

冬季の南関東で発生する晴天乱気流の 高解像シミュレーションおよび飛行中の旅客機への影響解析

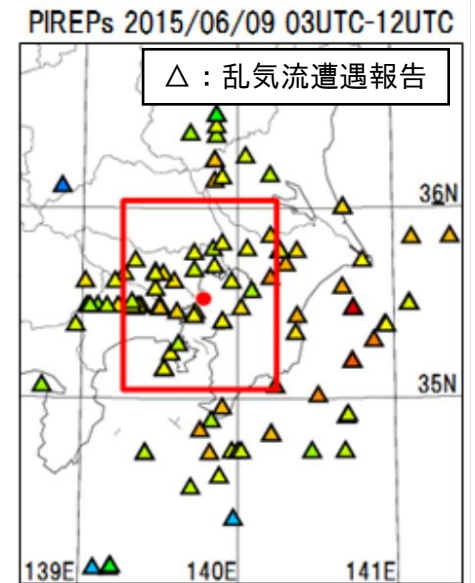
「富岳」成果創出加速プログラム 2021年度成果発表会

2022年3月11日 13:25~13:45

吉村 僚一^{1,2}, 伊藤 純至³, 鈴木 健斗⁴, Patrick Antonio Schittenhelm⁵,
焼野 藍子¹, 大林 茂¹

1. 東北大学 流体科学研究所
2. 東北大学大学院 工学研究科 航空宇宙工学専攻
3. 東北大学大学院 理学研究科
4. 気象庁 情報基盤部
5. Aerospace Engineering, University of Stuttgart

- 関東域は航空交通量が特に多い
 - 羽田・成田着陸回数は日本の空港全体の27% [1]
- 乱気流の影響を小さくする飛行方法の検討
 - 「予見制御」による揺れの低減(JAXA) (濱田 2015, Hamada 2020)
- 冬季の南関東中下層で発生する晴天乱気流に着目
 - 2020/12/30に晴天乱気流が多発した事例
 - 乱気流を数値的に再現→揺れ低減に資する飛行方法を考察



羽田空港Weather Topics 62号 第5図



乱気流による揺れの低減に重要な知見の取得

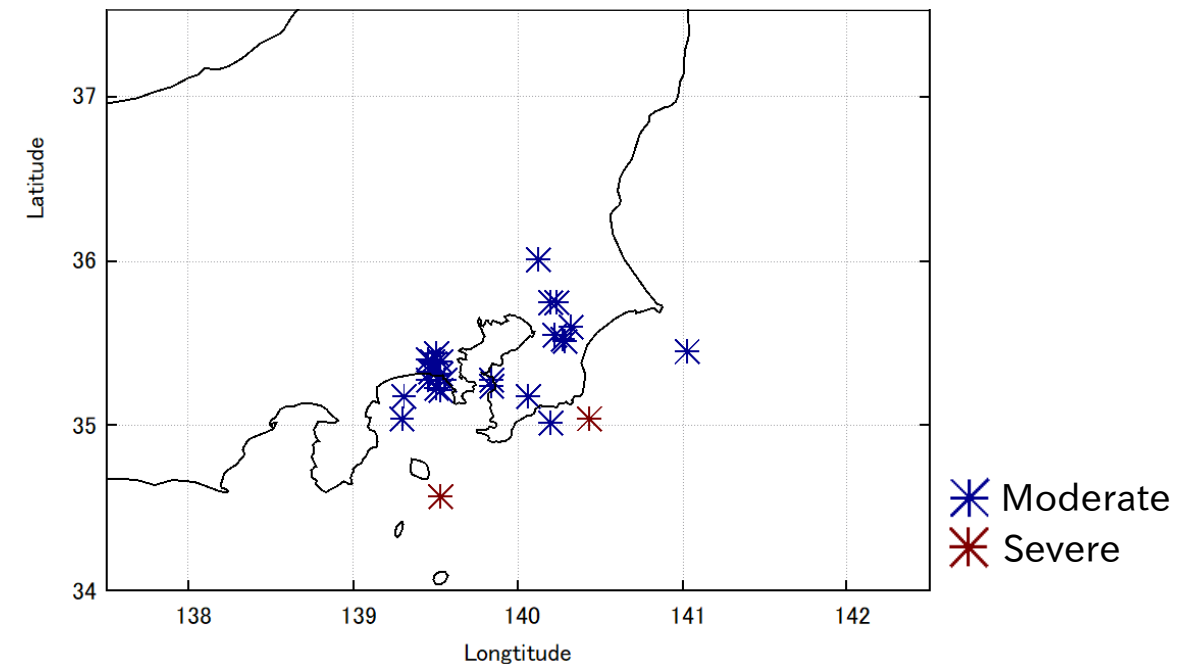
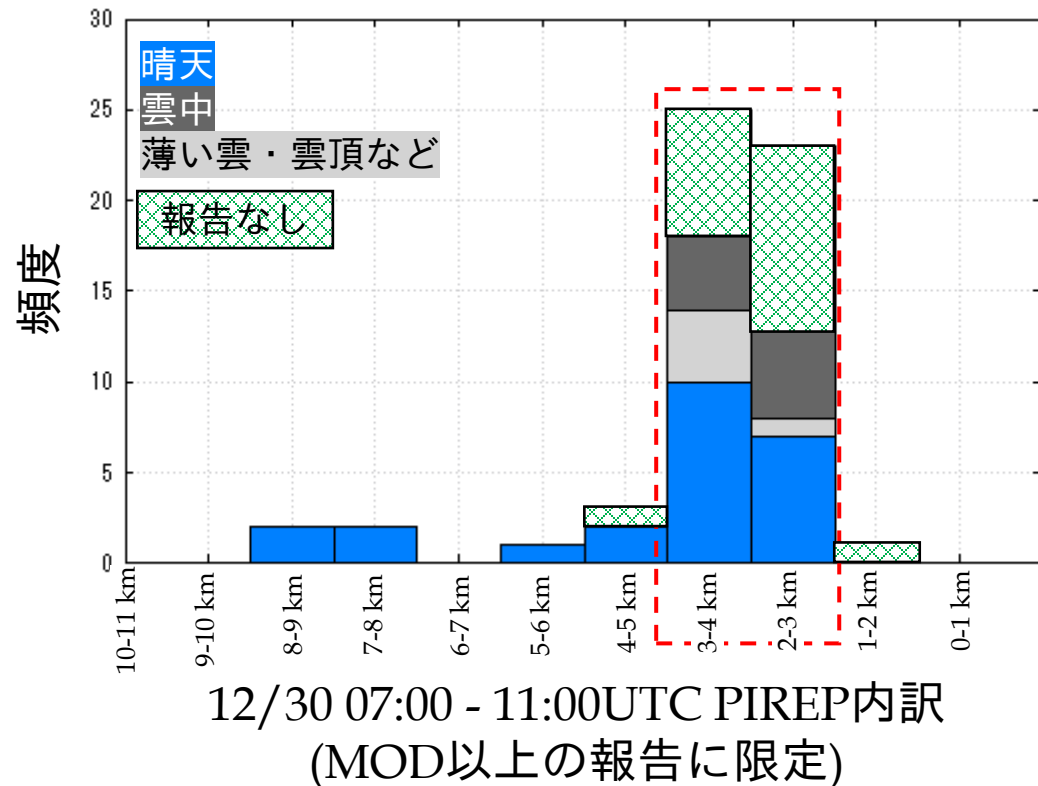
- 富岳を用いた高解像シミュレーションによる南関東の乱気流の再現
- 乱気流発生原因の考察
- フライトシミュレーションによる飛行機の応答解析
- 当日のフライトデータを用いた乱気流の再現性検証
- マクロな視点での乱気流回避方法の提案

本研究の波及効果

- 高解像計算による乱気流の再現
 - 揺動を低減する飛行方法の提案, より詳細な乱気流予測
- 自由大気中の乱流の数値計算および観測データによる検証
 - 高解像度シミュレーションによる上空乱流の解像&観測による検証は世界初の取り組み
- フライトシミュレーションによる揺動評価, 実データとの比較
 - 気象学と航空工学の学際的研究

事例紹介

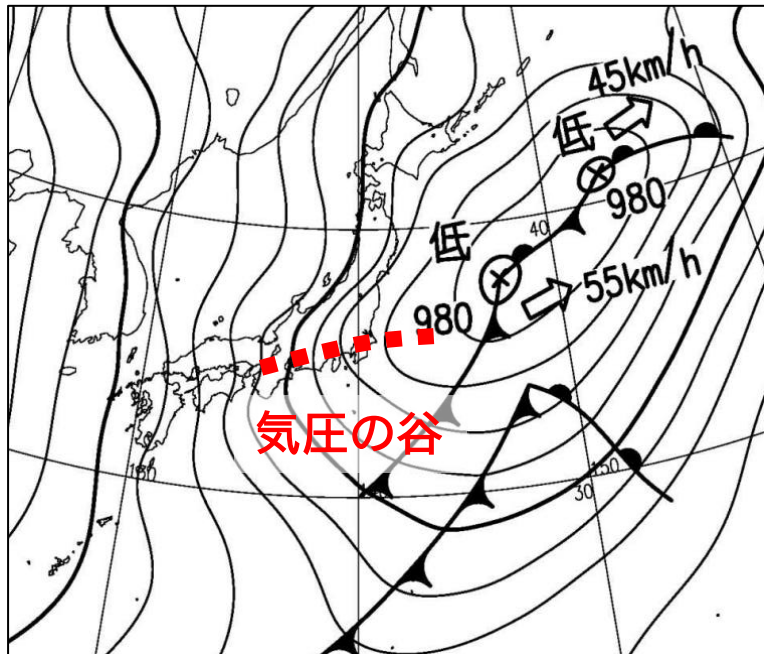
- 2020年12月30日の乱気流多発事例
 - 旅客機からの乱気流遭遇報告 (JAL PIREP)
 - 07:00~11:00UTCでModerate(中)以上計57件, うちSevere(大) 2件
 - 9-10時UTCが最多報告数(18件), 東京湾周辺, 高度2-4 kmに集中



