

オキシダント濃度と六甲山風速の相互に 関係する短期変動について*

小 路 正 弘**

要 旨

六甲山上の風速と神戸市のオキシダント濃度やオゾン濃度とは、周期 60~180 分くらいの範囲の同一周期の卓越波を含むことがある。特に須磨では両卓越波の位相角度差が 180° 近くになることが多い。この相互に
関係する短期変動の諸性質を、スペクトル解析を用いて現象的に明らかにした。

1. 序 論

一般にオキシダント濃度は 13~14 時ごろに最高となり、それ以後減少してゆく。ところが神戸市では時々であるが日中のピークが過ぎた後、夕方近くに再び高濃度のピークを生じることがある。1972年のデータを用いてこの現象を検討した結果、オキシダント濃度の夕方のピークは六甲山風速の挙動と関係のあることが分かった(小路・尾崎, 1973)。すなわち、六甲山風速は日中弱まり昼すぎから強まってゆく日変化をするが、夕方にオキシダント濃度のピークを生ずる日には、午後いったん強まる傾向を見せながらも途中で逆に弱まりだし、その最低を記録したところに地上のオキシダント濃度が極大になっているのである。この時の夕方のオキシダント濃度のピークは 1 回だけであったが、その後 1973年 7月 26日にこのピークが何回も生じ、それぞれのオキシダント濃度の極大時に六甲山風速の極小が対応している事例が出現した(小路・尾崎, 1974)。この日については後に事例解析をしているが、オゾン濃度やオキシダント濃度と六甲山風速との逆相関々係は見事であり、これによって夕方に現われる大きな単一ピークよりもむしろ、日中から夕方にかけてオキシダント濃度と六甲山風速の両者に含まれる周期 60~180 分の短期変動に注目するようになった。第 2 図は短期変動の逆相関が顕著に現われた例である。

六甲山監視局は標高 900m の地点にあるが、垂直方向にこれだけ離れ、かつ水平方向にも 17km も離れた地点間にこんな関係が出てくるのは驚く他はない。

そこで、1972~1974年の 3年間の 6~9月の 10分間平均値を用いてこの現象の解析を行った。まずオキシダント濃度と六甲山監視局の風速をスペクトル解析し、両者に含まれる同一周期の卓越波を検出する。そして、両卓越波の位相角度差や周期、出現時刻等特徴的なことを述べる。次に、短期変動の二次元的な拡がりについて調査し、さらに 7月 26日の事例解析も行って短期変動の種々の性質を現象的に明らかにした。

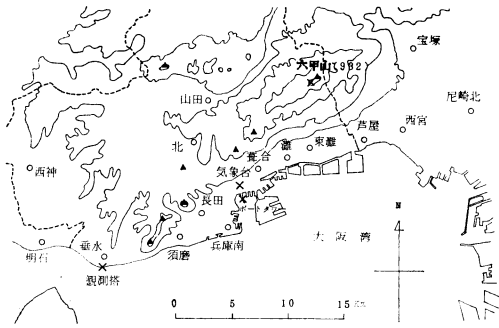
なお、オキシダント濃度は 10% の中性ヨウ化カリウム液を用いた比色法で、オゾン濃度はエチレンを用いたケミルミネッセンス法で測定した。また、スペクトル解析は鈴木(1968)の方法によった。

2. オキシダント濃度と六甲山風速の短期変動

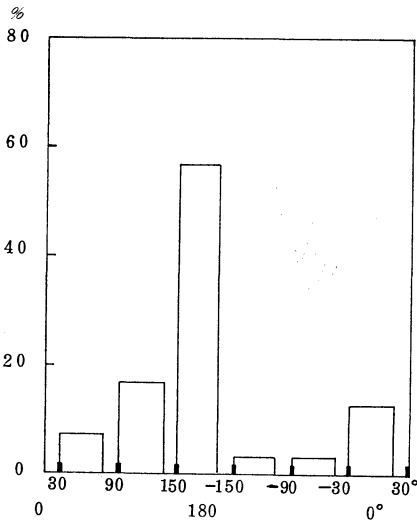
オキシダント濃度と六甲山風速のアナログ記録紙を並べて注意深く観察し、相互に関連のありそうな短期変動を含む時間帯を見つけ出す。つぎに、その時間帯について 10分間平均値を読み取りスペクトル解析を行うのであるが、オキシダント濃度の短期変動の振幅は日変化よりもずっと小さいことが多く、そのままではうまく解析できない。そこで、不要な低周波成分を除くため移動平均偏差を求め、偏差図によって解析すべき時間帯を再確認した上で移動平均偏差をスペクトル解析する。その結果からオキシダント濃度と六甲山風速との間に同一周期の、しかもほぼ単一の卓越波が存在しているかどうかを調べる。この際、移動平均の操作によって卓越波の波形がひずむのを避けるため、移動平均の項数が結果的に卓

