



# 赤外サウンダ利用の現状と課題 —一次期ひまわり赤外サウンダ利用に向けて—

気象庁数値予報課  
数値予報モデル開発センター  
林昌宏

# はじめに

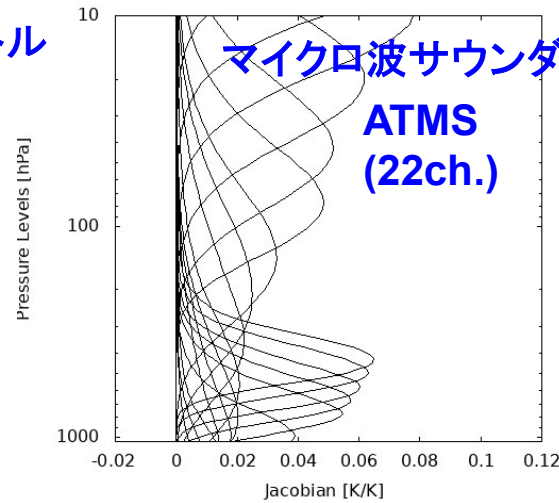
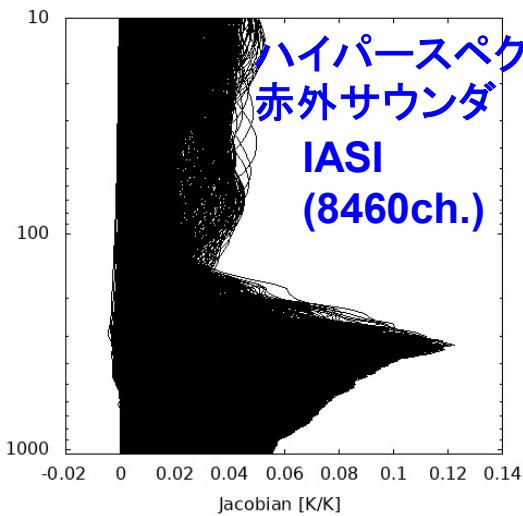
- 気象庁の数値予報システムでは、初期値の作成に、衛星に搭載された赤外サウンダの観測データを利用している。赤外サウンダは数値予報に大きなインパクトをもつ。ただし、その観測を最大限に活用するためには更に利用高度化の余地がある。
- 次期ひまわり赤外サウンダ有効活用のため、気象庁および海外現業センターにおける赤外サウンダ利用の現状をまとめ、利用方法高度化を目指すための課題とそれに対応する先行研究のいくつかを紹介する。

# 本日の講演の流れ

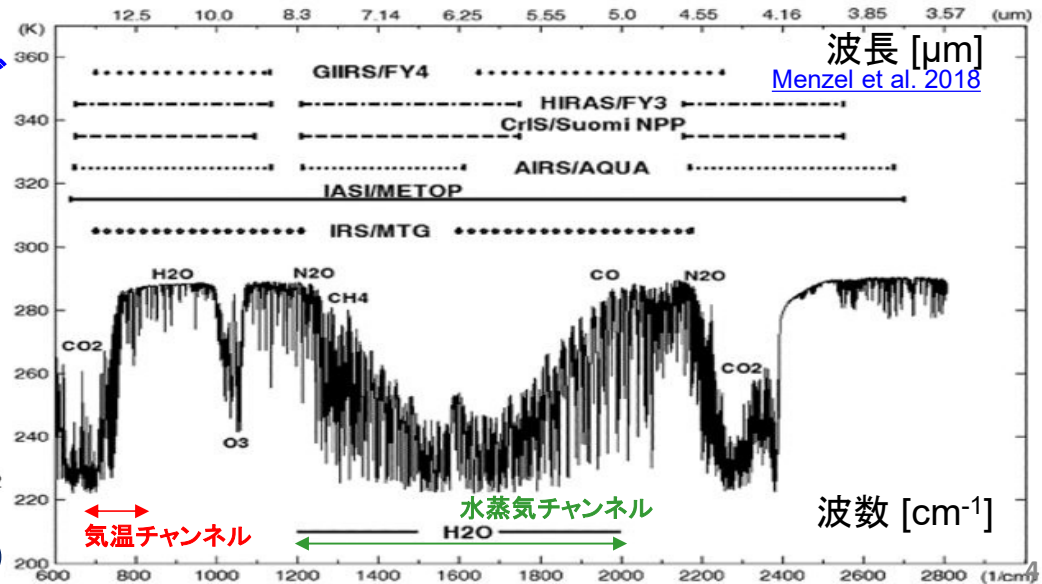
- 赤外サウンダとは
- 赤外サウンダの現業センターにおける利用状況
  - 気象庁数値予報モデルにおける赤外サウンダの利用状況
  - 主要現業数値予報センターの赤外サウンダ利用状況
- 次期ひまわりと赤外サウンダ
- 赤外サウンダ利用についての課題
  - 大容量データの取り扱い（情報量削減・圧縮）
  - 対流圏下層大気情報の抽出
  - 雲域における同化
  - 観測とモデル特性を考慮した同化手法高度化
- まとめ

# 赤外サウンダとは

- 多数の赤外波長域で放射観測すること物理量の鉛直分布を観測（サウンディング）可能
- 数値予報では、気温・水蒸気量に感度のあるチャンネルが利用され日々の数値予報初期値場の改善に寄与
  - 高速放射伝達モデルを観測演算子に利用した輝度温度直接同化が主流
- 近年の地球観測赤外サウンダでは、数千のチャンネルをもち、観測精度・鉛直分解能1K/1kmでの観測を目指した**ハイパースペクトル赤外サウンダ**が主流



各チャンネルの各高度の気温に対する感度の例(Jacobian)



波長 [μm]  
Menzel et al. 2018

波数 [cm<sup>-1</sup>]

# 運用・計画中のハイパースペクトル赤外サウンダ

(Menzel et al. 2018を改変)

運用期間 (WMO/OSCARより)

2002~

2007~

2012~

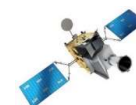
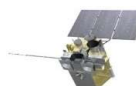
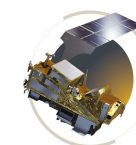
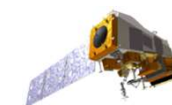
2018~

2025~  
(衛星打ち上げ予定)

2018~

2025~  
(衛星打ち上げ予定)

