

接地境界層内部でのオゾンの鉛直分布*

若 松 伸 司**

要 旨

ヘリコプターやパイロットバルーンを用いてオゾン、気温及び風の鉛直分布の観測を実施したところ上空にオゾンの高濃度域がしばしば認められ、この高濃度域は海風の上限より下であり、風の滞留域と一致している事が、垂直流解析により明らかとなった。これは地表付近から放出された一次汚染質が海風の影響下でゆっくり上昇し、滞留域に漂い、この層で光化学反応を起こし、オゾンが生成されることによるものである。一方、地表付近では上空よりも紫外線が弱いため光化学反応は上空よりも不活発であり、また生成されたオゾンを破壊する物質が多いため、オゾン濃度は減少し、その結果、一般に、500~700mにオゾンのピークが形成される。

1. はじめに

接地境界層内部におけるオゾンの立体分布の解明は、光化学スモッグの発生機構に関する研究のためには、重要な課題である。

Lea (1968) はオゾンゾンデを用いてロスアンゼルス西部75kmの海岸部で観測を行い、オゾンの極大域を、下部逆転層の内部で観測した。Edinger *et al.* (1972), Edinger (1973) そして Gloria *et al.* (1974) はロスアンゼルスにおいて同様な観測を、小型飛行機を用いて実施し、光化学反応により生成されたオキシダントが、日射をうけて熱せられた斜面に沿って上昇し、逆転層の上端と底部の間に滞留することを観測した。Miller *et al.* (1970) は、逆転層が破壊される時に急激にオキシダントが上昇することを報告している。Miller *et al.* (1972) は、シエラネバダ山脈のセントラルバレーにおいて観測を行い、午前中には、オキシダントの極大域が逆転層の上端に存在し、午後になると、谷を昇る風によって汚染物が移送される現象を観測している。

これらの観測結果は、光化学スモッグの形成のメカニズムを解明するためには、地上での汚染物や気象の観測だけでは不十分であり、三次元的な観測が重要であるこ

とを示している。しかし、オゾンの垂直分布についてのデータは、まだ十分に蓄積されていないのが、現状である。本研究は、これらの観点から、ヘリコプター、パイロットバルーン等を用いて、多数のオゾン、気温、風の立体観測を実施し、発散解析法等により風の立体構造を解明するとともに、得られた汚染物のデータと気象条件の関連を解析し、特にオゾンの鉛直分布についての考察を試たものである。

2. 観測の概要

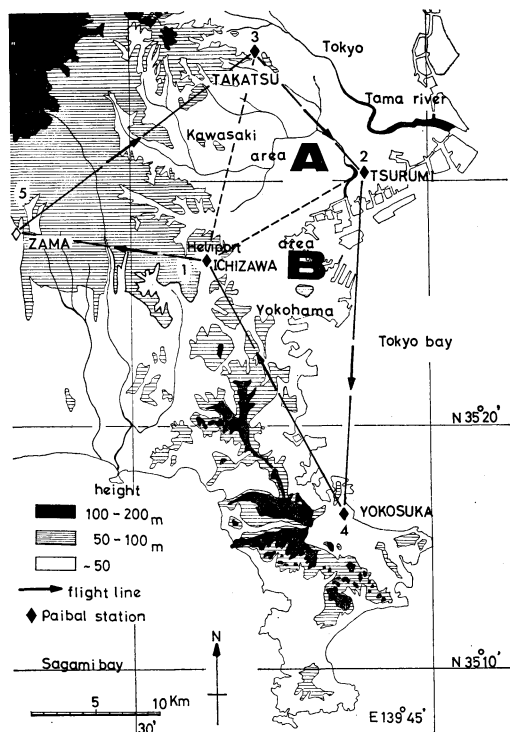
観測は、1972年から1973年の2年間にわたって実施し、6月から8月にかけての夏季三カ月間について解析を行った。測定地域は、西部の山岳域を除いた神奈川県全域である。観測地点とヘリコプターの飛行コースを第1図に示す。ヘリコプターには、オゾン計と、温度計を塔載し、通常、1日2回、約1.5時間飛行し、約1kmまでの鉛直分布を観測した。風の観測は、パイロットバルーンを用いて、4地点(横浜市旭区市沢町県警ヘリポート、横浜市鶴見区総合庁舎、川崎市高津区役所、横須賀市役所)で行い、上昇速度、毎分200mでの一点観測法によった。気温はサーミスター温度計(Model ET-3AR 玉屋納)を使用した。精度は0.2°C以下、応答時間は1秒程度である。オゾンは、ケミルミネッセンス法によるオゾンモニター(Model GLX-11、電気化学計器、Model OX-21、京都電子工業)を使用した。精度は1ppb、応答時間はサンプリング系も含めて約1分程度である。地上のオキシダント濃度は、中性ヨウ化カリ

* Vertical Distribution of Ozone in the Planetary Boundary Layer.

