

2020.12.4
日本科学者会議 第23回総合学術研究集会講演

人為起源温室効果ガスによる地球温暖化現象と 気候変動の問題について

中島映至
東京大学名誉教授
国立環境研究所衛星観測センター シニアアドバイザー

国際地球物理学・測地学連合 (IUGG)
国際気象学・大気科学協会 (IAMAS) 百周年
米国気象学会 (AMS)

● IUGG100, IAMAS100 articles

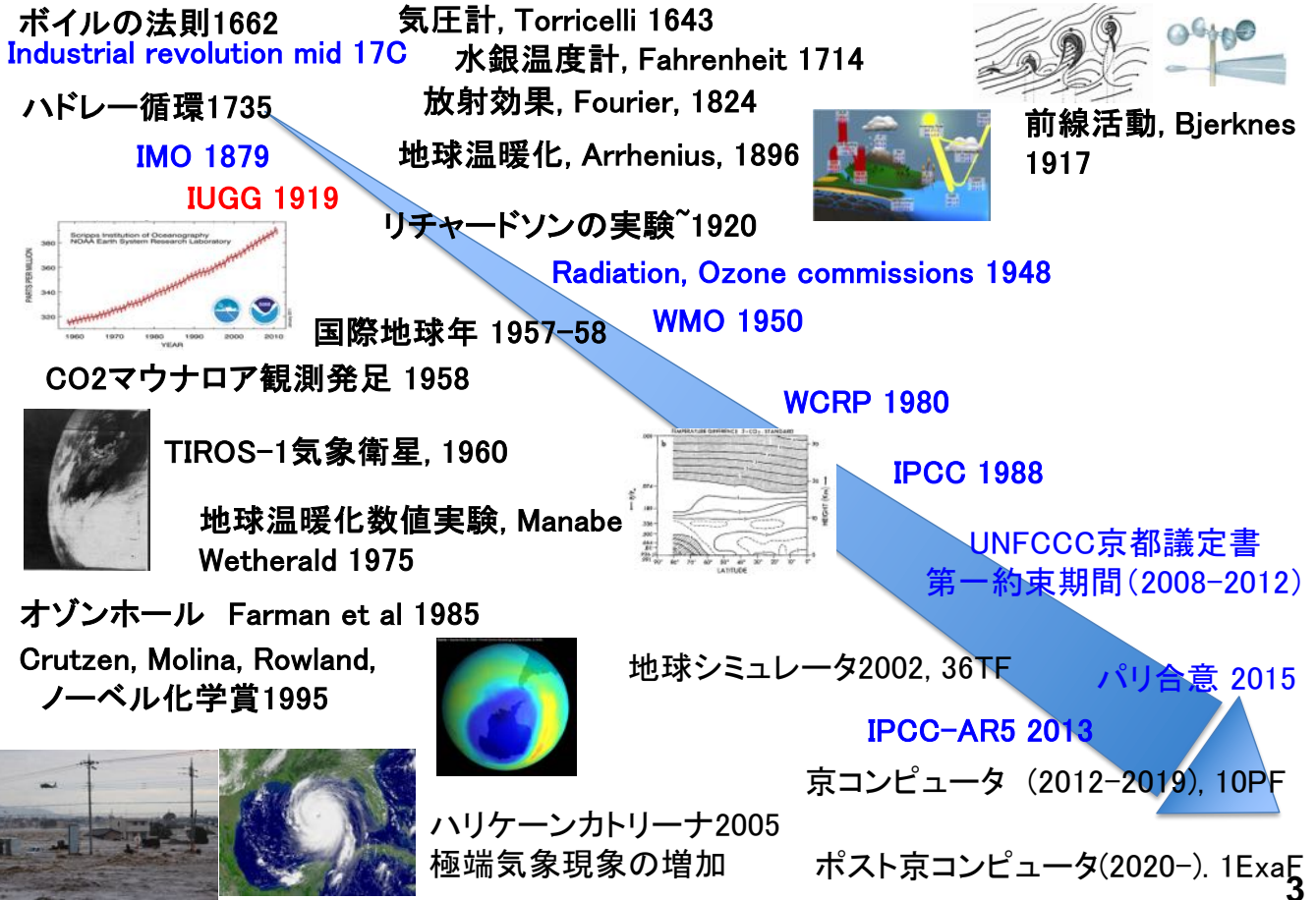
- Hist. Geo Space Sci., 10, 2019
- IAMAS: a century of international cooperation in atmospheric sciences by M.C. MacCracken and H. Volkert

● AMS100 celebration

- <https://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/AMSMONOGRAPHS-D-18-0020.1>
- 100 Years of Progress in Forecasting and NWP Applications by S.G. Benjamin, J.M. Brown, G. Brunet, P. Lynch, K. Saito, T.W. Schlatter



気象学と大気科学の発展(100周年記念！)



3

二酸化炭素の排出

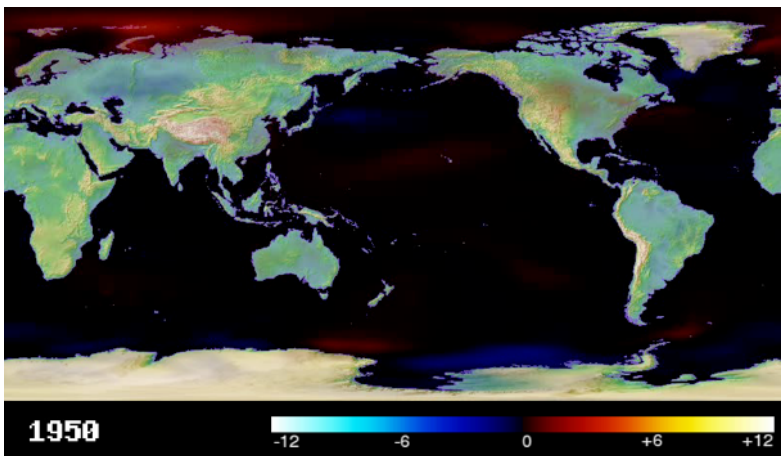
CO2: 6GtC/y (1990) 9 GtC/y (2018)
人口: 57億人 76億人



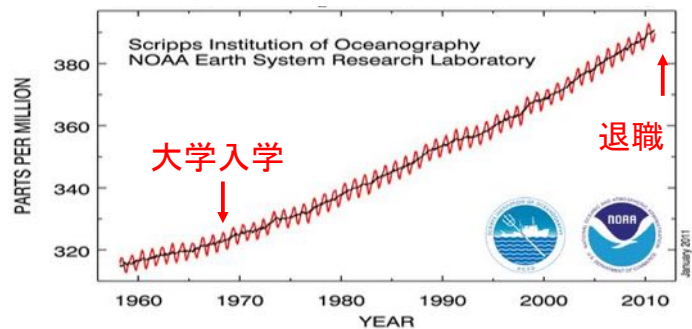
from Scripps Institute web

国際地球年 (1957-58); Charles D. Keelingによるマウナロアでの長期観測

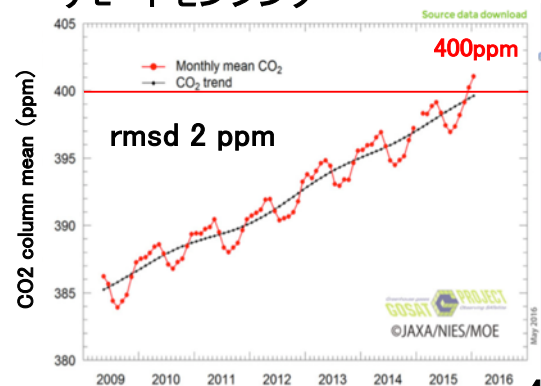
MIROC気候モデルによる地表気温変化(1900年からのA1Bシナリオ)



二酸化炭素濃度の長期地上観測(ppmV)



GOSAT衛星によるCO2気柱量のリモートセンシング



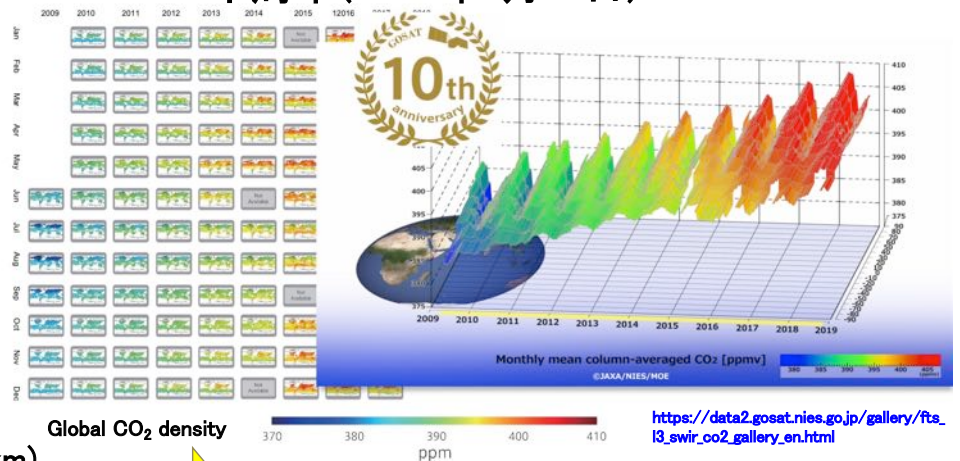
4



GOSATシリーズによる二酸化炭素の長期観測 十周年(2019年1月23日)

■ 達成成果

- 気柱CO₂
rmsd 2 ppm,
bias 0.33 ppm
(Crisp, CEOS-ACVC 2018)
- 気柱メタン
- クロロフィル蛍光



軌道: 13:00 (666km/613km)

GOSAT (いぶき, 2009)

FTS: CO₂, CH₄, O₂, H₂O
0.76–0.78; 1.56–1.72; 1.92–2.08; 5.6–14.3 μm
FOV 10.5km, ±20°AT, ±35°CT
CAI: 5波長、雲・エアロゾルイメージャー

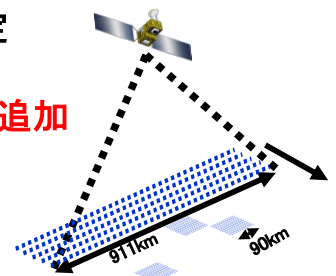
GOSAT-2 (いぶき, 2018)

FTS2: COを追加
0.75–0.77; 1.56–1.69; 1.92–2.38; 5.5–8.4; 8.4–14.3 μm
FOV 9.7km, ±40°AT, ±35°CT
インテリジェントポインティング
CAI2: 10波長、前方・後方視

GOSAT-GW (JFY2023)

