

# HFCと温室効果ガス削減対策のオゾン層回復に対する有効性評価に関する研究

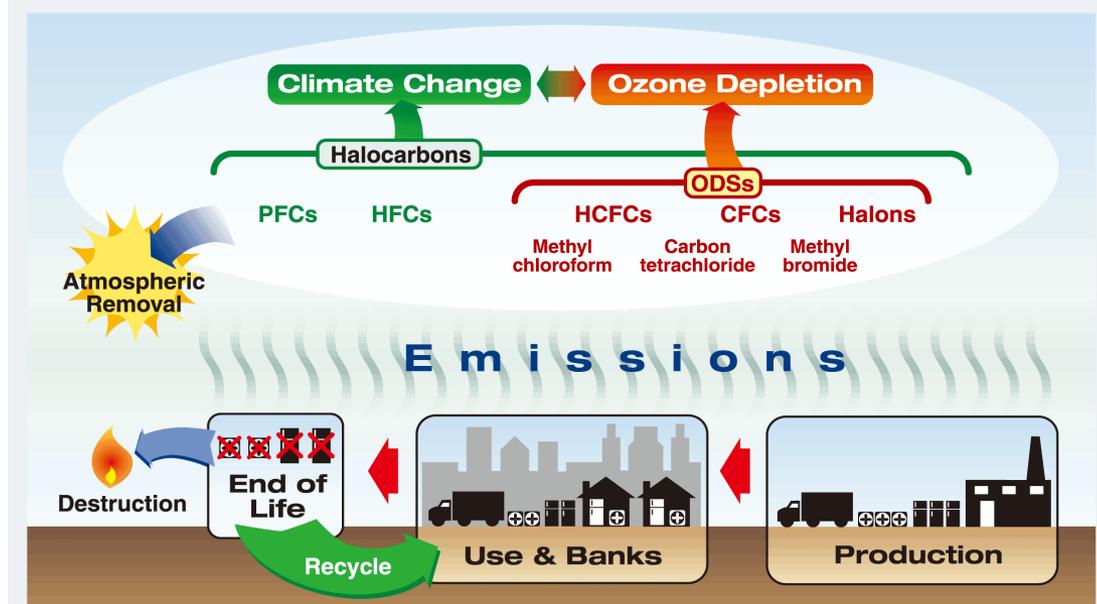
課題代表: 秋吉英治 (国立環境研究所)

## 研究体制

秋吉英治 (課題代表)  
小倉知夫 (分担)  
塩竈秀夫 (分担)

国立環境研究所)  
国立環境研究所)  
国立環境研究所)

研究協力者:  
今村隆史、E. Dupuy (国環研)  
山下陽介 (JAMSTEC)  
門脇正尚 (日本原子力研究開発機構)



# 目的および手法(研究計画)

## 目的

- GHG対策、HFC対策のオゾン層回復に対する有効性の評価
- 将来にわたって全球規模で有害紫外線の脅威を避けることができる安全なオゾン量を実現するODS濃度の目安の設定を、より高い信頼性で行う。

## 手法

- モデルの精緻化: MIROC6化学気候モデルの開発
- アンサンブル数の増加: 100→500アンサンブル
- 設定するODS濃度、GHG濃度を増やす  
ODS濃度: 1960年、1980年、1985年、1990年、2000年のレベル (赤字:追加年)  
GHG濃度: 2000年、2030年、2040年、2050年、2100年のレベル
- 解析対象領域のグローバル化: (1)北極、(2)北半球中緯度、(3)低緯度、(4)南半球中緯度、(5)南極
- HFCの影響の解析

