

佐久盆地の局地風と大気汚染

田中 正昭・枝川 尚資

LOCAL WIND AND AIR POLLUTION IN THE SAKU BASIN

By *Masaaki* TANAKA, *Hisashi* EDAGAWA

Synopsis

High concentrations of photo-chemical oxidants are frequently observed in summer in the Saku Basin, in Nagano prefecture, where there is no large-scale source of air pollutions. Air pollutions in the Saku Basin are caused by long-range transport of air pollutants from coastal areas with easterly wind of regional scale. The purpose of this paper is to clarify the local wind system such as mountain and valley wind, and estimate the exchange of pollutants between the atmospheric boundary layer and the free atmospheric layer in the Saku Basin.

Field observations of the vertical distributions of wind, temperature, ozone concentration and so on were carried out at Komoro, Saku, Asashina in the Saku Basin from 23 to 25 in July 1985.

Amounts of ozone fluxes and horizontal divergence of air over the Saku Basin were calculated. Preliminary estimates indicated that the half amount of ozone transported from coastal areas were lifted into the above free atmospheric layer over the Saku Basin and the remainder were transported to the westerly inland area.

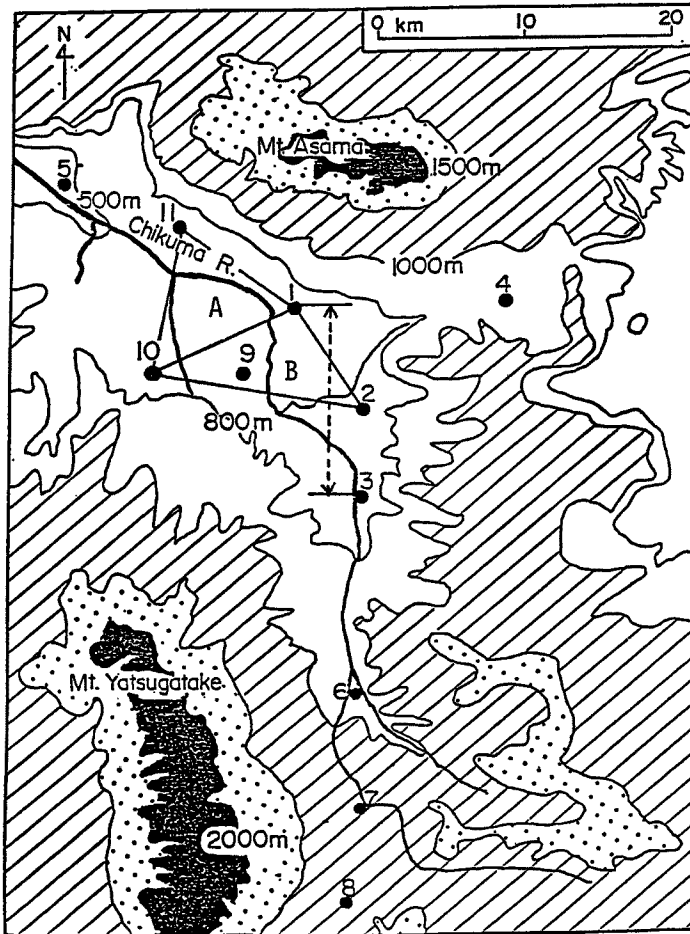
1. は し が き

盆地・谷などの地形が、周辺の局地気象にどのような影響を及ぼすかという観点から、われわれは、1983・84年の夏季に長野県佐久盆地において、風・気温その他の気象要素の観測を実施し、得られた資料に基づいて、夜間の冷え込み・安定層の発達・山風の形成・一般風の影響などについて詳しい検討を行なった¹⁾。これまでの結果をまとめると、佐久盆地の局地風は大きくみて、1つは盆地中央部から南部では千曲川に沿って南北方向に、北部では浅間山に沿って東西方向に発達する「盆地スケール」の山谷風と、いま1つは「地域スケール」の東風、すなわち、関東地方から信州地方へのび、関東平野では南寄り、関東山地と佐久盆地では東寄りとなる広域的な局地風によって構成されることがわかった²⁾。一方、「ナイト・スモッグ」とよばれ、長野・上田でしばしば観測される夜間のオゾンの高濃度は、地域スケールの東風によって、発生源である関東地方から長距離輸送されたものであることが確認された³⁾。

