



CARATSオープンデータと QAR飛行データを用いた 高精度な飛行状態推定法の確立

CARATSオープンデータフォーラム
令和3年12月13日, オンライン開催

○菊谷 尚暉, ○入江 康平, 原田 明德
高知工科大学

発表構成

1. はじめに

- 研究の背景と目的

2. 飛行状態推定法について

3. 精度評価の結果

- 対地速度, 平滑化処理
- 真対気速度, 気象, 燃料

4. 正確な飛行状態推定のための機体質量推定

5. まとめ

国土交通省：「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
- ・運航効率の向上
- ・環境への配慮

研究開発の活性化のため
CARATSオープンデータが提供

便数が多いが位置情報のみ

→運航効率の分析に必要なものは推定する必要がある

- システムの性能の評価
- 効率の継続的なモニタリング

- 運航速度→飛行性能の評価
- 燃料消費量→**運航コスト**の評価など

詳細な飛行状態量を推定するための正確な方法が必要
しかし

CARATSオープンデータの**多数の便を用いて精度評価を行った例はない**

研究の目的

位置情報のみによる高精度な飛行状態推定法の確立

本研究の内容

機上で記録されたデータ(QARデータ)を真値として、CARATSオープンデータから推定した値と比較することで精度を評価し、精度の高い飛行状態推定の方法を明らかにする。

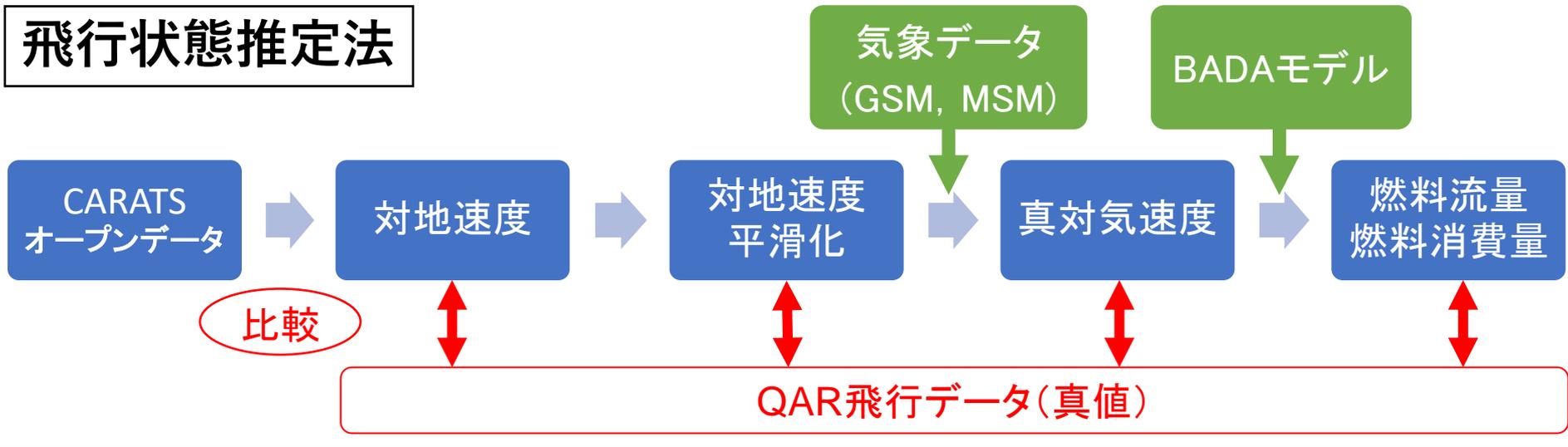
本研究成果の寄与

延べ約119万便の監視レーダデータを活用した高精度かつ大規模な解析

- 運航効率のより正確な分析
- 現状のシステムの問題点の抽出

飛行状態推定法

飛行状態推定法



CARATSオープンデータ

国土交通省より提供いただいた航跡データ。1便に対して約10秒周期で記録時間、仮想便名、緯度、経度、高度、機種^{の6種}のデータが格納。

QAR (Quick Access Recorder)データ

機上で記録されたデータ。1便に対して1秒周期で記録。

データ間隔、種類ともにCARATSよりも詳細かつ正確で誤差が少ない。

これを真値として用いる。なお、QARデータは非常に機密性が高く非公開である。

解析路線：福岡空港発東京国際空港行き
解析便数：517便

比較に使用した計算手法と気象モデル

緯度経度からの距離の算出方法(地球の仮定)

- ・GSI: 国土地理院サイトの測地線長の計算式(回転楕円体)
- ・EH: Hubenyの厳密解(回転楕円体)
- ・SH: Hubenyの簡略式(回転楕円体)
- ・PS: 地球を真球と仮定し大圏距離を算出(真球)
- ・PT: 緯度経度の差に地球半径を乗じ三平方の定理から算出(真球)

- ・GSI: Geospatial Information Authority of Japan
- ・EH: Exact Hubeny's distance formula
- ・SH: Simplified Hubeny's distance formula
- ・PS: Perfect Sphere
- ・PT: Pythagorean Theorem

対地速度の平滑化に用いるフィルタ

- ・ガウシアンフィルタ
- ・メジアンフィルタ
- ・イプシロンフィルタ

気象データ

気象庁の数値予報モデル (GPV現況値を時間方向に内挿)

- ・GSM: 地球全体の大気を対象
- ・MSM: 日本及びその近海の大気を対象

- ・GPV: Grid Point Value
- ・GSM: Global Spectral Model
- ・MSM: Meso-Scale Model

- 距離の算出: **回転楕円体を用いた計算式**
- 対地速度の平滑化: **メジアンフィルタ**
- 気象データ: **GSM**

誤差の評価手法

- ME: 全体の誤差が正負どちらに偏っているかを評価
- RMSE: 正負を考慮せず全体の誤差のばらつきを評価

評価指標

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_{CARATS}[i] - Y_{QAR}[i])$$

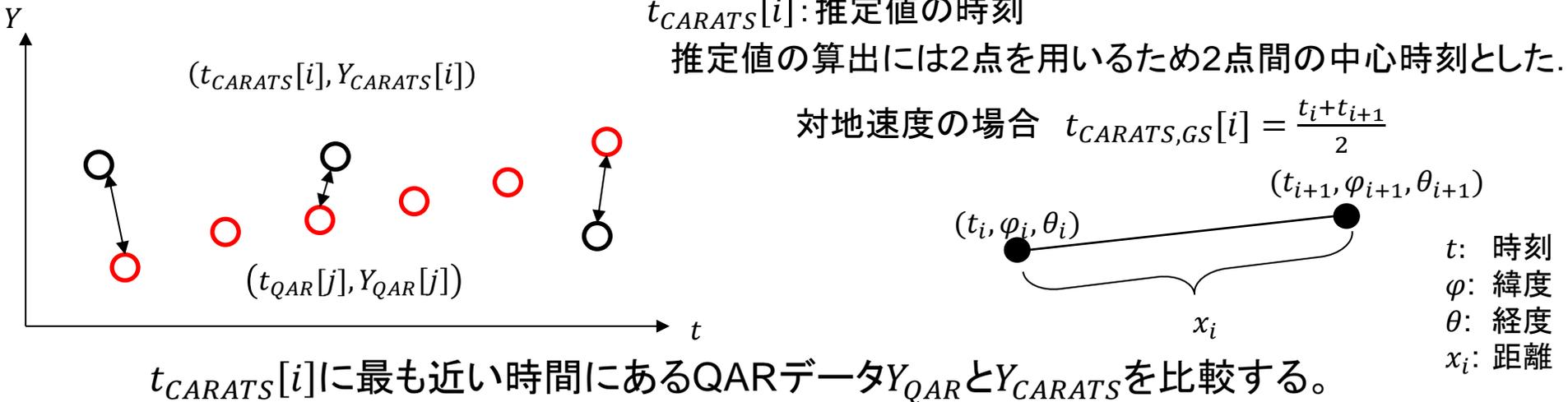
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_{CARATS}[i] - Y_{QAR}[i])^2}$$

$Y_{CARATS}[i]$

: CARATSから推定した値

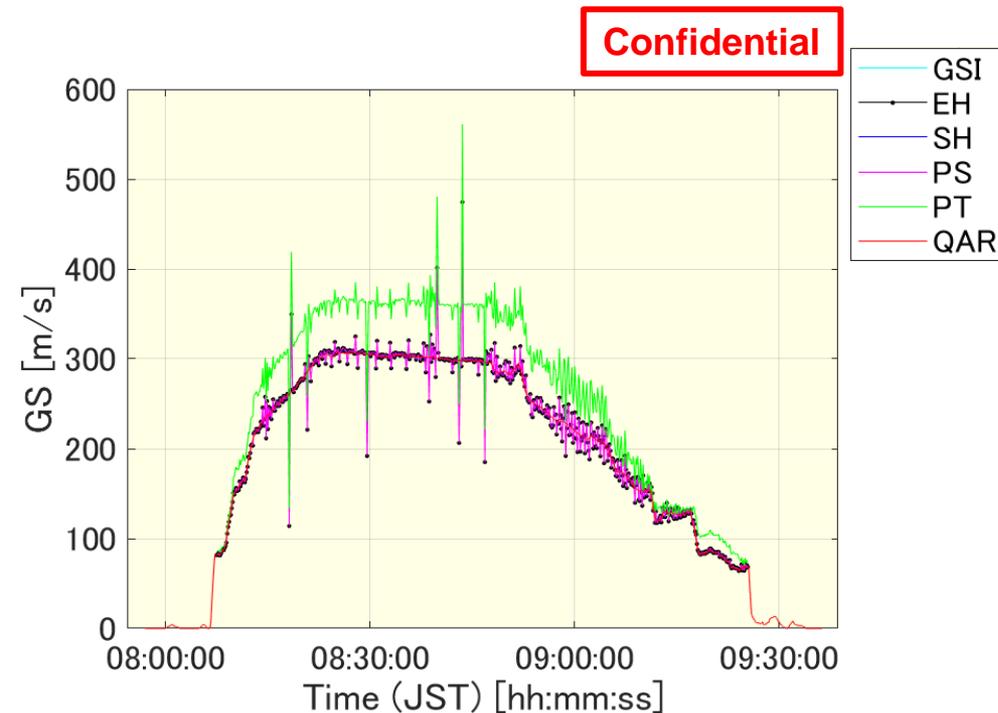
$Y_{QAR}[i]$

: $Y_{CARATS}[i]$ の時刻に最も近いQARデータの値

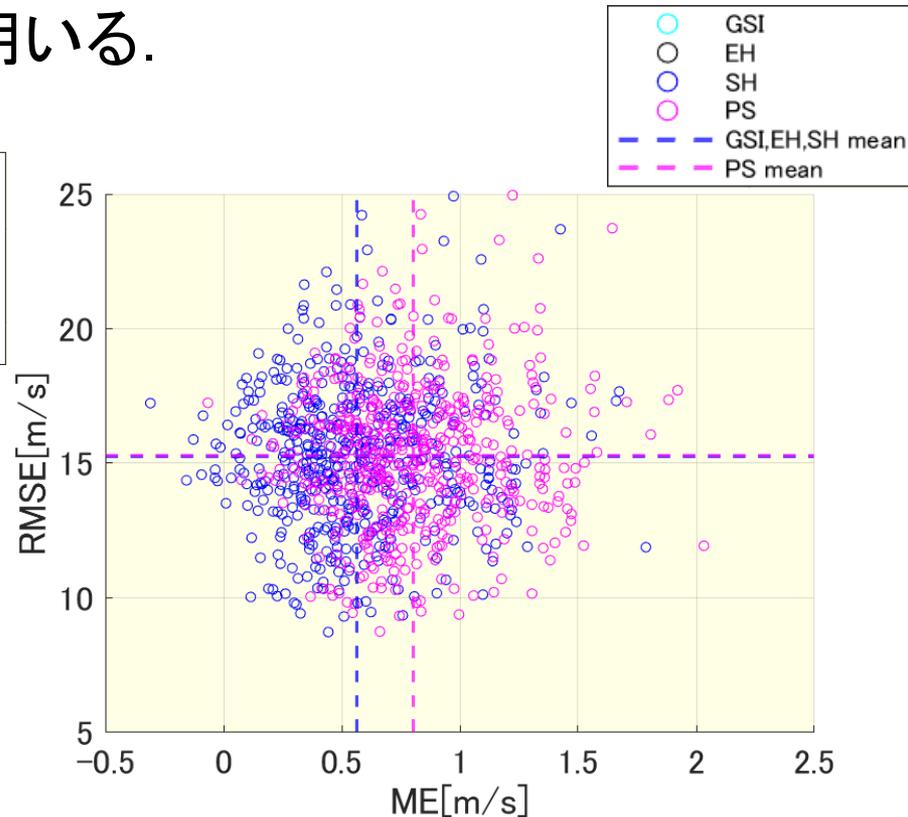


対地速度の精度評価

- 解析結果: 回転楕円体を仮定したGSI, EH, SHが精度が高く, どれも同程度の精度である.
- 以降は計算が煩雑でないSHを用いる.



