

学位論文全文に代わる要約 Extended Summary in Lieu of Dissertation

氏名： 齋藤 正彦
Name

学位論文題目： 丹沢山地におけるオゾンの汚染メカニズムと樹木への影響
Title of Dissertation に関する研究

学位論文要約：
Dissertation Summary

第 1 章 緒論

神奈川県丹沢山地において、1980 年頃からブナ (*Fagus crenata* Blume) の立ち枯れが多く見られるようになった (図 1)。神奈川県が実施した調査の結果、ブナ衰退の原因として O_3 が原因のひとつと結論づけられた。しかし、丹沢山地全域での O_3 の汚染メカニズムは未だ十分に解明されておらず、さらに同山地全域での樹木への O_3 の影響についても明らかにされていない。そこで本研究では、気象要素 (風向風速、温湿度など) を推定する気象モデル及び大気汚染物質の発生・輸送・変質・沈着に関する大気質モデルを活用して、丹沢山地の O_3 の汚染メカニズムを解明し、樹木への O_3 の影響を明らかにすることを目的とした。

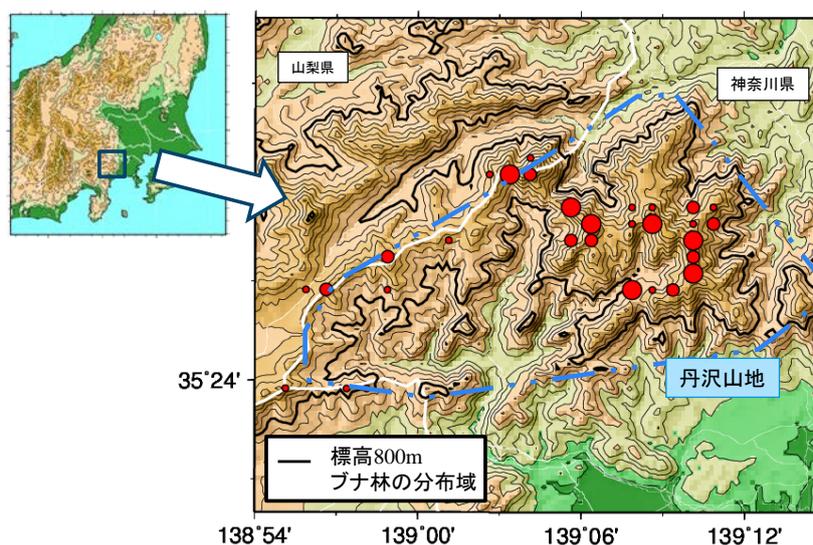


図 1 丹沢山地におけるブナの衰退本数割合 (山根ら, 2007a を元に作図)

● : 0-15% ● : 15-37% ● : 38-88%

二点破線は丹沢山地を示し、太い実線は標高 800m の等高線を示す。
(ブナ林は標高 800m 以上に分布している。)

丹沢山地の衰退状況や樹木への O_3 の影響を評価する方法について、既報研究のレビューを行った。その結果、①森林衰退の調査の結果、奥日光白根山や赤城山などの多くの山地で O_3 が影響していることが指摘されていること、②丹沢山地においても、現地調査から O_3 が衰退原因のひとつであると結論づけられていること、③都市域で生成された高濃度 O_3 は、大規模海風により沿岸部から関東北部へ輸送されること、④数値モデルを用いた大気中の O_3 濃度の推定は都市域で多くの研究がなされているが山岳での研究は少ないこと、⑤樹木への影響を評価する方法として O_3 曝露量のみならず樹木の葉面の気孔からの O_3 の取込み量を考慮することが重要であることをレビューした。

第2章 解析方法

本研究では、気象モデルは第5世代の米国国立大気研究センター/ペンシルバニア州立大学メソスケールモデル(Fifth-Generation PSU/NCAR mesoscale model: MM5) Ver.3.7 と大気質モデルは、米国環境保護庁が開発した領域大気質汚染モデル (the Community Multiscale Air Quality : CMAQ) Ver.4.7.1 を用いた。両モデルとも、計算領域は東アジア域、本州域、関東域の3つに分けて計算を行った。気象モデルの計算領域を図2に、計算格子数を表1に示す。

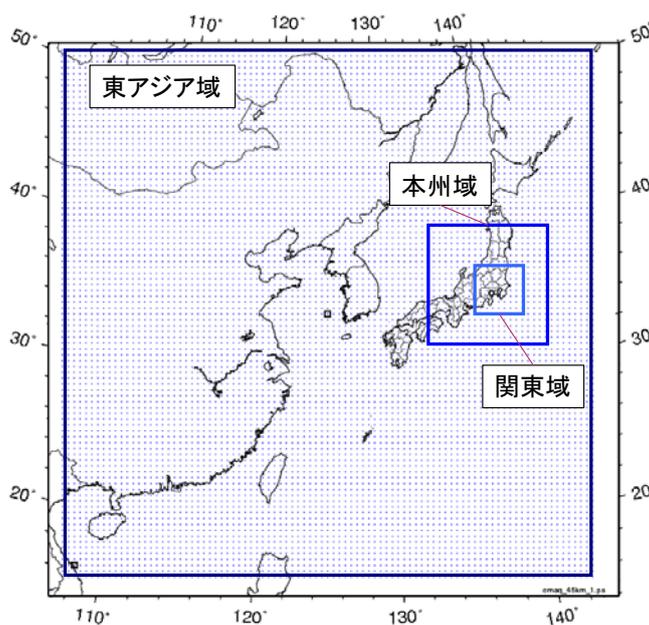


図2 気象モデルの計算領域

表1 領域別の計算格子数 (東西格子数 x 南北格子数)