PIREP 2020/12/30 07:00 - 11:00UTC
積算プロット

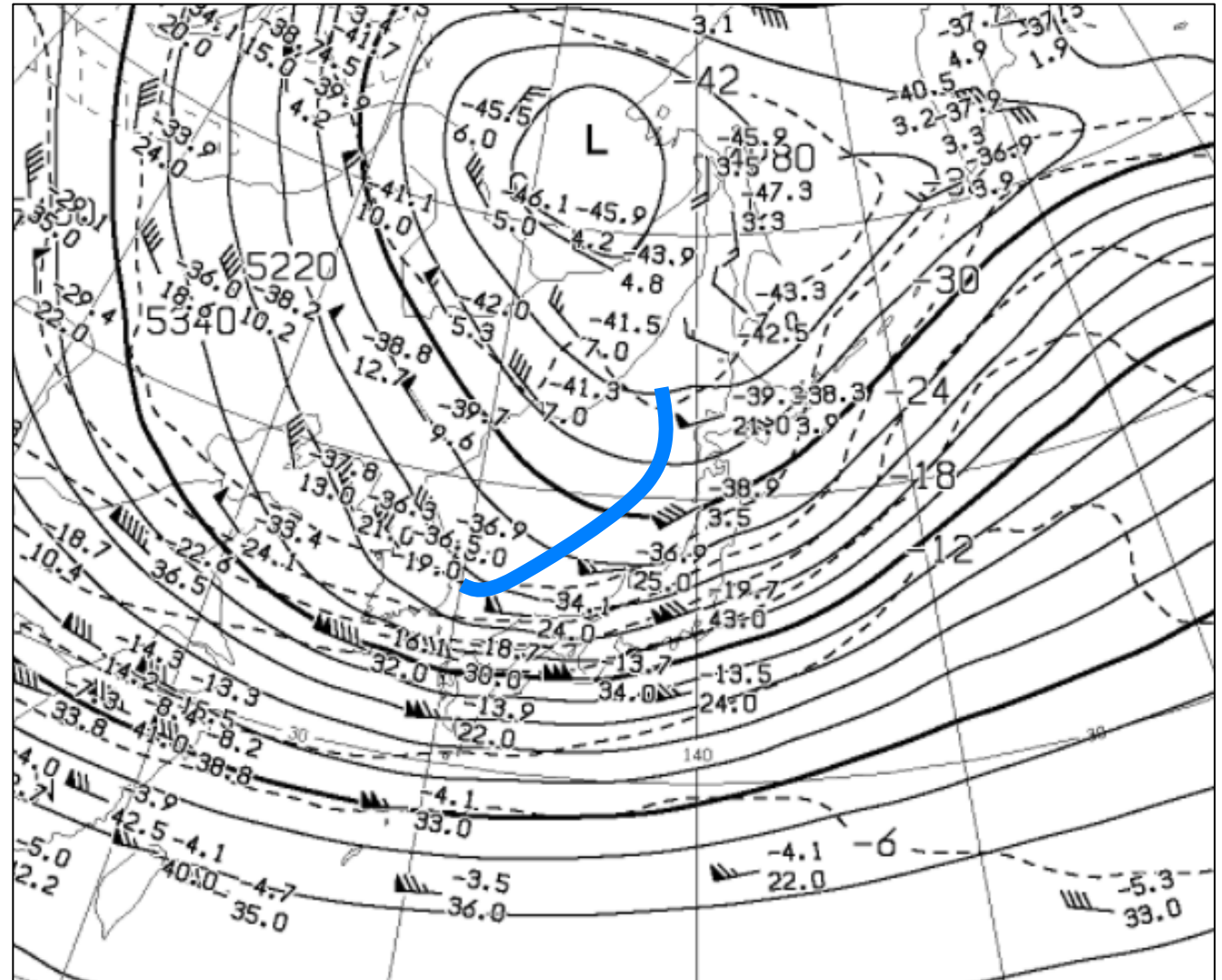
環境場①

12月30日09UTC 地上天気図



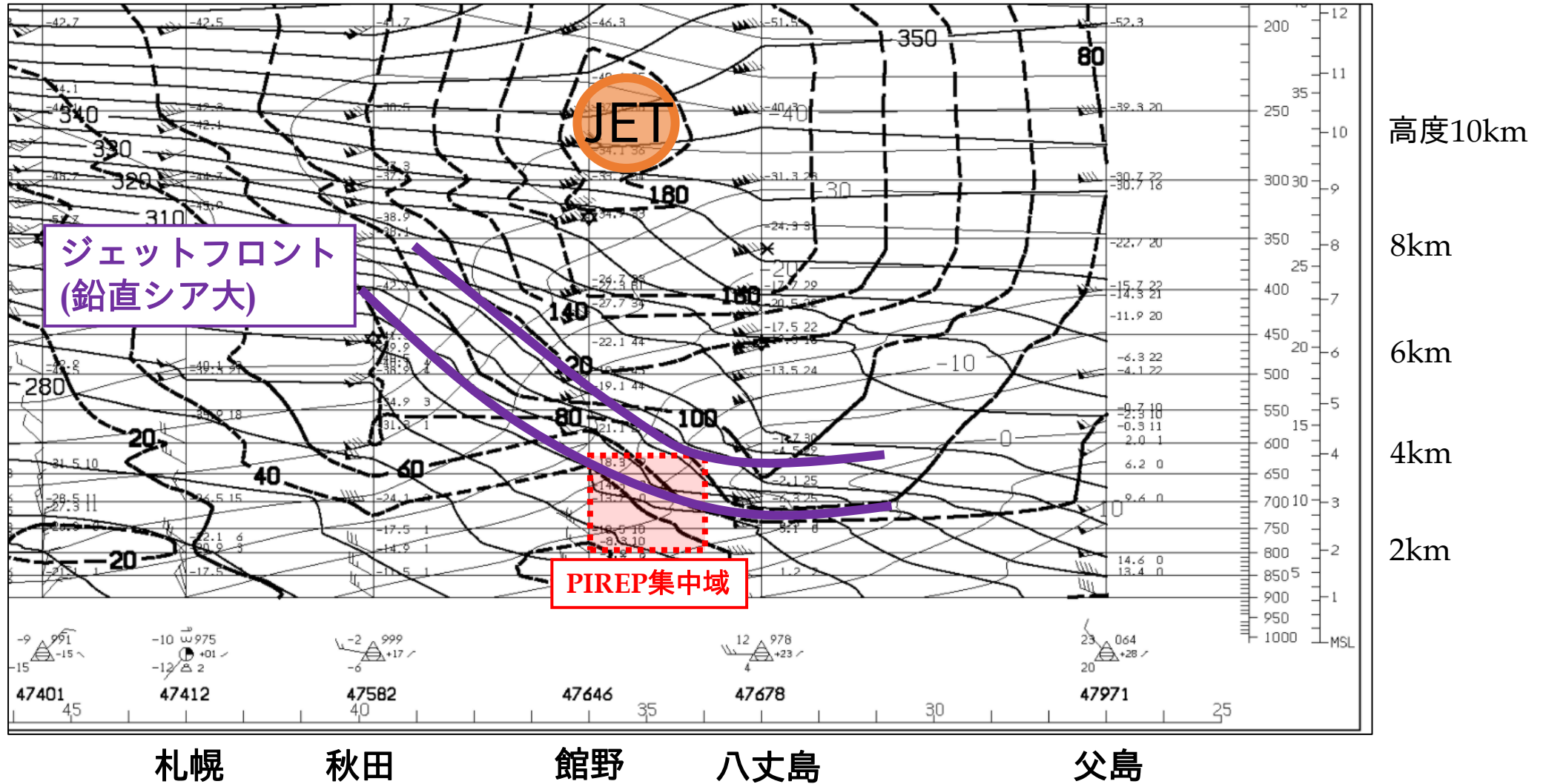
- ・強い冬型の気圧配置に移行
- ・東日本を気圧の谷(赤点線)が南下

12月30日12UTC 500hPa(~高度5km)天気図



日本海にトラフ(青線)、関東はその前面に位置し南西流場

12月30日12UTC 東経140度断面図



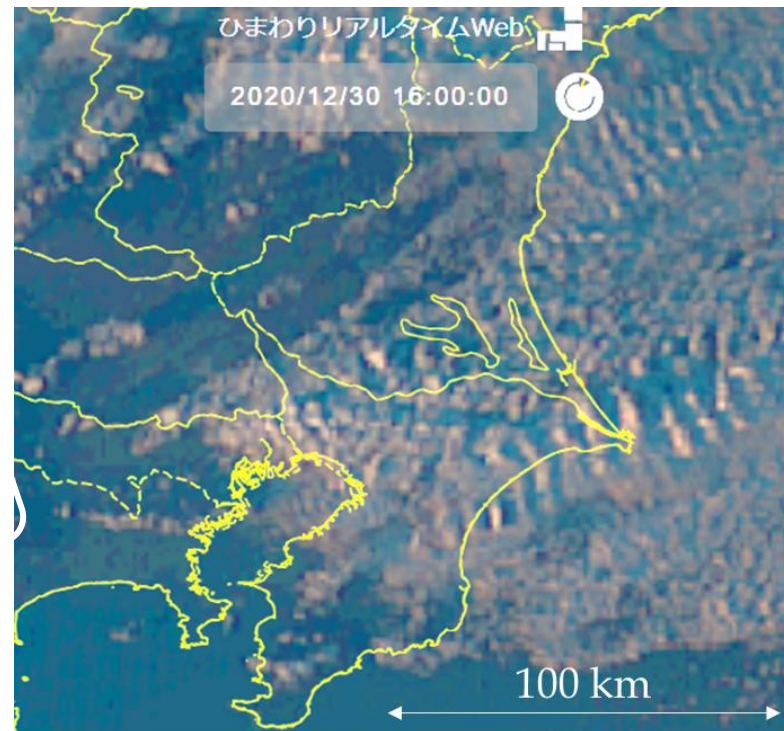
関東上空にジェット気流があり、PIREP集中域はジェットフロント近傍に存在

関東南部下層に発生したシアライン

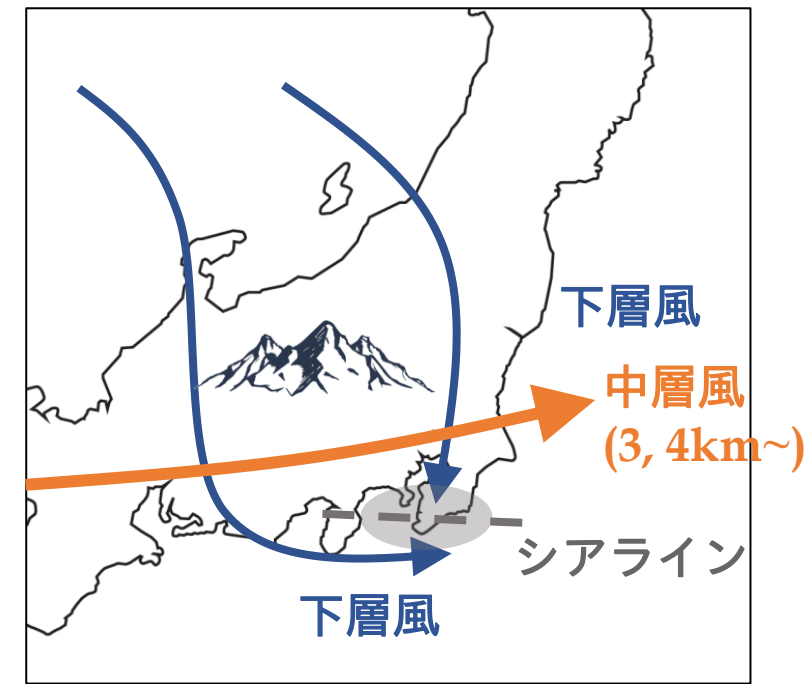
- 中部山岳を迂回する北西風と南西風が関東南部で収束 (→シアライン形成)
- シアライン上で対流雲が発生
- 衛星画像では波状雲(KH不安定波?)を確認. 東北東方向へ移流



地上アメダス 19時
(日本気象協会HP)