われわれは、佐久盆地において、これまでと同様な観測を1985年にも行なった。本稿では、1985年の観測で得られた資料を1983、1984年のものに加えて、佐久盆地における山谷風・東風の性質を再吟味し、さらに、佐久盆地に発達する局地風と大気汚染との係りという観点から、地域スケールの東風により、発生源である関東平野から関東山地を越え、佐久盆地へ輸送されてくるオゾン量とその行方について検討した。

2. 観測地点周辺の地形と観測項目

佐久盆地は、Fig. 1 に示すように、千曲川に沿う海拔 600~700m の底部 (13km×13km) をもち、北と南西は海拔 2,000m を越す浅間山と八ヶ岳に、南と東は海拔 1,000~1,800m の野辺山高原と関東山地に囲ま



Numerals indicate 1. Komoro, 2. Saku, 3. Usuda, 4. Karuizawa, 5. Ueda, 6. Koumi, 7. Minami-maki, 8. Nobeyama, 9. Asashina, 10. Tateshina, 11. Tobumachi. (see table 1)

Dotted line indicates measuring line where ozone flux was calculated. Domain A (1-11-10) and domain B (1-10-2) indicate area where divergence was calculated.

Fig. 1 Map of Saku Basin.

測期間のなかで一般風が最も強かった1983年7月29日と、午後に関東地方から信州地方にかけて広範囲に雷雨があった1984年8月2日をのぞいて、東風は4回出現しており、いずれも佐久盆地に80 ppbを越すオゾンの高濃度をもたらしていることがわかる。一方、夜半から早朝にかけて霧が発生した1983年7月28日と1984年8月2日の小諸での山風をのぞいて、盆地全域に山谷風が発達した。以下では、山谷風と東風の性質について述べる。

3.1 盆地スケールの山谷風

Fig. 2 に小諸・佐久・浅科における、1985年7月23~25日の風の鉛直時間断面図を示す。図中の実線は等風速線、二重線は昼間の谷風層または夜間の山風層の及ぶ高度を示している。谷風は昼過ぎに最も発達して、約500mの高度に達する。風向は小諸では西寄り、佐久・浅科では北寄りが卓越する。しかし、3地点とも午後14時以後、谷風は東風に交代する。夕方になると、東風層の下に山風が発達する。その発達高度は、小

れている。

測器を設置して直接に風・気温その他を観測した地点を Fig. 1 に、観測項目・期間などは Table 1 にまとめて示す。1985年には、小諸(1)・佐久(2)・浅科(9)で7月23~25日の2昼夜、一般地上観測とパイバルによる地上約3km高度までの1時間の風の鉛直分布観測を、佐久では同じ期間、低層ゾンデによって6時間毎に、係留ゾンデにより、2時間毎に、地上約2km高度までの気圧・気温・水蒸気圧の鉛直分布観測を行なった。

観測結果の解析には、上記の観測で得た資料に加えて、「内陸域における大気汚染の動態」観測班⁴⁾の他のグループによって行なわれた、1985年の東部町・立科における風の鉛直分布観測、1983・84年の飛行機によるオゾン観測、1985年の佐久におけるオゾンの地上観測などの資料も使用した。

3. 観測結果

1983年から1985年にいたる3年間延べ6昼夜の観測期間中に得られた、観測地域の気象条件と局地風・オゾン濃度の概要をまとめると Table 2 のようになる。地域スケールの東風に注目すると、観