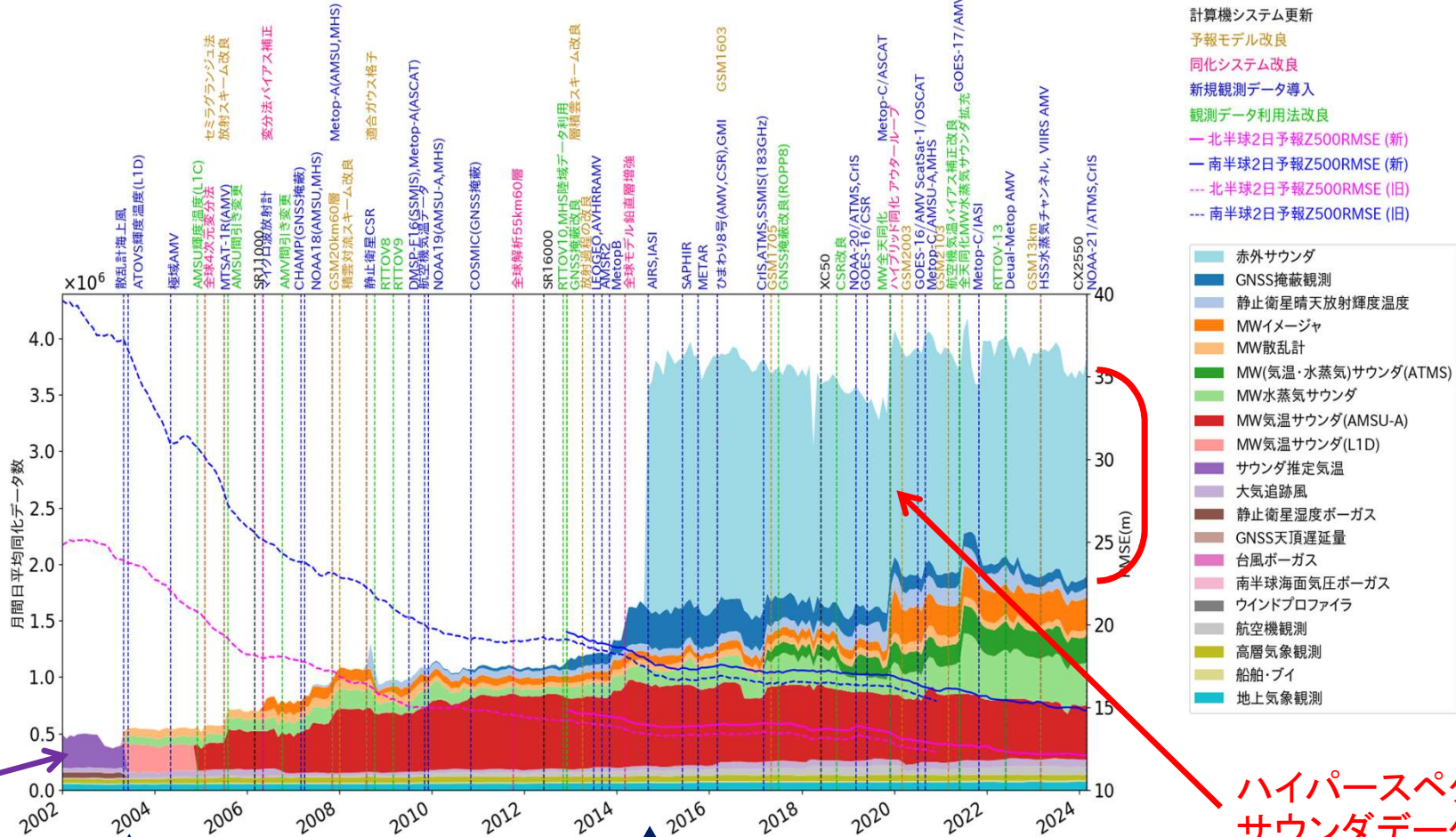
衛星名	センサー名	分光方法	軌道	波長レンジ cm <sup>-1</sup> (μm)	波長分解能 (cm <sup>-1</sup> )	チャンネル数	水平分解能 (km)	感度 (NEΔT)	スキャン幅 (km)
Aqua	AIRS	回折格子	極軌道	長波 649-1136 (15.4-8.80) 中波 1121-1612 (8.22-6.2) 短波 2169-2673 (4.61-3.74)	0.55 1.2 2.0	2378	13	0.15-0.35 K (at 280 K)	1650
Metop	IASI	干渉計	極軌道	長波 640-1210 (15.5-8.26) 中波 1210-2100 (8.26-5.0) 短波 2100-2700 (5.0-3.62)	0.25	8460	12	0.2-0.35 K (at 280 K)	2052
S-NPP (JPSS)	CrIS	干渉計	極軌道	長波 650-1095 (15.38-9.13) 中波 1210-1750 (8.26-5.71) 短波 2155-2550 (4.64-3.92)	0.625 1.25 2.5	1385	14	0.1-0.5 K (at 250 K)	2200
FY-3	HIRAS	干渉計	極軌道	長波 667-1136 (15.00-8.80) 中波 1210-1750 (8.26-5.71) 短波 2155-2550 (4.64-3.92)	0.625 1.25 2.5	1343	16	0.15 K (at 250 K) 0.2 K (at 250 K) 0.3 K (at 250 K)	2300
Metop-SG (衛星打ち上げ予定)	IASI-NG	干渉計	極軌道	長波 645-1150 (15.5-8.6) 中波 1150-1950 (8.6-5.13) 中/短波 1950-2300 (5.13-4.35) 短波 2300-2760 (4.35-3.62)	0.125	16921	12	0.13-0.39K (at 280K) 0.13-0.45K (at 280K) 0.16-0.45K (at 280K) 0.26-1.43K (at 280K)	2000
FY-4	GIIRS	干渉計	静止	長波 700-1130 (14.28-8.85) 中/短波 1650-2250 (6.06-4.45)	実験:0.8 運用:0.625 実験:1.6 運用:1.2	実験:912 運用:1188	実験: 16 運用:8	0.3 K 0.1 K	領域/ メソ・マイクロ ロススケール
MTG (衛星打ち上げ予定)	IRS	干渉計	静止	長波 700-1210 (14.28-8.26) 中波 1600-2175 (6.25-4.60)	0.625	1740	4	0.2 K (at 280 K)	フルディス ク



# 気象庁数値予報モデル衛星データ利用状況

種類	衛星/センサー	全球解析	メソ解析	局地解析
1. マイクロ波サウンダ	NOAA-15,18,19, Metop-B,-C/AMSU-A	輝度温度	輝度温度	輝度温度
	NOAA-19, Metop-B,-C/MHS	輝度温度	輝度温度	輝度温度
	DMSP-F17,18/SSMIS	輝度温度	-	-
	Suomi-NPP, NOAA-20,21/ATMS	輝度温度	輝度温度	輝度温度
2. 赤外サウンダ	Metop-B,C/IASI	輝度温度	輝度温度	輝度温度
	NOAA-20,21/CrIS	輝度温度	輝度温度	輝度温度
3. マイクロ波イメージャ	DMSP-F17,18/SSMIS	輝度温度	輝度温度, 降水強度	輝度温度
	GCOM-W/AMSR2	輝度温度	輝度温度, 降水強度	輝度温度, 土壤水分量
	GPM-core/GMI	輝度温度	輝度温度, 降水強度	輝度温度
4. 可視・赤外イメージャ	Himawari-9	晴天輝度温度, 大気追跡風	晴天輝度温度, 大気追跡風	晴天輝度温度, 大気追跡風
	GOES-16,18	晴天輝度温度, 大気追跡風	-	-
	Meteosat-9,10	晴天輝度温度, 大気追跡風	-	-
	NOAA-15,18,19, Metop-B,-C/AVHRR	大気追跡風	-	-
	Suomi-NPP, NOAA-20/VIIRS	大気追跡風	-	-
	LEO GEO composite image	大気追跡風	-	-
5. 散乱計	Metop-B,-C/ASCAT	海上風	海上風	海上風, 土壤水分量
6. GNSS掩蔽	Metop-B/GRAS	屈折角	屈折率	-
	TerraSAR-X/IGOR	屈折角	屈折率	-
	TanDEM-X/IGOR	-	屈折率	-
7. 降水レーダー	GPM/DPR	-	相対湿度	-