* On the Correlative Short-Period Variation of Oxidants Concentration and Wind Speed at Mt. Rokko

** M. Koji, 神戸市公署監視センター
—1975年 12月 11日 受領—
—1976年 5月 31日 受理—



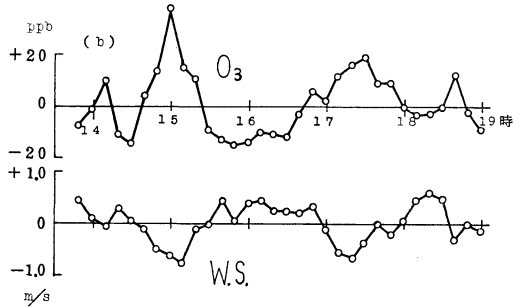
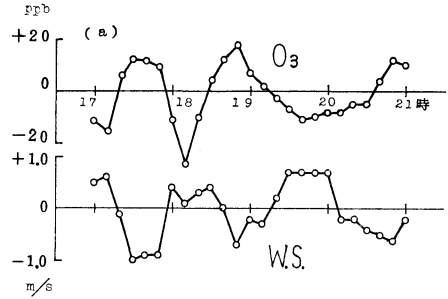
第1図 測定点配置図



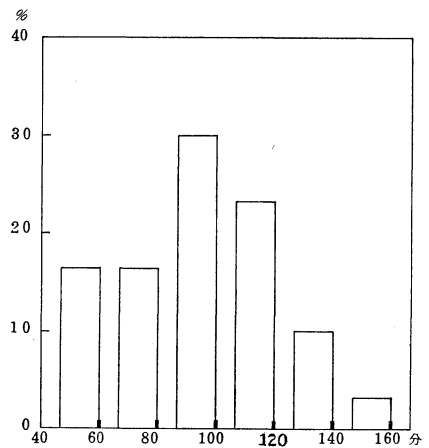
第3図 六甲山風速を基準とした時の須磨のオゾン(オキシダント)濃度と六甲山風速との位相角度差分布。

卓越波の周期の整数倍になるよう項数を何度か変えて、試行錯誤的にスペクトルの計算を繰り返した。ただ、この場合の卓越波は、瞬間値ではなく10分間平均値をデータとして採用することにより高周波成分を除き、さらに、移動平均によって低周波成分をも除いた、比較的せまい周波数範囲内での卓越波を意味する。一方、データのサンプリング間隔が10分なので周期60分未満の波は対象とせず、また、オゾン測定器のある須磨ではオキシダント濃度の代りにできるだけオゾン濃度を用いた。

神戸市の全監視局について前記の計算をした結果、六甲山風速と同一周期の卓越波が須磨のオキシダント濃度に最も多く出現していることが分かった。そこで、以下にはこの須磨を中心として解析結果を述べる。須磨では



第2図 須磨のオゾン濃度と六甲山風速の逆相関々係。(a) 1973. 7. 12. 90分移動平均偏差 (b) 1973. 7. 26. 130分移動平均偏差



第4図 卓越波の周期分布。

オキシダントないしオゾン濃度と六甲山風速との間に同一周期の卓越波が2周期以上にわたり存在する例が3年間に30例、日数にして24日検出できた。この内オゾン濃度のデータを用いたものは13例である。1周期しか出現しなかったものを採用しなかったのは、位相角度を計算

