

神奈川県丹沢地域の大気環境

斎藤正彦*・若松伸司*・岡崎友紀代*・國元浩平*・松隈大亮**・

下村佳史***・相原敬次****・山根正伸****

Atmospheric Environment in the Tanzawa Mountainous Areas of Kanagawa Prefecture

Masahiko SAITO*, Shinji WAKAMATSU*, Yukiyo OKAZAKI*, Kohehi KUNIMOTO*,
Daisuke MATSUKUMA**, Yoshifumi SHIMOMURA***, Kenji AIHARA****
and Masanobu YAMANE****

要 旨

斎藤正彦・若松伸司・岡崎友紀代・國元浩平・松隈大亮・下村佳史・相原敬次・山根正伸：神奈川県丹沢地域の大気環境 神奈川県自環境報告9:33-43, 2012 本研究では、丹沢におけるブナ衰退の要因解明を大気環境の視点から明らかにすることを目指し、気象と大気汚染モニタリングデータの解析、オゾンと気象の立体分布観測や数値シミュレーションによる解析を行った。気象のトレンド解析から、神奈川県では冬が短くなり夏が長くなる傾向があることが分かった。AOT40解析からは、丹沢山地の夜間におけるAOT40の増加が顕著であることが明らかとなった。後方流跡線解析からは、西丹沢犬越路で100ppb以上のオゾン濃度が測定された多くの日は、関東地方から輸送されたオゾンであることが明らかになった。また、東海地域からの輸送も認められた。オゾンゾンデ観測解析からは、春季には、上空の幅広い高度範囲に東アジアを起源とするオゾンの層が存在すること、夏季には高度1,000m付近にオゾンのピークが観測され、海風、陸風によるオゾンの輸送があること等が明らかとなった。数値シミュレーション解析からは、水平濃度分布やゾンデ観測と概ね同様の立体分布パターンの状況が再現でき、これを基に生成機構解明がなされた。

キーワード：オゾン、光化学オキシダント、AOT40、オゾンゾンデ観測、数値シミュレーション

I はじめに

これまで神奈川県では丹沢山地のブナ林の衰退に係わる調査を行い、その衰退原因のひとつとして大

気汚染質のオゾンの影響が指摘されている（阿相ら, 1995 ; 若松ら, 2001 ; 相原ら, 2004 ; 山根ら, 2007）。Sudo *et al.* (2008) は、丹沢山地の地形を考慮した流体シミュレーションを行い、地形特有の風

*愛媛大学農学部大気環境科学研究室（〒790-8566 愛媛県松山市噂味3丁目5番7号）

**九州大学総合理工学府大気海洋環境システム学専攻大気環境モデリング研究室
（〒816-8580 福岡県春日市春日公園6丁目1番地）

***NTTデータ東海（〒460-0003 愛知県名古屋市中区錦2-17-21）

****神奈川県自然環境保全センター研究企画部研究連携課（〒243-0121 神奈川県厚木市七沢657）

速とオゾン濃度のフラックスから、ブナ林衰退のメカニズムを提案している。しかし、オゾンは、都市域で排出された窒素酸化物と揮発性有機化合物により生成される汚染質であり、広域的な範囲で生成されるものである。すでに、現状のオゾン濃度はブナ林の衰退が懸念されているレベルに達している(河野, 2001) こともあり、広域的なオゾンの動態を説明する必要がある。

そのため、本研究ではオゾンを中心に大気環境の視点から丹沢山地におけるブナ衰退の要因解明を目指し、気象や大気質の長期変動解析、後方流跡線によるオゾン輸送経路の解析、気象・オゾン濃度の立体観測、気象・オゾン濃度の数値シミュレーション解析を行った。

II 気象のトレンド解析

丹沢山地周辺の東京都、神奈川県、山梨県、静岡県における過去30年間のアメダスデータより気象の長期変動(トレンド)を解析し、その変動がブナ林衰退をもたらすとされているシカやブナハバチの生態系に影響を及ぼすかを検討した。

東京都、神奈川県、山梨県、静岡県にある40地点のアメダスデータを1978年から2007年の30年間に、年間と月別の日最高気温、平均、日最低気温の上昇率を図1に示す(下村ら, 2009)。年間の上昇率の大きさは、日最低気温、平均、日最高気温とも同程度で、約0.04℃/年であった。月別にみると、2月と3月、9月と10月に気温上昇が大きい。具体的には、2月と9月では、日最高気温で約0.07℃/年、平均で約0.06℃/年、日最低気温で約0.05℃/年であった。この気温上昇の要因として、都市部ではヒートアイランドが考えられる(三上, 2005)。日本の季節変化について解析した高橋(2009)によると、ここ30年間で秋雨の始まりが半月程度遅れる傾向があることが分かり、丹沢山地においても秋雨の遅れが気温上昇に影響していると推測される。全体的な傾向として、2月と9月が最も気温上昇が大きいことから、冬が早く終わり、夏が長くなることが明らかになった。

特に冬季の気温が上昇していることは、ブナの生育環境に悪影響を及ぼす可能性が高い。ブナは寒冷

な地域を好むので、温暖で夏季の降水量が少ない地域には、あまり分布していない。丹沢山地においても標高800 mよりも高い地域にブナ林が多く生育している。

このように気温の上昇は、ブナ林の生態系に直接的な影響を与えるのみならず、ニホンジカやブナハバチの生態にも影響を及ぼし、食害の影響が加速される可能性も考えられる。

また、気温上昇により人為起源、自然起源の大気汚染原因物質の発生量も増加する。これと共にオゾンや二次生成粒子(PM_{2.5})生成をもたらす反応性も増大するので、これらの複合的な影響が懸念される。