** S. Wakamatsu, 神奈川県公害センター

—1975年1月20日原稿受理—

—1975年6月10日改稿受理—



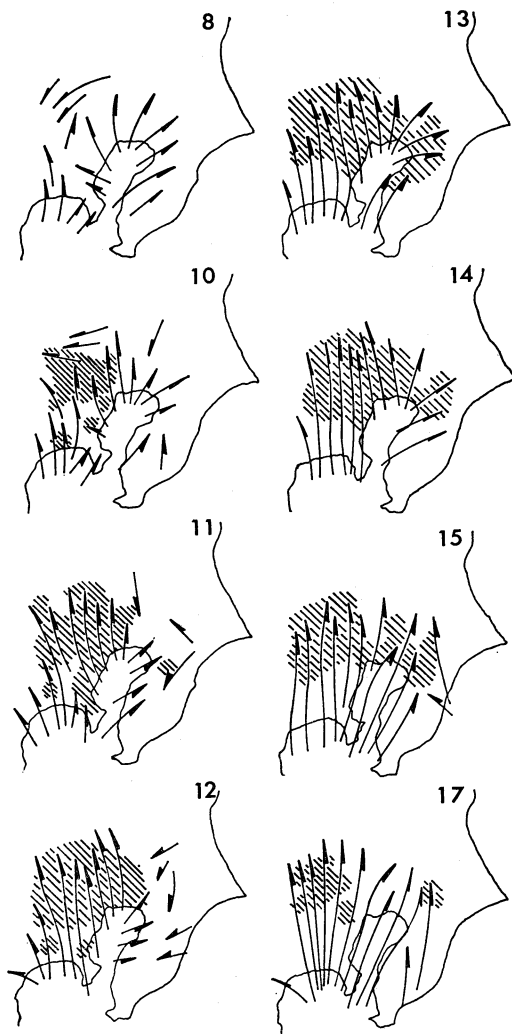
第1図 ヘリコプター飛行コースと地形 (1~4の地点においてパイバルの観測を行なった。A, Bは発散量の計算領域である。)

法によるオキシダント計 (Model GX-2, 電気化学計器) により計測した神奈川県下43地点での大気汚染測定網のデータを用いた。

3. オゾン濃度の鉛直分布と風の立体構造

地上で高濃度のオキシダントが発生した日は、上空でもかなり高濃度のオゾンが観測されており、オゾンの鉛直分布は海風の侵入に伴う風や気温の立体分布と密接な関連がある事が明らかになった。神奈川県は、その東部を東京湾に接し、南部は相模湾に面しているため、気圧傾度が弱く、ある程度の日射がある場合には、海風が発達しやすく、特に、夏季においては、相模湾からの海風が顕著である。一般に海風の侵入がない場合は気温も低く、地上でも上空でもオキシダントは低濃度であり、オゾンの鉛直分布は、ほぼ等濃度であるかまたは、若干下層が高くなる傾向があるが、海風が侵入し始めると、地上でも上空でも濃度の上昇が観測されることが多い。このような時のオゾンの高濃度域は、ほぼ海風の上限と対応しており、また、最高濃度が出現する高度は、風の収束域と一致することが認められた。これらの傾向は、約