5つの緯度帯において、オゾン層破壊の極端な事例の発生頻度のODSおよびGHG濃度依存性を明らかにし、得られた知見をグローバルな観点から体系づける

# 1. 化学気候モデルの開発

- 気候特性の異なる複数の気候モデルをベースにした化学気候モデルを使う

モデル間で異なる気候特性  
化学計算スキームは同じ

(参考) CCSRNIES化学気候モデル  
UNEP/WMOオゾンアセスメントレポート2006・2010に貢献

## (1) MIROC3.2化学気候モデル

オゾンアセスメントレポート2018に貢献予定。  
CCSRNIESモデルに比べて放射スペクトルの分割数が多く、気温の再現性が向上。

## (2) MIROC5化学気候モデル

海面水温の再現性が向上。積雲対流スキームと雲の微物理過程の変更。

## (3) MIROC6化学気候モデル

本課題で開発を行う。成層圏の気温と水蒸気の再現性が向上。熱帯の降水量分布の再現性の向上。

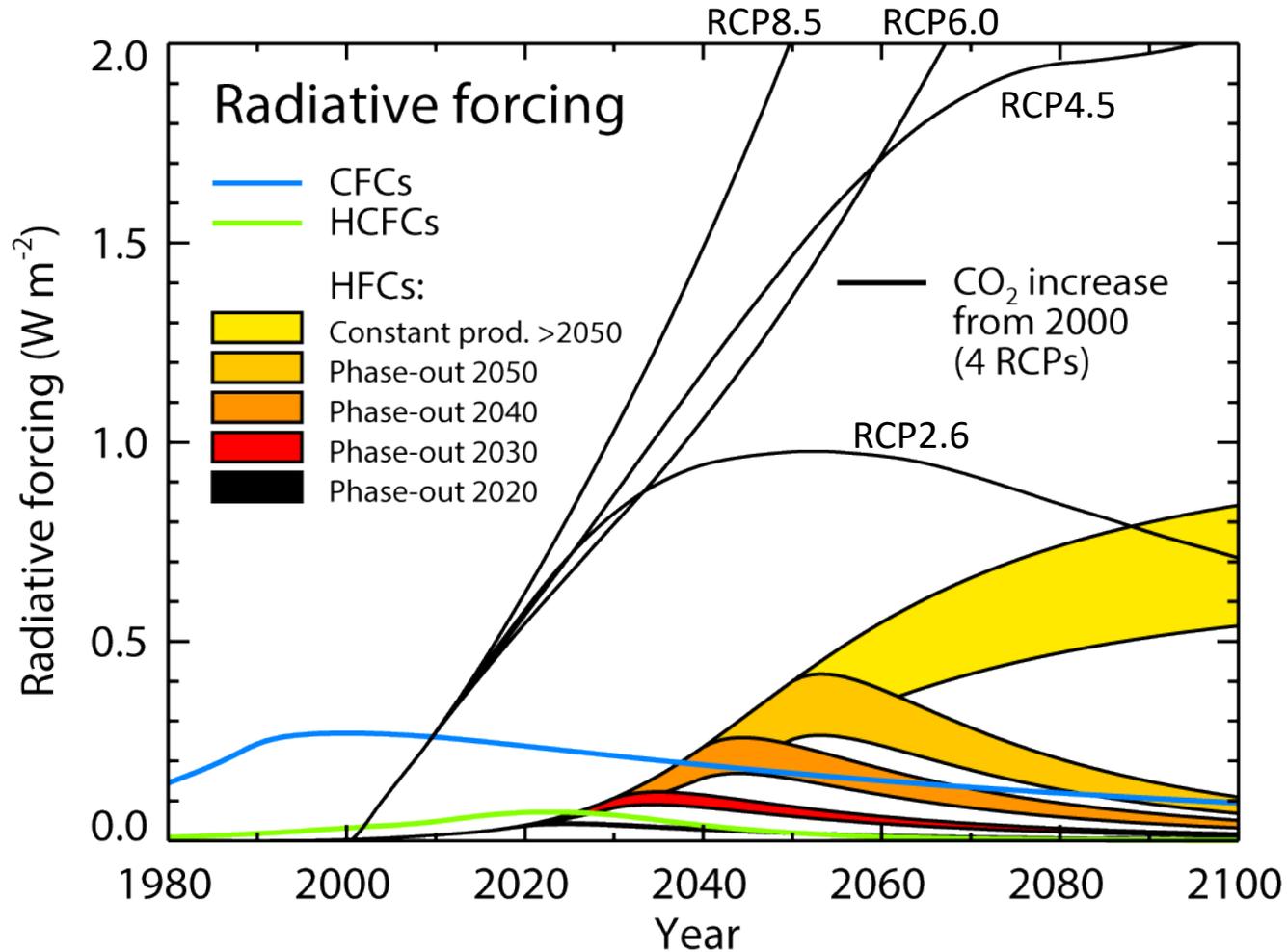
- 化学気候モデルの開発・検証・計算解析スケジュール

	H29	H30	H31
MIROC3.2 CCM	計算・解析		総合評価
MIROC5 CCM		計算・解析	総合評価
MIROC6 CCM	開発	開発・検証	計算・解析・総合評価

# オゾン層への影響

1. HFCの影響
2. 温室効果ガス(GHG)の影響

# 今後増加が懸念されるHFCの放射強制力

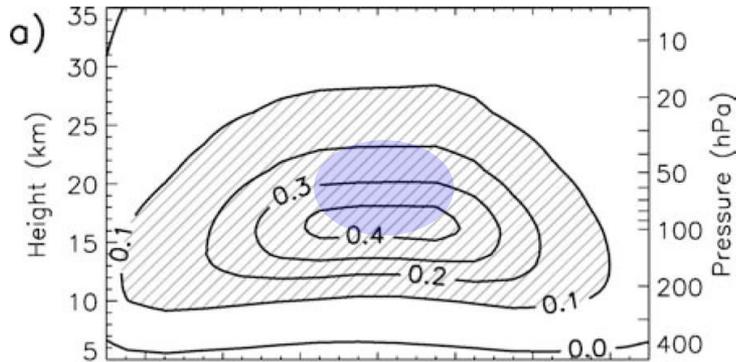


(Velders et al, 2014)

