

ブナ林の立地環境調査（大気）

丹沢山地周辺のオゾン濃度の実態とブナに対する影響

河野吉久*1, 須藤 仁*1, 石井 孝*1, 相原敬次*2, 内山佳美*3

1. はじめに

わが国の大気常時監視点は、人口の密集する都市域を中心に配置されているため、わが国では過疎地や山間地での測定はほとんど行われていない。鹿角ら（2001）は八方尾根山腹において5月～9月の5ヶ月間の観測結果を報告しているが、森林衰退現象が指摘されている山岳地点での観測例は極めて少なく、日光白根山で夏季および秋季にオゾン測定した例（畠山ら，2004），奥秩父雁坂小屋での観測例（伊豆田・小川，2004）がみられる程度で、年間を通じた観測結果についての報告はみられない。

丹沢山地では、1960年代から大山のモミの衰退現象が指摘され、1980年代からは山頂や尾根筋を中心にブナの衰退が進行している（越地ら，1996）。丹沢山地のブナ衰退要因として、様々な要因が指摘されているが、丸田らは（1999）は1994～1995年に実施された調査結果をもとに、丹沢山地のブナ衰退要因として高濃度オゾンの影響を指摘している。このような指摘に対して、武田および相原（2005）は、西丹沢（犬越路）地点において小型オープントップチャンパー（OTC）を用いて、浄化・非浄化空気によるブナの暴露試験を行い、オゾンがブナの落葉（老化）を促進し、成長が抑制されている可能性を明らかにしている。

丹沢山地内の西丹沢（犬越路：標高920m）地点ではオゾンの連続観測が1995年～2000年度に実施されており、年平均値として42～46ppb、1時間値の最高値として136～176ppbが記録されている（阿相ら，2001）。また、実際に衰退の観察される地点を中心に丹沢山地内にパッシブサンプラーを配置し、実態把握を行っている（阿相・中嶋，2004；阿相ら，2005）。しかし、パッシブサンプラーによる測定では、年間を通じた濃度変化やドースの推移、時間値の最大値などのデータをタイムリーに取得することはできない。このため、本報告では、実際にブナ衰退現象が観察されている丹沢山地内の檜洞丸地点においてオゾンの連続観測を通年行った結果に基づいて、オゾン濃度やドースの実態について解明するとともに、ブナ衰退との関連性について考察を加えた。

一方、森林衰退現象には、大気汚染物質のみならず気象条件や土壌などの自然のストレスが複雑に関連していることが指摘されている（河野，2004；越地ら，1996；谷本ら，1996；Kohno et al., 2005；UN/ECE and EC, 1999）。特に、山岳部では局所的な衰退現象が多くみられ

ることから、強風との関連性を示唆する報告が見られる（谷本ら，1996）。しかしながら、既往の研究では個別の要因に着目して検討されている例が多く、各地の衰退現象に対して主たる要因の影響、および主たる要因と従たる要因の複合的な影響についてはほとんど検討されていない。森林衰退の原因究明には、このような局地的要因を考慮しつつ大気汚染物質等の広域に及ぶ要因の影響を評価する必要があると考える。

そこで、本報告では山岳地における局地的な森林衰退の要因として、特に大きな影響が懸念される風況とO₃に注目し、森林衰退地点周辺を対象に、複雑地形によって変化する沈着量を評価するのに適した数値流体力学に基づく風況・物質輸送シミュレーションを行い、山岳地における風況と衰退現象との関連性、さらには衰退現象に及ぼす風況とオゾンの複合的な影響について検討し、丹沢山地におけるブナ衰退現象のメカニズムについて考察した。

2. 材料および方法

2.1 檜洞丸地点でのオゾンの連続観測

丹沢大山国定公園特別保護地区の檜洞丸山頂直下の南西尾根上の比較的平坦な標高1540m地点に、風力発電機とソーラーパネルを組み合わせたハイブリッド型の電源供給システムを組立て設置した（図1）。

用いた資機材の構成概要を図2に示した。ソーラーパネルと小型風力発電機4系列を並列に設置し、それぞれ余剰電力はバッテリーに蓄電する方式とし、ダシビ製1006-AHJ（測定値に対して気圧補正処理）あるいはダイレック製Model-1150（温度気圧自動補正）による連続観測を行っ

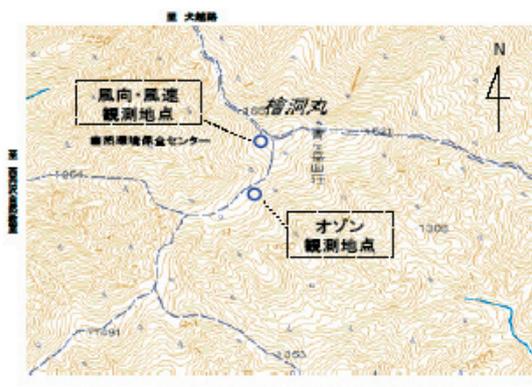


図1. 丹沢山地檜洞丸オゾン観測地点

*1 財団法人 電力中央研究所

*2 神奈川県環境科学センター

*3 神奈川県自然環境保全センター研究部

た。この方式では、主たる電力はソーラーパネルが供給し、風速が4m/秒以上になると風力発電機が稼動する。しかしながら、図-1に示したように、システムを設置した場所が、登山道に隣接していると同時に、ブナ個体の日陰になることを避けた関係から南東風が直接当たる尾根筋の西側に設置できなかったことから、南西風の吹き込みが悪くなり風力発電機の稼動効率が極めて悪かった。このため2004年12月に蓄電池を増強した。これにより、連続観測結果から得た稼働率(観測率)は2年間の平均で約90%となった(表3-1参照)。

2004年7月下旬にシステムを設置して以降、5分間値あるいは10分間値をデータロガーに蓄積し、定期的にロガーの回収を実施した。これを基に1時間平均値を算出し、日報、月報を作成し、平均濃度、AOT40 (Accumulated exposure Over a Threshold of 40 ppb; Fuhrer et al., 1997; 伊豆田・松村, 1997) 等を算出した。また、山腹に相当する西丹沢(犬越路)地点および山麓周辺の常時監視点(神奈川県伊勢原市役所, 以下、伊勢原と記述)の観測値との比較も行い、山頂周辺のオゾン濃度、ドーソンの特徴を把握した。

本報告では、記録を開始した直後の2004年8月～2006年7月までの2ヶ年間の結果について整理した結果を報告する。なお、檜洞丸地点以外の地点の観測結果については神奈川県の大気常時監視測定点における観測結果(2006年4月～7月については速報値, それ以外については確定値)を用いた。

2.2 数値解析手法

2.2.1 解析手法

大気汚染物質の長距離輸送と沈着を評価する手法には、気象モデルと組み合わせた種々のモデルがあり、広く用いられている(Byun & Ching, 1999)。しかしながら、これらの多くは、山岳地のような複雑地形上での評価に対してモデルの特性上、十分な精度を得ることが難しい。ここでは、山岳地における風速場と物質濃度場を精度良く再現するため、数値流体力学に基づく解析手法(風況・物質輸送解析コード「NuWiCC」(須藤ら, 2004))を、地表における酸化性物質の乾性沈着過程を考慮できるようカスタマイズして用いた。

大気として非圧縮性の乾燥空気を、酸化性物質として

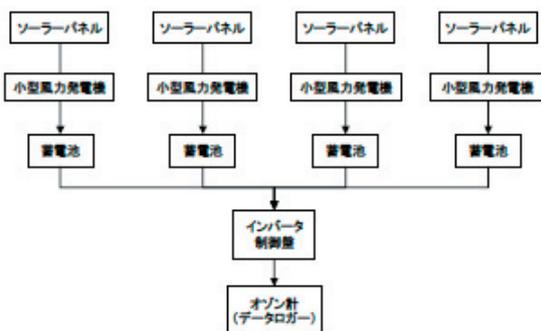


図2. 観測用電源供給システムの構成

オゾン(O₃)を想定した。複雑地形を精度よく取り扱うため、境界適合座標で記述した連続の式、Navier-Stokes式、物質濃度輸送方程式を用いた。渦動粘性係数は標準型k-εモデルにより算出し、乱流シュミット数は1に設定した。なお、本計算の対象領域は10km四方程度の狭い領域であり、移流が支配的であると考えられるため化学反応系は省略した。

基礎式の空間離散化には高次精度差分法を用いた。流入側境界では速度と濃度に対して対数分布を与えた(成層圏等を起源とするオゾンを想定)。地表面境界では対数則より算出される速度および、濃度拡散フラックスと沈着フラックスのつりあい条件式を与えた。

$$D_i \frac{\partial C}{\partial z} = V_d C$$

ここで、 C : 濃度、 D_i : 濃度の渦拡散係数、 V_d : 沈着速度、 z : 鉛直方向座標である。

複雑地形が沈着挙動に及ぼす影響は、局地風によって変化する濃度と渦拡散係数を通して現れることになる。本手法に基づく解析結果の妥当性については文献(須藤ら, 2004, Suto et al., 2005)を参照されたい。

風況解析を行うにあたり必要となる主風向の選定には、気象庁および神奈川県自然環境保全センターによる気象観測データを利用した。風向出現頻度が比較的高い南(S)、南南西(SSW)の2風向を選定し、各風向条件に対して表4-1および図4-1に示すような矩形領域をそれぞれ設定した。表4-2、図4-2、表4-3および表4-5にそれぞれ、各領域に対する格子条件、粗度区分、計算条件を示した。なお、計算には電力中央研究所大型計算機システム分散メモリー型並列スカラー計算機(Intel Itanium2, 1.6GHz)を使用した。気流場と濃度場それぞれの計算時間は表4-4、表4-6に示したとおりである。

2.2.2. 解析条件

- 対象地 -- 丹沢山地およびその周辺(大室山付近を含む)
- ・主風向 -- SおよびSSWの2方向
- ・風速 -- 鉛直方向分布1種類(中立大気を想定した対数分布とした)
- ・濃度 -- 鉛直方向分布1種類(バックグラウンドオゾン濃度を想定した対数分布とした)

3. オゾンの連続観測結果および考察

3.1 檜洞丸地点の概況

連続観測システムを設置した地点は、越路ら(1996, 2006)がブナ衰退調査を継続的に実施している檜洞丸山頂直前のやや平坦な部分の登山道脇の標高1540m地点で、概ね南～南南西の尾根筋上に位置する(図-1)。山頂直下の南西斜面(標高1601m)では神奈川県自然環境保全センターにより気象観測が実施されており、2004年8月～2006年7月の2ヶ年間の年平均気温は6.9℃、

