

ISBN4-87805-049-7  
C0344 ¥2800E  
定価：本体価格2,800円(税別)

**HUBA PRO.**

## オゾンのゆくえ 気候変動とのかかわりをさぐる

### Aセッション 特別講演

衛星観測で見る成層圏の姿 廣田 勇

### Bセッション 気候変動はどのようにしておこるか

オゾンホールとは何か 宮原 三郎

気候変動をさぐる 伊藤 久徳

突然昇温と気候 廣岡 俊彦

オゾンホールと気候変動 渡辺 真吾

### Cセッション 対流圏と成層圏

熱帯大気と物質の循環 塩谷 雅人

コンピュータでさぐる物質の流れ 山崎 孝治

熱帯の雲と循環 西 憲敬

準2年周期振動とオゾン 高橋 正明

### Dセッション 物質の輸送 大気波動のはたらき

波動と物質の輸送 余田 成男

衛星観測から見る水蒸気 江口 菜穂

高低気圧のはたらき 向川 均

### Eセッション オゾンホールのはたらき

コンピュータと数値シミュレーション 堀之内 武

ピナツボ噴火とオゾン 滝川 雅之

オゾンホールを予測する手立て 秋吉 英治

オゾンホールは何時消滅するか 永島 達也

◆  
'04  
オゾンのゆくえ  
気候変動とのかかわりをさぐる



2004 第18回「大学と科学」公開シンポジウム講演収録集

# オゾンのゆくえ

## 気候変動とのかかわりをさぐる

主催：平成16年度文部科学省科学研究費補助金  
研究成果公開促進費「研究成果公开发表(A)」補助事業  
代表 九州大学大学院理学研究院教授 宮原 三郎  
後援：(社)日本気象学会 / 日本地学教育学会

**九州**

# オゾンのゆくえ

## 気候変動とのかかわりをさぐる

### A セッション 特別講演

#### 衛星観測で見る成層圏の姿

京都大学名誉教授 廣田 勇 8

はじめに / 成層圏の発見 / 成層圏の観測の歴史 / 成層圏気象図の特徴  
現代のさまざまな観測手段 / 衛星観測の特長と意義 / 極軌道衛星観測の特長  
赤外放射の観測 / 成層圏循環と大規模変動 / 成層圏オゾンの分布  
オゾンの垂直分布と季節変動 / 季節変化と年々変動 / オゾンの将来予測  
わが国の貢献と将来展望 / まとめ

### B セッション 気候変動はどのようにしておくか

#### オゾンホールとは何か

九州大学大学院理学研究院教授 宮原 三郎 20

はじめに / オゾンホールの発見 / 成層圏オゾンの成因 / オゾンの分布とその実現機構  
総オゾン量の季節変動 / オゾンホールの姿形 / オゾンホールの成因  
オゾンホールの変動と大気変動

#### 気候変動をさぐる

九州大学大学院理学研究院教授 伊藤 久徳 28

はじめに / 気候と気候変動 / 気候と大規模な大気・海洋の循環 / 大気循環と気温変動  
海洋循環と気候変動 / 対流圏と成層圏 / 対流圏が成層圏へ及ぼす影響  
成層圏が対流圏に及ぼす影響 / 対流圏と成層圏の相互作用 / まとめ

#### 突然昇温と気候

九州大学大学院理学研究院教授 廣岡 俊彦 39

突然昇温とは / 突然昇温の生起機構 / 大規模突然昇温の生起条件  
大規模突然昇温の生起頻度の変化と気候 / 突然昇温とオゾン  
突然昇温の生起をみてわかること / 突然昇温が及ぼす対流圏への影響  
南極域での観測史上初めての大規模突然昇温 / まとめと今後の課題

#### オゾンホールと気候変動

地球環境フロンティア研究センターポスドク研究員 渡辺 真吾 49

はじめに - オゾンホールとは - / オゾンホールと成層圏の気候  
成層圏 - 対流圏結合変動 / コンピュータシミュレーションの利用  
大気大循環モデルの概要 / 数値実験の結果：北半球のオゾン破壊と気候変動  
オゾンホールの気候への影響 1) 気候値  
オゾンホールの気候への影響 2) 年々変動 / まとめ / おわりに