# HFCの影響

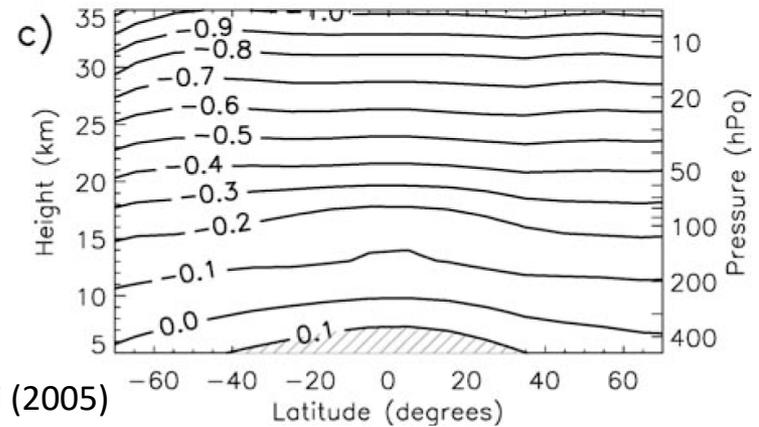
## HFCのオゾン層への影響(気温と大気循環の変化を介した影響)

1950年以降のハロカーボン(CFC, HCFC, HFC)の増加による年平均気温の変化



Forster and Joshi (2005)

1980-2000年の期間のCO2増加による年平均気温の変化

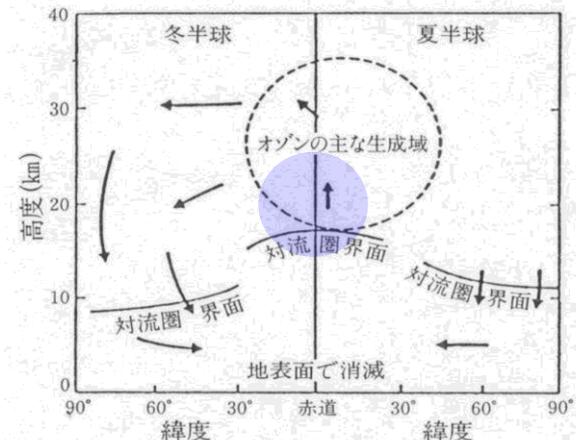


ハロカーボン類の増加は低緯度帯の上部対流圏・下部成層圏を暖める。

CO2の増加は成層圏をグローバルにほぼ一様に冷却する。

経度平均2次元モデル(緯度-高度断面)によるHFCの大気循環への影響は複雑な様相を示す (Hurwitz et al, 2015)

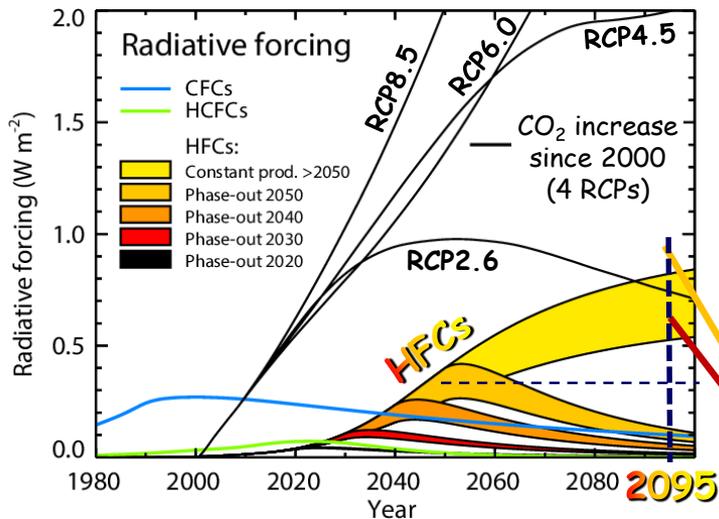
3次元モデルで精査



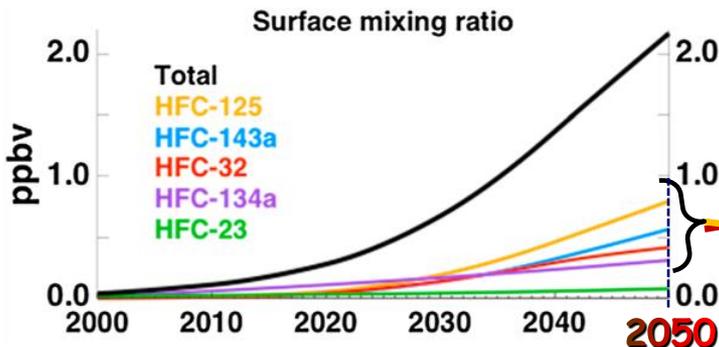
小倉義光著、「一般気象学」より

# HFC 影響計算の方法

- 2095年大気を想定し、100アンサンブル実験を行う
- アンサンブル平均の経度平均・年平均を示す
- GHGs: RCP 2.6 シナリオ (“best case”)
- ODSs: WMO-A1シナリオ