Table 1 Observation site, measuring factor, instrument, period

Site	Altitude	Measuring Factor	Instrument	Location	Period
Komoro Higashi Junior high School (1) in Fig. 1	718m	Temperature Humidity	Long Range Thermo-Hygrograph (Nakaasa)	Field 1.5m (Shelter)	1984. 7. 1-8. 24
		Wind Profile	Pilot Baloon	up to 3km	{1983. 7. 28-7. 29 1984. 8. 1-8. 3 1985. 7. 23-7. 25
Nagano Livestock Breeding Station (2) in Fig. 1	701m	Wind Speed Wind Direction	Anemo-Micro Pair (Makino, AVS-16)	Field 4m	1984. 8. 3-8. 25
		Net Radiation	Net Radiometer (Eiko, CN-11)	Field 1.5m	1984. 7. 1-8. 24
		Wind Profile	Pilot Baloon	up to 3km	{1983. 7. 28-7. 29 1984. 8. 1-8. 3 1985. 7. 23-7. 25
		Temperature Profile Humidity Profile	Tethersonde (A.I.R.C, TS-2A)	up to 0.5km	{1983. 7. 28-7. 29 1984. 8. 1-8. 3 1985. 7. 23-7. 25
		Ozone Profile	Temperature Sonde (Meisei, JWA-76)	up to 2km	{1983. 7. 28-7. 29 1984. 8. 1-8. 3 1985. 7. 23-7. 25
Usuda Junior High School (3) in Fig. 1	694m	Wind Speed Wind Direction	Anemo-Micro Pair (Makino, AVS-16)	18m hight	1984. 7. 1-8. 24
		Temperature Humidity	Long Range Thermo-Hygrograph (Nakaasa)	Field 1.5m (Shelter)	1984. 7. 1-8. 24
		Wind Profile	Pilot Baloon	up to 3km	{1983. 7. 28-7. 29 1984. 8. 1-8. 3
Koumi Junior High School (6) in Fig. 1	870m	Wind Speed Wind Direction	Anemo-Micro Pair (Makino, AVS-16)	10m hight	1984. 7. 1-8. 24
		Temperature Humidity	Long Range Thermo-Hygrograph (Nakaasa)	Field 1.5m (Shelter)	1984. 7. 1-8. 24
Minamimaki Junior High School (7) in Fig. 1	1046m	Temperature Humidity	Long Range Thermo-Hygrograph (Nakaasa)	Field 1.5m (Shade)	1984. 7. 1-8. 24
		Net Radiation	Net Radiometer (Eiko, CN-11)	Field 1.5m	1984. 7. 1-8. 24
Asashina Junior High School (9) in Fig. 1	673m	Wind Speed	Anemo-Micro Pair (Makino, AVS-16)	Field 4m	1985. 7. 23-7. 25
		Temperature Humidity	Long Range Thermo-Hygrograph (Nakaasa)	Field 1.5m (Shade)	1985. 7. 23-7. 25
		Wind Profile	Pilot Baloon	up to 3km	1985. 7. 23-7. 25

諸・佐久では1985年7月24日の場合は約700m, 7月25日の場合は約200mである。山風の風向は、小諸では東寄り、佐久では南寄りとなっている。しかし浅科では、これら2地点とは状況を異にする。すなわち、**Fig. 3**に示すように、浅科では7月24日は3時から7時にかけて、7月25日は4時から8時にかけて霧が発生した。そのために、地上付近をのぞいて上空の風は欠測となっている。**Fig. 3**に示した地上風の時間変化も参考にして、浅科における山風を詳しく検討してみると、風速は1m/s前後と弱く、風向は変動が激しく不定である。しいていえば、地上付近は霧発生前は南西風系が、霧発生後は東風系が多いようである。浅科が八ヶ岳北麓の端にあり、山麓を下る斜面風(南風)と、佐久では南寄り、小諸では東寄りとなって千曲川本流を下る山風とが、この付近でぶつかり合い、その結果霧が発生したと考えられる。

Table 2 Period, meteorological condition, local wind, ozone concentration

Period	Pressure pattern at observation site	Weather		General wind	Local wind			Ozone concentration	
		Site	Day		Night	Mountain wind	Valley wind		Easterly wind
'83 July	Northern edge of high	Komoro	Fine	Fog	Direction: W-NW Speed: 8-10m/s	Speed: 1-2m/s Thickness: 300m Southerly (Saku, Usuda), no Mountain wind (Komoro)	no Valley wind	no Easterly wind	less than 60ppb
		Saku Usuda	" "	Cloudy "					
	"	Komoro	Fine	Cloudy	W 6-8m/s	2-3m/s 700m Southerly (Saku, Usuda), Easterly (Komoro)	Speed: 2-4m/s Thickness: 700m Northerly (Saku, Usuda), Westerly (Komoro)	Speed: 3-8m/s Time: 17h- Thickness: 700m	more than 100ppb (17-19h)
		Saku Usuda	" "	" Fine					
1-2	Western edge of high	Komoro	Fine (Thunder storm)	Fine	W-NW 2-6m/s	2-3m/s 700m Southerly (Saku, Usuda) Easterly (Komoro)	1-3m/s 500m W-NNW	3-8m/s 14-24h 700m	more than 100ppb (15-21h)
		Saku Usuda	" "	" "					
2-3	"	Komoro	Fine (Thunder storm)	Fog	W-NW 2-6m/s	1-3m/s 500m Southerly (Saku, Usuda) no Mountain wind (Komoro)	2-3m/s 700m W-NNW	no Easterly wind	no data
		Saku Usuda	" "	Cloudy Fine					
23-24	Center of high	Komoro	Fine	Fine	NW 2-4m/s	1-3m/s 700m Southerly (Saku) Easterly (Komoro) Uncertain (Asashina)	1-3m/s 500m Noutherly (Saku, Asashina) Westerly (Komoro)	3-8m/s 14-24h 700m	more than 80ppb (21h)
		Saku Asashina	" "	" Fog					
24-25	"	Komoro	Fine	Fine	N → NE → E 2-6m/s	1m/s 200m Southerly (Saku) Easterly (Komoro) Uncertain (Asashina)	1-3m/s 500m Noutherly (Saku, Asashina) Westerly (Komoro)	3-8m/s 14-3h 900m	more than 100ppb (19-23h)
		Saku Asashina	" "	" Fog					