### C セッション 対流圏と成層圏

#### 熱帯大気と物質の循環

京都大学生存圏研究所教授 塩谷 雅人 62

なぜ熱帯域が重要か - 大気の子午面循環 - / プリューワーの考えた子午面循環  
水蒸気の年変動 / 熱帯対流圏界面温度の年変動 / 地球大気における水蒸気的作用  
水蒸気の特長 / 成層圏における水蒸気の増加トレンド / 熱帯域における水蒸気観測  
熱帯対流圏界面領域における水蒸気の変動 / さらなる展開

## 目次

### コンピュータでさぐる物質の流れ

北海道大学大学院地球環境科学研究科教授 山崎 孝治 70

成層圏の泉仮説 / 成層圏の泉か、排水口か / 大気大循環モデルによるシミュレーション  
成層圏は排出口 / 成層圏の排出口はなぜできるのか / 流跡線解析による水蒸気の流れ  
流跡線計算による水蒸気の流れ解析 / 脱水過程 / エルニーニョにともなう水蒸気変動

### 熱帯の雲と循環

京都大学大学院理学研究科助手 西 憲敬 80

熱帯対流圏での循環 / 地域ごとの鉛直流研究の方針 / 赤道大気レーダーによる鉛直流直接観測  
TRMM 衛星を使った上昇流域パターン形成の推定 / 熱帯域上層層状雲の形態 / まとめ

### 準2年周期振動とオゾン

東京大学気候システム研究センター教授 高橋 正明 87

はじめに / 地球上空の大気の流れ / 成層圏における物理量 / 準2年周期振動とは  
熱帯域の対流活動 / 波動の伝播 / 鉛直伝播する波の様子  
準2年周期振動のメカニズム / オゾンの準2年周期振動

### Dセッション 物質の輸送 大気波動のはたらき

#### 波動と物質の輸送

京都大学大学院理学研究科教授 余田 成男 96

##### 第1節 大気波動

音波とは / 重力波とは / プラネタリー波とは

##### 第2節 物質の輸送と混合

移流とは / ランダム運動と秩序運動 / 乱流状態でない流れのなかでの流体粒子運動  
カオスの混合(ラグランジュカオス)

##### 第3節 地球規模の波の働き

オゾンホールと中緯度碎波帯 / 成層圏域でのカオスの混合 / 波に駆動される平均子午面循環

##### 第4節 まとめと今後の展望

#### 衛星観測から見る水蒸気

京都大学生存圏研究所助手 江口 菜穂 108

なぜ、熱帯上部対流圏の水蒸気か / 上部対流圏における水蒸気の特徴  
上部対流圏における水平方向の水蒸気分布 / 熱帯対流圏界面遷移層 / TTLでの脱水過程  
衛星による水蒸気観測 / 熱帯域における季節内変動  
季節内変動(MJO)による気温、風、水蒸気場の構造  
季節内変動にともなうTTL内の脱水機構 / おわりに

#### 高低気圧のはたらき

京都大学防災研究所助教授 向川 均 118

はじめに / 天気図でみる移動性高低気圧 / 移動性高低気圧の構造 / 偏西風  
傾圧不安定波 / 偏西風ジェットとストームトラック / ストームトラックの形成機構  
大気大循環モデルを用いた数値実験 / まとめ

**Eセッション オゾンホールのおくえ**

**コンピュータと数値シミュレーション**

..... 京都大学生存圏研究所助手 **堀之内 武** 134

はじめに / 大気の数値シミュレーションに使う計算機 / 地球シミュレータ  
大気の数値シミュレーション / 大気の数値モデルの骨格をなす流体の基礎方程式  
大気の数値モデル中の物理過程 / 大気化学の組みこみ / オゾンの化学反応による増減  
数値シミュレーションの不確実性 / まとめ

**ピナツボ噴火とオゾン**

..... 地球環境フロンティア研究センターポスドク研究員 **滝川 雅之** 140

ピナツボ火山噴火の規模 / 火山ガスが大気に与える影響 / 研究の目的とモデルの概要  
硫酸エアロゾルの扱い / ピナツボ火山噴火時の実験 / 硫酸エアロゾルの分布と時間変化  
エアロゾルのオゾン分布と温度に与える影響 / おわりに