領域名	格子間隔	気象モデル MM5	大気質モデル CMAQ
東アジア域	45 km	91x91	87x87
本州域	15 km	64x64	59x59
関東域	5 km	91x91	87x87

汚染質などの化学物質の排出量については、東アジア域は国立環境研究所(2014)が公開している緯度経度0.5度毎の排出量データを用いた。排出国は、中国、台湾、日本、韓国、北朝鮮、モンゴルの6か国である。本州域と関東域については、国土地理院3次メッシュの全国排出量データ(Kannari et al., 2007)を用いた。

モデルの検証のために、丹沢山地内の犬越路局や丹沢山地周辺の測定局の測定結果を用いた(図3、表2)。

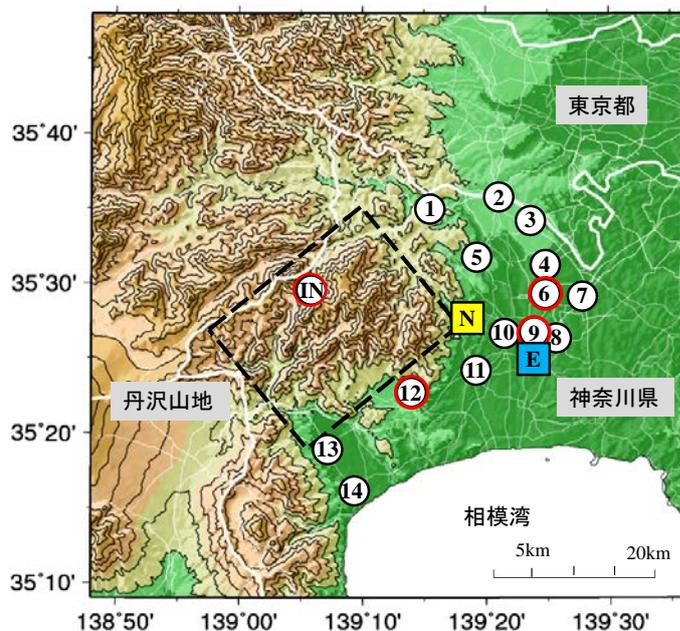


図3 丹沢山地周辺の測定局

表2 丹沢山地周辺の測定局・アメダス局

記号	局名	記号	局名
①	津久井	⑩	厚木
②	橋本	⑪	伊勢原
③	相模原	⑫	秦野
④	相模台	⑬	南足柄
⑤	愛川町	⑭	小田原
⑥	座間	E	海老名アメダス局
⑦	大和	N	七沢
⑧	綾瀬	IN	犬越路
⑨	海老名		

O₃曝露量による樹木への影響の評価方法として、AOT40 (Accumulate Exposure Over a Threshold of 40 ppb) の算出式を示した。また、気孔からのO₃の取込み量については、気孔コンダクタンスの算出式や入力パラメータについて述べた。

第3章 地上・上層の気象解析

丹沢山地の地上・上層の気象場の特徴を解析した。丹沢山地内にある犬越路局(標高920m)は地形の影響を受けているため観測値は利用せず、気象モデルの計

(様式5) (Style5)