年平均降水量 3,873mm, 年平均飽差 (Vapor pressure deficit) は 0.211kPa であった。

この地点周辺には比較的大木のブナが分布するが、シカの被害もあり天然の稚樹、若木はほとんど見当たらず、近年はブナハバチの被害による衰退や枯損が進行し、急速にギャップが拡大している状況にある。

3.2 観測結果の概要

檜洞丸地点において連続観測した結果の概要を表 3-1 に示した。2004 年 7 月 28 日より檜洞丸地点において観測を開始したが、台風や天候不順のため電力供給が追いつかず、欠測率が高かった。しかし、12 月初旬に蓄電池を増強した結果、2005 年 12 月～2006 年 3 月まではほぼ順調にシステムを稼動することができた。一方、2006 年 4 月に自動データ伝送システムに変更した結果、初期トラブルや雷害によりデータ消失があったことなどのため欠測率が極めて高くなった。このため、後述するように、欠測率が 10% を超える月についてはデータを補正し、解析を行った。

3.2.1 日変化

檜洞丸地点において 2 ヶ年間に観測された 1 時間値の最高値は 2005 年 9 月 1 日の 119ppb であった。この日の日変化を図 -3-1 に示した。山麓に位置する伊勢原では 15 時に最高値 147ppb が記録され、西丹沢 (犬越路) においても同時刻に 134ppb が記録されている。檜洞丸でも同時刻に 118ppb が記録されているが、一旦濃度がわずかに

低下した後、20 時に最高値 119ppb が記録された。また、これに次ぐ高濃度を記録した 2005 年 8 月 5 日の場合には、伊勢原で 13 時に 111ppb が記録され、西丹沢 (犬越路) では 3 時間遅れの 16 時に 140ppb が記録され、檜洞丸でも 16 時に 115ppb が記録された。

この 2 ヶ年間ににおける檜洞丸および西丹沢 (犬越路) の 1 時間値の最高値は、西丹沢 (犬越路) において 1995 年～2000 年度に記録された最高値 176ppb (1998 年度) よりも大幅に低い値であった (阿相ら, 2001)。一方、丹沢山地および伊勢原のオゾン濃度の最大値を見ると、山間地よりも平地の伊勢原地点の方が高い傾向にあった (表 3-1～表 3-3 参照)。

3.2.2 年平均値

檜洞丸地点における 24 時間値 (日平均値)、日中 12 時間平均値 (6 時～18 時) あるいは日中 8 時間平均値 (9 時～17 時) の年平均値は約 42ppb で、3 者の間にはほとんど差がみられなかった。また、檜洞丸と西丹沢 (犬越路) 地点にはほとんど差異がみられないが、伊勢原の場合には 24 時間値の年平均値は西丹沢や檜洞丸よりも低く、対象時間帯が短くなるほど平均値が高くなる傾向にあった。24 時間値でみると伊勢原の年平均値は西丹沢および檜洞丸地点における年平均値の約 1/2 の濃度レベルであった (表 3-1～表 3-3)。

表 3-1. 西丹沢 (檜洞丸) 地点でのオゾン連続観測結果観測状況

Year	Month	Days	Hours	Max (ppb)	Mean (24h, ppb)	Mean (12h, ppb)	Mean (8h, ppb)	AOT40 24h, ppb·h	AOT40 12h, ppb·h	AOT40 8h, ppb·h	欠測率 (%)
2004	2004-08	31	618	94	36.4	35.3	35.5	4,148	1,809	1,227	16.9
	2004-09	30	439	86	39.5	38.4	38.3	2,685	1,267	952	39.0
	2004-10	31	620	77	43.3	41.6	41.4	2,962	1,176	770	16.7
	2004-11	30	630	53	27.5	22.9	26.4	478	242	153	12.5
	2004-12	31	732	48	29.8	29.7	29.2	391	182	99	1.6
	2005-01	31	718	53	42.8	42.2	41.9	2,689	1,175	720	3.5
	2005-02	28	606	46	43.5	43.4	43.2	3,053	1,328	821	9.8
	2005-03	31	694	89	52.2	51.3	50.8	8,751	4,050	2,627	6.7
	2005-04	30	718	91	55.3	52.9	52.2	11,171	4,730	2,975	0.3
	2005-05	31	739	89	54.4	52.6	53.0	11,063	4,846	3,310	0.7
	2005-06	30	715	111	50.1	47.4	47.9	9,081	3,531	2,410	0.7
	2005-07	31	744	94	41.8	40.6	42.1	5,286	2,350	2,004	0.0
2005	2005-08	31	743	115	37.9	36.6	37.6	4,751	1,919	1,373	0.1
	2005-09	30	719	119	37.3	37.8	40.0	3,787	1,991	1,599	0.1
	2005-10	31	743	61	39.2	39.0	39.3	1,890	874	540	0.1
	2005-11	30	710	61	41.0	40.7	40.7	2,528	1,193	760	1.4
	2005-12	31	715	60	34.4	33.9	33.8	106	47	24	3.9
	2006-01	31	740	53	37.4	37.2	37.1	751	366	232	0.5
	2006-02	28	662	58	41.1	40.9	40.8	2,130	984	614	11.0
	2006-03	31	743	93	49.9	49.7	49.2	7,761	3,777	2,408	0.1
	2006-04	30	200	76	55.0	55.4	55.8	3,141	1,546	1,059	72.2
	2006-05	31	702	89	52.0	50.9	51.2	9,609	4,373	2,948	5.6
	2006-06	30	601	106	51.9	50.3	50.5	8,296	3,658	2,446	16.5
	2006-07	31	323	76	31.4	29.4	30.1	1,039	366	295	56.6
2004		365	7,973	111	43.1	41.5	41.8	61,758	26,686	18,068	9.0
2005		365	7,601	119	42.4	41.8	42.2	45,788	21,093	14,298	14.0
	平均				42.7	41.7	42.0	53,773	23,890	16,183	11.5
2004	(4月～9月)				46.3	44.5	44.8	43,434	18,533	12,878	
2005	(4月～9月)				44.2	43.4	44.2	30,622	13,852	9,720	
	平均				45.2	44.0	44.5	37,028	16,193	11,299	

標高: 1,540m

期間: 2004/08/01-2006/07/31 (2006.04の欠測率が高いのは、システム不具合あるいは落雷によりデータが消失したことによる)

8h: 09:00-16:59

12h: 06:00-17:59

24h: 00:00-23:59

AOT40: 未補正

表 3-2. 西丹沢（犬越路）地点でのオゾン連続観測結果

Year	Month	Days	Hours	Max (ppb)	Mean (24h, ppb)	Mean (12h, ppb)	Mean (8h, ppb)	AOT40 24h, ppb·h	AOT40 12h, ppb·h	AOT40 (8h, ppb·h)	欠測率 (%)
2004	2004-08	31	710	138	35.0	38.9	40.6	4,184	2,895	2,103	4.6
	2004-09	30	690	111	36.2	39.3	40.5	3,129	2,303	1,609	4.2
	2004-10	31	709	67	38.3	40.0	41.0	1,801	1,195	897	4.7
	2004-11	30	685	76	39.1	41.2	42.5	2,396	1,696	1,314	4.9
	2004-12	31	711	46	28.5	30.4	31.8	70	50	43	4.4
	2005-01	31	711	47	35.3	36.3	36.9	234	176	147	4.4
	2005-02	28	642	52	35.9	36.8	37.2	736	421	312	4.5
	2005-03	31	708	77	45.7	47.5	47.9	4,977	3,018	2,081	4.8
	2005-04	30	647	86	52.4	54.7	55.4	8,571	5,280	3,720	10.1
	2005-05	31	686	88	48.5	50.4	51.3	7,086	4,303	3,023	7.8
	2005-06	30	686	92	44.0	47.1	48.0	5,556	3,527	2,453	4.7
	2005-07	31	710	106	36.9	39.9	41.9	3,684	2,590	1,967	4.2
2005	2005-08	31	709	140	38.0	40.3	40.8	4,502	2,663	1,686	4.7
	2005-09	30	688	134	36.8	39.2	40.3	4,050	2,535	1,778	4.4
	2005-10	31	706	63	34.8	36.9	37.8	733	571	415	5.1
	2005-11	30	633	59	36.2	37.5	39.0	1,280	838	680	12.1
	2005-12	31	710	48	34.3	35.1	35.7	390	214	144	4.6
	2006-01	31	711	53	35.2	36.0	37.2	699	441	343	4.4
	2006-02	28	640	56	38.4	39.8	40.4	1,636	974	688	4.8
	2006-03	31	704	76	48.8	50.3	50.7	6,570	3,694	2,481	5.4
	2006-04	30	687	80	52.5	54.3	54.9	8,912	5,184	3,576	4.6
	2006-05	31	710	101	51.4	53.2	53.5	9,617	5,495	3,704	4.6
	2006-06	30	679	114	51.3	53.9	54.2	9,473	5,602	3,749	5.7
	2006-07	31	550	126	36.3	38.0	39.0	3,573	2,206	1,469	26.1
2004		365	8,295	138	39.7	41.9	42.9	42,424	27,454	19,669	
2005		365	8,127	140	41.2	42.9	43.6	51,435	30,417	20,713	
	平均				40.4	42.4	43.3	46,930	28,936	20,191	6.2
2004	(4月～9月)				42.2	45.1	46.3	32,210	20,898	14,875	
2005	(4月～9月)				44.4	46.5	47.1	40,127	23,685	15,962	
	平均				43.3	45.8	46.7	36,169	22,292	15,419	

標高: 920m
 期間: 2004/08/01-2006/07/31(2006/04-07:速報値を使用)
 8h: 09:00-16:59
 12h: 06:00-17:59
 24h: 00:00-23:59
 AOT40: 未補正