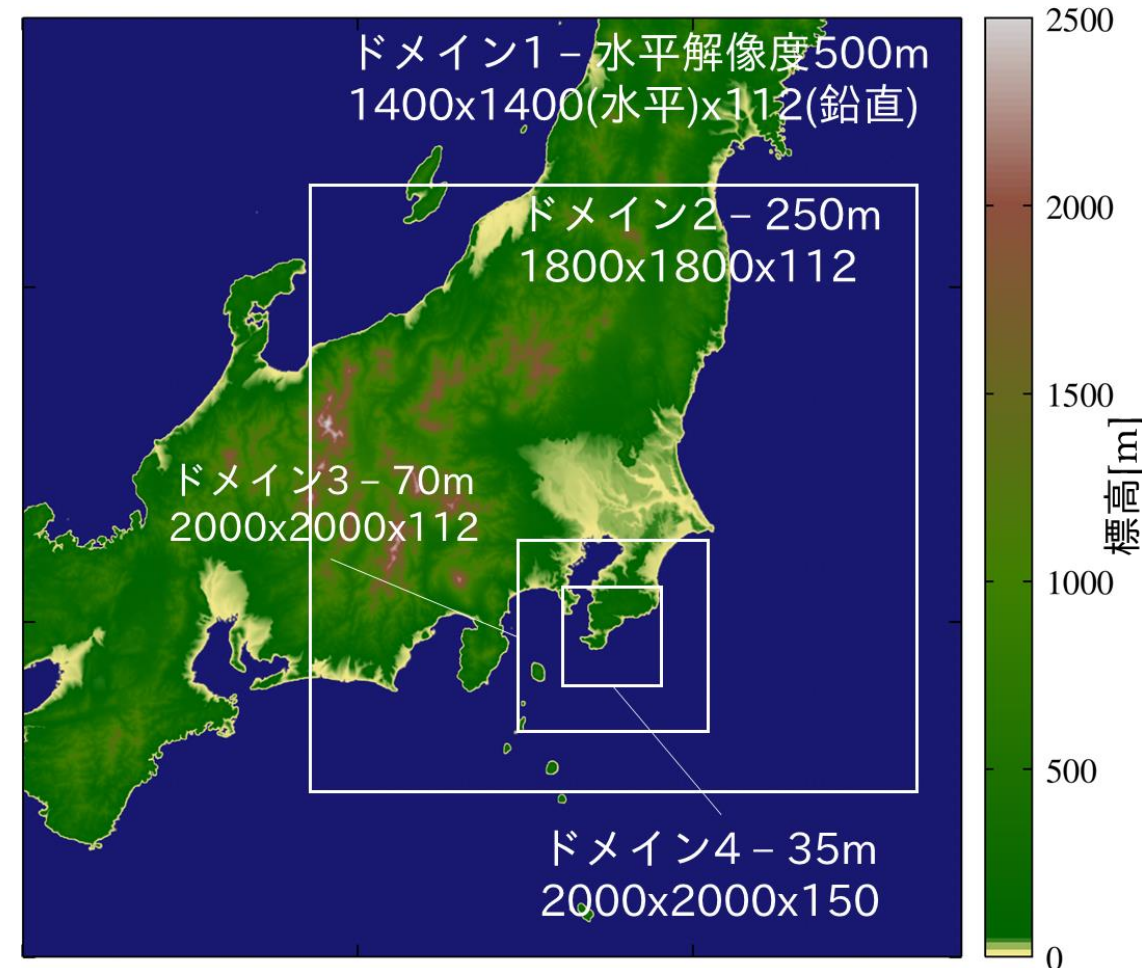


可視衛星画像 16時
(ひまわりリアルタイムWeb)



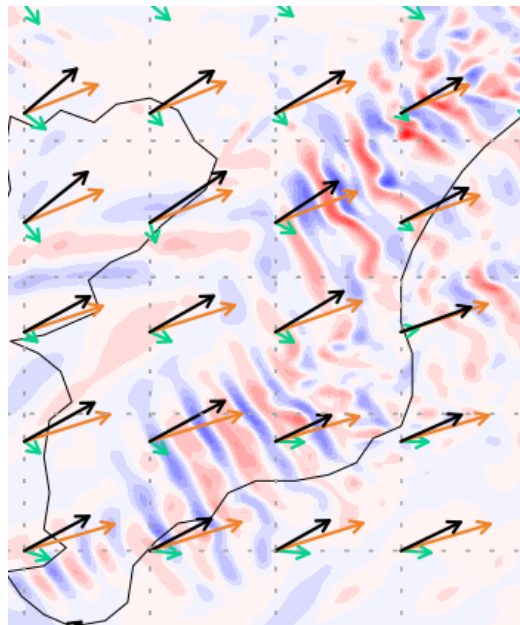
数値計算設定

- 使用モデル 気象庁非静力学モデルasuca
- 初期境界データ 気象庁MSM解析 (モデル面)
- 計算期間・解像度
 - 日時 : D01 : 12/30 03 - 12 UTC · dx=500m, dz~100m
 D02 : 12/30 04 - 12 UTC · dx=250m, dz~100m
 D03 : 12/30 05 - 12 UTC · dx=70m, dz~100m
 D04 : 12/30 06 - 12 UTC · dx=35m, dz~35m
 - ターゲット時刻 10 UTC
- 物理スキーム等
 - 大気境界層スキーム : Deardorff (LES)
 - 鉛直風速ダンピング : なし
- 計算時間、資源
 - 富岳 382ノード
 - 4ドメインで計4週間程度



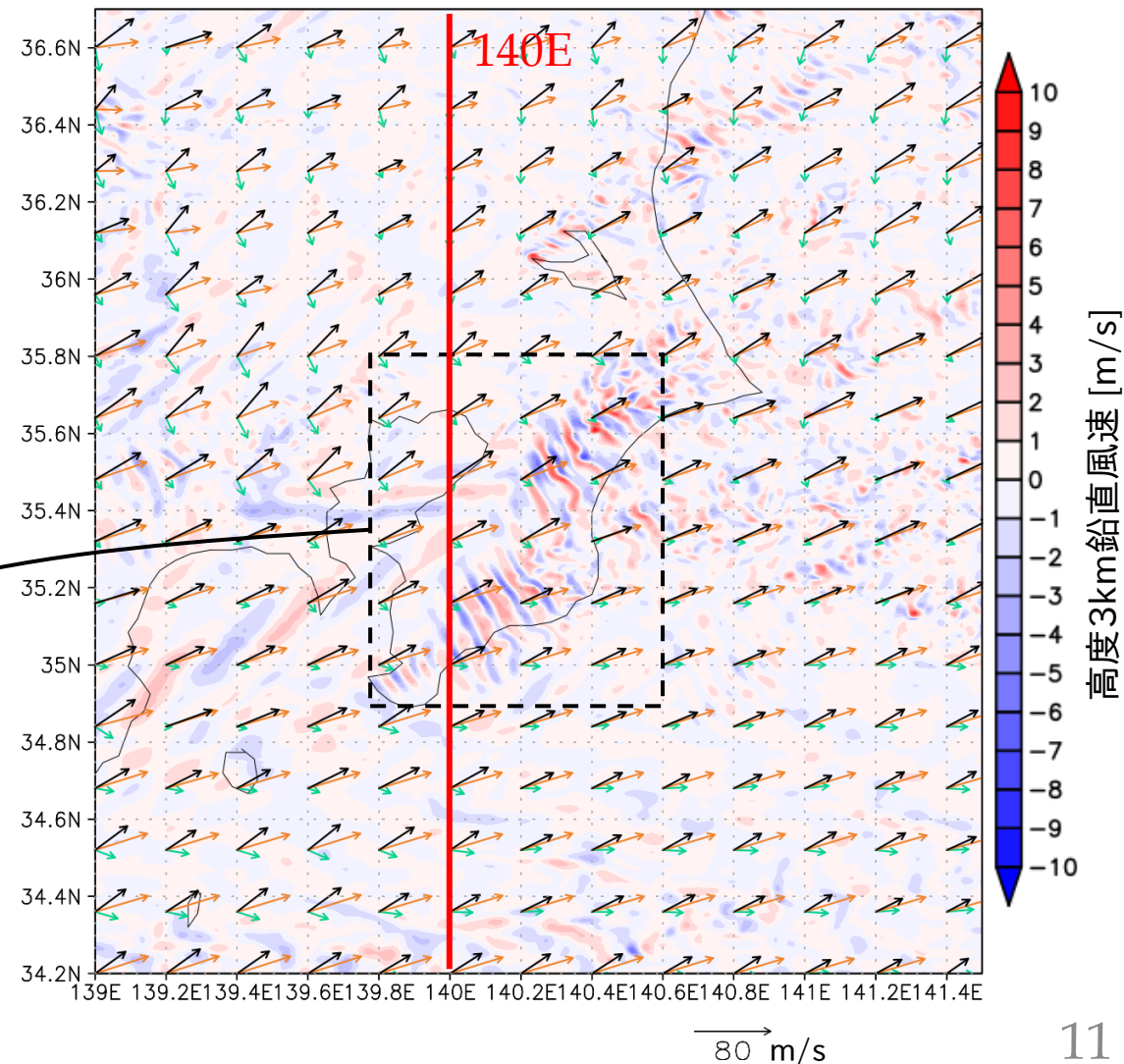
乱気流の再現状況 (ドメイン1, $dx=500$ m)

- 衛星画像と同様の波状分布
 - 2020/12/30 10:00UTC
 - 規則的な鉛直風速の波列
 - シアベクトル(高度4km-1km 風速ベクトル差分)が波とほぼ垂直
→KH不安定性の波



風速(3992m)
風速(1017m)
差分ベクトル
(シアベクトル)

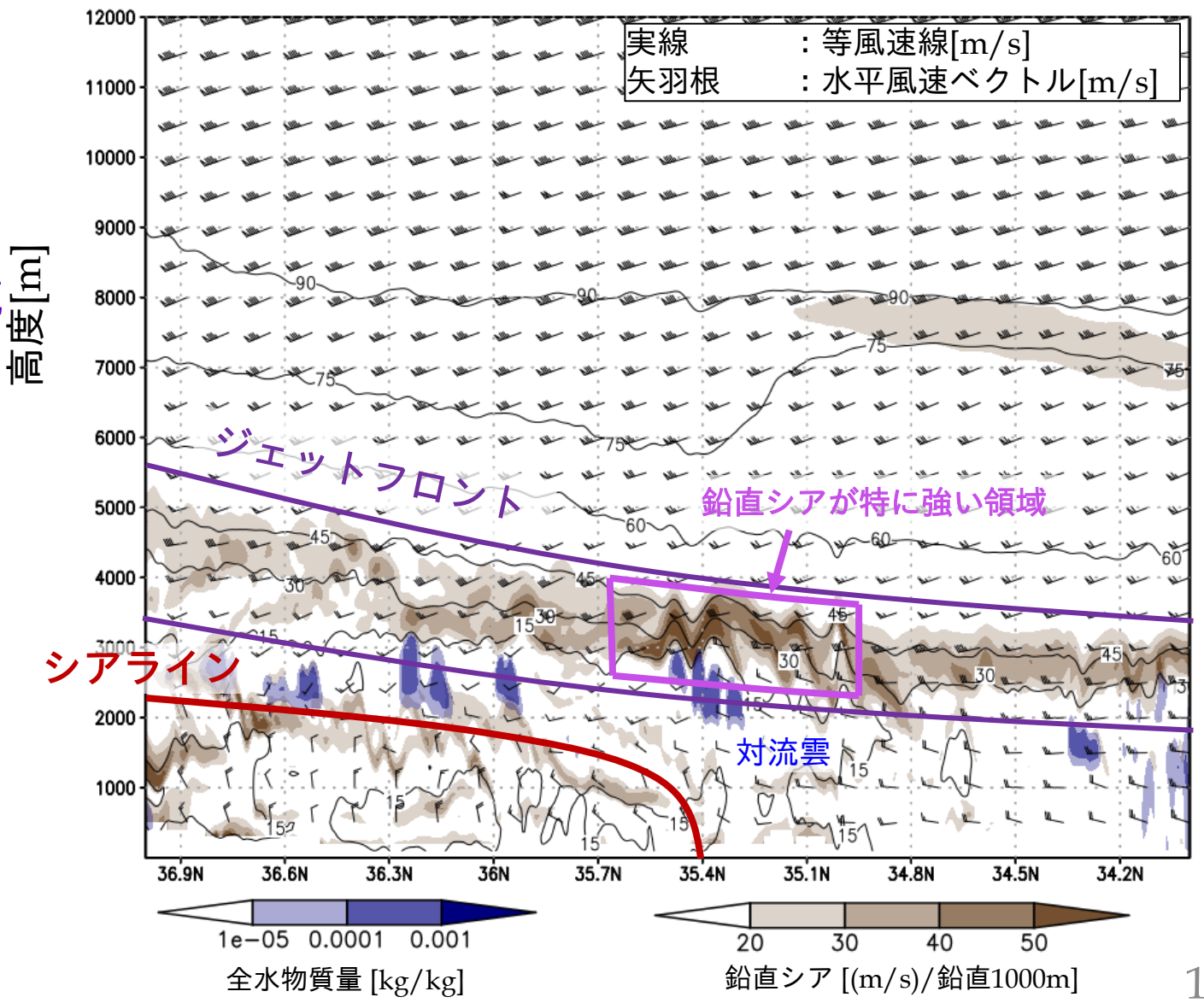
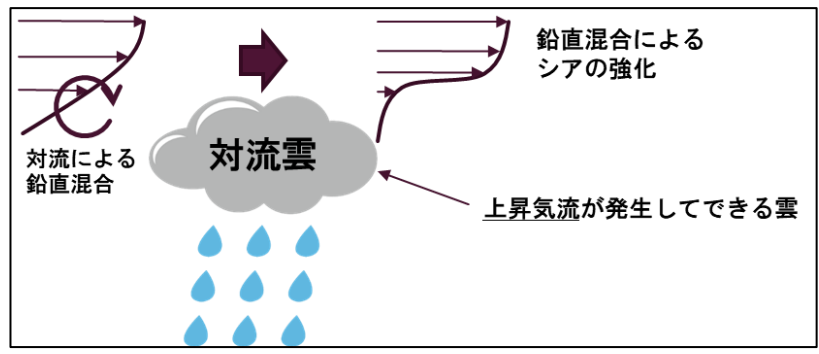
高度3km面 鉛直風速・シアベクトル