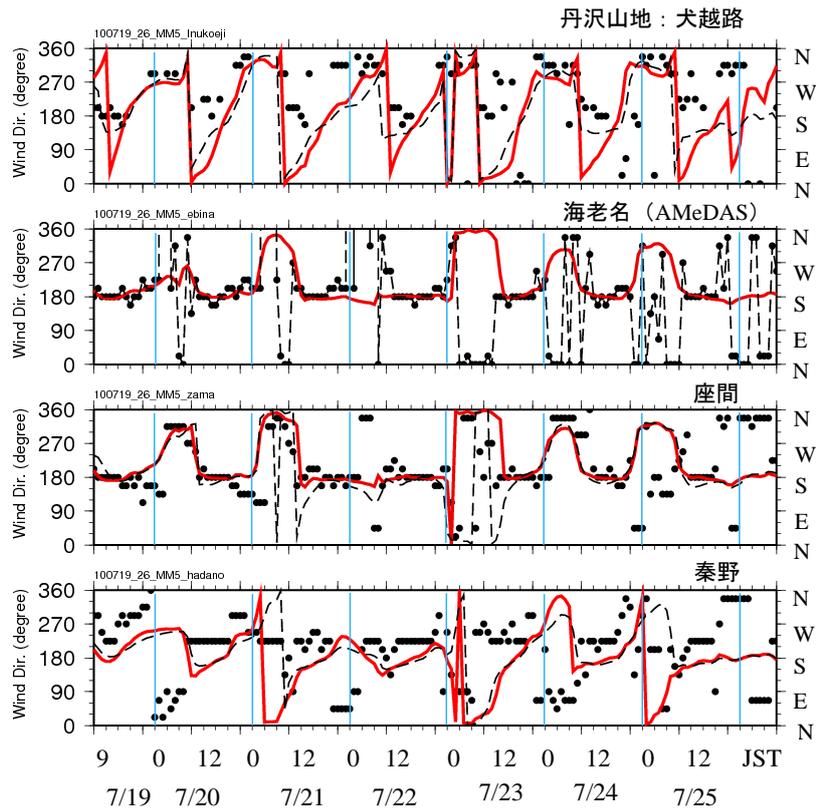


図4 地上の風向の時刻変化（2010年7月19日9時から7月26日9時）に関する気象モデル計算結果と測定局での観測値との比較
実線：モデル（5km格子）、破線：モデル（15km格子）、点：観測値

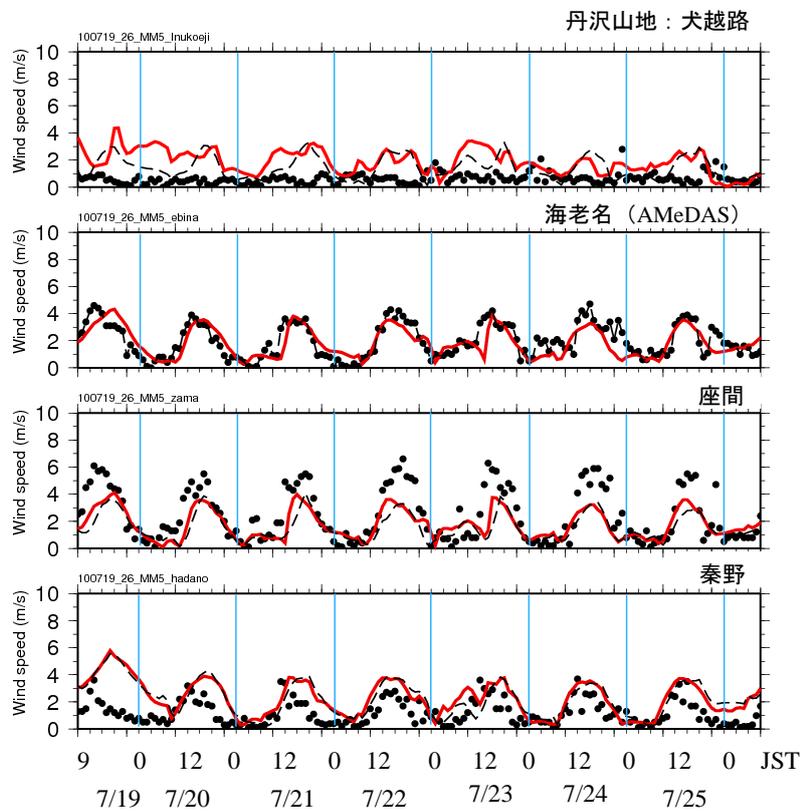


図5 図4と同じ、ただし地上の風速について

算結果より、犬越路局における O_3 高濃度日の地上の風向風速の特徴を調べた (図4、図5)。その結果、早朝では風速は弱く、昼にかけて徐々に風速は増す。午後には南寄り 4m/s 程度の風速になることを明らかにした。

丹沢山地の麓で行われたゾンデ観測結果から、丹沢山地の山頂付近の高度を中心に、それより下層では海風により南寄りの風が卓越するが、頂上付近の高度より上層では総観気象 (天気図スケール) の場に支配され北西寄りの風が卓越していた (図6)。

海老名のアメダス局での地上風の風向風速の観測結果やゾンデ観測から得られた鉛直方向の温位、比湿及び風向風速は、モデル結果と良く一致した。このことから、気象モデルを丹沢山地へ適用できることが明らかになった。

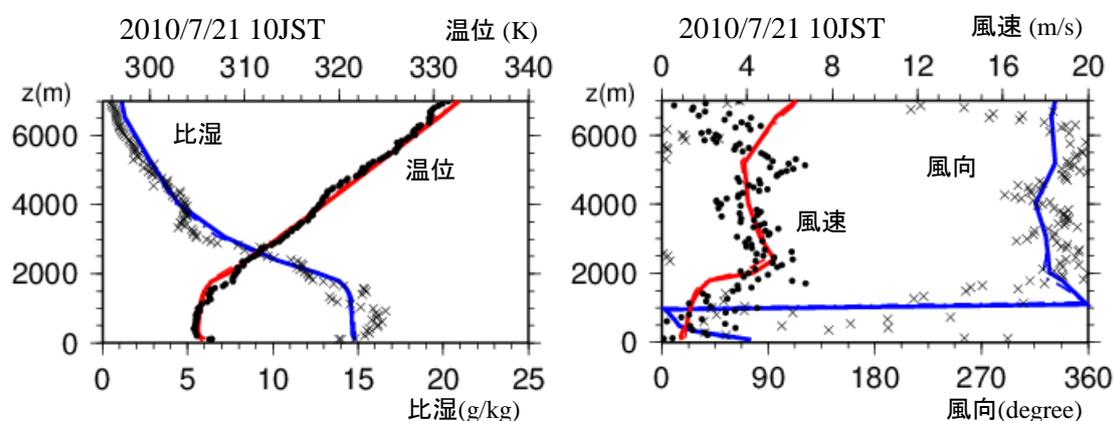


図6 七沢上空の温位、比湿、風向、風速の鉛直分布に関する実測値と気象モデル計算結果の比較 (2010年7月21日10時)