ある1便の対地速度

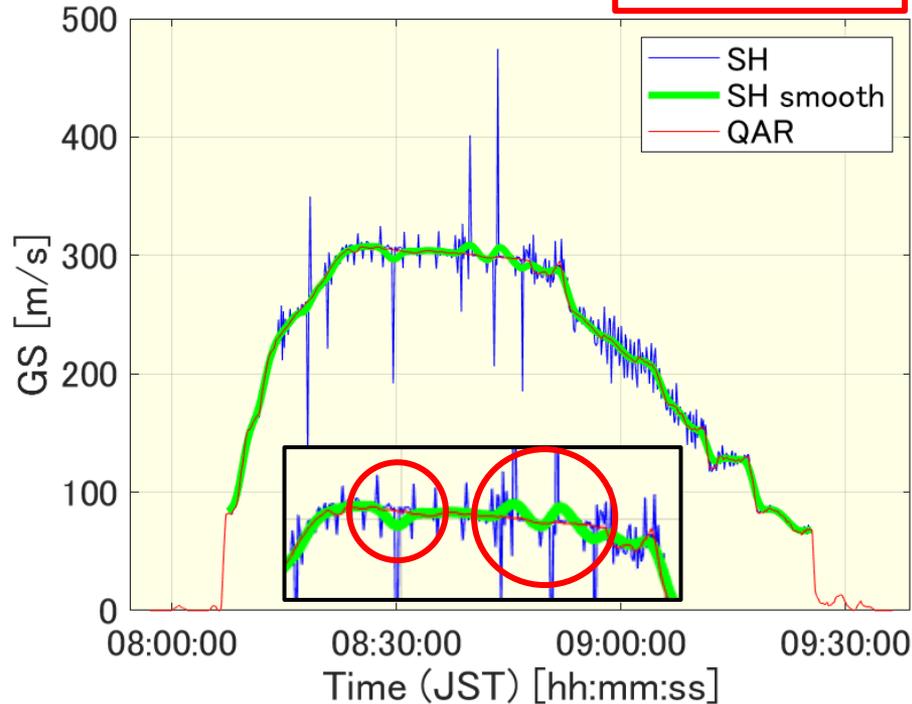


517便のME, RMSE (PTを除く)

- ・GSI: 国土地理院サイトの測地線長の計算式(回転楕円体)
- ・EH: Hubenyの厳密解(回転楕円体)
- ・SH: Hubenyの簡略式(回転楕円体)
- ・PS: 地球を真球としてモデル化し2点間の距離を算出(真球)
- ・PT: 緯度経度の差に地球半径をかけ, 三平方の定理から算出. (真球)

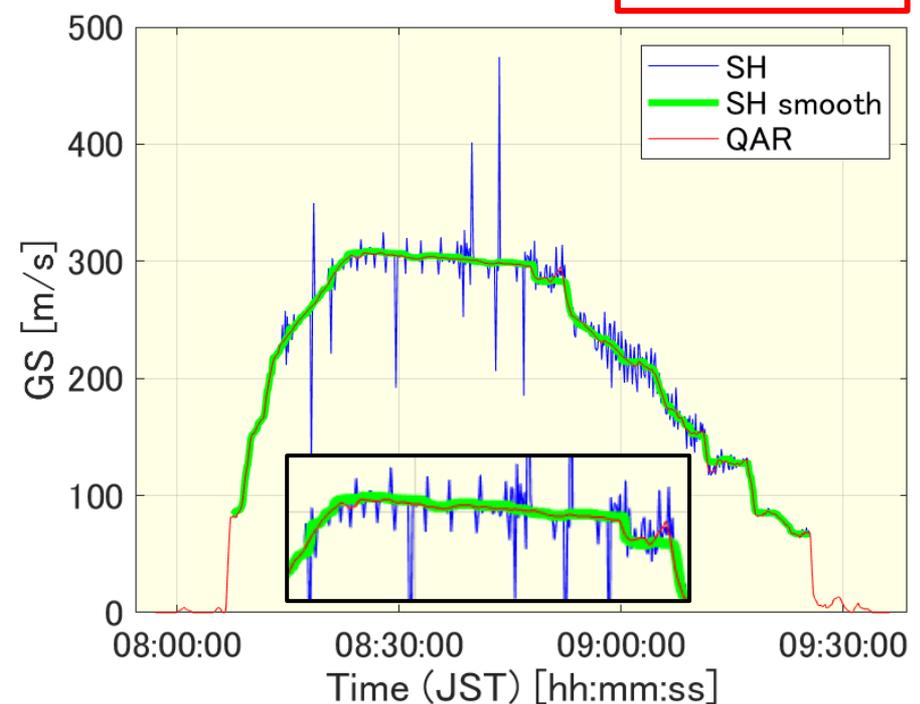
フィルタの比較

Confidential



ガウシアンフィルタ(ローパスフィルタ)
を用いた場合

Confidential



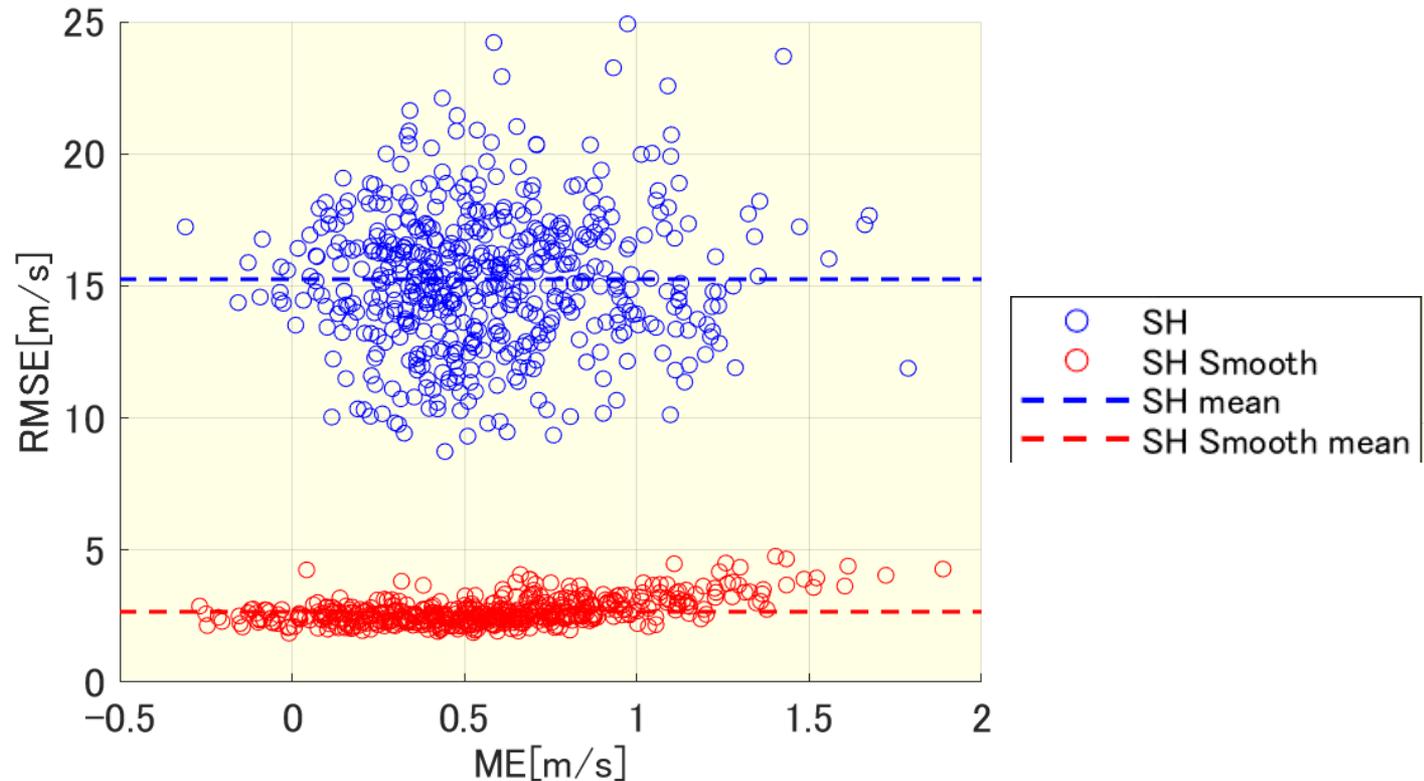
メジアンフィルタを用いた場合

- ・インパルス性雑音が存在する点周辺での挙動が異なることが確認された
→メジアンフィルタを用いることで精度向上

インパルス性雑音: 瞬時的かつ急激な変化で外れ値となるような雑音

対地速度の平滑化

- 検討の結果, メジアンフィルタを2段で適用
- メジアンフィルタを用いた平滑化によりRMSEが大きく改善された。
(平均約15 m/s → 平均約2.7m/s)
- ガウシアンフィルタの場合にはRMSEは平均約3.7 m/sであり, フィルタを変更することで約1m/sの精度向上を実現.



平滑化前と平滑化後の517便の対地速度の評価結果

真対気速度の精度評価

- 真対気速度は、対地速度を平滑化後、次式で求めた。

$$\vec{V}_{TAS} = \vec{V}_{ES} - \vec{V}_{Wind}$$

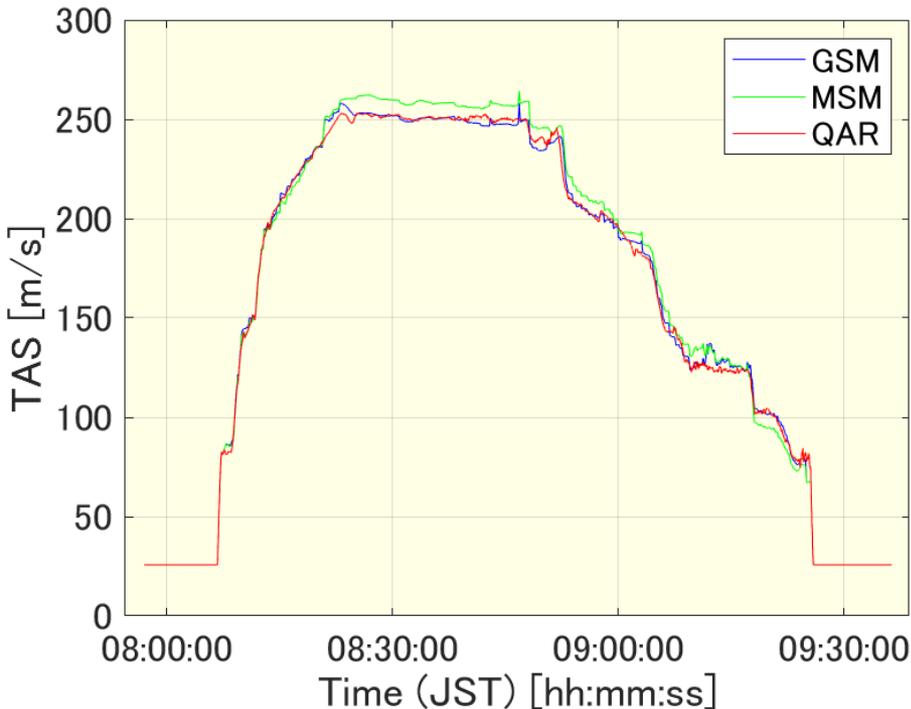
V_{TAS} : 真対気速度
 V_{ES} : 慣性速度
 V_{Wind} : 風速

$$\vec{V}_{ES} = \vec{V}_{GS} + \left(\frac{dH}{dt} \right)$$

H: 高度
 t: 時刻

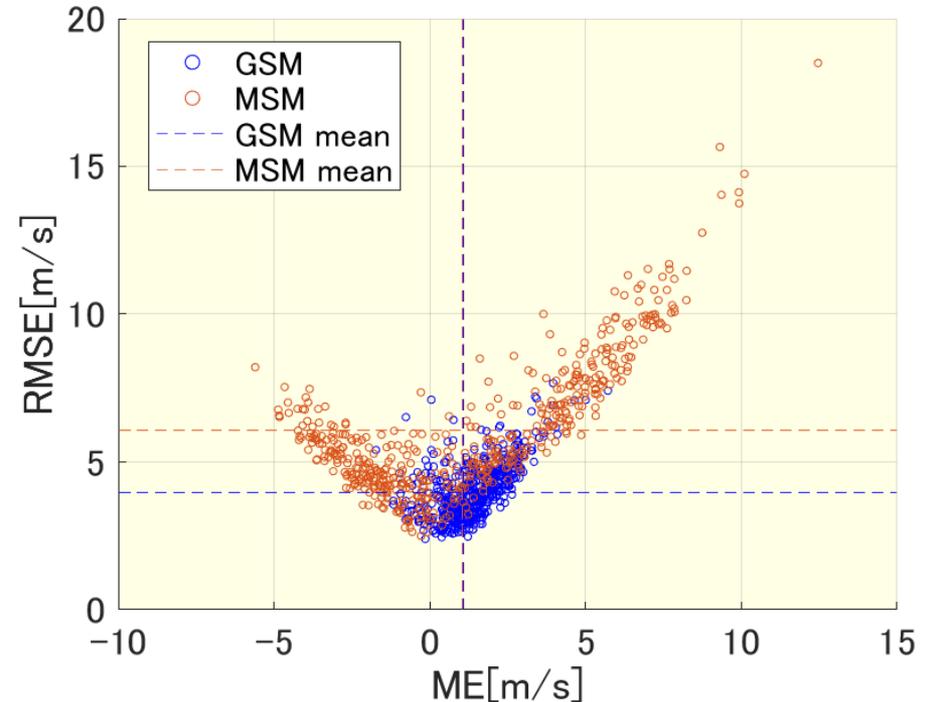
- 解析結果: 格子間隔は粗いが大気の循環を予報する目的で運用されている GSMの方が精度が良い.