鉛直シア分布 (ドメイン1 dx=500m, dz~100m)

東経140度南北鉛直断面図

- ジェットフロント上で鉛直シアが大きい(>20 (m/s)/鉛直1000m)
- 地上のシアライン付近で発生する対流雲雲頂付近でシアが特に大きい
→対流雲によるシア強化
- シアライン上も北風と南西風のシアにより、VWSが局所的に大きい(>50 (m/s)/鉛直1000m)



リチャードソン数分布

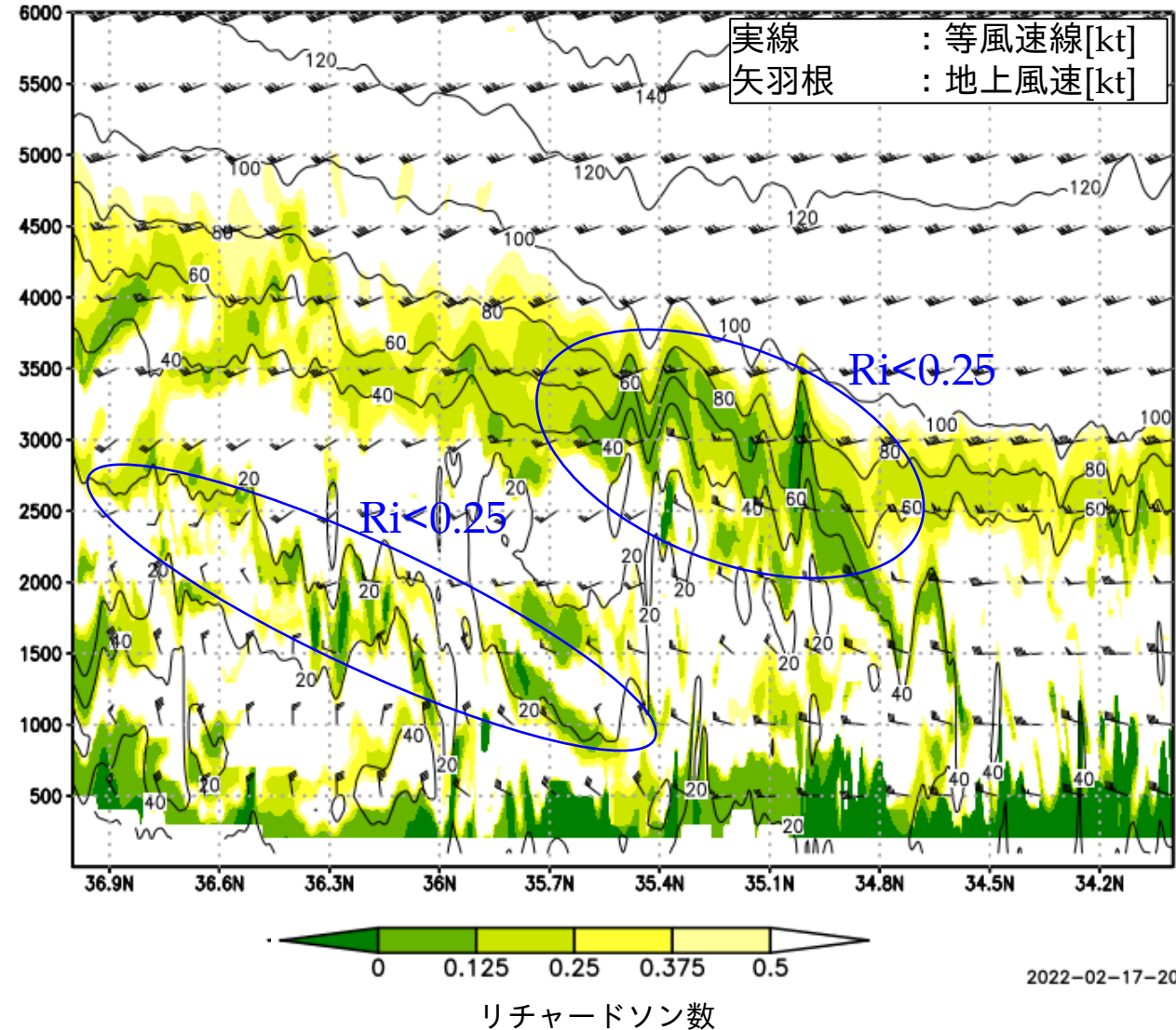
- 浮力と強制対流の効果の比
 - 0.25下回るシアでKH不安定誘起

$$Ri = \frac{\text{浮力}}{\text{強制対流}} = \frac{gd\theta}{\theta dz} \frac{1}{\left(\frac{du}{dz}\right)^2 + \left(\frac{dv}{dz}\right)^2} < 0.25 \text{ (不安定条件)}$$

- ジェットフロント上で $Ri < 0.25$
 - 対流雲上で顕著
- シアーライン上でも局所的に $Ri < 0.25$
 - 南西風と北風のシアによるもの

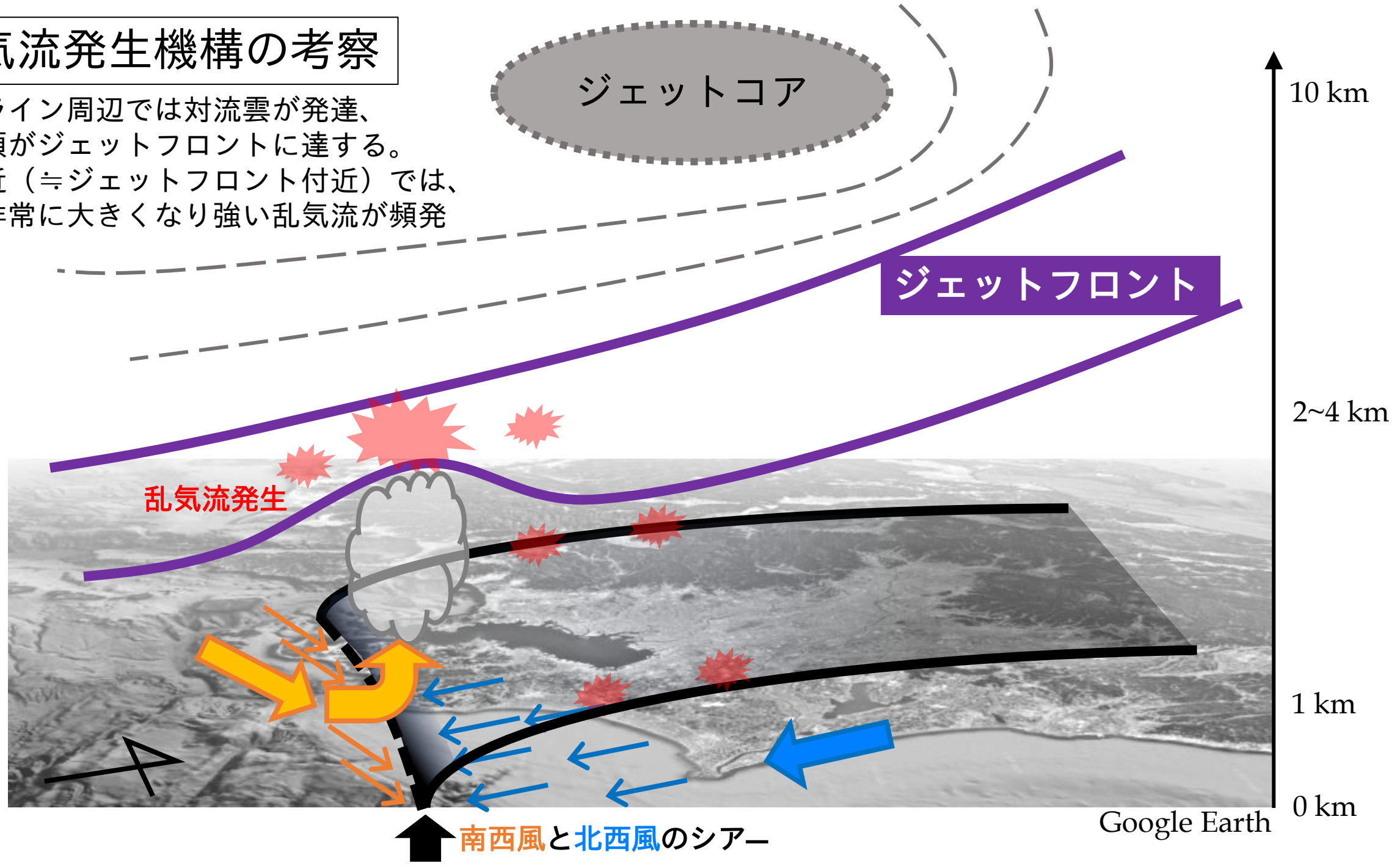
高度[m]