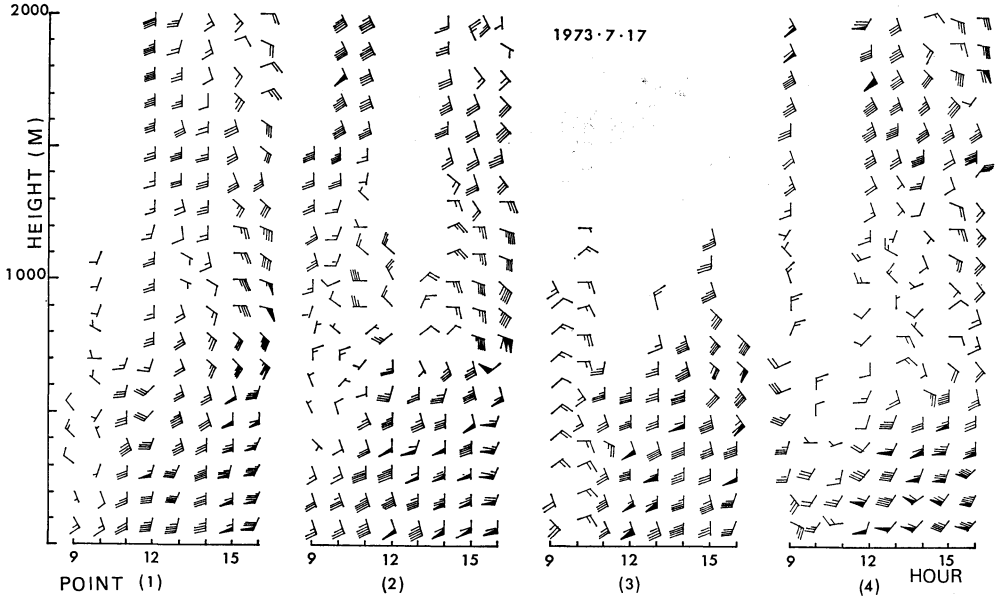
1975年9月



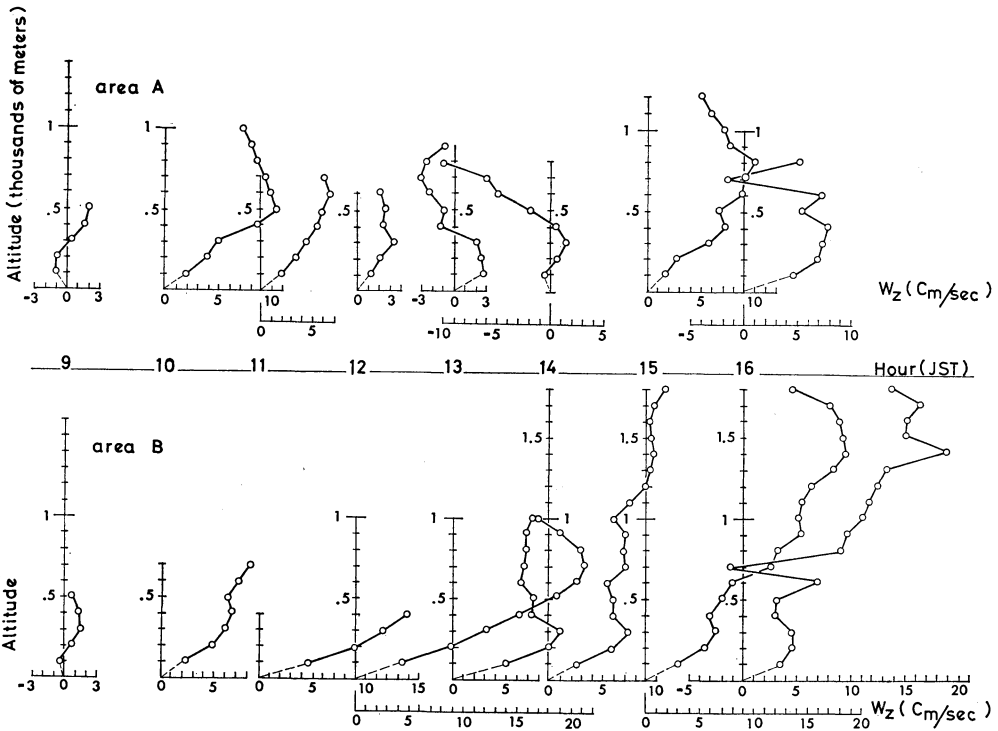
第2図 1973年7月17日の関東南部における地上風系とオキシダント濃度の時刻変化。斜線部分は10ppm以上のオキシダント濃度(1時間平均値)発生地域である。なお図中の数字は時刻を示す。

50回にわたるヘリコプターの観測により確認されたが、その代表的な例として、1973年7月17日の観測結果を中心に、オゾンの高濃度域が形成されるメカニズムについて解析する。