●と×：ゾンデ観測結果、実線：モデル 5km 格子、破線：モデル 15km 格子

第4章 地上・上層の O_3 濃度の解析

丹沢山地と周辺市街地 (海老名局) の地上と上層の O_3 濃度について検討した。

月別の O_3 濃度変化を 1998 年から約 16 年間について調べた結果、2013 年を除き犬越路局は海老名局に比べ常に高い濃度傾向を示した。また、2008 年以降、海老名局では O_3 濃度が増加傾向にあり、犬越路局と同程度又はそれ以上の濃度が測定されていることが明らかになった。

犬越路局は、周辺の地点に比べ O_3 濃度の日変化が小さいという特徴的な傾向がみられた (図7)。この日変化の詳細な解析結果は、第5章で述べた。

O_3 高濃度日における O_3 濃度の水平分布より、東京湾の西側に出現した高濃度 O_3 気塊は大規模海風により内陸へ輸送され、この高濃度 O_3 気塊の一部が丹沢山地へ影響していることが示唆された。

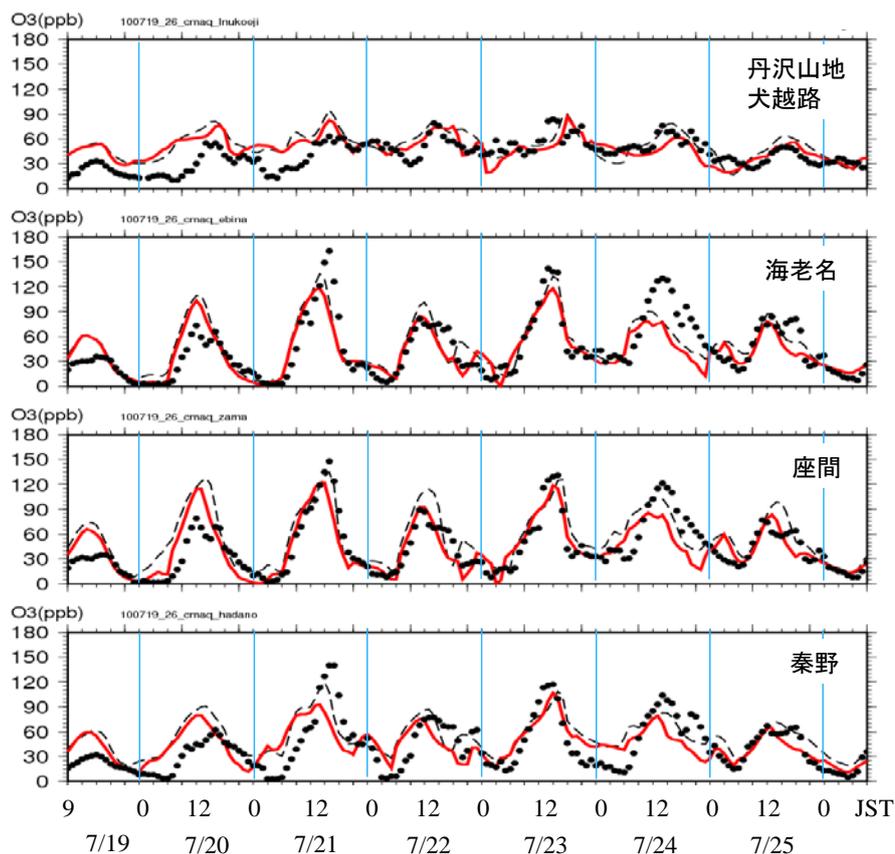


図7 2010年7月19日から2010年7月26日における地上のO₃濃度の時刻変化
(実線: 5 km 格子間隔、破線:15 km 格子間隔、●: 実測)

丹沢山地の麓(七沢)で実施されたO₃ゾンデ観測より、地上から高度1 km から2 kmの大気境界層内ではO₃濃度が高く、さらに上層では高さと共に減少し、高度3 kmからは再び増加していた(図8)。丹沢山地の山頂付近の上空高度約1.5kmでは、周辺の地上O₃濃度より高い傾向が見られた。

犬越路局や周辺のO₃濃度測定結果さらにO₃ゾンデ観測から得られた高度方向の鉛直断面におけるO₃濃度分布は、モデル結果とほぼ一致した。このことから、大気質モデルを丹沢山地へ適用できることが明らかになった。