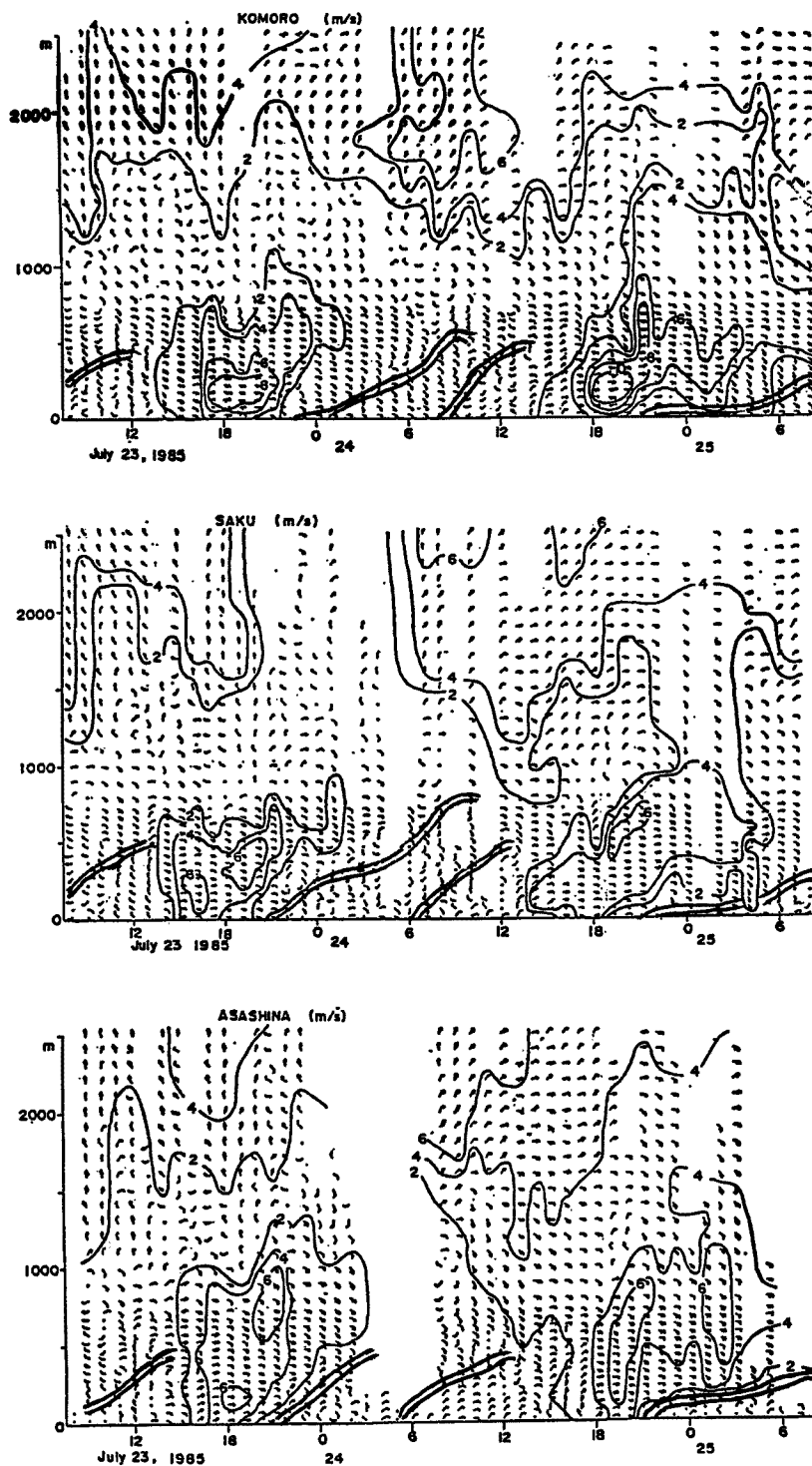


Fig. 2 Variations with height and time of wind speed in meter per second observed at Komoro, Saku and Asashina from 23 to 25 July 1985. Arrows indicate horizontal wind direction and speed. Double lines indicate height of the mountain or valley wind layer.