# 気象庁の全球サイクル解析で利用している観測データ量とスコアの経年変化（～2024年3月）



サウンダ (ATOVS) リトリブ量の同化

輝度温度直接同化の開始

ハイパースペクトル赤外サウンダ同化開始

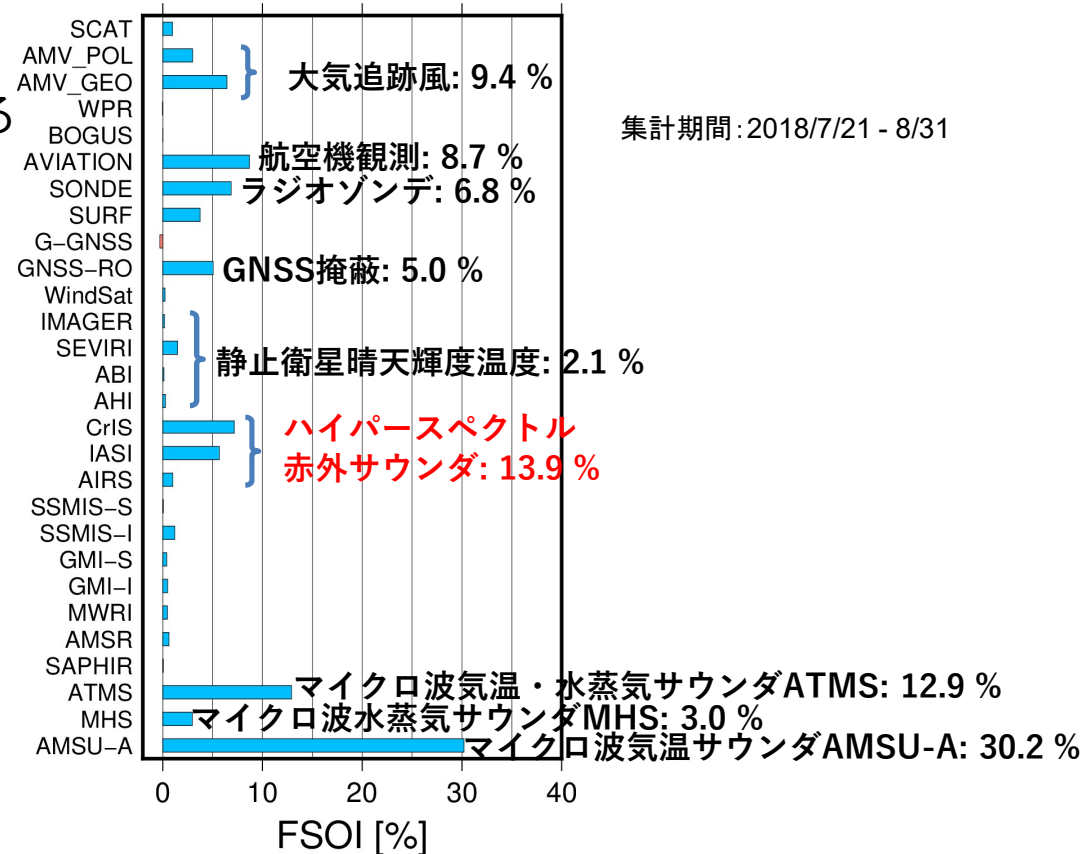
ハイパースペクトル赤外サウンダデータ

- 計算機システム更新
- 予報モデル改良
- 同化システム改良
- 新規観測データ導入
- 観測データ利用法改良
- 北半球2日予報Z500RMSE (新)
- 南半球2日予報Z500RMSE (新)
- 北半球2日予報Z500RMSE (旧)
- 南半球2日予報Z500RMSE (旧)

# 気象庁全球モデルにおける赤外サウンダのインパクト

令和4年(2022年) 数値予報開発センター年報 P93-98  
4.6 FSOI (Forecast Sensivity Observation Impact) より

- Forecast Sensivity Observation Impact (FSOI)
  - 観測データの同化が予報誤差の軽減に与えるインパクトを定量化したものの。
- 観測データの種類ごとに確認
  - 2019年12月時点の数値予報システムを使用
- インパクトの大きいデータ
  - マイクロ波気温サウンダ
  - ハイパースペクトル赤外サウンダ
  - 航空機観測
  - ラジオゾンデ
  - 大気追跡風
  - GNSS掩蔽





# 主要現業数値予報センターの 赤外サウンダ利用状況(全球モデル)

	利用センサ※ (利用チャンネル数)			放射伝達 モデル	同化領域 (晴天/曇天)	陸上での利用	空間間引き距離(km)	
	IASI	CrIS	GIIRS				全球モデル	領域
ECMWF	220	148	—	RTTOV	晴天+完全曇天域 (overcast)	対流圏以下に感度がある チャンネルを除く	110-140 (可変)	—
Met Office	138	134	—	RTTOV	晴天+影響が弱い 雲域(1D-Var利用)	陸面温度・射出率リト リーバル(1D-Var)の推定 結果を利用	CrIS:125,154 IASI:80,154 (熱帯で154)	24
NCEP	165	84	—	CRTM	晴天のみ	地表面射出率チェックに より地表面に感度の大き いチャンネルを除く	145	80
CMA	66	80	110	RTTOV	晴天のみ	?	200	60
JMA	77	36	—	RTTOV	晴天のみ	対流圏以下に感度がある チャンネルを除く	200	45

国際鉛直探査計研究会議(ITSC)第24回会合サーベイ(2023年3月時点)より

# 静止気象衛星「ひまわり」の役割と後継機(ひまわり10号)の整備計画

令和6年2月28日静止気象衛星に関する懇談会第9回資料より

## ひまわりの役割

### ひまわりは安全・安心な国民生活・社会経済活動に不可欠な社会インフラ

#### 防災

- ✓ 台風・集中豪雨・線状降水帯の監視・予測(特に洋上は唯一の手段)
- ✓ 観測データはスーパーコンピュータによる数値予測で処理され、予報・警報の基盤となっている。



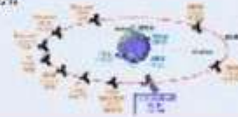
#### 国民生活

- ✓ 日々の天気予報に不可欠
- ✓ お茶の間に広く浸透



#### 国際貢献

- ✓ 世界気象機関 (WMO) における世界的な観測網の一翼を担う
- ✓ 地球環境・森林火災・噴火の監視



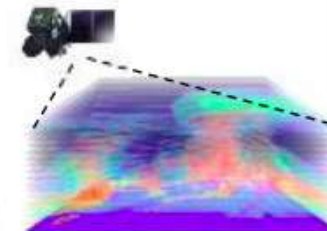
#### 産業・交通安全

- ✓ 農業、観光等の各種産業における基盤情報として利用
- ✓ 航空機、船舶等の安全で経済的な航行に寄与



## ひまわり後継機の整備計画

- 現行の静止気象衛星ひまわり8号、9号は令和11(2029)年度までに設計上の寿命を迎える
- 宇宙基本計画(令和5年6月13日閣議決定)に沿って、**令和11(2029)年度の後継機の運用開始に向け、着実に整備を進める**

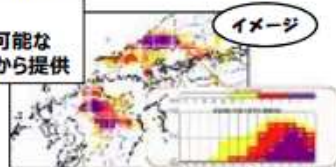


3次元観測イメージ  
(大気の立体的構造)

- 線状降水帯や台風等の予測精度を抜本的に向上させるため、**大気の三次元観測機能「赤外サウンダ」など最新技術を導入した次期静止気象衛星(ひまわり10号)を整備**

◎市町村単位で危険度の把握が可能な気象情報を半日前から提供し、早期避難による人的被害の最小化と物的被害の低減を図る

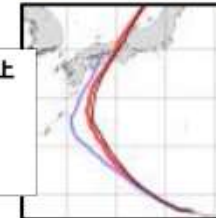
令和11(2029)年～  
市町村単位で危険度の把握が可能な  
危険度分布形式の情報を半日前から提供



◎台風の進路を正確に予測することにより、鉄道・空港などの的確な運用(計画運休)、広域避難等を可能に

3日先の台風進路予測精度を大幅に向上  
(H30年台風第21号の例)

黒: 実際の台風経路  
青: 現状の予測  
赤: 精度向上した予測



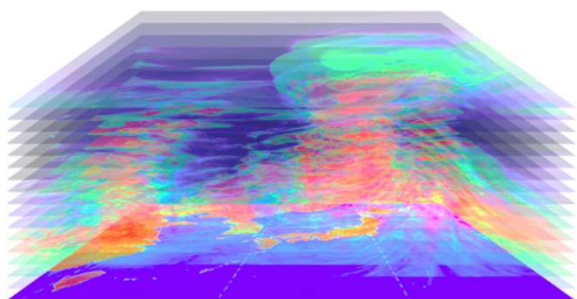
# ひまわり赤外サウンダ（GHMS）観測機能の概要

表中の値は要求値を示す。

## 観測範囲・間隔

観測種別（最小観測範囲）	観測間隔
ディスク観測 （衛星天頂角60度以内の領域）	60分
日本域観測 （東西2500 km × 南北2000 km）	15分※
機動観測 （東西1000 km × 南北1000 km）	15分

※ 60分に4回のうちの1回はディスク観測で代替



## 水平分解能・スペクトル諸元

水平分解能（衛星直下点）		≤ 4.2 km
観測波数（波長）域	LWIR※ <sup>1</sup>	680 - 1095 cm <sup>-1</sup> (14.7 - 9.13 μm)
	MWIR※ <sup>2</sup>	1689 - 2250 cm <sup>-1</sup> (5.92 - 4.44 μm)
波数分解能（FWHM※ <sup>3</sup> ）		≤ 0.754 cm <sup>-1</sup>
波数サンプリング間隔		≤ 0.625 cm <sup>-1</sup>