12/30 10:00UTC 東経140度鉛直断面



乱気流発生機構の考察

シアライン周辺では対流雲が発達、その雲頂がジェットフロントに達する。雲頂付近（≒ジェットフロント付近）では、シアが非常に大きくなり強い乱気流が頻発



乱気流発生

ジェットコア

ジェットフロント

南西風と北西風のシア

10 km

2~4 km

1 km

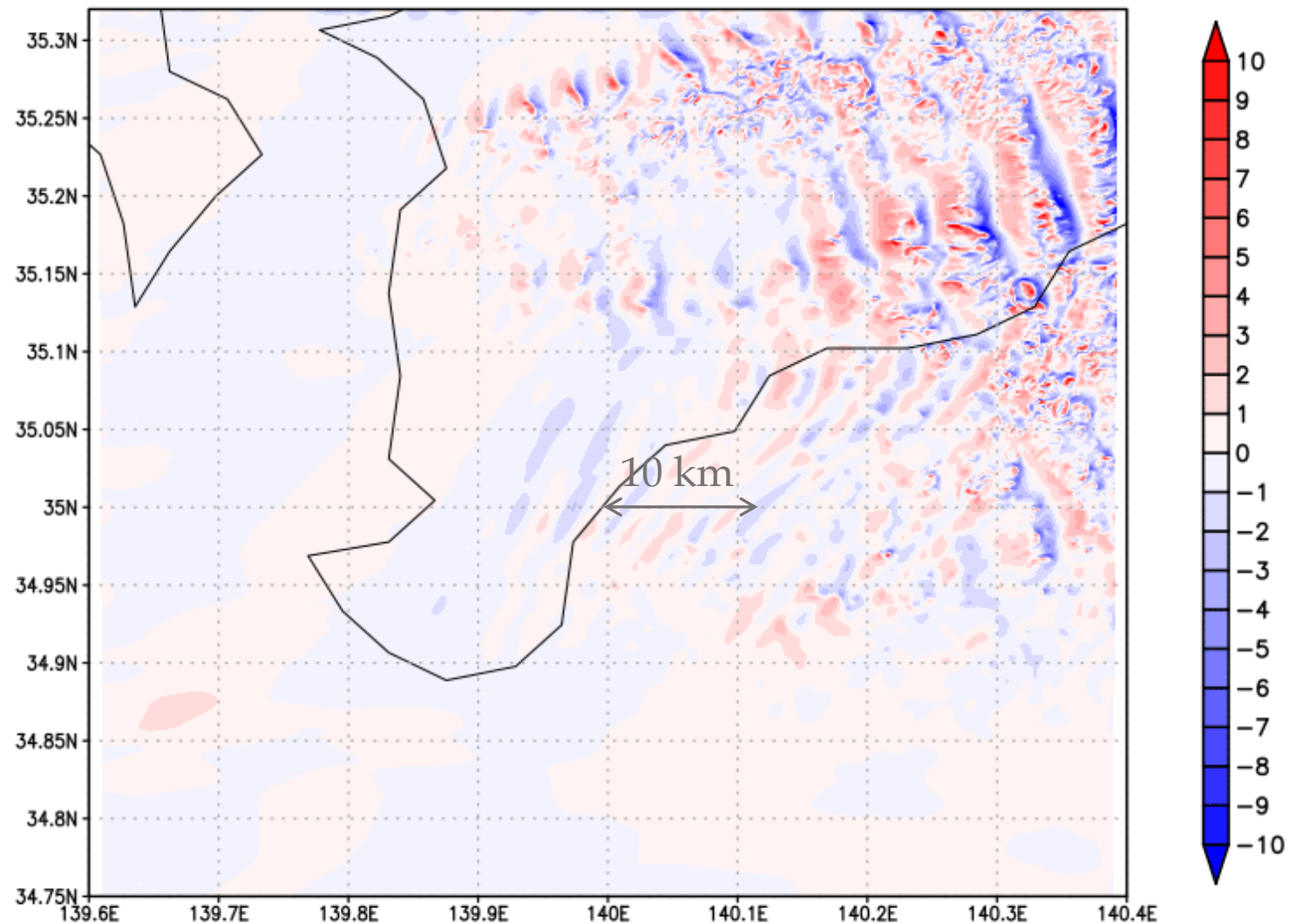
0 km

Google Earth

乱気流の再現状況 (ドメイン4, $dx=dz=35m$)

房総南部周辺 高度3257m水平断面図

Time = 09:30Z30DEC2020 Alt = 3257.5 [m]



KH波列の誘起
(波長約6km)



波列の成長



砕波

高度3270m 鉛直風速 [m/s]

砕波の様子

Time = 10Z30DEC2020 Alt = 3257.5 [m]

10:00 ~ 10:15UTC
高度3270m断面図

波列の誘起

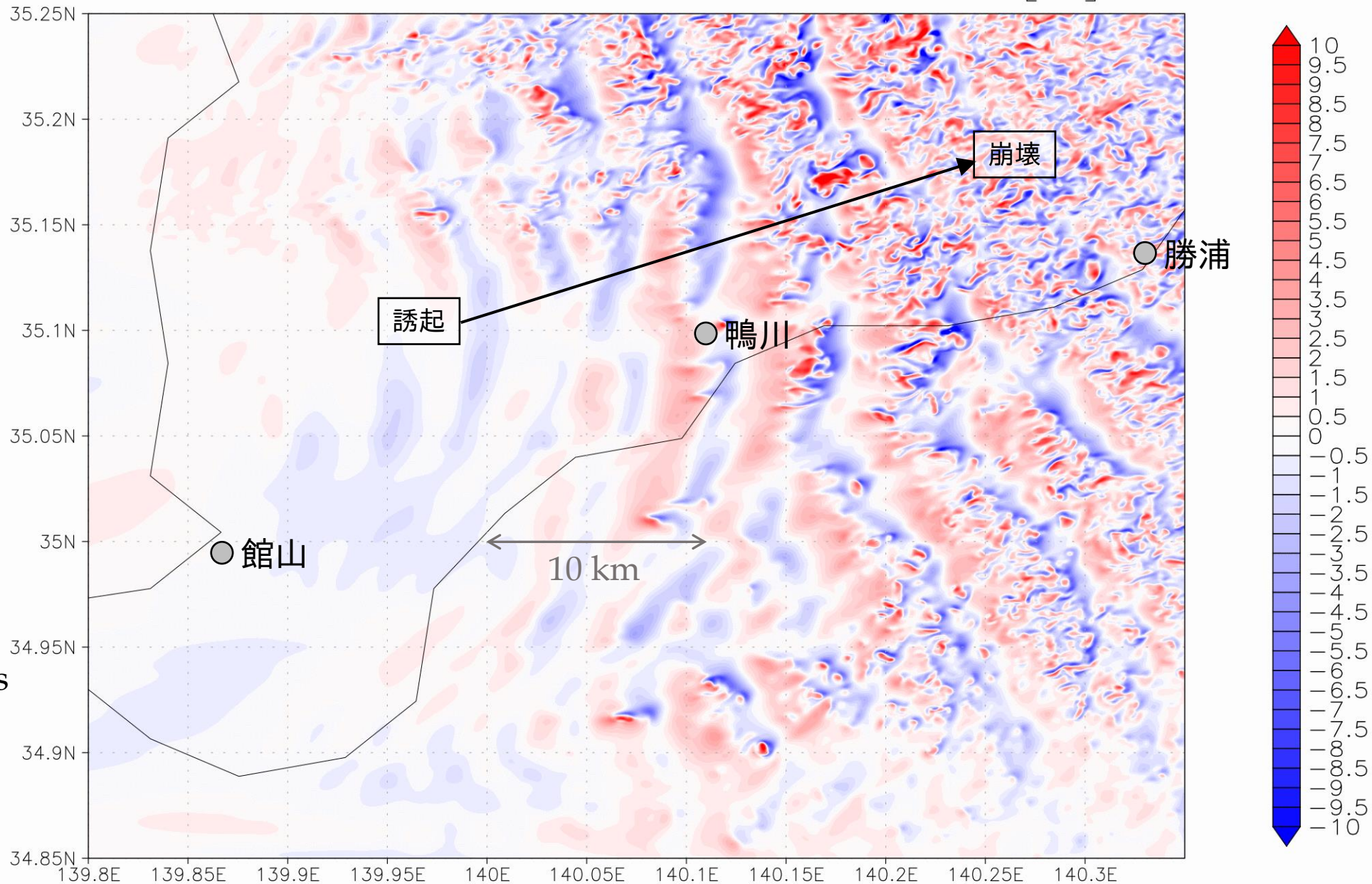


波列の成長



砕波

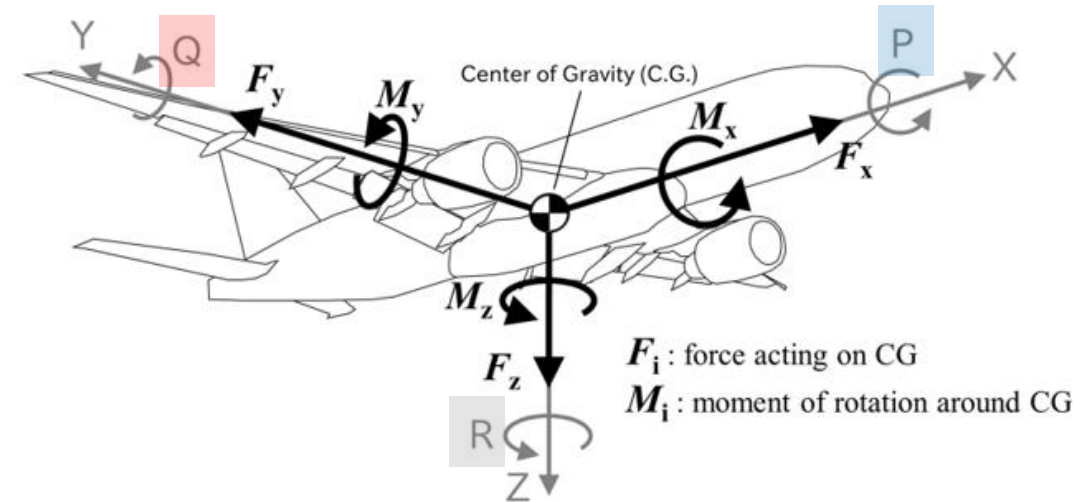
数百mスケールの砕波
渦で強いものは、
鉛直風速が最大±15m/s
程度



飛行機の揺動解析手法

飛行機の重心に関する6自由度運動方程式を解く

- 6自由度=6変数
- 並進3方向：u(x方向), v(y方向), w(z方向)
- 回転3方向：p(ロール), q(ピッチ), r(ヨー)
- 乱気流による外力を考慮
- 自動機体制御は無視(→Gを過大評価する)
- B747-100を想定
 - 飛行機特有の値(X_u, X_a など)は加藤(1982)から推定
 - NACA CR-2144(巡航高度空力係数)で推定手法検証+MIL-F-8785Cの縦安定性確認



6自由度飛行運動方程式

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} u \\ U_0\alpha \\ q \\ U_0\beta \\ p \\ r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_u & X_\alpha & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Z_u & Z_\alpha & (U_0 + Z_q) & 0 & 0 & 0 \\ M_u & M_\alpha \frac{d}{dt} & M_\alpha + M_q & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Y_\beta & Y_p & -(U_0 - Y_r) \\ 0 & 0 & 0 & L'_\beta & L'_p & L'_r \\ 0 & 0 & 0 & N'_\beta & N'_p & N'_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ \alpha \\ q \\ \beta \\ p \\ r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -g\theta \\ 0 \\ 0 \\ g\phi \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ F_{\text{elevator}} \\ M_{\text{elevator}} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} F_{\text{turb},u} \\ F_{\text{turb},\alpha} \\ M_{\text{turb},q} \\ F_{\text{turb},\beta} \\ M_{\text{turb},p} \\ M_{\text{turb},r} \end{bmatrix}$$

飛行機の姿勢変化に伴う空気力

重力

自動機体制御
(今回は無視)