Confidential



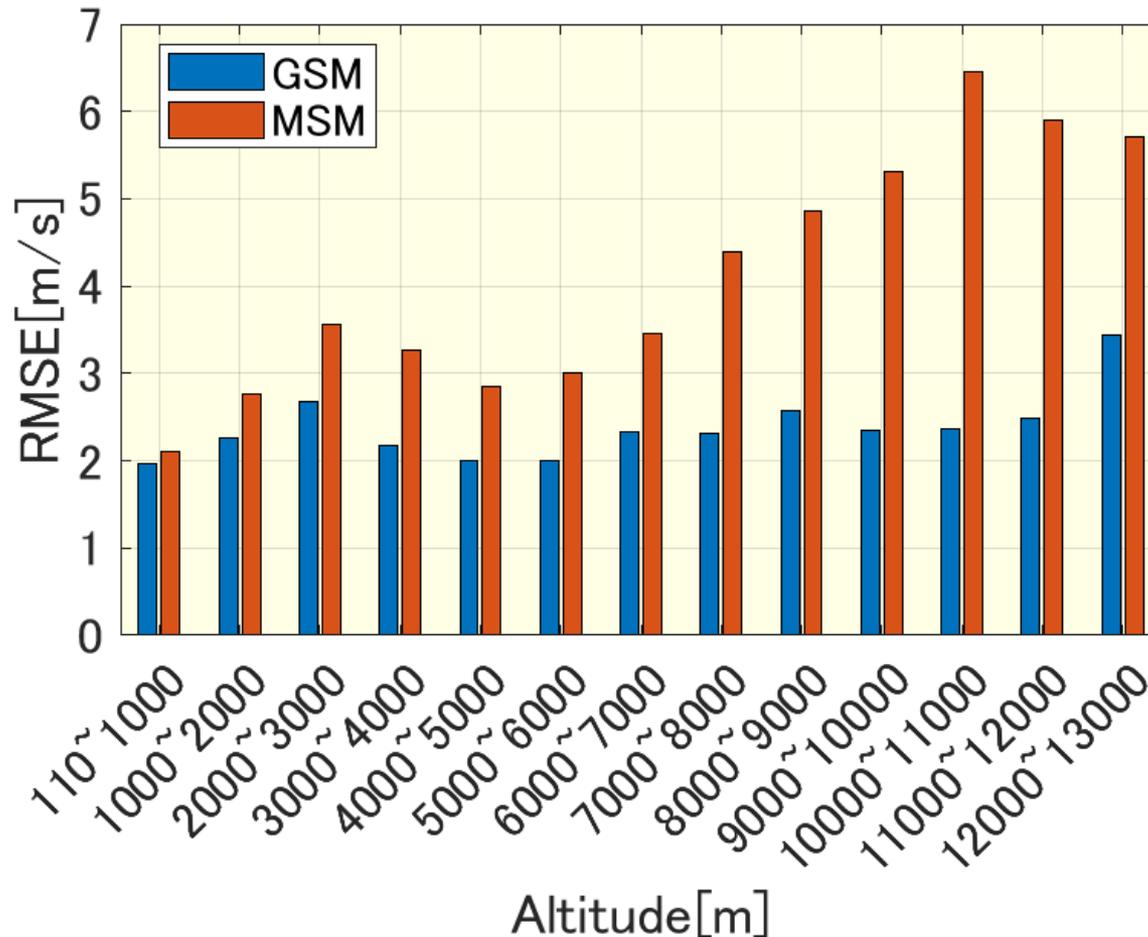
ある一便の真対気速度の時間履歴

MSMの誤差は全体を通して正もしくは負に偏っている



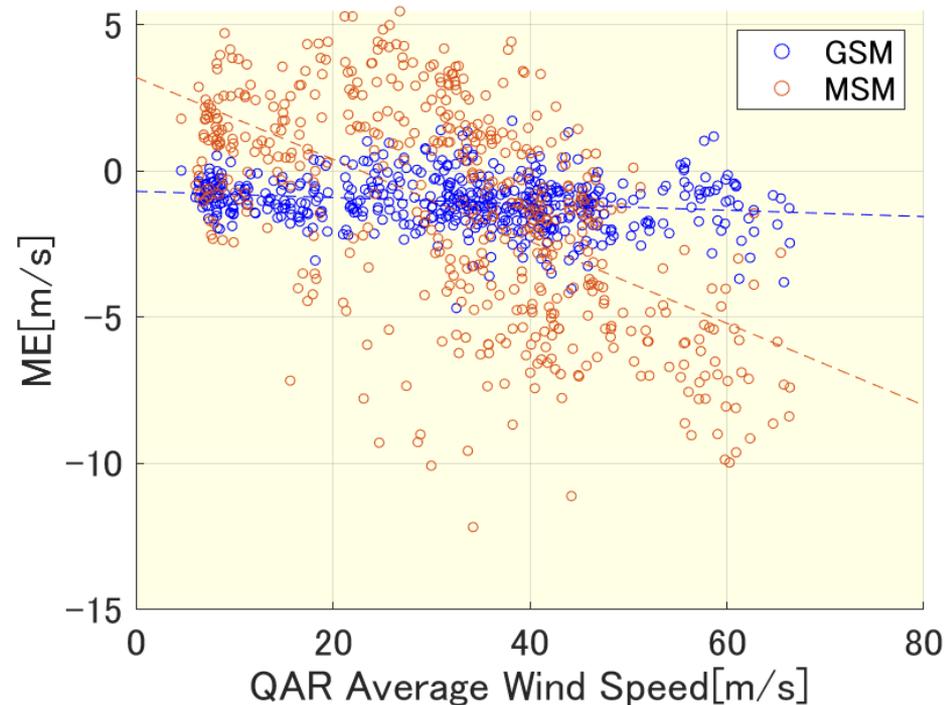
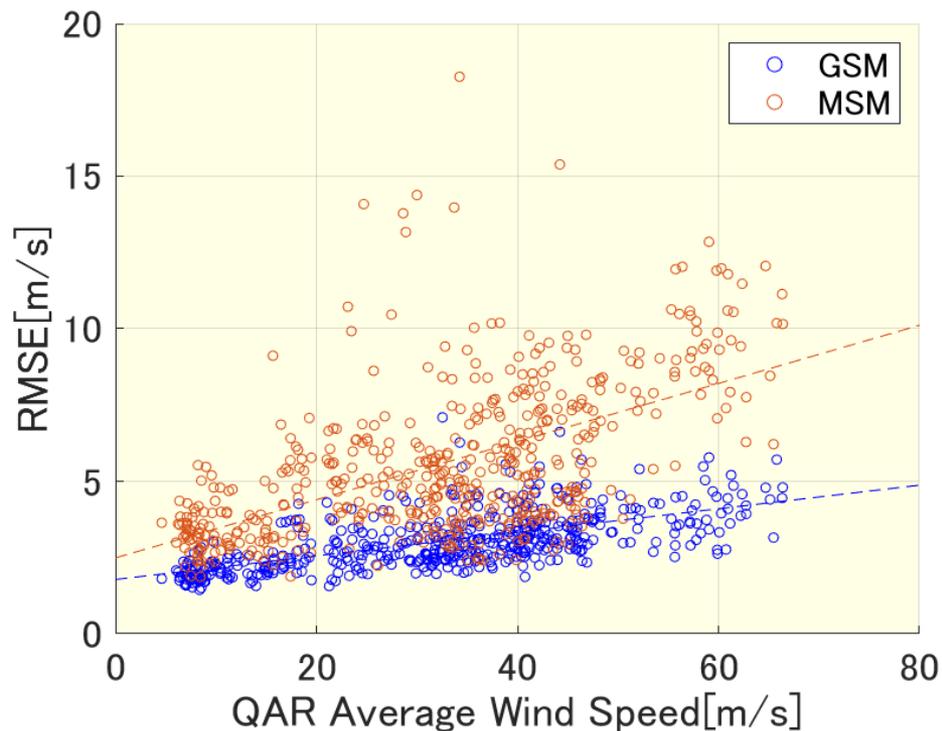
517便の真対気速度の評価結果

数値予報現況値の精度評価



- 517便すべてのデータを高度ごとで分け、その高度ごとにRMSEを算出した。
- GSMでは、高度に関係なく、精度がほぼ一定である。
- MSMでは、高度が上がると、精度が劣化する傾向がある。

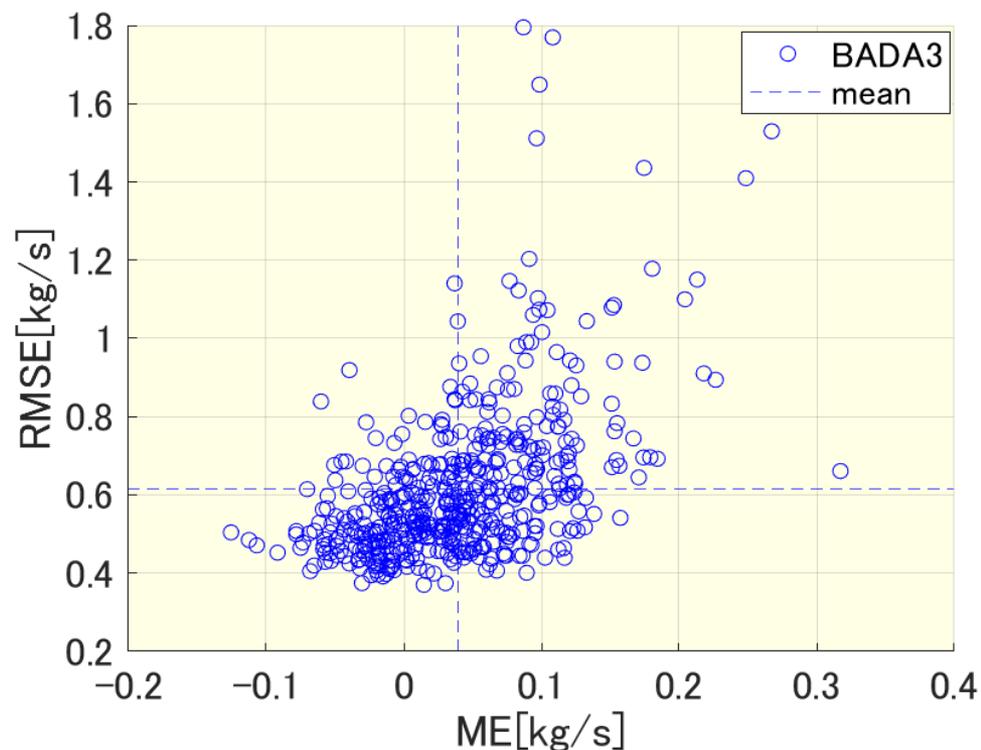
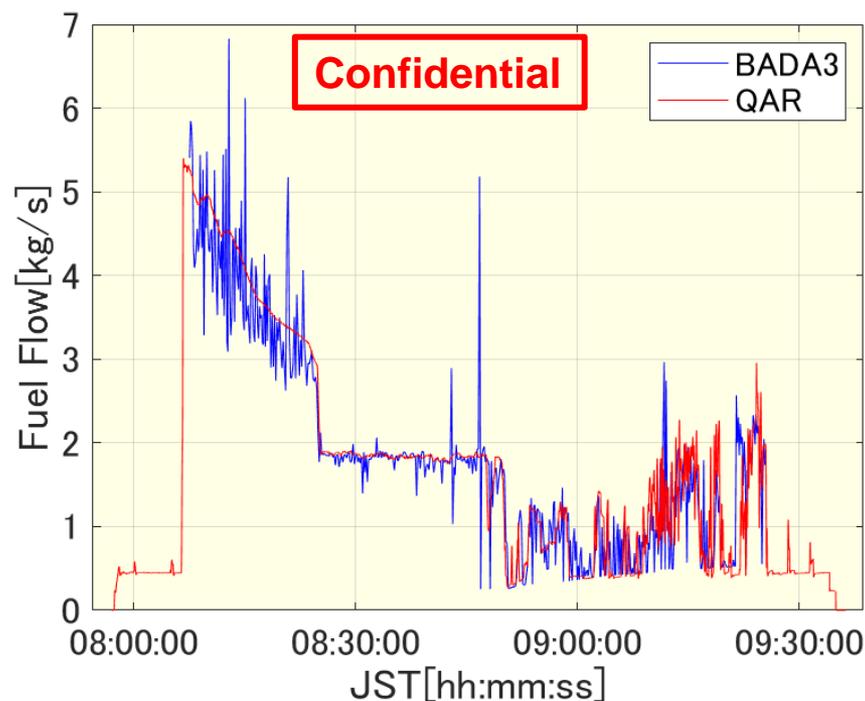
数値予報現況値の精度評価



