荒 木 眞 之⁽¹⁾•佐々木 長 儀⁽³⁾ 本 木 茂⁽³⁾•岡 上 正 夫⁽⁴⁾

Masayuki ARAKI⁽¹⁾, Osashige SASAKI⁽²⁾, Shigeru ΜοτοκΙ⁽⁸⁾ and Masao OKANOUE⁽⁴⁾: Relative distribution of ozone concentration in the forest stand, and diminution of ozone by the stand

要旨:特別研究「都市および都市周辺における樹林地の維持と管理に関する研究」の一部として、1976~'80年にわたり東京都下と筑波の各種樹林において、林内のオゾン濃度分布が測定された。これに先だち、この問題に関する報告例がないので測定方法を決定するため無林地で各種測定が行われた。その結果、オゾン濃度は風速の変動によって2~6分程度の周期をもって変動することがわかった。垂直変化には、濃度が急減する接地層があること、この層外の垂直変化はきわめて少ないこと、層の厚さは無林地面積の増加に伴い薄くなるが約2mに収束することがわかった。これらのことから、林内の相対濃度測定における林外対照点は林緑から10m以上離れた地上7.5mの高さにとることとし、測定時間は3~10分と決めた。11樹林の測定結果より、林内の濃度は林外より常に低く、次の特徴を有すことがわかった。すなわち、垂直分布は、林冠中央部で濃度の極小値および枝下中央部で極大値が現れ、林冠上部と林床部で濃度が急減する傾向となる。水平分布は、林緑より中心に向って濃度が漸減する傾向となる。そして、物質密度が高い樹林あるいは部分で濃度低下が激しく起る。次に、樹林の濃度減衰効果を定量化するため林内の濃度減衰率を求め物質密度の指標となる各種要因と対比させた結果、いずれの部分・方向についても濃度減衰率は物質密度と反比例の関係があることがわかった。さらに、各種測定結果を総合すると、林内濃度はオゾンの分解速度と風による補給の速度のパランスによって規定されることが推論された。

次

目

		_													
I	ま	え	が	き…	•••••	••••••	•••••	•••••	•••••	•••••	•••••	•••••	•••••	•••••	·52
Π	測定	樹材	およ	び測	定法	••••••	•••••	•••••	• • • • • • • • • •	•••••	• • • • • • • • • •	•••••	••••••	••••	·53
1	. 浿	同定構	対林お	よび	気象条件·		•••••	•••••		•••••		•••••	•••••	•••••	·53
2	. 沮	ij		機	•••••	••••••••••	•••••	•••••	••••••	•••••	•••••	•••••	••••••	•••••	·56
3	. 浿	ij	定	法	••••••	••••••	••••••	• • • • • • • • • • •		••••	••••••	•••••••••	•••••	•••••	-56
ш	林内	外四	おけ	るオ	ゾン濃度の	D短時間的	り変動・	•••••		•••••	•••••	•••••	•••••	•••••	·57
1	. H	t Ľ	් හ	10		•••••	•••••	••••••	•••••	•••••	•••••	•••••	••••••	• • • • • • • • • •	·57
2	. 魚	ŧ林坩	包にお	ける	短時間内發	変動の1個	케	••••••		•••	•••••	••••	•••••	•••••	·57
3	• 材	内夕	トにお	ける	変動程度の	D差異		••••••		•••••	••••••••	•••••		•••••	-58
4	. 短	時間	同内濃	度変	動の周期	生 ······		•••••		• • • • • • • •	•••••		•••••	•••••	·59
5	. 無	ŧ林圠	してお	ける	濃度変動の	D周期性	•••••••	•••••	•••••	•••••	• • • • • • • • • • •	• • • • • • • • • • • •		•••••	·62
6	. 7	擦ネ	ょよび	結論		•••••		•••••	•••••		•••••	•••••	•••••	•••••••	·62
IV	無材	地に	こおけ	る濃	度変化お。	よび分布…		•••••	•••••		•••••	•••••		•••••	·64
1	. 1	ゾン	/濃度	の日	変化	••••••	•••••	•••••••	•••••	•••••	••••••	•••••	•••••	•••••	·64

1982年7月7日受理 (1)(2)防災部 (3)(4)元防災部 防 災-26 For. Influences-26

2.	無材	地にお	3ける地	表附近の濃度の垂直分布	64
3.	結		論・・		
V 4	各種樹	材にお	3ける濃	度分布······	66
1.	林内	っにおけ	る濃度	分布	
((1)	測	定	法	
((2)	結		果	68
((3)	考		察	72
2.	林内	っにおけ	る詳細	な濃度分布	73
((1)	測定法	および	計算法	73
((2)	結果お	よび考	察	74
3.	疎材	におけ	トる濃度	分布	75
((1)	測	定	法	75
((2)	結果ネ	よび考	察	76
VI 🕯	各種枝	林にお	ける濃	度減衰効果······	76
1.	結果	よ および	「考察…	••••••	76
2.	結		論・	•••••••••••••••••••••••••••••••••••••••	
VII >	オゾン	の分解	驿速度 の	測定	
1.	現:	地 測 :	定例…		80
2.	実馴	倹的 測	定例…		81
3.	考		察…		82
VIII A	木内湛	度決定	₹機作…		83
IX a	ŧ	ک	ø	••••••	
引月	用文	こ 献…	••••••	• • • • • • • • • • • • • • • • • • • •	
Sumi	mary	•••••	•••••	•••••	

Iまえがき

都市および都市周辺地域内に存在する公園や緑地にある樹林が,環境保全・防災・景観・情操など多く の面から必要であることは論をまたない。一方,それらが置かれている土壌や大気など環境条件が劣悪化 していることも周知の通りである。東京都の場合,すでに1967~1970年の段階において都心から半径50 kmの圏内では健全に生育を続けているスギの大木は皆無であった¹⁾。1972~1976年に至っては、この50 km 圏が平塚・浅川・寄居・高崎・佐野・宇都宮・筑波・土浦・牛久・佐倉・千葉を結ぶ線の範囲に広がった²⁾。

したがって、樹林および樹林地を存続維持するために適切な管理の手を加える必要が生じ、環境庁のプロジェクト研究「都市および都市周辺における樹林地の維持と管理に関する研究」が1976年より1980年まで行われた。

本研究はその一部として,他の大気汚染物質の場合と異なり解析の手が及ばなかったオゾンをとり上げた。オゾンは他の汚染物質やガスに比し測定が困難であるため、地球大気との関わりなどを気象的に解析する分野⁸⁾⁴⁾ 以外の分野においては一般に測定例が少ない。そして,地表附近におけるオゾンについては広域分布⁵⁾⁶⁾ およびその機作問題⁷⁾⁸⁾,あるいは植物の生理的反応⁹⁾¹⁰⁾ が論議の中心である。分布問題の詳細,特に林内の分布を扱った報文はないようである。したがって,まず気中オゾンにおける濃度変動の発生原因の解明などを含めた測定法の開発を行った。次に,各種樹林における地表附近の濃度分布を測定解

- 52 -

析し、林帯による濃度減衰効果を明らかにした。

研究は、1976年に岡上正夫元気象研究室長の発案により開始され、本木茂前気象研究室長に引き継が れ1980年まで継続された。この間、測定は佐々木長儀主任研究官・本木茂前室長・荒木眞之現気象研究 室長によって実行され、解析と執筆は荒木眞之により行われた。この研究の調査・測定は、東京都下田無 および筑波地区で行われた。田無においては東京大学農学部附属演習林田無試験地内で、一部の測定は試 験地に隣接する同じ東京大学の多摩農場で行われた。測定に際し多大なご援助をくださった田無試験地の 渡辺章・八木喜徳郎両先生ならびに事務室・現場の方々に厚くお礼申し上げる。なお本研究の一部は92 回日本林学会大会発表論文集に発表した。

Ⅱ 測定樹林および測定法

1. 測定樹林および気象条件

Table 1 に林内濃度分布などが測定された樹林 等の概要を示す。筑波における樹林はすべてほぼ 孤立状態であったが,田無においては全体的な林 相が複雑であるため,林地および無林地の配置状 態を Fig. 1 に示す。図中の内黒2重円は無林地 における測点を,時計数字は測定が行われた樹林 を示す。そして樹林中の点線および黒丸はそれぞ れ設定された 測線 および 測点を示す。 図中の D 点は,前述のように隣接する農場内に設定された 無林地測点の位置を示す。農場内はすべて草地で あり,D 点を中心とする直径約 90m 以内には草 丈約 30 cm 以上の作物はなかった。

測定はすべて晴天日に行われたが,途中で曇天 状態になった日もある。測定ごとの日時およびそ の時の気象条件などを Table 2 に 一括して示し た。風速および気温は熱線風速計を林外基準点に 置き読み取った値の最大・最小値を示す。以後, Table 2 の引用は左端欄に記した Ref. No. によ って行う。林内測定のほぼすべては林内外同時測 定である。ただし,林外測定のうち林内との対比 資料のみならず,無林地における垂直分布などの 解析資料に用いられた測定は林内外別個に Ref. No. を与え,同時測定の組合わせ欄に対比対照を 示した。



Fig. 1. 田無試験地における樹林と無林地 の配置状態

Location of the stands and grasses at Tanashi experimental field of Tokyo University.

Note: ⊙: sampling point on the grass, Q.: Quercus, P.: Pinus, Me.: Metasequoia, Po.: Populus. Ch.: Chamaecyparis, C: Cryptomeria, B.: Bamboo, Mx.: Mixed, H.: Broad leaved, s.: stand, s. s. : scattered stand, G.: grass, ---: measured line in the stand.

Table 1. 測定対象樹林などの概況

An outline of measured stands and grasses

Stand No.	Ĺ	ocation	Species	Size (m)	Area (m²)	Mean height (m)	Mean dia (m)	Mean C. L. (m)	Dens. (Nos/ha)	RLI (%)	
I	Tokyo	Tanashi	Ch.	20 × 20	400	3.6	3,6	0,9	8, 500	1	
П	"	"	$\mathbf{P.d.} \times \mathbf{P.T.}$	9 × 14	128	5.0	7.7		2, 200	10.1	
ш	"	"	P. d.	45×25	1,125	5.9	10.0	1.8	990	—	
IV	"	11	Pop.	90 × 45	4,050	14.8	21.3	2,5	230	-	
V	"		Mixed	120×42	5,000	15.6	36.3	5.6	330	—	
XI	Tsukuba	Teshirogi	P. d.	35 × 30	1,300	7.9	11.8	4.2	2 , 100	5.0	
XI	"	Matsunosato	"	27 ×100	2,700	12.5	14.8	9.0	3,000	7.8	
хш	"	Sugama	P. d. (Cry. + Ch.)	60 × 90	5,600	15,5(5,0)	23,0(5,2)	9.7(2.0)	1, 50 0(2, 600)	4,6	two storied
XIV	"	Matsunosato	Ze.	7×43	300	2.9	1.5	2.0	89, 300	_	
хv	"	"	P.d.	27×17	460	9.8	19.5	4.0	1, 300	16.7	
хvi	"	Taguu	Ch.	22×22	425	5.0	5.3	1.5	7,700	6,2	
Α	Tokyo	Tanashi	grass	46 × 18	830	<0,20	ן ו				
В	"	'n	"	5 🗙 70	350	<0.05					without stand but short grass
С	//	"	"	20 × 40	800	<0.10	grass				"
D	"	"	"	circle	6,100	<0.20	height				"
Е	"	"	"	66 × 66	4,400	<0.30					"
F	"	"	"	74 × 20	1,480	<0.30	J				

Note: P. d.=Pinus densiflora. P. T.=Pinus Thunbergii. Pop.=Populus spp. Ch.=Chamaecyparis obtusa. Ze.=Zelkova serrata. Cry.=Cryptomeria japonica.