1973年7月17日の気圧配置は、典型的な夏型で、北太平洋の発達した高気圧が、日本列島をおおっており、気圧傾度は弱く、晴天であった。横浜地方気象台の観測によれば、最高気温は32.3°C、平均風速は2.8m/sec、日照



第3図 1973年7月17日の地点1～4におけるパイバル観測による上空の風の時刻変化、地点位置は第1図に示してある。



第4図 1973年7月17日の area A, B における垂直流 (W_z) の時刻変化

第1表 1973年7月17日の area A における高度別水平発散量 $\left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}\right)$ の時刻変化. 単位は $\times 10^{-4}/\text{sec}$.

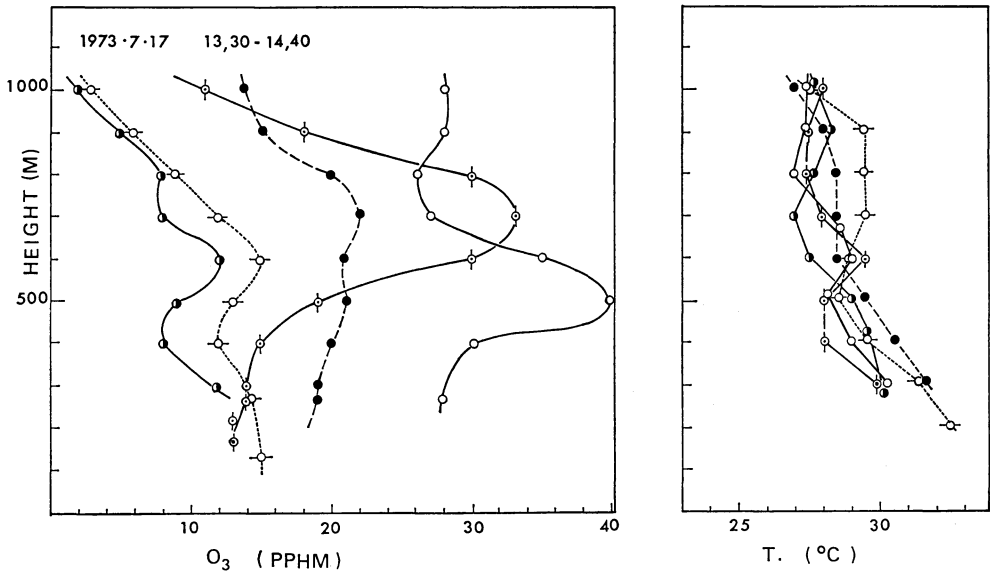
Hour (J.S.T)								
Altitude (m)	9	10	11	12	13	14	15	16
100	1.11	-2.00	-1.80	-1.29	-2.63	0.47	-1.62	-4.57
200	-0.03	-2.02	-1.38	-0.86	0.24	-0.94	-1.08	-2.18
300	-1.48	-1.10	-0.85	-1.07	0.45	-0.81	-3.01	-0.41
400	-1.22	-3.57	-1.01	0.79	3.46	0.98	-1.48	-0.39
500	-0.28	-1.40	-0.56	-0.11	-0.66	2.22	-0.67	2.37
600		0.63	-0.50	0.46	1.46	3.08	-2.06	-1.76
700		0.54	0.47		0.69	1.75	-0.01	8.76
800		0.91			-0.45	3.28	-0.99	-6.67
900		0.40					2.36	
1000		0.88					0.85	

第2表 1973年7月17日の area B における高度別水平発散量 $\left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}\right)$ の時刻変化. 単位は $\times 10^{-4}/\text{sec}$.