※1 Long Wave InfraRed: 長波赤外

※2 Mid Wave InfraRed: 中波赤外

※3 Full Width at Half Maximum: 半値全幅

令和5年7月31日静止気象衛星に関する懇談会第8回資料より

# 赤外サウンダ利用についての課題

- ひまわり赤外サウンダの高波数分解能・高密度・高頻度の観測を利用することで、数値予報モデル初期値精度改善を通じ数値予報精度向上が期待できる。しかし、現在の同化システムではその情報を余すことなく活用できるわけではない
- ひまわり赤外サウンダを数値予報モデルで最大限活用するための課題について、気象庁における利用状況と最新の研究・開発動向を踏まえ、今後の開発の方向性について議論したい
  1. **大容量データの取り扱い（情報量削減・圧縮）**
  2. **対流圏下層大気情報の抽出**
  3. **雲域における同化**
  4. **観測とモデル特性を考慮した同化手法高度化**

- 1. 大容量データの取り扱い（情報削減・圧縮）**
- 2. 対流圏下層大気状態の抽出**
- 3. 雲域における同化**
- 4. 観測とモデル特性を考慮した同化手法高度化**

# 情報量の削減・圧縮

- 目的・背景

- ハイパースペクトル赤外サウンダは非常に大容量のデータであり、現業センターにおける配信・同化利用には工夫が必要
  - MetopSG/IASI-NGはIASIの2倍の波数分解能
  - MTG/IRS, GHMS等の静止気象衛星赤外サウンダは時空間分解能が高く膨大なデータ量

- 課題

- 数千チャンネルの観測には情報の重複があり、数値予報モデルに利用したいパラメータ(気温・水蒸気等)に対して実際の自由度は小さい
- 特定のチャンネルの観測には微量気体(CH<sub>4</sub>, SO<sub>2</sub>など)の情報が含まれ、これらは数値予報モデルへの同化利用においてはノイズ
- 数値予報モデルに必要な情報はできるだけ減らさず、ノイズを取り除き、可能な限りデータ量削減・圧縮して利用する必要

# 気象庁における現状

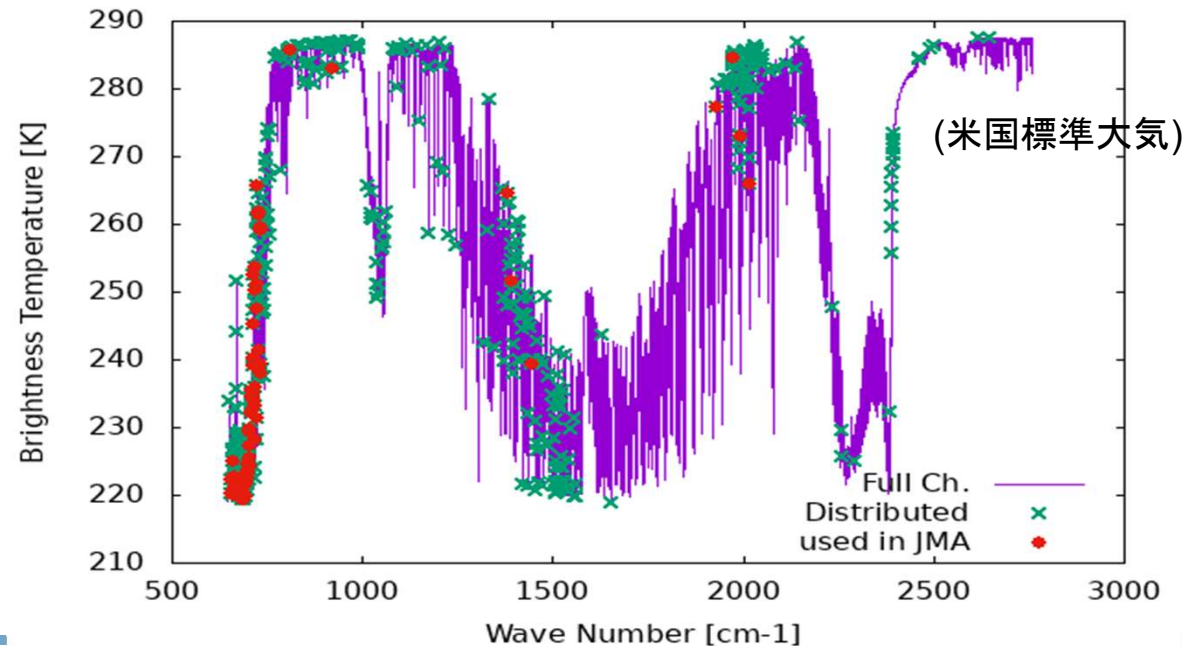
## – 配信

- 数値予報センター向けにチャンネル選択され配信されているものを利用

## – データ同化

- 配信チャンネルからさらに気象庁数値予モデル同化に有効なチャンネルを情報量やヤコビアンを用いて経験的に選択

センサ	配信チャンネル数	同化利用チャンネル数
IASI	500( <a href="#">EUMETSAT, 2019</a> )	全球:77    メソ: 31
CrIS	431( <a href="#">Jung et al. 2017</a> )	全球:36    メソ:17



IASI輝度温度と配信チャンネル・利用チャンネル(全球) 15

# 情報選択の例：情報量を利用したチャンネル選択

- 情報量を利用したチャンネル選択(e.g., [Rodgers 1996](#), [Rabier et al. 2002](#))
  - 求めたいパラメータに対するエントロピー、自由度(Degrees of Freedom for Signal: DFS)を性能指数(figure of merit)に用いたチャンネル選択が広く利用されている(e.g., [Li and Han 2017](#))

- 例：エントロピー (Entropy Reduction:ER)

$$H(P) = - \int P(x) \log P(x) dx$$

$P(x)$ : 尤度関数  
 $x$ : 気温・水蒸気等のパラメータ  
 $S$ : 解析誤差行列

$$= \frac{1}{2} \log |S| + Const.$$

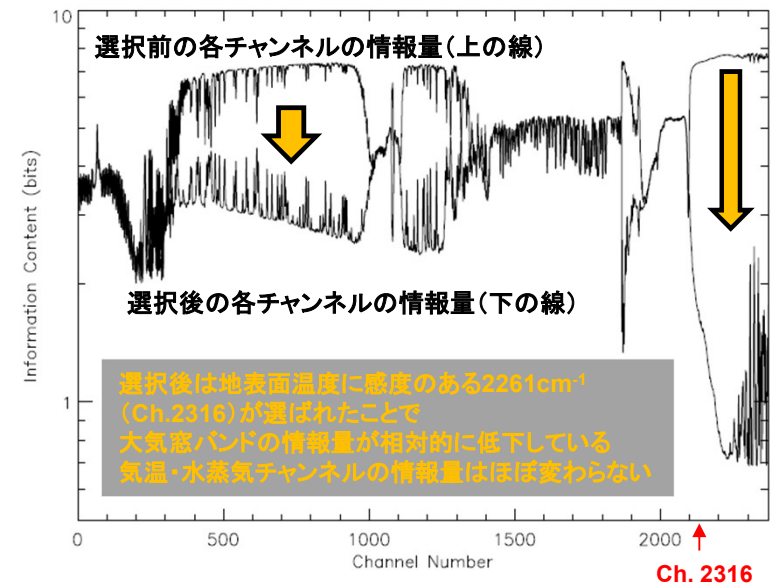
新しいチャンネル*i*を追加した時の情報量の増加量

$$\delta S_i = \frac{1}{2} \ln(1 + \mathbf{k}_i^T \mathbf{S}_{i-1} \mathbf{k}_i)$$

$\mathbf{k}_i$ : 観測誤差行列で規格化したヤコビアン

が最大になるようなチャンネルを順番に選択していく  
 →情報量増加がサチってくる数百チャンネル程度まで選択

(Rodgers 1996)