54

Table 2. 測定日および気象条件

Sampling date and condition of weather

Ref. No.	Stand No.	Sampling	g occasion	Wind direc- tion	Wind speed (m/s)	Air temp. (°C)	Weather	Synchro- nized Ref. No.	
100	Α	Aug. 29. '77.	6:00~19:30			27~28	F.		
101	В	<i>"</i> 28. 78.	11:17~11:27	S	Ca.	30~32	"		
102	"	"	13:27~13:37	"		"	"		
103	"	Aug. 29. '78.	10:40~10:50		0,2~1,0	30~31	"		
104	"	"	11:09~11:16	S	0.05~0.15	30~32	"		
105	"	"	14:33~15:32	"	0.2~2.2	30~33	"	202	
106	"	Aug. 30. '78.	10:02~10:12	"	Ca.	30~32	"		
107	"	"	10:26~11:31	"	0.3~1.2	32~35	"	203	
108	"	"	11:36~12:44	"	0.3~1.5	34~37	"	204	
109	С	Oct. 7. '77.	13:48~14:22			23~25	"		
110	D	Sept. 3. '80.	11:30~12:35	S	1.0~2.0		"	112	
111	"		13:47~14:51	"	1.0~3.0		"	118	
112	Е	Sept. 3. '80.	11:30~12:35	"	1.0~2.0	—	"	110	
113	"	<i>"</i> 4. '80.	11:15~12:20	"	0.5~4.0		T. C.	209	
114	"	"	13:30~14:39	"	0.5~4.0	—	F.~T.C.	210	
115	"	Sept. 5. '80.	10:00~11:08		0.3~1.5	30~32	T. C.	211	
116	"	"	13:10~14:25	"	0.5~2.0	29~ 30	F.	212	
117	"	"	14:35~15:47	"	0.5~2.0	28~30	"	213	
118	F	Sept. 3. '80.	13:47~14:51	"	1.0~3.0	-	"	111	
200	I	<i>w</i> 28. '77.	10:26~11:37	N	0.7	22~23	"	٩.	
201	"	"	12:47~13:53	"	0.5	24~25	"		
202	"	Aug. 29. '78.	14:33~15:32	S	0.2~2.2	30~33	"	105	
203	"	<i>"</i> 30. 78.	10:26~11:31	"	0.3~1.2	3 2~35	"	107	
204		"	11:36~12:44	"	0.3~1.5	34~37	"	108	
205	"	"	13:45~14:58	"	0.3~1.2	33~34	"		
206	п	Aug. 30. '77.	11:45~12:41	w	0.67	28~29	"		
207	"	"	13:52~14:55	NW	0.83	28~29	"		
208	ш	Oct. 7. '77.	12:20~13:05	S	ч .	23~25	"		
209	IV	Sept. 4. '80.	11:15~12:20	"	1.0~2.0	-		113	
210	"	"	13:30~14:39	"	0.5~4.0	_	T. C.	114	
211	v	Sept. 5. '80.	10:00~11:08	"	0.3~1.5	30~32	"	115	
212	"	· //	13:10~14:25	"	0.5~2.0	29~30	F.	116	
213	"	"	14:35~15:47		0.5~2.0	28~30	"	117	
300	XI	Sept. 20. '79.	11:20~16:20	"	0.1~1.4	25~26	"		
301	XI	<i>"</i> 26. 79.	14:20~17:09	W	0.1~0.7	19~21	"		
302	ХШ	Oct. 4. 79.	11:29~15:56	E	0.1~0.7	20~23	C		
303	XIV	Sept. 18. 79.	14:34~15:06	S	0.2~1.5	25~27	F.		
304	XV	"	15:29~16:13	"	0.2~1.6	23~25	"		
305		Sept. 19. 79.	11:38~16:46	N	0,1~1,9	21~29			
Note : (Note: Ca.=Calm, F.=Fine, T. C.=Thin Cloudy, C=Cloudy.								

2. 測 機

オゾンの定量分析には各種の方法があるが、本研究では現存機種のうち 95% 応答時間が短かい。 無液型・他のガスが不要・高精度・可搬性などの利点から、米国ダシビ社製オゾン濃度計 1003-AH が用いられた。同機は、紫外線がオゾンガスに吸収される量からオゾン濃度を定量するもので 20,000~1 ppb の範囲で測定できる。ただし、同機は 20 秒ごとに測定値の表示を行うが、測定値は次のような特徴をもつ。

すなわち,試料空気は連続的に吸引されているが,値表示前約13秒より10秒までの3秒間に吸引され た試料空気はオゾン分解器を通過した後,紫外線吸収度が測られる。そして,値表示前約4秒より1秒ま での3秒間に吸引された試料空気は直接紫外線吸収度が測られ,両者の差がオゾン濃度として表示され る。オゾン以外の紫外線吸収物質の短時間変動はほぼないと考えられるので,測定値は概ね表示前約4秒 より1秒の間の3秒間平均値とみてよい。そして,現在ここに述べた紫外線吸光光度法は赤外線吸光光度 法・気相滴定法とならんで最も信頼性が高い¹¹⁰とされ中間準器に使用されることも多い。

3. 測 定 法

通常の多点測定には管路切換器を用いるが、この調査では唯一の例外を除きすべての測定において切換 器は用いられていない。管路切換器を用いた場合,配管系内空気が多量となるため新試料空気との置換時 間および新試料による管壁の aging 時間が長くなる。すなわち,測点を移動するごとの待ち時間が長く なるが,それを避けるため試料空気はすべて同一の内径 6 mm,長さ 17 mのテフロンチューブにより吸 引・採取された。指定されている吸引速度 2 l/min に従うと,試料空気がチューブを通過するには 6.4 秒 必要である。さらにチューブ内の aging 時間を考慮し,測定箇所を移動するごとに最初の1分間の測定 値が捨てられた。

測定においては、2台の同型のオゾン計および2本の等しいチューブが用いられ、それぞれのチューブ の採取口は、伸縮式の樹高測定稈の先端に取り付けられ、林内外それぞれの測定位置に置かれた。特に林 内における測定の際には、測定を短時間に行うため、および人体の移動・存在などの影響を少なくするた め次の配慮が払われた。林床に測線を設定する作業は測定の20分以上前に行う、林縁に近い測点より測 定する、同じ測点では地上高が低い順に測定する、測竿のむだな動きを無くす、測定者は測定位置より常 に2m 以上離れて測竿を操作する、ということとした。

個々の測定における時間と方法は、以下のとおりであった。測定 Ref. 101~104 および Ref. 106 は無 林地 B 内の 各位置において 10 分ずつ 行われた。 測定 Ref. 105 および Ref. 107・108 は 無林地 B 内の 地上高 7.5 m および各種地上高において,交互に約4分ずつ行われた。したがって、測定の開始より終 了までに約1時間要している。これに対応して樹林 I の内部で行われた測定が Ref. 202~204 である。測 定 Ref. 110・111 は無林地 D において各高度約8分ずつ行われた。これに対応して,同一方法により行 われた 林内測定が Ref. 118 である。測定 Ref. 112~117 は無林地 E 内において 各高度約8分ずつ,く り返し行われた。対応して行われた林内測定は Ref. 209~213 である。測定 Ref. 205 およびRef. 300~ 305 は、樹林内外で同時に各高度約4~10 分ずつ行われたもので、資料の別途使用は行わないため林内外 1 対の測定につき Ref. No. を各1個与えた。

以下に,上記とは異なる 測定法を用いた例を説明する。Ref. 100 は管路切換器を用いた唯一の例外的 測定で,各測定高に別個の空気採取チューブを設置し,管路切換器と記録計により自動測定を行ったもの である。したがって,各高度の 測定には各6分の 時間差がある。 測定 Ref. 109 は以下のように 行われ

— 56 —

た。すなわち、各高度2個ずつ濃度値を測る、これを1回の測定とし、測定が連続的に5回くり返された。したがって、濃度値数は各高度につき2個1組の値が5回分あるので合計10個となる。

解析の結果,林内濃度の低下は樹林の物質密度に強く影響されることがわかった。そして,物質密度の 大小はオゾンガスを林内にもたらす風の構造の変化に関与すると考えられた。したがって,ここで用いる 樹林あるいは林内なる語は樹体の生理的活動を考慮しないで使用している。

Ⅲ 林内外におけるオゾン濃度の短時間内変動

1. はじめに

林内濃度分布を把握するためには、林内位置および地上高が異なる多数の点で測定を行う必要がある。 しかし、オゾン濃度は気象状態の影響による日ごとおよび時間的な変動が激しい。したがって、林内濃度 分布を確定するには以下の二つの方法が考えられる。一つは、個々の点について長期間測定を行って求め た平均的濃度により林内濃度分布を求める方法である。他は、日中変動が顕著でない時間帯において、短 時間のうちに全測点の測定を完了させ分布を把握し、そのくり返しによって日間差を平均化させて林内濃 度分布とするものである。前者の方法は、時間の制約・管路切換器のもつ技術的問題などのため現実的で ない。したがって、後者の方法によることになるが、測定を行ってみると特に林内のオゾン濃度は短い時 間内でもかなりの変動があることがわかった。そこで、この章においては、まず変動の実例を示し、次に その原因を解明した。このことは、後者の測定法における妥当性を検討したことにほかならない。この変 動は解析の結果、ランダムに起るのではなく風の乱れの周期に対応することがわかったので、以後短時間 内変動と称する。

2. 無林地における短時間内変動の1例

無林地 B において樹林 I の林縁より 1.5m・地上 7.5m (平均樹高 3.6m)の位置で測定されたオゾン 濃度の経時変動 (Ref. 107・108・205) を Fig. 2 に示す。図は 20 秒間隔で測定された結果より、1分



Fluctuation of ozone concentration on clear day of 30th August in 1978. おきの測定値を抜き出し平均した,6分間平均濃度の経時変 動を示す。この日の天候は晴であったが,11時42分以後は 快晴のほぼ無雲状態となった。このためか,11時42分以前 には値の経時変動が激しかったが,以後は漸増その後漸減傾 向を示した。しかし,以後の測定においても,20秒ごとの 測定値を時間に対して示すと Fig.3のとおりかなり変動が



Fig. 3. 短時間内のオゾン濃度の変動 Fluctuation of ozone in a short time interval of a day.