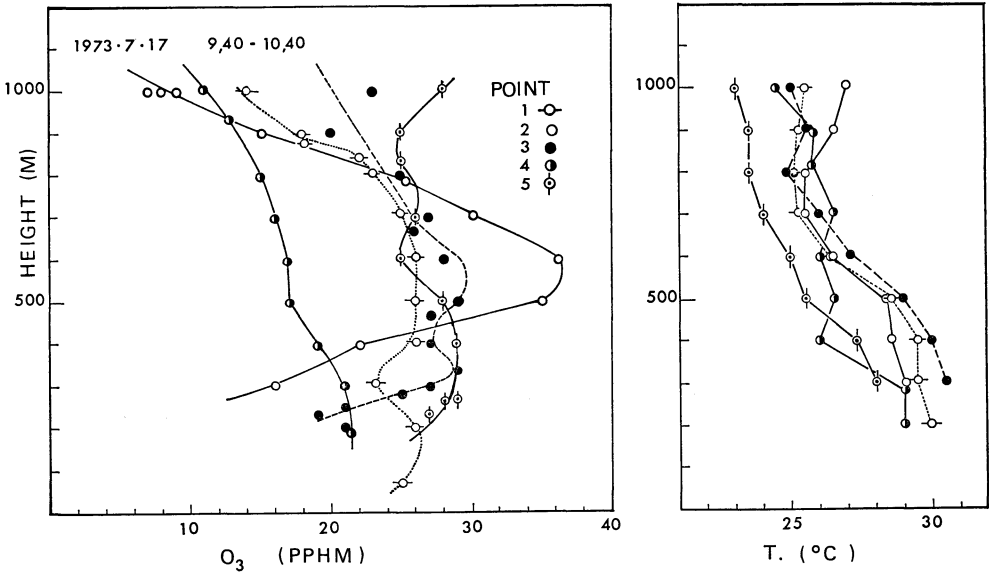
Hour (J.S.T)								
Altitude (m)	9	10	11	12	13	14	15	16
100	0.28	-2.34	-4.52	-4.41	-5.06	-2.57	-3.01	-3.51
200	-0.97	-2.45	-4.36	-4.55	-3.98	-3.27	-2.46	-1.00
300	-0.89	-1.09	-2.56	-3.19	-1.87	-1.61	-0.91	0.04
400	0.29	-0.58	-2.08	-3.00	3.67	1.46	0.54	1.66
500	0.59	0.50		-3.03	-0.15	0.12	-0.18	-0.18
600		-1.12		-2.07	1.28	0.68	-0.86	-3.93
700		-1.02		-0.37	-0.12	-1.76	-0.86	8.16
800				0.78	-0.20	0.40	-3.47	-10.09
900				2.15	0.16	-1.05	-0.43	-0.71
1000				2.48	-0.72	-2.25	-2.06	-1.15
1100						-1.53	0.28	-0.64
1200						-1.47	-0.22	-0.61
1300						-1.17	-0.68	-0.63
1400						-0.35	-1.88	-5.35
1500						1.29	-0.97	3.87
1600						0.37	0.43	0.02
1700						-0.55	0.43	-1.25
1800						-0.35	1.12	2.80
1900						-0.26	3.60	2.21
2000						-0.53	0.56	2.41

時間は11.1時間であり、いわゆる光化学スモッグが最も発生しやすい気象条件であった。事実、この日は、高濃度のオキシダントが観測され、11時30分から15時30分の間、横浜、川崎、相模原地区に、光化学注意報が発令された。海風は、東京湾と相模湾から吹き出し、午後には、相模湾海風が卓越していた。第2図にこの日の南関

東の地上の流線と、オキシダントの時間変化を示した。斜線部は10pphm以上のオキシダント濃度発生地域である。高濃度域が時刻とともに内陸部に移動している様子が、明瞭にあらわれている。上空の風の観測は4地点で行ったが、その結果を第3図に示す。これによれば、海風の高度は500~600mの所にあり、平均風速は、午前



第5図 オゾンと気温の立体分布。(1~5の地点はそれぞれ市沢, 鶴見, 高津, 横須賀, 座間上空であり, その位置は第1図に示した.)



第6図 オゾンと気温の立体分布。(地点の記号は第5図と同じである.)