**オゾンホールを予測する手立て**

..... 国立環境研究所主任研究員 **秋吉 英治** 152

はじめに / 化学輸送モデル / 南極のオゾンホールの経年変動  
北極におけるオゾン破壊と日本への影響 / 亜酸化窒素( $N_2O$ )の分布  
北極オゾンの経年変動 / おわりに

**オゾンホールは何時消滅するか**

..... 国立環境研究所ポスドク研究員 **永島 達也** 160

オゾンホールの発見 / ODS がオゾン層破壊に影響するプロセス  
オゾンホールの形成機構 / オゾンホールの将来を決める要素  
ODS に対する規制効果 / オゾンホール縮小の要因 / 成層圏の気温予測  
数値モデルを用いたオゾン層の将来予測 / 南極オゾンホールの将来見通し  
北極域成層圏オゾンの将来見通し / 他モデルの計算結果との比較

閉会挨拶 ..... 九州大学大学院理学研究院教授 **宮原 三郎** 170

演者紹介 ..... 172

# オゾンホールとは何か



宮原 三郎

九州大学大学院理学研究院教授

## はじめに

1982年に南極昭和基地でオゾンホール現象が発見され、その後の研究によりそれが人為的に排出されたフロンに起因することが明らかとなり、オゾンホールは人為的な環境破壊の代表的なものとして社会的に大きな関心事となりました。その結果、オゾン層保護のための国際的なフロン使用規制が実施されるにいたったことはよく知られています。この講演では、オゾンホールの発見についてまずお

話し、なぜ成層圏にオゾン層が存在するのか、成層圏オゾンはどうな分布をしているのか、なぜそのような分布となるのか、オゾンホールの成因、近年のオゾンホールの振舞いなどについて、その概略をお話したいと思います。

## オゾンホールの発見

南極昭和基地で1982年2月から83年1月までの1年間に観測された、毎月の総オゾン量の観測値が図1に示されています。この図では、オゾン量をDU(ドブソンユニット)

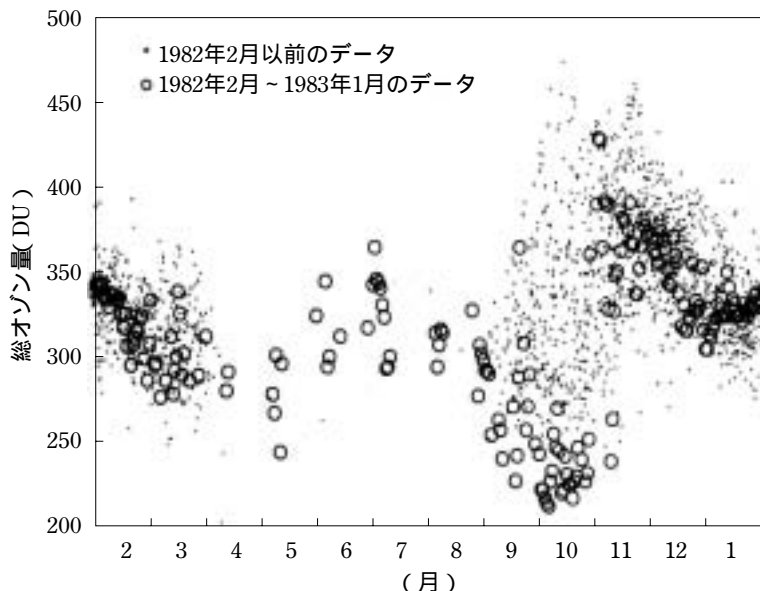


図1 南極昭和基地での総オゾン量観測値(国立極地研究所編『南極の科学』)

という単位で示していますが、ある地点の頭上の大気に含まれるオゾンの総量を総オゾン量と呼び、0-1気圧の標準状態に換算した単位がDUで、100DUは総オゾン量の厚さが標準状態で1mmであることを表しています。この図をみると、南極のオゾンは年平均すると300DU、つまり3mm程度であることがわかります。

図1において、小さな黒点は1982年2月以前の総オゾン量の観測値を示しています。82年8月までは例年どおりでしたが、9月、10月になると急激に200DU近くまで減少したことが発見されたのです。