第1表 神戸市内の多くの地点のオキシダント濃度に卓越波が出現した時の、須磨における卓越波の出現時刻、周期、六甲山風速との位相角度差等の一覧表。

年	月/日	時刻(時)	周期(分)	波数	位相角度差(度)	六甲山平均風速(m/s)	六甲山主風向
1972	9/21	12~16	120	2	-13	1.5	SSW
1973	6/30	9~13	80	3	149	2.0	NW
"	7/4	10~14	120	2	-160	1.6	NE
"	7/11	10~14	120	2	170	4.5	NW
"	7/12	17~21	80	3	-152	1.5	N
"	7/26	14~18.5	140	2	177	1.9	NNW
"	7/27	13~19	120	3	177	4.2	ESE
"	8/7	12~15	90	2	-152	2.0	NW,E
"	8/7	16~20	120	2	157	4.8	NNW
"	8/9	8~13	150	2	-167	1.9	NNW
"	8/12	10~14	80	3	170	1.5	NE
"	8/20	13~16	90	2	153	3.0	NNW
1974	6/9	12~14.5	80	2	-150	1.2	-
"	6/9	15~18	90	2	57	1.5	-
"	8/7	16.5~21	140	2	18	7.1	NW,N
"	8/10	10.5~12.5	60	2	159	3.3	ESE
"	8/10	16~19.5	100	2	139	6.2	ESE
"	8/22	11.5~15.5	120	2	144	1.1	SSE
"	8/22	15~19	120	2	-24	1.8	S, SW

第2表 兵庫県東部地域での卓越波の検出数と平均振幅。

測定点		検出数	振幅の算術平均値
明石	西垂須長兵庫南部北(山田)葺合灘	5回(3)	5ppb(5)
石神水磨田		10	11
須磨		19	10
田		13	7
兵庫南部		14	7
北(山田)		8	5
葺合灘		10	6
		13	7
東灘		14	6
芦屋		1	7
西宮		2	4
尼崎北		7	10
宝塚		7	8

注) 西神は1974年から測定

なく神戸市内の多くの監視局のオキシダント濃度に問題となっている卓越波が出現した19例をまとめたものである。

3. 現象の特徴

須磨の解析結果を用いて問題にしている短期変動の周期、出現時期、およびその時の風向風速等について今少しくわしく述べる。

(1) 周期

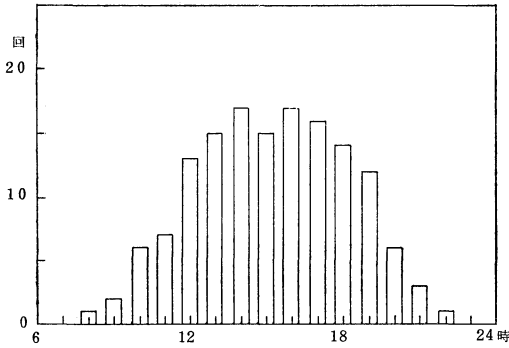
周期の出現分布は第4図のごとくで90~120分が多いが、特定の周期が卓越する傾向はない。一方、この周期の値がずっと一定値を保ち続けることはまれで、時間的に少しずつ変化してゆくことが多い。特に同じ日の昼間とそれに続く夕方から夜にかけての周期が全く違う例もいくつかある。これを反映して周期の持続回数の分布はほぼ指数分布となっており、2周期では60%の出現率を持つが4周期以上持続した例は17%しかない。ここで周期ではなく持続時間に目を移すと、4時間が最も多いがやはり長時間持続する例は少なく、特に8時間以上続いた例は一度もなかった。

(2) 出現時期

現象の出現回数は1972~4年につきそれぞれ9, 13, 8回で、毎年10回くらい大体均等に出現している。月別では7~8月が多くこの2カ月で18日(75%)に達し、特に夏期に集中していると言えよう。つぎに、時刻別に見ると第5図のごとく12~19時の間で多くの出現を見て

する場合の誤差が大きくなることと、偶発的な現象をできるだけ避けるよう配慮したためである。この時、六甲山風速を基準として須磨のオキシダント濃度と六甲山風速との位相角度差を計算すると、第3図のとおり180°付近が圧倒的に多く、逆相関係が明確に出る。ここで、オキシダント濃度とオゾン濃度と両データがある場合について両者を比較すると、オキシダント濃度よりもオゾン濃度の方が相関係がより明確に出る傾向にある。また、逆相関がはっきり現れるのは須磨だけで、位相角度差は後述のように地域差がある。位相そのものは時間的に一定していることが多いが、時に不連続的に大きく変化することもあり、例えば1975年8月22日には同じ日でありながら11~15時と15~19時とでは位相が互に180°ほど違っている。