あった。11時 58 分より 12時 01 分の間に測定された濃度は,最大値 119,最小値 112,差7,平均 115.8 ppb であった。すなわち,差/平均は約6%と計算された。同様に 11時 47 分より同 50 分の間については,差/平均が 10% と計算された。

3. 林内外における変動程度の差異

このようにオゾン濃度測定値には変動があるので、その程度を明らかにするため以下の検討を行った。 樹林 I の中央(林縁より 10 m, Ref. 202)において各地上高の濃度が測定された。 同時に、無林地 B 内 で樹林 I の林縁より 1.5 m・地上 7.5 m の位置(Ref. 105)における濃度が測定された。 結果を Fig. 4 に示すが、各高度とも図の上方に示された経時変動が林外濃度で、下方が林内濃度である。各高度の測定 は同時測定ではないが、各々同時に測定された林外濃度値に変動が比較的少ないことから、各測定高ごと の変動を直接比較してさしつかえないであろう。この図から、測定高が低いほど濃度変動の程度が増大す ることがわかる。一方、(Ref. 105)と同一地点で行われた林外各高度の濃度測定(Ref. 107)によって林 外各高度の変動程度を Fig. 5 に示すが、林内と同様に測定高が低いほど変動程度が増大することがわか る。一方、(Ref. 202)と(Ref. 107)は同時測定ではないので明確さが劣るが、同一高度の比較では、林内の 方が変動程度が高いようである。これらの点を変動係数によって表現すると Fig. 6 のとおりである。図 中の a は前述の(Ref. 202)林内中央の例で、b は同一林内の林縁より 4.5 m の位置において測定(Ref. 204)された林内の例で、c は無林地 B における前出の(Ref. 107)林縁の例である。一方、B より面積が広 い無林地 C (Ref. 109)の例を Fig. 6 中の d として示す。この時の測定は、他の場合と異なり連続的に



Fig. 4. 樹林 I における林内オゾン濃度とその変動

Vertical profiles of ozone concentration and its fluctuation in the stand L

Note: Upper line indicates the ozone concentration measured simultaneously to lower line in the grass B and at 7.5 m in height.



Fig. 5. 無林地Bにおけるオゾン濃度 およびその変動の垂直プロファ イル

Vertical profiles of ozone concentration an its fluctuation in the grass B.





Vertical profiles of coefficient of variation for fluctuation of ozone concentration in the stand I. Note: "a" point was set at the center, "b" point inner, "c" point outer part of the stand, and "d" in the grass C.

5回くり返されたが、その間に環境濃度の変化が あった。したがって、各高度の測定値を、測定の 最上高である9mの濃度を100とする相対値に 換算し、各高度に10個ずつある相対濃度値から 変動係数を求めた。なお、Fig.6には模式化さ

れた樹林を併記した。

これらから、変動係数すなわち短時間内の濃度変動の程度は林冠層に入ると増大すること、地上高が低いほど増大すること、林内深く入るほど増大すること、さらに林外においても地上高が低いほど増大する ことがわかる。

4. 短時間内濃度変動の周期性

上述のような短時間内濃度変動の発生原因を解明するため、 無林地 B 内で位置および日時をかえて測 定がくり返された。経時変動の数例を Fig. 7 に示す。 Fig. 7 の a は前述の樹林 I の林縁より 2.2 m・ 地上 1.5 m の位置で, b は林縁より 2.2 m・地上 0.3 m の位置で行われた 同時測定例 (Ref. 101) であ る。c は a と同じ位置において時刻が異なった例 (Ref. 102) で, d は無林地 B の中央・地上 0.15 m に おいて (Ref. 104), e は林縁より 2.2 m・地上 2.3 m の位置において (Ref. 106) 測定された 例 であ る。各例の変動係数は a・b・……・e 例の順に 0.032・0.065・0.044・0.062・0.127 であった。

このことは前述の、地上高が低いほど短時間内変動は大きいが、平均値は小さいという傾向と一致しない。理由は、測定が行われた日時がそれぞれ異なるのでベースの濃度値にかなり差があり、また樹林および地表植生と測点が置かれた位置関係が異なっているためである。しかし、経時変動における周期性は、特に e 例に顕著であり Fig. 7 からも 40 秒周期であることがわかる。他の例にも変動の周期性が認めら



Fig. 7. 無林地Bにおけるオゾン濃度の変動比較 An examples of fluctuations in ozone concentration measured in the grass B.

Note: Point "a", "b", "c", and "e" were set at 2.2m distant from an edge of the stand I. "e" point was set at 2.3m, "a" and "c" at 1.5m and "b" at 0.3m in height on the ground. "d" point was set at 3.5m distant from the edge and 0.5m in height.

れるが、周期値は図から判然としない。そこで、自己相関係数行列による周期解析を行った。計算結果を 3 点移動平均値にまとめ、タイムラグの増加に対して図化し Fig. 8 を得た。どの例においても濃度変動 の時系列には明確な周期性があることがわかった。しかし、振動周期は各例により異なっており、a~e 例の順に 4'40'' + 5'20''・5' + 5'20''・x + 2'20''・40''・2'40'' + 2' と計算された。すなわち、同時測定で ある a・b、および同位置測定である a・c は各々異なった周期となった。ただし、周期を示す数字が一つ である d 例は周期 40 秒を有する単振動であり、他は複合波であるが被加数が影響度の高い周期である。 (c 例中の x については 10 分間測定では周期計算が不能であった。)

ここで推定された周期は,使用されたオゾン濃度計の測定間隔が20秒に限定されているため,真の値 とはいえない。しかし,濃度変動には周期性があること,その振動周期および振幅は測点のおかれた条





a, b, c, d, e: See Fig. 7.



Fig. 9. 無林地Bにおけるオゾン濃度と風速の同時測定(田無) Relation between ozone concentration and wind velocity in the grass B in Tanashi experimental field.

61

件,すなわち樹林・植生との位置関係の差,さらに測定時の気象条件の差に影響されるものであることは 断言してさしつかえなかろう。

とこで、測点のおかれた位置関係の問題と気象条件の問題を統一的に説明するものとして風速の変動が 考えられる。この点を確かめるため無林地 B の中央・地上 0.15m(植生は芝で草丈約 5 cm)において、 オゾン濃度と風速の併測が行われた。熱線風速計により、オゾン計の濃度表示が出た瞬間の風速が測定さ れた(Ref. 103)。測定結果を時間に対して示すと Fig. 9 の a・b のとおりである。 a・b 両値はそれぞ れ周期性のある変動を示しているが、同時に極大値・極小値が現れるのではない。したがって、相関係数 はr=0.053で直接的相関関係はない。しかし、変動の周期は c・d のとおりで、両者ともに 2' +約 4' と 計算された。しかも e に示された、オゾン濃度・風速の相互相関係数行列において、非常に乱れが少な い傾向が示され、かつ周期が同様に 2' +約 4' と推定された。

5. 無林地における濃度変動の周期性

一方,広大な無林地の例として,1979年8月16・17・22・27日に筑波本場の気象観測櫓(地上高9m, 周囲 400m 以内には同高以上の建築物等はない)においてオゾン濃度および風速の同時測定が行われた。 測定は各回10分とし、いずれも無雲状態の下で33回行われた。測定されたオゾン濃度の平均値は26ppb





であり、田無の場合は 114 ppb であるので約1/4 程度と低かった。しかし、各回の測定中の最大・ 最小値間差が 10 ppb 程度 であったため、変動係 数は 0.04~0.05 と 計算され 田無の例と同程度と なる。 33 回の測定中 25 例においてオゾン濃度の 振動現象が認められ、17 例に風速の 振動現象が 認められた。この例数が一致しないのは、風向に 対して指向性がある熱線風速計により自動測定を 行ったためと考えられる。したがって、風速の振 動現象が とらえられた 17 例について 周期解析を 行った。 1 例を Fig. 10 に示すが、他の例も風 速およびオゾン濃度の周期はほぼ一致した。しか し、その値は田無の例より長い場合が多く、平均 6分であった。

考察および結論

大気中のオゾン濃度は、平均的には安定状態と みえる内にも、瞬間値はかなりの変動を含んでい ることがわかった。この点については類例¹⁹⁾¹³⁾ど おりである。この短時間内変動は広大な無林地に おいても大多数の場合周期性をもって認められる ため、常に存在すると考えられた。そして、周期 性は気象状態が安定した時顕著になる¹⁴⁾ことが確 認され、風速の振動周期と一致する例が多いこと

— 62 —

がわかった。類例に10分間平均濃度の経時変動と10分間平均風速の変動の間に同一周期の卓越波が存在 することを見た例¹³⁰¹⁸⁰がある。一方、短時間内変動を変動係数で表現すると、林内では Fig. 6 に示した ような諸性質を示す。以上のことから、変動の発生原因は風の乱れといえる。筑波の広大な無林地におけ る測定において長周期が、田無の樹林群中の狭い無林地における測定に比較的短周期が、林内ではより短 い周期が計算されたこともこの考察を裏付けるものである。

すなわち,風速には短時間内の変動(風の乱れ)があること¹⁰⁾⁻¹⁰,風はさまざまな波が複合されたものであること^{16)10)が}一般的に認められているからである。また,前述した林内では中央部,垂直的には下層で濃度変動が大きいことは,風がその場所の地物に衝突することによって変質し,乱れがさらに短周期化するということ²⁰⁾²¹⁾とよく符号するからである。この際,新たに発生する乱れは林外からその場所に到達する間の植物体の存在状態,すなわち物質密度²⁰⁾²⁰⁾に影響されると考えられる。ただし,ここで示した周期は,用いたオゾン濃度計の測定間隔に制限されているため,通常論じられている周期より長いものであることを断わっておく。

いずれにしても、オゾン濃度には大きな経時変動があり、初めに述べたようにある時間内の測定につい て〔(最大値-最小値)/平均値〕をとれば、この値が 10% 程度に留まる場合はむしろ少ない。筑波におい ても、前述のとおり濃度絶対値が低いなどの理由によって、この値は 20~30% となる。Fig. 7 の例は、 平均的に 20% 程度であるが、特に変動が大きい e 例は約 70% であった。林内測定においては より大き くなり、Fig. 4 の例では 5.5 m 高で 24% を示し、以下の高度では Fig. 6 に示した変動係数の 増大と 同様に増加し、2 m 高で 83%、より以下の高度では 100% を越えた。

これらのことを測定論の立場からまとめると以下のとおりとなる。いずれの測定においても、その場所 における平均的周期の1波以上の時間である3分ないし10分の測定を行うことにしてある。一方、3分 ないし10分という時間のスケールは、平均的風速を仮に0.1m/sと仮定した場合においても、18~60m

程度の大きさのスケールに読み換 えられる。それに対し測定樹林の 大きさは9m×14m程度から60 m×90m程度までであるのでス ケールは対応していると考えて良 い(樹林の大きさに合わせて測定 時間をかえたことは当然である)。

すなわち,大きな変動を含む測 定ではあるが,変動の1波以上を 含む測定時間をとれば時間内の値 を平均して取扱ってもさしつかえ ないと考えられた。



Fig. 11. 無雲日におけるオゾン濃度の日変化 Ozone concentration on cloudless day of 29th August in 1977.