この観測をされた方はこのデータをみて、最初は何か観測の間違いではないかと思われたそうですが、いろいろと検討した結果、観測に間違いはなく、総オゾン量が減少していることが明らかになったわけです。これが、いわゆるオゾンホールの世界で最初の観測です。この発見を機会にオゾンについて社会の関心が高まり、その後の研究により、それが人為的に排出されたフロンに起因することが明らかとなり、オゾンホールは人為的な環境破壊の代表的なものとして社会的に大きな関心事となりました。その結果、オゾン層保護のための国際的なフロン使用規制が実施されるにいたったことはよく知られています。

### 成層圏オゾンの成因

成層圏のオゾンは、酸素や窒素のように大気成分としてもともと存在するわけではありません。この成層圏オゾンの生成機構について、1930年にチャップマンが純酸素モデル(チャップマン機構)を提唱しました(図2)。その真髄を一言でいうと、オゾンは大気中の酸素分子に太陽の紫外線が作用して生成されるということです。主に100km以上の高度で、酸素分子に太陽の紫外線があたると酸素原子が生成します。生成した酸素原子が、もともと存在する酸素分子と結合してオゾンができ、生成したオゾンに紫外線があたると酸素原子と酸素分子に分解します。このとき大気を加

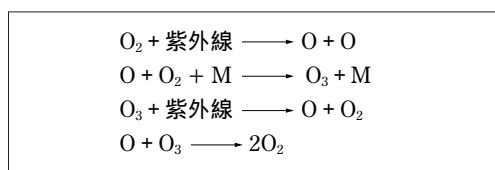


図2 チャップマン機構(純酸素モデル)

熱します。これが、成層圏の温度が高くなる原因です。この過程で生成した酸素原子とオゾンが反応して酸素分子に戻ります。このような一連の反応の結果、主に成層圏でオゾンが生成されることとなります。

### オゾンの分布とその実現機構

このチャップマン機構を使って、平均的なオゾンの鉛直分布(1cm<sup>3</sup>あたりの個数)を計算すると、図3の実線のようにになります。ところが、実際の観測値は観測誤差や地域差などがあるため1本の線に集約できませんが、チャップマン理論から計算される値からは大きくはずれたものとなります。実際に、成層圏では1桁近くオゾンが少なく、対流圏でははるかに多くなっています。

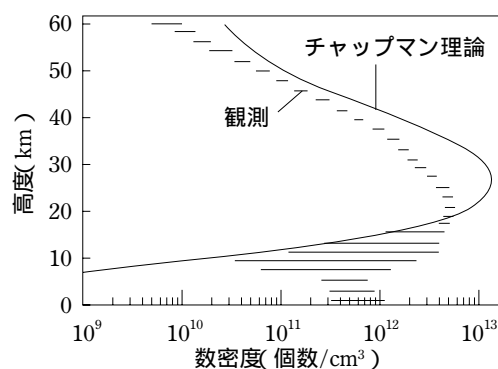


図3 オゾンの鉛直分布(島崎達夫著『成層圏オゾン』)

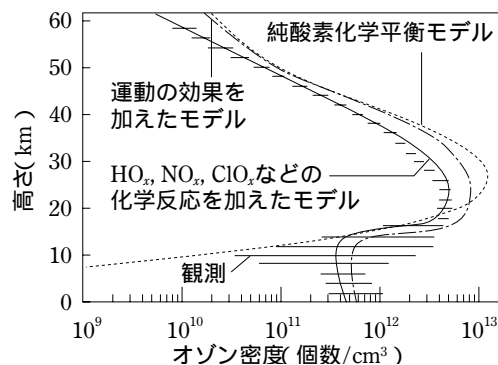


図4 化学反応・大気運動の効果をとりにれたオゾンの鉛直分布(島崎達夫著『成層圏オゾン』)

対流圏でオゾンが多いことは、大気運動の効果で説明することができます。つまり、対流圏では対流や高・低気圧擾乱の活動が活発で、成層圏と対流圏の境目付近まで及ぶ激しい大気運動によって、オゾンに対流圏に引きずり降ろすということです。しかし、成層圏における違いは、大気運動の効果だけでは説明することはできません。