乱気流外力

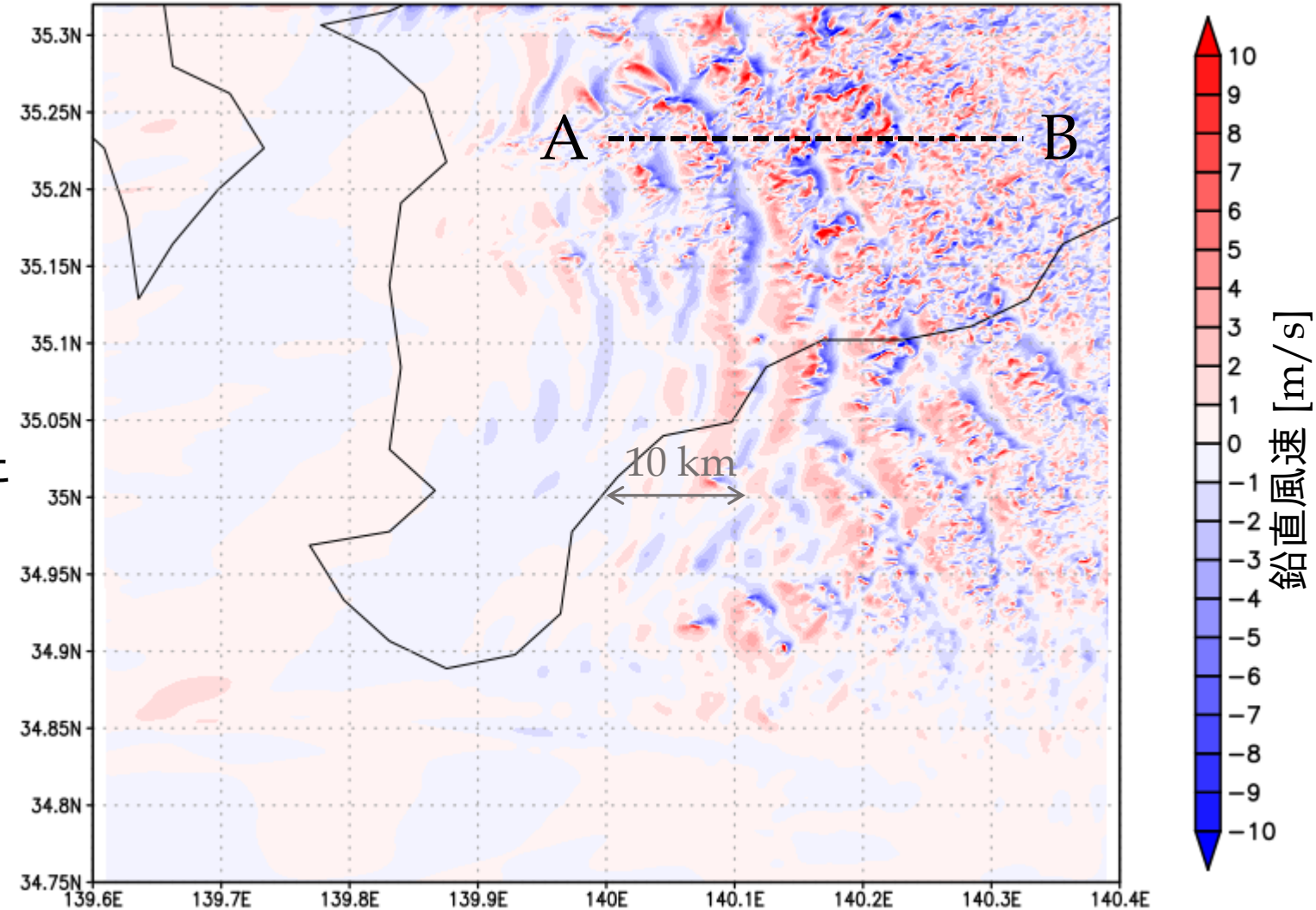


フライトパスなど

フライトパス概要図(ドメイン4風速場の例)
Time = 10Z30DEC2020 Alt = 3257.5 [m]

計算条件

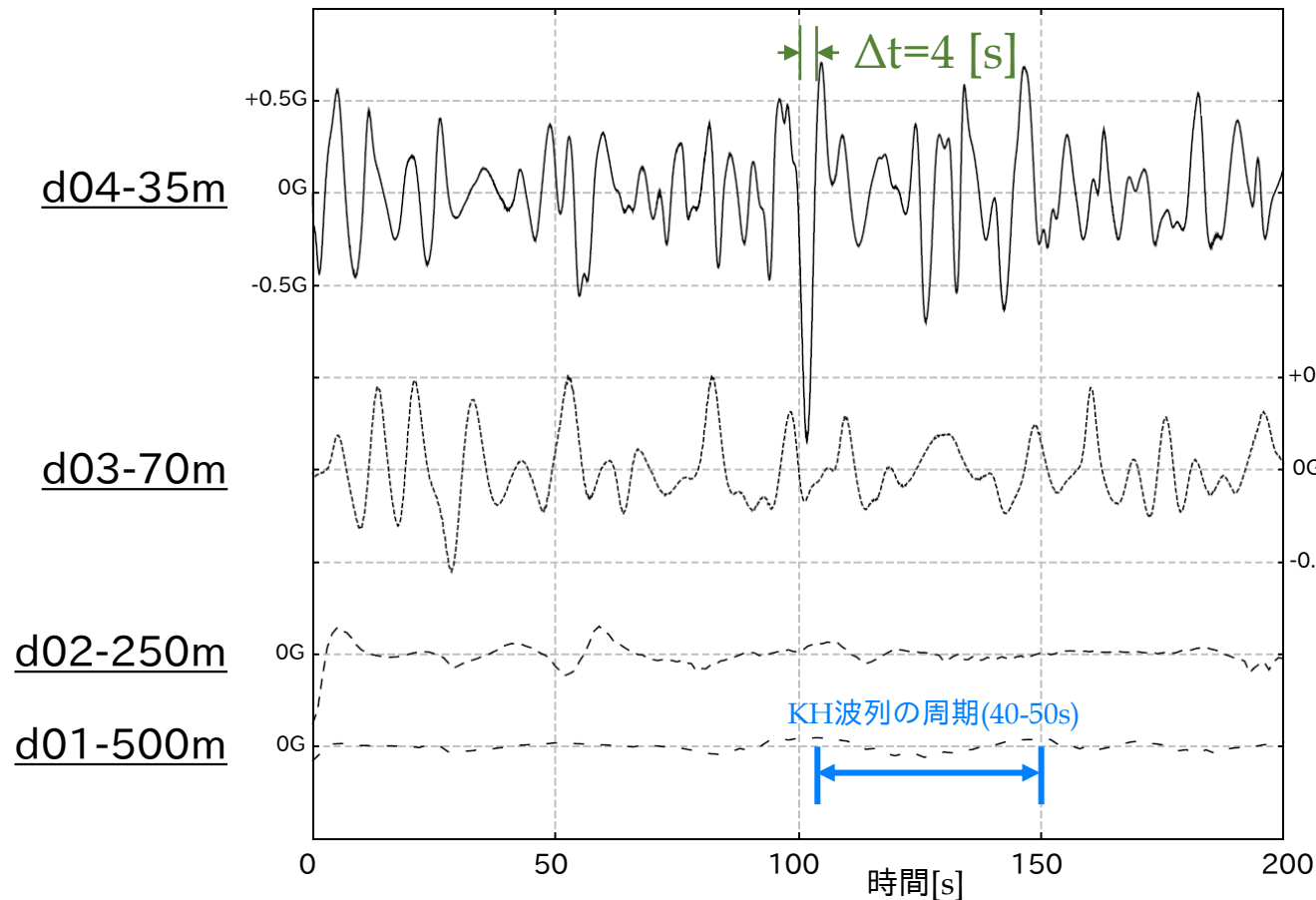
- 2020/12/30 10:00UTC瞬時場
- A地点からB地点を飛行
- 高度 3 km
- 飛行速度 133 m/s
- 定常飛行
- ドメイン(1, 2, 3, 4)で再現された乱気流中を飛行させて比較



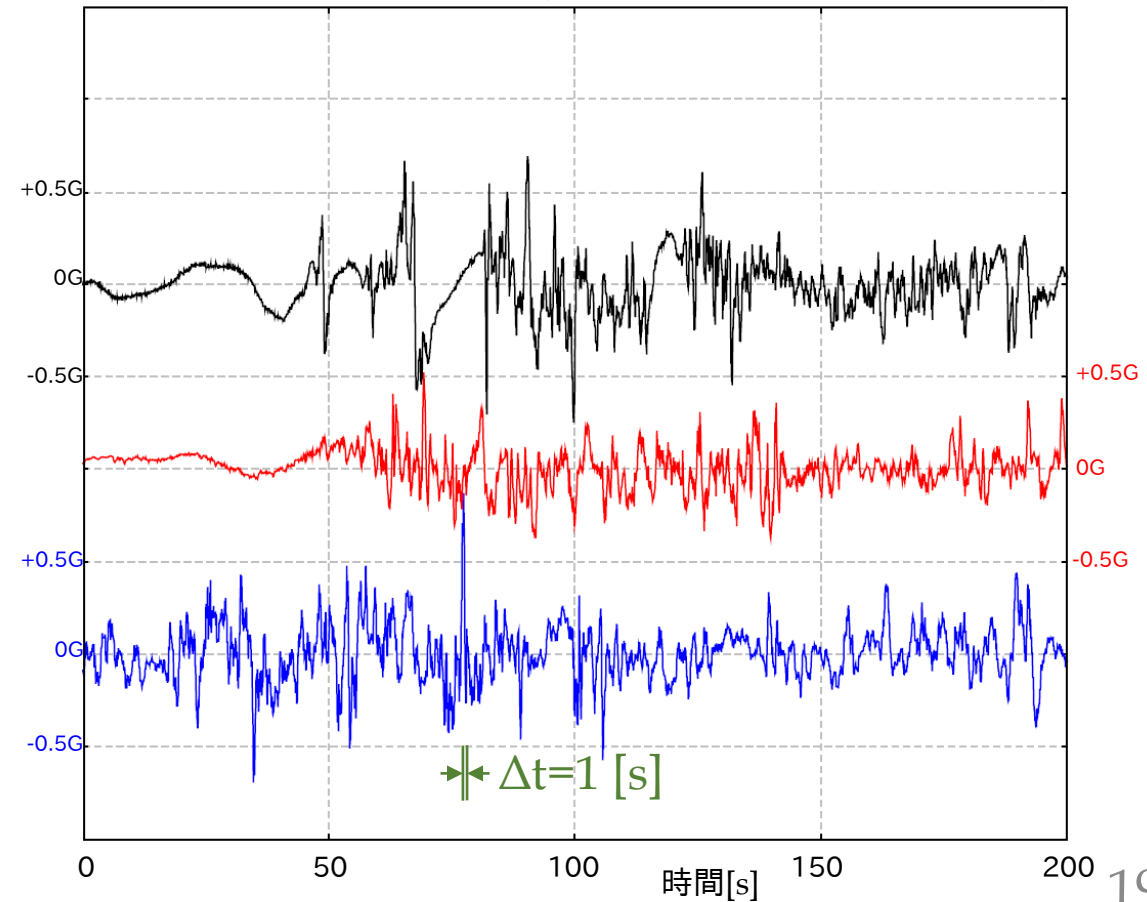
結果 & フライトデータ比較

- 格子解像度を上げると揺れが大きく、周期は短くなる (KHの波列の周期では大きく揺れない)
- 35m解像度の乱気流では4秒周期, フライトデータでは1秒周期

鉛直加速度の時間履歴(計算値)