表 3-3. 伊勢原地点でのオゾン連続観測結果

Year	Month	Days	Hours	Max (ppb)	Mean (24h, ppb)	Mean (12h, ppb)	Mean (8h, ppb)	AOT40 24h, ppb·h	AOT40 12h, ppb·h	AOT40 (8h, ppb·h)	欠測率 (%)
2004	2004-08	31	703	94	15.2	20.6	23.1	825	777	610	5.5
	2004-09	30	678	72	15.3	20.2	22.6	403	339	267	5.8
	2004-10	31	704	44	14.8	18.3	20.6	36	36	34	5.4
	2004-11	30	674	52	14.9	19.5	23.5	273	247	247	6.4
	2004-12	31	694	47	13.6	17.7	21.1	26	26	26	6.7
	2005-01	31	702	48	18.3	22.9	26.0	103	76	62	5.6
	2005-02	28	633	45	19.1	23.5	25.9	77	74	63	5.8
	2005-03	31	693	74	23.9	29.1	31.5	899	758	596	6.9
	2005-04	30	680	82	34.2	41.7	44.7	3,909	3,256	2,442	5.6
	2005-05	31	700	87	35.7	44.1	47.0	4,026	3,292	2,399	5.9
	2005-06	30	676	102	28.3	35.9	39.7	2,895	2,412	1,846	6.1
	2005-07	31	704	74	15.4	21.7	24.6	472	469	386	5.4
2005	2005-08	31	701	111	21.8	29.6	33.1	1,841	1,665	1,262	5.8
	2005-09	30	659	147	19.8	27.0	30.7	1,809	1,617	1,331	8.5
	2005-10	31	712	70	18.5	24.2	27.6	486	477	409	4.3
	2005-11	30	706	73	14.2	21.3	27.0	384	337	328	1.9
	2005-12	31	730	46	13.9	20.4	25.1	27	27	27	1.9
	2006-01	31	731	52	12.4	17.6	21.6	72	72	68	1.7
	2006-02	28	663	55	17.6	23.8	26.9	293	292	248	1.3
	2006-03	31	728	73	28.7	37.1	41.3	2,576	2,067	1,639	2.2
	2006-04	30	711	84	31.0	39.6	42.6	3,561	2,816	2,066	1.3
	2006-05	31	731	112	37.9	45.1	48.3	5,866	4,234	3,163	1.7
	2006-06	30	709	154	33.5	45.1	49.6	5,949	4,755	3,577	1.5
	2006-07	31	731	144	28.6	39.0	42.9	5,205	4,245	3,141	1.7
2004		365	8,241	102	20.7	26.3	29.2	13,944	11,762	8,978	4.4
2005		365	8,512	154	23.2	30.8	34.7	28,069	22,604	17,259	2.8
	平均				21.9	28.5	32.0	21,007	17,183	13,119	3.6
2004	(4月～9月)				24.0	30.7	33.6	12,530	10,545	7,950	
2005	(4月～9月)				28.8	37.6	41.2	24,231	19,332	14,540	
	平均				26.4	34.1	37.4	18,381	14,939	11,245	

標高: 25.5m
 期間: 2004/08/01-2006/07/31 (2006.04-07:速報値を使用)
 8h: 09:00-16:59
 12h: 06:00-17:59
 24h: 00:00-23:59

3.2.3 季節変化

檜洞丸, 西丹沢 (犬越路) および伊勢原の3地点について, 日報から毎月の時間毎の平均値を求め, 3ヶ月毎に平均して季節別のオゾン濃度を求め, 図3-2に示した. オゾン濃度はいずれの地点も春に高く, 標高が最も高い檜洞丸地点では冬季の日変化がほとんど見られなくなる傾向にあった. なお, 3地点における春季の濃度レベルは他の3季よりも約10ppb程度高かった.

3地点のうち平地部の伊勢原地点では日中にピークがみられる典型的な山型の日変化パターンが見られ, 春以外の3季の深夜から早朝にかけての濃度は約10ppbであった. これに対して, 西丹沢 (犬越路) および檜洞丸地点では深夜から早朝にかけての濃度が約30ppbと伊勢原地点よりも高く, 標高が高くなるほど山型の日変化パターンが見られにくくなる傾向にあった.

これらの観測結果から, オゾンのバックグラウンド値を議論する場合には観測地点の標高, 季節を考慮する必要があると考えられた.

3.2.4 AOT40 (Accumulated exposure Over a Threshold of 40 ppb)

表3-1および表3-2に示した檜洞丸地点と西丹沢 (犬

越路) 地点の欠測率の高い月のデータは, 積分値であるAOT40の値に大きく影響する. そこで, 欠測率の高い月 (目安として欠測率が10%を超える場合) のデータを除外して, AOT40(24h)について檜洞丸地点と西丹沢 (犬越路) 地点の両者の相関を求め, 以下の式を得て, 檜洞丸地点のAOT40(24h)を補正した.

$$\text{檜洞丸地点の AOT40(24h)} = 1.136 \times \text{西丹沢地点の AOT40 (24h)} + 952.669 \quad (R^2 = 0.870)$$

次に, 補正した檜洞丸地点のデータを基にして檜洞丸と西丹沢 (犬越路) 地点の関係式を得て, 西丹沢地点の2005年11月のAOT40(24h)を補正した.

$$\text{西丹沢地点の AOT40 (24h)} = 0.7933 \times \text{檜洞丸地点の AOT40 (24h)} - 353.66 \quad (R^2 = 0.9024)$$

また, AOT40(12h) および AOT40(8h) の値は, それぞれの地点における実測値のAOT40(24h)と比例していたことから, 檜洞丸地点については, 以下の式により補正した.

$$\begin{aligned} \text{AOT40 (12h)} &= 0.4408 \times \text{AOT40 (24h)} \quad (R^2=0.9882), \\ \text{AOT40 (8h)} &= 0.2963 \times \text{AOT40 (24h)} \quad (R^2=0.9714) \end{aligned}$$

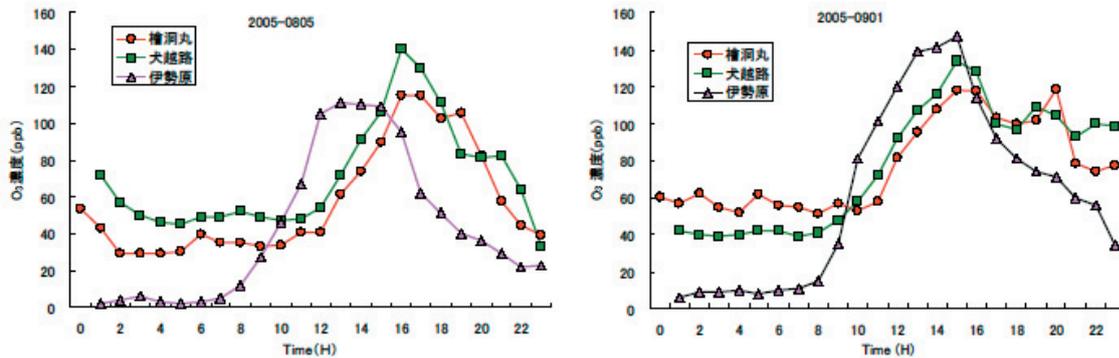


図3-1. 最高濃度出現日 (2005年8月5日および9月1日) におけるオゾン濃度の時間変化

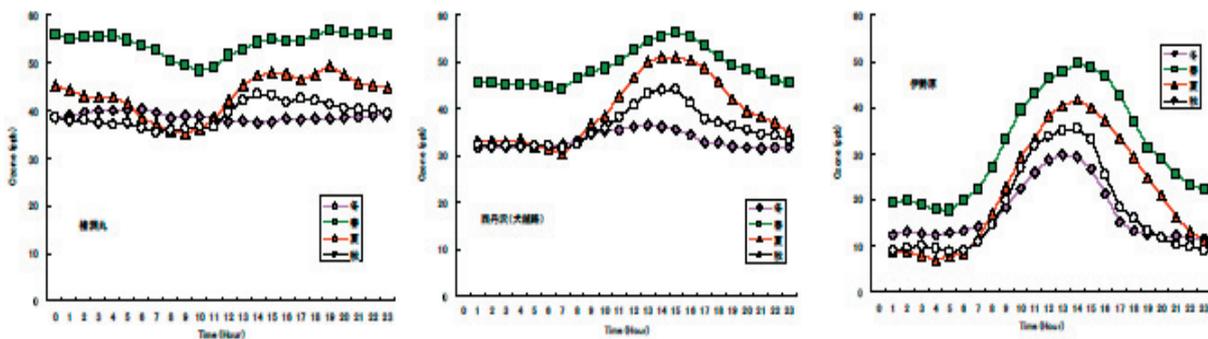


図3-2. 檜洞丸, 西丹沢 (犬越路), 伊勢原地点における季節別オゾン濃度の変化
冬: 2004年12月~2005年2月, 春: 2005年3月~5月,
夏: 2005年6月~8月, 秋: 2005年9月~11月

また、西丹沢（犬越路）地点については、以下の式により補正した。

$$\begin{aligned} \text{AOT40 (12h)} &= 0.6035 \times \text{AOT40 (24h)} \quad (R^2=0.9892), \\ \text{AOT40 (8h)} &= 0.4162 \times \text{AOT40 (24h)} \quad (R^2=0.9750) \end{aligned}$$

表 3-4 に示したように、檜洞丸地点における 4～9 月の 6 ヶ月間の積算平均 AOT40 (24h, 12h, 8h) はそれぞれ 46, 20, 14ppm・h、西丹沢（犬越路）地点では 36, 22, 15ppm・h、伊勢原地点では 18, 15, 11ppm・h であった。図 3-3 に 2005 年 6 月における時間帯別の AOT40 の変化を示した。檜洞丸、西丹沢（犬越路）および伊勢原の 3