しかし、チャップマンの研究以降、水素酸化物や窒素酸化物、塩素酸化物など成層圏に存在する大気中の微量成分が、触媒反応によってオゾンを消滅させる働きをもつことが明らかになってきました。このような化学的な触媒作用を考慮すると、観測値とほぼ一致し

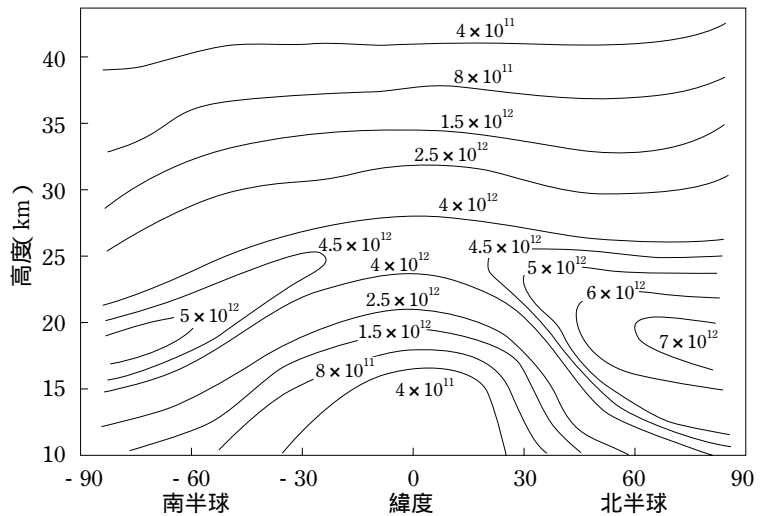


図5 オゾンの緯度 - 高度分布(数密度) 松野太郎・島崎達夫著『成層圏と中間圏の大気』)

た値が得られます(図4)。つまり、チャップマン機構に加えて種々の化学反応と大気運動によってオゾンの分布が決まっていることがわかります。

これまでに示した分布は、緯度について平均した高度分布ですが、分布を緯度ごとにみると、どのようになっているのでしょうか。

3月、ちょうど北半球が春になった季節のオゾンの緯度 - 高度分布は、図5のようになります。北極付近や南極付近の20kmより少し下付近で、オゾン数密度が最大になっており、酸素分子に紫外線が作用してオゾンが主に生成される低緯度域ではなく、高緯度ないし極域で多くなっていることがわかります。この緯度 - 高度分布は、オゾンは酸素分子に紫外線が作用して生成するという化学反応だけでは説明することができず、オゾンが主な生成域である低緯度域から大気運動によって高緯度ないし極域に輸送されていることを示しています。

### 総オゾン量の季節変動

次に、総オゾン量の季節変動がどのようになっているかをみることにしましょう。図6は、オゾンホールが発見される以前の平均的な12月から次の年の12月までの総オゾン量

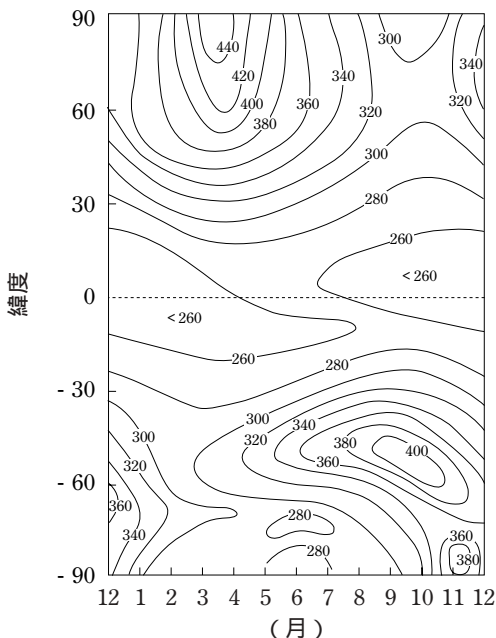


図6 総オゾン量(DU)の季節変動(Dütsch, *Advances in Geophysics*, p.211, 1971)

秋吉 英治(アキヨシ ヒデハル)