大都市・排出源の特定
UNFCCCパリ合意
ストックテーク、NO₂を追加

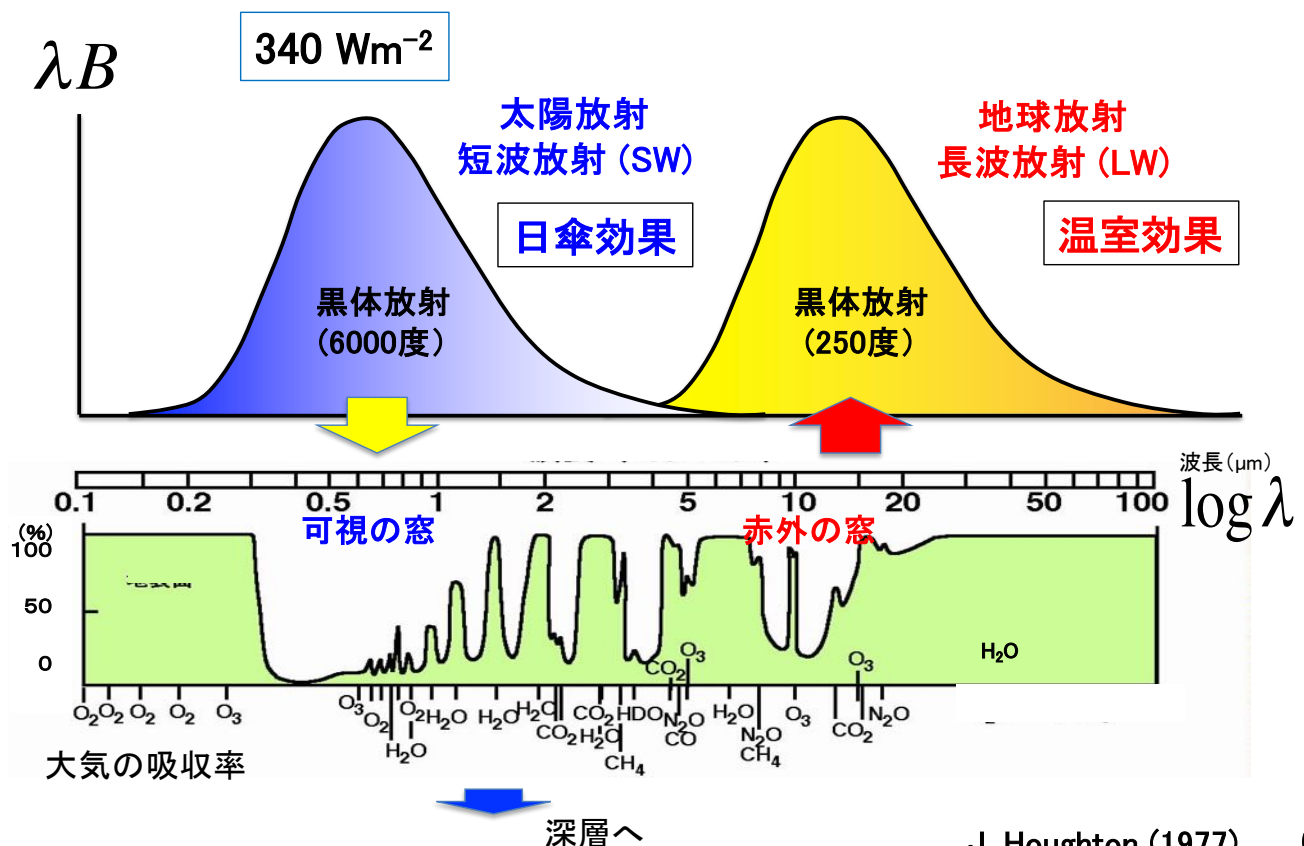
TANSO-3 (MOE-NIES) &
AMSR3 (JAXA)
回折格子分光



FOV: 10km × 92、3km × 30

5

太陽放射と地球放射



6

産業革命前からの放射強制力(1750-2011)

人為起源物質の放射強制力

- よく混合された温室効果ガス
- ・ 評価はほぼ確定

+3.00

- 短寿命気候強制因子(SLCF)
- 短寿命気候汚染物質(SLCP)

+0.18

- エアロゾル

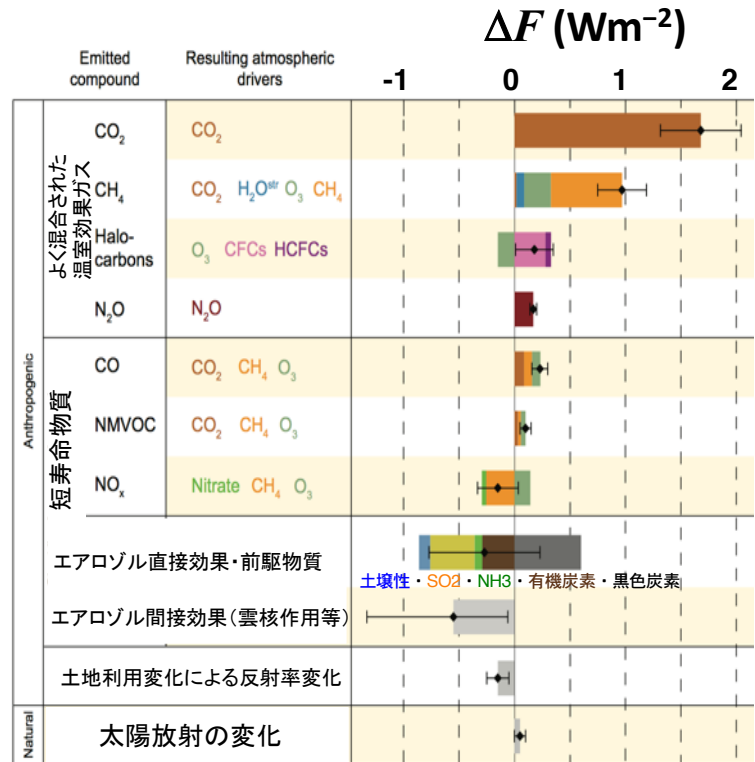
- ・ 硫酸塩等は負
- ・ 黒色炭素(BC)は正
- ・ 直接、雲への間接効果
- ・ 正味で負、30%を相殺
- ・ 評価誤差大

-0.82

-0.15

+0.05

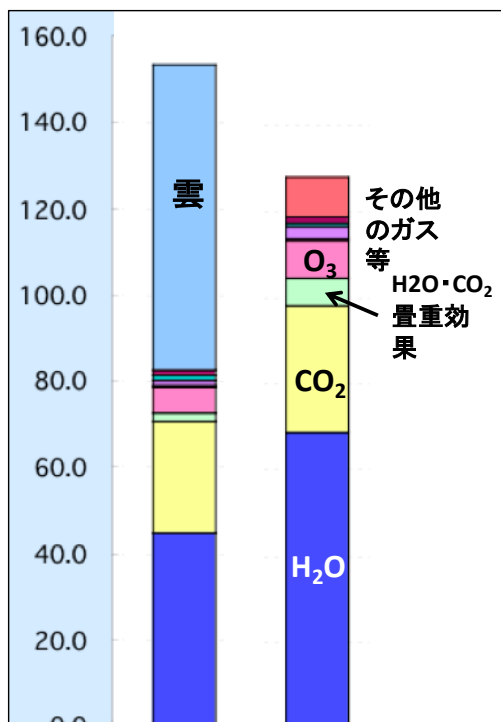
合計: **+2.26 Wm⁻²**



IPCC-AR5 (2013)

7

地表面から放出された熱放射の吸収量(W m⁻²)

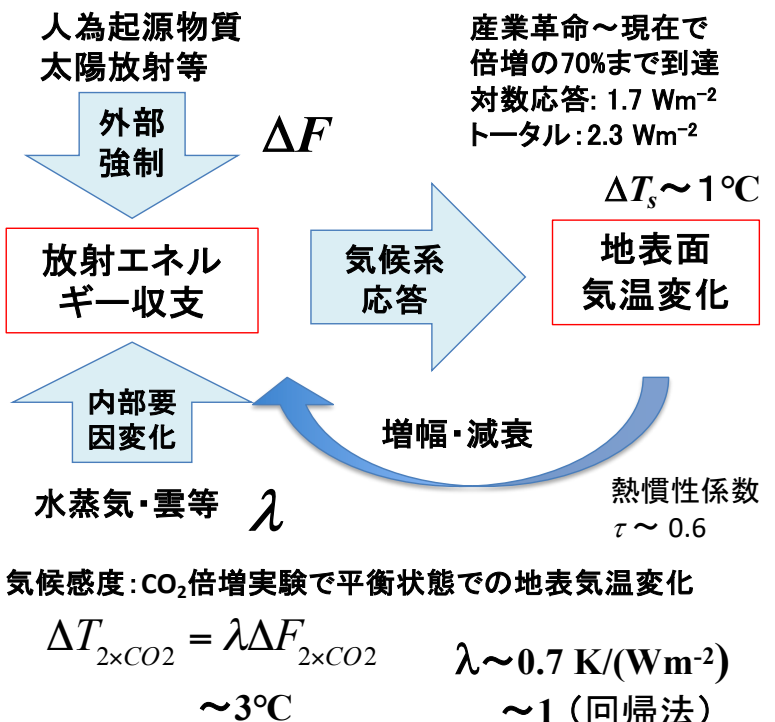


曇天時 晴天時
気象学会地球温暖化書籍(2014)

放射強制力の問題

$$\Delta F_{2\times CO_2} \sim 3.7 \text{ Wm}^{-2}$$

3.4 Wm⁻² (回帰法)



気候感度の問題

平衡気候感度係数

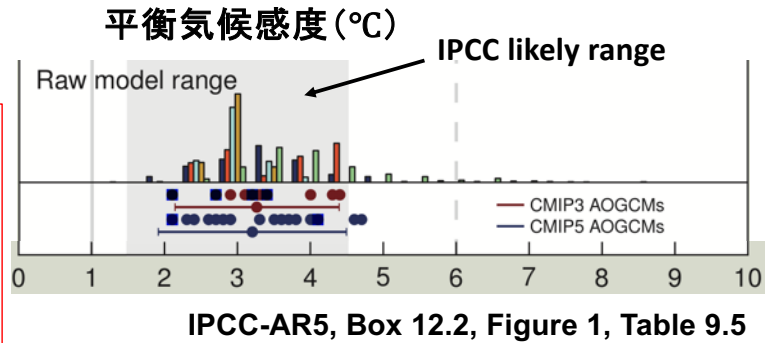
8

気候感度の算定

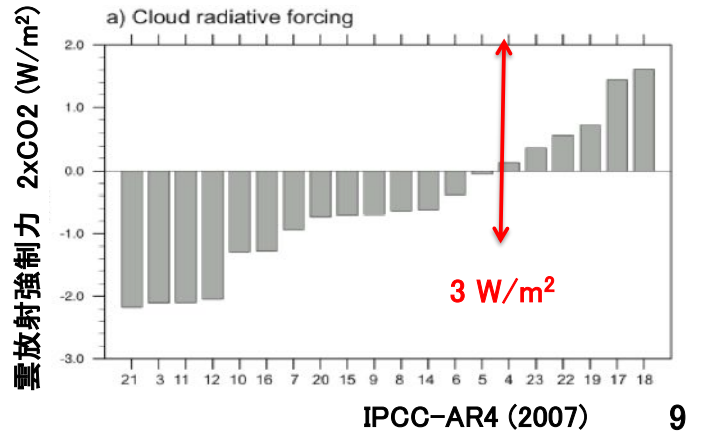
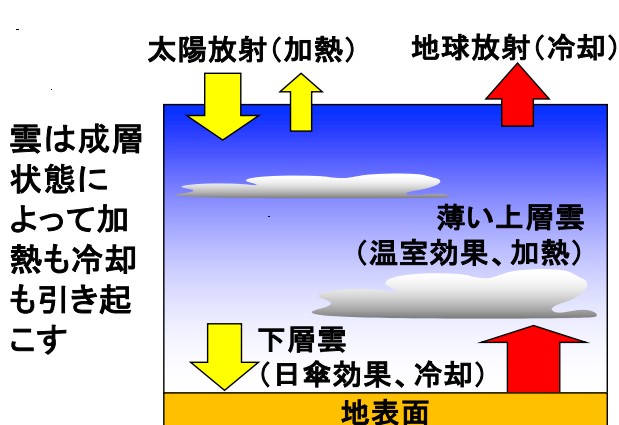
WCRP(世界気候研究プログラム)
気候モデル比較実験結果

平衡気候感度 $\Delta T_{2\times CO_2}$

実験	CMIP3(2010)	CMIP5(2013)
IPCC	AR4	AR5
モデル数	24	64
平均	3.3°C	3.2°C
範囲	$\pm 1.1^\circ\text{C}$	$\pm 1.3^\circ\text{C}$