なお、この30例中6割は光化学スモッグ注意報等の広報発令日で、さらに24日中15日は須磨のオキシダント濃度が10pphm以上であったが、残り9日は6~9pphmとそう高濃度ではなかった。また第1表は、須磨だけで



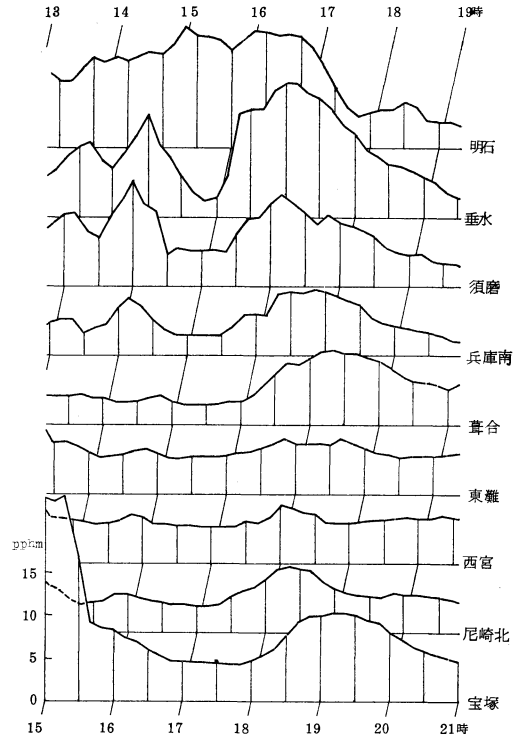
第5図 卓越波の出現時刻分布.

いる。すなわち、光化学オキシダントがどんどん生産されているであろう午前中は余り出現せず、たくさんのオキシダントが生産されてしまったであろう午後によく出現しているのは注目すべき事実であろう。つまり、この現象は光化学オキシダントの生成過程よりも、生成後の拡散、移流に関係して生じていると推定できる。

(3) 風向風速

風速変動と関係があるのなら、同時に風向変動にも何らかの関係があるのではないだろうか。この視点に立って六甲山風向についても風速と同じく移動平均偏差をスペクトル解析した。その結果、六甲山の風向変動にオキシダント濃度や六甲山風速と同一周期の卓越波があるものは意外に少なく、30例中10例しかなかった。残りの内の7例は周期が異なり、11例は変動がほとんどなく風向一定、2例は欠測であった。この10例の卓越波の平均振幅は 35° で、風速を基準とした時の風速との位相角度差は $150^\circ \pm 60^\circ$ の間に大部分があり逆位相に近い。これは、風向は時計まわりを正にとっているのだから、風速が強まった時風向が平均方位から反時計まわりに 35° ほど振れることを意味する。次に、六甲山風向の短期変動ではなく風向そのものについて調査すると、N~NW, ESE~SSEの出現度数が高く両者で7割を占めている。だが、この傾向はオキシダント高濃度日の風配と大差なく、これと言った特色は見当たらない。一方、六甲山風速は概して弱く全体の7割は 3 m/s 以下である。しかし、 1 m/s 未満の極めて弱い風速域の出現は全くない。また、風速変動の振幅は 1 m/s あたりが最も多い。

さて、この六甲山風向風速と地上の風向風速、さらには地上の風向風速とオキシダント濃度がどう対応しているか興味深い。今までと同じ手法による解析の結果、長田で22例、ポートタワー（高さ 100 m ）で17例、風速に



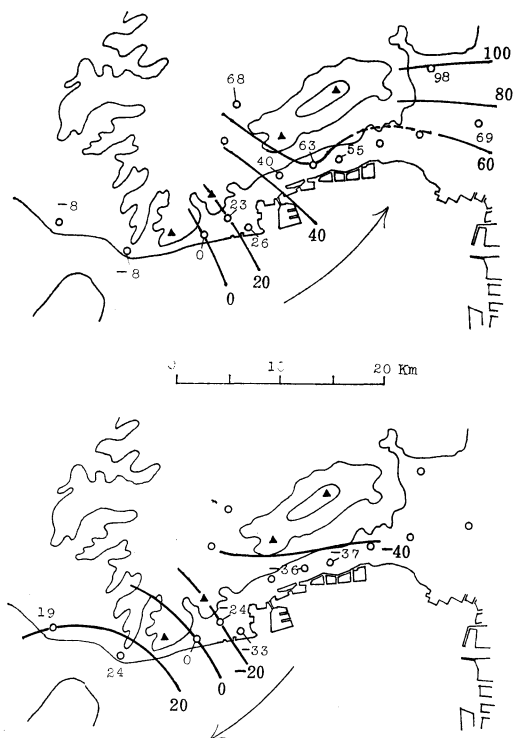
第6図 オキシダント濃度の波動伝播 (1973. 7. 26).