III 大気質の長期的変化の解析

大気汚染常時監視測定結果を用いて、全国平均と神奈川県平均の大気質(光化学オキシダント、窒素酸化物、非メタン炭化水素)の長期変化を調べた。丹沢山地のブナ着葉期(4~9月)のオゾン生成の前駆物質である窒素酸化物(NO_x)と非メタン炭化水素(NMHC)について、1990~2010年度までの経年変化を図2に示す(國元ら, 2012)。窒素酸化物も非メタン炭化水素ともに、全国平均より神奈川

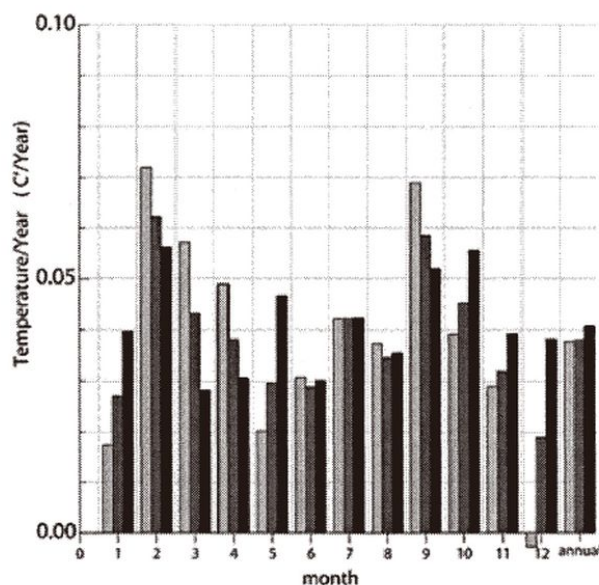


図1 過去30年間のアメダスデータによる日最高気温、平均、日最低気温の年間上昇率(月別と年平均)

(月別および年平均は、それぞれ3本の棒グラフから構成されている。左側は日最高気温、中央は平均、右側は日最低気温を示す。)

県の方が高い。非メタン炭化水素は1990年代前半に急激に低下しているが、窒素酸化物は2000年頃から急激に低下している。窒素酸化物の低下は、自動車排気ガス規制によるものであると推測される。

神奈川県および全国の1990～2010年度までの光化学オキシダント (O_x 、ほとんどがオゾン) の経年変化を図3に示す。図2に示した通り、オゾン生成の前駆物質である窒素酸化物と非メタン炭化水素が経年的に減少しているが、光化学オキシダントは全国も神奈川県も増加傾向にある。

また、ポテンシャルオゾン^注 (PO) と二酸化窒素 (NO_2) の経年変化を図3に示す。神奈川県の光化学オキシダントは全国平均より低い値を示しているが、ポテンシャルオゾンは全国平均より高い値を示している。神奈川県では、全国平均よりも二酸化窒素が高いため、ポテンシャルオゾンが全国平均より高くなったと考えられる。ポテンシャルオゾンが高いことは、全国平均に比べ光化学反応によって生成したオゾンが多いことを示している。

非メタン炭化水素と窒素酸化物の比について、1990～2010年度までの経年変化を図4に示す。この比が6～8の範囲にあると80ppbを超える光化学オキシダントが確認されやすくなるとされている。窒素酸化物が急激に低下し始めた2000年頃から非メタン炭化水素と窒素酸化物の比は上昇傾向に転じている。前駆物質の削減により非メタン炭化水素

と窒素酸化物の比率が変わり、光化学オキシダントを発生させやすい環境が生み出されている。

日中 (6:00～18:00) と夜間 (18:00～6:00) におけるAOT40^注 (Accumulate exposure Over a Threshold of 40ppb、伊豆田ら、1997) の神奈川県平均 (1990～2010) と犬越路 (2004～2010) の経年変化を図5に示す (國元ら、2010)。各年の平均値は、ブナの着葉期の4～9月の半年間の値から算出した。日中、夜間ともに、犬越路は県平均より高い値を示している。特に夜間の値は県平均より3～4倍程度高い値になっており、夜間のオゾンが高いことによる植物への影響が懸念される (國元ら、2012; 國元、2012)。

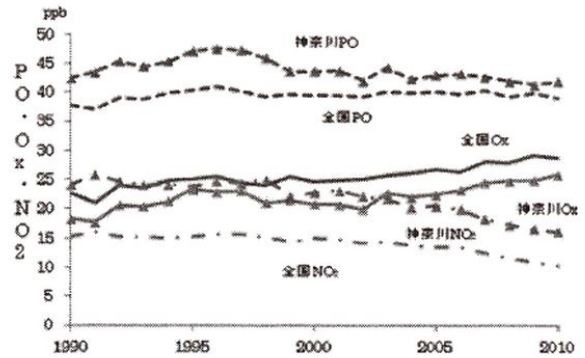


図3 光化学オキシダント (O_x)、ポテンシャルオゾン (PO)、二酸化窒素 (NO_2) の経年変化 (全国平均、神奈川県平均)

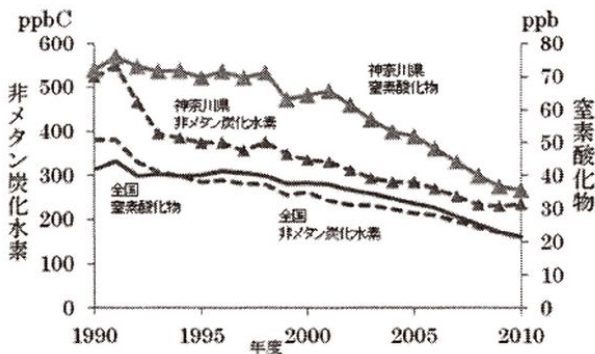


図2 窒素酸化物と非メタン炭化水素の経年変化 (全国平均、神奈川県平均)