最大のモデル不確実要因は雲



9

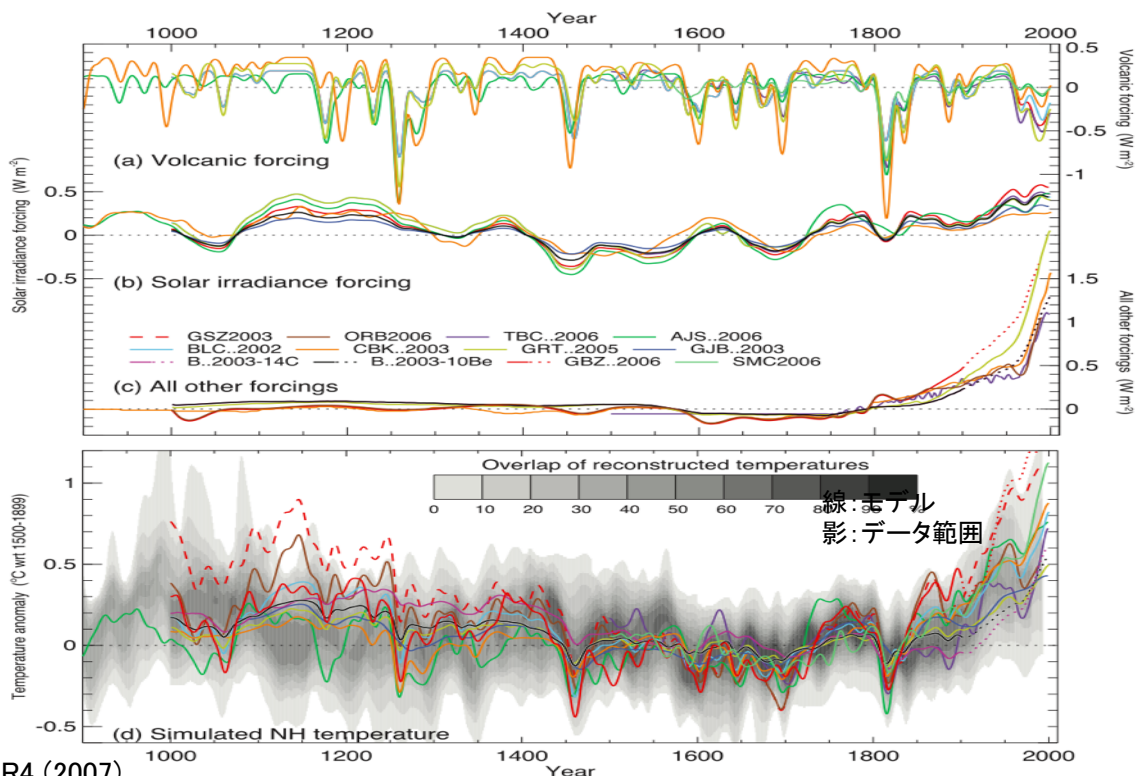
温暖化現象評価に関する議論

ホッケースティック論争

- 火山活動
- 中世の小氷期: 14世紀半ば~19世紀半ば
- マウンダー極小期(17世紀)

放射強制力偏差 (Wm^{-2})

温度偏差 ($^\circ\text{C}$)

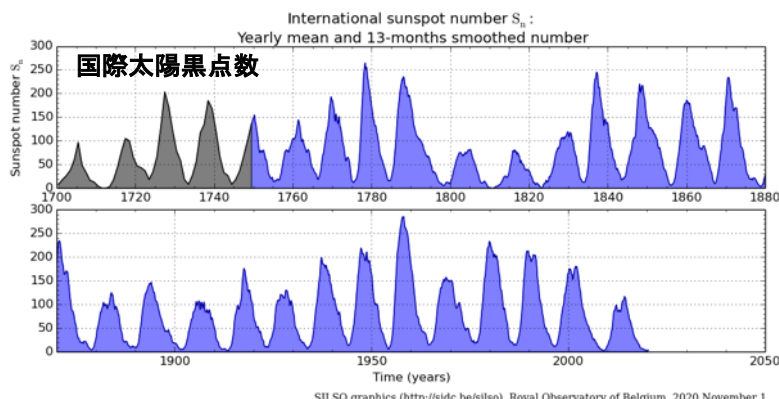


IPCC-AR4 (2007)

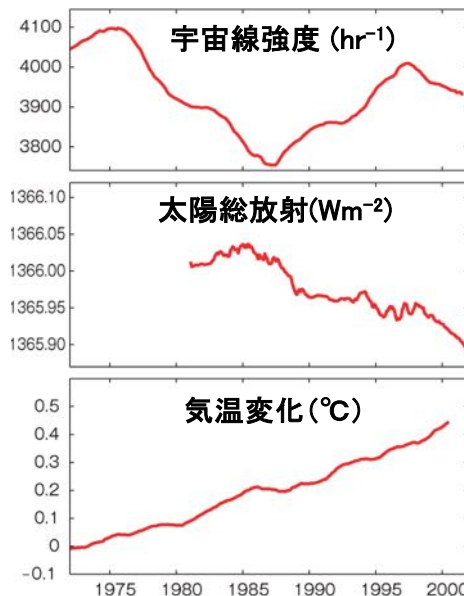
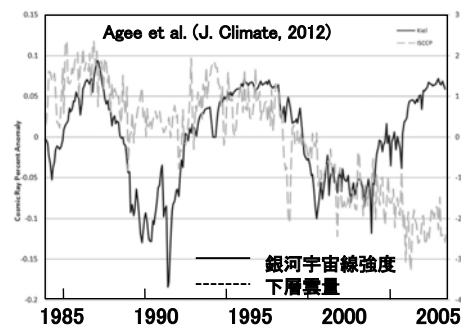
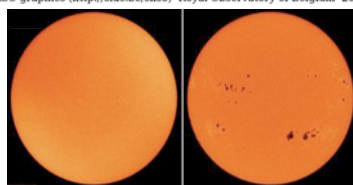
10

太陽活動と気候変動

- 静かな太陽: マウンダーミニмум、17世紀の小氷期
- 太陽活動は1985年頃から減少、しかし気温は上昇
- 最近の顕著な極小、2007年7月
- 銀河宇宙線と地磁気活動: 雲生成の可能性 (Marsh&Svensmark, 2001)
- 雲核効果: 大気汚染物質 > 宇宙線起源イオン



Left: A photo of the sun taken Sept. 27, 2008. Right: The sun on Sept. 27, 2001.
(Credit: ESA/NASA Solar and Heliospheric Observatory (SOHO))
<http://www.sciencedaily.com/releases/2008/10/081008184638.htm>

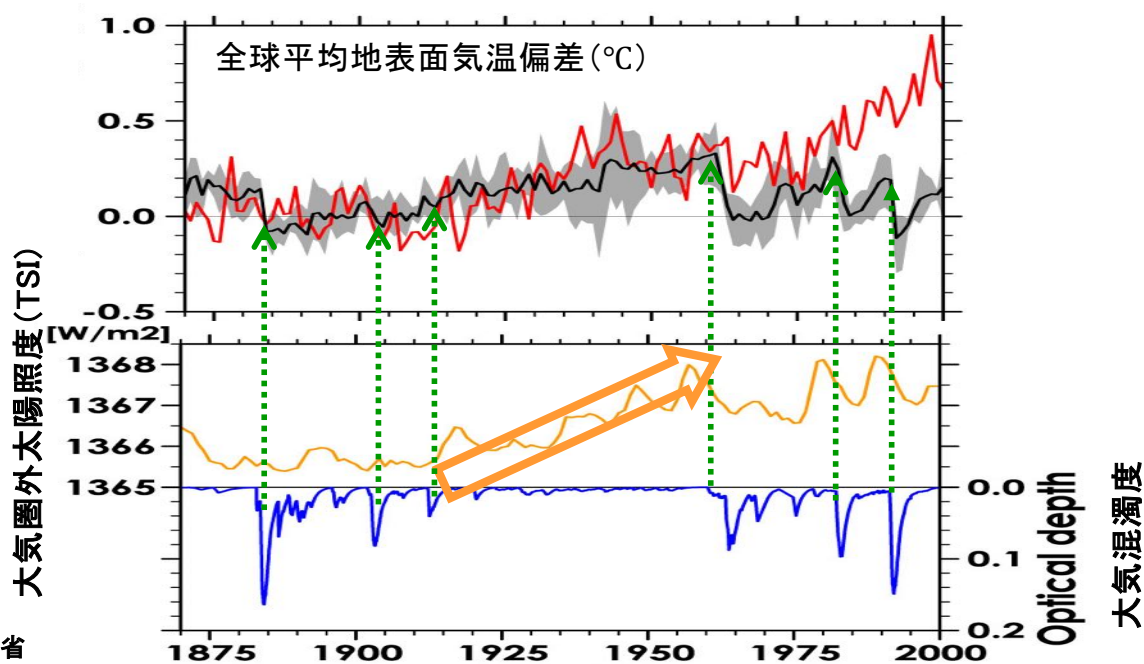


(Lockwood and Frohlich (2007))
約11年周期の変動を平均化

11

最近百年スケールの気候変動の理解

- IPCC第4次評価(2007): 気候システムの温暖化は明白である(unequivocal)
- 最近の外部要因: 温室効果ガス、大気汚染(エアロゾル)、火山活動、太陽照度
- 不確実要因: エアロゾル直接・間接効果(放射強制)、雲モデリング(気候感度)



二酸化炭素による温暖化：不明な冷源（ミッシングシンク問題）

- Charlson et al. (Science '92): 硫酸エアロゾルの直接効果

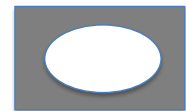
-1.3 Wm⁻²

- 2000年代の解釈： 直接効果（ススのため減少）： -0.5 Wm⁻²

雲への第一種間接効果： -0.7 Wm⁻²

- Sato & Suzuki (Science, 2019): 衛星観測と高解像度モデルによると間接効果もさらに小さい可能性がある→冷源問題の再来？

1990年代の解釈



エアロゾルの直接効果のみで冷却と解釈



2000年代の解釈



ススの存在のために、エアロゾルの直接効果は小さく、エアロゾルによる雲変化（間接効果）で冷却と解釈

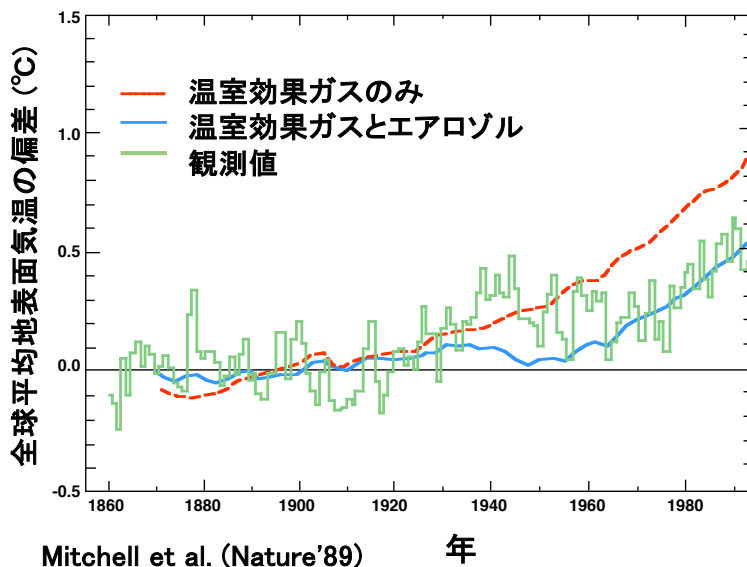
通常：大粒の水雲

間接効果：エアロゾルが雲核になって小粒の水雲



反射率が増える、雨も減る

13



全球大気汚染とメガシティの時代

- 2025年までに世界人口の60%が都市環境に住む
- 人類紀 (Anthropocene by P. Crutzen)

NO₂ from OMI/Aura
Nitrogen Dioxide (10¹⁵ molecules/cm²)



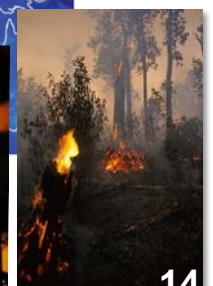
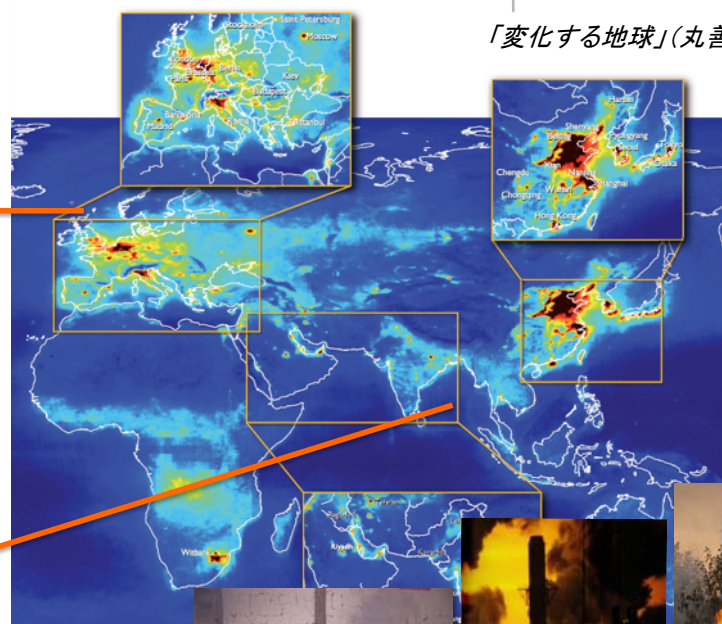
「変化する地球」(丸善)から