六甲山風速と同一周期の卓越波が検出できた。しかし、地上風向風速を日記々録していた監視局はこの2局だけであり、また、監視センターに伝送されてくる10分毎の値も記録していなかったため、地上風の変動の地域的な位相分布は求められない。一方、オキシダント濃度の位相は地域的に変化してゆく。したがって、現段階では地上風と他要因との関係についてくわしく解析できず、これは今後の研究課題としたい。

4. 短期変動の伝播

前節までは現象の顕著な須磨という一地点の解析結果を主として述べてきたが、ここでは短期変動の平面的な拡がり等について明らかにしたい。

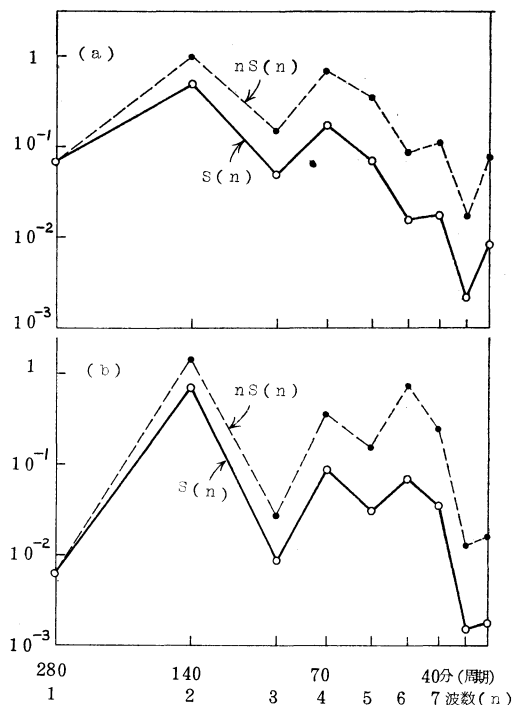
六甲山風速と地上のオキシダント濃度に含まれる同一周期の卓越波は相当広範囲の地点に出現することがあり、またこの時、卓越波の位相は多くの場合距離とともに少しずつ変化してゆく。第6図はその一例で次節で事例解析をしている日であるが、西は明石から東は尼崎、宝塚まで神戸市の市域を越えた広い範囲に変動が伝播しているのが分かる。しかし、明石市の西の播磨町や宝塚市の東の川西市ではこの種の変動はなかった。そこで、



第7図 須磨を基準とした時の平均伝播時間分布。図中の数字は時間(分)。

神戸市内の多くの監視局で問題にしている卓越波が検出できた19例について、明石以東の兵庫県域まで対象地点を拡げてオキシダント濃度の変動を調査し、卓越波の存在やその位相等を調べた。

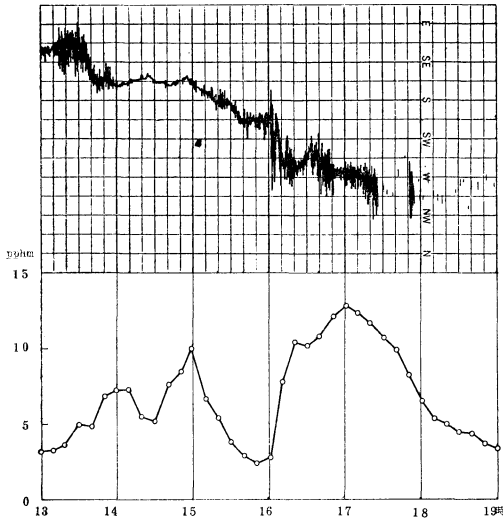
その結果、まず卓越波は第2表のごとく神戸市域外でも5~7例検出できた。ここで目立つことは、芦屋、西宮での出現度数が少ないことと、そこからさらに東方の尼崎や宝塚で出現度数が増し、かつ波の振幅も大きくなることである。次に位相を見ると大別して3つの傾向に分かれ、19例中8例が東ほど位相が遅れ、7例がおおむね同相、残り4例が東ほど位相が進んでいた。そこで、同相以外の例について周期と位相角度とから平均伝播時間を計算し、須磨を基準とした時の時間差分布を地図上に示した(第7図)。同相や東ほど位相が進む場合はその出現がほとんど東西20kmの明石~神戸市域に限られているが、東ほど位相が遅れる場合は明石から宝塚まで東西40kmにわたり分布する。測定点の分布が東西に偏っているため南北の分布が正確ではないが、六甲山脈を越えた裏六甲の北や山田でも上記3つのいずれの場合に