Velders et al., Atmos. Chem. Phys., 2014



Hurwitz et al., Geophys. Res. Lett., 2015

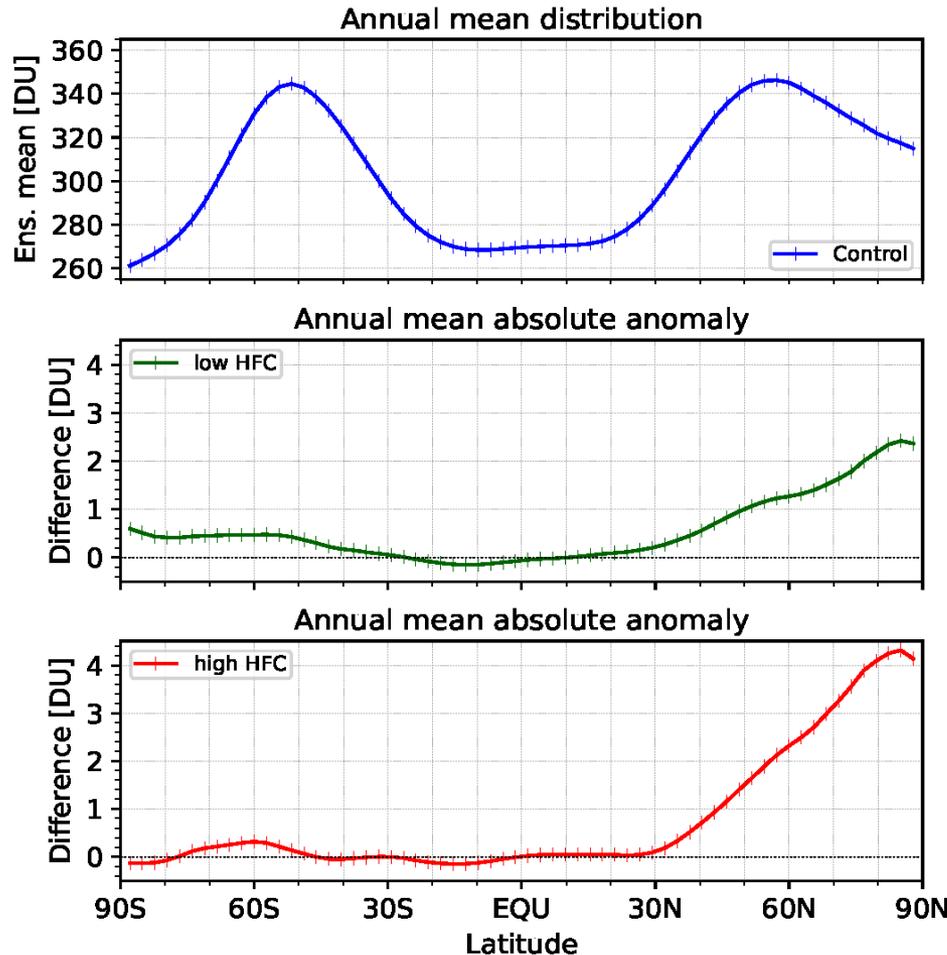
## HFCs:

- HFC-125, 143a, 32, 134a
- HFC濃度を異なる値に設定した実験
- コントロールラン: HFC濃度ゼロ
- HFC規制なしシナリオの2050年濃度 × 2  
→ lower limit case
- HFC規制なしシナリオの2050年濃度 × 3  
→ upper limit case

	HFC-125	HFC-143a	HFC-32	HFC-134a
コントロールラン	0 ppbv	0 ppbv	0 ppbv	0 ppbv
Lower limit case	1.60 ppbv	1.10 ppbv	0.84 ppbv	0.64 ppbv
Upper limit case	2.40 ppbv	1.65 ppbv	1.26 ppbv	0.96 ppbv

# 結果：オゾン全量(気柱量)への影響

- オゾン全量の年平均・経度平均の100アンサンブル平均値を計算
- Lower limit実験, upper limit実験のコントロール実験からの差[DU]



- コントロール実験:  
GHG(2095, RCP-2.6)  
ODS(2095, WMO-A1)  
HFCなし

MIROC3.2  
化学気候モデル

- “Lower limit” 実験:  
コントロール実験からの差

- “Upper limit” 実験:  
コントロール実験からの差

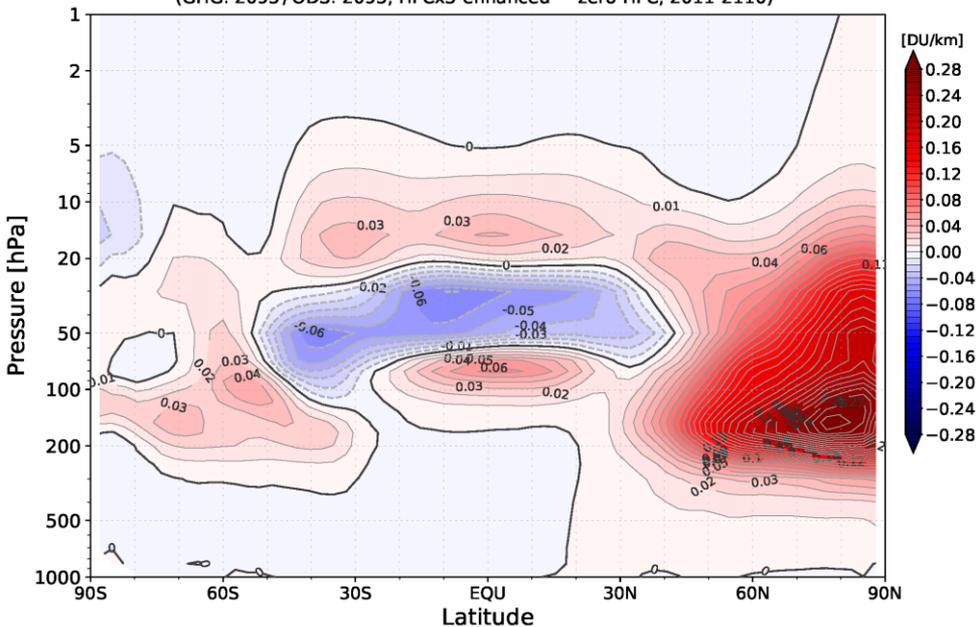
- 南半球と北半球低緯度の影響はほとんど見られない。
- 北半球中高緯度に1%くらいの影響が見られる。