航跡雲（エアロゾル間接効果）



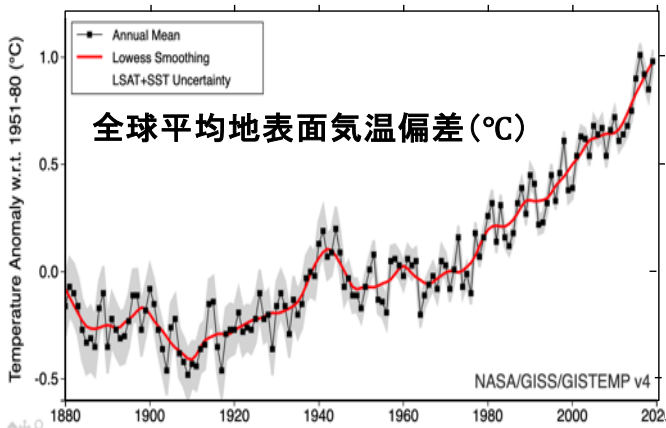
エアロゾル（エアロゾル直接効果）



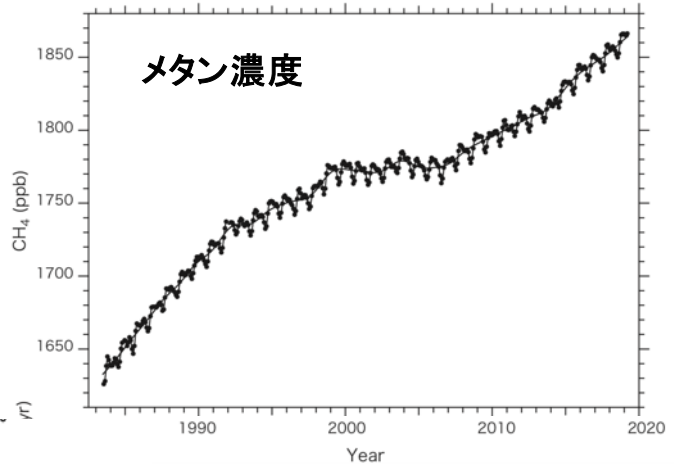
14

2つのHiatus(中断)現象

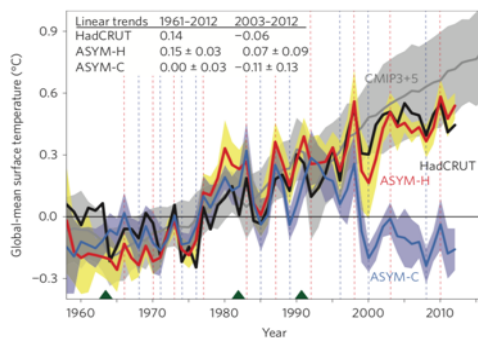
15



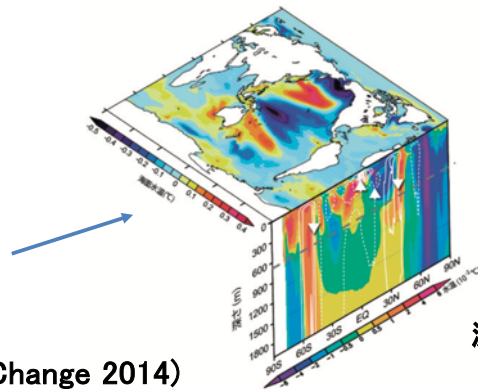
https://data.giss.nasa.gov/gistemp/graphs_v4/



T. Nakazawa
(Proc.Jpn.Acad.'20)

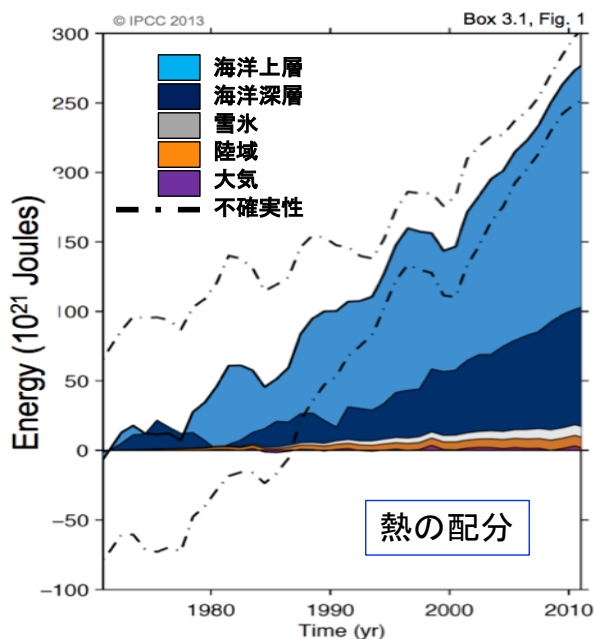


Watanabe et al. (Nature Climate Change 2014)

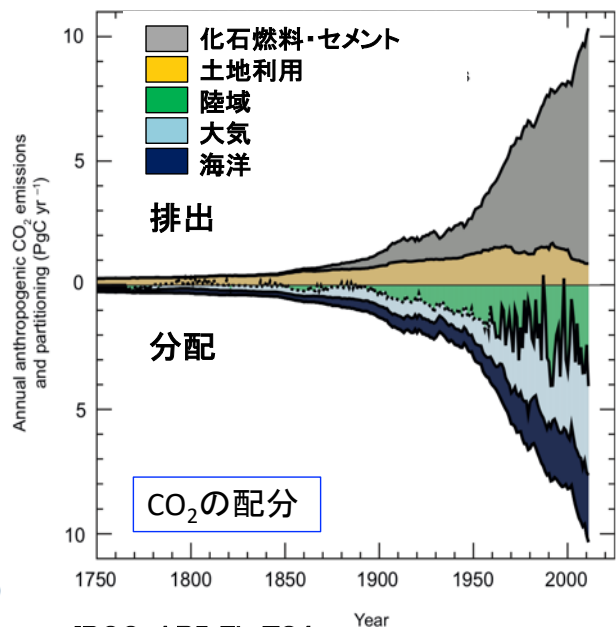


二酸化炭素と熱の排出・吸収の収支

- 熱の深層への蓄積は進んでいる。大気の貯熱量は海洋の千分の1。
- ハイエイト現象はあるが、人為起源温暖化物質と地表面気温は増加中。
- CO₂のミッシングシンク問題: 初期の評価では、人為起源CO₂の排出量と比べて、大気・海洋・陸域の吸収量の和は年間1ギガトン以上不足していた。最近の評価では陸域植生はネットとして吸収で増加中 (T. Nakazawa, Proc.Jpn.Acad.'20)。



IPCC-AR5, Ch3.Fig.1

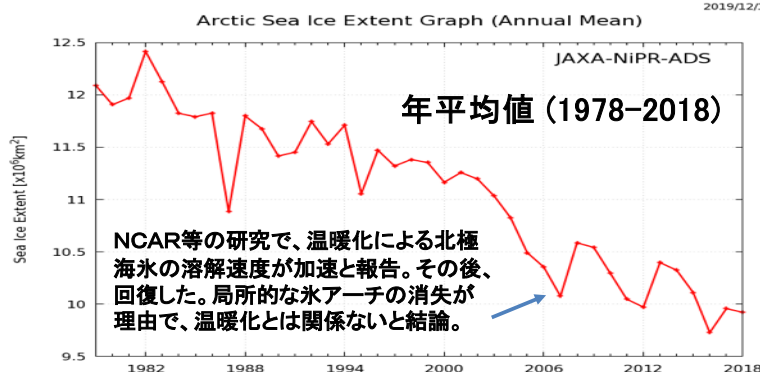
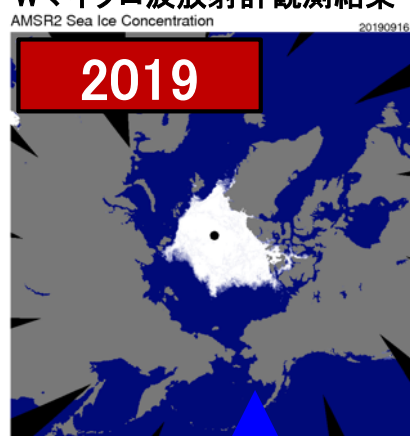
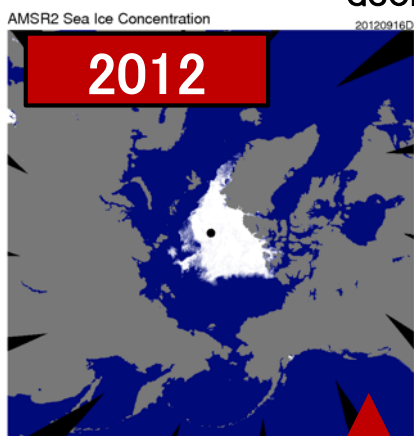
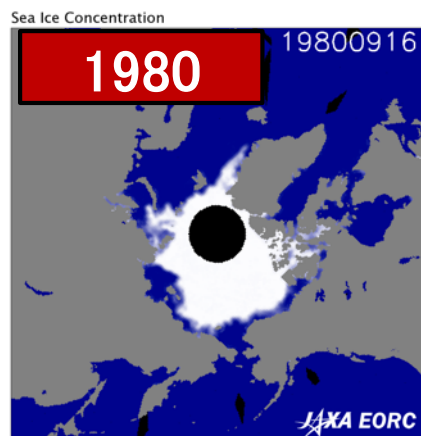


IPCC-AR5 Fig.TS4

16

北極域の海氷面積: 2019年に2番目の最小を観測

GCOM-Wマイクロ波放射計観測結果



衛星観測レコード上、最小面積を記録

衛星観測レコード上、2番目の最小値

地球のカナリア

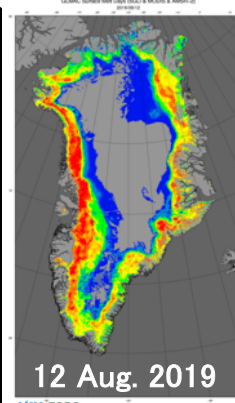
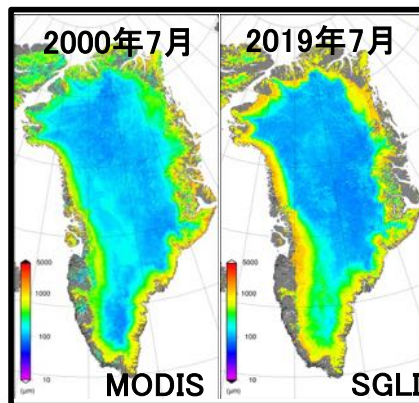
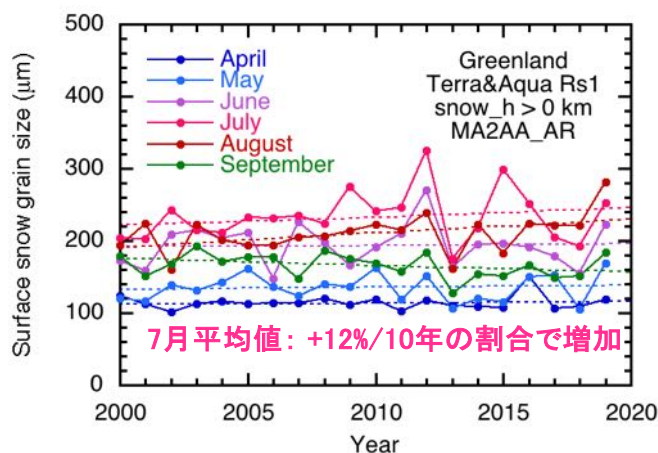
JAXA/EORC資料 17