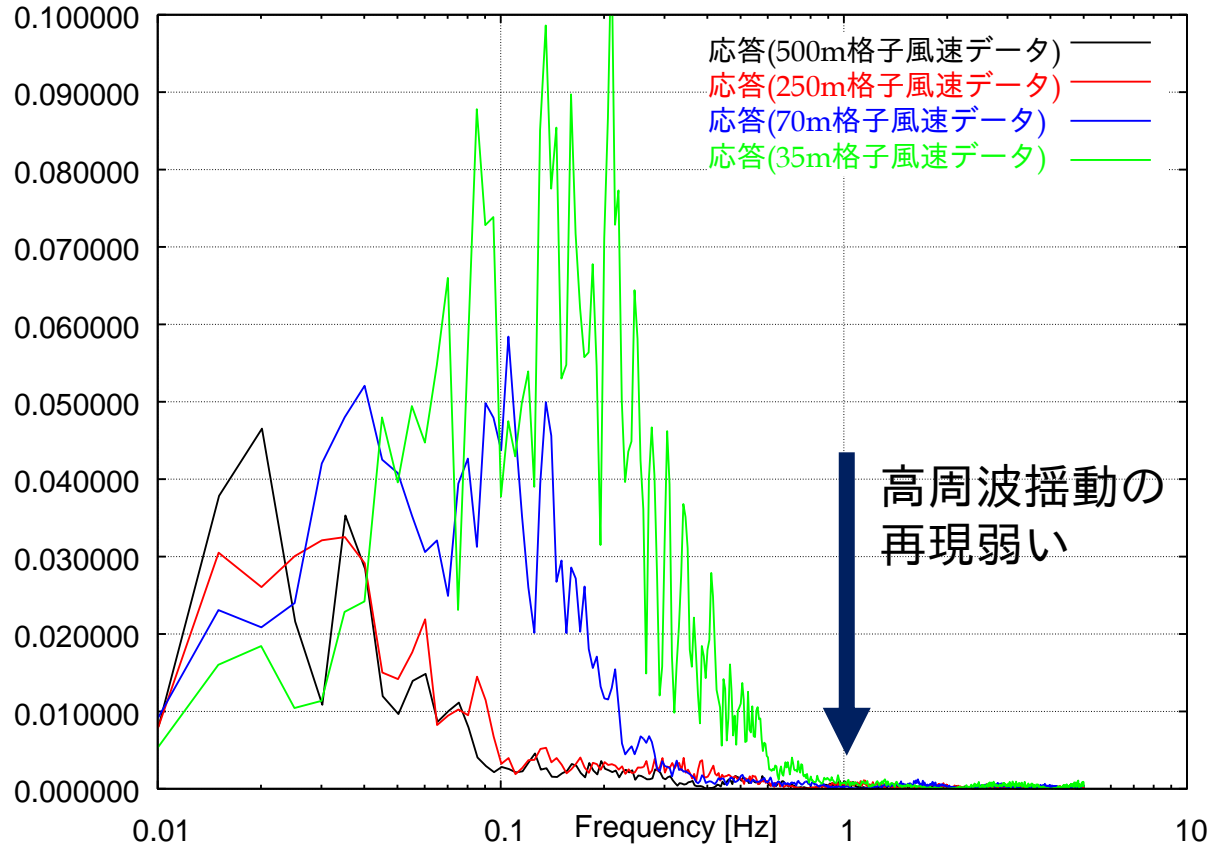


鉛直加速度の時間履歴(当日フライトデータ3便分)

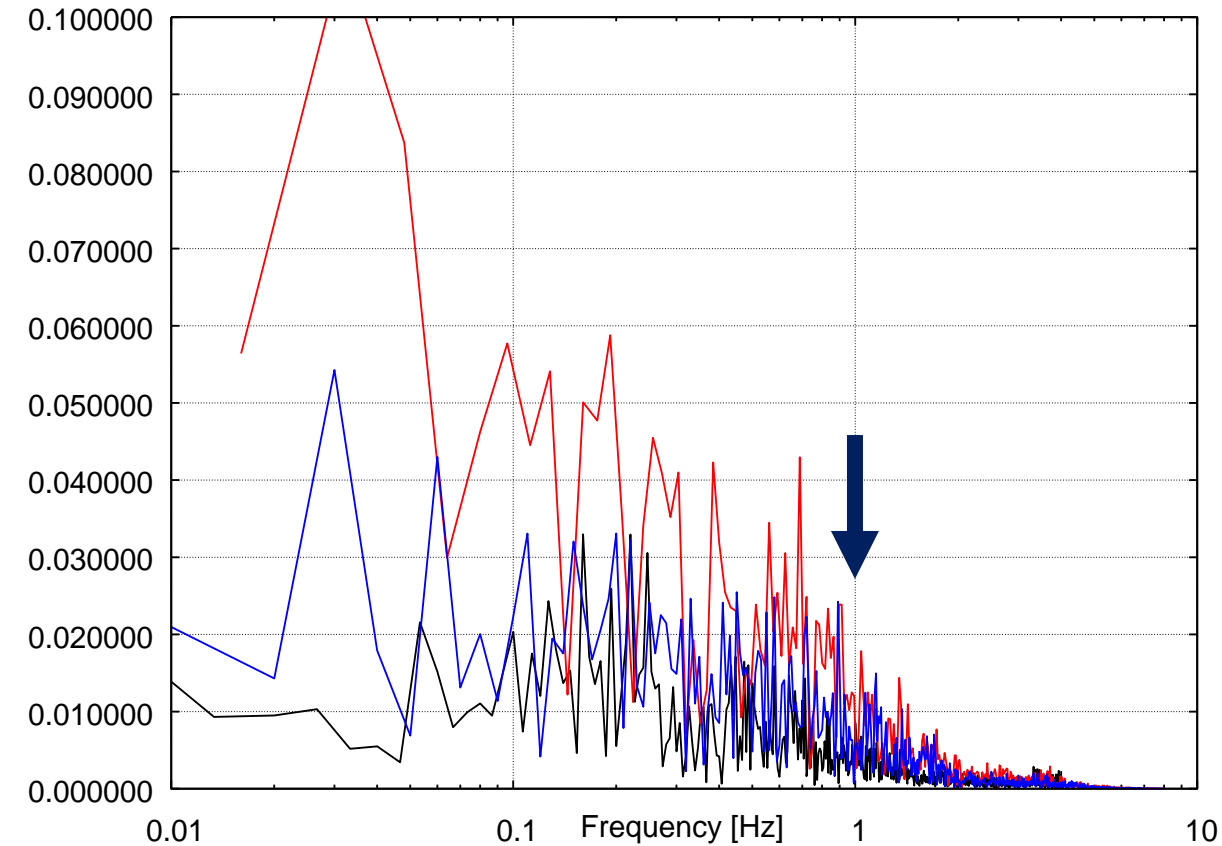


スペクトルの比較

シミュレーション



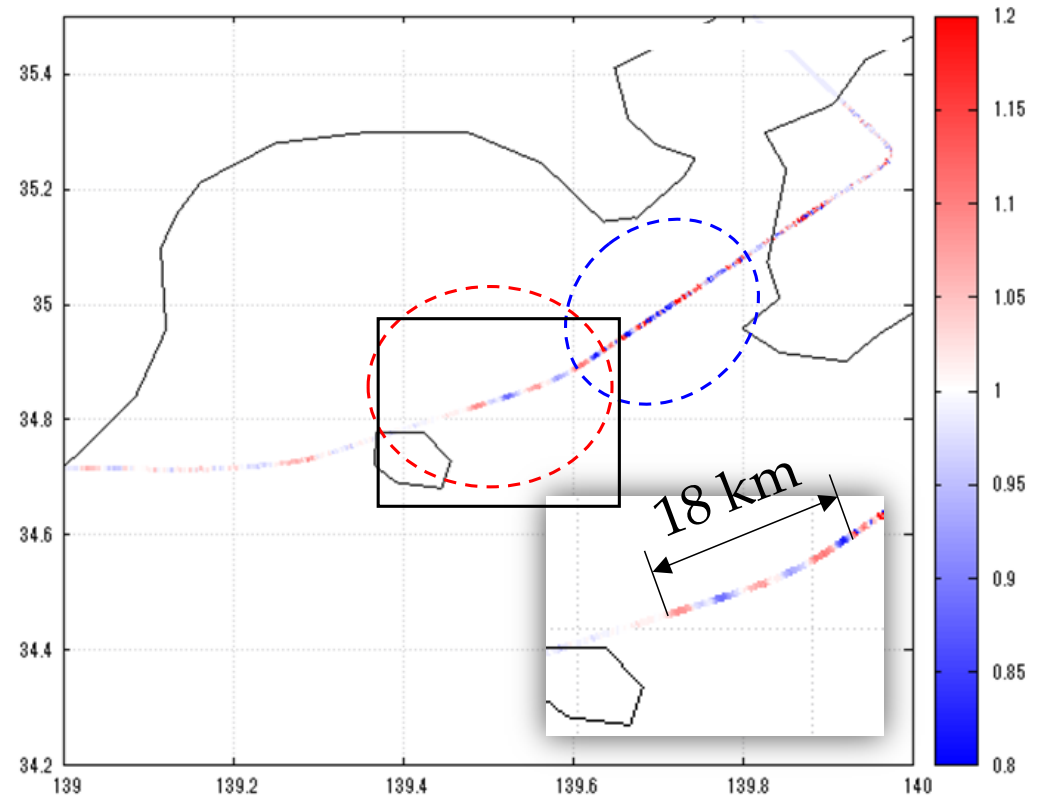
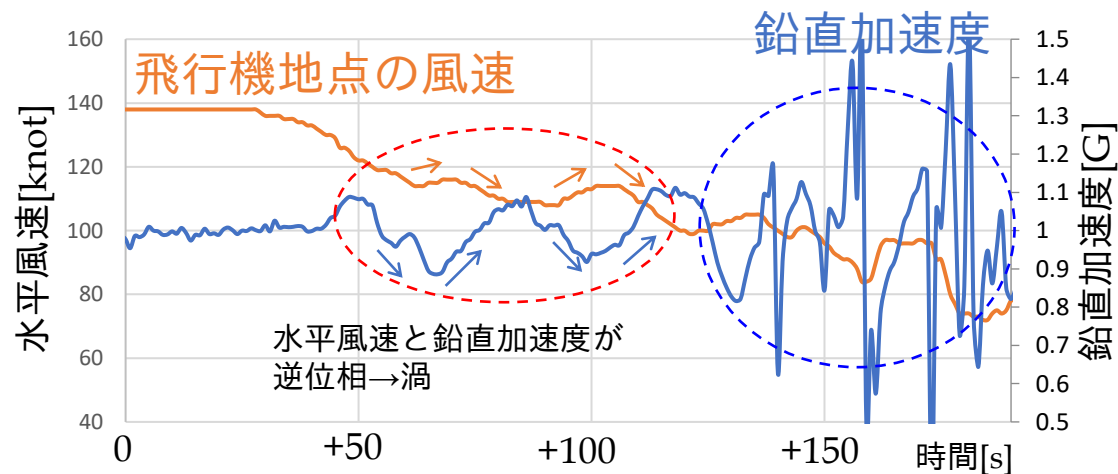
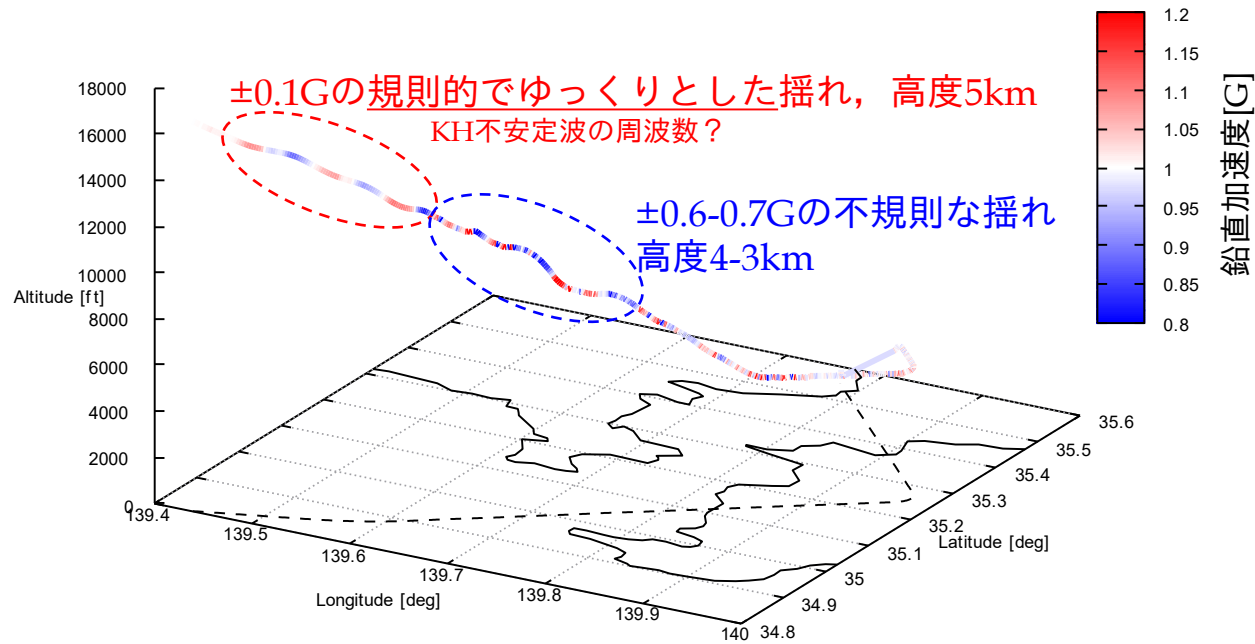
フライトデータ (3便分重ねて表示)