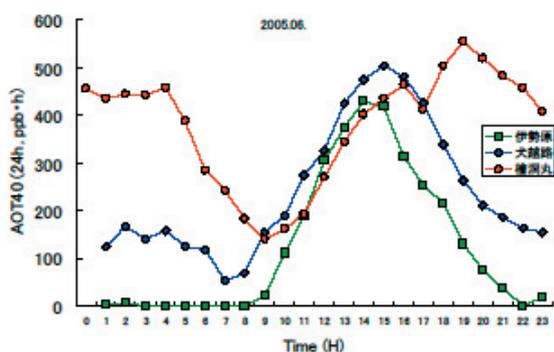


図 3-3. 檜洞丸（赤）、伊勢原（緑）、犬越路（青）地点における 2005 年 6 月における AOT40 の時間帯別変化

表 3-4. 檜洞丸、西丹沢（犬越路）および伊勢原における AOT40 の比較

Year	Month	檜洞丸			犬越路			伊勢原		
		24h	12h	8h	24h	12h	8h	24h	12h	8h
2004	2007-08	5,706	2,515	1,691	4,184	2,895	2,103	825	777	610
	2004-09	4,507	1,987	1,335	3,129	2,303	1,609	403	339	267
	2004-10	2,999	1,322	888	1,801	1,195	897	36	36	34
	2004-11	3,675	1,620	1,089	2,396	1,696	1,314	273	247	247
	2004-12	391	182	99	70	50	43	26	26	26
	2005-01	2,689	1,175	720	234	176	147	103	76	62
	2005-02	3,053	1,328	821	736	421	312	77	74	63
	2005-03	8,751	4,050	2,627	4,977	3,018	2,081	899	758	596
	2005-04	11,171	4,730	2,975	8,571	5,280	3,720	3,909	3,256	2,442
	2005-05	11,063	4,846	3,310	7,086	4,303	3,023	4,026	3,292	2,399
	2005-06	9,081	3,531	2,410	5,556	3,527	2,453	2,895	2,412	1,846
	2005-07	5,286	2,350	2,004	3,684	2,590	1,967	472	469	386
2005	2005-08	4,751	1,919	1,373	4,502	2,663	1,686	1,841	1,665	1,262
	2005-09	3,787	1,991	1,599	4,050	2,535	1,778	1,809	1,617	1,331
	2005-10	1,890	874	540	733	571	415	486	477	409
	2005-11	2,528	1,193	760	1,651	996	687	384	337	328
	2005-12	106	47	24	390	214	144	27	27	27
	2006-01	751	366	232	699	441	343	72	72	68
	2006-02	2,130	984	614	1,636	974	688	293	292	248
	2006-03	7,761	3,777	2,408	6,570	3,694	2,481	2,576	2,067	1,639
	2006-04	11,077	4,883	3,282	8,912	5,184	3,576	3,561	2,816	2,066
	2006-05	9,609	4,373	2,948	9,617	5,495	3,704	5,866	4,234	3,163
	2006-06	11,714	5,164	3,471	9,473	5,602	3,749	5,949	4,755	3,577
	2006-07	5,012	2,209	1,485	3,573	2,206	1,469	5,205	4,245	3,141
2004		68,371	29,635	19,969	42,424	27,454	19,669	13,944	11,762	8,978
2005		61,115	27,779	18,736	51,806	30,575	20,720	28,069	22,604	17,259
	平均	64,743	28,707	19,353	47,115	29,015	20,195	21,007	17,183	13,119
2004	(4月～9月)	46,814	19,959	13,725	32,210	20,898	14,875	12,530	10,545	7,950
2005	(4月～9月)	45,949	20,538	14,158	40,127	23,685	15,962	24,231	19,332	14,540
	平均	46,381	20,249	13,942	36,169	22,292	15,419	18,381	14,939	11,245

AOT40: ppb-h
 8h: 09:00-16:59
 12h: 06:00-17:59
 24h: 00:00-23:59
 檜洞丸のAOT40(24h)を補正した後、犬越路のAOT40(24h)を補正。次に、それぞれの地点のAOT40(24h)を基に12hおよび8hを求めた。なお伊勢原地点については補正を行っていない

の間にクリティカルレベルの2倍を超える35ppm・hのオゾン暴露を受けていることになり、オゾンが大きく影響している可能性が示唆された。

阿相ら(2002)は、「急性影響対策として当面の目標値としてAOT40(12h)を24ppm・hとすることが現実的であり、ブナ保全のためのO3許容量として一時間値が120ppbを越えないこと」を提案している。しかし、阿相らが観測を実施した西丹沢(犬越路)地点では最大値が120ppbを超えてはいるものの、檜洞丸での2年間の観測では1時間値が120ppbを越える状況はみられていない。また、AOT40(12h)も既に24ppm・h以下であることを考慮すると、この提案では現時点で衰退が進行中のブナ林の保全目標値としては適当ではないと考える。

平地部におけるAOT40について12時間値および24

時間値の差は比較的小さいことから、平地部については12時間値での議論でも十分対応が可能と考えられるが、山間地については夜間濃度が高いことからAOT40(24h)は高い値を示すことが明らかとなった。檜洞丸のAOT40(12h)はブナに対するクリティカルレベルである17ppm・hに近いことを考えると、山間地を対象としたクリティカルレベルの暫定値案であるAOT40(24h)として20ppm・h(河野ら, 2006)あるいは阿相ら(2002)が提案している日中だけを対象とするのではなく、24時間を対象にして24ppm・hを超えないように対策を検討する必要があると考える。

一方、檜洞丸地点における観測データを基にした1時間値の累積相対度数分布曲線(図3-4)から推定すると、1時間値の目標値として阿相ら(2002)が提案する120ppbよりも80ppbを目標値に設定した方が現実的である

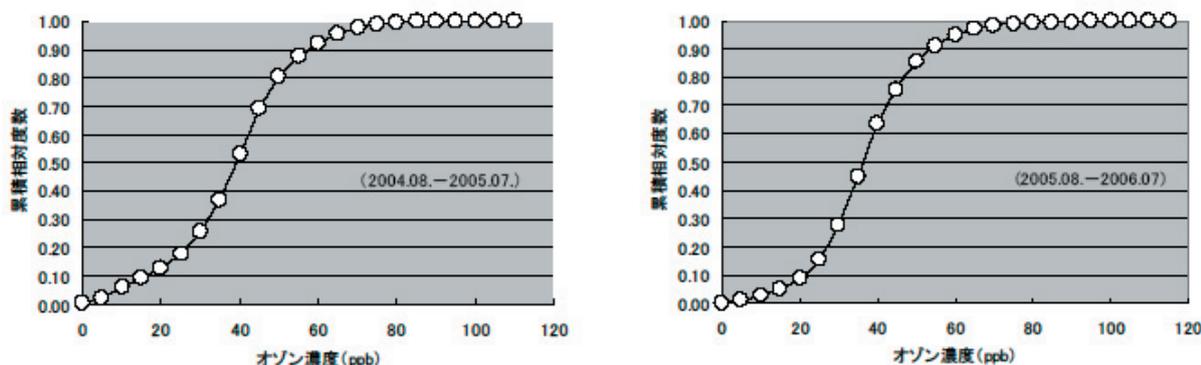


図3-4. 檜洞丸地点における2ヶ年間のオゾン観測結果に基づく1時間値の累積相対度数分布曲線

表3-5. 丹沢山地周辺地点における2年間の平均AOT40

		檜洞丸	西丹沢	南足柄	小田原	秦野	伊勢原	海老名	相模原	津久井
AOT40(12h)	4-9月	20,249	22,292	10,324	13,852	8,545	14,939	8,242	8,498	6,307
	5-9月	15,442	17,060	8,050	11,086	6,089	11,903	6,047	6,583	4,682
	6-9月	10,833	12,161	5,933	7,966	4,053	8,140	4,240	4,880	3,169
	6-8月	8,844	9,742	4,819	6,579	3,518	7,162	3,215	3,910	2,489
AOT40(24h)	4-9月	46,381	36,169	11,912	16,040	10,834	18,381	8,919	9,813	7,238
	5-9月	35,258	27,427	9,121	12,676	7,596	14,646	7,003	7,438	5,265
	6-9月	24,922	19,076	6,582	8,893	4,876	9,700	4,785	5,473	3,537
	6-8月	20,775	15,486	5,338	7,364	4,287	8,594	3,631	4,435	2,771

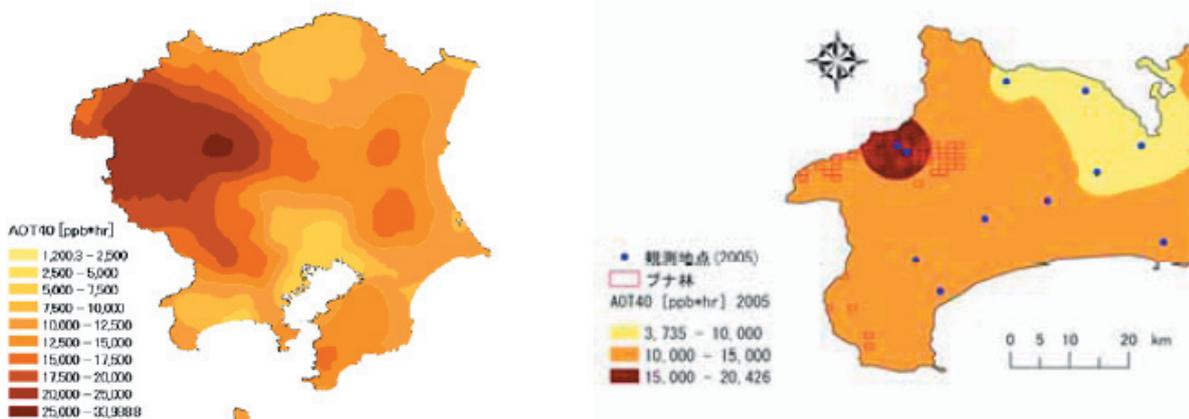


図3-5. 関東地方のAOT40の推計値の分布(左)と丹沢山地を中心としたAOT40(12h)の実測値の分布(右)

左: 1995年~1999年の5ヶ年間の平均AOT40(12h)の分布

右: 2004年8月~2006年7月における4月~9月までの6ヶ月間の平均AOT40(12h)の分布

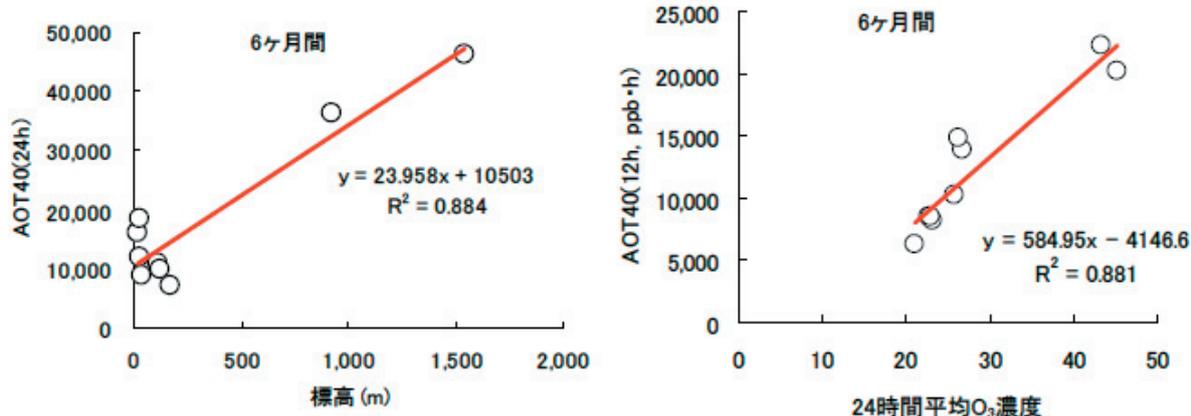


図 3-6 丹沢山地を中心とした常時監視測定点の標高と AOT40 (24h) との関係および平均オゾン濃度と AOT40 (12h) との関係

と考えられた。

3.2.5 AOT40 と標高との関係

丹沢山地周辺の大気常時監視測定点の観測データを解析し、AOT40 を算出し、表 3-5 に示した。また、図 3-5 (左) には関東地方の大気常時監視測定局の光化学オキシダント濃度が 0.06ppm および 0.12ppm を超えた時間数の合計データから推計した AOT40 (12h) を Krigging 法により表示した。一方、図 3-5 (右) には、丹沢山地を中心とした常時監視データから算出した AOT40 (12h) の分布について示した。