AIRSで最初に $2261\text{cm}^{-1}$ チャンネルが選ばれた時の情報量の変化



# 情報圧縮の例：主成分分析(PCA)

- 主成分分析(Principal Component Analysis; PCA) ([石田ほか 2024](#))
  - 数千チャンネルの情報を数百程度の固有ベクトル空間に圧縮 (IASIなら8460ch.→~300程度)
  - 上位の固有ベクトル利用で情報量圧縮に加えてノイズ低減の効果も期待できる
  - “Mixing Problem”により個々の固有ベクトル空間にQC等に必要な情報が入り込む
    - 例えば、各PCスコアのみで雲の影響を分離するのが困難 (e.g., [Aires et al. 2016](#))
- 配信
  - EUMETSATはMetop/IASIの観測をPCスコアでも配布([EUMETSAT, 2024](#))
  - MTG/IRS・ひまわり/GHMS等の今後計画されている赤外サウンダで配信を検討
- 同化利用
  - 再構築輝度温度の同化 ( [Collard et al. 2010](#))
    - 200PCスコアから再構築したIASI・AIRSの輝度温度同化は通常の輝度温度同化と同程度の精度
  - PC直接同化([Matricardi and McNally 2014](#))
    - IASIの20PCスコアを直接同化(完全晴天のみ)したところ通常の輝度温度同化と同程度の精度

# リトリーブ量同化のリバイバル？

- 近年、同化計算コスト削減手法の一つとして、リトリーブされた鉛直プロファイルの同化も選択肢として調査されている  
(e.g., [Salonen and McNally 2020](#), [Silveria et al. 2022](#))
  - 観測・リトリーバル手法・数値予報モデルの高度化も背景
- 課題
  - 同化したい数値モデルとは無関係なリトリーバル時の誤差の混入
  - リトリーバル鉛直プロファイルと数値モデルの鉛直解像度の違い
- 近年の同化研究の例 例えば、[Salonen and McNally\(2020\)](#)は、IASI-Level2プロダクトが表現する解像度では、逆転層などのモデルで表現している微細な構造をなましてしまうことを指摘
  - 観測誤差相関・Averaging Kernelの考慮([Salonen and McNally 2020](#), [Emili et al 2019](#))
  - Level2プロダクトPC固有ベクトルを観測演算子に利用した同化 ([Salonen et al. 2024](#))
  - Transformed Retrieval同化 ([Migliorini 2012](#), [Levens and Migliorini 2024](#)等)

1. 大容量データの取り扱い（情報削減・圧縮）
2. 対流圏下層大気情報の抽出
3. 雲域における同化
4. 観測とモデル特性を考慮した同化手法高度化

# 対流圏下層大気情報の抽出

- 目的・背景

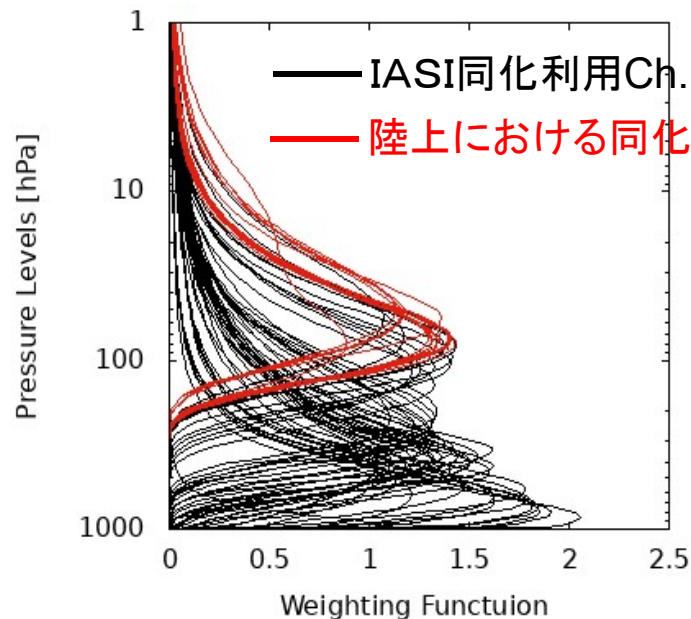
- 赤外サウンダで対流圏下層大気情報、特に水蒸気量分布を正確に把握することで台風や線状降水帯等の極端気象の予測精度向上に貢献(e.g., [Li et al. 2011](#))

- 課題

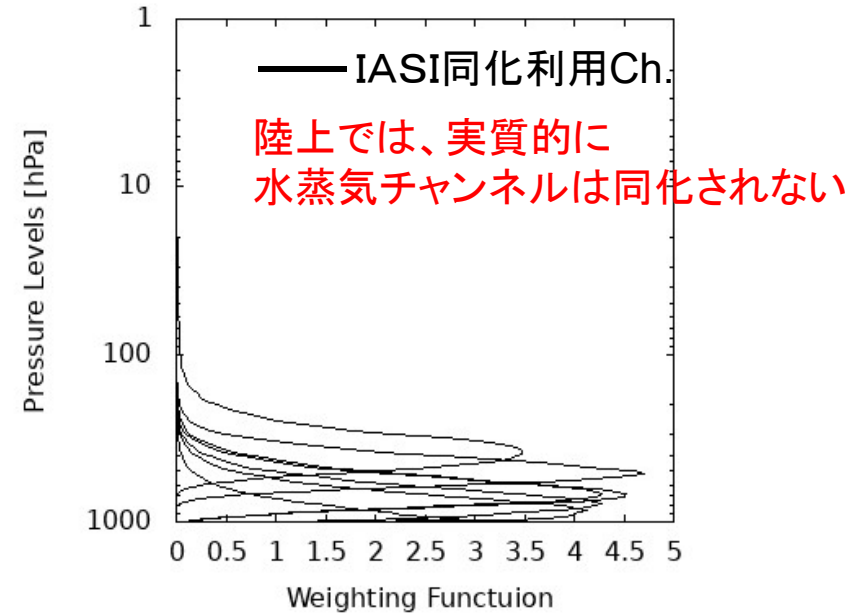
- 対流圏下層大気情報を適切に抽出するためには当然大気下層に感度があるチャンネルの利用が必要
  - 必然的に地表面に感度あるチャンネルを同化することになるため地表面温度や射出率の正確な値が必要となる
    - 特に数値予報モデルの陸面温度と利用可能な陸面射出率は誤差が大きい
- 大気プロファイルは時間・場所によって異なり、特に極端気象時の大気下層プロファイルは時空間変動が大きいいため、固定プロファイルを仮定して選択したチャンネルでは適切な情報が得られない可能性

# 気象庁における現状

- 陸上における対流圏に感度があるチャンネルの除外
  - 陸上では地表面予測値・気候値(射出率)の精度が低いため(同化利用時に不都合なバイアス等だけでなく、雲判定にも影響がある)、対流圏に感度があるチャンネルはすべて利用しない



IASI気温チャンネルの荷重関数(全球モデル)  
赤色は陸上利用チャンネル( $<680.1\text{cm}^{-1}$ )



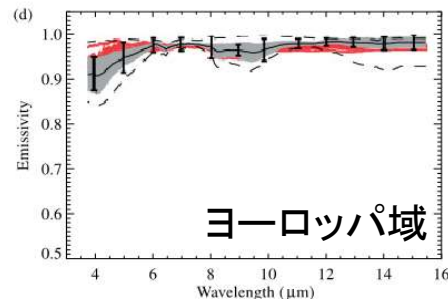
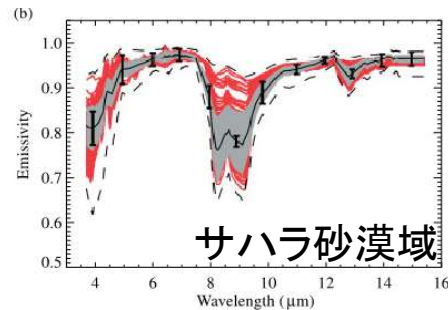
IASI水蒸気チャンネルの荷重関数(全球モデル)