- フライトデータでは1Hz付近の周波数域までの揺れが示されている。
- シミュレーションでは、0.3Hz程度までの揺れを再現できた。

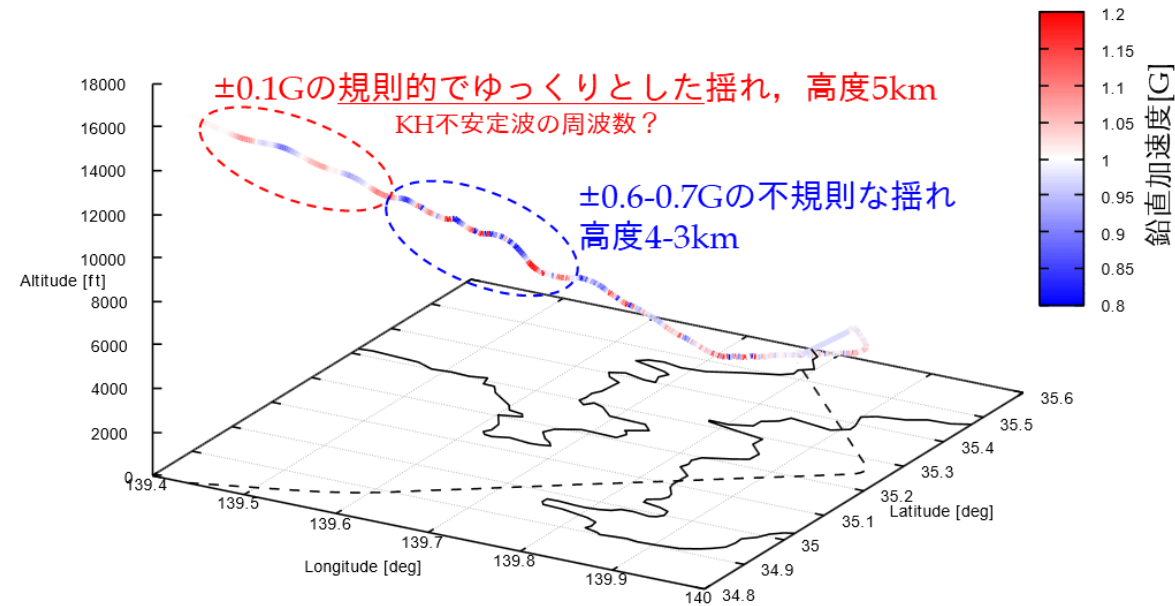
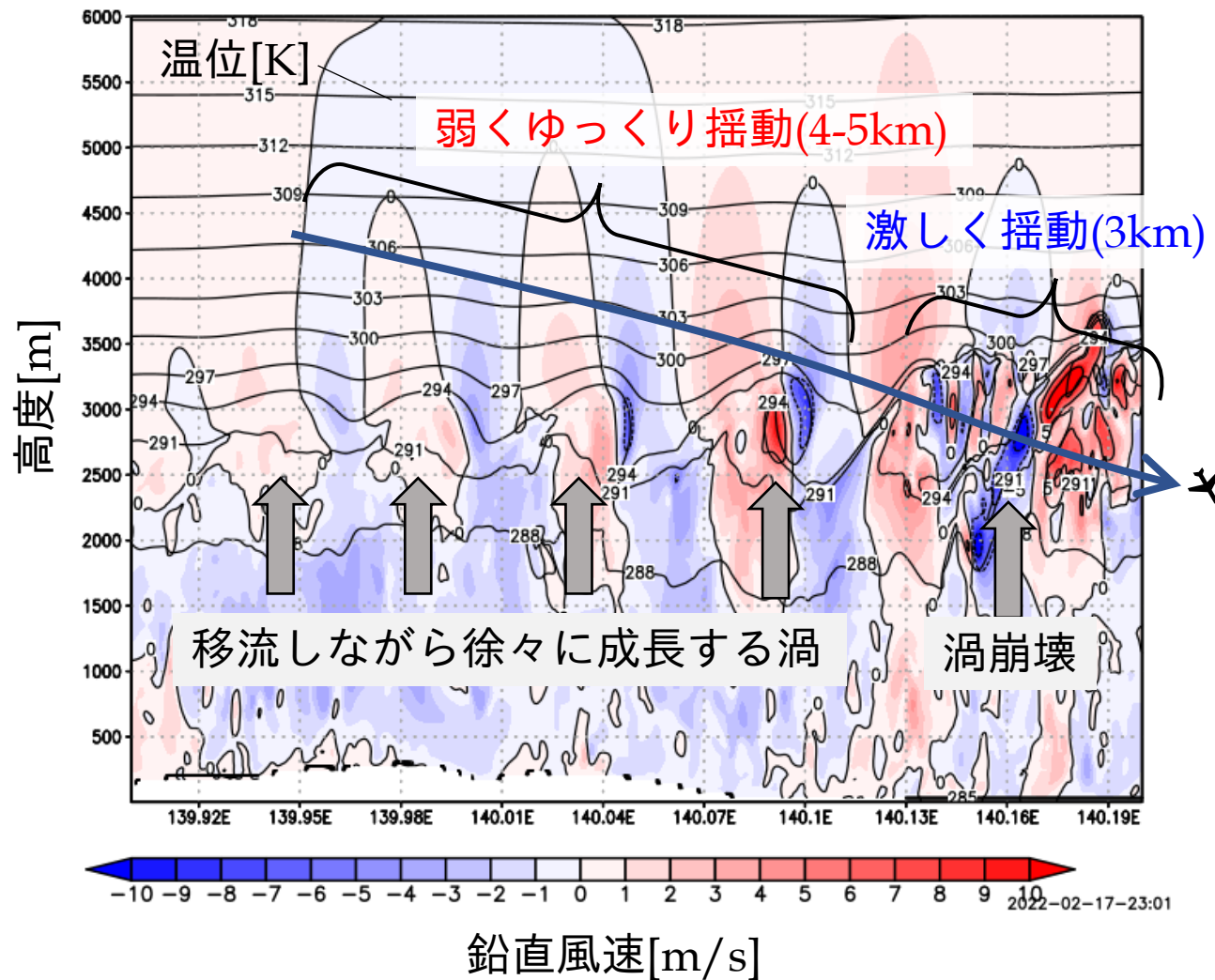
フライトデータから見る当時の状況

下部のKH波による上下降流でゆっくり揺れた後、砕波領域に突入し激しく揺れた



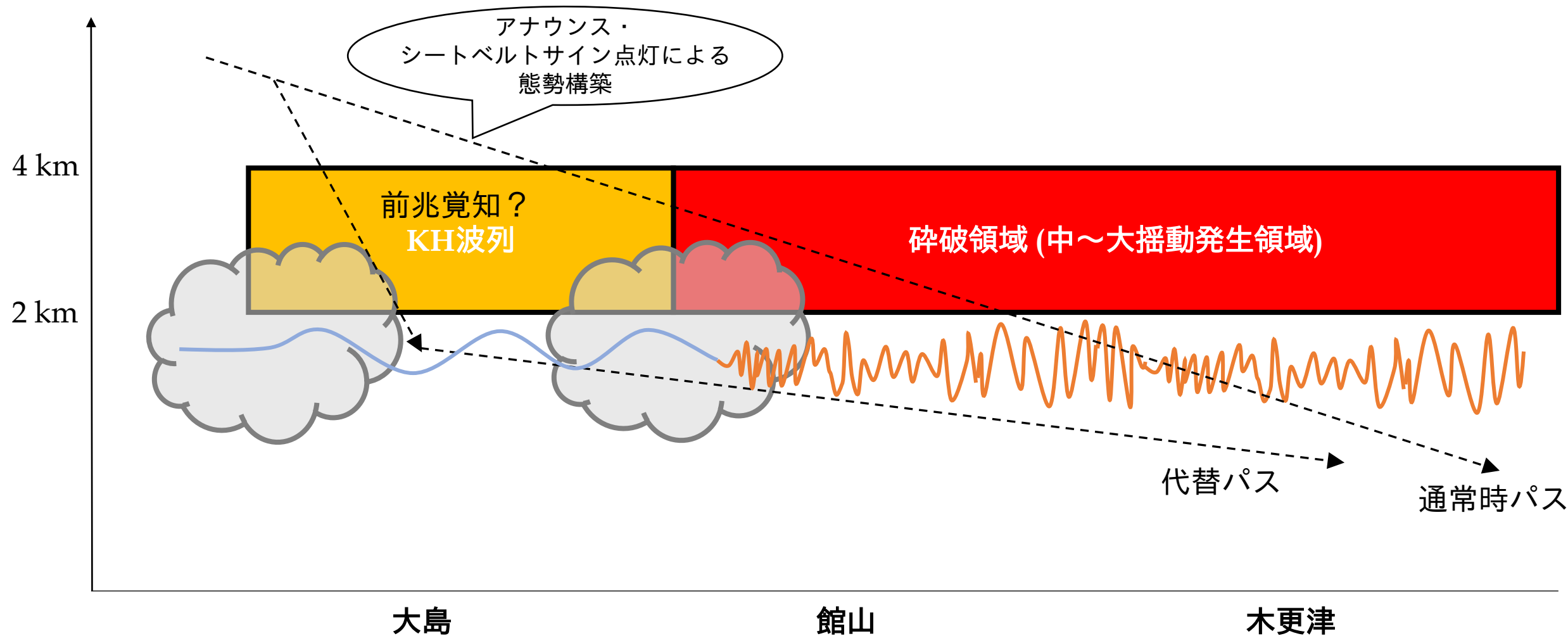
フライトデータから見る当時の状況

下部のKH波による上下降流でゆっくり揺れた後、碎波領域に突入し激しく揺れた



事故回避方策の提案

伊豆方面から羽田へのアプローチを例に、乱気流回避策を提案した



まとめ・今後に向けて

- 2020/12/30の関東南部での乱気流に着目
 - 東京湾上空で短時間に多数のPIREPが集中
- 富岳を用いた大規模数値計算により当時の乱気流を再現
 - 500m解像度～35m解像度で当時の乱気流発生状況を再現
- 航空会社提供のフライトデータを用い，乱気流の再現性を検証
 - フライトデータでは1Hzまで確認，シミュレーションでは0.3Hz程度の揺れまでを再現できた
- フライトデータと計算結果から，マクロな視点での乱気流回避策を提案

今後に向けて

- 1Hz相当の揺れを引き起こす乱気流再現を目指し，さらに解像度(10m～5m)の高い計算に取り組む
- 関東南部の事例だけでなく，乱気流回避のためのより一般的な知見を得る