神奈川県内の平地部については AOT40 の推計値と実測値を基にした分布とは概ね傾向が整合していると考えられるが、山間地については実測値を基にした分布とは大きく異なっている。これは、常時監視点が山間地には設置されていないことが原因であると考えられた。今後、24 時間値を組み込んだ評価や、山間地の値の推定、補正方法の改善等について検討する必要があると考える。

表 3-5 のデータおよび、常時監視点のデータを基にして、標高とオゾン濃度との関係、AOT40 との関係について検討した結果、標高と 6 ヶ月間の AOT40 (12h) との間の相関は $R^2=0.585$ と比較的低いのが、6 ヶ月間の AOT40 (24h) との相関は $R^2=0.884$ と高いこと、24 時間を対象とした 6 ヶ月間の平均オゾン濃度と AOT40(12h) との相関が高いこと (図 3-6) などが明らかとなった。このため、表 3-5 に示した地点のデータを対象に多変量解析 (重回帰分析) により 6 ヶ月間の AOT40 (12) あるいは 6 ヶ月間の平均オゾン濃度の推計式を求めた。その結果、

$$\begin{aligned}
 & \text{6ヶ月間の AOT40(12h, ppb} \cdot \text{h)} \\
 & = 1011.555 \times \text{6ヶ月間の平均 O}_3 \text{濃度 (24h, ppb)} \\
 & - 7.8063 \times \text{標高 (m)} - 13771.3 \quad (R^2=0.958, p=0.0001), \\
 & \text{あるいは,} \\
 & \text{6ヶ月間の AOT40(24h, ppb} \cdot \text{h)} \\
 & = 1197.173 \times \text{6ヶ月間の平均 O}_3 \text{濃度 (24h, ppb)}
 \end{aligned}$$

$$+5.1515 \times \text{標高} - 17529.5 \quad (R^2=0.974, p=0.0000)$$

により求めることができた。今後、これらの統計式を用いて山間地のデータを推計することにより AOT40 あるいは平均オゾン濃度の分布を推計し、オゾンの影響が懸念・想定される地点を絞り込む必要があると考える。

4. NuWiCC を用いた風況・物質輸送シミュレーション

4.1 地形条件

丹沢山地周辺について、丹沢山 [N35° 28' 16", E139° 9' 57" (日本測地系)] を基準位置とし、以下の地形を作成した。表 4-1 に解析領域を示し、表 4-2 には解析格子数を示した。また、図 4-1 に解析領域図、図 4-2 に粗度区分図、図 4-3 に鳥瞰図を示した。

4.2 気流計算条件

気流計算条件は表 4-3 に示した通りである。

表 4-1. 解析領域

ケース	風向(°)	X方向解析領域		Y方向解析領域	
		距離(km)	格子数	距離(km)	格子数
S1	180	-8.0~6.0	141	-4.0~13.0	171
SSW1	202.5	-10.0~5.0	151	-6.0~12.5	186

表 4-2. 解析格子数

ケース	解析領域	X方向 ダミーメッシュ				Y方向	Z方向	総格子数
		流入平面	流入斜面	流出斜面	流入平面			
S1	141	10	22	32	10	171	30	1102950
SSW1	151	10	19	33	10	186	30	1244340

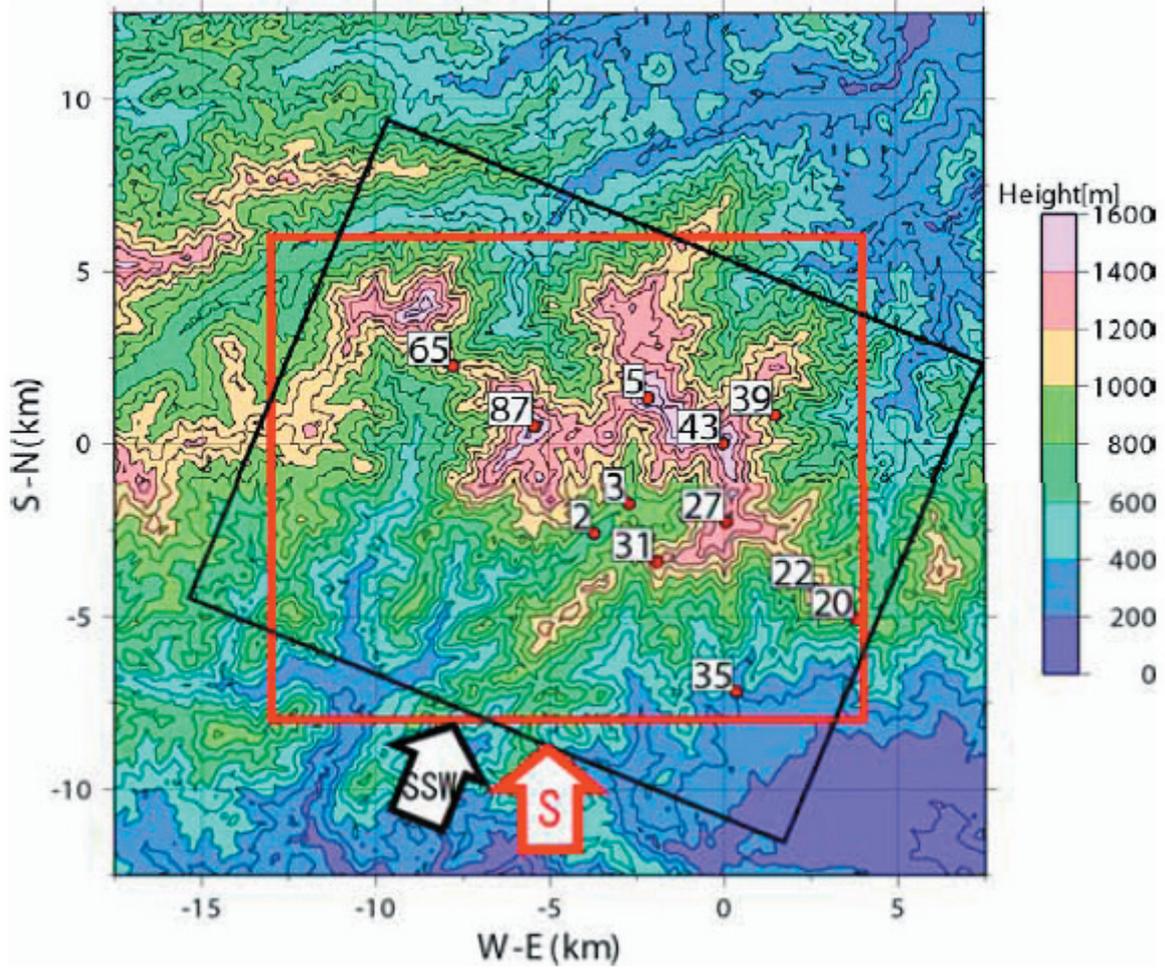


図 4-1. 解析領域図
 図中の番号および赤点は、神奈川県が実施したオゾン濃度調査地点

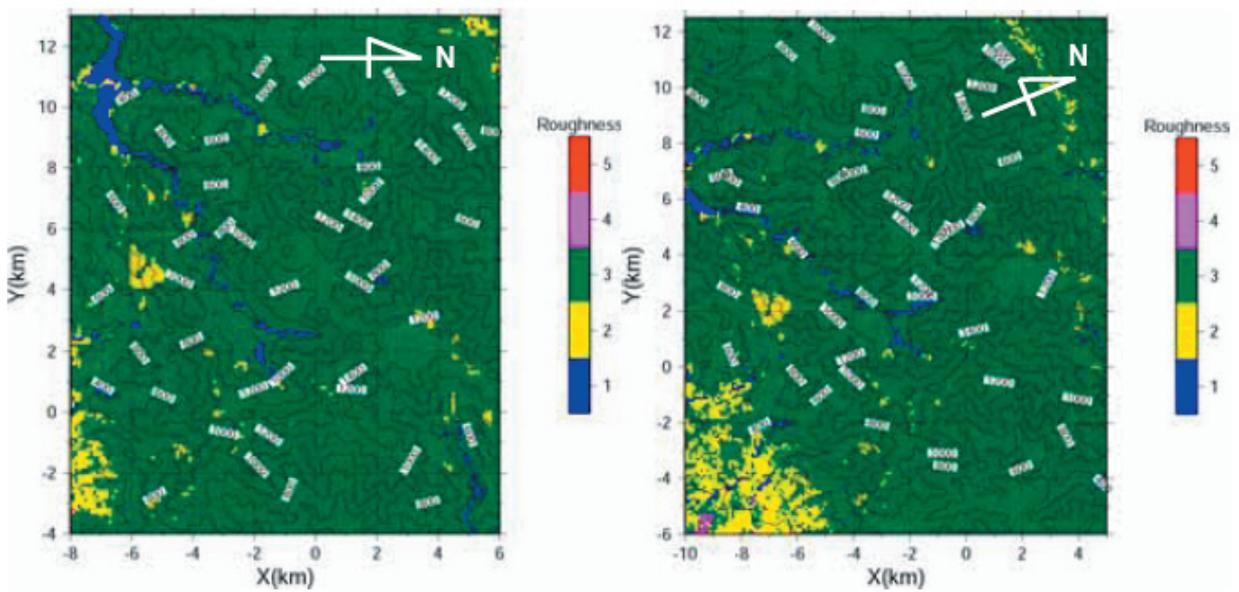


図 4-2. 粗度区分図 (左 : S1, 右 : SSW1)