GSMに比べてMSMは、QAR平均風速が大きくなるほど誤差が大きくなる傾向がある
→実際の風速が大きい場合にMSMは精度が劣化する可能性がある

燃料流量の精度評価

- 燃料流量については、BADA3を用いた場合の精度評価を行った
- ただし、初期質量をBADA標準質量とした。
- 上昇フェーズのノイズが目立つものの、全フェーズを通しておおよそ一致していると言える。

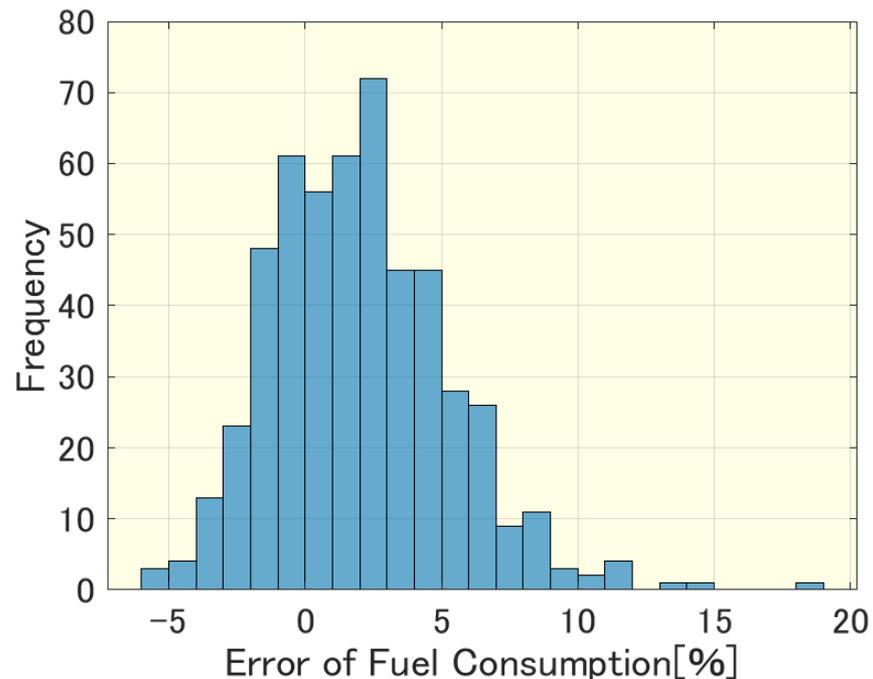
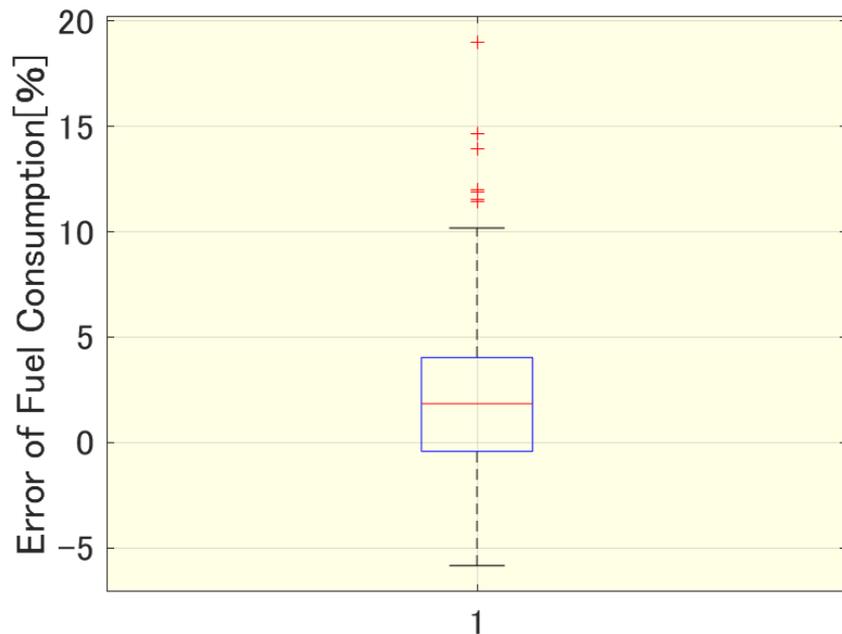


MEの $\mu \pm 1\sigma$: 0.0394 ± 0.0610 [kg/s]

RMSEの $\mu \pm 1\sigma$: 0.6167 ± 0.1940 [kg/s]

μ : 平均値, σ : 標準偏差

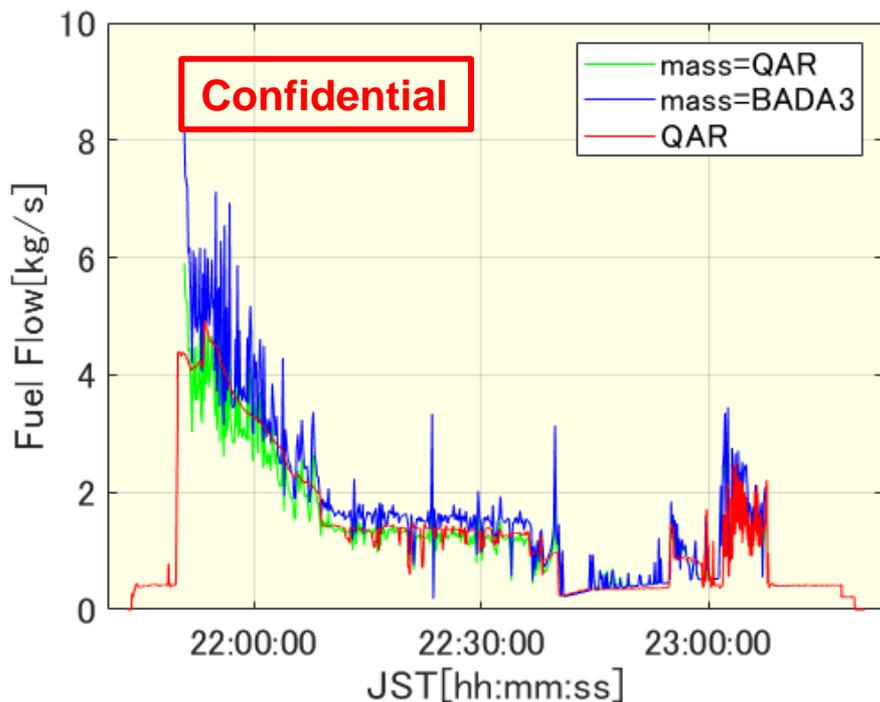
燃料消費量の精度評価



- 平均約2.03%の誤差
- 82.3%の便が $\pm 5\%$ 以内の誤差で推定を行うことができた

正確な飛行状態推定のための機体質量推定¹⁴

- CARATSオープンデータには、航空機の質量は含まれていない。
- 実際の機体質量など運航に関する詳細なデータは機密性が非常に高く、非公開。
- 先の説明にあった燃料消費量は初期質量が影響している。
- 燃料消費量の推定には、質量を仮定して算出を行っている。