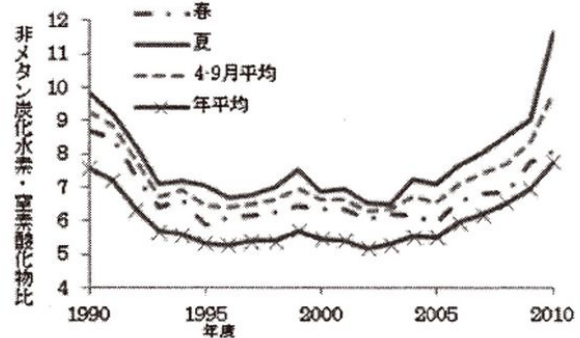


図4 非メタン炭化水素と窒素酸化物の比の経年変化

注) ポテンシャルオゾンとは、光化学反応によって生成したオゾンは、 $NO + O_3 \rightarrow NO_2 + O_2$ の反応により、NOを消失する反応で一部オゾンが消費されるといわれており、この消失分を補正したもの (環境省、2007)。

Ⅳ 後方流跡線によるオゾン輸送経路の解析

丹沢山地の上空の空気塊がどのような経路を経て移動してきたかを調べるために、後方流跡線解析^{注)}を実施した。ここで用いた流跡線解析は、国立環境研究所地球環境研究センター (NIES - CGER ; <http://www-cger.nies.go.jp/index-j.html>) で開発された METEX (Meteorological Data Explorer) を使用した。計算方法は三次元法 (Kinematic) を用い、入力する気象データは気象庁の GPV (Grid Point Value) の MSM (Meso Scale Model) データ (格子系、地上 : 0.05度×0.0625度、気圧面 : 0.1度×0.125度) を使用した。到達点は、北緯139.083°、東経35.489°の西丹沢犬越路局 (以下、犬越路局と呼ぶ) の海拔1,200mとした。解析対象日は、2007年と2008年の2年間のうち着葉期の4月から9月の間に犬越路局のオゾン濃度が100ppb以上の日 (23日間) とした。

後方流跡線解析 (METEX) の結果、犬越路局に到達する経路として大きく2パターンがあることが分かった (図6)。一つは、東海・関西方面から犬越路局へ輸送されてきたパターン (3例)、もう一つは、関東方面から輸送されたパターン (20例) である。犬越路局で100ppb以上のオゾン濃度が測定された多くの日は、関東地方からの輸送されたものであることが後方流跡線解析 (METEX) から分かった (松隈ら, 2009 ; 松隈ら, 2010)。

Ⅴ 気象・オゾン濃度の立体観測

丹沢山地におけるオゾンと気象要素 (風向風速、温湿度) の立体分布を把握するために、2009年から2011年に24回のオゾンゾンデ観測を実施した。ゾンデ観測は、自由気球に観測機器を取り付けて300m/分間で飛揚し、上昇中に外気と高度を測定することにより、各要素の高度分布を観測するものである (岡崎ら, 2010 ; 山下ら, 2011)。

気象要素を観測する場合は、気象ゾンデ (明星電気社製 RS-06G 型 GPS ラジオゾンデ) を用い、オゾン濃度観測をする場合は、気象ゾンデにオゾン濃度のセンサー (EN-SCI社製 1 Z 型) を取り付けて観測する。オゾン濃度は、ヨウ化カリウムとオゾンとの化学反応で生じる電流から算出するものであり、ECC (Electrochemical Concentration Cell) 型と呼ばれている。本観測機材は、気象庁をはじめこれまで広く利用されている。

2009年春季 (3月) のゾンデ観測 (図7) では、高度1,000mから5,000mの広い範囲にオゾンのピークが見られ、このパターンは愛媛県松山市でのオゾン観測と類似しており、東アジアを起源と考えられる対流圏起源のオゾンの層が存在すると考えられる。2009年8月と2010年7月の夏季は1,000m付近にオゾンのシャープなピークが認められる (図7)。特に2010年の場合には、500m、1,000m付近

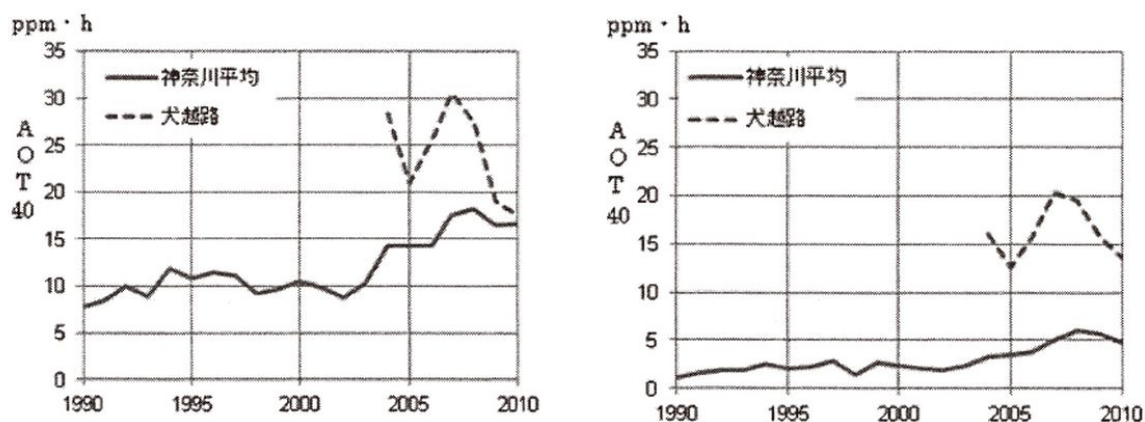


図5 日中(左図; 6:00~18:00)と夜間(右図; 18:00~6:00)のAOT40の経年変化(神奈川県平均、犬越路局)