Ⅳ 無林地における濃度変化および分布

ここでは,林内の濃度分布を次章で論ずるに先だち,オゾン濃度の日変化や垂直分布等の一般的事項を 明らかにしておく。

1. オゾン濃度の日変化

オゾン濃度の日変化の例を Fig. 11 に示す。測定は無林地 A の 中央・地上 6 m の 位置で行われた (Ref. 100)。この日は,併測した日射量記録によると雲はきわめて少なく,ほとんど無雲状態であった。 図は、6分おきに測定された濃度値を平滑曲線で結んで描かれている。オゾン濃度は時刻の進行に対しゆ るやかに増減し、13時30分頃に1つのピークを示す。無雲状態における典型的な日変化については他に も報告例^{340,360}があるが、いずれも Fig. 11 と同様な傾向を示しており日変化の発生は日射量の日変化に よる³⁶⁰とされている。

しかし、一般的には終日無雲状態が継続することはきわめて少ないので、通常の日変化傾向は Fig. 2 のようにかなり不規則³⁶⁰なものとなる。

2. 無林地における地表附近の濃度の垂直分布

面積が 350 m³ と狭少である無林地 B の中央におけるオゾン濃度の 垂直分布を Fig. 12 に示す。 図中 の a は Ref. 105 の測定であり、1 測定高度約 4 分間の 平均値を示した。 b (Ref. 107)・c (Ref. 108) ともに同一地点における測定くり返しで、 a と全く同じ測定法で測られた。 a 例にも前述の短時間変動が 認められるが、振幅はきわめて小さく各高度ごとの最高濃度と最低濃度を高度が高い方から順に示すと、 110~100・103~94・96~90・94~87・87~83・80~72・81~72 ppb であった。 b・c 例においては、 測 定時の気象条件に大きな変化はなかったにもかかわらず、垂直分布傾向に乱れがあった。 c 例をみると各 高度ごとの最高最低間濃度差は a 例よりやや大きく 1.5 倍程度であるが、平均濃度も 1.5 倍程度大きい。 測定くり返しごとに傾向が異なる原因は環境濃度の変動にあると考えられた。いずれにしても、濃度の垂 直分布は地上高が低い程濃度が順次低下するため、左下りの傾向を示すとみてさしつかえない。



in the grass B.

順に Ref. 112・113・……・117 と対応

次に, 面積が広い無林地 E (4,400 m²) における測定例を Fig. 13 に示す。 図中の a・b・……・f の

する。 **b・c** 例において 風速がやや高い ほかは, 特に気象条件に差があったとは 考えにくい。

しかし,濃度の垂直分布の傾向はまち まちで,地表附近で前述したものとは逆 の傾向が出現した例 (b・f) もあった。 前に述べた短時間内の濃度変動より大き な日変化に近いスケールの変動が含まれ たためか,この測定のみは幅2mの植 被が全くない通路上で測定されたためか データの範囲からは不明であった。しか し,いずれにしても地上高2~3mより

- 64 -



上の部分においては上下方向の濃度差が少ないといえるであろう。 一方, Fig. 12 に示した無林地 B の 例は測定最上高の 7.5m までは測定高の上昇に伴う濃度の増加が認められた。

そこで、無林地の広さと地表附近の濃度低下の関係を調べた。 Fig. 14 中の a は無林地 B における測 定中の典型例 (Ref. 105) であり、Fig. 14 中の b は面積 800 m² をもつ 無林地 C における測定 (Ref. 109) である。Fig. 14 中の c は面積 830 m² をもつ無林地 A において、 自動測定法 (Ref. 100) によっ た例である。記録を通覧すると、オゾン濃度には日変化があり、かつ値の変動が激しいが、高度が高いほ どほぼ常に濃度が高いという垂直分布が認められた。この例は1か月間の連続測定であるため、日ごとの 最高濃度の月平均値より垂直分布を求めた。

Fig. 14 中の d は面積 1,480 m³ をもつ無林地 F における測定例で (Ref. 118), c 例以外の 他の例と 全く同様の移動観測法によって測定された。Fig. 14 中の e は面積 4,400 m³ をもつ無林地 E における測 定例のうちから変化傾向が極端でない例 (Ref. 116) を示した。Fig. 14 中の f は面積 6,100 m³ をもつ 無林地 D において,前述の無林地 F の測定と同時に同一の方法で測定 (Ref. 111) された。



Note: g. s. indicates the ground stratum shown in the vertical profile of ozone concentration in the grasses.

さて、濃度の垂直分布と無林地の広さの関 係は一見まちまちであるが、ほぼ各例とも地 表に近い部分の濃度は地上高が低いほど低下 している。 たとえば 図中の a 例は 地上高が 低いほど濃度が低い傾向を示しているが、同 一場所の 測定くり返し である Fig. 12 の b 例においては 5.5 m 以下 に 漸減傾向が みら れる。Fig. 12 の c 例においても 5.5 m 以 下に急減傾向がある。すなわち、5.5m以下 では勾配に差はあるにしろ地上高が低いほど 濃度が低下する傾向が共通にみられる。この 高度範囲を接地層と仮称する。Fig. 13 の例 においては、二つの例外を除くと、接地層は 1~2m といえよう。そして、接地層以上の 高度においては、Fig. 12 および Fig. 13 の ように濃度の増加程度が僅少である場合や、

むしろ逆傾向を示す場合もある。すなわち、数回の測定により勾配には差異があるにしろ一定の傾向が得 られる範囲と、それ以上の高さで測定をくり返すごとに傾向が異なる範囲とがあるようである。一方、航 空機等による高度 100 m 程度より 1,000 m 程度までの 垂直分布の測定においても、気象条件によって種 々異なった分布傾向を示す²⁴⁾⁵⁷⁾が、濃度の変異幅は 5~15 ppb²⁷⁾³⁸⁾ あるいは 20 ppb⁴⁸⁾程度と狭い。(逆転 層が存在する場合も、層内濃度は高いが層中の垂直分布における濃度差は 10 ppb 程度³⁸⁾のことが多い。) そして、地上 10 m 程度と高度 100 m 間の濃度差は 1~12 ppb 程度³⁸⁾ であり、平均的には微増傾向とみ てよい。

すなわち, Fig. 14 に示したような狭い高度範囲内において示される, 平均的には 13 ppb/7 m 程度と いえる低減率と比較し, はるかに低減率が小さい。したがって, 逆に低減率が大きい地表附近を接地層と 仮称した。

以下,同様に接地層厚を測定例ごとに読みとり,測定した無林地の面積に対応づけ,Fig. 15 を得た。 前述したように,変動が激しい測定対象であるため接地層の厚さは確定しにくいが,Fig. 15 のように下 限値はかなりそろっているので図中に示すとおりの曲線をいれた。この曲線の変曲点すなわち,接地層の 厚さが急増する広さは無林地面積 800 m^a 程度であるといえよう。

3. 結

鲙

以上の考察により、無雲状態ではオゾン濃度には日変化があるため日中の濃度が高い時間帯に測定すべきこと、林内の濃度測定値と対比するための林外基準点は、樹林に接する無林地の面積が800m³程度の場合、林縁から10m程度以上離れた地上7~9m程度に設定すれば充分であることがわかった。

V 各種樹林における濃度分布

田無と筑波地区において1977年より1980年にわたって、各種の樹林において測定された林内濃度分布

- 66 --

を示す。

1. 林内における濃度分布

(1) 測 定 法

まず,樹林の中央点を通る2本の直交線を林縁線に平行および直角に設定した。測定樹林は全て正方形 もしくは長方形のものが選定されたため,直交線は樹林を4分することになる。そして,2本の直交線の うち測定時の風向が南あるいは北の場合に南北方向の,風向が東あるいは西の場合に東西方向の線が主な 測定対象とされた。測線方位を測定時の風向に正しく合致させる方法も考えられるが,測定はすべて微風 もしくは弱風時に行われたため機械的に設定された。

つぎに、この測線上において風上側から林縁・林内・林内中央の3測点をとることを原則とした。測点 林縁は林縁の植栽列上に、測点林内中央は林内中央点上に、測点林内は上記2点の中央にとった。樹林が 大きい場合は測点林内を増やし、小さい場合は省略した例もある。

林内濃度と対比すべき林外濃度を測定する基準点は、測線の風上側延長上の林縁より7~10mの地点 にとることを原則とした。そして、基準高度のとり方に関して次のように考えられた。

すなわち,測定目的が林内濃度分布を知り,濃度低下に関する樹林の効果を把握することにあるため, 理論的には林内外同一地上高の測定値を対比すべきと考えられた。そこで,この対比法採用の必要性を間 接的方法であるが,下記の無林地間の濃度比の垂直分布の解析によって検討した。前述のとおり無林地と みなせる最小面積は 800 m² と考えられた。このことから,理論的に次のことが導き出せる。すなわち,お のおの 800 m² 以上の面積をもち,地表植生の状態に差がない 2 つの無林地があった場合,同一高度の濃 度比に関する垂直分布を求めると,それは測定高によらずほぼ 1.0 となろう。同様に,800 m² 以上の無 林地における濃度を分母に,800 m² 以下の無林地における濃度を分子とする濃度比の垂直分布は以下の ような傾向を示すであろう。すなわち,地上高 7 m 程度以上の部分における濃度比はほぼ 1.0 であるが, 地表に近づくにつれ順次減少する。しかし,地上高がより低い部分では,分母にとった無林地の測定も接 地層内で行われるため,濃度比は増加傾向に転ずる。ここで,分母にとった無林地の面積が同一で,分

子にとった無林地の面積に大小がある場 合,上記濃度比の減少は小面積の無林地 において,より激しく起るものと予想さ れる。

以上のことを検証するため,同時測定 法によって解析した結果は Fig. 16 のと おりである。 図中の a は無林地 E にお ける濃度 (Ref. 112, Fig. 13 の a) を 分子に,無林地 D における 濃度 (Ref. 110, Fig. 14 の f') を分母にとり 計算 した例で,無林地の 面積比は 70% であ る。 図中の b は,無林地 F (Ref. 118, Fig. 14 の d) を分子に,無林地 D (Ref. 111, Fig. 14 の f) を分母にした例で,



Note: Profile "a" is a ratio of concentration in grass E and D, and "b" in F and D. "c" is a ratio in gap of stand V and grass E.

- 67 -

無林地面積比 は 24% である。 図中の c は樹林 V の 3 (Ref. 213), すなわち, 疎林中にある直径 5 m の 孔状地における濃度を分子に, 無林地 E (Ref. 117, Fig. 13 の f) の濃度を分母にした例で, 面積比は 0.5% である。

すなわち,実測結果はどの例においてもかなりの程度の上下差がある。また,3例間の相互関係においても,予想と逆の傾向を示している。そこで,分子あるいは分母にとった各々の垂直分布を,Fig.13・ 14 にもどって調べると,どの例もその場所における典型的な例ではなかったことがわかる。したがって, 予想した濃度比の分布は,無林地の最小面積に関する解析の場合と同様に,平均化された垂直分布の対比 によって明らかになる事象であろうと考えられた。

 Table 3. 樹林 I における 2 種の林内相対

 濃度算出法の比較

Comparison of two methods for calculation of relative concentration of ozone in the stand B.

TT-1-1-1	Edge o	f stand	Center of stand			
Height	1	2	1	2		
(m) 7	(%) 99.6	(%) 99.7	(%) 105.4	(%) 104.1		
6	102.9	101.2	108.5	108.2		
5	102.5	102.2	105.4	105.7		
4	99.7	99.3	82.7	82.8		
3	99.0	99.0	85.5	93.7		
2	94.0	93.6	71.3	71.2		
1	98.4	97.8	36.7	36.5		

Note : 1=method 1= $(\sum_{n=1}^{n} (\text{conc. in stand/conc. in grass}))/n$

2=method 2= $\left(\left(\sum_{n=1}^{n} \text{ conc. in stand}\right)/n\right)$

 $/(\sum_{n=1}^{n} \text{ conc. in grass})/n)$

conc.=concentration of ozone (ppb.)



Distribution of the relative concentration of ozone in the stand I.

(Note) ●: Measuring point.
 Numerals: Relative contentration (%).