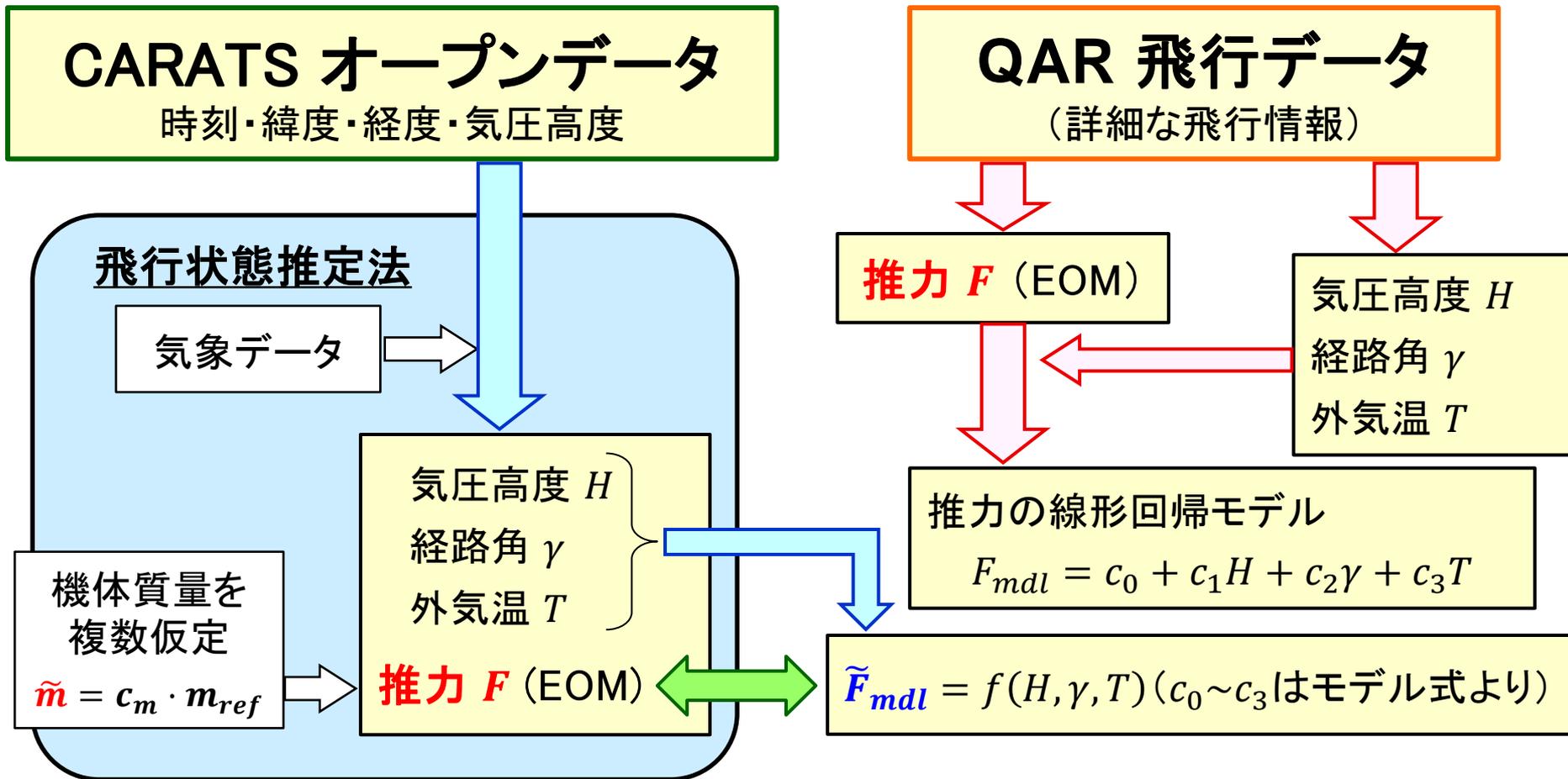


BADA標準質量の場合の誤差：約19%
QAR質量の場合の誤差：約-2.5%

正確な機体質量が必要

- CARATSオープンデータから機体質量を推定する方法を提案
- QAR飛行データと比較して精度を評価する

提案する機体質量推定法



推定質量 m : F が \tilde{F}_{mdl} に最もよく合うときの \tilde{m}

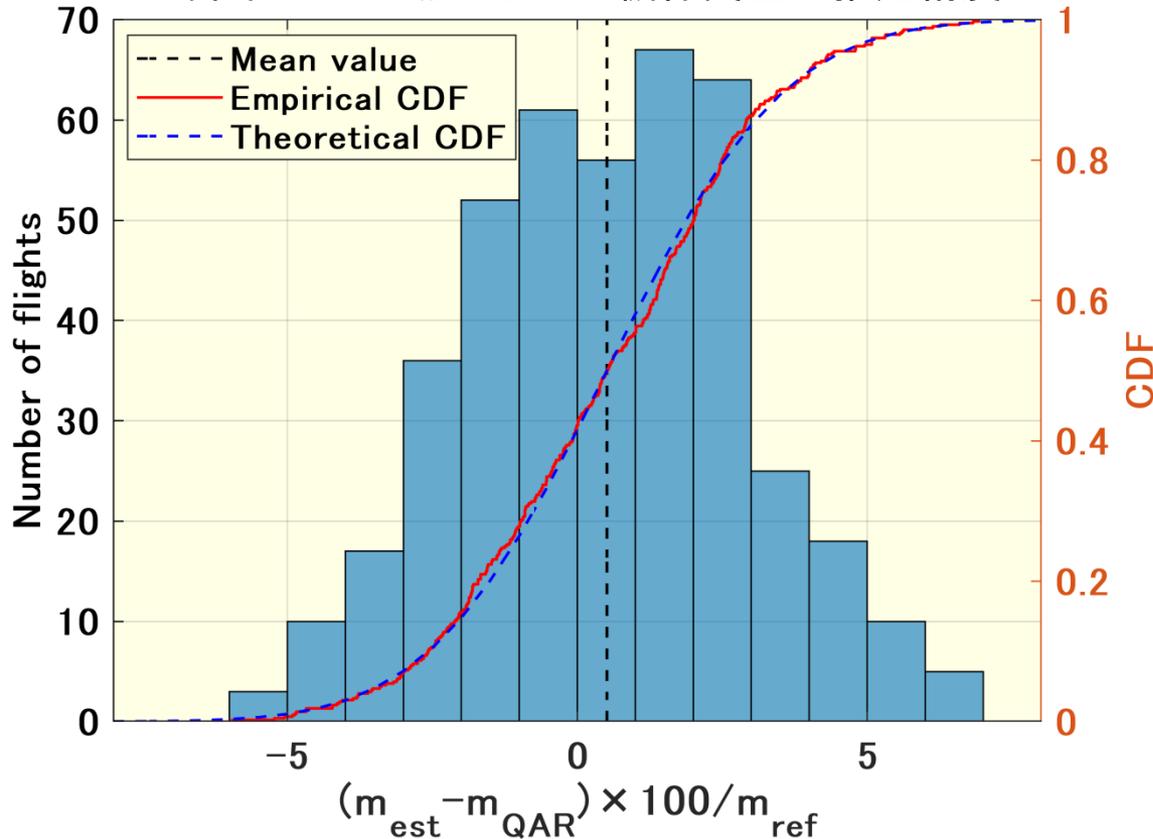
(推力計算と m_{ref} には機体性能モデルBADA3を使用.
推力の比較には誤差平方和を使用.)

誤差評価

QAR 飛行データ

機体質量の推定結果

上昇中10000ft点における機体質量の推定精度



平均値 : 0.5112 [%]

標準偏差 : 2.4019 [%]

- 推定の対象便数: 424便
- 回帰に用いた便数: 84便

(高度データの欠損がある便, 速度のノイズが推力の計算に大きな影響を及ぼす便, 計9便は除外.)

BADA標準質量は208.7tonのため, $\pm 6\%$ は $\pm 12.5\text{ton}$ に該当.
精度向上のため, さらなる改善が必要.

まとめ、今後の展望

まとめ

1. 対地速度：回転楕円体を考慮した計算式で精度が良い
2. 対地速度をメジアンフィルタで処理
→ガウシアンフィルタよりも精度向上
3. 真対気速度：GSMを用いた場合に精度が良い
4. 燃料流量：82.3%の便が $\pm 5\%$ 以内の誤差
5. 機体質量： $\pm 6\%$ (12.5ton) 以内の誤差

今後の展望

1. 誤差の大きい便と小さい便の要因分析
2. 燃料推定にBADA4を用いた場合の精度評価
3. 機体質量の推定精度の向上

謝辞

CARATSオープンデータをご提供いただきました国土交通省航空局様
QAR飛行データを提供いただきました日本航空株式会社様
に感謝の意を表します。

QARフライトデータの使用に関して

日本航空株式会社より提供を受けたQARフライトデータについては、日本航空株式会社と高知県公立大学法人高知工科大学間で締結したフライトデータ等に関する秘密保持契約書第4条第3項に基づき、第三者への貸与、譲渡、開示、漏洩なきよう秘密保持義務を遵守し、適切な管理のもと取り扱いました。



高知工科大学
KOCHI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

ご清聴ありがとうございました。

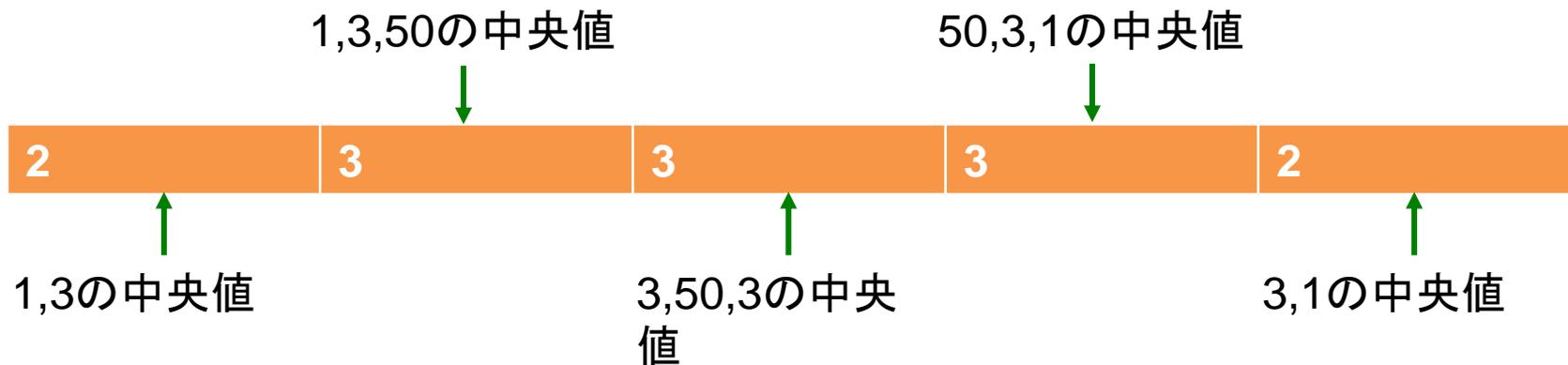
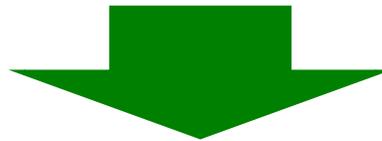
フィルタ選定の理由

1. ローパスフィルタは、外れ値の影響を受けやすく、インパルス性雑音が存在するときには、非線形フィルタ、特にメディアンフィルタがその除去に効果を示すことが知られている。[1]
2. また、フィルタを二段階で適用することで、細かな変化も残しながら平滑化が可能である。

[1]近藤 啓子, 長谷山 美紀, 北島 秀夫: インパルス性雑音除去のための非線形フィルタによる雑音検知に関する考察(映像メディアおよび一般インターネット, デジタル放送, マルチメディア, 三次元画像, 視覚と画質評価, ITS等), 映像情報メディア学会技術報告, 2002, 26.9, pp.43-48



フィルタ窓3で処理



フィルタの比較

距離算出にSHを用いた場合で比較

フィルタ窓:517便のRMSEが最も小さくなった時の窓数.

517便のME

使用フィルタ	フィルタ窓	平均値[m/s]	標準偏差[m/s]
メジアンフィルタ2段	9,19	0.5714	0.3684
メジアンフィルタ1段	17	0.5636	0.3525
ガウシアンフィルタ	25	0.5826	0.3221

517便のRMSE

使用フィルタ	フィルタ窓	平均値[m/s]	標準偏差[m/s]
メジアンフィルタ2段	9,19	2.6654	0.4864
メジアンフィルタ1段	17	2.7405	0.4646
ガウシアンフィルタ	25	3.6802	0.5096

略記	計算方法	地球の仮定
GSI(Geospatial Information Authority of Japan)	国土地理院が用いている測地線長の計算式	回転楕円体
EH(Exact Hubeny's distance formula)	Hubenyの厳密解	回転楕円体
SH(Simplified Hubeny's distance formula)	Hubenyの簡略式	回転楕円体
PS(Perfect Sphere)	地球を完全な球体としてモデル化し、距離を算出する方法	完全な球体
PT(Pythagorean Theorem)	緯度経度の差に地球半径をかけ、三平方の定理から求める方法	完全な球体

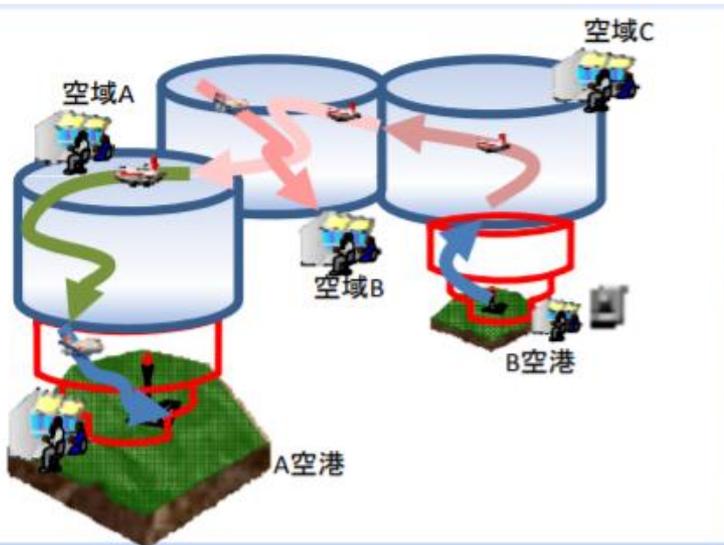
略記	計算方法	地球の仮定
GSI(Geospatial Information Authority of Japan)	国土地理院が用いている測地線長の計算式	回転楕円体
EH(Exact Hubeny's distance formula)	Hubenyの厳密解	回転楕円体
SH(Simplified Hubeny's distance formula)	Hubenyの簡略式	回転楕円体
PS(Perfect Sphere)	地球を完全な球体としてモデル化し、距離を算出する方法	完全な球体
PT(Pythagorean Theorem)	緯度経度の差に地球半径をかけ、三平方の定理から求める方法、緯度によって変化する経度1度の距離を考慮しない (すべて赤道での距離)	完全な球体

CARATS(Collaborative Actions for Renovation of Air Traffic Systems)

1. 2010年に国土交通省が策定した将来の航空交通システムに関する長期ビジョン。
2. 目標設定
 - ①安全性の向上
 - ②航空交通量増大への対応
 - ③利便性の向上
 - ④運航の効率性向上
 - ⑤航空保安業務の効率性向上
 - ⑥環境への配慮
 - ⑦航空交通分野における我が国の国際プレゼンスの向上

CARATS(Collaborative Actions for Renovation of Air Traffic Systems)

空域ベース運用



軌道ベース運用(TBO)