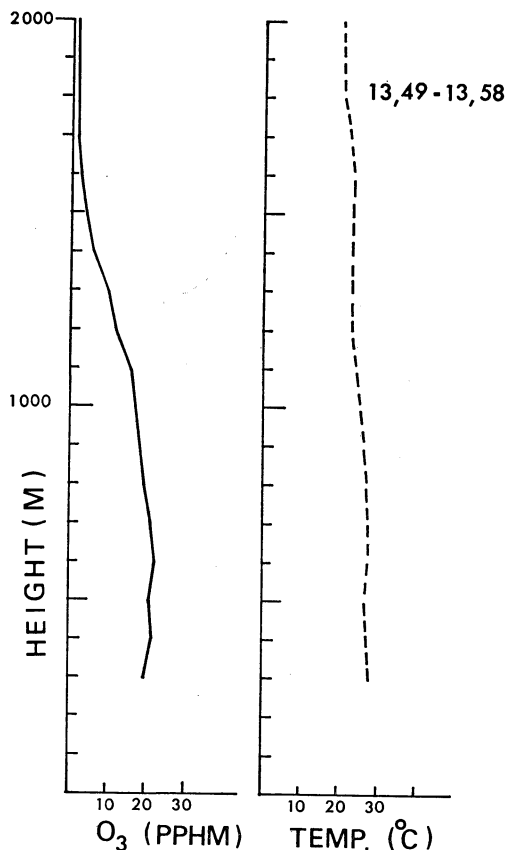
中は2~3 m/sec, 午後は3~5 m/secであった。海風の侵入の立体構造をより詳細に把握する目的で第1図のエリアAとBについてそれぞれ100mごとに, 水平発散量を求めそれから, 垂直流を計算し, その結果を第1, 2表および第4図に示した。なお水平発散量 Q と垂直流 W_z は以下の式で定義される。

$$Q = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}$$

(u, v はそれぞれ x, y 方向の風の水平成分.)

$$W_z = -\frac{1}{\rho_h} \int_0^h \rho_z \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) dz$$

(z と ρ_z は高度と, z での空気密度.)



第7図 1973年8月28日における座間市上空での高度2kmまでのオゾンと気温の鉛直分布。観測時刻は13時49分から13時58分である。

高濃度となっていた。鶴見では500mの高度で40pphmの極大値を記録した。これに対し、上層の気温の逆転層は午前中は全域にわたりほぼ600~800m付近にあり、午後は400~500mと700~800mの二層に逆転が観測された。

これらの観測結果を総合すると、高濃度域は海風の上限と対応しており、最高値が出現する高度は、風の収束域と一致していることがわかる。

海風域より上部でのオゾンの分布を知るためにいくつかの観測を行ったが、データを比較するために、7月17日と全く同様の気圧配置であった1973年8月28日の例を示す。この日は北太平洋高気圧下で、気温が高く、県下全域で高濃度のオキシダントが観測された。オゾンの鉛直分布は、海岸付近では400~500mに高濃度域があり、ヘリポートでは800~900mが高濃度域であった。この高濃度は海風の上限とほぼ一致していた。このような状況下での座間市上空2,000mまでの観測結果を第7図に示す。オゾン濃度は、海風域上部では、高度とともに急速に減少していることがわかる。このような傾向は、他の気圧配置の時も同様に観測された。

4. まとめ

オゾンの鉛直分布は風や気温の鉛直分布と密接に関連しており、一般には約500~700mの高度に最大値が出現する。この層は海風の上限より下であり、気温逆転層の底部にあたる。この高濃度域は、風の収束域と一致することが、発散量や、上昇流の解析から明らかとなった。このような分布を形成するメカニズムは、次のように説明される。すなわち、地面付近から放出された一次汚染物は、海風の影響下で、ゆっくり上昇し、滞留する。この滞留物が、海風の影響下で、少しずつ移動しながら光化学反応を起こし、高濃度のオゾンが生成される。一方、逆転層下部では、濃いスモッグが形成されているために日射は減少し、また、それに伴って光化学反応速度も減少する。このような条件に加えて、大気下層では一次汚染質が多いため、それらの物質がオゾンにより酸化されてオゾン濃度は減少する。そのために、500~700mにピークを持つ形となる。また、海風侵入高度よりも上空では、オゾン濃度は急速に減少しており、1500~2000mの高度でのバックグラウンド値は、約2~5ppbであった。

謝辞

50回にもわたるヘリコプターのフライトを快く、お引き受け下さった神奈川県警航空隊の皆様方に深く御礼申

Qの計算はペラミイの方法により行い、 ρ_z は日本標準大気を使用した。この結果から、400~700mの間に風の収束域が形成されていることが確認される。

一方、ヘリコプターによる観測は、2回実施し、それぞれ9時30分と、13時30分から約1.5時間にわたり、市沢ヘリポートから、座間市、川崎市高津区、横浜市鶴見区そして、横須賀市上空を経て、市沢ヘリポートに至るコースで1,000mまでのオゾンと気温の計測を行った。その結果を第5、6図に示す。オゾン濃度の鉛直分布は、午前の観測では、横須賀で急減、座間では等濃度、ヘリポートでは700mまでは等濃度で、それより上層では急減となっていたが、高津、および鶴見では、500~600m付近で最高値を記録しており、鶴見では36pphmの高濃度が観測された。午後の観測では各測定点とも厚さ約200mの高濃度域がみられ、500~700mで最