注) AOT40とは、オゾン濃度が40ppbを超えた時の40ppb超過濃度の期間積算量であり、植物への影響を示す指標として使われている。

注) 後方流跡線解析とは、到達地点にある空気塊がどのような経路を経て輸送されてきたかを調べるため、過去の気象データを使って時間を遡って移動経路を調べる方法である。

と上空8,000から9,000mにピークを持つ複雑な構造になっていた。上空の500m、1,000m付近のピークは海陸風循環の影響によるものと考えられ、下層500mのピークは南寄りの風である海風領域、上層1,000mのピークは北寄りの風である陸風領域に対応している。

VI 気象・オゾン濃度の 数値シミュレーション

丹沢山地の上空の気象やオゾン濃度を解析するために、コンピュータによる数値シミュレーションを実施した(斎藤ら, 2009; 斎藤ら, 2011)。本シミュレーションでは、気象を再現するモデルとしてMM5(UCAR, 2008)を用い、オゾン濃度を再現する大気

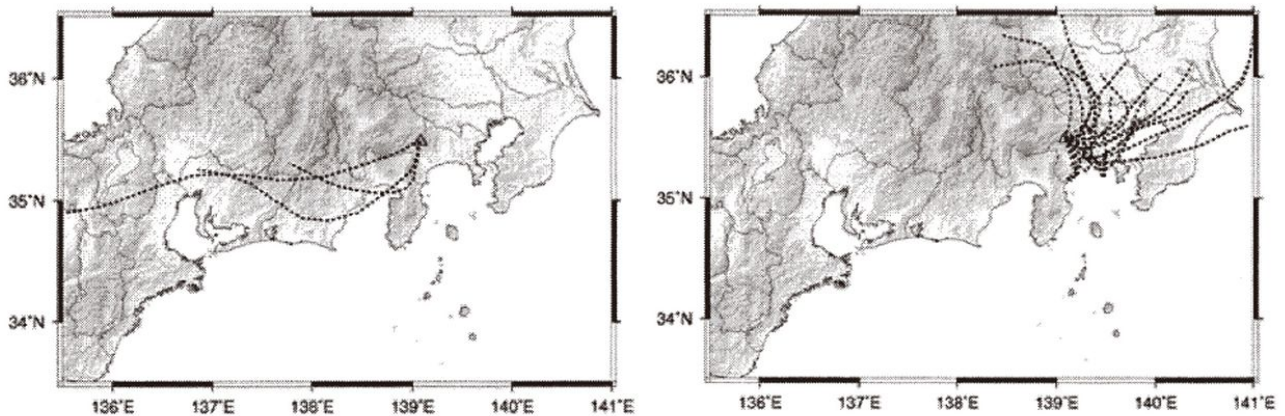


図6 METEXによる後方流跡線解析の結果

(左図：東海・関西方面からの輸送された3例、右図：関東方面から輸送された20例)

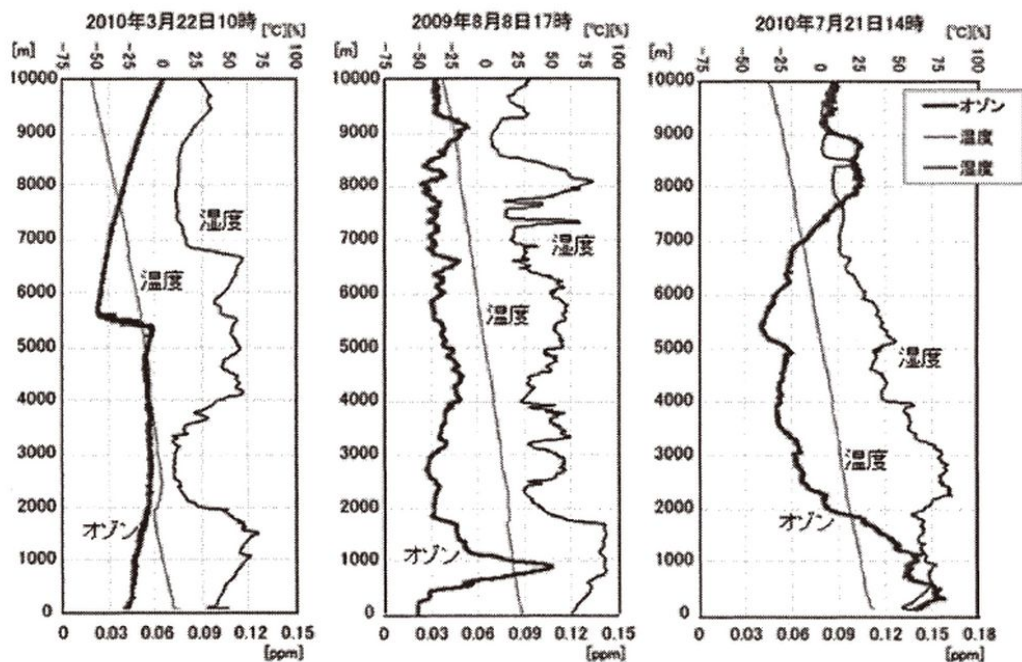


図7 オゾン濃度、温湿度の鉛直分布

(左図：2010年3月22日10時放球、中央の図：2009年8月8日17時放球、右図：2010年7月14時放球)

質モデルとしてCMAQ (Byun *et al.*, 2006)を用いた。東アジアの影響を考慮するために、図8に示した領域を設定した。大気質モデル (CMAQ) へ入力する気象データは、気象モデル (MM 5) の計算結果を用いた。気象モデル、大気質モデルともに、本州域の初期・境界条件は東アジア域の結果を取り込み、関東域の初期・境界条件は本州域の結果を取り込んでいる。排出量データは、東アジア域については国立環境研究所 (2007) のデータを、また本州域、関東域については Kannari *et al.* (2007) を用いた。