- ・分割された空域、予め定められた経路を基本とした運用

現位置を把握し、将来位置を「予測」

- ・全体を1つの空域として捉え、出発から到着までの軌道を最適化

- ・現位置と将来位置(空間、時間)を「正確に把握」

用いるデータ・モデル

1. CARATS Open Data

国土交通省が提供している航跡データ。1便に対して約10秒周期で記録時間、仮想便名、緯度、経度、高度、機種 の6種のデータが格納。

1. QAR(Quick Access Recorder)データ

機上で記録されたデータ。1便に対して1秒周期で記録。

データ間隔、データ種類ともにCARATSよりも詳細。これを**真値**として用いる。
なお、QAR データは非常に機密性が高く非公開である。

1. 気象データ

気象庁が提供する数値予報データを利用。

数値予報モデルは、GSMおよびMSMを利用。

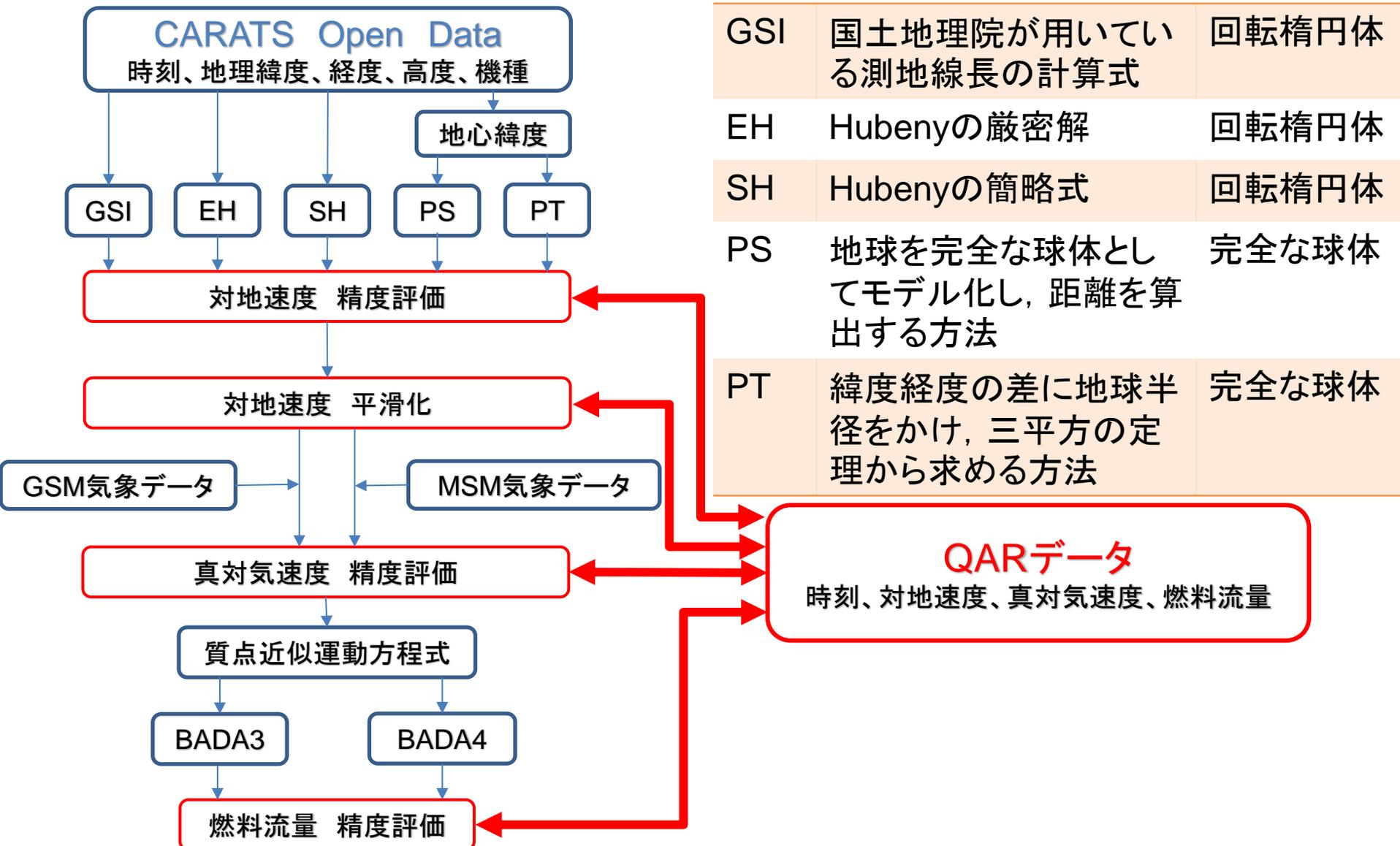
GSM: 地球全体の大気を対象とした
気象庁の数値予報モデル
MSM: 日本及びその近海の大気を対象とした
気象庁の数値予報モデル

1. BADAモデル

欧州航空航法安全機構(EUROCONTROL)が維持・管理する機体性能モデル。

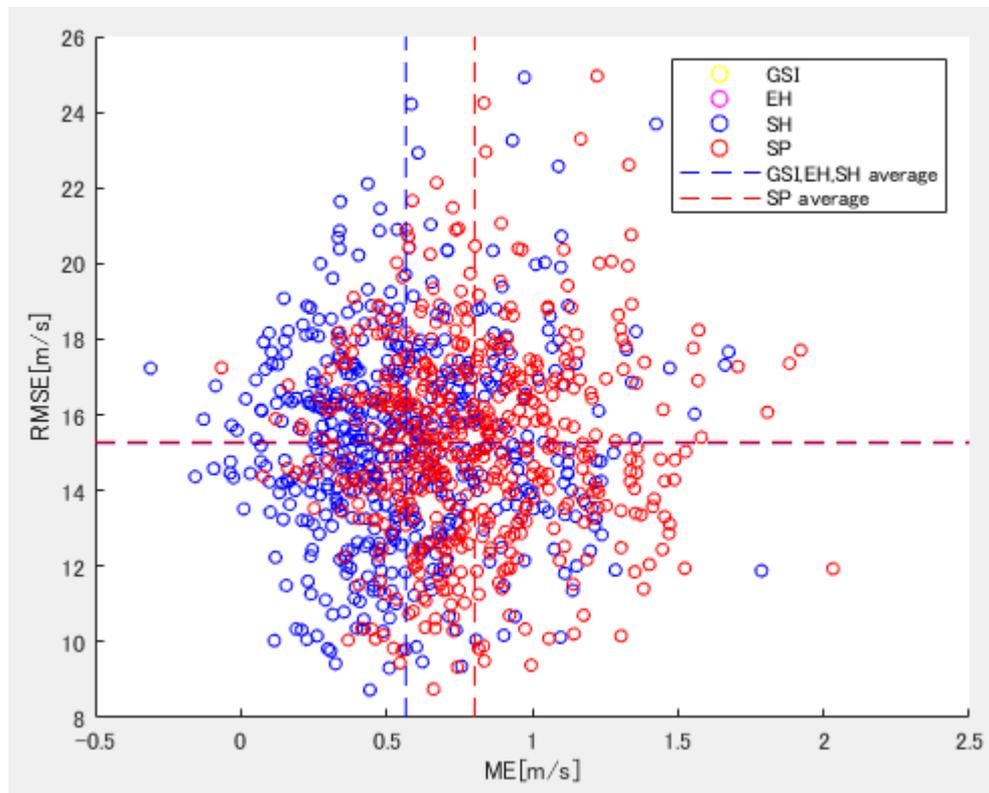
解析路線: 福岡空港発東京国際空港行き
解析便数: 517便

研究の流れ



対地速度の精度評価

1. 解析結果: 回転楕円体を仮定したGSI, EH, SHが精度が高く, どれも同程度の精度である。
2. よって, これ以降は計算が煩雑でないSHを用いる。



517便のME, RMSE (PTを除く)

最小総数: 各便で比較したときに他の方法と比べてその方法のME(もしくはRMSE)が最小になった便の総数

評価指標

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (V_{CARATS}[i] - V_{QAR}[i])$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (V_{CARATS}[i] - V_{QAR}[i])^2}$$

$V_{CARATS}[i]$: CARATSから推定したデータの値

$V_{QAR}[i]$: $V_{CARATS}[i]$ の時刻に最も近いQARデータの値

ME	平均[m/s]	標準偏差[m/s]
GSI	0.5664	0.3228
EH	0.5664	0.3228
SH	0.5664	0.3228
PS	0.8024	0.3212
PT	39.1810	2.3468

RMSE	平均[m/s]	標準偏差[m/s]
GSI	15.2541	2.6368
EH	15.2541	2.6368
SH	15.2541	2.6368
PS	15.2804	2.6380
PT	48.2653	2.9562

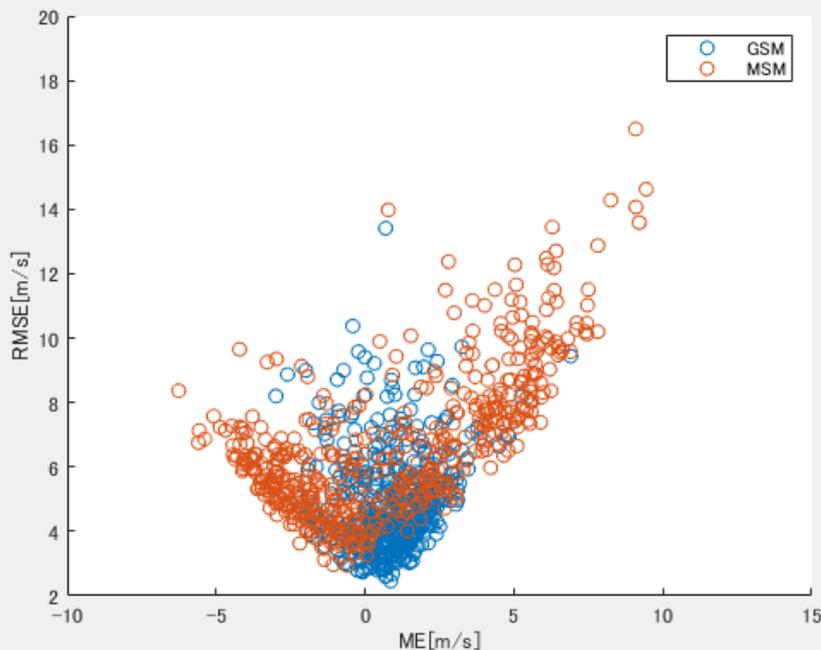
真対気速度の精度評価

1. 真対気速度は、風力三角形より次のように求められる。

$$V_{TAS} = V_{GS} - V_{Wind}$$

V_{TAS} : 真対気速度
 V_{GS} : 対地速度
 V_{Wind} : 風速

3. 解析結果: 格子間隔は粗いが大気の循環を予報する目的で運用されているGSMの方が精度が良い。



517便のME, RMSE

ME	最小総数	平均[k/m]	標準偏差[m/s]	中央値[m/s]
GSM	411	0.8900	1.2279	0.9169
MSM	106	0.8975	3.4641	0.3717

RMSE	最小総数	平均[k/m]	標準偏差[m/s]	中央値[m/s]
GSM	479	4.8524	1.5168	4.4827
MSM	38	6.6998	2.2721	6.2573

EH(ヒュベニの厳密解)