# 結果: “upper limit” 実験, O<sub>3</sub> と T の 変化 (2095年)

MIROC3.2  
化学気候モデル

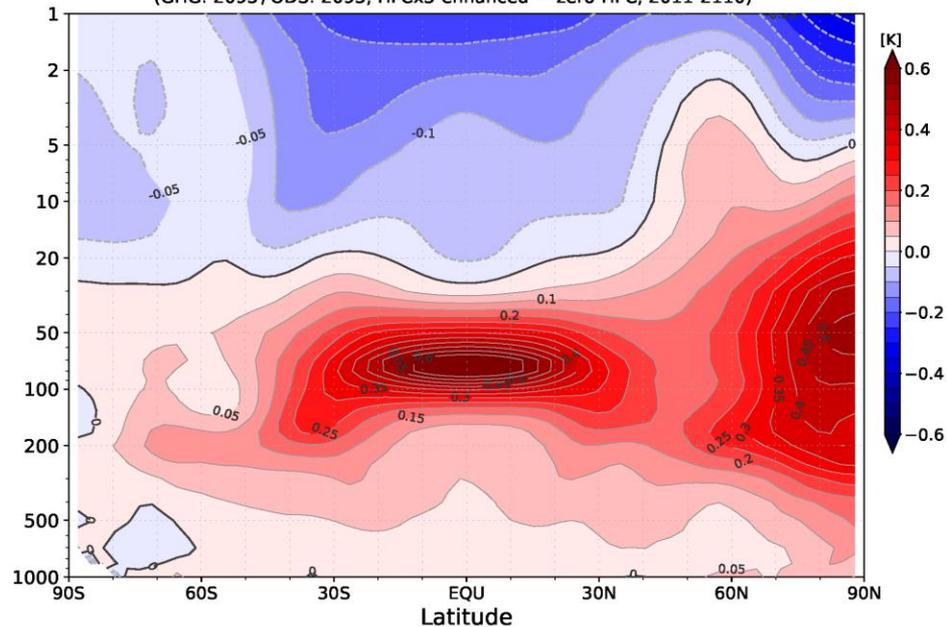
## オゾン partial column (DU/km)

Yearly ensemble mean absolute differences, O<sub>3</sub>  
(GHG: 2095/ODS: 2095, HFCx3-enhanced – zero-HFC, 2011-2110)



## 気温 (K)

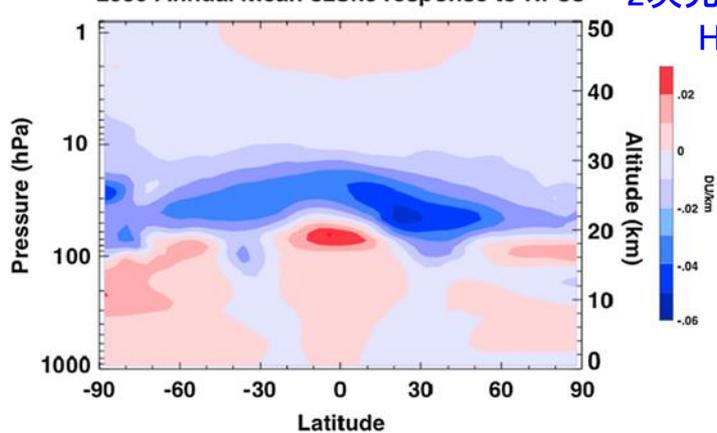
Yearly ensemble mean absolute differences, Temperature  
(GHG: 2095/ODS: 2095, HFCx3-enhanced – zero-HFC, 2011-2110)



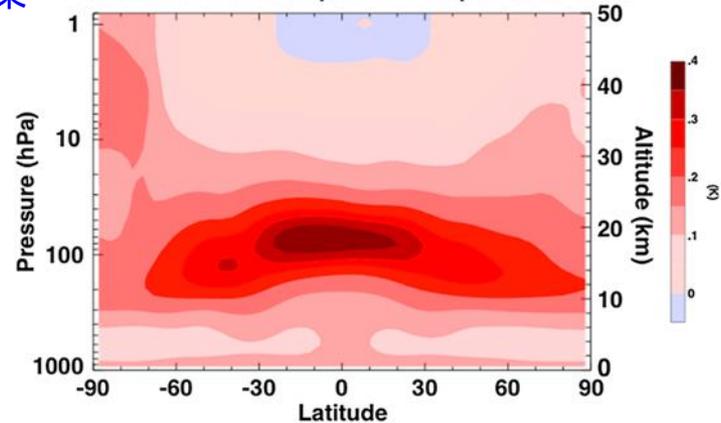
2050 Annual mean ozone response to HFCs

2次元モデルによる結果  
Hurwitz (2015)