さらに東アジアからの丹沢山地へのO₃の影響を検討するために、中国からの排出量を考慮した場合と考慮しない場合との差から大陸からの影響を推定した。その結果、最大35ppb程度の差が認められ、この時刻での約半分が中国からの影響であることが推定された。

(様式 5) (Style5)

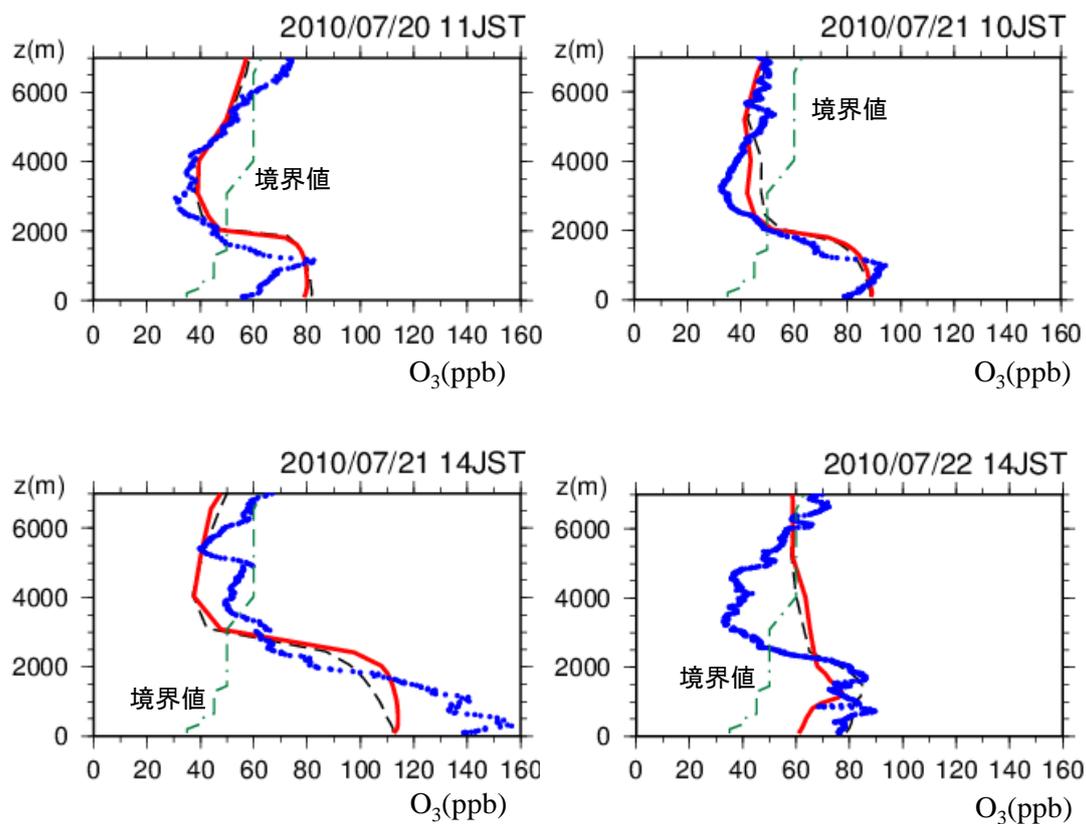


図 8 丹沢山地の山麓七沢における大気中の O_3 濃度の鉛直分布

(観測結果は、2010年7月20日11時、21日10時、21日14時、22日14時である。図中の点線(青色)は観測値を示し、実線(赤色)は格子間隔5kmでのモデル計算結果、破線(黒色)は格子間隔15kmでのモデル計算結果を示す。一点鎖線(緑色)で示した境界値とは東アジア域の西側境界での O_3 濃度の鉛直分布を示す。

第 5 章 O₃ の濃度変化プロセスの解析

丹沢山地での O₃ 濃度の時刻変化を移流、拡散、化学反応、乾性沈着の時刻変化の成分に分けて、高濃度に至る経過について検討した。このように成分に分ける解析をプロセス解析と呼び、これは大気質モデル CMAQ の機能のひとつである。具体的には、式(1)に示す通り、左辺は O₃ 濃度の時間変化項 (total)、右辺の最初の 3 項は三次元の移流項(adv)、次の 3 項は三次元の拡散項(diff)を示す。また、*R* 項は化学反応(Chem)による変化、*S* 項は発生量、*Dep* 項は乾性沈着(Dep)、*Cld* 項は湿性沈着で雲・液相による変化 (Cld) を示す。ここで、*C* は濃度、*t* は時間を示す。xyz は座標を表しており、各々東西、南北、鉛直方向を示す。U、V、W は、xyz での平均風速を示す。*K_H* と *K_Z* は、各々水平方向と鉛直方向の拡散係数を示す。

$$\underbrace{\frac{\partial C}{\partial t}}_{\substack{\text{total} \\ \text{時間変化}}} = \underbrace{\left[-U \frac{\partial C}{\partial x} - V \frac{\partial C}{\partial y} - W \frac{\partial C}{\partial z} \right]}_{\substack{\text{Advection terms} \\ \text{移流項}}} + \underbrace{\left[\frac{\partial}{\partial x} \left(K_H \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_H \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_Z \frac{\partial C}{\partial z} \right) \right]}_{\substack{\text{Diffusion terms} \\ \text{拡散項}}} +$$

$$\underbrace{R + S + Dep + Cld}_{\substack{\text{Chemical Reaction} \\ \text{化学反応} \\ \text{Source} \\ \text{発生量}}} \quad \underbrace{Dep}_{\substack{\text{Dry} \\ \text{Deposition} \\ \text{乾性沈着}}} \quad \underbrace{Cld}_{\substack{\text{Wet} \\ \text{Deposition} \\ \text{湿性沈着}}} \quad (1)$$