グリーンランド氷床表面の変化

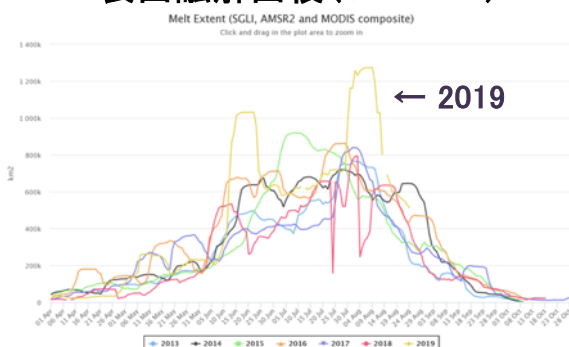
JAXA/EORC資料

衛星から求めた積雪粒径の経年変化

表面融解面積

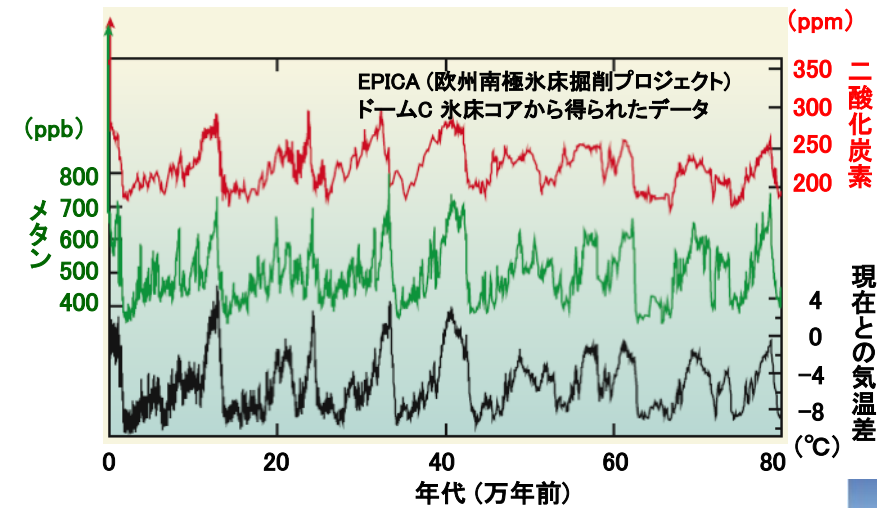


表面融解面積 (JASMES)

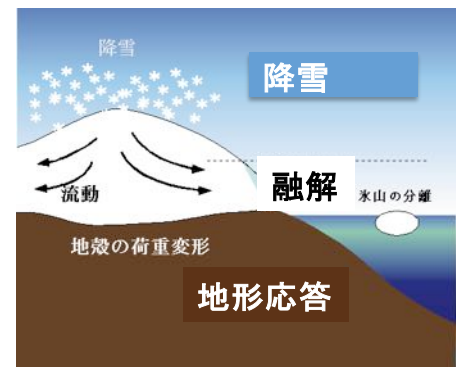
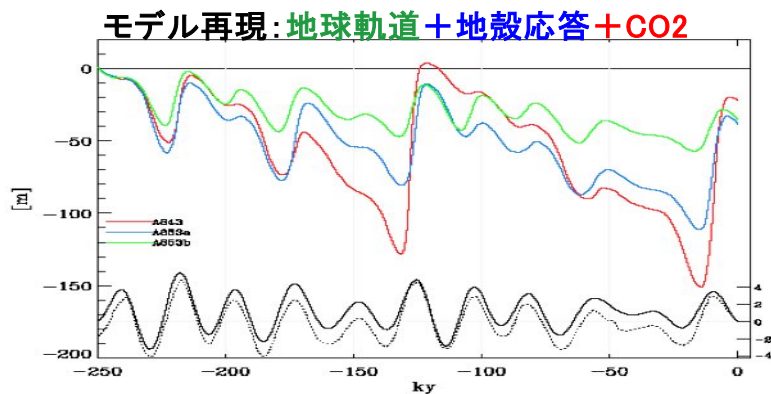


- ✓ 1990年代後半からグリーンランド氷床の質量損失が増加
- ✓ それに伴う海面上昇への寄与は現在約22%と見積もられ、今後増加が予想
- ✓ 気温上昇→氷床表面の積雪粒径が増加(上図)→表面アルベド低下→融解が加速
- ✓ 2000年以降、2012年は最大融解量、2019年は2位の融解量を記録(右図)

数万年スケールの気候変動



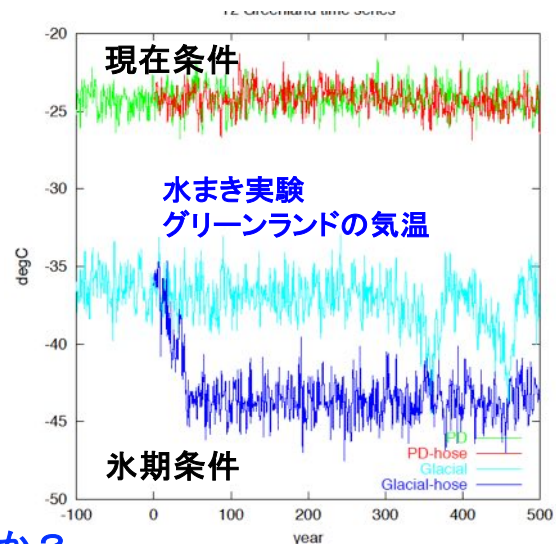
ミランコビッチサイクル (1920)
 歳差: 19. 23kyr
 赤道傾斜角: 43 kyr
 離心率: 100kyr



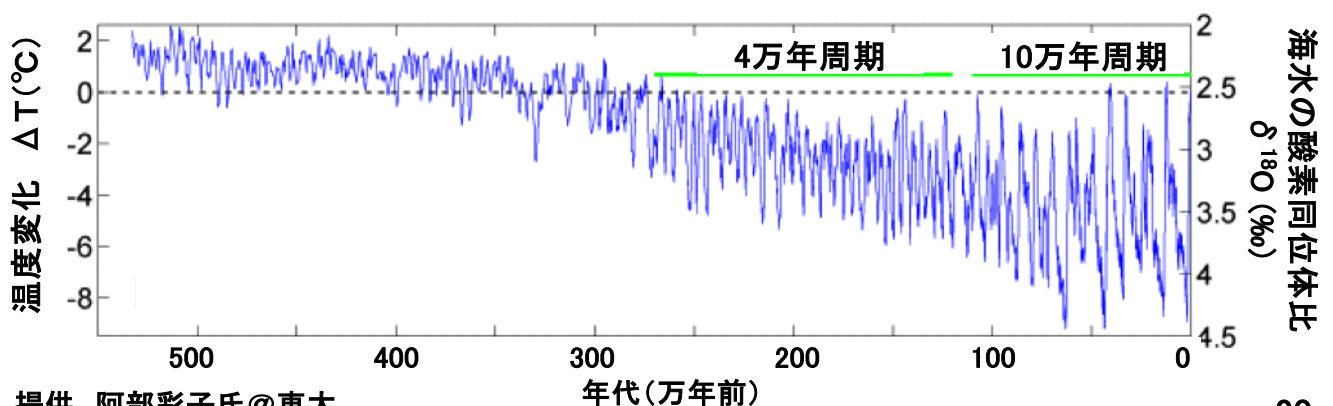
Abe-Ouchi+ (Nature' 13)

19

氷期・間氷期サイクルの遷移



北大西洋深層水、コンベアベルトは止まるか？



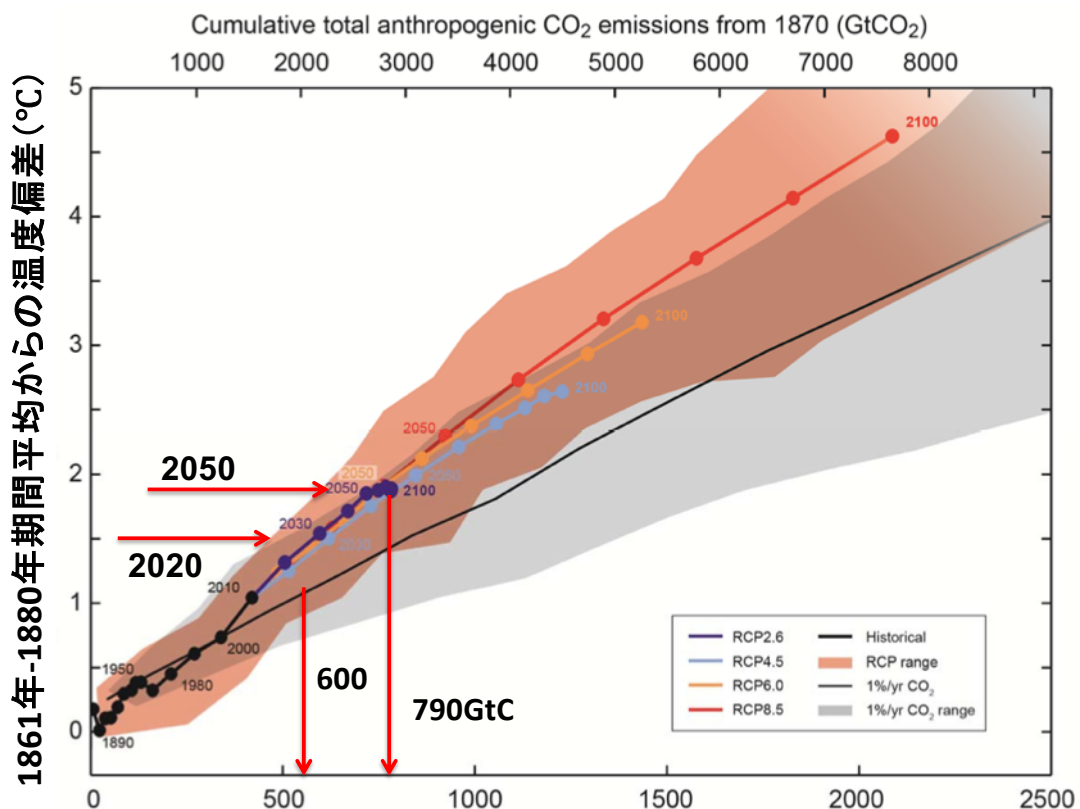
提供 阿部彩子氏@東大

20

IPCC評価活動

- UNEPとWMOが1988年に共同設置
- 研究者のボランティア評価活動: 評価報告書(1~5次)と特別報告書、6次作成中
- policy-relevant, but not policy-prescriptiveな科学的情報の提供
- 査読システム: 専門家査読 (1回目) → 専門家・政府査読(2回目)
- 不確実性インデックスの導入(第3次から)
 - AR4: 5-95%の誤差バー、科学的信頼度(LOSU): 高、中、中低、低、極低(評価しない)
- 批判
 - Hockeystick論争: 近年の気温の急増データ改ざん批判→外部科学評価パネル調査は故意のデータ操作は無かったと結論
 - 第4次評価報告書WG2でのヒマラヤ氷河消滅時期の評価の一部は科学的根拠がないという批判: IPCC声明、標準の評価手続きが守られなかった、手続きを再度確認する。
- 2010年: 国際科学会議(ICSU) 声明、国連事務総長とIPCC議長がInter Academy Councilにレビュー依頼
 - データの質の保証と品質管理、文献に関するガイドライン、査読手続き、科学的見解の取り扱い、発見されたエラーの修正手続き
 - IPCCプロセスの分析: 運営、管理、UNEP, WMO, UNシステム、その他の利害者の役割。評価システムの効率化と強化。
 - メディアとの適切なコミュニケーション: 社会による知見の理解の促進

二酸化炭素積算排出量と気温偏差の関係



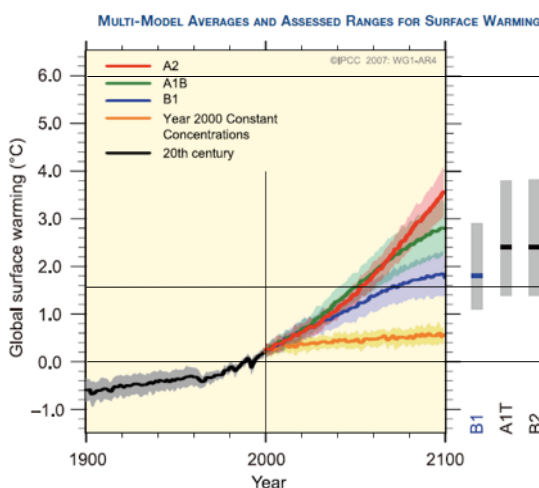
対策の進展

- COP3京都議定書(1997)
 - ・ 数値目標の導入:2008-2012の平均排出量を1990年比の95%にする
 - ・ 市場メカニズムの導入 メカニズム):共同実施(JI: Joint Implementation), 温室効果ガス濃度安定化の クリーン開発メカニズム(CDM: Clean Development 、排出量取引(ET: Emission Trading)
- COP21パリ協定(2015)
 - ・ 産業革命前から2度目標、1.5度努力目標
 - ・ 先進国と途上国が一体となった体制
 - ・ グローバルストックテーク(棚卸し) 2023年
- 米カリフォルニア州:2035年までにガソリン車ゼロ
- 日本政府
 - ・ 2018: 気候変動適応法
 - ・ 気候変動適応情報プラットフォーム(A-PLAT)の設置
 - ・ 2020: 2050年までに全体として炭素排出ゼロ(カーボンニュートラル)、G7で日本と米国だけがそれまで宣言してなかった
- 中国政府:2060年までにカーボンニュートラル
- How?: 原発、エネルギーミックス、削減技術革新、モデル予測...