2050 Annual mean temperature response to HFCs



2050年



MIROC3.2による500アンサンブル実験

RCP6.0

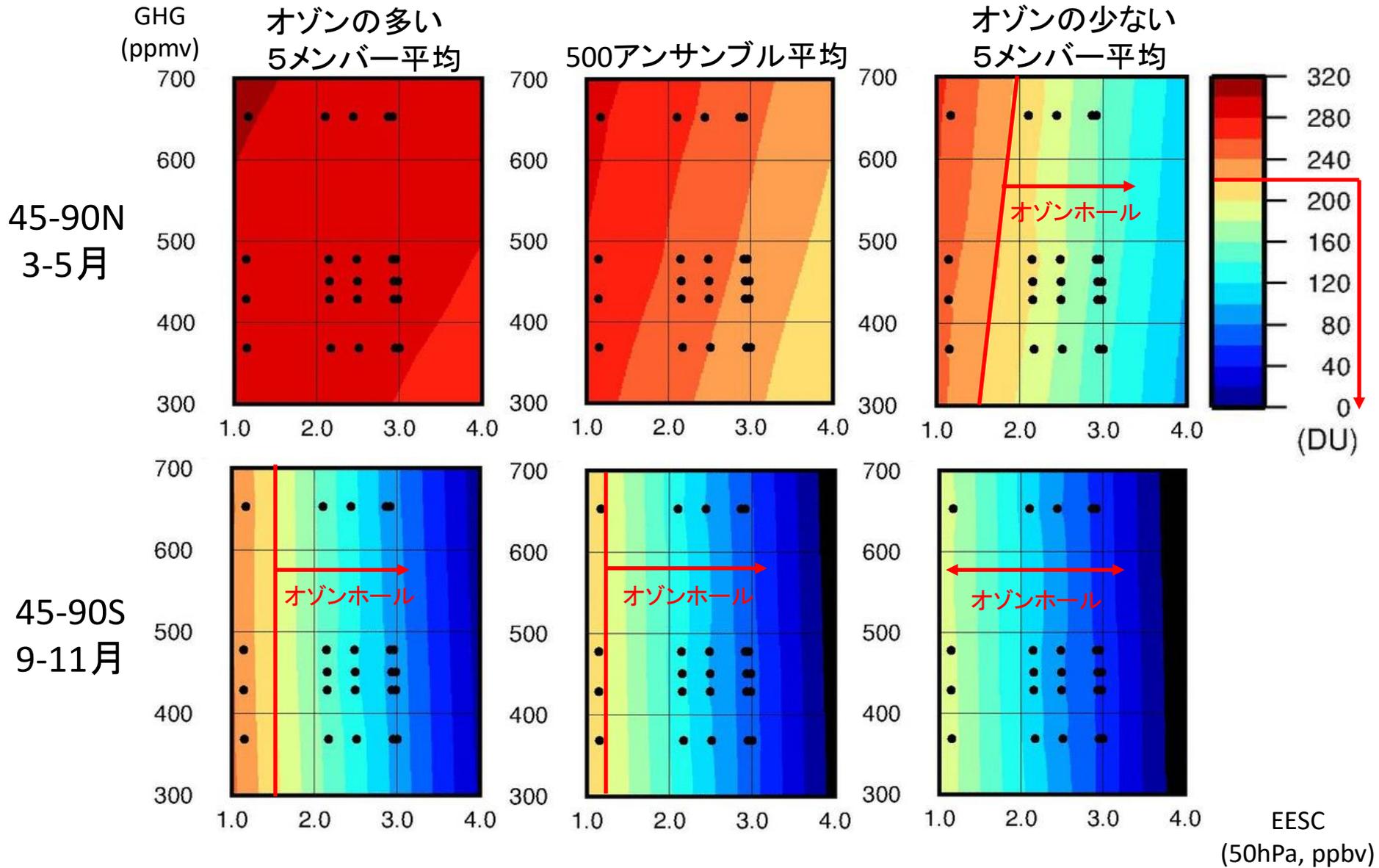
ODS GHG	2000	1995	1990	1985	1980	1960
2000	●		●	●	●	●
2030	●		●	●	●	●
2040	●		●	●	●	
2050	●		●	●	●	●
2095	●		●	●	●	●