丹沢山地での O₃ 濃度の時刻変化 (全体) を移流、拡散、化学反応、乾性沈着の時刻変化に分けて、O₃ 濃度の日変化の内訳を調べた (図 9)。犬越路局において O₃ 濃度の日変化が市街地に比べ小さい理由を解析した結果、①近くに O₃ を光化学反応により生成する前駆物質 (NO_x と NMVOC) の発生源がなく、また大気中にも O₃ 生成の前駆物質の濃度が低いと考えられること、一方②乾性沈着による O₃ 濃度の減少が日中に市街地 (平地) に比べ著しいこと、③夜間では移流、拡散、化学反応、乾性沈着ともに小さく、O₃ 濃度が変化することなく夕方の O₃ 濃度が継続したと考えられる。

丹沢山地の麓 (七沢) において、高濃度日における高度方向の O₃ 濃度の鉛直プロファイルに関するプロセス解析を行った。その結果、日中の大気境界層内での O₃ 濃度の上昇は、主に化学反応と移流が大きく寄与しており、特に化学反応は午前中に大きいことが明らかになった。さらに日没と共に地上の O₃ 濃度は減少するが、高度 1 km ~ 1.5 km 付近には 120ppb 以上の高い O₃ 濃度が翌日の深夜 3 時頃まで残留し、その後 50 ppb 程度にまで減少したが、その理由として西南西の移流による寄与が考えられた。