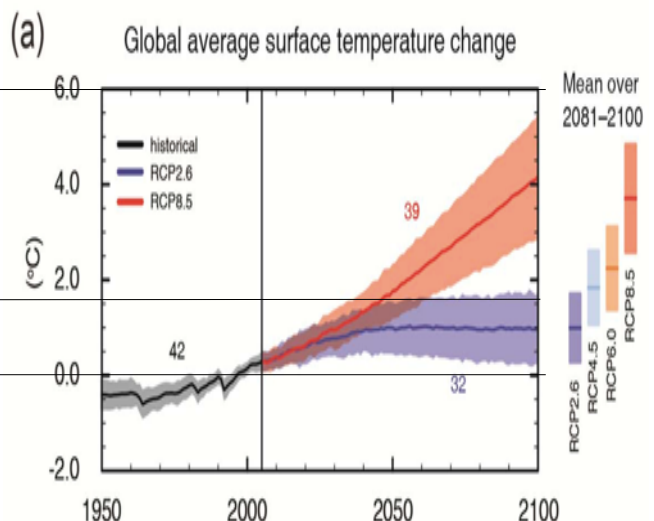
23

気候変化予測

- 二酸化炭素の大気中寿命は長いので、今(2010年)すぐ対策を取っても2030年頃まで顕著な気温低下減少は期待できない。
- 温暖化緩和策を取らない限り、21世紀終わりまでに3℃～5℃の全球平均地表気温の増加が発生する可能性。
- 変化メカニズムの理解が進んでいる。
- 不確実性は排出シナリオと自然モデリングで同程度存在する。



IPCC-AR4 (2007)

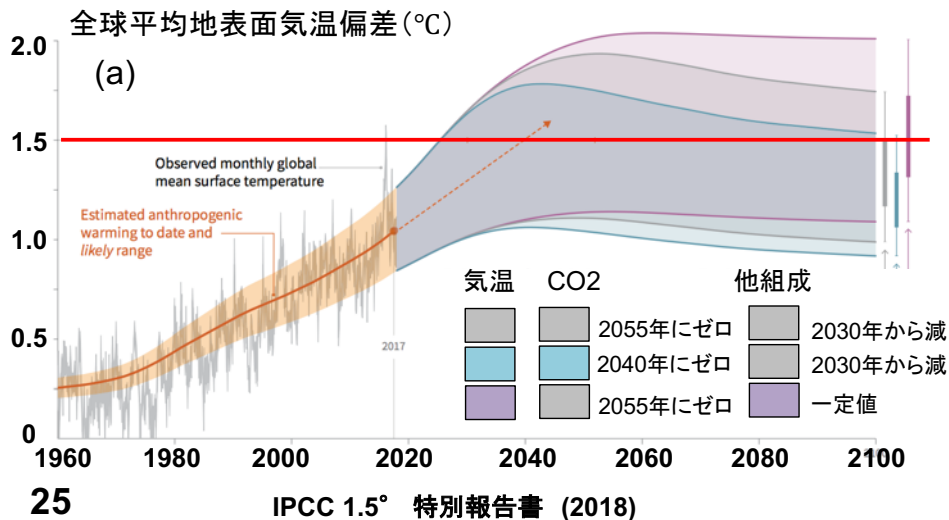


IPCC-AR5 (2013)

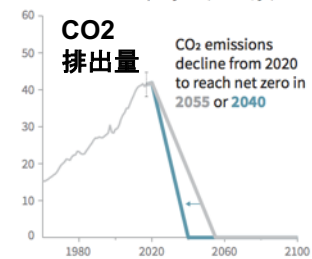
24

IPCC 1.5度特別報告書 (2018)

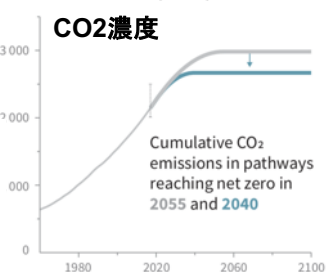
- 2050年頃までにCO₂と他物質の排出ゼロを行えば、若干のオーバーシュートはあるものの産業革命前からの昇温を1.5℃以下に抑えられる。
- 黒色炭素・対流圏オゾン統合評価書 (UNEP 2011)
 - ・ 短寿命気候汚染物質 (SLCP) の概念: メタン、対流圏オゾン、黒色炭素等
 - ・ 大気中寿命が短いSLCP削減は-0.5℃が早期に実現



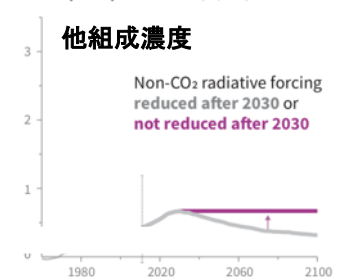
b) Stylized net global CO₂ emission pathways
Billion tonnes CO₂ per year (GtCO₂/yr)



c) Cumulative net CO₂ emissions
Billion tonnes CO₂ (GtCO₂)



d) Non-CO₂ radiative forcing pathways
Watts per square metre (W/m²)



気候と大気浄化の国際パートナーシップ (2012)



Climate & Clean Air Coalition

- Voluntary, partner-led "Coalition of the Working" - governments, IGOs, NGOs and private sector
- First global effort to treat SLCPs as a collective challenge - based on science & initiatives - catalytic
- Complementary to global efforts to reduce CO₂ - and to improve health and crop yields



26

温暖化と大気汚染の両方の緩和に貢献



大気汚染エアロゾル削減の効果

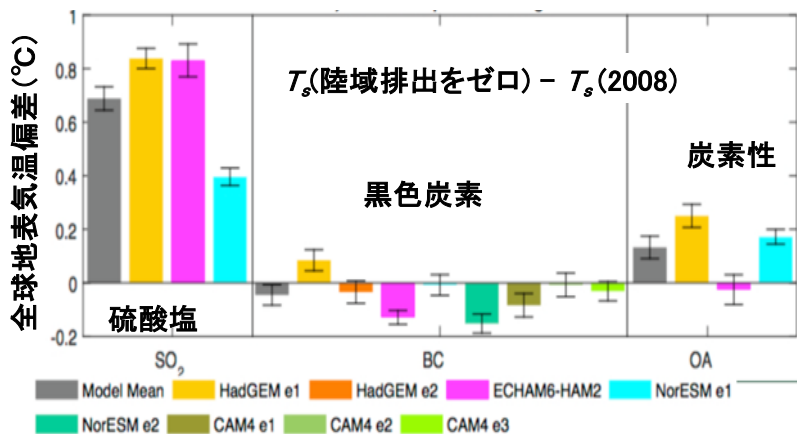
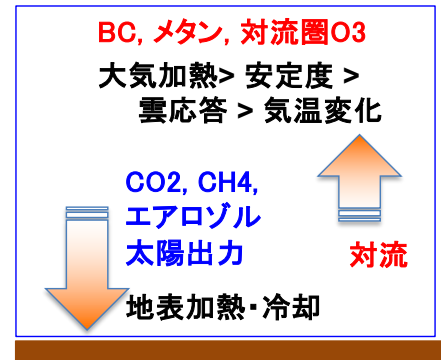
	ΔF Wm^{-2}	$\Delta T(^{\circ}C)$ $\gamma = 1$ $\lambda = 0.7$	モデル計算値
硫酸塩	-0.4	-0.28	-0.8
黒色炭素	+0.6	+0.42	+0.1

$$\gamma = \Delta F_e / \Delta F_i$$

$$\lambda = \Delta T / \Delta F_e$$

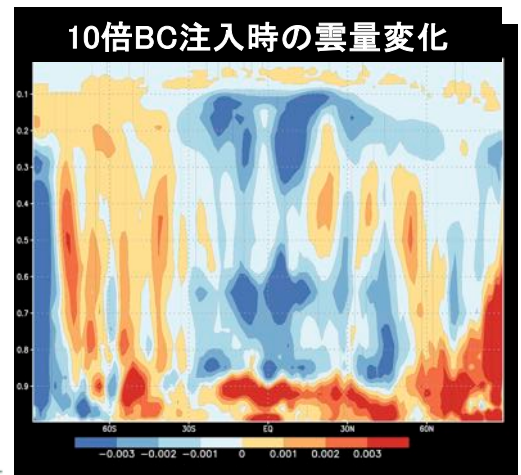
雲への間接効果で大きな冷却

大気が安定化、下層雲が増えて冷却、温暖化を相殺



27

Stohl et al. (ACP'15)



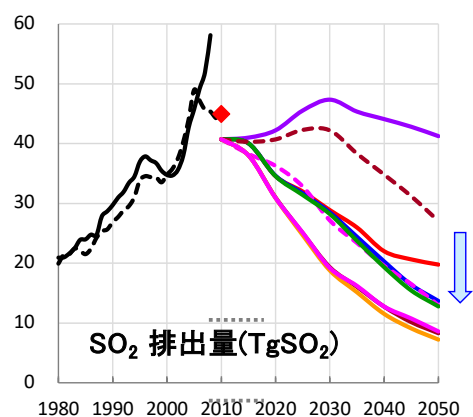
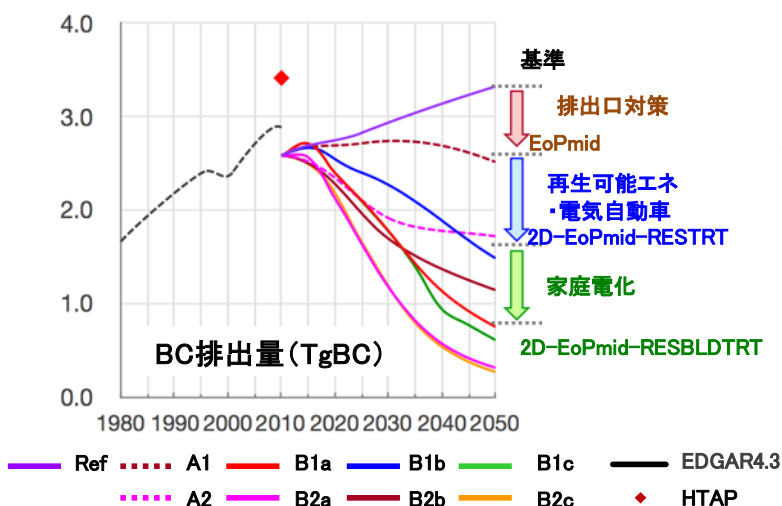
Takemura & Suzuki (SciRep'19)

Suzuki & Takemura (JGR'18)

SLCP削減シナリオの作成

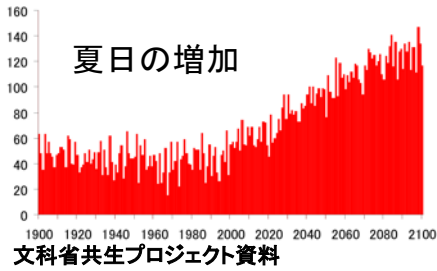
28

- 一律50%削減では、かえって温暖化
- 適切な組み合わせ削減が必要
 - BCの大幅削減
 - 適度な硫酸塩エアロゾル削減
 - NOx削減はメタン寿命を延ばすので、炭素系物質(COやVOC)の同時削減が必要
 - メタン削減はメタン寿命減少、対流圏オゾン削減で効率的

