたシミュレーションの対地速度から、実際の飛行機が巡航時に、どの程度のMach数で飛行しているか調べる

飛行時間比 4日(雷)



飛行時間比 7日



巡航Mach数の補正により

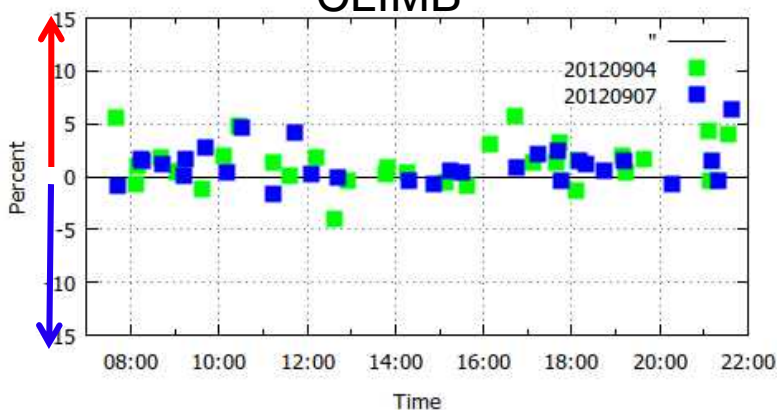
4日(雷): 0.31%

7日(晴天): 0.08%の改善

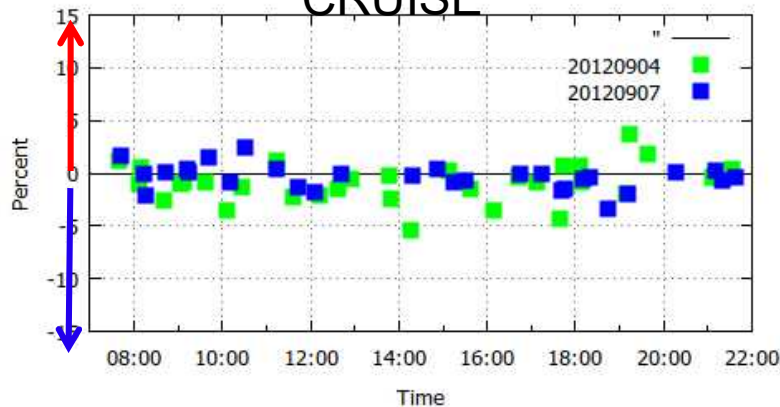
# 実運航とBADA飛行速度の飛行時間の比較

飛行時間長い  
飛行時間短い

## CLIMB

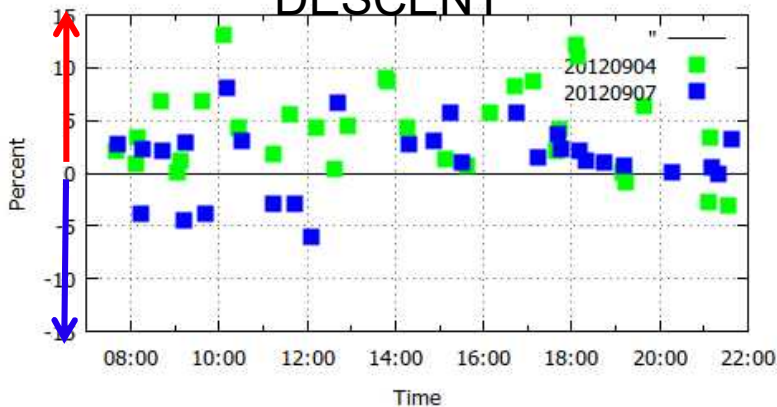


## CRUISE

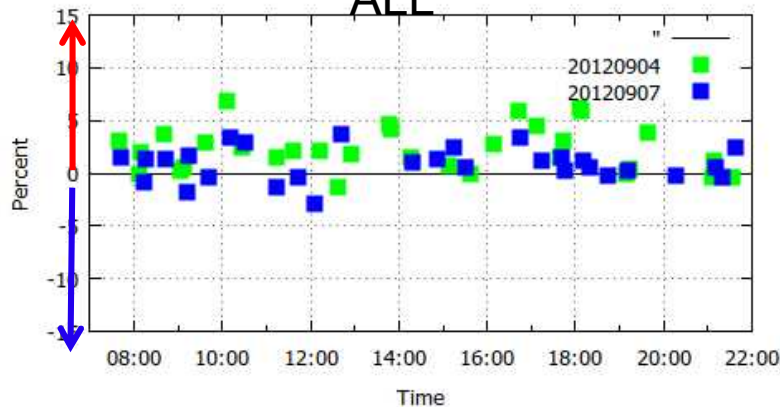


## DESCENT

飛行時間長い  
飛行時間短い



## ALL



◆雷のあった4日(緑)のほうが、7日(青)よりも到着時間の分散が大きい。特に降下開始からの飛行時間が4日(緑)のほうが7日(青)よりも長い

# Climb, Cruise, Descentの違い

平均所要時間(s)	CLIMB	CRUISE	DESCENT	ALL
4日(雷)	1226.9	1066.8	2231.2	4524.9
7日	1128.0	1351.9	1970.4	4450.3
時間差	+98.9	-285.1	+260.8	+74.6

4日(雷)は巡航時間が短く、降下してからの飛行時間が長い  
手前で降下を始めていると考えられる  
運航全体としては、7日に比べて70秒ほど飛行時間が長い

千歳→羽田便 雷が発生した日の分析 今後の予定

4日(雷)のデータに対して、降下開始(TOD)からの飛行速度や  
降下率などの違いを分析していく予定

# まとめ

Carats Open DataとMSMの風を用いて算出した標準的な飛行時間を比較

飛行時間に5%程度の差が生じるケースも散見

Carats Open Dataのレーダ計測周期を補正して対地速度を算出し比較

空いている時間帯を飛行したケースでは巡航マッハ数を抑えた経済的な巡航速度が選択されたと推察。

宮崎→羽田便のB737型機に対し、偏西風の影響を調査

標準的な飛行ルートよりも偏西風が強いルートを飛行したケースでは、

追い風を受けて飛行しCARATS Open Dataの対地速度は速くなっている。

7月に通常より高度を下げて運航しているケースがみられる。気圧面200hPaでは偏西風の蛇行がみられる。

千歳→羽田便に対し、東日本に雷が発生した日のフライトを調査

2012年9月4日は東北地方で雷発生し、レーダエコーが強い地域を避けるように経路変更。

巡航時間が短く、降下してからの飛行時間が長い傾向、運航全体としては、7日に比べて70秒ほど飛行時間が長い

降下開始(TOD)からの飛行速度や降下率などの違いを分析していく予定