したがって,濃度の林内分布に関する 測定を同時測定法により行う場合,林外 基準点は比較的高い位置に固定する方 が,現実的であり,測定時間が短かくて すむため基準点濃度の変動を最小にする ことが出来る利点がある。そこで,基準 点高度は接地層高以上の高さである7~ 9mにとることとした。

つぎに、相対濃度を求める際に考えら れる2通りのデータ対比法について検討 した。第1の方法は、同時測定であるこ とを重視し、林内外に複数個ずつある測 定値の個々の対比によって、複数個の相 対濃度値を算出し,最後に平均する方法 である。第2法は、林内外の測定値を別 個に平均し、平均値の対比によって相対 濃度を算出する方法である。ここで、両 法の差を明らかにするため、樹林Iの測 点林縁および測点林内中央についてRef. 203・107・205 により計算された結果 を, Table 3 に併示する。このように, 両法の差は僅少であるので、以下に示す 測定結果においては、すべて同時測定で あることを重視した第1法を用いること にした。

(2) 結果

樹林I

樹林 I における林内相対濃度分布測定 の結果を Fig. 17 に示す。 測点林縁 は Ref. 203 · 107 に,林内は Ref. 204 · 108 に,林内中央 は Ref. 202 · 105 および Ref. 205 に対応する。Ref. 202 · 105 のすべての測定値は Fig. 4 に, Ref. 203 に 対応する 林外基準点 (Ref. 107)の 濃度変動は Fig. 5 に示されている。また,この樹林における濃度の変動係 数はすべて Fig. 6 に示されている。

測点林内中央には測定くり返しが2回ある。そのうち Ref. 205 のデータは上述したので, Ref. 202 の相対濃 度を地上高が高い順に示すと94・89・95・73・66・41・ 36% である。すなわち,地上高1mにおいてはくり返 し間差が30%に達するが,他の高度におけるくり返し 間差は,前述の諸測定と比較しても少ないので, Ref. 205・202 の値を平均して Fig. 17 に示した。図には林 冠層を模式的に併記し,値の変動をわかりやすくした。 Table 4. 樹林 I における林内外同一 高度比較法による相対濃度 Relative concentration of ozone in stand I, by the method of same height comparison

Height	Edge	Inner	Center	
(m) 7	(%) 100	(%) 100	(%) 105	
6	105	102	99	
5	93	97	105	
4	100	97	83	
3	98	86	92	
2	. 99	89	65	
1	85	91	5 9	

Note: Edge=Edge of the stand, Inner=Inner part of the stand, Center=Center part of the stand.

また図の横軸は林縁よりの林内距離を示し、縦軸は地上高を示す。そして、図の左側が風上方向である。 これらのことは、以後に示す図のすべてについて共通である。

林冠上でほぼ 100% を示す相対濃度は林冠に入ると急減し、測点林内の 地上 2m 高では値が高いが、 他はおおむね測定高が低いほど、かつ林内深く入るほど値が低減することが明確である。

ここで、先の樹林による濃度減衰効果を調べる場合、理論的には林内濃度・林外濃度ともに同一高度に おいて測定した値を対比すべきであるという問題を、得られた濃度値の面から検討する。同一高度におけ る測定値の対比により求めた相対濃度を Table 4 に示す。これらの値が、Fig. 17 に示した値より、特 に低高度において高いことは当然である。しかし、なおかつ地上高が低くなるほど、林内深くはいるほど 値が低下している。すなわち、厳密な意味の樹林による濃度減衰効果の存在も明らかである。

樹林XI

次に、1979年筑波地区において 測定された 例を 以下に示す。 測定法、 値の取り扱い方などは すべて Fig. 17 に示した例と同じである。

樹林XII (Ref. 301)の測定結果を Fig. 18 に示す。測定時の風向は西であったが,西は林縁より約2m 離れてクリ林 (東西幅 15m,南北長は樹林XII と同大,平均樹高 2.5m)に接していた。また樹林の平均 樹高が 12.5m と高いので林冠下のみの測定である。測点林縁および林外1m 地点における相対濃度は隣 接する林冠の影響のため乱れが激しい。しかし、測点林内の地上3mの値を除き、ほぼ測定高が低いほ ど、また林内深く入るほど濃度が低下していることがわかる。特に、測点林内中央における地表附近の濃 度低下が顕著であるが、原因はこの樹林は林床管理がなされておらず、高さ1.5m 程度のススキ・ウド 等の林内植生が多量に存在するためと考えられた。

樹林 XI

樹林 XI (Ref. 300)の測定結果を Fig. 19 に示す。この樹林では南北方向の主測線のほかに東西方向の測線もとられたので、副測線の測定値を右側に併記した。この樹林においては林冠中の濃度低下は認められるが、林床附近の濃度低下は認められない場合が多く、あってもわずかである。この原因の一部とし







て、この樹林にはマントルがなくかつ林床管理がされていることがあげられよう。しかし、原因がそれだ けではないことは、前述のとおり地表附近における**濃度減**衰が無林地および裸地においても認められるこ とから、明らかである。しかし、この現象の主な発生原因は併測した風速記録その他データの限りでは不 明であった。

樹林 XIV

次に規模の小さい場合の例として、林帯幅が4mである樹林XIV (Ref. 303) における測定結果を Fig. 20 に示す。この樹林は約30m×50mの裸地状地(裸地もしくは当年播種床)の中にあり、樹高 に比べ枝下高が高く、しかもマントルがない樹林であった。それにもかかわらず、測点林内中央において は林冠中の濃度低下が認められる。

樹林XV

次の例は樹林XV (Ref. 304)の測定結果で、測点林縁の測定を欠くが Fig. 21 に示す。測点林内中 央の地上高 2.5 m の濃度低下が目立つが、これはこの樹林に高さ 50 cm 程度の林床植生があったためと 思われる。

樹林 XⅢ

次に、樹林XII (Ref. 302)の測定結果を Fig. 22 に示す。この樹林は2段林であるために、上木の 林冠下および林床はアカマツ壮齢林としては本数密度、特に物質密度が高い。この林の大きさからする と、基準点の地上高は20m程度とし、林床から上層林冠中までの測定を行うのが望ましいが、測定上の 制約により不可能であった。また、林内中央点は林縁より30mの位置となるが、同様の理由により林内 20m地点を林内中央点とみなした。林内では測点によりかなりの変動があるが、地上高が低いほど相対 濃度が低いことがうかがえる。林縁からの距離が増すにつれて濃度が低下する現象は測定高ごとの傾向が 一定でないため図からは判然としない。そこで異常値を除き高度間平均値をとり地点の代表値とした。代 表値を林縁から林内距離が増加する順に示すと、89・88・89・85%である。 すなわち、 林内深く入るほ ど軽微ではあるが濃度低下の傾向が認められる。

ここで異常値についてふれておく。この場合の異常値とは測点林内 10m の測定高 3m にみられた 121 % および測点林内 15m の測定高 5m にみられた 17% を指す。 121% は他の例と比較してもかなり高い 値で、林内測点においてはほとんど出現しない。しかし、出現の原因は不明であった。一方、 17% とい う異常に低い測定値の出現は以下の理由によるものであろう。すなわち、他の例においても試料空気採取 チューブの空気取入れ口が枝葉の近く、大約 5cm 以内に近づいた場合にはしばしば異常低濃度が測定さ れた。測定中にこのことに気がついた場合は、通常空気取入れ口を左右に 20 cm 程度移動させて 異常値 の混入を防止することにつとめた。しかし、この場合は測定中には気づかなかったのであろう。いずれに しても、枝葉の近くで低濃度が出現することは物質密度が高い場所において濃度が低下するという筆者の 立論となんら矛盾するものではなく、極端に表現されたものであろう。したがって異常値と称すべきでは ないともいえよう。

樹林XVI

Fig. 23 に示す樹林XVI (Ref. 305)の例は、筑波における林内中央の地表附近の濃度減衰程度が、田 無の場合に比べて一般的に低いことを確かめたものである。すなわち、筑波地域には数が少ないヒノキ林 の内から、面積・密度・樹体の大きさなどが田無の樹林 I に最もよく似た林を選定し測定した。この場合 の測点林内中央における測定高 2 m の相対濃度は、樹林 I の 76% に対し 97% で樹林による濃度減衰は軽 後であった。原因は、樹冠密度が低い(林床相対照度は樹林 I が 1.0%、樹林 X VI が 6.2%)ことにもよ ろうが、環境濃度が低いことによると思われた。筑波は都内よりオゾン濃度が低く、測定中に出現した最 大値は筑波の 100 ppb に対し 都内は 180 ppb であった。自治体 による 8 月の測定値について、1 時間値 が 0.06 および 0.15 ppb をこえた日数と時間、あるいは1 時間値の 月間最大値などを 比較すると 平均的 には 1/2~1/3 程度と考えられた。

(3)考察



以上7つの樹林について林内相対濃度分布を示した。これらに認められる共通点は次のようなことであ

Fig. 23. 樹林 XVI におけるオゾンの相対濃度分布 Distribution of the relative concentration of ozone in the stand XVI.

る。林冠上の濃度はほぼ100%を示すが、林冠層に入ると濃度が急に減衰する、そして測定点が林床に近 づくほど減衰するようである。枝下部分で濃度の増加が認められる場合もあるが、林床に近づくと再び急 減する。特に、林床植生の量が多い樹林において減衰程度が大きい。

したがって、枝下高が充分に高く、マントル発達程度が低い一般的な樹林内における典型的な垂直分布 傾向は縦軸に高さ、 横軸に濃度をとった場合、 右にやや傾いた S 字状曲線で代表され、 極小値が林冠層 中央部に、極大値が枝下部中央に出現するとみられる。

一方,測点林内と林内中央を比較すると林内中央,すなわち林内深く入るほど濃度の減衰程度が高くな るようである。逆に,林冠表面部および林緑部においては垂直分布傾向が乱れ,異常値も出現しやすいと 考えられる。

これら共通的な現象をさらに統一的に説明する概念として、物質密度³⁸³あるいは表面積密度があげら れよう。すなわち、ある一定の空間体積をとった場合、その中に存在する植物体重量の合計値が高い部分 において、濃度の減衰が激しく起るようである。たとえば、林冠上と林冠内を比較すると、当然林冠内が 物質密度が高い。また、林床植生量が多い樹林においては林床附近の物質密度が高い。さらに、林縁から 林内のある地点までの物質量を考えると、その総量は地点が林内深く入るほど増大する。

すなわち、物質密度によって共通的な現象の大部分が説明できるが、林冠層より物質密度が高い枝下部 分において、濃度の極大値が出現することはうまく説明できない。しかし、物質密度を空間への分散程度 により補正した概念を用いると、林内のすべての場所・条件が取り扱えるものと考えられる。すなわち、 林内における濃度の減衰は(後に詳述)物体への衝突や吸着さらに大気中に併存する物質との反応により 起る。一方、林内へのオゾン分子の補給あるいは移動は、風の乱流および拡散によって起るが、風は空間 中に存在する物質によって規制される²⁰⁾。そして、この場合物質量のみでなく、その分散程度が規制効果 を左右する⁸⁰⁾からであろう。

2. 林内における詳細な濃度分布

以上の推論を確認するため、樹林 I・Ⅱにおいて、測定高 間隔を短かくし、かつ樹体との対応を考慮した詳細な分布測 定が行われた。

(1) 測定法および計算法

これらの測定は1台の濃度計によった。そのため測定は, 各地点で地上高6・5・……・0.5mの順に行われた。そし て,最後の地点の0.5m高の測定終了後直ちに,その地点 の6m高の測定が再び行われた。また,地点移動時間を極 力短縮すること,および1測定高あたり測定値数を2~3個 にとどめることによって,全測定時間の短縮化が図られた。 なお,各地点・地上高ごとに測定が行われた時刻の記録も採 られた。相対濃度値算出に用いる林外基準濃度は,林冠表面 より2m上に位置する各地点の6m高の値で代用した。こ の値の経時変化の1例(Ref. 200)をFig.24に示す。測 定時間中における濃度の変動幅は20ppb程度であった。



Fig. 24. Fig. 25 作成の基になっ た林外濃度変化

Change of ozone concentration with time progress on the stand I.