上げます。また、パイロットバルーンの四点観測は、川崎市、横浜市、横須賀市、および神奈川県との協力のもので行われたものであり、観測に参加された皆様に深く感謝の意を表します。最後に本研究を行うにあたり、御指導いただいた神奈川県公害センターの氷見部長、才木科長、調査に参加していただいた大気科の皆様から心から御礼申し上げます。

参考文献

- Edinger J.G., McCutchan M.H., Miller P.R., Ryan B.C., Schroeder M.J., Behar J.V., 1972: Penetration and Duration of Oxidant Air Pollution in the South Coast Air Basin of California. J. Air Poll. Control Assoc., 22, 882-886
- Edinger J.G. 1973: Vertical Distribution of Photochemical Smog in Los Angeles Basin. Environ. Sci. Technol. 7, 247-252
- Gloria H.R., Bradburn G., Reinisch R.F., Pitts

- J.N., Behar J.V., and Zafonte L., 1974: Airborne Survey of Major Air Basins in California. J. Air Poll. Control Assoc., 24, 645-652
- Lea D.A., 1968: Vertical Ozone Distribution in Lower Troposphere Near an Urban Pollution Complex. J. Appl. Meteor., 7, 252-267
- Miller P.R., McCutchan M.H., and Milligan H.P., 1972: Oxidant Air Pollution in the Central Valley, Sierra Nevada Foothills, Mineral King Valley of California. Atmospheric Env. 6, 623-633
- Miller A. and Ahrens D., 1970: Ozone within and below the west coast temperature inversion. Tellus XXII 328-339
- Wakamatsu S., Saiki Y., Himi Y. and Kanno S., 1974: Vertical Distribution of Air Pollutants in Kanagawa Prefecture. Annual Report of Kanagawa Prefectural Environmental Center. Vol. 5, 43-55.
- 渡辺次雄, 1958: 近代気象調査法, 技報堂



吉野正敏編著・陳 国彦訳

中国の雨と気候

大明堂発行 A5版 216頁 2,700円

中国の気象学者のすぐれた研究の一端は、これまでも他国の雑誌に掲載された論文や *academica Sinica* の英文の論文集などによって、知られていたし、かつて日本気象学会外国交流委員会によって、直接紹介されたこともある。しかし近年とくに中国の学術雑誌の入手が困難であった上に、中国語の知識のある研究者がわが国に少ないことも重なって、隣国でありながら、中国の気象学の研究がわが国には、余り知られていないし、したがって論文に引用されることも珍しいというのが実状である。しかも、中国の印刷気象資料も入手に困難の多い現状では、中国の気象関係の研究成果の紹介は切実な問題ともいえるであろう。

本書は陳国彦氏（シンガポール大学助教授）という日

本語に堪能な気候学者が、吉野教授と協力して、1965年ころまでの中国の重要な気候関係の論文15編を翻訳したものと、中国の気候の研究のレビューとから成っている。

後者は、本書の第1部として吉野教授の執筆で、本書に訳出されなかった多くの論文の紹介をかねてまとめられている。前者は、本書の主要部を占めていて、大気大循環と気候（3）、水蒸気輸送（3）、梅雨（3）、気候変化（4）、気候区分（2）（括弧内は収録されている論文数）に分れている。たとえば大気大循環の論文は、徐淑英・許孟英：大気の活動中心と夏季の江淮流域における持続性の湿潤と乾燥、章名立：盛夏の中国東部における熱収支の一計算例、郭其蘊：中国において夏の季節風が卓越する時期の物理量輸送の分析が載っている。また梅雨の章には、高由禧・徐淑英：東アジアの季節風の進退および雨季の始まりと終わりという論文が入っているのを見てもわかるように、季節風の問題を扱う上にも有益な論文が含まれている。紙面の関係で内容を詳しく挙げることは、できないが、学問的にも資料的にも貴重な論文が掲載されている。

（河村 武）