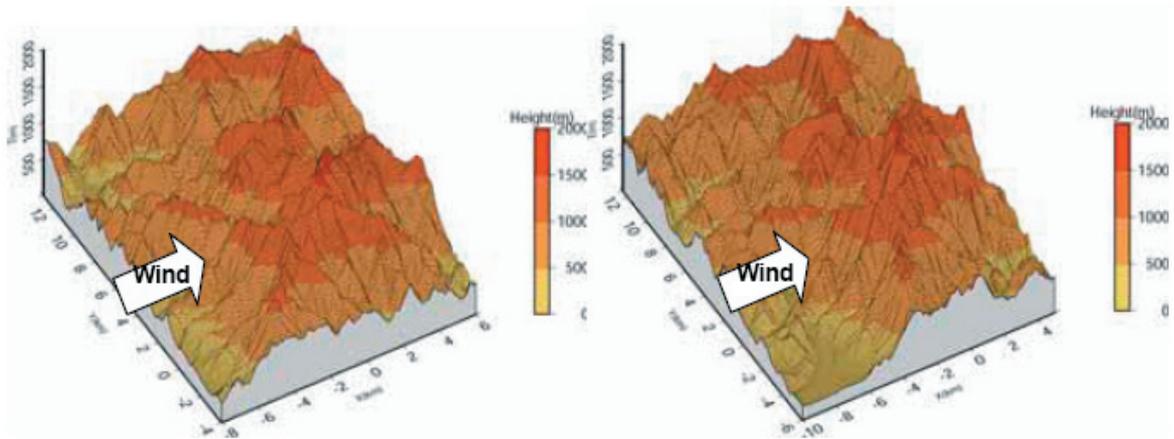


図 4-3. 鳥瞰図 (左 : S1, 右 : SSW1)

4.3 気流計算結果

使用した計算機は、電中研大型計算機システム・分散メモリー型並列スカラー計算機 (Intel Itanium2, 1.6GHz) で、CPU 時間は表 4-4 に示したとおりである。

図 -4-4 ~図 -4-5 に風速絶対値 ($\sqrt{u^2+v^2+w^2}$) の水平分布図および乱流エネルギーの水平分布図を示した。図 -4-6 ~図 -4-7 には風速絶対値 ($\sqrt{u^2+v^2+w^2}$) の鉛直分布図および乱流エネルギーの鉛直分布図を示した。

4.4 拡散計算条件

拡散計算は物質輸送解析コードを使用した。表 4-5 に拡散計算条件を示した。

4.5 拡散計算結果

使用した計算機は、電中研大型計算機システム・分散

メモリー型並列スカラー計算機 (Intel Itanium2, 1.6GHz) で、CPU 時間は表 4-6 に示した通りである。図 -4-8 ~図 -4-9 に濃度水平分布図および移流フラックス水平分布図を、図 -4-10 に濃度鉛直分布図を示した。なお、ここで、移流フラックスは上空風速で無次元化している。

4.6 考察

4.6.1 風速場

図 -4-4 と図 -4-5 にそれぞれ、S 風向、SSW 風向に対する地上高 10m における平均風速の大きさと乱流エネルギー (地形による気流の乱れに対応するもの) のコンターを示した。なお、主流の向きは図の左から右であり、図中の矢印は各地点での地形の影響を受けた風向を示している。図より、風速は地表の起伏に応じて増減し、稜線もしくは峰の頂上部付近で極大となることがわかる。このような地表付近の風速の変化は、地形勾配に伴う乱流エネルギーの増

表 4-3 気流計算条件

沈着速度	0.01
沈着速度参照高さ	10m
クーラン数	0.2
吹き抜け回数	5回
SOR収束回数上限	20
SOR残差閾値	1.00E-07
SOR緩和係数	1
流入濃度	分布 風速分布と相似
	地表面(z_d) 0.8
	上空 1

表 4-4. 計算時間

計算ケース	CPU時間(hour)
S1	38.74
SSW01	40.26

表 4-5. 拡散計算条件

パラメータ	
下層鉛直格子間隔	10m
下層鉛直格子数	10
全鉛直格子数	30
解析領域高さ	10km
流入風速	粗度区分3 高さ10mで5m/s
クーラン数	0.2および2.0
吹き抜け回数	3回
連続式の収束回数上限	20
連続式の閾値	1.00E-03
圧力の収束回数上限	20
圧力残差の閾値	1.00E-05

表 4-6. 計算時間

計算ケース	CPU時間(hour)
S1	4.26
SSW01	4.43

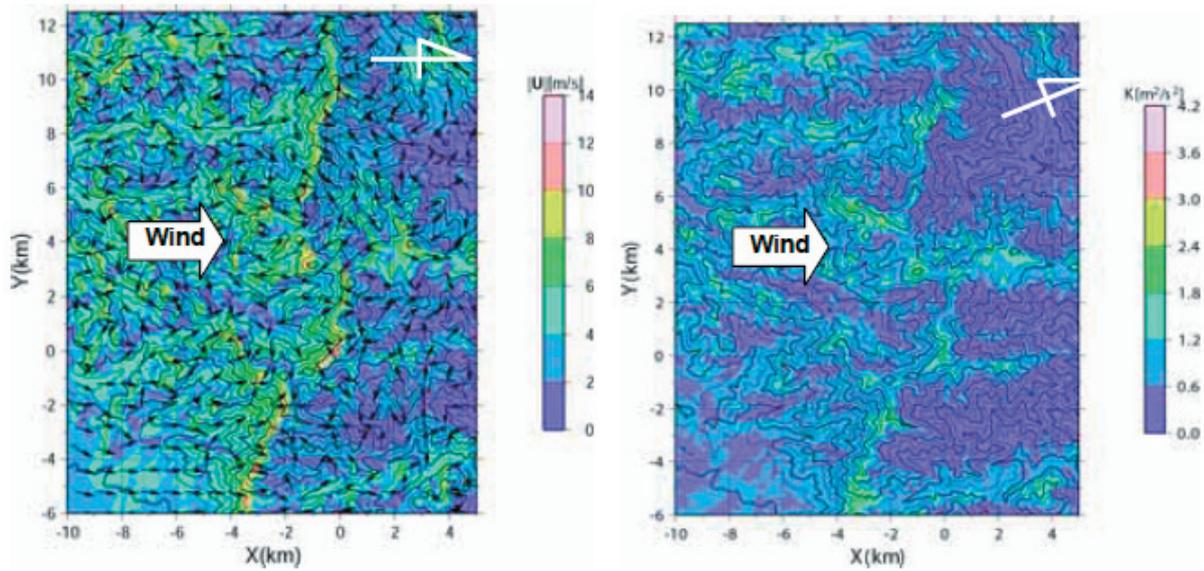


図 4-4. 風速絶対値水平分布 (左) および乱流エネルギー水平分布図 (右) (地上高さ 10m, S1)

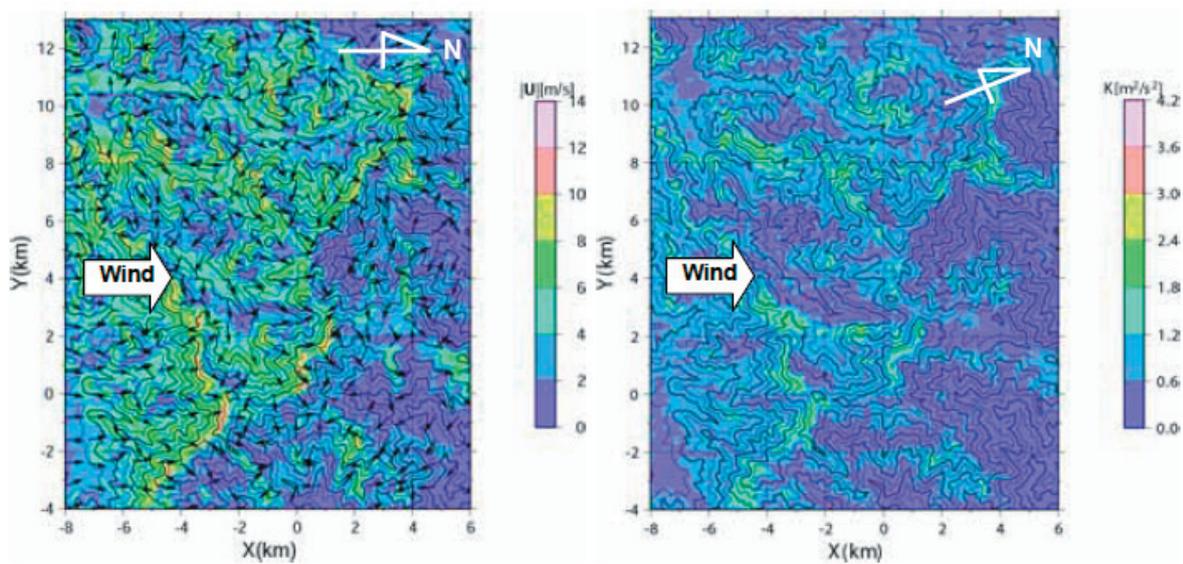


図 4-5. 風速絶対値水平分布 (左) および乱流エネルギー水平分布図 (右) (地上高さ 10m, SSW1)

減や山の後方での高速気流の地表面からの離と密接に関連している。このことは、図-4-6と図-4-7に示す丹沢山山頂 $(x, y) = (0, 0)$ [km] を通る主流方向垂直断面での平均流、乱流エネルギーの分布から確認できる。

確認されている局所的な樹木衰退地点は峰の頂上部付近の南側斜面に集中しているが、これは解析結果に見られる地形に起因して風速が増加する地点と対応するものであり、本地域における衰退現象の局所性は局地風の影響を強く受けていることが示唆される。ただし、尾根付近では主風向のわずかな変化によって風速が変していることから、樹木への長期的影響を評価するためには、年間を通じての風向の変化に十分に配慮する必要があるものとする。

4.6.2 O₃ 濃度場

図-4-8, 図-4-9にそれぞれ、S風向、SSW風向に対する地上高10mにおけるO₃濃度とO₃移流フラックスのコンターを、図-4-10に丹沢山山頂 $(x, y) = (0, 0)$ [km] を通る主流方向垂直断面でのO₃濃度を示した。なお、これらの図において、主流の向きは図の左から右であり、値は流入境界における上空濃度と地上高さ10mの風速を用いて規格化している。地表付近において、O₃濃度は山の風上側斜面でかつ高標高ほど高く、風況場との類似性がうかがえる。ただし、平均風速分布と比較してわかるように、濃

度の空間的な変化は非常に小さいが、風上側の地形の影響を受けやすい傾向にあった。従って、確認されている衰退地点は、地形の影響で濃度が上昇する領域内に位置するものの、濃度場との明確な対応は見られなかった。