# 対流圏下層大気情報抽出の例 1

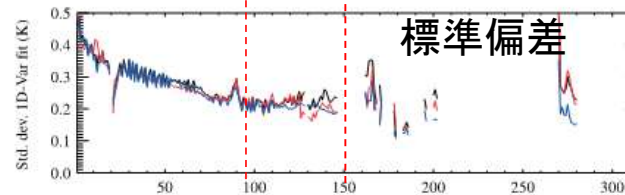
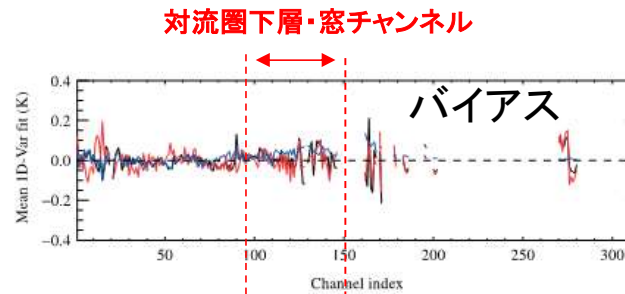
- 地表面パラメータの推定

- 陸面温度・陸面射出率を推定して同化処理に利用

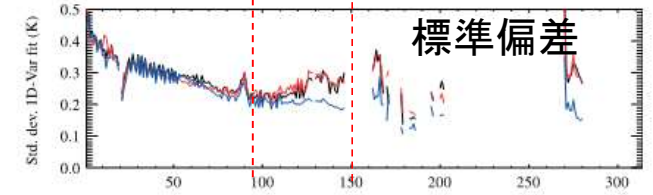
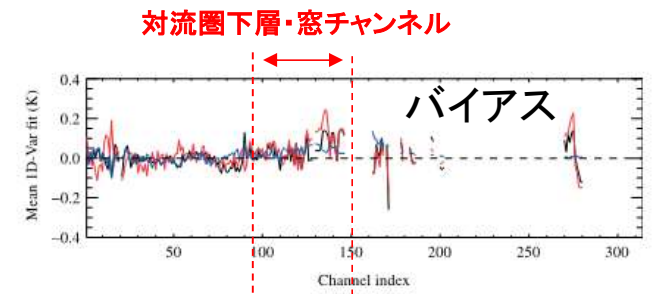
- [Pavelin and Candy \(2014\)](#)は陸上の陸面温度・陸面射出率を1D-Varシステムにより事前に推定することで、陸上においても対流圏下層に感度があるチャンネルを同化利用 (Met Officeで採用)



推定された射出率



推定射出率を利用した時の  
O-B統計(青)と1D-Var推定結果(赤)



射出率0.98で固定した時の  
O-B統計(青)と1D-Var推定結果(赤)

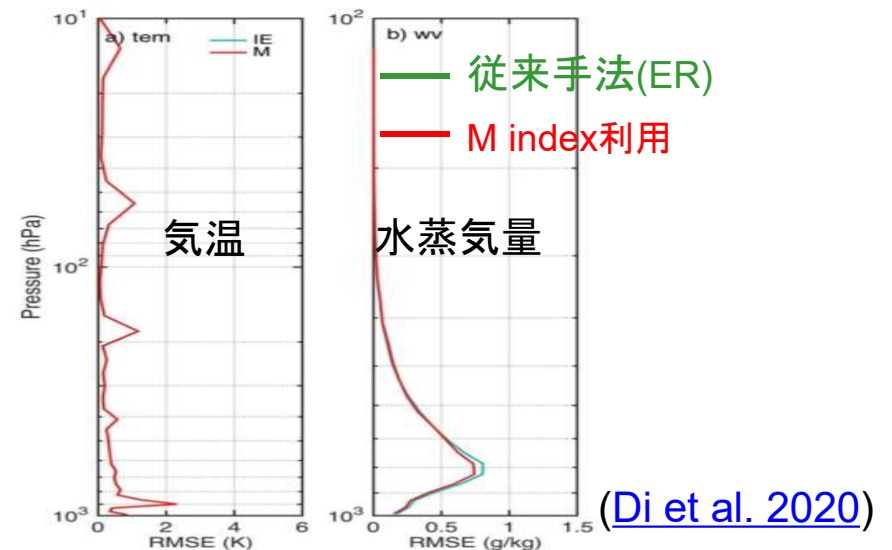
# 対流圏下層大気情報抽出の例 2

- 水蒸気量の時空間変動を考慮したチャンネル選択
  - 静止気象衛星では同じ場所を高頻度に観測可能
  - [Di et al. \(2020\)](#)は、情報量を利用したチャンネル選択(ER)に加え、時間変化情報(M index)も利用したチャンネル選択を提案
    - 時間変化情報も考慮することで下層水蒸気量の推定精度が改善

$$M = \min(l_1, l_2) \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{\min(l_1, l_2)} (J_{2,i} - J_{1,i})^2}{\sum_{i=1}^{\min(l_1, l_2)} J_{1,i}^2}}$$

M index: 各プロファイルのJacobian(J)の時間差分を表す

- 下付きの1..前回の観測時刻
- 下付きの2..今回の観測時刻
- i..鉛直プロファイルのレベル番号



ERA5を利用した  
1D-Varリトリバル誤差

1. 大容量データの取り扱い（情報削減・圧縮）
2. 対流圏下層大気情報の抽出
3. 雲域における同化
4. 観測とモデル特性を考慮した同化手法高度化



# 雲域における同化

- 目的・背景

- 地球の7割程度は雲域(e.g., [Wylie and Menzel 1999](#))であり、雲域を同化せず晴天域の利用のみでは同化可能な領域が限定される
- さらに、予測初期に誤差が成長しやすい領域は雲域と高い相関があるという指摘もある(e.g., [McNally 2002](#))
- マイクロ波観測では全天同化の現業利用が進んでおり([Eyre et al. 2021](#))、近年、雲の影響を受けやすい赤外観測においても雲域利用のための研究開発が進んでいる(e.g., [Li et al., 2022](#))

- 課題

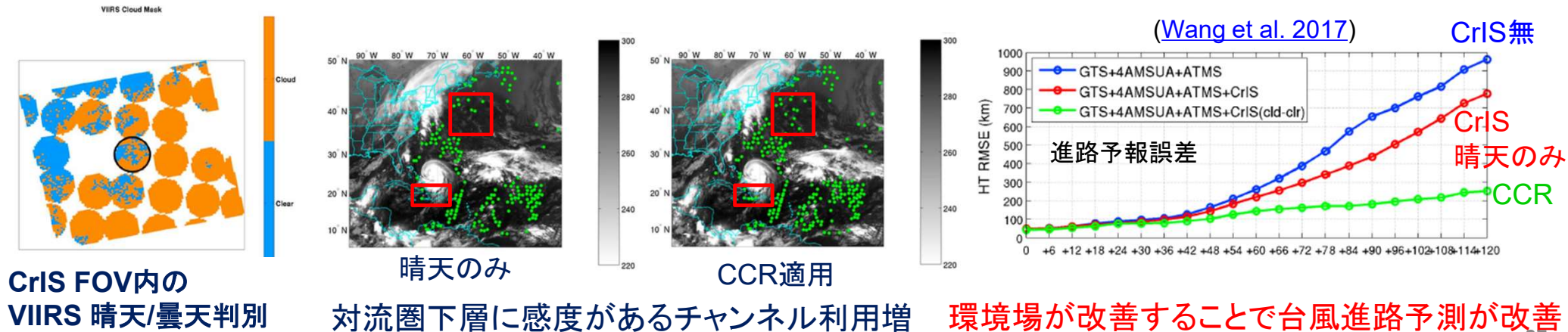
- 観測とモデルの表現の違いが大きい
  - 雲微物理量の表現、オーバーラッピング、水物質の生成消滅/位置ずれ...
- 放射伝達モデル(観測演算子)の非線形性、計算精度・コストの悪さ

# 気象庁における現状

- 晴天の(雲放射の影響がない)チャンネルのみを同化
  - Minimum Residual法([Eyre and Menzel 1989](#))による雲頂高度推定を用いた雲判定
    - 対流圏上・中層付近に感度のある気温チャンネルと大気窓チャンネルの2つのチャンネルを用いて雲頂高度の推定を行い、推定された雲頂高度より下層に感度のあるチャンネルを除く
  - 巻雲判別
    - 11 $\mu\text{m}$ と12 $\mu\text{m}$ チャンネル輝度温度差分 $>3\text{K}$ の地点を巻雲域とみなし対流圏以下に感度があるチャンネル(波数 $<680.1\text{cm}^{-1}$ )を除く
  - 11 $\mu\text{m}$ の観測輝度温度 – 晴天輝度温度差分によるQC