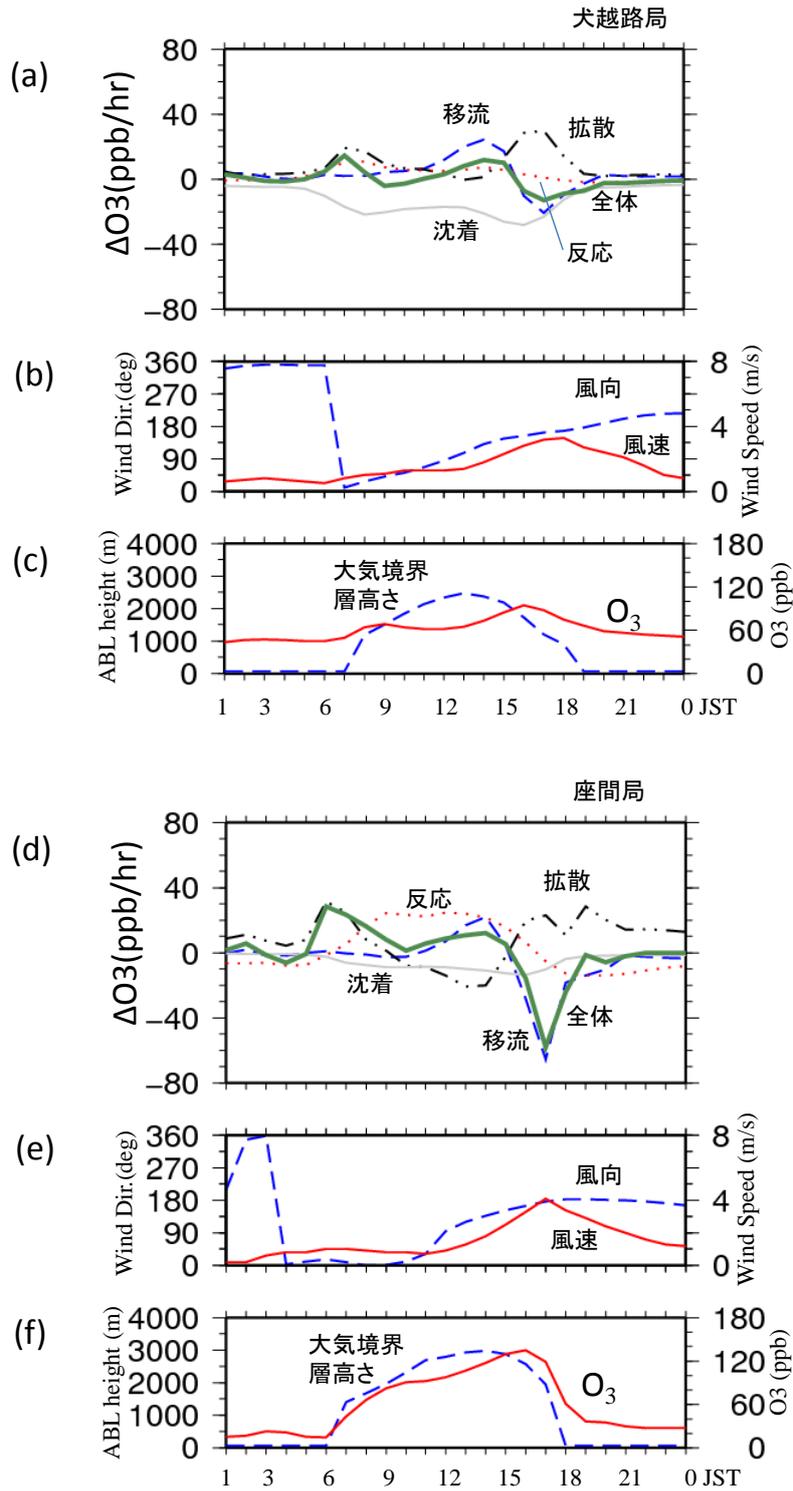


図9 O₃高濃度日(2010年7月21日)における地上O₃濃度のプロセス解析結果(犬越路局と座間局)
(a)、(d): O₃濃度の時間変化(全体)、移流、拡散、化学反応(反応)、乾性沈着(沈着) (b)、(e): 風向、風速 (c)、(f): 地上O₃濃度と大気境界層の高さを示す。

第6章 樹木に対する O₃ の影響評価

O₃ 曝露量や気孔からの O₃ の取込み量から、丹沢山地全域について樹木への O₃ の影響を調べた。

犬越路局における O₃ 曝露量 (AOT40) を 1998 年から 2013 年について実測値を用いて算出した結果、O₃ 曝露量は減少傾向にあるが、周辺局は 2006 年から増加傾向にあり、2009 年に若干減少傾向に転じているが、2000 年当初のレベルまで戻っていないことが解析結果として得られた。

また丹沢山地全域での AOT40 と樹木葉の気孔からの O₃ の取込み量を算出するために、大気質モデル CMAQ を用いて着葉期間の O₃ 濃度を推定した。犬越路局における O₃ フラックス F_{st} の時間値、測定値から推定した O₃ の取込み量 POD_{1ob} 、モデルから推定した O₃ の取込み量 POD_{1model} を図 10 に示す。大気質モデルの計算結果に基づいて、丹沢山地全域について AOT40 と O₃ の取込み量の分布図を作成した結果、AOT40 と推定された気孔からの O₃ の取込み量ともにクリティカルレベルを超えており、O₃ による樹木への成長阻害の影響が大きいことがこれら解析の

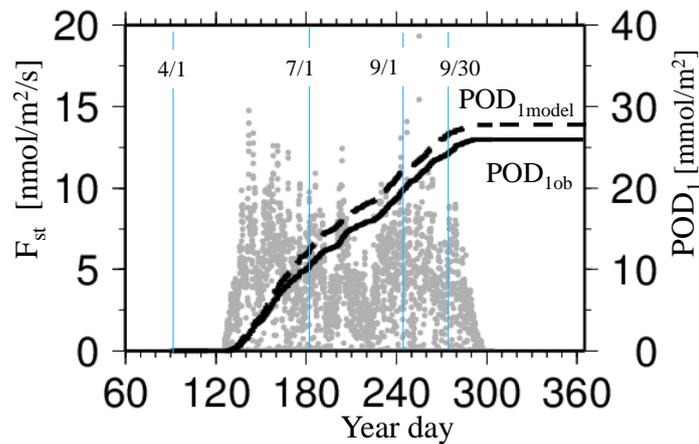


図 10 犬越路局における O₃ フラックス F_{st} の時間値(点)、測定値から推定した POD_{1ob} (実線)、モデルから推定した POD_{1model} (破線)