Note: Measurement was performed at 6.0 m in height on the ground (average of stand height is ca. 3.5 m). - 74 -

林業試験場研究報告 第321号

Ref. 201・206・207 においてもほぼ同程度であった。 この約 20 ppb という変動幅は Fig. 3・5・7 と比較すると中程度といえる。

したがって、個々の相対濃度値算出法には次の三つの方法が考えられる。第1法は、ある測点の6m高 の測定時刻より次の測点の6m高の測定時刻までの間に発生した林外濃度の変化は、時刻の進行に対し て直線的であるとみなす。すると、林内濃度は記録されている時刻によって推定林外基準濃度と対比がで きる。第2法は、林外濃度の経時変化が比較的少ないことから、それらの平均値を推定林外基準濃度と し、林内濃度と対比させるものである。第3法は、直前に行われた6m高の値を林外基準値とするもの である。ここで、樹林I (Ref. 200)の測点林内3mおよび測点林内7.5mについて、1・2・3法の比 較を行った。1法と3法との差は、測点3mの場合に平均1%で、測点7.5mの場合に平均4%程度で あった。1法と2法との差は、測点3mの場合に平均4%で、測点7.5mの場合に9%であった。すな わち、林外濃度の経時変動の影響が現れているようであるので、取りまとめに際しては、それを最少にす ると考えられる第1法を採用することとした。なお、各地上高ごとに連続して2~3個ずつ採られた測定 値にみられた濃度変動は、Fig. 26中の測点林内5mの場合、測定高が低い順に11・29・10、6・27・ 14、33・7・34、43・50・20、41・35・46、56・53、56・62、61・58、60・61 ppbであった。すなわち、 比較的変動程度が低いが、前述の林床に近いほど変動が大きいことが明確に現れている。

(2) 結果および考察

樹林 I における測定結果 (Ref. 200・201) を Fig. 25・26 に、樹林 I における結果 (Ref. 206・207) を Fig. 27 に示す (これらの図は、縦軸の縮尺が横軸のそれの 1/2 になっている)。この測定の場合測線 は樹林を横断して設定された。Fig. 25~27 に示した樹型模式は測線に接する風上側の植栽列、1 列につ



concentration of ozone in the stand I.

Note: Measurement points were set on the center line of the stand for S-N direction.





Contour map with respect to the distribution of relative concentration of ozone in the stand I for W-E direction.



Fig. 27. 樹林 II におけるオゾンの相対濃度分布 Distribution of relative concentration of ozone in the stand II

いて樹高・直径などを測定し比例的に描いた。そして、等濃度線を併記した。

Fig. 25~27 を通覧した結果, これまで述べてきた諸現象は, すべて確認された。また, この測定例で は林縁に多くの測点を設けたこと, 個々の樹体の大きさを測定したこと, 樹林を横断する測線としたこと などにより, さらにいくつかの現象が明らかになった。すなわち, 100%の等濃度線は林冠に接し, ある いは1~2m 程度離れているにしろ, 林冠表面の凹凸に対応している。また, マントルおよび林縁部植 生の影響, さらに他の樹林の影響が明確であること, 逆に林冠密度が疎の場合は林床濃度の減衰程度が低 いこと, 林冠表面が一様でない部分の下方において異常値が出現しやすいことがわかった。

3. 疎林における濃度分布

(1) 測定法

測定対象とした疎林はいずれも面積が広く樹高が高い。したがって、基準点は樹林の近傍でなく、周辺 にある無林地のうち最も面積が広い無林地 D にとった。一方、これまでの経験により樹林による濃度減



Note: "a" and "b" repersent the repetition of measurement in each stand respectively. "c" represents a measurement performed in a gap of stand V.

衰効果がきわめて 少ないと予想されたので、 樹林による効果を直接的に 比較できる 同一高度比較法によった。すなわち、林内測点・基準点ともに順次測定高を上下させて同時測定を行った。

(2) 結果および考察

樹林Ⅳ (Ref. 209・210) およびV (Ref. 211・212・213) における測定結果を,両林分一括して Fig. 28 に示す。まず, この図はこれまでに示した林内濃度の垂直分布傾向と異なり,最下層まで高い相対濃度を示していることに気付くが,これは同一高度比較法によったためである。

樹林Wにおいて a・b は測定くり返しを示すが、いずれも 3 m 以上の測定高では 100% 程度の値を示し ており、3 m 以下では激しい変動があるが地表に向う減少傾向が認められる。これは、疎林のため濃度減 衰効果はきわめて少ないが、林床植生の影響により対照とした無林地の場合よりも地表附近の濃度低下が 激しいことを示す。いずれにしても樹林の効果は 3 m 以上の測定値より求めるべきであるので、7・5・3 m の測定値および測定くり返しについて平均値を求めると 100% であった。すなわち濃度減衰効果はないと いえよう。

樹林Vについて Fig. 28 中に示した a・b・c はそれぞれ, この混交林中にあっては, 林冠密度が高い 地点・中庸な地点・林内孔状地における測定に対応する。したがって, c における相対濃度が最も高いと 予想されたが, 結果は a・b・c が逆順になっている。 この原因は不明であった。 いずれにしても, 林内 測点 a・b における傾向は 似かよっているので, 両測点の 各測定高における相対濃度を平均した 94% が この林における濃度減衰効果と考えられる。測定くり返しおよび類例が少ないが, 樹林IVには減衰効果が なく, 樹林V程度の植栽密度から減衰効果が発生するものと考えられる。

VI 各種樹林における濃度減衰効果

この節においては、これまでの測定結果のすべてを用いて樹林による濃度減衰効果を考察する。

1. 結果および考察

林床植生が多い樹林において林床部の濃度減衰程度が高いことなどから、林内濃度の減衰には、林内空 間中の物質密度などが多大な影響を与えていると前述した。そこで、物質密度を指標する各種の尺度を用

- 76 -



幹材積密度 Stem volume density (m³/m³)

Fig. 29. 枝下部水平方向の濃度減衰 率と幹材積密度

Diminution of ozone with respect to horizontal plane below the leaf layer and stem volume density of the stand.

Note: Numerals in the figure indicate the stand number.

いて樹林の濃度減衰効果を解析した。解析は、樹 林を樹林全体・林冠部・枝下部にわけ、さらに各 部分において 垂直方向・水平方向について行っ



相対照度 Relative light intensity (%)

Fig. 30. 林冠部垂直方向の濃度減衰

率と林床相対照度 Diminution of ozone with respect to vertical plane at leaf layer and relative light intensity in the stand floor.

た。Fig. 29 は枝下部における濃度減衰を,枝下部の物質密度に対比したものである。横軸は,枝下部の 幹材積合計量 m³ を,その部分の空間体積 m⁸ で除した,いわば幹材積密度である。縦軸は,各測点の枝 下部における濃度減衰量(100-相対濃度値)を,林縁よりその測点に至る最短水平距離で除した,枝下部 における樹林の単位長あたり濃度減衰率である。測点および測定高ごとに濃度減衰率を求め,値の変動程 度を示すため,すべての値を図示し縦線で結合した。

マントルが発達した樹林Iの値が高いが、他は減衰率2~3%/m以下で、幹材積密度の増加に伴い減 衰率が増大するようである。

次に林冠部における濃度の垂直方向の減衰率を Fig. 30 に示す。本来,横軸には林冠部の幹・枝・葉 の表面積合計値を用いるべきであるがデータがない。したがって,林冠部表面積の大部分を占める葉面積 によって規定される相対照度を横軸に用いた。縦軸は林冠による濃度減衰率であり,測点林内中央におけ る林冠内の相対濃度を100より差し引き,林冠表面からその点までの垂直距離で除して求めた。主に,表 面下1mの値を用いたが,異常観測値の混入を除くため,図には林冠表面下2mにおける濃度減衰率, および測点林内を設けた場合は表面下1mと2mにおける平均減衰率を併記し,変動範囲を明らかにし た。ただし,樹林XVのみは林冠表面下3mにおける値である。

図から、林冠密度が高まり林床相対照度が5%以下になると、林冠による濃度減衰率が急増することが わかる。そして、この場合変異幅は減衰率で約10%程度と広いが、変異の上限および下限を滑らかに結 んだ曲線はほぼ平行になることから、両者の対応は明確なものと判断できる。

次に,林冠部および枝下部を一括した, 樹林による水平方向の濃度減衰率を Fig. 31 に示す。 横軸は





Diminution of ozone with respect to horizontal plane for whole stand and stem volume density of the stand.

Fig. 29 と同じ枝下部における幹材積密度で代用 した。縦軸は濃度減衰率であり、林内各地点にお ける濃度減衰量を林縁より地点までの距離で除し て求めた。この場合、各地点の濃度減衰量は、各 測定高度における相対濃度を平均し、100より差



相対照度 Relative light intensity (%)

Fig. 32. 林冠部水平方向の濃度減衰率と 林床相対照度

Diminution of ozone with respect to horizontal plane at leaf layer and relative light intensity on the stand floor.

し引いて求めた。ただし、樹林XII・X IIIは林冠部の測定値を欠いている。これにより、Fig. 29 において 認められた幹材積密度の増加に対する濃度減衰率の上昇が、より明確に認められる。

ここで, Fig. 29~31 に示された傾向を総合すると次のように推論される。まず, Fig. 29 にみられる 樹林 I の値が極度に 大きい現象が Fig. 30 において認められないことから, 樹林 I の枝下部濃度は林冠 部で減衰した濃度が他の影響を受けずに測定されたと考えられる。すなわち, マントルの発達しない樹林 にあっては枝下部における水平方向のオゾンガスの移流があり, これと林冠部からの垂直方向の移流の両 者によって林内枝下部の濃度分布が形成されるものと理解できる。そして, Fig. 31 における傾向線の曲 率が Fig. 29 におけるそれより大きいことから, 林内濃度分布の 形成には水平移流部分の影響が比較的 大きいと考えられる。

そこで、林冠内について地点ごとの平均濃度および林内距離から、林冠部水平方向の濃度減衰率を求め、それを林冠の表面積密度の指標となる林床相対照度に対比させて Fig. 32 を得た。結果は傾向の乱れが多く、図中の3曲線のどれをとるべきか判断出来ないが、いずれにしろ他の図と同様に密度が高いほど濃度減衰率が高いことがわかる。

つぎに、林冠部・枝下部および垂直方向・水平方向のすべてから移流してくる各成分が総合的に形成す る林床濃度を調べた。Fig. 33 は、林床の濃度減衰量を樹林の合計幹材積量に対比させたもので、横軸は ha 当り合計幹材積量であり、他の例と同様に物質密度の一表現である。ただし、幹材積は林分密度管理

— 78 —

図⁸¹⁾による推定値である。縦軸は林床に おける濃度減衰量であり,前例と同様に 測点林内における1および2m高の平 均値ならびに測点林内中央における1お よび2m高の値をそれぞれ100より差し 引いて求めた濃度減衰量を併記し,変異 幅を示した。また,樹林Vの材積は円錐 体近似により求め,林床濃度は前述の理 由で3mの値を用いた。

変動幅は 20% とかなり 広いが,上・ 下限を結んだ曲線がほぼ平行であること から,この関係は 妥当 なものといえよ う。したがって,例外値を除くと図中の 点曲線が得られる。

最後に林床における濃度の減衰程度を 樹林面積に対比させ Fig. 34 を得た。 横軸は樹林面積の対数を表わし,縦軸に は測点林内中央における地上高1および 2mの濃度値をとった。この図から,林 内濃度は約1,000 m² 附近より急減する ことがわかる。

論

2. 結

以上, すべての対比において物質密度 の増加により濃度が減衰することが明確 である。そして, 横軸に用いた各尺度の 指標としての的確さの程度には大差がな いようである。すなわち, 厳密には林内 濃度は, 樹体の表面積密度をその空間分 散度によって補正した値の大小により規 定されるといえよう。



林分幹材積 Stem volume of the stand (m3/ha)



Diminution of ozone concentration on the stand floor and stem volume of the stand.