丹沢山地の周辺の測定局 (座間) における地上の風向風速の観測結果 (神奈川県, 2011) と気象モデル (MM 5) の結果を図9に示す (斎藤ら, 2011)。解析期間は、2010年7月20日9時から7月26日9時までである。午前中は風が弱い、午後風が強まり南寄りの風 (海風) になっている。夜は再び風は弱まっている。光化学スモッグ注意報は、2010年7月21日から24日まで発令されており、日中は比較的風速が弱く、気温が高い典型的なオゾン高濃度気象条件になっている。

気象ゾンデ観測の鉛直方向の温位^{注)}・比湿^{注)}、風向風速分布 (2010年7月21日10時) を図10に示す

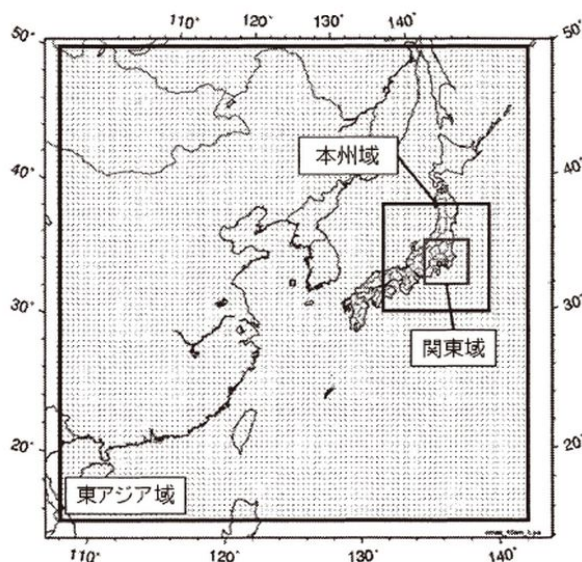


図8 計算領域

(東アジア域: 45km計算格子間隔、本州域: 15km計算格子間隔、関東域: 5km計算格子間隔)

(斎藤ら, 2011)。温位分布より、大気境界層の高さ (図中: PBL 高さ) は、日中の対流により 1,800 m 付近まで達している。比湿は、大気境界層内ではほぼ一定で、大気境界層より上空では急速に減少している。また、風向風速についてみると、大気境界層より上空では北寄りの風が卓越しているが、大気境界内では風が弱く、丹沢山地の山頂付近の 1,500 m では風速は 2 m/s 以下になっている。これらのことから、気象モデル (MM 5) の結果は、温位、比湿、風向風速ともに変化傾向を再現していると評価される。

次に、地上のオゾン濃度の測定値 (神奈川県, 2011) と大気質モデル (CMAQ) の結果を比較した (斎藤ら, 2011)。測定局は、丹沢山地の代表局として犬越路局、また、丹沢山地周辺の一般環境大気測定局の代表局として座間局とした (図11)。犬越路局や座間局も、大気質モデル (CMAQ) により良く再現されているが、特に犬越路局の夜間オゾン濃度が下がらない現象も良く捉えている。

一般に、多くの測定局では日中オゾン濃度が高く、夜間低い一山型の日変化を示すが、丹沢山地でのオゾン濃度は夜間下がらない日変化を示している (図11)。そこで、丹沢山地では何故、オゾン濃度が日変化をしないかを調べるためにプロセス解析を実施した。プロセス解析とは、オゾン濃度の時間変化を、移流項、拡散項、化学反応、湿性・乾性沈着に分解し、各々の大きさを求めるものであり、大気質

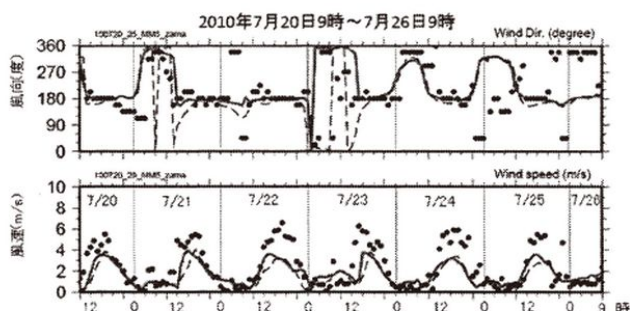


図9 風向風速の時刻変化 (座間)

(点は実測、実線は気象モデル 5 km 計算格子間隔、破線は気象モデル 15 km 計算格子間隔の結果)

注) 温位とは、空気塊を標準気圧 (1,000hPa) まで断熱的に移動させたときの温度を表す。

乾いた大気中では 100m 高くなると約 1℃ 低くなりますが、この効果を差し引いた気温が温位に相当する。

注) 比湿とは、湿潤空気の質量 (1 kg) 当たりの水蒸気の質量 (kg または g) を表す。

モデル (CMAQ) の機能のひとつである。犬越路局における夜間のオゾン濃度の時間変化の内訳を調べた結果、丹沢山地では夜間風が弱く移流項や拡散項が小さく、化学反応、湿性・乾性沈着がほとんど無視できる大きさであったため、日中のオゾン濃度がそのまま保たれたためであることが分かった。

大気質モデル (CMAQ) による地上オゾンの水平濃度分布の時刻変化を図12に示す。また、オゾン濃度の測定結果は、測定位置の○に濃度スケールに対応した色を付けた。解析対象日は、神奈川県が光化

学スモッグ注意報を発令した2010年7月21日とした。日出とともに都市圏を中心にオゾン濃度が増加し、14時から16時にかけて東京都を中心に高濃度になっている。丹沢山地は、この広域な高濃度オゾン域の端に位置している。この時刻別水平濃度分布より、オゾンは広域的に発生する汚染物質であることが分かる。