一方、O₃移流フラックスは地表面に平行に輸送されるO₃の量を表すものであり、樹木に及ぼす風速と濃度の複合影響を評価するための指標の一つになると考えられる。前述の通り、濃度の空間変化は風速の変化に比べて非常に小さいことから、O₃移流フラックスは風速分布と非常に類似したものとなっている。樹木に対して風とO₃が相乗的に(フラックスとして)影響するかどうかについてはこれまで検討がなされていないことから不明であることから、植物影響を解明するためにも更なる検討が望まれるところである。いずれにしても本研究により、O₃の影響に関しては濃度としてよりも移流フラックスとして評価した方が衰退状況との対応が良好であることがわかる。

次に、西丹沢(犬越路)地点と檜洞丸地点を比較した場合や、山頂や稜線沿いでも南側斜面と北側斜面においてオゾン濃度やAOT40に差異が見られないのにブナの衰退度に顕著な差異がみられる原因の一つとして、西丹沢(犬越路)地点、稜線や山頂の北側では主風向の風速が小さいことが原因している可能性が考えられた。すなわち両者の濃度やAOT40にはそれほど大きな違いがみられなくて

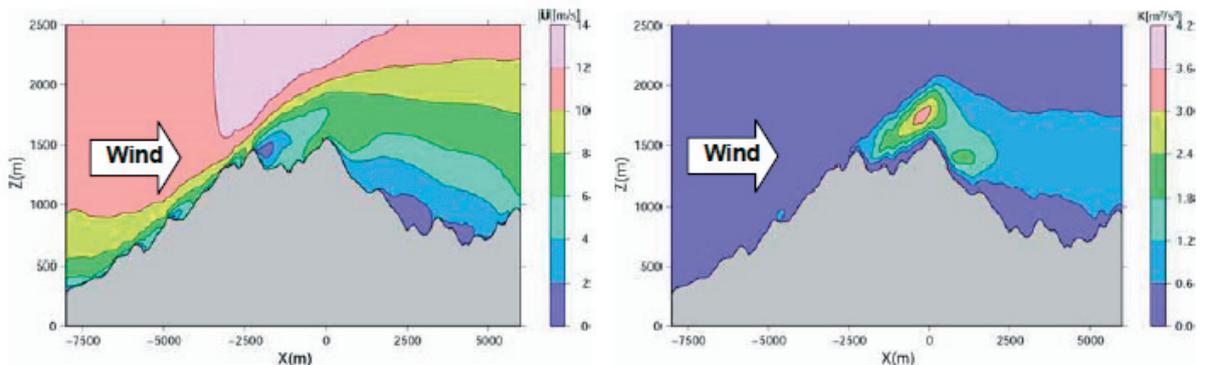


図 4-6. 風速絶対値鉛直分布 (左) および乱流エネルギー鉛直分布図 (右) (Y=0.0km, S1)

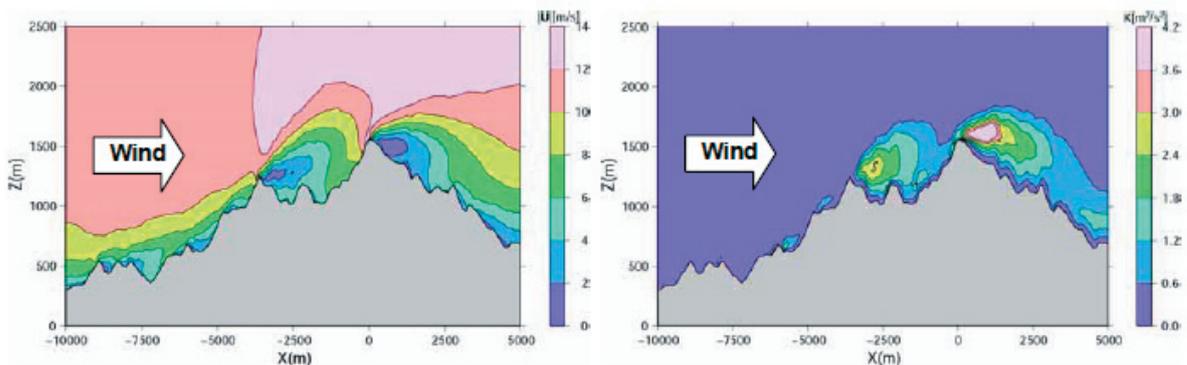


図 4-7. 風速絶対値鉛直分布 (左) および乱流エネルギー鉛直分布図 (右) (Y=0.0km, SSW1)

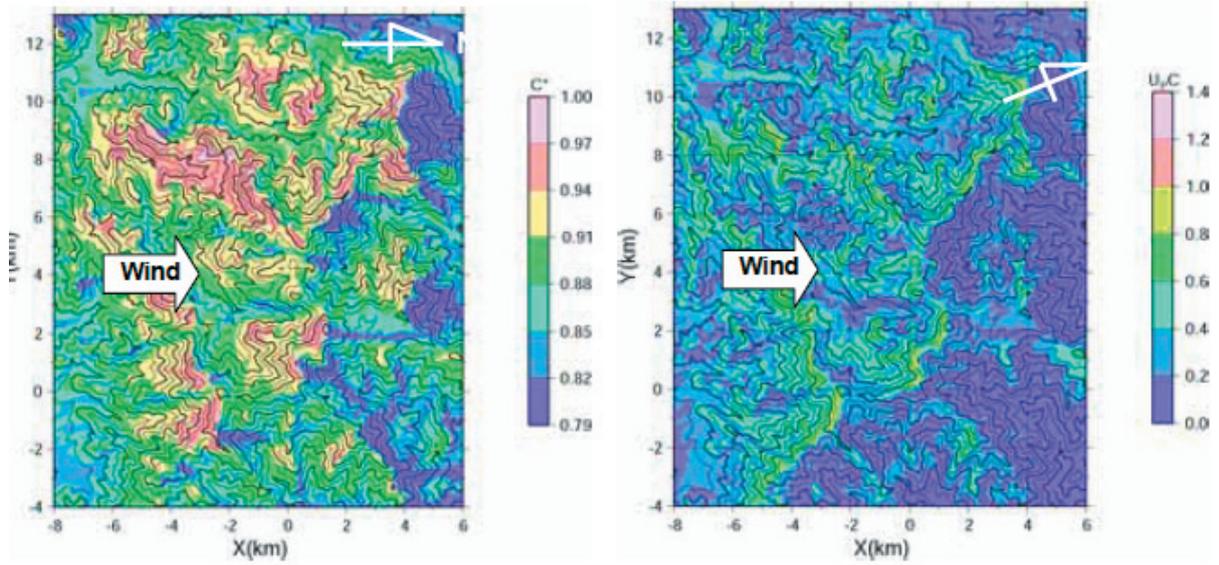


図 4-8. 濃度水平分布 (左) および移流フラックス水平分布図 (右) (地上高さ 10m, S1)

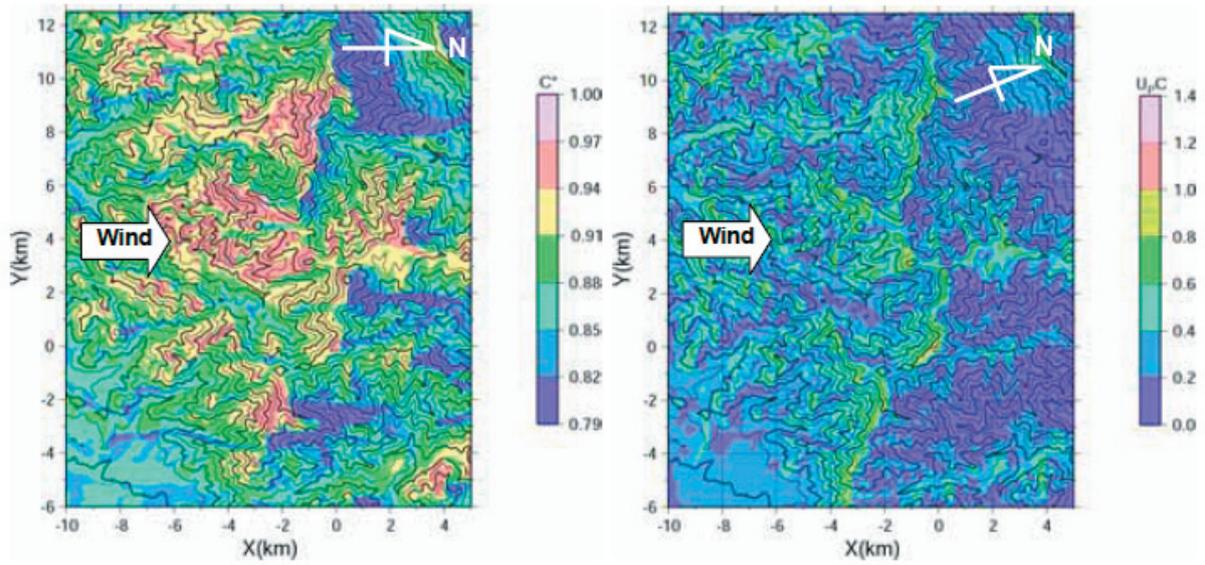


図 4-10. 濃度分布図 (Y=0.0km, 左 : S1, 右 : SSW1)

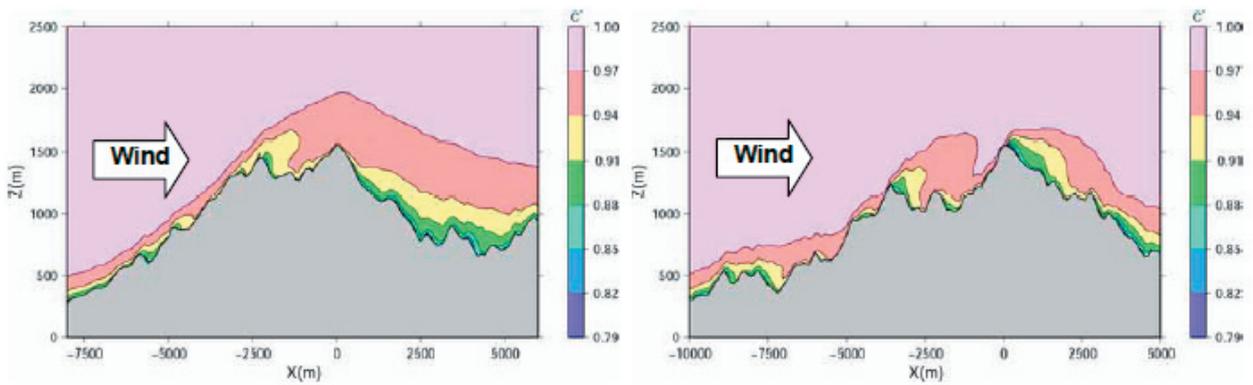


図 4-10. 濃度分布図 (Y=0.0km, 左 : S1, 右 : SSW1)