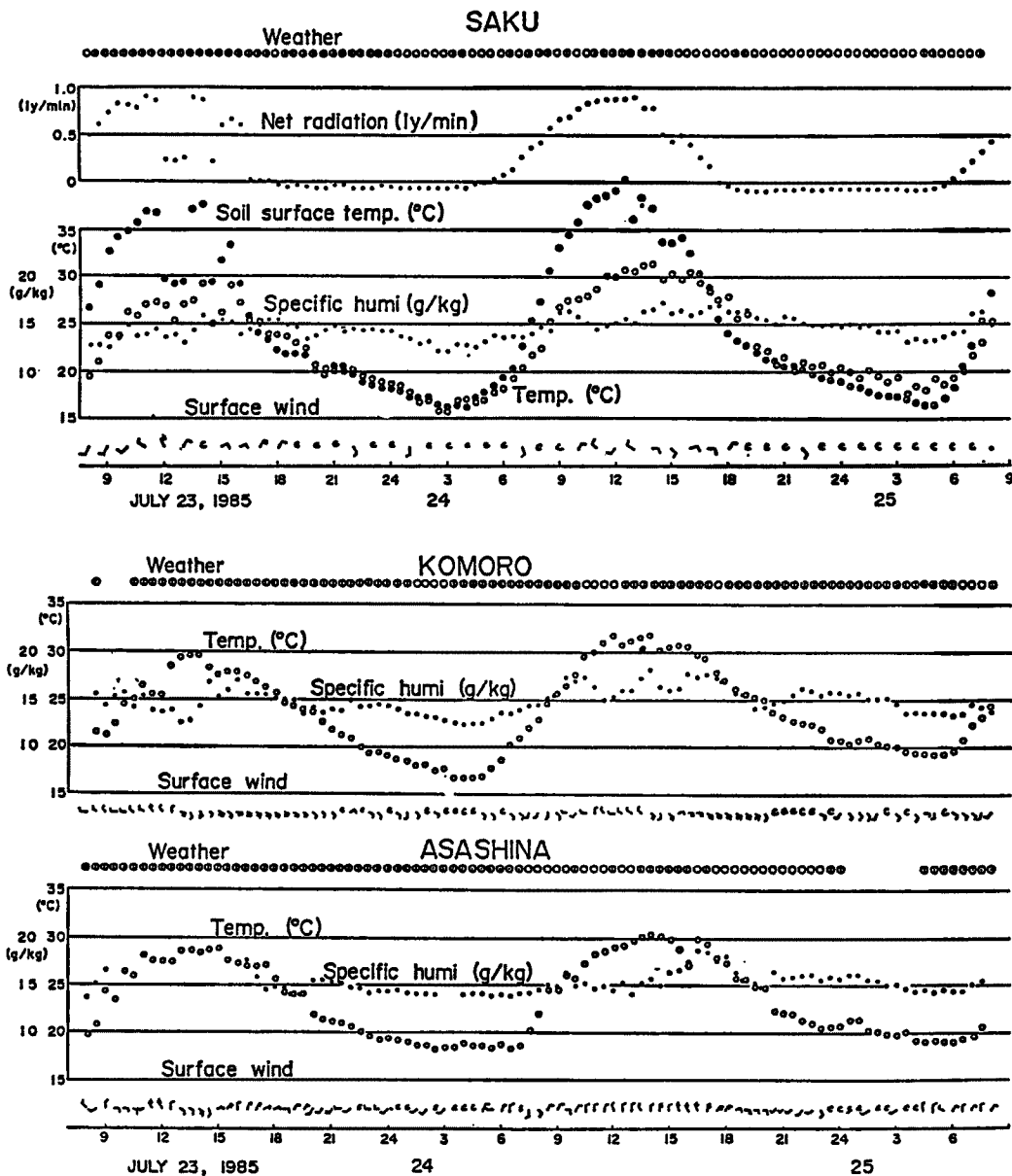


Fig. 3 Variations with time of weather (cloudiness), net radiation (ly/min), soil temperature (°C), air temperature (°C) and specific humidity (g/kg) at 1.5m height, and wind speed (AMEDAS) at Saku; Variations with time of weather, air temp., specific humi. and wind speed at 1.5m height at Komoro and Asashina from 23 to 25 July 1985.