MIROC5による500アンサンブル実験

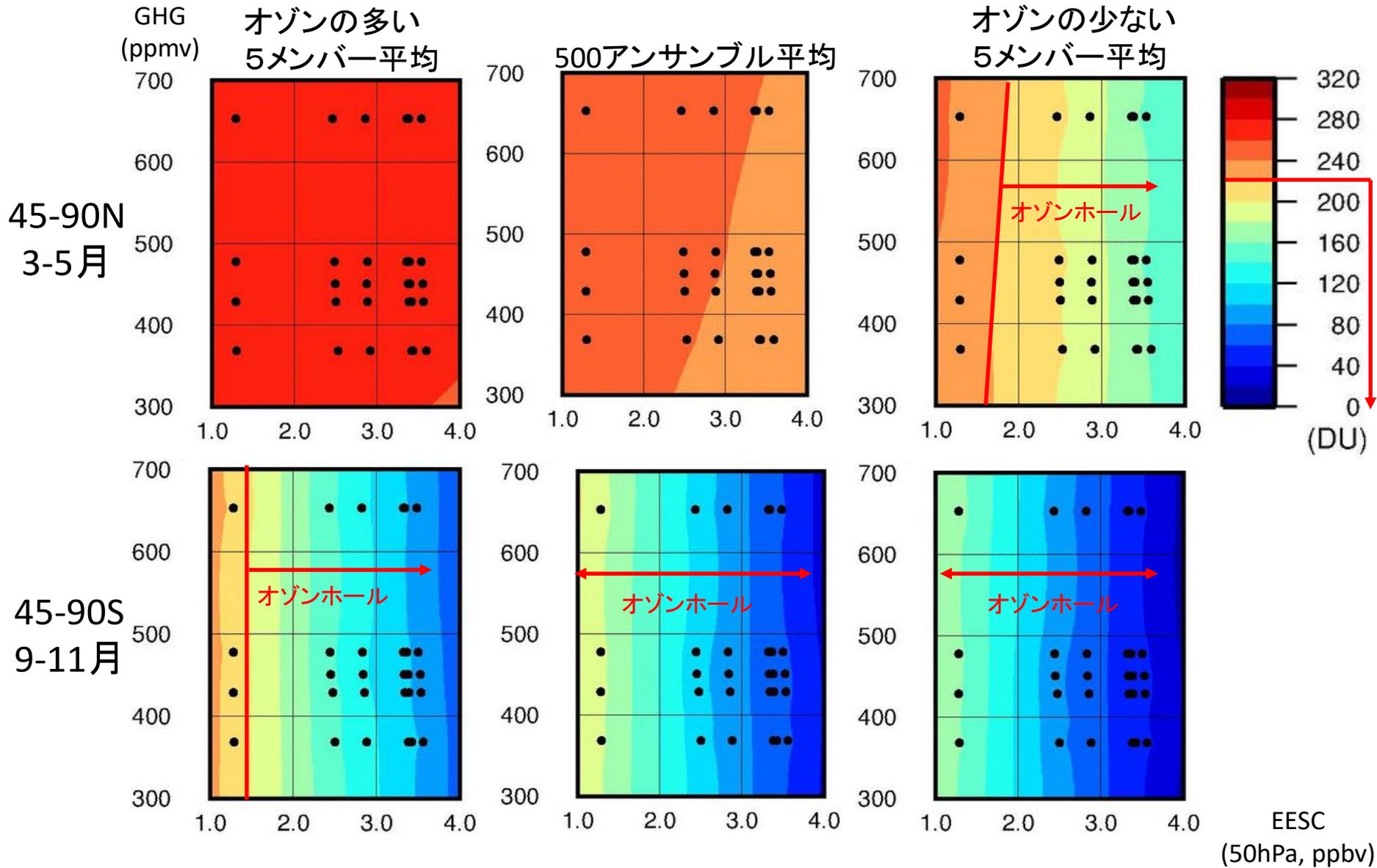
RCP6.0

ODS GHG	2000	1995	1990	1985	1980	1960
2000	●	●	●	●	●	●
2030	●	●	●	●	●	●
2040	●	●	●	●	●	
2050	●	●	●	●	●	●
2095	●	●	●	●	●	●

# 春季オゾン全量最低値のODS, GHG濃度依存性 (MIROC3.2モデル)



# 春季オゾン全量最低値のODS, GHG濃度依存性(MIROC5モデル)



## まとめ

1. HFCのオゾン全量への影響は、GHG濃度がRCP2.6シナリオに沿った2095年大気において、HFCが“規制なしの増加”の場合でもオゾン全量が1%増加する程度の影響。
  - 影響は中高緯度に限られる。
  - 低緯度における影響は、有意性が高いが、鉛直方向にオゾンが増加する高度と減少する高度が混在しており、全量への影響はほとんど見られなかった。
  - 低緯度における影響の高度分布は、先行研究の経度平均2次元モデルの結果 (Hurwitz et al, 2015) によく対応している。
  - 南半球への影響はアンサンブルの統計的有意性が低かった。
2. GHG増加によって、アンサンブル平均の北半球中高緯度(45-90N)のオゾン全量は増加し、低緯度(20N-20S)のオゾン全量は減少する。南半球や北半球中緯度(30-45N)のオゾン全量のGHG濃度依存性は小さい。
3. ただし、45-90Nのオゾン全量は年々変動が大きく、オゾンが多いアンサンブルメンバーは、極渦が弱く、成層圏の気温が高く、オゾン全量のODS・GHG濃度依存性は小さい。一方、オゾンが少ないアンサンブルメンバーは、極渦が強く、気温が低く、ODS濃度依存性が大きくなり、ODS濃度の増加によってオゾン全量の220DU以下が発生する。北半球中高緯度では温室効果ガスが増加するとオゾン量が増加すると言われているが、アンサンブル実験の結果は、たまたま北極渦が安定した年は、ODS濃度が高ければGHG濃度に拘わらずオゾンホールに匹敵するオゾン減少が生じることを示しており(2011年の北極オゾン層の大規模破壊がこれに対応)、北半球中高緯度のオゾンに対してもODS対策を怠ってはならない。
4. 以上の結果は、MIROC3.2モデルとMIROC5モデルに共通して見られる。MIROC3.2とMIROC5の極域への循環の強さの違いがオゾン全量のODS・GHG濃度依存性にも表れている。