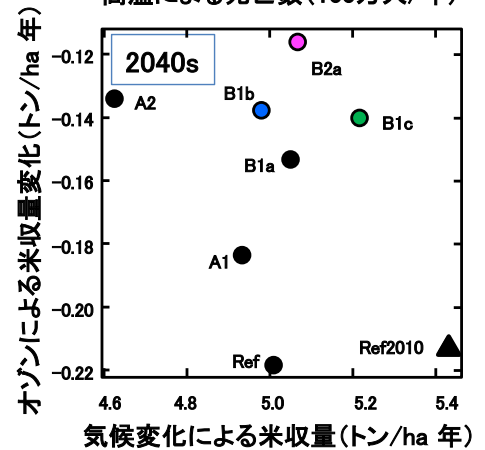
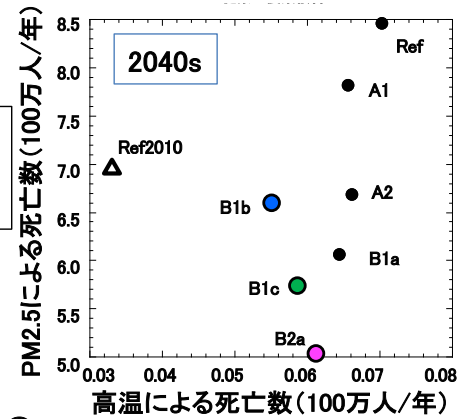
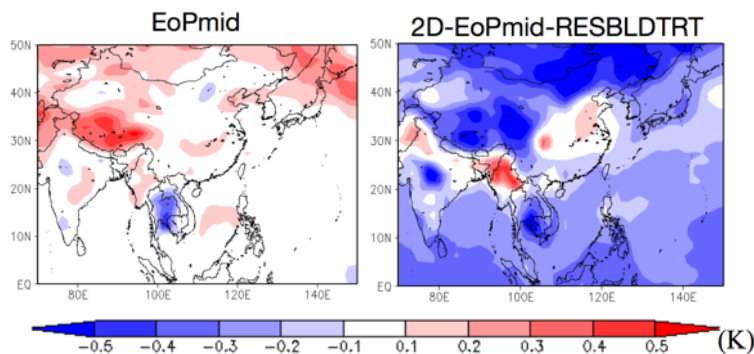


環境省S12プロジェクト
Nakajima et al. (PEPS'20)

削減シナリオと東アジアの地表面気温変化



- 大気汚染物質の排出口対策 (EoPmid) だけでは、却って気温は上昇
- 全短寿命物質の適切な緩和シナリオが必要
- S12プロジェクト最適シナリオ (2D-EoPmid-RESBLDTRT) を設定すると、0.3度程度の気温低下が得られた
- 大気汚染の激しい地域ではホットスポットの形成される



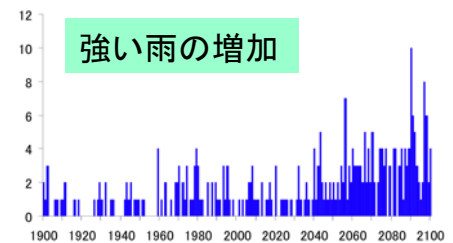
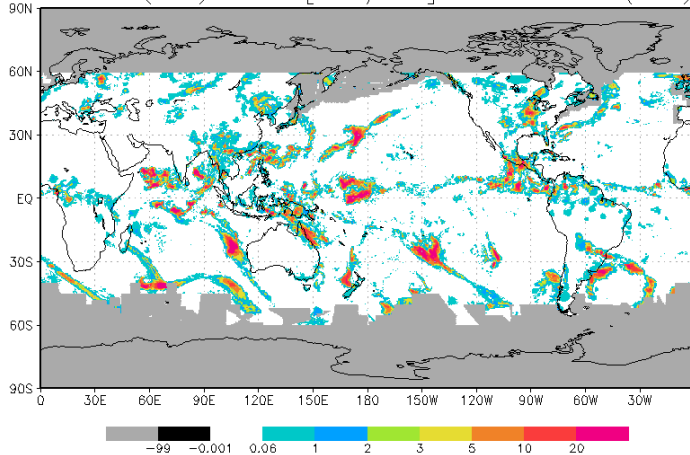
環境省S-12プロジェクト
Nakajima et al. (PEPS' 20)

29

豪雨の増加と降雨量のデータ同化

衛星による降雨強度の観測 (JAXA/GSMaP)

GSMaP (obs) norm[mm/6hr] 2014060800(UTC)



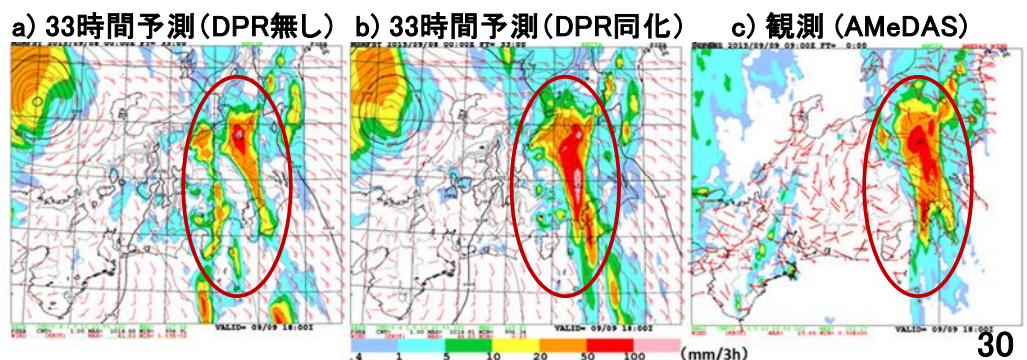
文科省共生プロジェクト資料



© MLIT, Japan

気象庁によるGPM
衛星データ同化
/2015年関東・東北
豪雨(鬼怒川氾濫)
事例

気象庁資料

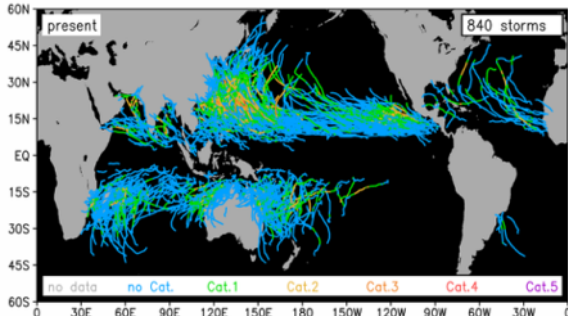


30

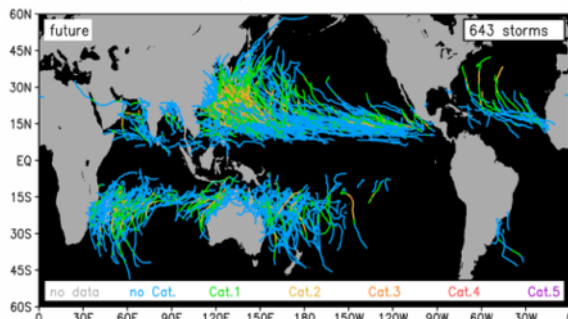
熱帯性低気圧の変化

● 数は減るが、強度の強いものが発生する可能性

熱帯低気圧
現在(1979-87) 経路 840個



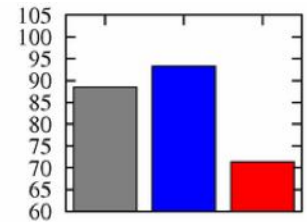
将来実験 (温暖化9年間) 経路 643個



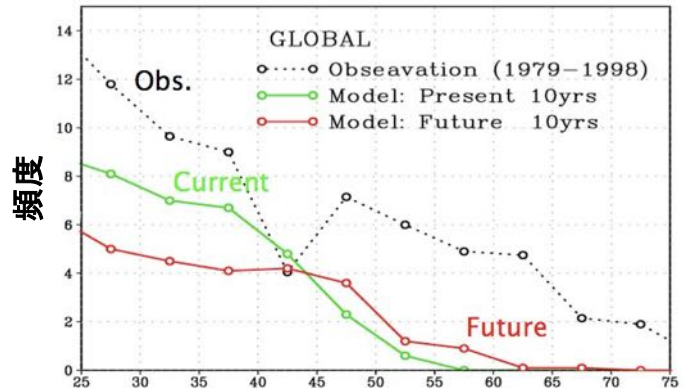
NICAM現在実験
14km格子

Yohei Yamada (2013)
using K-computer

熱帯低気圧個数-全球



観測 現在 将来



最大速度 (m/s)

Oouchi et al. (2005)