国立環境研究所成層圏オゾン層変動研究プロジェクト主任研究員

1984年九州大学理学部物理学科卒業、同大学大学院博士課程修了。福岡大学理学部助手を経て、1994年より現職。

専門は大気物理学。特にオゾン層に関連した輸送・化学・放射過程。現在は地球温暖化とオゾン層変動に関心をもつ。

伊藤 久徳(イトウ ヒサノリ)

九州大学大学院理学研究院地球惑星科学部門教授  
1972年京都大学理学部卒業、77年同大学大学院理学研究科地球物理学専攻博士課程単位取得退学。和歌山大学教育学部・助手、助教授を経て、98年より現職。

専門は気象学、特に大気大循環・大気波動。現在は対流圏と成層圏の相互作用にも関心をもつ。

江口 菜穂(エグチ ナヲ)

京大学生存圏研究所大気圏環境情報分野助手。地球環境科学博士。

1998年東海大学理学部物理学科卒業、2000年北海道大学大学院修士課程修了、04年同大学院地球環境科学研究科博士課程修了。

専門は大気科学、特に衛星データの解析。現在は上部対流圏と下部成層圏の水蒸気分布に関心をもつ。

塩谷 雅人(シオタニ マサト)

京大学生存圏研究所生存圏診断統御研究系大気圏環境情報分野教授。理学博士。

1982年京都大学理学部卒業、87年同大学大学院理学研究科博士後期課程修了。京都大学理学部助手、北海道大学大学院地球環境科学研究科助教授、教授、2001年京都大学宙空電波科学研究センター、04年4月の組織変更により現職。

専門は大気科学。特に大規模な大気の流れや微量成分分布に関心をもつ。

2002年日本気象学会学会賞受賞。

高橋 正明(タカハシ マサアキ)

東京大学気候システム研究センター教授。理学博士。

1974年鹿児島大学理学部物理学科卒業、九州大学大学院博士課程単位取得退学。九州大学理学部助手、東京大学気候システム研究センター助教授を経て、98年より現職。

専門は気象学、特に気象力学。現在は物質輸送に関心をもつ。

1994年日本気象学会賞受賞。

共著に、『キーワード気象の事典』(朝倉書店、2002)など。

滝川 雅之(タキガワ マサユキ)

地球環境フロンティア研究センター大気組成変動予測研究プログラムポスドク研究員

1995年東京大学理学部地球惑星物理学科卒業、2000年同大学大学院理学系研究科地球惑星物理学専攻修了。2000年より地球フロンティア研究システム大気組成変動予測研究領域研究員、04年7月の組織変更により現職。

専門は気象学、特に大気化学。現在は成層圏・対流圏物質交換などに関心をもつ。

永島 達也(ナガシマ タツヤ)

国立環境研究所大気圏環境研究領域大気物理研究室ポスドク研究員

1996年東京工業大学理学部地球・惑星科学科卒業、2001年東京大学大学院理学系研究科博士課程修了。専門は気象学、なかでも大気化学物質の数値モデリング。成層圏オゾン層の将来見通しに関する研究を行い、最近はよりひろく大気中の化学物質変動を介した気候の変動に興味をもつ。

西 憲敬(ニシ ノリユキ)

京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻助手



1986年京都大学理学部地球物理学科卒業、同大学大学院博士後期課程単位取得退学。京都大学防災研究所助手を経て、現職。

専門は気象学、特に熱帯気象学。現在は熱帯対流圏循環に関心をもつ。

廣岡 俊彦(ヒロオカ トシヒコ)

九州大学大学院理学研究院地球惑星科学部門教授。理学博士。

1981年京都大学理学部卒業、86年同大学大学院理学研究科地球物理学専攻博士後期課程修了。気象庁気象大学校講師、九州大学理学部助教授、同大学大学院理学研究科教授を経て、2000年より現職。専門は気象学、中層大気科学。特にオゾンホールにかかわる力学に関心をもつ。

1991年日本気象学会賞受賞。

共著に、『気象と環境の科学』(養賢堂、1993)など。

廣田 勇(ヒロタ イサム)

京都大学名誉教授。日本気象学会理事長。理学博士。

1961年東京大学理学部物理学科卒業、66年同大学大学院博士課程修了。京都大学理学部助教授、同教授を経て、2001年定年退官。

専門は気象学、特に大気波動力学。

1976年日本気象学会賞受賞。

著書に、『グローバル気象学』(東京大学出版会、1992)、『気象解析学』(東京大学出版会、1999)、『気象の遠近法』(成山堂書店、1999)など。

堀之内 武(ホリノウチ タケシ)