山風の発達高度は、一般風の強さと夜間の冷え込み量に依存する。Fig. 2 の1985年7月24・25日の例についてみると、山風の発達高度は7月24日が約700mであるのに対して、7月25日は約200mと、3年間6昼夜に観測された山風のなかで、もっとも小さい値となっている。1985年7月25日の場合、一般風は2~6m/sでとくに強くはなかったが、山風層の上に4~5m/sを越す東風が3時頃まで存在した。また、Fig. 3に示した一般地上気象観測の気温の日変化からわかるように、7月25日の最低気温は24日に比べて、3~4°C高かった。

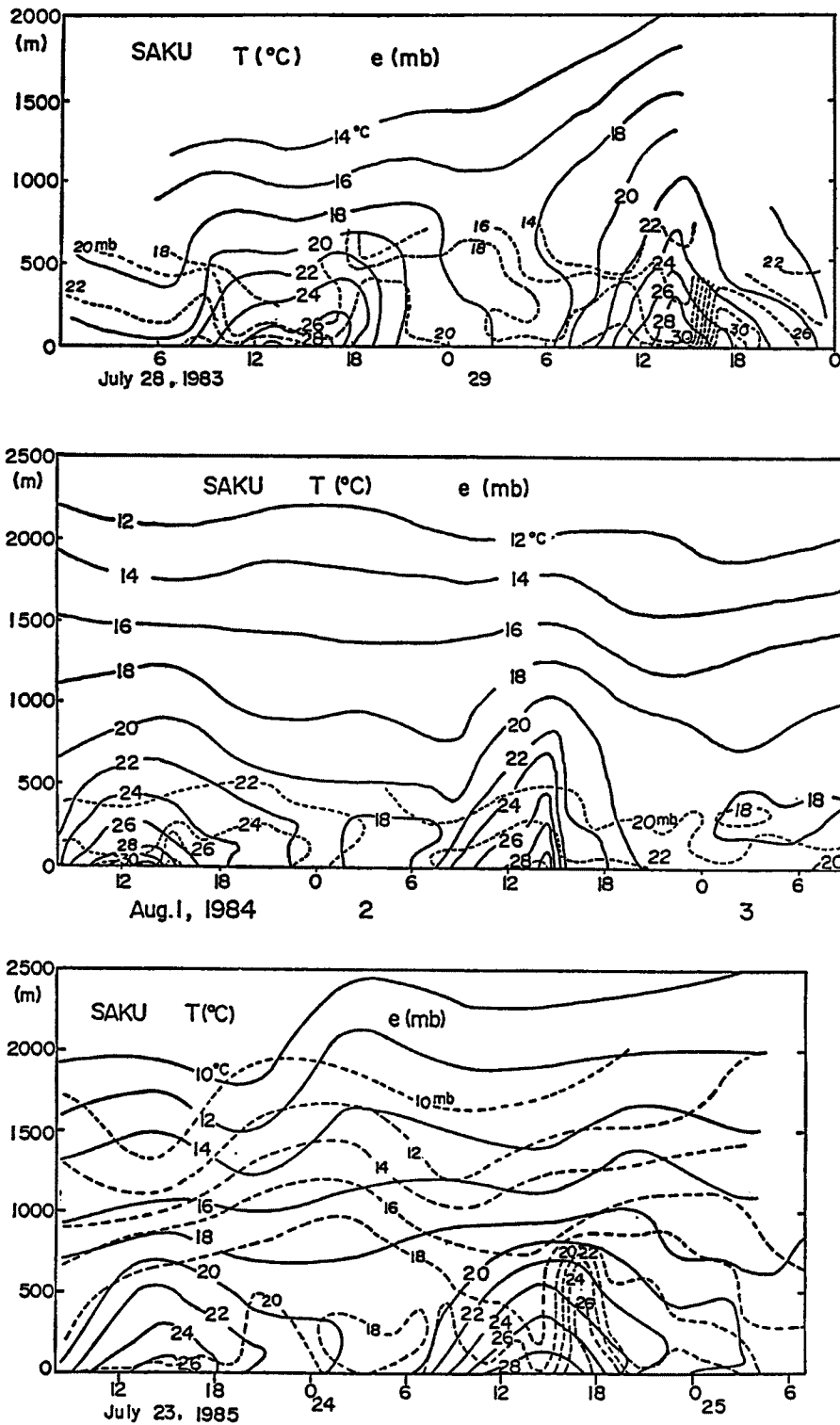


Fig. 4 Variations with height and time of air temperature ($^{\circ}\text{C}$) and water vapour pressure (mb) from 28 to 30 July 1983 (upper), from 1 to 3 Aug. 1984 (middle) and from 23 to 25 July 1985 (lower).