Fig. 34. 林林の復度と個林地面積 Decrease of ozone concentration on the stand floor and area of the stand.

₩ オゾンの分解速度の測定

林内においては、オゾンの分解速度はかなり速いと考えられた。したがって、その速度の概略値を知る ための各種測定を行った。

大気中のオゾンは、気中に併存する物質、特に大気汚染性各種過酸化物質との反応⁸⁰⁾および自己分解, さらに水蒸気への吸収⁸⁰⁾、浮遊塵埃への吸着などにより、その濃度が減衰する。そして、林内に入ると上 記原因の他に、樹体への吸着および主に樹葉による吸収、さらに樹体との衝突による分解などによりいっ



閉鎖後の時間 Time after shielding (min.)

Fig. 35. オゾン分解速度の野外における測定例

Decomposition of ozone in the progress of time after the shielding in the field.

Note : Arrows indicate the openning of the shield-cover.

そう濃度が減衰する。林床では土壌による吸着が起る。ここでは、これらを総合して、単に分解速度と称 する。

1. 現地測定例

1978年8月29日に田無において、分解速度の測定を行った。この日の天候は晴で気温33°C, 微風があった。方法は以下のとおりであった。無林地 B の通路中央の芝生(草丈約5cm)に高さ15cm の杭を打ち,それに試料空気採取用チューブを取りつけた。そして、濃度を測定し続け、その途中で体積531のポリエチレン製箱型容器(いわゆるコンテナ)をかぶせた。

この日の濃度は非常に高く、この高さにおいても 90 ppb を示していた。 測定は 11 時 05 分・11 時 19 分・11 時 31 分より各々約 10 分ずつ A・B・C として行われた。 箱内気温は 35℃ であった。結果は Fig. 35 のとおりで、杭に箱をかぶせると箱内空気中のオゾン濃度は、時間に対して非常に乱れの少ない曲線 的傾向を示しつつ急減してゆくが、約4分以後はほぼ一定の値に収束する。これは、空気を吸引採取して いるので 21/min の速度で周囲の空気が箱内に取り込まれるが、この取り込まれた空気中のオゾンと箱内 空気中のオゾンが動的平衡状態に達したことを意味する。そして箱を取り除くと濃度の激増が起り、旧濃 度に復帰する。

この濃度の減衰過程を下記式で把握した。

 $C = 0.01 C_0 (100 - b \log t)$

 $C_0 = 初期濃度$ (ppb), C = T秒後の濃度 (ppb), T = 閉鎖後の時間(秒)

t = T/20 秒, 測定のピッチ数, b = 低減率

ただし、オゾン計の測定表示と箱をかぶせる時刻を同調させることが不可能であること、および式の性質 上、箱をかぶせた瞬間の1ピッチ前の値を基準値とし、その値は箱をかぶせた後においてもっとも近い値 に等しいとして計算してある。

低減率は A・64.07, B・52.47, C・71.82 と計算された。この値は、A 例の場合 20 秒後に初期濃度の

80.7%,40秒後に69.4%,60秒後に61.4% になることを意味する。同様に,40秒後に B例は75.0%,C例は65.7%になる。

2. 実験的測定例

次に、大気汚染実験棟の気温・湿度・オゾン 濃度を各々設定可能な接触実験用 chamber 内において、分解速度の測定を行った。この chamber は開放型あるいは循環型に作られ ているため、ダクト部分の空気体積が求めが たいなどの理由により測定法は現地測定法に ならった。すなわち、Fig. 36 に示すよう な、容積 81の内壁にテフロンシートを張っ た木製箱を用い、そのふたを chamber 外よ り閉じる方式により測定した。一方、実験条 件としては気温・湿度・chamber 内オゾン 濃度を変化させた。



Fig. 36. オゾン分解速度測定箱 Schematic sketch of the instrument for measurement of decomposition of ozone. Note: Numerals in the figure indicate length in mm.

測定結果を Fig. 37~39 に示す。 どの例においても箱内のオゾン濃度は閉鎖後の時間に対して, 乱れ の少ない曲線的傾向を示しつつ減衰する。その後,ふたの周囲より吸入された chamber 内空気中のオゾ ンと箱内空気中のオゾンが平衡状態に達するので,現地測定例と同様に濃度の収束が起る。濃度・湿度を 一定にし, 気温を変化させた 場合に おける 低減率は 15℃・11.63, 25℃・21.14, 35℃・23.48 であった (前例同様 40 秒後の濃度は 94.5・89.9・88.8% となる)。現地測定と実験測定において,使用した箱の体



Fig. 37. オゾン分解速度と気温

Decomposition of ozone in the progress of time after the shielding at three different levels of temperature.



Fig. 38. オゾン分解速度と湿度 Decomposition of ozone in the progress of time after the shielding at two different levels of relative humidity.





Fig. 39. オゾン分解速度と設定オゾン濃度 Decomposition of ozone in the progress of time after the shielding at four different levels of ozone concentration.

積が異なるので, 値はそのまま比較できな いが、これらの低減率は現地測定の値より 小さい。これは、 chamber 内の空気が清 浄空気にオゾンのみ加えた空気であること から当然である。すなわち、ここで低減率 として計算された分解速度は、自己分解速 度・水蒸気への吸収速度・器壁への衝突分 解速度の合計値である。

次に、相対湿度による差をみたが、すで に明らかにされているとおり88)水蒸気量が 多いほど分解速度が速い。湿度 60・70%の 条件における低減率は16.53・21.14であ った(40秒後の濃度は92.1・89.9%)。

一方、オゾンの濃度レベルについては、 Fig. 39 のとおり, 100 ppb 条件下において 傾向が乱れているが、おおむね環境濃度が 高いほど濃度の減衰が大きいようである。 そして,低減率は,400・240・100・80 ppb の順に10.16・11.59・30.08・7.34と計算 されたので、40秒後の濃度は初期濃度の 95.2・94.5・85.6・96.5%となる。

3. 老 察

オゾンの分解速度は非常に速く、現地測 定例の場合における3分後の濃度は初期濃 度の48~33%である。しかも、この場合 の分解速度測定は箱外から高濃度の補給が ある状態で行う方法である。 現実には 測 定困難であるが,補給がない状態における 分解速度は、 さらに 速いものと 考えられ る。したがって、補給を断つと数分後には きわめて低濃度となるものと予想される。 すなわち,ある場所におけるオゾン濃度は 乱流による補給速度と分解速度のバランス によって 規定される と考えて よいで あろ う。この点が,他の大気汚染質と非常に異 なるオゾンの特異的性質である。

₩ 林内濃度決定機作

ここにおいては、すべてのデータおよび解析結果を通覧して林内濃度が決定される機作を考える。 平均的にはかなり均一な気塊も、詳細にみれば高・低濃度部分が斑状あるいは塊状に混在することか ら、部分気塊の集合¹⁶⁾¹⁹⁾であるといえる。大気の混合が、ここで対象にしている大きさのスケール(測点 距離は短い例で 0.5m) に至るまで、完全に行われているとは考えにくい。程度の差こそあれ風の乱れは 常に存在するのである²¹⁾¹⁸⁾。樹林の上方および側方から、乱流拡散により輸送され接近した気塊は林冠表 面部の枝葉や凹凸で分散・混合され比較的均一な小気塊群に変化すると考えられる。

そして、小気塊群が林冠層に流入する際に風速の急減が起るので、乱流拡散速度が低下する。このこと は、林冠層内に存在する部分気塊に対するオゾン分子の補給速度の低下をもたらすため、相対的に分解速 度が勝ることになる。したがって、林冠層内の濃度は林外より低くなる。この、拡散速度が高い部分にお いて高濃度オゾンが測定されることは、林冠内・外の場合だけでなく林内の各位置を比較しても同様にい えることである。すなわち、林内濃度の垂直分布はS字状の傾向を示すことを前述したが、この傾向は 林内風速の垂直分布における傾向と同じだからである。逆に、林冠表面にある凹部直下の林冠内では、し ばしば高濃度異常値が出現することをみたが、これは風速の減衰程度が低い部分においては濃度も低下し ないと解せるので、上述と同様に説明づけられよう。

また, 濃度レベルが低い空間中のある部分に小気塊が流入してオゾンがもたらされた瞬間を考えると, 一時的に比較的高濃度が出現するであろう。しかし,その気塊は空間にもとから存在した気塊と混合・拡 散するため,濃度は急減する。仮に混合・拡散がないとしても、3分後にはもたらされた瞬間における濃 度の48~38%程度に急減することは前に述べた。これにより,林内すなわち濃度レベルが低い場所にお いて濃度変動が大きいことも説明できよう。

これらの考察から,林内濃度分布の決定機作の厳密な取り扱いを行う場合,分解速度・補給速度の測定 は以下の手順によるべきものと考えられる。

分解速度の測定は、まず気温・湿度・気中併存汚染質など各量の大小を変化させて行う。次に、無底箱 を無被の土壤面上および草地上に置き吸着効率の大きい土壌⁸⁴⁾の影響を調べる。さらに、有底箱内に枝葉 等を入れるなどして、各種物体への吸着・衝突などによる分解速度を測定する。これらから、林内におけ る総合的分解速度を決定する。このような解析手順となろう。

一方において、乱流拡散による補給速度の決定は、原理的には風速傾度から計算できるわけであるが、 実際の樹林すなわち林冠の均一性・大きさなどを考慮すると、かなりの困難さが予想される。

ただし、これらの林冠が一様でかつ林縁のマントルが発達した樹林を対象にする場合であって、密度が 極端に低い樹林の林内濃度は林に吹いて来る風の中の濃度そのものとなるのであろう。いずれにしても、 機作解明の初期段階にあっては密度が高く、マントルが発達した林分を取り扱うのが有利であろう。