京都大学生存圏研究所助手。理学博士。

1992年京都大学理学部地球物理学科卒業、同大学大学院理学研究科博士課程修了。日本学術振興会海外特別研究員(ワシントン大学)を経て、京都大学宙空電波科学研究センター、04年4月の組織改変により現職。

専門は大気物理学、特に大気力学。現在は熱帯大気に関心をもつ。

1998年日本気象学会山本正野論文賞、2004年地球電磁気・地球惑星圏学会大林奨励賞受賞。

宮原 三郎(ミヤハラ サブロウ)

九州大学大学院理学研究院教授

1970年九州大学理学部物理学科卒業、72年同大学大学院理学研究科物理学専攻修士課程修了。九州大学理学部助手、同助教授を経て、91年より教授。専門は大気力学、特に大気潮汐。現在は下部熱圏の力学に関心をもつ。

1985年日本気象学会賞受賞。

向川 均(ムコウガワ ヒトシ)

京都大学防災研究所大気災害研究部門助教授。理学博士。

1983年京都大学理学部卒業、88年同大学大学院理学研究科博士課程修了。東京管区気象台、気象大学校講師、北海道大学大学院地球環境科学研究科助教授を経て、2002年より現職。

専門は気象力学、特に対流圏長周期変動の力学と予測可能性。現在は成層圏-対流圏力学結合に関心をもつ。

1990年日本気象学会1990年度山本・正野論文賞受賞。

共著(翻訳)に、『気候変動 21世紀の地球とその後』(日経サイエンス社、1997)。

山崎 孝治(ヤマザキ コウジ)

北海道大学大学院地球環境科学研究科教授。理学博士。

1971年東京教育大学理学部応用物理学科卒業、73年同大学大学院理学研究科修士課程修了、88年東京大学より理学博士取得。73年気象庁予報課、75年同庁気象研究所予報研究部、84年同主任研究官、90年同気候研究部第2研究室長を経て、94年より現職。

専門は気候力学。

---

余田 成男(ヨデン シゲオ)

京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻教授。  
理学博士。

1977年京都大学理学部地球物理学科卒業、同大学  
大学院博士課程修了。京都大学理学部助手、助教  
授を経て、2002年より現職。

専門は気象学・気候学、特に気象力学・気候力学。  
現在は成層圏 - 対流圏結合系の気候変動力学に関  
心をもつ。

1992年日本気象学会賞受賞。

共著に、『カオス応用戦略』(オーム社、1993)、『岩  
波講座 地球惑星科学 11: 気候変動論』(岩波書  
店、1996)など。

渡辺 真吾(ワタナベ シンゴ)

地球環境フロンティア研究センター地球環境モデ  
リング研究プログラムポスドク研究員

1997年九州大学理学部地球惑星科学科卒業、2002  
年同大学大学院博士課程修了。日本学術振興会特  
別研究員、02年地球フロンティア研究システム研  
究員、04年7月の組織改変により現職。

専門は中層大気の大循環と大気化学のかかわりあ  
いについて。特にオゾンホールと気候変動。現在  
は成層圏 - 対流圏結合系の高解像度モデリングに  
関心をもつ。

本書は直接出版費の一部として文部科学省科学研究費補助金  
(研究成果公開促進費「研究成果公開発表(A)」)の交付を受けています。

## オゾンのゆくえ

気候変動とのかかわりをさぐる

---

平成16年12月10日 第1版発行

編集 九州大学大学院理学研究院教授 宮原 三郎

発行者 松田 國博

発行所 株式会社 クバプロ

〒102-0072

東京都千代田区飯田橋3-11-15 UEDAビル6階

電話 03(3238)1689 振替 00170-9-173842

E-mail webmaster@kuba.co.jp

ホームページ <http://www.kuba.co.jp/>

印刷所 株式会社 技報堂

---

乱丁本・落丁本はお取り替えいたします。  
価格はカバーに表示してあります。

ISBN4-87805-049-7 C0344