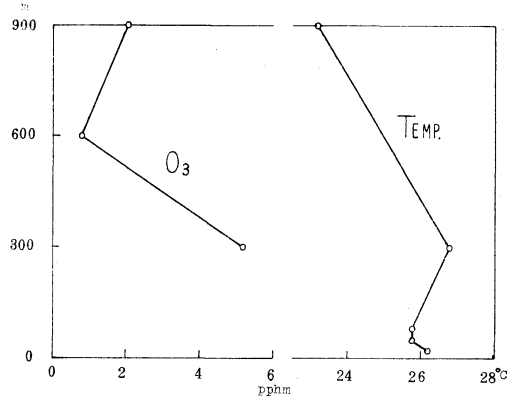
第8図 1973.7.26. 14~18.5時のパワースペクトル $S(n)$ 。(a) 須磨オゾン濃度 (b) 六甲山風速

も問題の波がしばしば現われている。ここで第7図を単に須磨を基準とした位相角度差分布に直しても分布図はほとんど変化しない。ただこの時、波が西から東へ伝播する場合に宝塚の位相角度差が、多少ばらついてはいるものの平均 320° と 360° に近づく。換言すれば、六甲山風速と宝塚のオキシダント濃度との位相角度差が須磨と同様 180° 近くになるということであるが、同時刻の両者の短期変動の対応性は須磨より悪い。もっともこの点については解析が神戸市を中心としたものになっているので、宝塚を中心に解析し直さないと正確なことは言えない。なお、簡単のために同相という言葉を用いたが、同相と言っても現実には ± 30 分程度の乱れがあり、波の伝播方向に統一性がない例とした方が適当かも知れない。

さて、第7図でコンターがなめらかに連続している神戸市西部市街地で平均位相速度を求めると、西から東への速度は 14km/h (4 m/s)、東から西へのそれは 11km/h (3 m/s) くらいになるが、この値は風速に近い。したがって、伝播は風による移流の可能性が出て来る。実際、神戸市の沿岸部では日中ほとんど西よりの風になる



第9図 観測塔31.5mの高さにおける風向変動と垂水監視局のオキシダント濃度の変化 (1973. 7. 26.)



第10図 垂水上空のオゾン濃度と気温の垂直分布。80mまでの気温は観測塔による値。(1973. 7. 26.)

が、西から東への伝播が多いのはこれを反映しているのかも知れない。しかし注意して見ると、伝播方向と地上風向が正反対の事例が少しだけ見つかるのである。そこで、今度は第6図に解析した日(7月26日)の兵庫県下大部分の測定点の風のデータにより、収束線の移動と波の伝播方向との対応を調べた。それにより、19時ごろ内陸に陸風が生じて宝塚の南付近で海風と衝突し、東西にわたる収束線が出現しており、この収束線は時刻とともに南下して21時には海岸に達していることが判明した。ところが、宝塚におけるオキシダント濃度のピークは19時すぎ、尼崎のそれは18時半ごろと南方の尼崎の方が30分以上早く、オキシダント濃度の波は収束線と反対方向に移動している。さらに、波の振巾の地域分布は伝播方向にかかわらず、須磨~垂水付近で最大となる性質がある。オキシダントの移流についてはいくつか報告があるが(たとえば U.S. Dept. of Health Education and Welfare, 1970; 池田他, 1974), ここでの伝播はそれらとはかなり違った面がある。特に単一の山でなく波動が伝播してゆくこと、風向や収束線との対応がつかない事例があること等は顕著な差異であろう。以上の結果は伝播の原因が地上風だけでなく、何か別の原因があることを示唆しているように思える。なお、六甲山風向と伝播方向については特徴ある関係は見出せなかった。