も、風速が異なると数値解析で指摘した移流フラックスには大きな差異があることになり、これが衰退に関係している可能性が想定された。

これらの結果を踏まえて、丹沢山地のブナ衰退要因として指摘されている様々な要因について図示してみると以下のように推察された(図 4-11)。大気中の NOx 濃度は極めて低い(井川ら、本報告書)が、林外における窒素の総沈着量は約 12kg/ha/年の負荷がある(戸田ら、本報告書)。これに林内雨により葉に捕捉された窒素が洗い落とされて加わるため、ブナ林への窒素負荷量はこの数値よりも大きくなると推察される。オゾンと窒素負荷の複合暴露試験結果によると、ブナは窒素負荷量が増加するとオゾンの悪影響が加速され(松村ら、2006；河野、2006)、ブナの衰退が加速する。シカの食害により林床植生が破壊され、乾燥化が進行するとともに、ブナハバチによる食害がブナの衰退を加速、枯死させるため、ギャップが拡大する。これにより林内風速が高くなるため移流フラックスも増加し、加速的に衰退が進行していると考えられる。

5. 今後の課題

オゾンの連続観測の結果と数値解析の結果を基に丹沢山地のブナ衰退原因について考察を行ったが、ここで得られたデータはたかだか2か年間の観測結果をもとにしているに過ぎない。オゾン濃度については年々変動も踏まえる必要がある。また、1ヶ所で得られたデータが山地全体を代表するデータとして適切であるのかどうかについての検討も必要である。主風向やその頻度の測定についても森林内の空間で測定したデータの信頼性の検討、さらには数値解

析の精度の向上も必要である。また、今回の調査研究により新たな指標として提案された移流フラックスの影響についての実験的な検証も必要である。

今回の調査により、ある程度のデータが得られたと考えるが、今後も長期にわたるモニタリングや調査活動を継続し、得られる知見をブナ林の保全・再生対策に反映させる必要があると考える。

本報告は、環境省地球環境研究総合推進費「C-7 東アジアにおける酸性・酸化性物質の植生影響評価とクリティカルレベル構築に関する研究(平成15～17年度)」成果の一部を含む。

参考文献

- 阿相敏明, 内山佳美, 齋藤央嗣(2005) 丹沢のブナ衰退の機構解明のためのオゾン濃度分布調査, 第46回大気環境学会年会講演要旨集, 386.
- 阿相敏明, 武田麻由子, 相原敬次(2001) 西丹沢における酸性雨及び大気汚染物質の汚染状況, 神奈川県環境科学センター研究報告 24:82-89.
- 阿相敏明, 武田麻由子, 相原敬次, 牧野 宏(2002) 丹沢大山における森林保全のためのオゾン許容量推定手法の開発, 神奈川県環境科学センター研究報告 25:73-79.
- 阿相敏明, 中嶋伸行(2004) 丹沢のブナ林衰退に係る松洞丸におけるオゾン濃度分布調査, 神奈川県環境科学センター研究報告 27:113-115.
- 井川 学, 永池英佑, 中山槇子, 松本 潔, 内山佳美(2007)

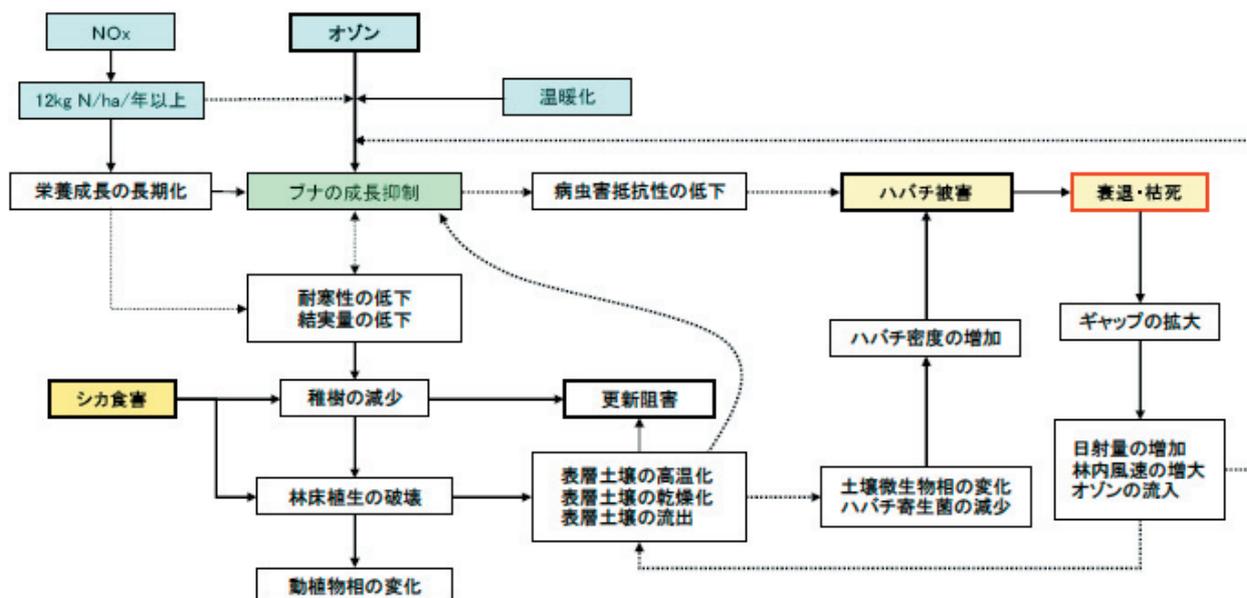


図 4-11. 丹沢山地におけるブナ衰退要因の関連図

- 丹沢山塊における微量ガス成分の濃度分布, 丹沢大山総合調査調査報告書。印刷中
- 伊豆田 猛, 小川和雄 (2004) 森林衰退の現状と取り組み (III) 奥日光前白根山周辺のダケカンバ衰退と奥秩父亜高山帯のシラビソ立ち枯れ, 大気環境学会誌 39(3):A65-A77.
- 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 (6) : A73-A81.
- 鹿角孝男, 内田英夫, 薩摩林光, 畠山史郎, 村野健太郎 (2001) 山岳地域との比較による都市域におけるオゾン中の光化学生成オゾンの寄与率, 環境科学会誌, 14:587-596.
- 河野吉久 (2004) 森林衰退の現状と取り組み (I) 欧米における樹木衰退の現状と研究の動向, 大気環境学会誌, 39(1): A1-A8.
- 河野吉久, 松村秀幸, 石井 孝, 速水 洋 (2006) 森林・樹木を対象とした酸性・酸化性物質のクリティカルレベルの構築 (3) クリティカルレベルの暫定値, 第47回大気環境学会年会講演要旨集 11112.
- 河野吉久 (研究代表者) (2006) 環境省地球環境研究総合推進費終了研究成果報告書『東アジアにおける酸性・酸化性物質の植生影響評価とクリティカルレベル構築に関する研究 (平成15~17年度)』
- 越地 正, 鈴木 清, 須賀一夫 (1996) 丹沢山地における森林衰退の調査研究 (1) ブナ, モミ等の枯損実態, 神奈川県森林研究所研究報告 22:7-18.
- 越地 正, 田村 淳, 山根正伸 (2006) 丹沢山地におけるブナハバチの加害と影響に関するブナ年輪幅変動の解析, 神奈川県自然環境保全センター研究報告 3:11-24.
- 須藤仁, 田中伸和, 服部康男, 大西浩史, 神崎潔 (2004) 観測データを用いた三次元風況解析コード (NuWiCC) の適用性評価, 第26回風力エネルギー利用シンポジウム講演論文集, 267-270.
- 武田麻由子, 相原敬次 (2005) 丹沢山地の環境オゾンがブナ苗におよぼす影響, 神奈川県環境科学センター研究報告 28:88-89.
- 谷本丈夫, 劉岩, 里道知佳, 大久保達弘, 二瓶幸志 (1996) 奥日光・足尾・赤城山地における森林衰退と立地環境, 森林立地 38 (1) : 1-12.
- 電中研 (2001) オゾンのクリティカルレベル, p.70, 酸性雨の総合評価, 電中研レビュー 43. 電力中央研究所.
- 戸田浩人, 白木克繁, 石川芳治, 内山佳美, 鈴木雅一 (xxxx) 大洞沢の降雨水質 xxxxxx
- 畠山史郎, 片平菊野, 高見昭憲, 菅田誠治, 劉 発華, 北 和之 (2004) 奥日光山岳域における夏季および秋季のオゾン濃度変動, 大気環境学会誌, 39:158-170.
- 松村秀幸, 山口真弘, 渡辺 誠, 岩崎真弓, 松尾直樹, 山下理恵, 伊豆田 猛, 河野吉久 (2006) 日本の代表的な6樹種の生育におよぼすO₃と土壌への窒素負荷の複合影響, 第47回大気環境学会年会講演要旨集 111024.
- 丸田恵美子, 志摩 克, 堀江勝年, 青木正敏, 土器屋由紀子, 伊豆田 猛, 戸塚 績, 横井洋太, 坂田 剛 (1999) 丹沢・檜洞丸におけるブナ林の枯損と酸性降下物, 環境科学会誌 12(2):241-250.
- Byun, D.W. and Ching, J.K.S. (1999) Science Algorithms of the EPA models-3 Community Multiscale Air Quality (CMAQ) modeling system, U.S. Environmental Protection Agency, EPA/600/R-99/030.
- Fuhrer, J., L. Skärby, and M. R. Ashmore (1997) Critical levels for ozone effects on vegetation in Europe. Environ. Pollut. 97(1-2):91-106.
- Kohno, Y., H. Matsumura, T. Ishii and T. Izuta (2005) Establishing critical levels of air pollutants for protecting East Asian vegetation - A challenge, p.243-250, In: Plant Responses to Air Pollution and Global Changes, Springer-Verlag, Tokyo.
- Matyssek, R., M. S. G-Goerg, S. Maurer, and T. Keller (1995) Nighttime exposure to ozone reduces whole-plant production in *Betula pendula*. Tree Physiol. 15:159-165.
- Suto, H., Hattori, Y., Tanaka, N. and Kohno, Y. (2005) Effects of Strong Wind and Oxidative Substances on Forest Decline in Mountains, 320, Acid Rain 2005 - 7th International Conference on Acid Deposition, Praha, Czech Republic.
- UN/ECE and EC (1999) Forest condition in Europe, 1999 Executive Report, ISSN: 1020-587X.