2010年7月21日10時におけるオゾン濃度の鉛直分布の観測結果と大気質モデル (CMAQ) 結果を図13に示す (斎藤ら, 2011)。オゾンゾンデ観測結果

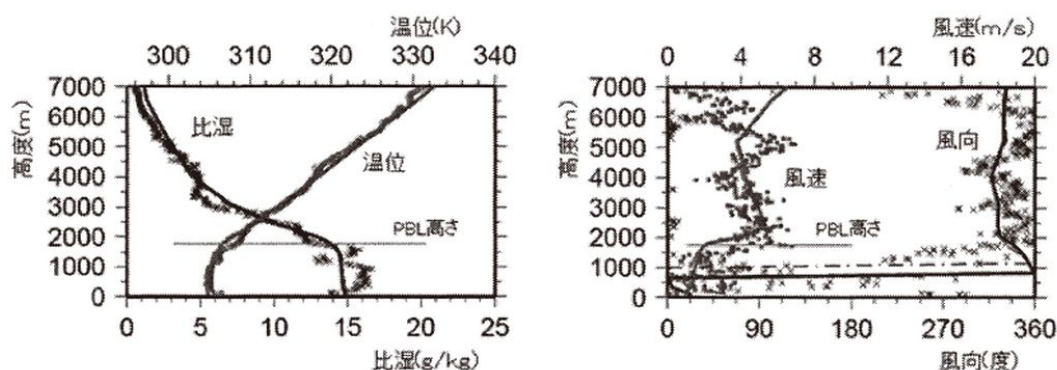


図10 鉛直方向の温位・比湿、風向風速分布(2010年7月21日10時)

(点は実測、実線は気象モデル5km計算格子間隔、破線は気象モデル15km計算格子間隔の結果)

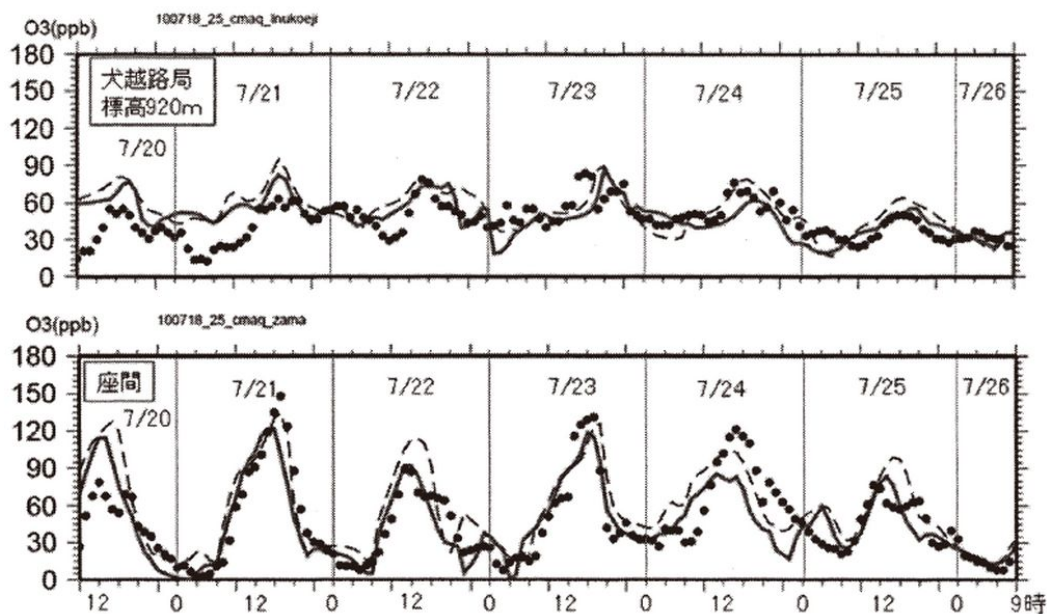


図11 地上オゾン濃度の時刻変化(犬越路局と座間)

(点は実測、実線は大気質モデル5km計算格子間隔、破線は大気質モデル15km計算格子間隔の結果)