1. 距離D (ガウスの平均緯度式) $D = \sqrt{(s \sin \alpha)^2 + (s \cos \alpha)^2}$
2. 長半径 α $\alpha = 6378137$ m 扁平率 $f = \frac{1}{298.257222101}$
3. 点A,B 緯度,経度 y_1, y_2, x_1, x_2
4. 緯度差 $\Delta y = y_2 - y_1$
5. 経度差 $\Delta x = x_2 - x_1$
6. 平均緯度 $y = \frac{y_1 + y_2}{2}$
7. 第一離心率の2乗 $e^2 = f(2 - f)$
8. 第二離心率の2乗 $e'^2 = \frac{e^2}{1 - e^2}$
9. 卯酉線曲率半径 $N = \frac{\alpha}{W}$
10. 子午線曲率半径 $M = \frac{\alpha(1 - e^2)}{W^3}$
11. $W = \sqrt{1 - e^2 \sin^2 y}$
12. $\eta^2 = e'^2 \cos^2 y$
13. $t = \tan y$
14. $s \sin \alpha =$

$$N \cdot \cos y \cdot \Delta x + \frac{N \cos y}{24} (1 - \eta^2 + \eta^4 - \eta^6 - 9t^2\eta^2 + 18t^2\eta^4 - 27t^2\eta^6) \Delta y^2 \Delta x + \frac{N \cos^3 y}{24} (-t^2) \Delta x^3 + \frac{N \cos y}{5760} (7 + 10\eta^2 - 27\eta^4 - 54t^2\eta^2 - 64t^2\eta^4 + 675t^2\eta^6) \Delta y^4 \Delta x +$$

$$\frac{N \cos^3 y}{5760} (-16 - 70t^2 - 158t^2\eta^2 + 158t^2\eta^4 + 90t^4\eta^2 - 180t^4\eta^4) \Delta y^2 \Delta x^3 + \frac{N \cos^5 y}{5760} (-24t^2 + 3t^4 - 27t^2\eta^2) \Delta x^5 + \frac{N \cos y}{1935360} 62 \Delta y^6 \Delta x +$$

$$\frac{N \cos^3 y}{1935360} (-416 - 2954t^2) \Delta y^4 \Delta x^3 + \frac{N \cos^5 y}{1935360} (-192 - 1680t^2 + 2652t^4) \Delta y^2 \Delta x^5 + \frac{N \cos^7 y}{1935360} (-816t^2 + 528t^4 - 6t^6) \Delta x^7$$
15. $s \cos \alpha = N(1 - \eta^2 + \eta^4 - \eta^6 + \eta^8 - \eta^{10} \dots) \Delta y + \frac{N}{24} (3\eta^2 - 6\eta^4 + 9\eta^6 - 3t^2\eta^2 + 21t^2\eta^4 - 54t^2\eta^6) \Delta y^3 + \frac{N \cos^2 y}{24} (-2 - 3t^2 + 3t^2\eta^2 - 3t^2\eta^4 + 3t^2\eta^6) \Delta y \Delta x^2 +$

$$\frac{N}{5760} (-36\eta^2 + 207\eta^4 + 36t^2\eta^2 - 1062t^2\eta^4 + 135t^4\eta^4) \Delta y^5 + \frac{N \cos^2 y}{5760} (-16 - 60t^2 + 4\eta^2 - 4\eta^4 + 102t^2\eta^2 + 48t^2\eta^4 + 90t^4\eta^2 - 630t^4\eta^4) \Delta y^3 \Delta x^2 +$$

$$\frac{N \cos^4 y}{5760} (-8 - 20t^2 + 15t^4 - 8\eta^2 + 96t^2\eta^2 - 15t^4\eta^2 + 15t^4\eta^4) \Delta y \Delta x^4 + \frac{N \cos^2 y}{1935360} (-192 - 2016t^2) \Delta y^5 \Delta x^2 + \frac{N \cos^4 y}{1935360} (256 + 784t^2 + 4200t^4) \Delta y^3 \Delta x^4 +$$

$$\frac{N \cos^6 y}{1935360} (-64 - 224t^2 + 1148t^4 - 42t^6) \Delta y \Delta x^6$$

SH(ヒュベニの公式)

ヒュベニの公式 計算式

$$d = \sqrt{(d_y M)^2 + (d_x N \cos \mu_y)^2}$$

地点1の緯度経度

$$x_1, y_1$$

地点2の緯度経度

$$x_2, y_2$$

緯度の差

$$d_y = y_1 - y_2$$

経度の差

$$d_x = x_1 - x_2$$

緯度の平均値

$$\mu_y = \frac{y_1 + y_2}{2}$$

子午線曲率半径

$$M = \frac{a(1-e^2)}{W^3}$$

卯酉線曲率半径

$$N = \frac{a}{W}$$

$$W = \sqrt{1 - e^2 \sin^2 \mu_y}$$

第一離心率

$$e = \sqrt{\frac{a^2 - b^2}{a^2}}$$

長半径(赤道半径)

$$a$$

短半径(曲半径)

$$b$$

$$1. \quad r_0 = \begin{pmatrix} \cos \varphi_0 \cos \theta_0 \\ \cos \varphi_0 \sin \theta_0 \\ \sin \varphi_0 \end{pmatrix}, r_f = \begin{pmatrix} \cos \varphi_f \cos \theta_f \\ \cos \varphi_f \sin \theta_f \\ \sin \varphi_f \end{pmatrix}$$

$$2. \quad \lambda = \cos^{-1}(r_0^T r_f)$$

$$3. \quad x = R\lambda$$

- $$x = \sqrt{\{R(\varphi_1 - \varphi_2)\}^2 + \{R(\theta_1 - \theta_2)\}^2}$$

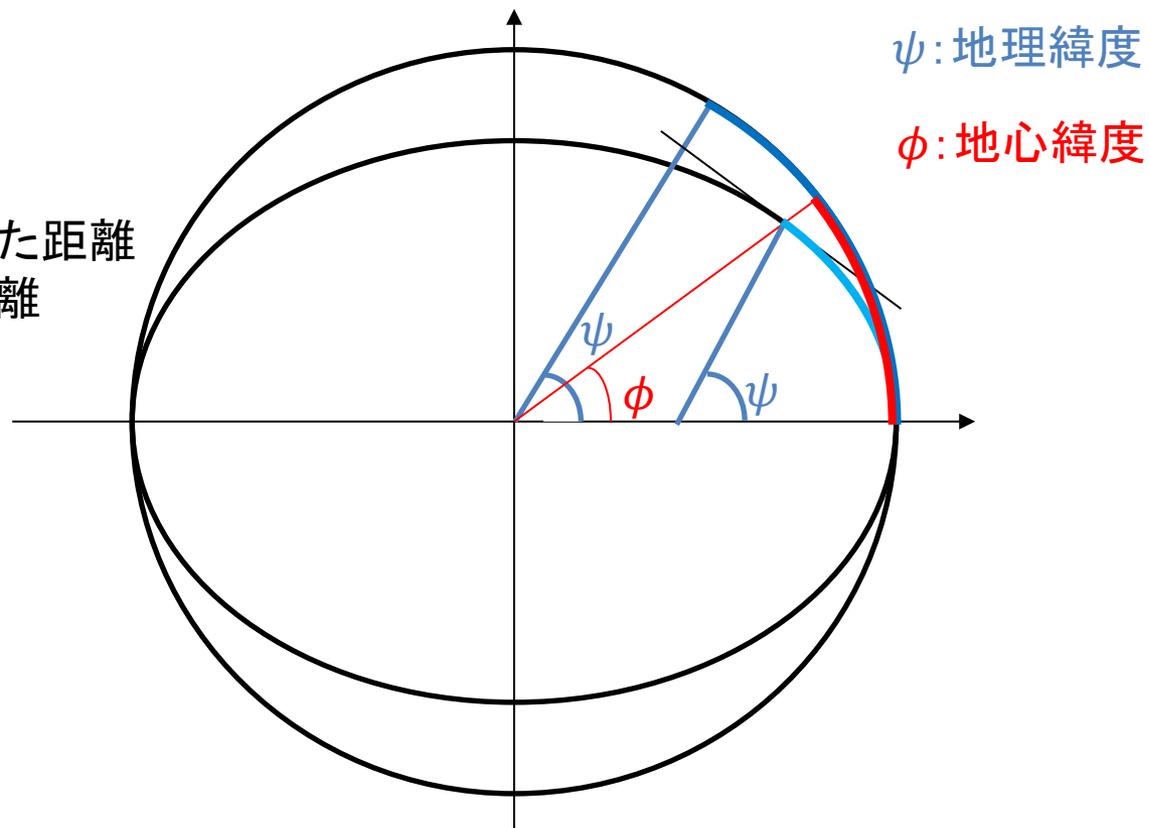
地理緯度と地心緯度

水色→楕円上での距離

完全球体としたときに

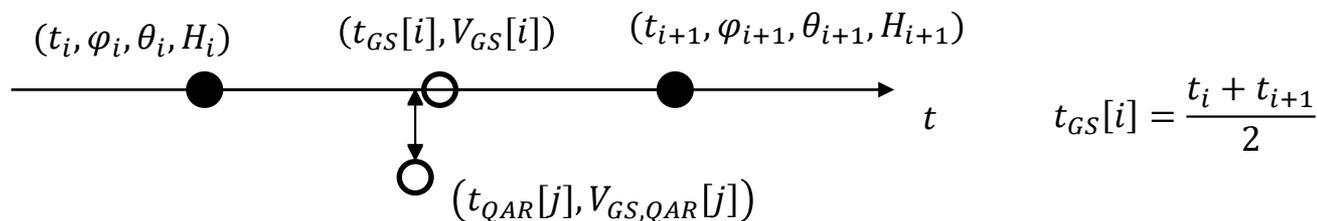
濃い青色→地理緯度で求めた距離

赤色→地心緯度で求めた距離



① 対地速度の精度評価

比較方法 2点間の中心の時間での対地速度として比較。



$t_{GS}[i]$ に最も近い時間にあるQARデータの $V_{GS,QAR}$ と V_{GS} を比較する。

①対地速度の精度評価

1. 比較方法2の解析結果:地球を完全に球体として算出した方法(P)が最もQARに近いと考えられる。

最小総数:各便で比較したときに他の方法と比べてその方法のAVE(もしくはRMSE)が最小になった便の総数

単位:最小総数[便]
それ以外[kt]

平滑化前

AVE	最小総数	平均	標準偏差	中央値
H	5	1.4077	0.9448	1.1782
P	497	1.2638	0.9785	1.0042
HS	15	1.4077	0.9448	1.1782
S	0	79.8899	4.9017	80.1779
GSI	0	1.4077	0.9448	1.1782

RMSE	最小総数	平均	標準偏差	中央値
H	4	30.6148	4.8649	30.4310
P	358	30.6087	4.8619	30.4239
HS	155	30.6148	4.8649	30.4310
S	0	96.6774	5.9490	96.9219
GSI	0	30.6148	4.8649	30.4310

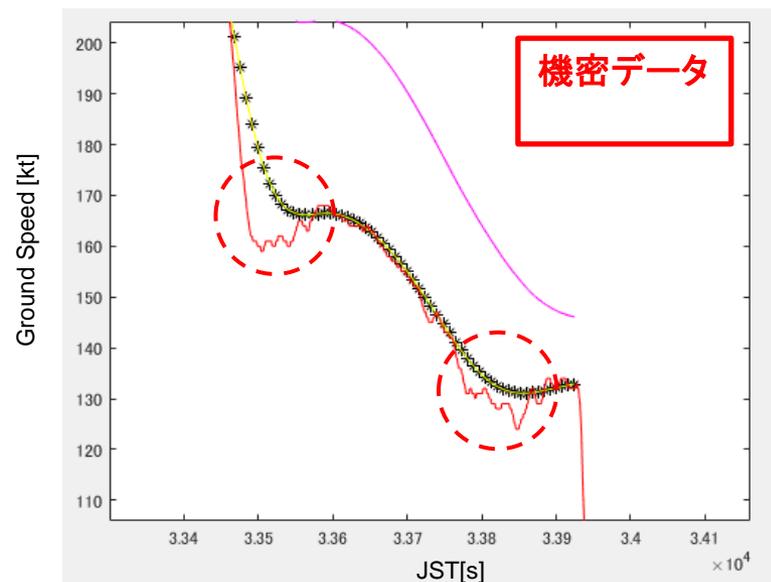
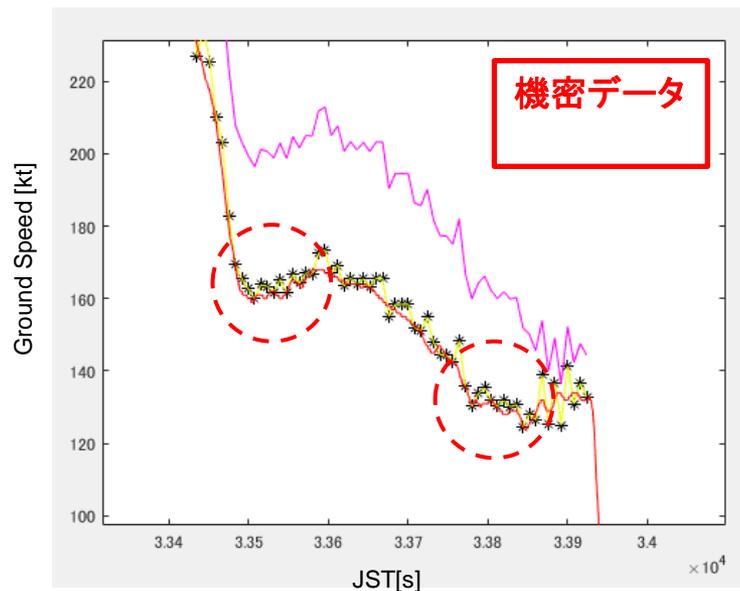
平滑化後