# 雲域での利用高度化の例 1

- 部分雲域で晴天放射量を推定(Cloud-Cleared Radiance; CCR)
  - 観測範囲内から部分雲の寄与を取り除き晴天放射量を推定して同化
  - 同様な手法は古くからリトリーブで利用(e.g., [Chahine 1977](#))。ただし、現時点でこの手法を採用している現業数値予報センターはない
    - 同一衛星搭載の高分解能な可視・赤外イメージャ(e.g., CrIS+VIIRS)をCCRに利用する手法が研究されている(e.g., [Wang et al. 2017](#), [Reale et al. 2018](#))
    - ただし、FOV内での水平一様性の仮定に難(e.g., [Di et al. 2021](#))



## 雲域での利用高度化の例 2

- 雲パラメータを推定して同化

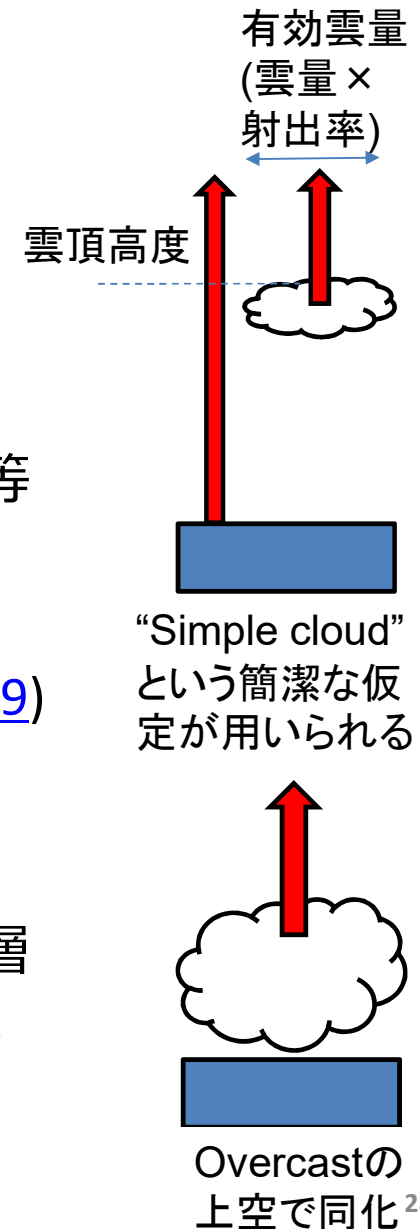
推定雲パラメータは”Sink Variable”とみなし同化時は固定

– 雲頂高度・有効雲量を事前に推定して同化

- Met Office([Pavelin et al. 2008](#))、Meteo France([Pangaud et al. 2009](#))等で採用
- 簡潔な仮定で雲放射の影響が少ない地点のみの利用に限られるため晴天利用時から～10%程度しか増えない(e.g., [Geer et al. 2019](#))

– 完全曇天(overcast)時の雲頂高度を推定して同化

- ECMWFで採用([McNally 2009](#))
- 完全曇天(FOV・モデル格子内が全域黒体雲)域では雲内部や多層雲のオーバーラッピング等の複雑な仮定をしなくてよく、雲頂高度推定精度が高いため想定外の誤差が入りにくい
- ただし、完全曇天とみなせる地点はかなり限られる(～10%)



# 雲域での利用高度化の例 3

- [Okamoto et al. \(2024\)](#)の手法による全天同化
  - 赤外に先駆けて進んでいるマイクロ波全天同化手法を踏襲 ([Geer and Bauer 2011](#), [Geer et al. 2019](#))
  - 雲の影響を定量化して観測誤差モデル等に考慮。種々の雲域での同化をカバー
  - IASIの水蒸気チャンネルのうち9チャンネルまで同化
  - 雲域も考慮した観測誤差行列の導入
- 気象庁では、ひまわり9号イメージャ水蒸気バンドにおいて同様な手法を用いた全天同化([Okamoto et al. 2023](#))の導入を進めている

([Okamoto et al. 2024](#))

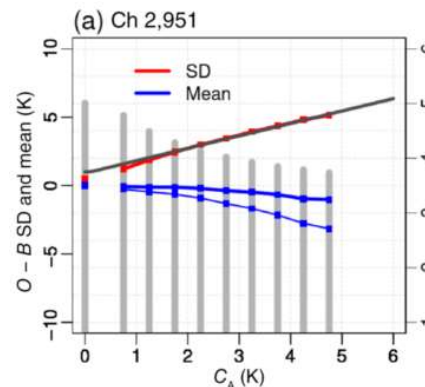
雲の影響を定量化して同化利用

$$C_A = \frac{|B - B_{\text{clr}}| + |O - B_{\text{clr}}|}{2}$$

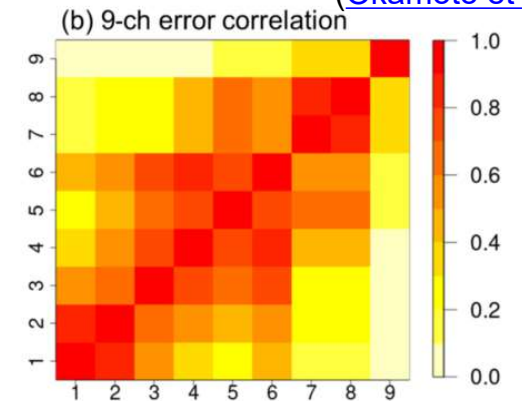
モデルに雲があると大きくなる      観測に雲があると大きくなる

観測誤差行列

$$R_{ij} = f^2 \sigma_i \sigma_j C_{ij}, \quad \sigma = g(C_A) = \begin{cases} g_{\text{clr}} & \text{for } C_A \leq C_{A_{\text{clr}}} \\ g_{\text{clr}} + \frac{g_{\text{cld}} - g_{\text{clr}}}{C_{A_{\text{cld}}} - C_{A_{\text{clr}}}} (C_A - C_{A_{\text{clr}}}) & \text{for } C_{A_{\text{clr}}} < C_A < C_{A_{\text{cld}}} \\ g_{\text{cld}} & \text{for } C_A \geq C_{A_{\text{cld}}} \end{cases}$$



雲の影響と標準偏差・バイアスの関係を定量化



水蒸気チャンネル9つの観測誤差相関行列

1. **大容量データの取り扱い（情報削減・圧縮）**
2. **対流圏下層大気情報の抽出**
3. **雲域における同化**
4. **観測とモデル特性を考慮した同化手法高度化**

# 観測とモデル特性を考慮した同化手法高度化

## • 目的・背景

- 観測・数値予報モデルはそれぞれが捉えている現象(物理量)の時空間スケールなどの表現が異なる
  - 表現は観測原理や数値予報モデル特性に依存
- 数値予報モデルに適切な初期値を作成するには、観測・モデル特性を把握し、適切に同化する必要がある

## • 課題

### – 観測とモデル特性に関連するデータ同化に必要な開発項目

- QC: 測器・モデルに起因したバイアス補正等 (Inteferogram, appodizationなど  
測器の特性・処理が複雑)
  - 正確な観測誤差・背景誤差行列の見積もりと適切な利用 (観測の空間間引き、  
平均処理(super-ob)も)
  - 高頻度同化可能なシステム構築、時間誤差相関の考慮
- 赤外サウンダの観測原理は複雑で情報量も多く、観測とモデル双方の理解を深めた上で同化していく必要がある

# 気象庁における現状

- バイアス補正
  - スキャンバイアス補正、変分バイアス補正（佐藤 2007）
- 空間的代表性(空間誤差相関)の考慮
  - 水平間引き→全球200km、メソ・局地45km
    - 空間誤差相関がないとみなせる距離に間引く
- 観測誤差行列
  - O-B統計値をもとに対角成分(観測誤差)を推定して利用
  - チャンネル間誤差相関を表す非対角成分は考慮しない
    - 観測誤差を大きく(インフレーション)することによりチャンネル間誤差相関の影響を軽減
- 同化頻度
  - 全球・メソ：4D-Varシステムにより1時間毎のスロットで同化
  - 局地：3D-Varシステムにより前3時間、1時間毎の予報・解析サイクルで同化