3.2 地域スケールの東風

Table 2 にまとめた3年間の結果からわかるように、14時頃から夜半にかけて、佐久盆地全域に地域スケールの東風が4回出現した。この東風が出現しなかった日は、一般風が強かった1983年7月28日と、関東地方から信州地方にかけての地域で、午後に雷雨が発生した1984年8月2日であった。地域スケールの東風が出現した日の一般風の風向をみると、1983・84年が北西、1985年は7月23日が北西、24日が北から北東、25日が東であった。この結果から、東風の出現は、その時の一般風の風向には依存しないようである。Fig. 2 に示した1985年の、小諸・佐久・浅科における風の鉛直時間断面図をみると、地域スケールの東風は、出現時刻が14時頃、風速が3~8m/s、鉛直スケールが約1km、継続時間が約10時間と、3地点ともほぼ共通した性質をもっていることがわかる。このような性質は、1983・84年の例でもほぼ同じであることは、Table 2 に示すとおりであり、この地域の大气汚染高濃度と密接な関連のある東風が、ごく普通に出現している現象であることがわかる。

佐久で観測された気温と水蒸気の鉛直時間断面を Fig. 4 に示す。1985年7月24・25日とも、700~800m以下の大气層では、午後東風の侵入と同時に気温が低下し、水蒸気圧が急上昇している。すなわち、地域スケールの東風は、冷気と水蒸気の移流を伴っている。このことは1983・84年の場合も同様にみられる。

4. 東風による佐久盆地へのオゾン輸送量とその行方

この章では、小諸・佐久・臼田で得られた風の鉛直分布と、佐久でのオゾン濃度・気温などの鉛直分布を用い、Fig. 1 の点線で示される、浅間山と八ヶ岳にはさまれた佐久盆地南北13km巾で、厚さ1kmの断面を通過するオゾンフラックスを求め、東風によって佐久盆地へ入るオゾン量の時間・空間変動の様子を検討する。

佐久におけるオゾン濃度の時間変化を Fig. 5 に示す。この図で上段の3つは、1983・84・85年に行なわれたカイツーンによるオゾン濃度の鉛直時間断面、下段は1985年だけ測定した地上濃度の時間変化である。一般風が強かった1983年7月28日と、オゾン濃度が欠測であった1984年8月2日をのぞいて、午後になると、東風とともに80ppbを越す高濃度がみられる。地上のオゾン濃度の時間変化には、東風に伴う午後のピークの他に、午前にはローカルな汚染源による小さいピークもみられる。カイツーンによって観測されるオゾン濃度は、高々500m程度の値しか得られない。したがって、それより上空のオゾン濃度は、次の事実を参考にして推定した。すなわち、1983・84年に関東・信州上空で実施された飛行機観測、関東側の深谷上空での実測の結果をみると、オゾン濃度の鉛直分布は、東風層ではほぼ一様、それより上空では急激に濃度が減少するようである。

以上のような手順で、風・オゾン濃度・気圧・気温の鉛直分布が与えられると、オゾン輸送量 (g/hour) の鉛直分布 $Q(z)$ は次式によって計算できる。

$$Q(z) = \left\{ u(z) \times h \times l \times n(z) \times 10^{-9} \times \frac{P(z)}{1013} \times \frac{273}{273+t(z)} \times \frac{M}{22400} \right\} \times 3600$$

ここに、 $u(z)$: 小諸・佐久・臼田における風速 (cm/sec) の鉛直分布、 $n(z)$: 佐久におけるオゾン濃度 (ppb) の鉛直分布、 $P(z)$: 佐久における大気圧 (mb) の鉛直分布、 $t(z)$: 佐久における気温 (°C) の鉛直分布、 h : 気層の厚さ (0~750mまでは 50×10^2 cm, 750~1050mまでは 100×10^2 cm)、 l : 計算した測線の長さ (cm)、 M : オゾンの分子量 (48g) である。

上式によって、東風があった日 (1983年7月29日, 1984年8月1日, 1985年7月23・24日) のオゾン輸送量の東西成分を1時間毎に計算し、その結果を鉛直時間断面図として Fig. 6 に示す。この図で網目を施した部分は、オゾン輸送量が東向きとなる領域である。図よりオゾンが輸送される高度は、地上から500mまでの層がほとんどで、200~500m高度に輸送量の最大がある。当然のことながら、オゾンの輸送は東風