Xまとめ

従来,地表附近のオゾン濃度の分布および測定法に関する調査例や文献はきわめて限られ,林内濃度に 関するものは皆無であった。したがって本研究の目的は,測定方法論の開発,地表附近の濃度分布におけ る一般的性質の解明,各種樹林における濃度分布の把握,樹林による濃度減衰作用の解明にある。 測定論に関する結果は次のとおりである。無林地内で, 濃度を測定すると10分以下の短時間内にも, 高濃度・低濃度が交互に現れるため値の変動が激しい。この変動の程度は,林内外ともに地表に近いほど 高く,林内外では林内が高く,林内では中央部が高い。しかし,これらの変動には周期性が認められ,併 測した風速における周期と一致したことなど多くの特徴から,変動の発生原因は風の乱れにあることがわ かった。すなわち,この変動はアトランダムに起るのではないので,短時間内変動と名付けた。そして, 以後の測定においては,測定時間は少なくも変動の1波以上として,時間中に得られた値の平均値をもっ てその地点の代表値とすることとした。

濃度分布の一般的性質解明に関する結果は次のとおりである。濃度の日変化傾向は無雲日の場合,日射 量の日変化傾向と一致するが,通常の晴天日には非常に不規則な傾向となる。無林地における濃度の垂直 分布は,地表よりある高さまでの範囲においては濃度が急増し,それ以上10m程度までの範囲において はほぼ一定値を保つ。この10mという値は測定された最上高であるにすぎず,文献的には約1,000m程 度まで延長して考えてよさそうである。この,地面附近で濃度が急増する範囲を接地層と名付けた。そし て接地層の厚さは無林地面積が増加すると薄くなるが,面積が800m²以上の無林地ではほぼ2mに収束 するようである。

林内濃度分布の把握に関する結果は次のとおりである。まず,予備的検討を行った。林内の相対濃度を 算出するための林外基準点は,樹林に接する無林地で林縁から10m以上離れた地点に設ければ良いこと がわかった。次に,理論的には林内外同一高度の濃度測定値より林内相対濃度を求めるべきと考えられる ので,この点の検討を行った。林内外同一の各種地上高ごとに濃度を測定した。一方,林外濃度測定高は 地上 7.5mに固定し,林内濃度測定高のみを変化させて測定した。その結果,二つの測定法によって求 めた,二つの垂直分布間の差は地表附近を除ききわめてわずかであることがわかった。そのため,林外濃 度の測定高は 7~9mに固定する方法を採用することとした。他の理由として,測定時間の短縮化が図ら れるため,環境濃度の変動の影響を最少化できるからである。

さらに、林内外ともに各地上高で4分以上の測定を行っているが毎分3個ずつの測定値が得られるた め、各測定高あたりの測定値数は12以上の数となる。これの平均化については、林内外の測点でおのお の平均値を求め平均値の対比により相対値を求める方法と、時間的対応を重視し、個々の測定値から多数 の相対値を求め相対値を平均する方法とがある。検討の結果、両方の差はきわめてわずかであるので後者 の方法を用いることとした。

以上のように定められた測定法に従い,マントルの発達程度・林床植生量・樹高・面積・構造等がおの おの異なる11の樹林において林内相対濃度分布を調査した。その結果,林内濃度の垂直分布は縦軸に地 上高,横軸に濃度をとった場合,右に傾いたS字状の傾向を示すことがわかった。林冠層の中央部で極 小値が,枝下部の中央高で極大値が出現し,林冠上部と林床部で濃度の急減が起る。林内濃度の水平分布 は,林縁より樹林の中心に向って濃度が漸減する傾向を示す。濃度低下が激しく起る樹林あるいは樹林中 の部分には,物質密度が高いという共通的特徴がある。

樹林による濃度減衰作用の解明に関する結果は次のとおりである。幹材積密度すなわち,樹林が占有する 空間体積量に対する幹材積量と樹林の単位長さあたり濃度減衰率との間には双曲線的傾向が認められる。 つまり,幹材積密度が増加するに従い,減衰率が急増する。上記のような樹林の物質密度と濃度減衰率の 間には、樹林に対するオゾンの水平移流・垂直移流あるいは、樹林の林冠・枝下・全体という部分のいず れを考えても,また物質密度を指標する尺度を変化させても,明確な関係がある。すなわち,密度が高い 樹林の方が強い 減衰効果があることがわかった。 例えば,幹材積が 140 m⁸/ha ある林内の林床濃度は林 外の 85% 程度である。あるいは,相対照度が 5% で林冠層の深さが 5m である林の林冠下濃度は,50% 程度である。

濃度減衰機作に関する解析の結果は次のとおりである。林内の測定より得られた諸結果から,林内濃度 は分解速度と補給速度のバランスにより規定されるものであること,分解速度は速いが樹林の影響は比較 的受けないものであること,補給速度は風の乱れによってきまるため樹林の影響を強く受けるものである ことなどが推論された。そこで,分解速度を測定したところ,気中併存物質が多い野外の場合,濃度の半 減時間は3分程度以下であることがわかったので,上記の考察は正しいといえよう。

引用文献

- 1) 山家義人:東京都内における樹木衰退の実態,林試研報, 257, 101~107, (1973)
- 2) 山家義人:都市域における環境悪化の指標としての樹木衰退と微生物相の変動,林試研報, 301, 119~129, (1978)
- PITTOCK, A. B. : Climatology of vertical distribution of ozone over Aspendale. Quart. J. R. Met. Soc. 103, 575~584, (1977)
- 4) FREDERICK, J. E. et al : Ozone abundances in lower mesosphare deduced from backscatterd solar radiances. J. Atom. Sci. 34, 1987~1994, (1977)
- 5) 北川徹三:光化学スモッグの成因についての一解釈,大気汚染研究,11,223~251,(1977)
- 6) 松岡義浩:首都圏域における植物の光化学大気汚染被害,大気汚染研究,11,195~203,(1977)
- 7) 根山芳晴ら:呉における大気汚染高濃度に対する地形効果,気象庁研究時報,28,279~283,(1976)
- 8) 太田幸雄ら:大気中のガス・エーロゾル成分の変動とオキシダント濃度と気温との関係について、 大気汚染学会誌,13,239~245,(1978)
- 9) 服田春子ら:オキシダントによるアサガオの被害とその指標性について、(I)アサガオのオキシ ダント被害の特徴および被害指数とオキシダント累積値の関係、大気汚染研究、9,722~728,(1975)
- 10) 古川昭雄ら: O₈によるポプラ葉の光合成・光呼吸・暗呼吸の性質におよぼす影響,大気汚染研究,
 9, 376, (1974)
- 11) 秋元 肇ら:赤外線吸光光度法・紫外線吸光光度法および気相滴定法によるオゾン測定器の絶対校 正,大気汚染学会誌,13,266~273,(1978)
- 12) 小路正弘ら:オゾン濃度と風速の短期変動,大気汚染研究,9,576,(1974)
- 13) 小路正弘ら:オゾン濃度と風速の短期変動(Ⅱ),大気汚染研究,10,612,(1975)
- 14) 北田敏広ら:光化学反応に影響を及ぼす2・3の要因,大気汚染研究,12,18~25,(1977)
- 15) 徳植 弘ら:風車型風速計の特性と観測値についての考察,気象庁研究時報,29,299~305,(1977)
- 16) 高橋浩一郎:風の構造と最大風速,災害の研究, VI, 技報堂, 59~61, (1963)
- 17) 斎藤錬一:10分間平均風速値から最大瞬間風速値の推定,災害の研究, VI,技報堂, 31,(1963)
- 18) 石井徳治:新東京国際空港における地面附近の風の乱れと鉛直シャー,気象庁研究時報,29,231 ~237、(1977)
- 19) 竹内和之ら: 鈴鹿山脈附近における乱気流の観測, 航技研報告, TR-180, 1~22, (1969)
- 20) 水野建樹: 大気乱流のコヒーレンスについて, 公害, 11, 112~128, (1976)
- 21) 竹内和之ら:東北地方太平洋沿岸航空路上における乱気流観測, 航技研報告, TR-222, 1~23, (1970)
- 22) 荒木眞之: 庇陰林分の葉量, 日林誌, 55, 296~300, (1973)
- 23) STERN, W. R. et al : Light relationships in grass-clover sward. Aust. J. Agric. Res. 13,

- 85 -

599~614, (1962)

- 24) 関原 彊ら:低層のオゾンについて、気象庁研究時報、29,105~111、(1977)
- 25) 横山長之ら:多重回帰分析法によるオキシダント濃度の予測の試み,公害,11,339~352,(1976)
- 26) 野本秀行ら:大阪の気象条件とオキシダント濃度についての考察,大気汚染研究,7(2),76,(1972)
- 27) 水野建樹ら:東京郊外における高度 3,000 m までのオゾン空間分布の観測,公害,14,289~299, (1979)
- 28) 小路正弘ら:神戸市における大気中の NOx, Os 濃度の空間分布, 天気, 25, 349~355, (1978)
- 29) 鈴木清太郎ら:網目と模型防風林の防風効果について、農業気象、4,5~6,(1948)
- GLAYNE, R. W.: Some effects of shelter-belts and wind breaks. Meteorol. Mag. 84: 999~ 1010, (1955)
- 31) 安藤 貴:林分密度管理図とその使い方,農林出版,11 pp., (1966)
- 32) 川村 清:富崎における大気オゾン,二酸化ちっ素および塩素イオンの観測,日気象春大会,219, (1964)
- 33) 松岡宏昌:工場廃水のオゾン処理, PPM, 4(10), 57~68, (1973)
- 34) GALBALLY, I. E., et al : Destruction of ozone at the earth's surface. Q. J. Roy. Met. Soc. 106, 599~620, (1980)

- 86 --

Relative Distribution of Ozone Concentration in the Forest Stand, and Diminution of Ozone by the Stand

Masayuki Araki⁽¹⁾, Osashige Sasaki⁽²⁾ Shigeru Motoki⁽³⁾ and Masao Okanoue⁽⁴⁾

Summary

The studies were carried out from 1976 to '80 to clarify the distribution of ozone concentration in the stand and the effect of the stand for diminution of ozone at Tanashi in the western suburbs of Tokyo and at Tsukuba in Ibaraki prefecture. In general one can conclude from many measurements that the relative concentration of ozone decreases in congested stand, in lower height from the floor, at the center part of the stand, and severely decreases in lower height of the stand with full vegetation on it's floor. A vertical profile of the concentration in the stand shows an "S" shape in the figure of which vertical axis represents the height from the ground and horizontal one does relative concentration. The maximum value of it appears at the center height of the part in branchless trunk and the minimum occurs at the center height in the leaf layer. Hundred % value appears in the over and outer part of the foliage, and 0% on the plane in contact with the stand floor. Analyses for diminution of ozone in the stand were attempted by comparing the diminution rate for many sections of the stand with many factors indicative of the spatial density for materials in the stand. As a result of these analyses, it was clarified that diminution of ozone is influenced by the quantity of materials and it's condition of dispersing in the stand. By compiling many subjects, we may construct a hypothesis that suggests the concentration of ozone in the forest stand is determined by the balance of the decomposition speed and the supply speed of ozone gas to the stand. In this matter, we can consider that, the decomposition speed is very high but is not influenced by the character of the stand, while the supplying speed is similar to wind speed and it's gust, This speed is influenced seriously by the condition of material density in the stand as in the case of a wind break forest. To certify a part of this hypothesis the decomposition speed of ozone was measured.

Received July 7, 1982

(1) (2) For. Influences Division

(3) (4) Former : For. Influences Division

- 87 -