# 観測誤差行列利用方法の高度化の例

## 観測誤差行列利用高度化

### 観測誤差行列の見積もり・非対角成分の利用

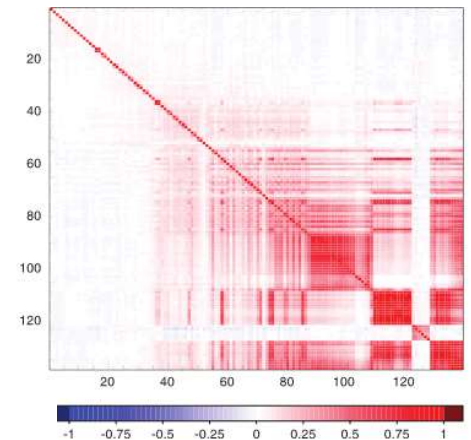
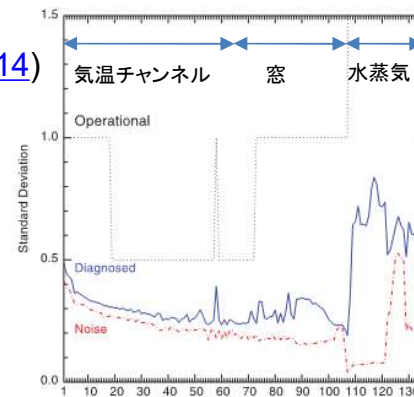
- 観測情報の数値モデルの適切な同化には、観測誤差行列：観測誤差(対角成分)・チャンネル間誤差相関(非対角成分)の適切な取り扱いが必要
  - [Hollingsworth and Lönnberg 1986](#)、[Desroziers et al.2005](#)の手法が広く利用され数値予報の改善にインパクト
    - e.g., [Weston et al. 2014](#), [Borman et al. 2016](#), [Bethmann and Collard 2021](#)
- 近年よく利用されるのはDesroziers et al. 2005の診断式であるが、行列のill-condition対策・最小値探索の収束速度向上のため条件数を考慮した調整(reconditioning)などを行って利用する必要がある

([Weston et al. 2014](#))

Desroziers et al. 2005の診断式

$$E[\mathbf{d}_a^o (\mathbf{d}_b^o)^T] = \mathbf{R},$$

平均[(観測-解析値)(観測-第一推定値)<sup>T</sup>]=観測誤差行列

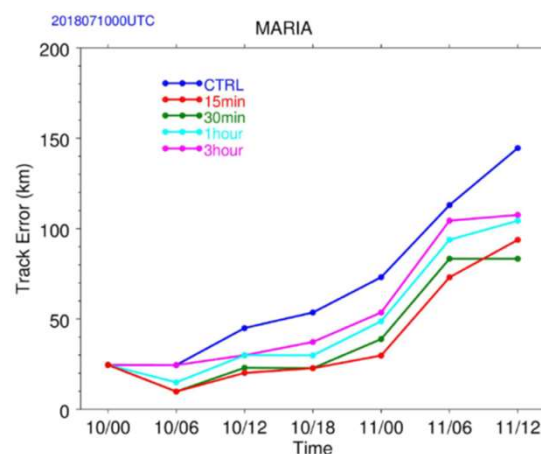
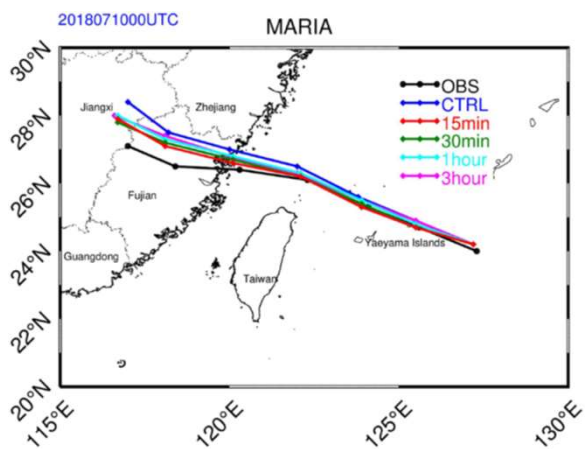


測器誤差(赤)、  
Desroziersの診断式(青)  
Met Officeでの観測誤差(点線)

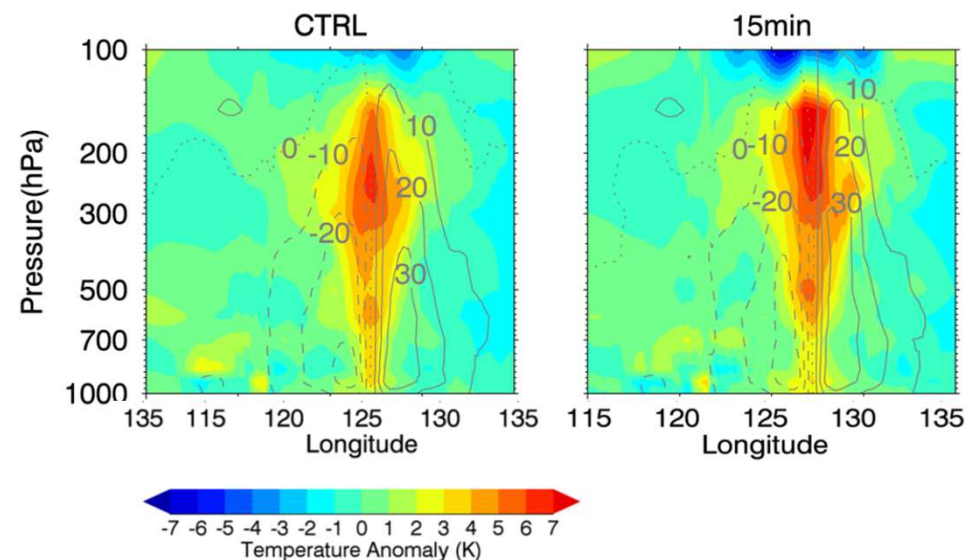
Desroziersの診断式による  
IASIの観測誤差相関行列

# 高頻度同化の例

- 静止気象衛星では同じ領域を高頻度に観測可能
  - 中国のFY-4A/GIIRSの気温チャンネルの高頻度同化 ([Yin et al. 2021](#))
    - 台風機動観測（15分毎）のインパクトを調査
    - 高頻度な同化は台風進路・強度予報を改善？
  - ただし、高頻度観測の適切な同化利用には時間相関の考慮や同化システム開発などの種々の課題



同化時間間隔を変えたときの台風進路誤差の変化



15分間隔同化した時の台風暖気核構造の変化

# まとめ

- 本講演では、次期ひまわり赤外サウンダ有効活用のため、気象庁および海外現業センターにおける赤外サウンダ利用の現状をまとめ、利用方法高度化を目指すための課題とそれに対応する先行研究のいくつかを紹介

- 現在でも赤外サウンダは数値予報に大きなインパクト。ただし...  
その観測を最大限に活用するためには更に利用高度化の余地がある

- 情報量が膨大
  - 冗長性を持つ数千を超えるチャンネルから数値予報の利用にとって最大限に情報を抽出
- 対流圏下層に感度があるチャンネルの利用、特に陸上ではまだ限定的
  - 陸面情報や時空間変動の大きな対流圏下層情報を適切に扱って同化する必要
- 雲域での利用は限定的
  - 観測とモデルの雲の表現の違い・取り扱いの難しさから、その特性を考慮した同化手法
- 観測と数値予報モデルの代表性を考慮した同化
  - 観測・モデル特性に応じて、バイアス補正、QC、観測・背景誤差設定等を適切に行う必要

高鉛直・水平分解能かつ高頻度なひまわり赤外サウンダ観測データを最大限に利用するためには、観測・モデル特性の把握・同化システム高度化等、同化手法高度化には観測とモデル双方の総合力が必要となる