5. 1973年7月26日の事例解析

この日はオキシダント濃度の短期変動が著しく、たまたまヘリコプターで上空の観測も行った日でもあるので特に事例解析を試みた。この中で、この現象の原因の1つに大気の乱れが考えられることも述べたい。

当日14~19時の間に何度か須磨のオゾン濃度がピークになっているが、ほぼ同時刻に六甲山風速が谷になっている(第2図)。この時間帯の130分移動平均偏差のスペクトル解析結果を第8図に示す。明らかにオゾン濃度、六甲山風速ともに周期140分に最大の卓越波があり、また周期70分にも卓越波がある(この日は移動平均偏差でなく、元のデータを直接スペクトル解析しても同じ結果を得る)。六甲山風速を基準とした時のオゾン濃度の位相角度差は周期140分の波が177°、周期70分の波が-177°といずれも逆位相がはっきり出るが、この結果は第2図から見て当然であろう。なお、六甲山風向については15時ごろにEからNへ急変している他に大きな特徴はない。

さて、六甲山の風以外の気象要素について調査してみる。まず、神戸海洋気象台の全天日射量、須磨の紫外線量とも午後はゆっくり単調減少していて大きい変動は全くなく、また、気象台の気温や気圧にも周期140分や70分の卓越波はない。地上風速については垂水の海岸にある観測塔(高さ80m)で卓越波が検出できた。垂水監視局とこの塔とは1kmしか離れていないので両者の値を比較してみる。観測塔では12.4, 31.5, 50, 80mの各高度で風速を測定しているが、いずれの高度にも周期140分の卓越波があり、一部には周期70分の波もある。140

分の波は位相から推して5分余りかかって80mの高さから地上に降りて来ており、また、観測塔最下部の風速と垂水のオキシダント濃度との位相角度差は風速を基準として -67° で、どちらかと言うと同相に近い。

ここで、単に風速の大きさでなく風の乱れに注目すると大変興味ある事実に気付く。すなわち、垂水では16時0~20分にかけてオキシダント濃度が8pphmも急上昇しているが、この直前に観測塔で強い風向の乱れを記録している(第9図)。それまで海から3~6m/sの風が吹き風向も非常に安定していたが、15時50分にまず80mの高さに、ついで16時ちょうどには31.5mの高さに著しい風向の変動が訪れ、この直後に地上のオキシダント濃度が急騰しているのである。また、同時に観測塔の20~80m間の気温差も一時的に0になっており、大気が上下に激しく攪拌されたと考えられる。すると、もしも上空に高濃度のオゾン層があった場合、それが大気の乱れによって地上に引き降ろされオキシダントの急上昇を招いたとも推定できる。この日はヘリコプターによる上空調査を行っており、15時半ごろちょうど垂水上空でオゾン濃度や気温の垂直分布を測定している。その結果は第10図であるが、高度300~900m間のオゾン濃度は高くても5pphm程度で高濃度ではない。しかし、300m以下には逆転層が観測されており、この辺りに高濃度のオゾンが存在していた可能性は十分にある。今のところ、この大気の乱れと六甲山風速の変動とがどう関係するか不明であるが、この辺りにこの現象を解明する鍵の1つがあるように思える。

一方、14時のオキシダント濃度のピークについてはその30分ほど前に少し大きい風向変動を記録しているが、15時のピークについては見られない。他の日についても調査したが、こんな激しいオキシダント濃度の上昇はなく、また風向の乱れとオキシダントの濃度の上昇、下降とがうまく対応している例は見つからなかった。

6. 結論

地上のオキシダントやオゾン濃度と、六甲山風速との両者に90~120分くらいの同一周期の卓越波が、スペクトル解析によって検出できた。特に須磨では両卓越波の間の位相角度差はほとんど 180° になる。この卓越波は概して不安定で4周期以上持続する例は少なく、また、周期そのものも時間的にふらつくことが多い。さらに、この現象は午前よりも午後を中心に、すなわち光化学オキシダントが十分生産されてしまったころ以後に多く出現している。これからこの現象は、光化学オキシダントの