# 本研究の意義

## 1. 科学

- UNEP/WMO「オゾン科学アセスメント(2022)」へ成果の発信
- 環境省「オゾン層等の監視結果に関する年次報告書」への成果の反映
- 国際プロジェクトへの貢献と連携 (SPARC, IGAC, CCMI)

## 2. 地球環境政策への貢献

- HFC対策のオゾン層回復に対する有効性の評価
- オゾン層の安定化に向けた対策 (オゾン層保護と温暖化対策の両立)

(科学的根拠の提示)

# 成果発表

## 誌上発表

- Morgenstern, O., K. A. Stone, R. Schofield, H. Akiyoshi, Y. Yamashita et al. (2018), Ozone sensitivity to varying greenhouse gases and ozone-depleting substances in CCMI-1 simulations, *Atmos. Chem. Phys.*, 18, 1091-1114, <https://doi.org/10.5194/acp-18-1091-2018>
- Son, S.-W., B.-R. Han, C. Garfinkel, S.-Y. Kim, R. Park, N. L. Abraham, H. Akiyoshi, et al. (2018), Tropospheric jet response to Antarctic ozone depletion: An update with Chemistry-Climate Model Initiative (CCMI) models, *Environ. Res. Lett.*, 13, 054024, doi:10.1088/1748-9326/aabf21
- Dhomse, S., D. Kinnison, M. P. Chipperfield, I. Cionni, M. Hegglin, N. L. Abraham, H. Akiyoshi et al. (2018), Estimates of Ozone Return Dates from Chemistry-Climate Model Initiative Simulations, *Atmos. Chem. Phys.*, 18, 8409-8438, <https://doi.org/10.5194/acp-18-8409-2018>
- Akiyoshi, H., M. Kadowaki, H. Nakamura, T. Sugita, T. Hirooka, Y. Harada, and A. Mizuno (2018), Analysis of the ozone reduction event over the southern tip of South America in November 2009, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 123, 12523-12542. <https://doi.org/10.1029/2017JD028096>
- Nakajima, H., I. Murata, Y. Nagahama, H. Akiyoshi, K. Saeki, T. Kinase, M. Takeda, Y. Tomikawa, E. Dupuy, and N. B. Jones, Chlorine partitioning near the polar vortex edge observed with ground-based FTIR and satellites at Syowa Station, Antarctica, in 2007 and 2011 (2020), *Atmos. Chem. Phys.*, 20, 1043-1074, <https://doi.org/10.5194/acp-20-1043-2020>
- Lamy, K., T. Portafaix, B. Josse, C. Brogniez, S. Godin-Beekmann, H. Bencherif, L. Revell, H. Akiyoshi et al. (2019), Clear-sky ultraviolet radiation modelling using output from the Chemistry Climate Model Initiative, *Atmos. Chem. Phys.*, 19, 10087–10110. <https://doi.org/10.5194/acp-19-10087-2019>

## 口頭発表

- 秋吉英治、門脇正尚、山下陽介、今村隆史、化学気候モデルのアンサンブル実験による北極域オゾン層破壊の塩素濃度および温室効果ガス濃度依存性の解析、第23回大気化学討論会、高松、2017年10月2日–4日(ポスター発表、2017年10月3日)、第23回大気化学討論会講演要旨集、p.39
- 秋吉英治、門脇正尚、山下陽介、低オゾンイベント出現の温室効果ガス濃度依存性に関する化学気候モデルを用いたアンサンブル実験、日本地球惑星科学連合2018年大会、千葉(幕張メッセ国際会議場)、2018年5月20日-24日(ポスター発表2018年5月23日)、AAS07-P08.
- 秋吉英治、門脇正尚、山下陽介、長友利晴、北半球中高緯度で低いオゾン全量を示す領域面積の温室効果ガス濃度依存性、日本気象学会2018秋季大会、2018年10月29日–11月1日(ポスター発表2018年10月31日)仙台(仙台国際センター)、ID:P381, 同予稿集 p.269
- 秋吉英治、門脇正尚、山下陽介、長友正晴、500アンサンブル実験による低中高緯度オゾン全量のODS・GHG濃度依存性、日本気象学会2019秋季大会、2019年10月28日–31日(ポスター発表2019年10月30日)福岡(福岡国際会議場)、ID:P373, 同予稿集 p.238
- Dupuy, E., H. Akiyoshi, Y. Yamashita, Impact of hydrofluorocarbons on stratospheric ozone recovery, 日本気象学会2019秋季大会、2019年10月28日–31日(ポスター発表2019年10月30日)福岡(福岡国際会議場)、ID:P372, 同予稿集 p.237

終了