AVE	最小総数	平均	標準偏差	中央値
H	4	1.6099	0.9836	1.3765
P	501	1.4659	1.0143	1.2261
HS	12	1.6099	0.9836	1.3765
S	0	80.1298	4.9183	80.436
GSI	0	1.6099	0.9836	1.3765

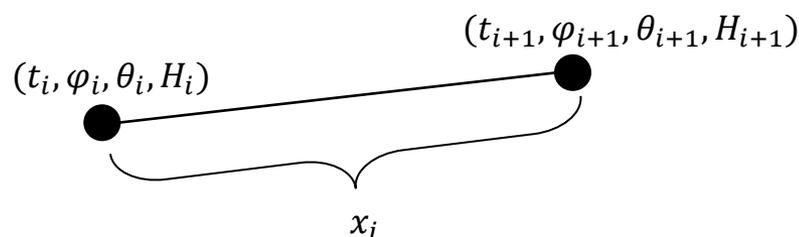
RMSE	最小総数	平均	標準偏差	中央値
H	399	7.5547	1.1465	7.4402
P	30	7.6212	1.1645	7.4921
HS	88	7.5547	1.1465	7.4402
S	0	89.521	6.0076	90.0849
GSI	0	7.5547	1.1465	7.4402

フィルターの選定

1. ガウス加重移動平均フィルタでは、精度が悪くなる箇所もみられる
2. 別のフィルターを用いて平滑化を行うことで各方法での精度がどう変化するかを調べる。
3. フィルターについて学び、適切なフィルターを選定する必要がある。



① 対地速度の精度評価



t :時刻
 φ :緯度
 θ :経度
 H :高度
 x_i :距離

1. 以下の5つの方法を用いて距離を算出。

I. 国土地理院が用いている測地線長の計算式(**GSI**)

II. Hubenyの厳密解(**SH**)

III. Hubenyの簡略式(**EH**)

IV. 地球を完全な球体としてモデル化し距離を算出する方法(**SP**)

V. 緯度経度の差に地球半径をかけて、三平方の定理から求める方法(**PT**)

- I ~ IIIは地球を回転楕円体と仮定
- IV, Vは地球を完全な球体と仮定(緯度は地心緯度に変換)

誤差の評価指標

1. 誤差の評価指標にはMEとRMSEを用いた。

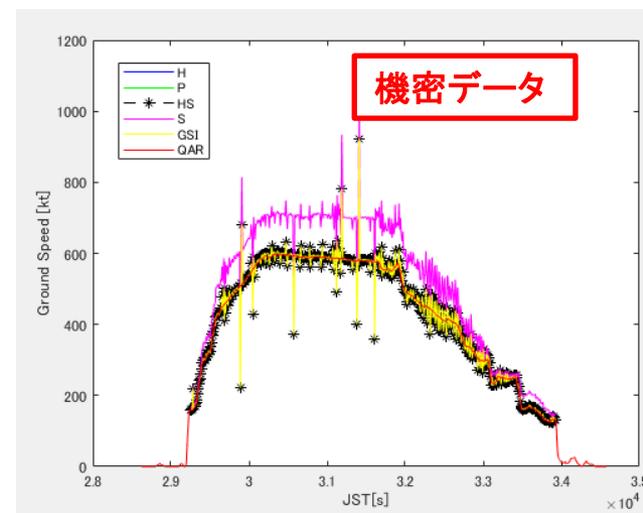
$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (V_{CARATS}[i] - V_{QAR}[i])$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (V_{CARATS}[i] - V_{QAR}[i])^2}$$

ここで、

$V_{CARATS}[i]$ はCARATSから推定したデータの値

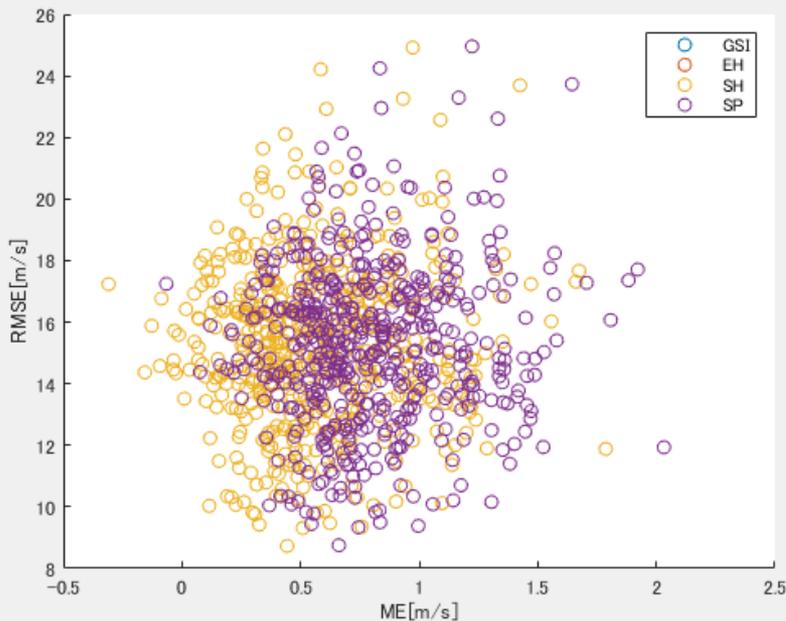
$V_{QAR}[i]$ は、 $V_{CARATS}[i]$ の時刻に最も近いQARデータの値である。



対地速度の精度評価

1. 解析結果: 回転楕円体を仮定したGSI, EH, SHが精度が高く, どれも同程度の精度である。
2. よって, これ以降は計算が煩雑でないSHを用いる。

最小総数: 各便で比較したときに他の方法と比べてその方法のME(もしくはRMSE)が最小になった便の総数



517便のME, RMSE (SPを除く)

評価指標

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (V_{CARATS}[i] - V_{QAR}[i])$$

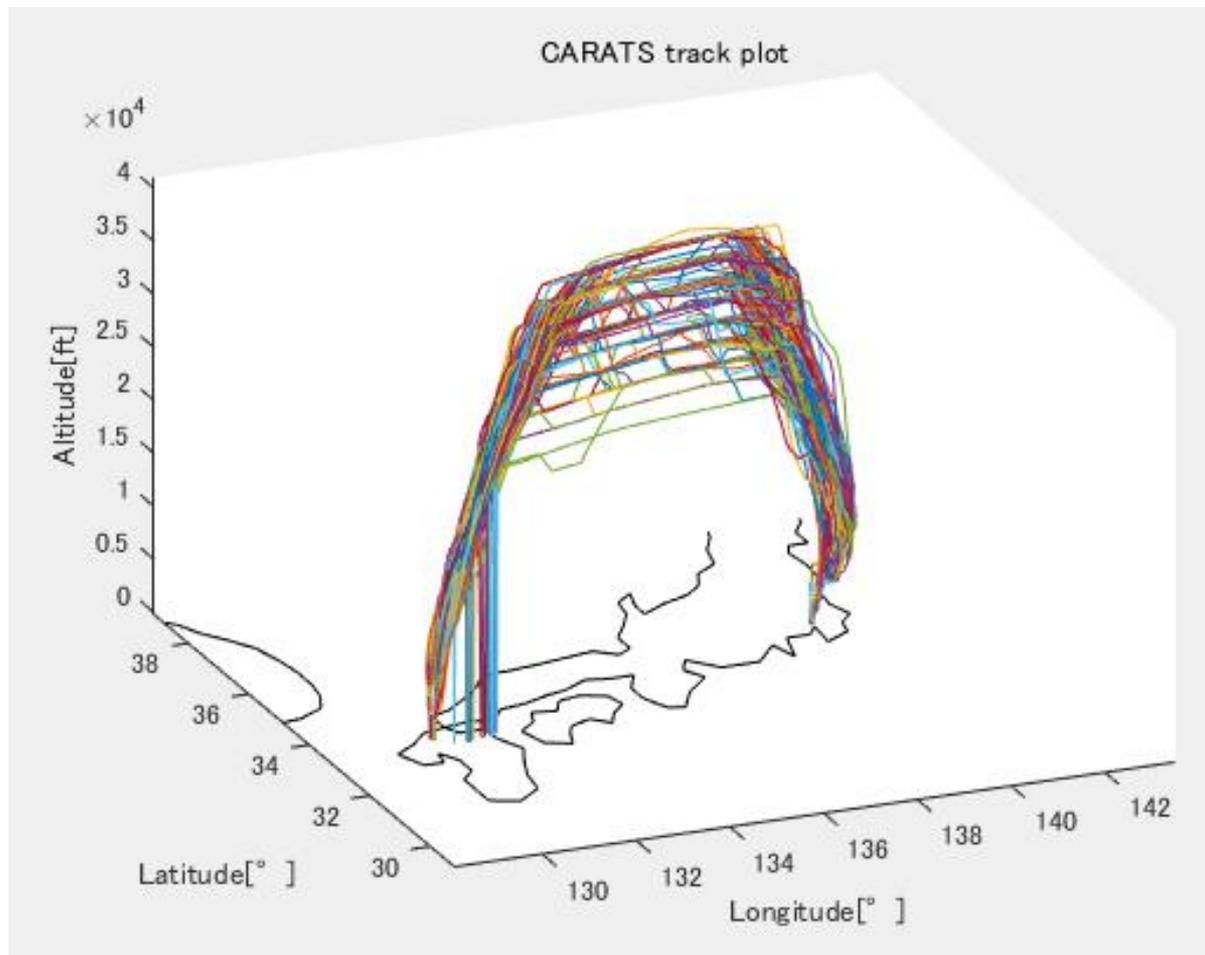
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (V_{CARATS}[i] - V_{QAR}[i])^2}$$

$V_{CARATS}[i]$: CARATSから推定したデータの値

$V_{QAR}[i]$: $V_{CARATS}[i]$ の時刻に最も近いQARデータの値

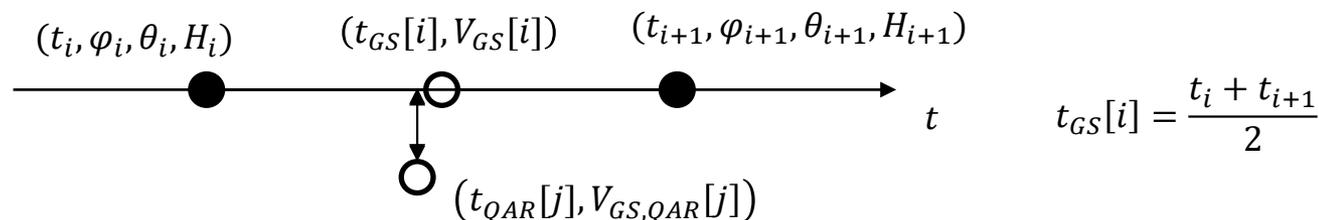
ME	最小総数	平均[k/m]	標準偏差[m/s]	中央値[m/s]
GSI	0	0.5664	0.3228	0.5175
EH	506	0.5664	0.3228	0.5175
SH	8	0.5664	0.3228	0.5175
SP	3	0.8024	0.3212	0.7541
PT	0	39.1810	2.3468	39.2851

RMSE	最小総数	平均[k/m]	標準偏差[m/s]	中央値[m/s]
GSI	0	15.2541	2.6368	15.2142
EH	514	15.2541	2.6368	15.2142
SH	3	15.2541	2.6368	15.2142
SP	0	15.2804	2.6380	15.2453
PT	0	48.2653	2.9562	48.4158



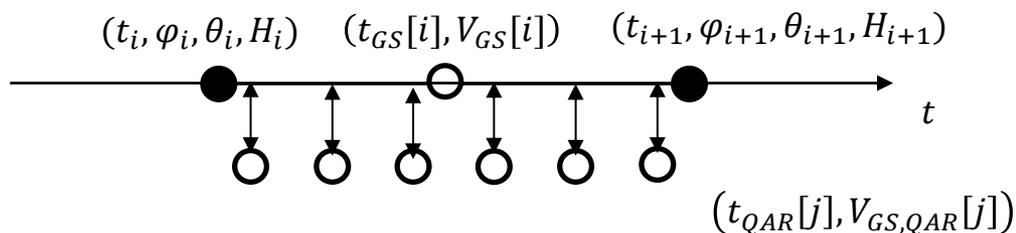
① 対地速度の精度評価

比較方法1 2点間の中心の時間での対地速度として比較。



$t_{GS}[i]$ に最も近い時間にあるQARデータの $V_{GS,QAR}$ と V_{GS} を比較する。

比較方法2 2点間の時間範囲にあるすべてのQARデータと比較。



$t_i \sim t_{i+1}$ の間にあるすべての $V_{GS,QAR}$ と V_{GS} を比較する。