31

文科省 ポスト「京」重点課題プロジェクト

戦略目標 <必要性>

背景

近年、50年に一度クラスの豪雨や竜巻が頻繁に発生し、またスーパー台風が存在などが報告されている。

⇒ 将来危機される災害を未然に防ぐために、「正確できめ細かい情報の提供」に資する予報システムの必要性

⇒ 「格段に高い解像度」と「観測ビッグデータ利用」による豪雨や竜巻の高精度予測の実現

人間活動に起因するエネルギー消費と環境変化による気候の変化や大気環境悪化

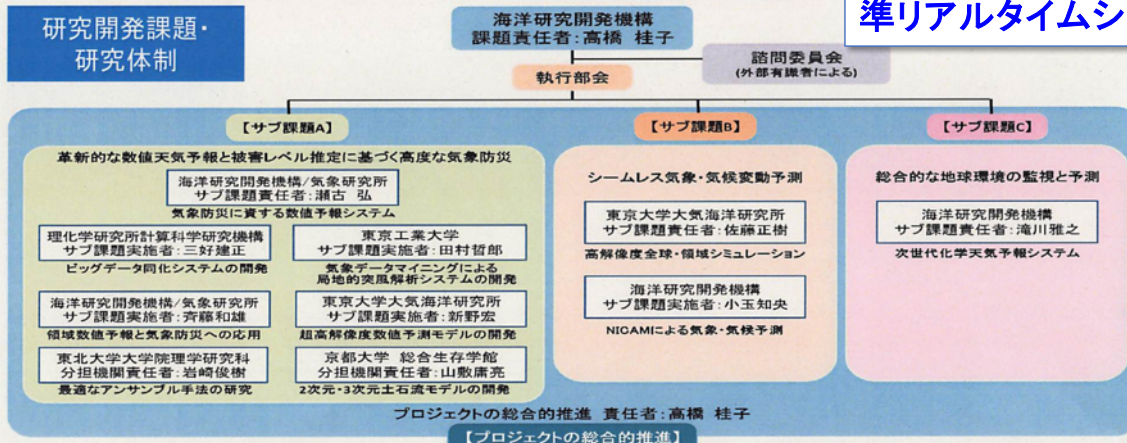
⇒ いち早く変化や悪化を察知し、対策と備えを考える必要性

⇒ 防災・環境政策立案などに資する科学的基盤提供の実現

衛星データ？

準リアルタイムシステム？

研究開発課題・研究体制



竜巻、局地的豪雨の高精度予測

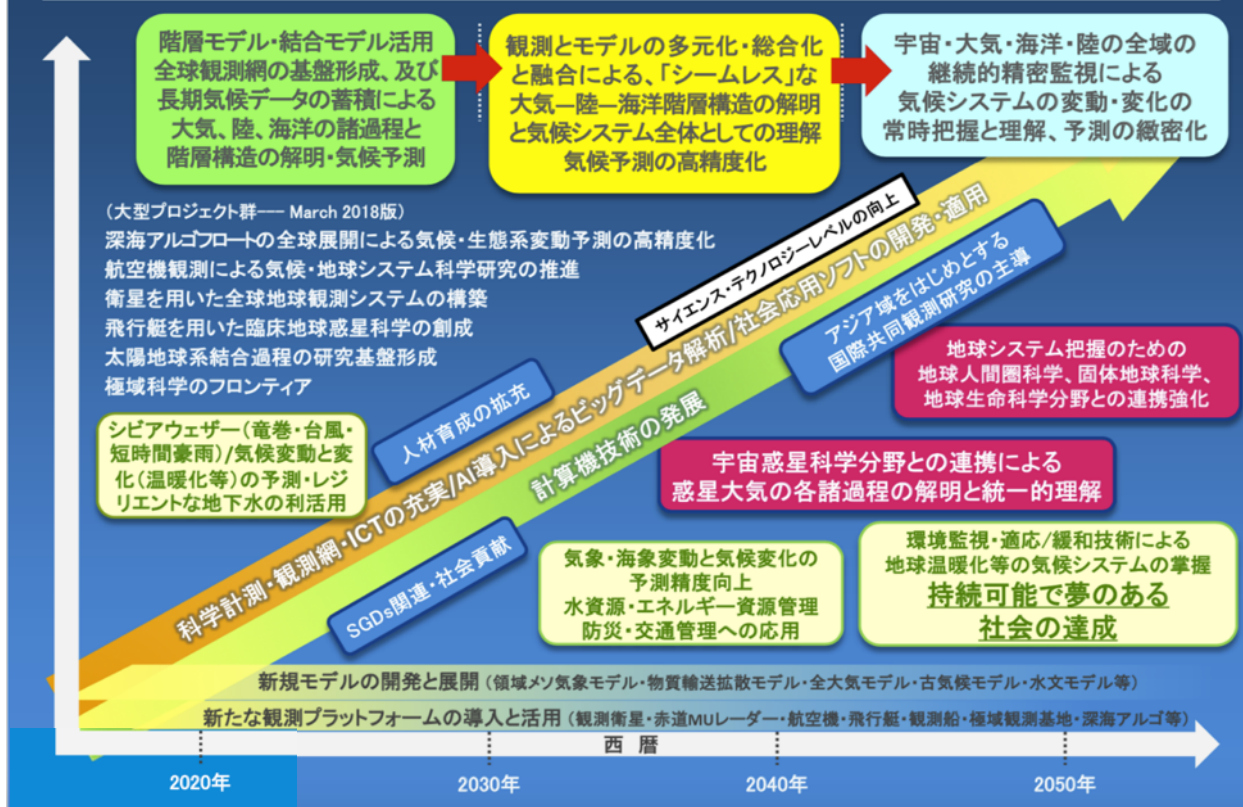
台風発生の高精度予測

PM2.5、光化学スモッグの高精度予測

高精度な予測による防災と環境政策立案に資する科学的基盤提供

2.大気水圏科学 学術会議夢ロードマップ

大気水圏の物理・化学・生物システムに関する基礎過程の把握と理解。高機能観測と常時監視、および高精度予測

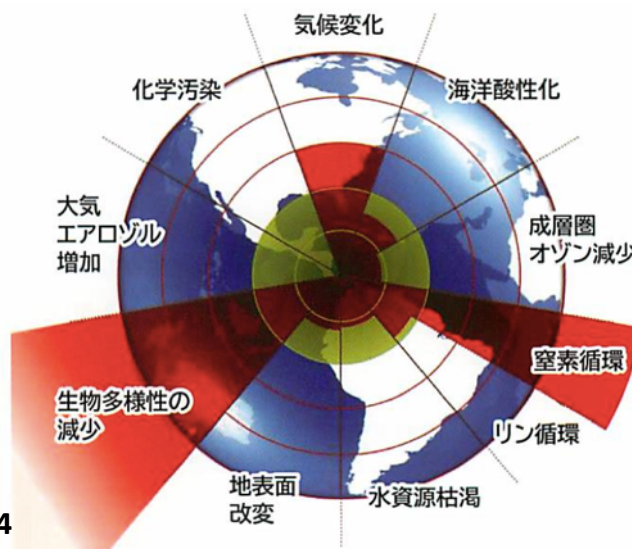


33

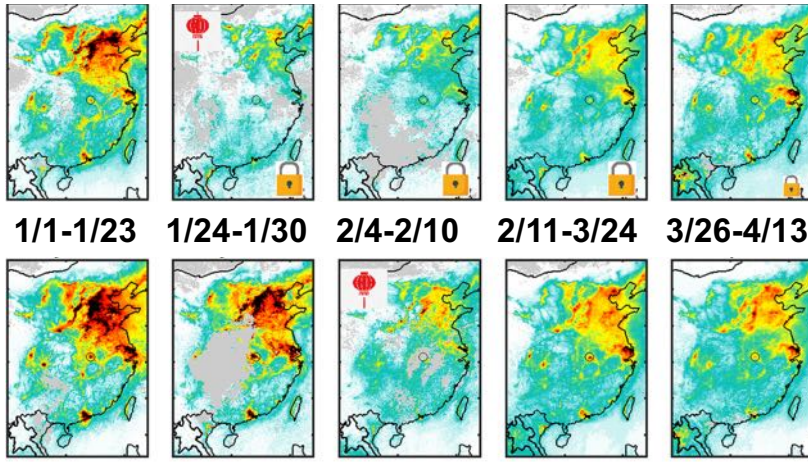
自然科学と社会科学の連携研究

- 国際科学会議(ICSU)と国際社会科学協議会(ISSC)が、2018年に合併し国際学術会議(ISC)が発足。2015年には、持続可能な地球社会の実現をめざす国際協働研究のためにフューチャー・アースプロジェクトが発足した。
- 地球・人間システムの状態を示すいくつかの指標:生物多様性の減少、気候変化、窒素循環は、安定状態(緑色)の限界を越えている。他の要素についても、近い将来、限界を越える可能性が指摘されている(Rockström et al., 2009)。

フューチャーアース 課題



3/25-4/12



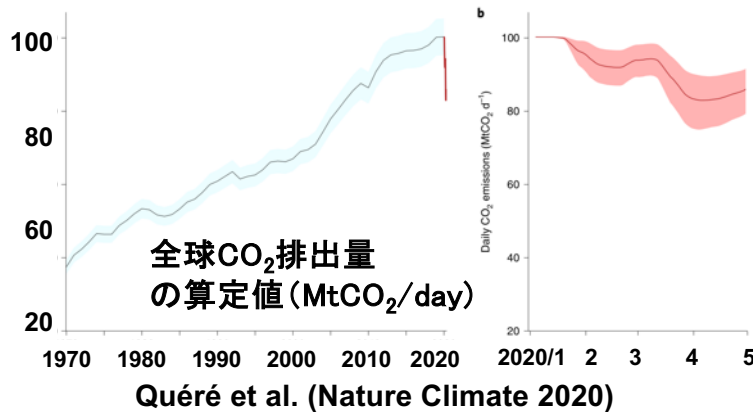
COVID19の影響とみられる 35
衛星から観測された
N2O濃度の減少

2020

2019

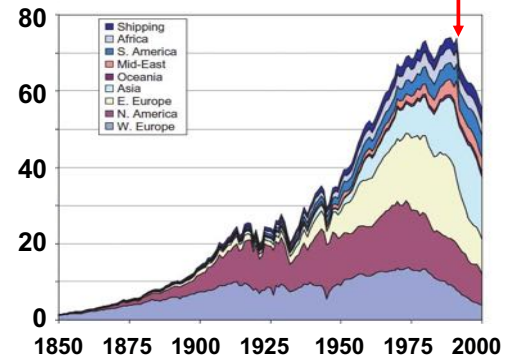
M. Bauwens+
(Geophys. Res.
Lett. 2020)

TROPOMI NO₂ (10¹⁵ molec. cm⁻²)



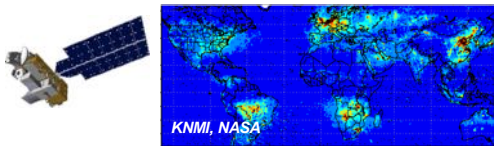
ソビエト体制の崩壊

全球硫黄排出量 (Mt S/yr)

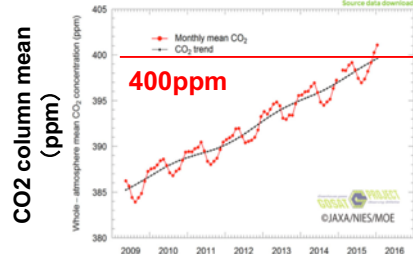
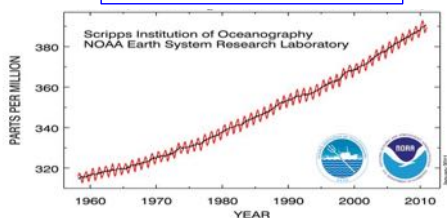


大気質変化と気候強制(駆動力)

GOME('95-'11), SCIAMACHY('02-'12), OMI
('04-), GOME-2 ('06-) etc
TEMPO-Sentinel4-GEMS Geo system

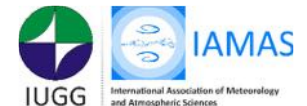


CO₂の長期地上観測



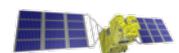
短寿命気候汚染物質
(SLCP)の衛星観測 (SO₂,
NO₂, HCHO, NH₃ etc)

高分解能モデリング



温室効果ガス(GHGs)の衛星
モニタリング (CO₂, CH₄ etc)

GOSAT ('09-)
OCO2 ('14-)
TanSat ('16-) etc



大気汚染

気候駆動力

地球温暖化

物理・化学過程
健康影響等

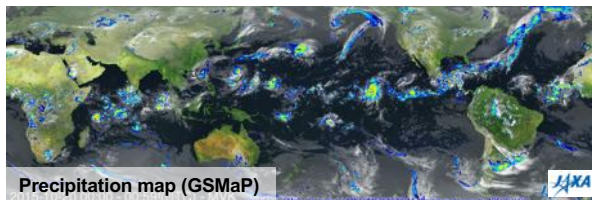
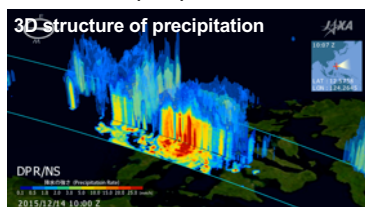
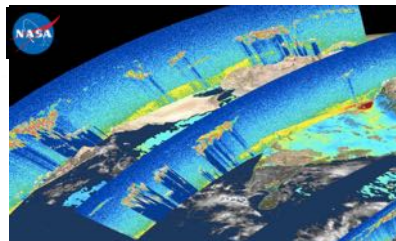
GHGs
SLCPs
排出

放射強制力・温室効果・
日傘効果等

自然・人間活動

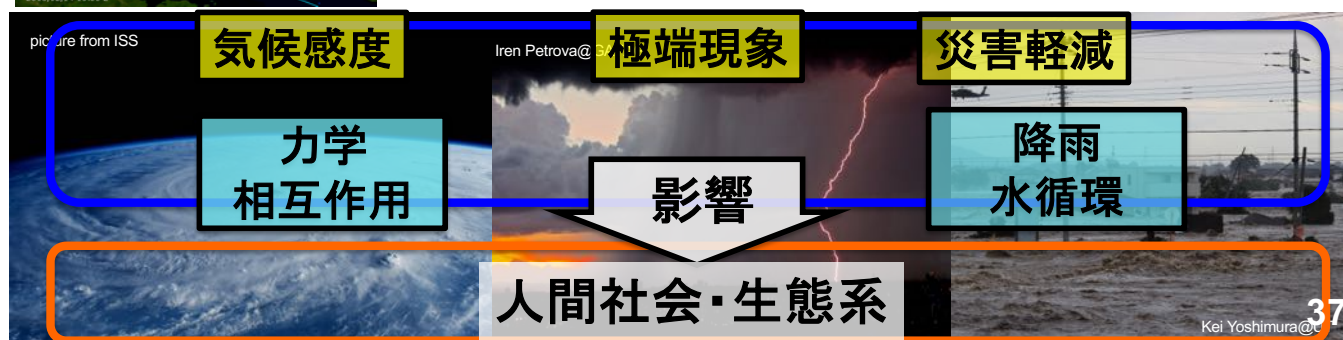
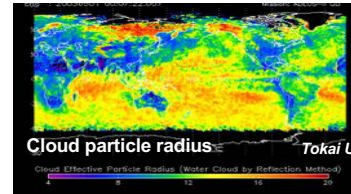
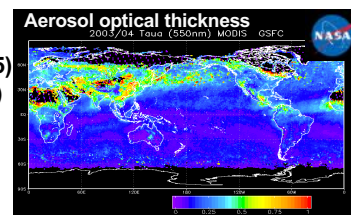
大気の相互作用と影響

大気の鉛直構造



TERRA/MODIS ('99-), SUOMI ('11-),
GCOM-C ('17-) etc

エアロゾル・雲相互作用



まとめ

- 地球温暖化現象とそれに関わる気候変動メカニズムに関する大気科学的理解とそれをモニターする地球観測は大きく発展してきた。
- しかし将来予測には不確実性がある。
 - ・ 社会シナリオ
 - ・ 自然モデリング: 雲、エアロゾル、植物圏、雪氷圏等
- 対策の進展が図られている
 - ・ COP21パリ合意: 2° C目標、1.5° C 努力、報告義務が設定された。日本では気候変動適応法の施行、2050年までのカーボンニュートラル目標が打ち出された。
 - ・ グローバルストックテーク: 温室効果ガス観測衛星データ利用のルールづくりが懸案である。
 - ・ 適応のための気象予測モデルと観測システムの構築も進化している。
 - ・ AI、ICT技術利用が望まれる、データ利用基盤も必要である。