生成過程よりもむしろ、生成後の拡散、移流過程に関係していると推定できる。一方、六甲山風速との位相角度差が 180° 近くになるのは須磨だけで、この値は須磨から離れるにしたがい変化してゆく。この仕方は、東の方へ位相が進む場合と遅れる場合、さらにおおむね同相の場合と3種に大別できる。位相速度は平均3~4m/sで風速に近いが、伝播方向については地上風向と逆の場合がある。さらに、オキシダント濃度のピークが地上の収束線の移動方向と正反対に進んだ事例もあり、いわゆるオキシダントの移流現象とは違った性格を持つ。また、この波は神戸市域外まで伝播してゆくことがある。この時、芦屋、西宮付近で波が跡切れることが多いが、尼崎、宝塚付近に再び現われ振幅も大きくなる。

ところで、垂水では風向が一時的に激しく乱れた直後にオキシダント濃度が急上昇し、六甲山風速もそれに対応して変動している事例がある。これはいささか特異な例であったかも知れないが、六甲山風速と地上のオキシダント濃度の互に呼応する短期変動が、大気の垂直方向の乱れに起因することを示唆しているのではないだろうか。光化学大気汚染時には、上空のオゾン濃度の方が地上よりも高いことが多いようである。もしこの時に何らかの原因で大気が上下に攪拌されれば、上空の高濃度のオゾンが降りて来て地上のオゾンやオキシダント濃度は上昇するであろう。逆に、地上付近のオゾン濃度の方が高かったならば、その時は地上の濃度は下がるであろう。すなわち、互に逆位相の現象が起こる可能性がある訳だが、ここで第3図を振り返って見ると、 180° の他に 0° 付近にも小さいながらピークがあり大変興味深い。つまり、相呼応する短期変動の原因の1つは、垂直方向に不均一なオゾン濃度の分布が大気の乱れが作用することにあるように思える。

最後に解析手法の問題点であるが、短期変動の持続周期回数が少ないためにスペクトル解析における周波数分解能は良くない。また、周期そのものが時間的に不安定なことはスペクトル解析の適用をより困難にしている。一方、今回は単一の卓越波が2周期以上にわたり存在する例だけを対象としたが、実際には7月26日の事例のごとく2つ以上の異なった周期の卓越波を含むこともあり、さらに1周期だけの場合も多くあろう。このように分析にいくつかの問題点もあるが、現象の大きな特徴は明らかにできたと思う。しかし、六甲山風速と地上の風やその乱れとの関係についてはデータ不足のためにほとんど解析できず、現象の立体的な把握はできなかった。

この現象が解明できれば光化学オキシダント濃度の時系列予測に大きな力を与えるであろうし、また、光化学大気汚染の発生機構に関する研究にも役立つであろう。今後地上風の10分間値を累積するとともに、パイロットバルーンによる風の立体観測等も行つて現象の究明に努めたい。

謝 辞

本調査研究に際し貴重なご意見をいただいた神戸市開発局の吉沢博主幹、公害対策部の尾崎耕作大気管理課長、鍋山郁夫公害監視センター主幹、ならびにご協力いただいた公害監視センターの諸氏に深く感謝いたします。また、観測塔の資料をお世話いただきました本州四国連絡橋公団第1建設局の溝畑進氏、およびデータの提供を受けました兵庫県大気監視センター、神戸海洋気象

台その他の関係機関に厚くお礼申し上げます。

文 献

- 池田有光, 中島暢太郎, 梅木雅幸, 1974: 流動する汚染気塊への光化学反応式の適用, 天気, 21, 517-525.
- 小路正弘, 尾崎耕作, 1973: オキシダントと六甲山上の風との関係, 大気汚染研究, 8, 573.
- 小路正弘, 尾崎耕作, 1974: オゾン濃度と風速の短期変動, 大気汚染研究, 9, 577.
- 小路正弘, 鍋山郁夫, 1975: オゾン濃度と風速の短期変動(II), 大気汚染研究, 10, 612.
- 鈴木栄一, 1968: 気象統計学, 地人書館, 161.
- U. S. Dept. of Health Education and Welfare, 1970: Air Quality Criteria for Photochemical Smog, 3・15~16.