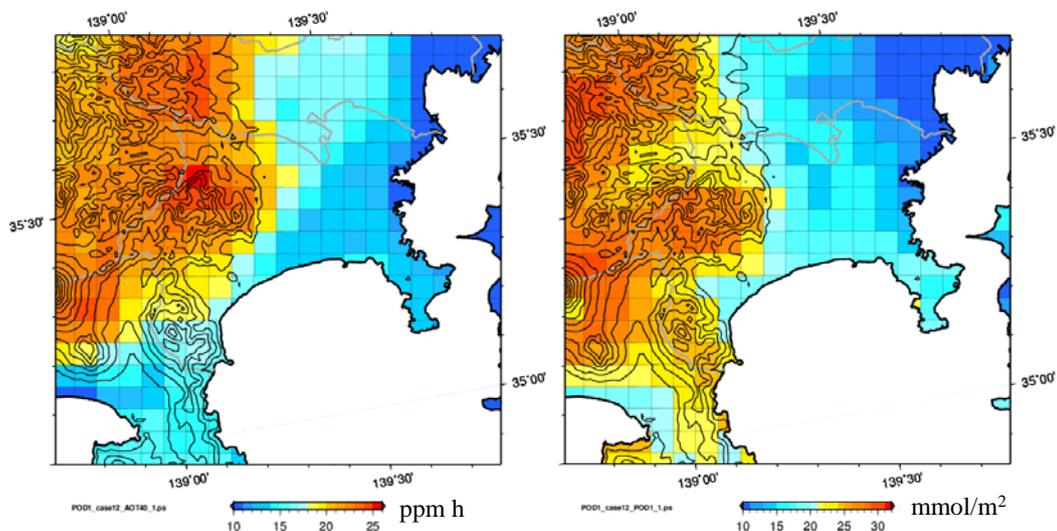


図 11 AOT40 (左) と POD_1 (右) の水平分布

結果から明らかになった(図11)。なお、AOT40のクリティカルレベル(武田と相原 2007)は、5~15 ppm h (10%生長阻害)、気孔からのO₃の取込み量のクリティカルレベル(UNECE 2010)は、4 mmol/m² (4%生長阻害)である。

さらに丹沢山地とその周辺において、標高とAOT40やPOD₁の変化の関係を調べた(図12)。AOT40は、標高約300 m以上でほぼ一定の値(約23 ppm h)になった。一方、O₃の取込み量は、直線的に増加し、標高約800 m以上でほぼ一定の値(約28 mmol/m²)になった。標高が高いほどO₃の取込み量が多いのは、標高が高いほどブナ林の衰退が深刻である傾向と一致した。

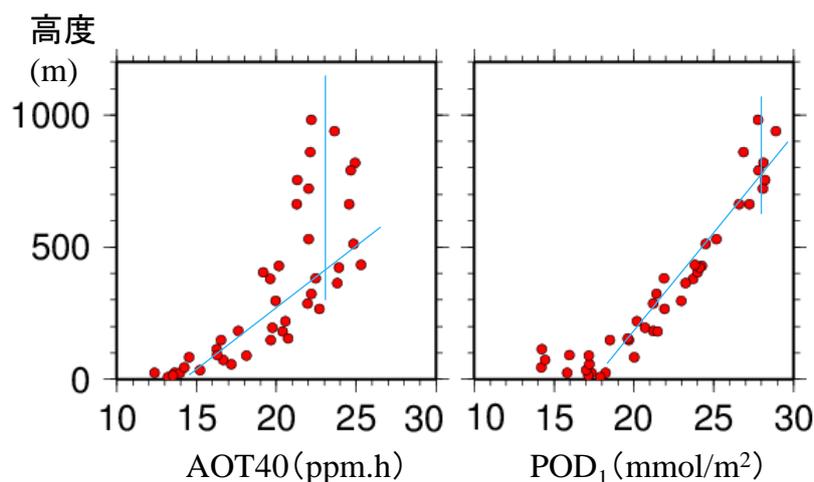


図12 AOT40(左)とPOD₁(右)の鉛直分布

第7章 総合考察

本研究では、丹沢山地について気象モデルと大気質モデルを用いて、O₃の汚染メカニズムの解明を行った。また、O₃の曝露量やO₃の取込み量を算出し検討した結果、樹木の生長阻害を及ぼす閾値であるクリティカルレベルを大きく超えていることが明らかになった。これらの解析結果より、山地へのこれら数値モデルの適用は有効であることを示唆している。また、本研究で示した解析手法は、赤城山や奥日光白根山などのO₃による影響が指摘されている山岳へ適用し、樹木枯死の実態とモデル計算により推定されるO₃濃度との関係を明らかにするなど森林保全の対策に活用することができるものと考えられる。

本研究では、また樹木のO₃曝露が樹木の枯死をもたらすという観点から、樹木の部位でも特に葉面の気孔がO₃ガスの取込みに寄与しているという点を鑑み、気孔からのO₃の取込み量の推定を行った。気孔からの取込み量の推定に関して、夜間のO₃の取込み量を考慮することが重要であることを指摘した。その理由として、夜間にも多くの樹木が気孔を開いており、気孔からのO₃など大気汚染物質の取込みを総体として評価する場合、このようなアプローチが有効であり、従来の推定方法の改善が望まれる。

第5章のプロセス解析における乾性沈着による大気中のO₃濃度の低下の一部に

は第6章で扱った O_3 の気孔からの取込みが寄与していると考えられる。しかし、お互い独立して扱われているため、これらを連携させた測定や推定方法の提案が望まれる。

地球温暖化対策で森林の役割は大きいですが、 O_3 が樹木の生長を阻害(CO_2 の吸収減)しているとの指摘がされている。地球規模での森林の保全のために、 O_3 のモニタリングや森林衰退の実態調査、またモデルによる衰退メカニズムの解釈が望まれる。

丹沢山地でのブナ衰退の原因として、 O_3 などの大気汚染物質に加え、土壌の乾燥化による水ストレス、ブナハバチによる食害が複合的に影響していると考えられているが、それら相互の関連性は明らかにされていない。今後、 O_3 の取込み量の推定に必要なより詳細な変数を組み込んだモデル計算とともに水ストレスやブナハバチによる食害などに関連すると考えられる要因も加えることにより、森林衰退の原因が解明されることが望まれる。

以上