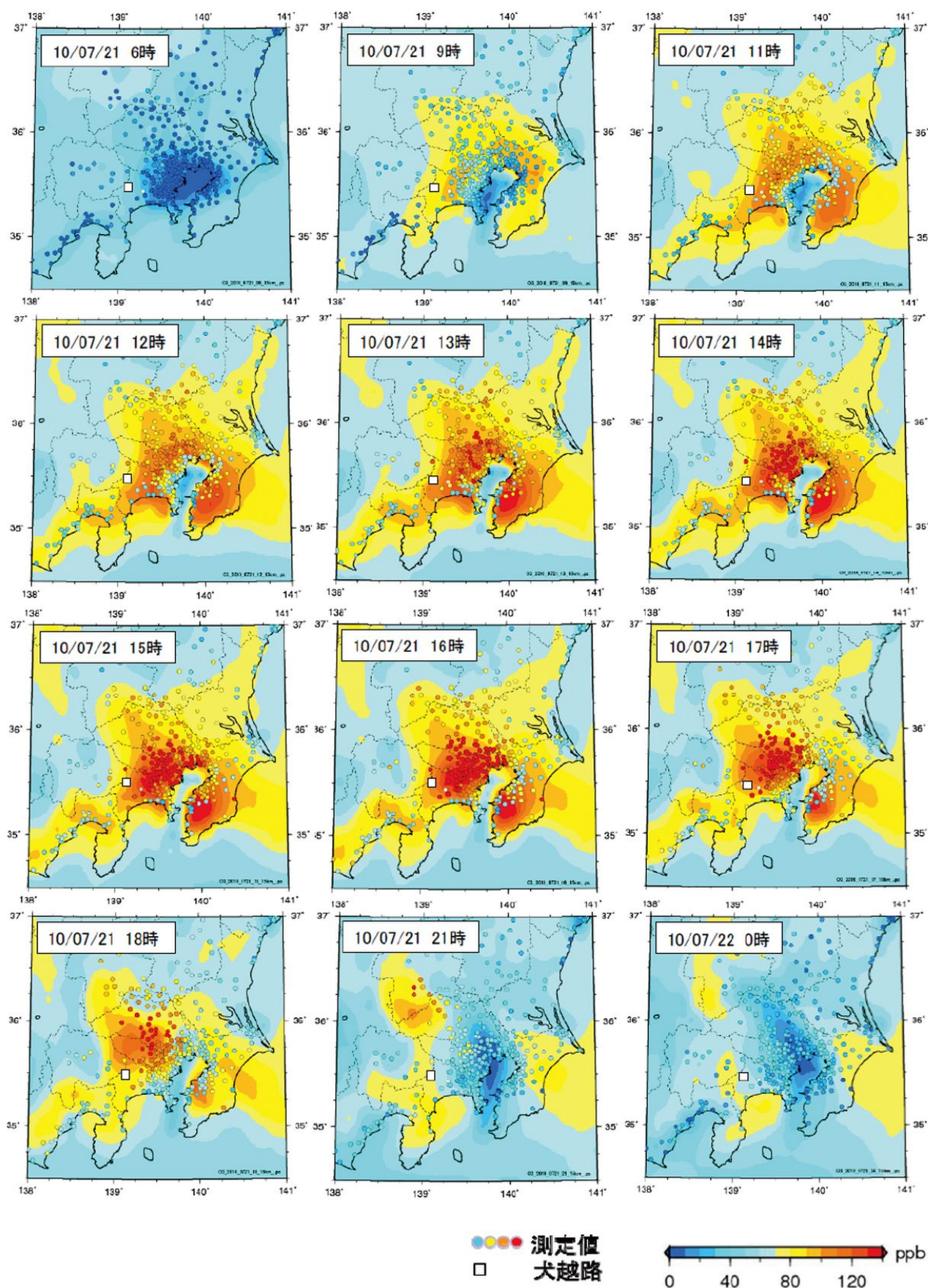


図12 地上オゾンの水平濃度分布の時刻変化

では、大気境界層内ではほぼオゾン濃度は一定で、大気境界層より上空では減少する傾向であった。大気質モデル (CMAQ) の結果でも、大気境界層の高さで明確な境になっており、大気境界層内ではほぼオゾン濃度は一定になり、観測結果とほぼ一致した。

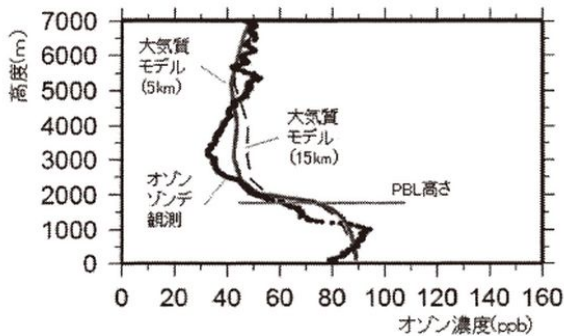


図13 オゾンゾンデ観測と大気質モデルによるオゾンの鉛直濃度分布(2010年7月21日10時)

(点は実測、実線は大気質モデル5km計算格子間隔、破線は大気質モデル15km計算格子間隔の結果)

VII まとめ

2008年から2011年の4年間にわたり丹沢におけるブナ衰退の要因解明を大気環境の視点から明らかにすることを目指し、気象と大気汚染モニタリングデータの解析、オゾンと気象の立体分布観測や数値シミュレーション解析を実施した結果、次のことが明らかとなった。

神奈川県およびその周辺地域の気象トレンドの解析から、解析対象地域で季節進行に変化が見られること、即ち冬が短くなり夏が長くなって来ていることが明らかとなった。このような変化は、ブナ林の生態系に直接的な影響を与えることに加え、ニホンジカやブナハバチの生態にも影響を及ぼし、食害の影響が加速される可能性も考えられる。

オゾンを生成する前駆物質(窒素酸化物と非メタン炭化水素)の濃度は減少しており、濃度の地域間における差が近年少なくなっているが、オゾン濃度は大きく上昇していることが分かった。特に山岳地域の夜間におけるAOT40の増加が顕著であること

が明らかとなり、植物への影響が懸念される。またVOC/NO_x比が最近上昇傾向にあり、反応機構の変化がオゾン増加に関連している可能性がある。

後方流跡線解析の結果、犬越路局に到達する経路として大きく2パターンがあることが分かった。犬越路局で100ppb以上のオゾン濃度が測定された多くの日は、関東地方からの輸送されたものであることが後方流跡線解析から分かった。また、東海地域からの輸送も認められた。

春季と夏季におけるゾンデ観測の結果、丹沢上空は、地上よりもオゾン濃度が高いことが分かった。春季には、上空の広い高度範囲に亘り東アジアを起源とするオゾンの層が存在すること、夏季には1,000 m付近にオゾンのピークが観測され、海風や陸風の局地循環があることが明らかになった。

数値シミュレーション解析からは、水平濃度分布やゾンデ観測と概ね同様の立体分布パターンの状況が再現でき、これを基に生成機構解明がなされた。

今後の課題として、①山岳地域における大気汚染モニタリングと、これと関連させての気象・気候と大気汚染の広域データ解析の継続実施、②オゾンやPM_{2.5}の立体分布観測の実施とモデル解析の活用が望まれる。

VIII 謝 辞

本研究の実施にあたり、愛媛大学農学部西川敦先生、愛媛大学農学部大気環境研究室の神田勲研究員にご協力、ご助言を頂き、ここに感謝いたします。気象・オゾンゾンデ観測の技術的サポートを頂いたメテオリサーチ株式会社の堀越信治さんに感謝いたします。本研究では、愛媛大学農学部大気環境科学研究室内の学生の卒論が含まれています。特に、泉萌さん、新山翔一さん、奥田梨恵さん、久保龍志さん、武智勝哉さん、高見雄佑さん、野本悠太さんの論文に負うところが大きく、ここに感謝いたします。

IX 引用文献

相原敬次・阿相敏明・武田麻由子・越地正 (2004) 森林衰退の現状と取り組み(II) 神奈川県の丹沢山地における樹木衰退現象, 大気環境学会誌

39: A29-A39.

阿相敏明・三村春雄・須山芳明・相原敬次・牧野宏・高橋照美・清水源治・若松伸司 (1995) 神奈川県西部地域における大気汚染発生機構の解明(2)－丹沢後背地への光化学オキシダントの流入過程－, 神奈川県環境科学センター研究報告, 18: 7-16.

Byun, D.W., Schere, K.L. (2006) Review of the governing equations, computational algorithms, and other components of the models-3 community multi-scale air quality (CMAQ) modeling system. Applied Mechanics Reviews 59: 51-77.

伊豆田 猛・松村 秀幸 (1997) 植物保護のための対流圏オゾンのクリティカルレベル. 大気環境学会誌 32: A73-A81.

神奈川県 (2011) 大気汚染常時監視測定結果月報 (1時間値)ダウンロードページ, <http://www.k-erc.pref.kanagawa.jp/taiki/data/index.htm>

環境省 (2007) 光化学オキシダント・対流圏オゾンに係る知見の整理 (資料3), 第2回光化学オキシダント・対流圏オゾン検討会.

Kannari A., Y. Tonooka, T. Baba, K. Murano (2007) Development of multiple-species 1kmx1km resolution hourly basis emissions inventory for Japan, Atmos. Environ., 41: 3428-3439.

河野吉久 (2001) 樹木に及ぼす酸性物質の長期慢性影響評価に関する研究. 大気環境学会誌36: 47-59.

国立環境研究所 (2007) East Asian air pollutant emissions grid database (EAGrid2000). http://www.cger.nies.go.jp/db/eagrid/eagrid_index_e.html

國元浩平・岡崎友紀代・西川 敦・若松伸司 (2010) 近年における日本のAOT40の推移及び地域的比較. 第51回大気環境学会年会 (大阪市). 講演要旨集255.

國元浩平・岡崎友紀代・若松伸司 (2012) 神奈川県における光化学オキシダントの解析. 大気環境学会中国四国支部公開講演会 (広島市). 講演要旨集23-26

國元浩平 (2012) 神奈川県における平野域と山岳域における光化学オキシダントの濃度分布と変動要因に関する研究. 愛媛大学農学部農学研究科

修士課程.

松隈大介・下村佳史・斎藤正彦・岡崎友紀代・西川敦・若松伸司・相原啓次・飯田信行 (2009) 丹沢山地周辺における高濃度オゾン解析. 第50回大気環境学会年会 (横浜市). 講演要旨集476.

松隈大亮・斎藤正彦・岡崎友紀代・西川敦・若松伸司・相原敬次・飯田信行・山根正伸 (2010) 丹沢におけるO₃移流経路の検討. 大気環境学会創立50周年記念中国四国支部公開講演会 (広島市). 講演要旨集17-20.

三上岳彦 (2005) 都市のヒートアイランド現象とその形成要因－東京首都圏の事例研究－. 地学雑誌114: 496-506.

岡崎友紀代・相原敬次・阿相敏明・福永明子・高見雄佑・國元浩平・山下真生・武智勝哉・堀越信治酒井隆・山根正伸・若松伸司 (2010) 神奈川県丹沢地域における2009年夏季のオキシダント濃度分布観測. 愛媛大学農学部紀要55: 7-23.

斎藤正彦・若松伸司 (2009) 関東地方の森林保全のためのオゾン濃度分布の推定. 第50回大気環境学会年会 (横浜市). 講演要旨集433.

斎藤正彦・若松伸司・岡崎友紀代・堀越信治・山根正伸・相原敬次 (2011) 丹沢山地の鉛直オゾン分布に関するモデル解析. 第52回大気環境学会年会 (長崎市). 講演要旨集445.

下村佳史・斎藤正彦・岡崎友紀代・西川敦・若松伸司・相原啓次・飯田信行 (2009) 丹沢山地における過去30年間の気象トレンド. 第50回大気環境学会年会 (横浜市). 講演要旨集301.

Suto H., Hattori Y., Tanaka N. and Kohno Y. (2008) Effects of Strong Wind and Ozone on Localized Tree Decline in the Tanzawa Mountains of Japan. Asian Journal of Atmospheric Environment 2: 81-89.

高橋信人 (2009) 前線分布でみた日本の季節進行とその近年における傾向. 天気56: 713-726.

UCAR (2008) MM5 Community Model. <http://www.mmm.ucar.edu/mm5/>

若松伸司・篠崎光夫 (2001) 広域大気汚染－そのメカニズムから植物への影響まで－, 209pp, 裳華房.

山根正伸・相原敬次・鈴木 透・笹川裕史・原慶太

郎・勝山輝男・河野吉久・山上 明（2007）総合解析．ブナ林の衰退機構と再生の方向，平成13～平成18年度，丹沢山地のブナ林衰退機構の解明に関する研究調査報告書，104-111.

山下真生・泉 萌・岡崎友紀代・西川 敦・若松伸司（2011）オゾンと気象の立体分布観測(2)．大気環境学会中国四国支部公開講演会（広島市）．講演要旨集13-16.