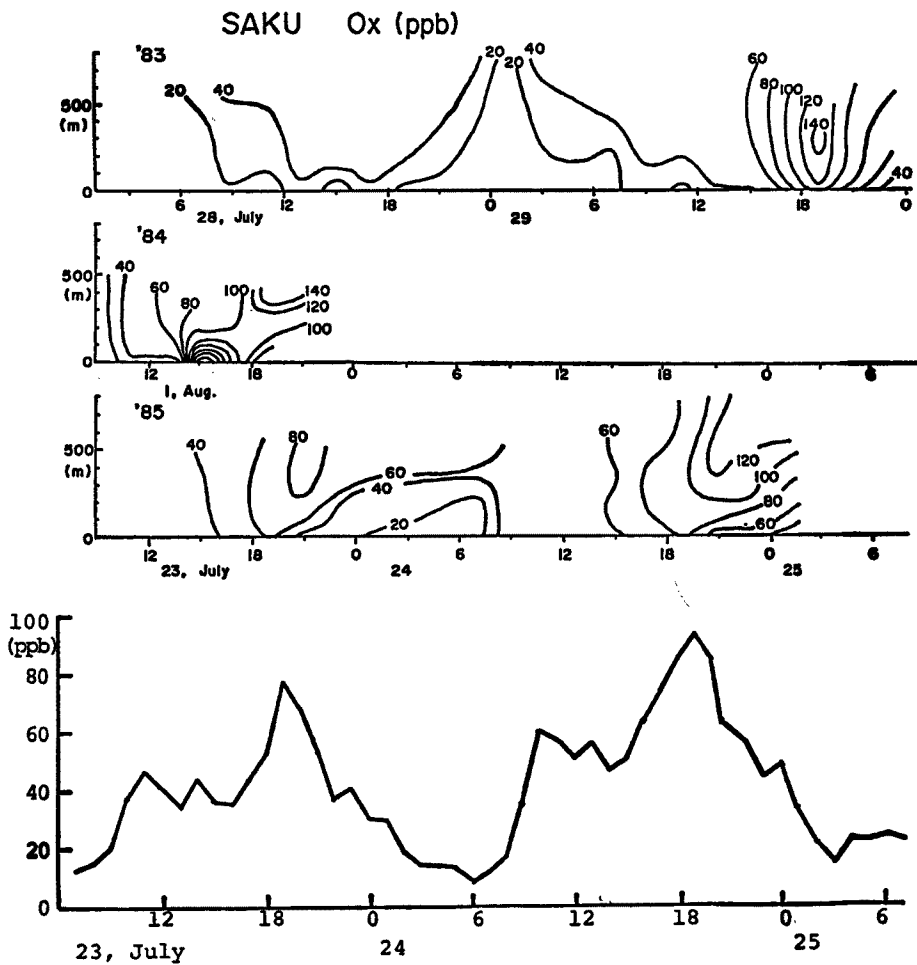


Fig. 5 Same as Fig. 4, but for ozone concentration (ppb). The lower indicates surface ozone concentration.

の吹き始めとともに始まり、その終了とともに急激に減少する。1984年8月1日の16時から17時の間、輸送量の値が小さくなり、地上から200m高度では東向きとなっている。これは、この時間帯に盆地内および周辺の一部で激しい雷雨があり、小諸・佐久・臼田とも一時的に西寄りの風となったためである。このときの佐久でのオゾン濃度の測定値は、200~500m層でやや減少し、逆に地上から200m高度までは増加している (Fig. 5)。Fig. 6 の輸送量の値を高度と時間で積分すると、東風による佐久盆地へのオゾン輸送量が求まる。その結果は、1983年7月29日が174 kg、1984年8月1日が96 kg、1985年7月23日が131 kg、同じく7月24日が279 kgであった。

東風によって佐久盆地に輸送されてきたオゾンの一部はさらに西方へ、一部は鉛直上方へ輸送され、残りは盆地内において消滅すると考えられる。オゾンの行方と盆地内の大気の三次元構造を検討するため、1985年7月23~25日の小諸 (海拔718m)、東部町 (617m)、立科 (714m)、佐久 (700m) の水平風速の測定値から、Fig. 1 に示される2つの三角形領域での気流の発散量をベラミー法によって計算した。その結果を鉛直時間断面図にして Fig. 7 に示す。高度は地上からの高さで、観測地点の海拔の差は考慮していない。図中の網目を施した部分は収束域であることを示している。ベラミー法から求めた発散量にはかなり問題があり、精度は高くないが、結果をみると盆地内の局地風に伴う発散の日変化がうまく表現されている。すなわち、500 m 以下の層は、両日とも夜間は山風に伴う収束、昼間は谷風に伴う発散となる。午後になると、発散が

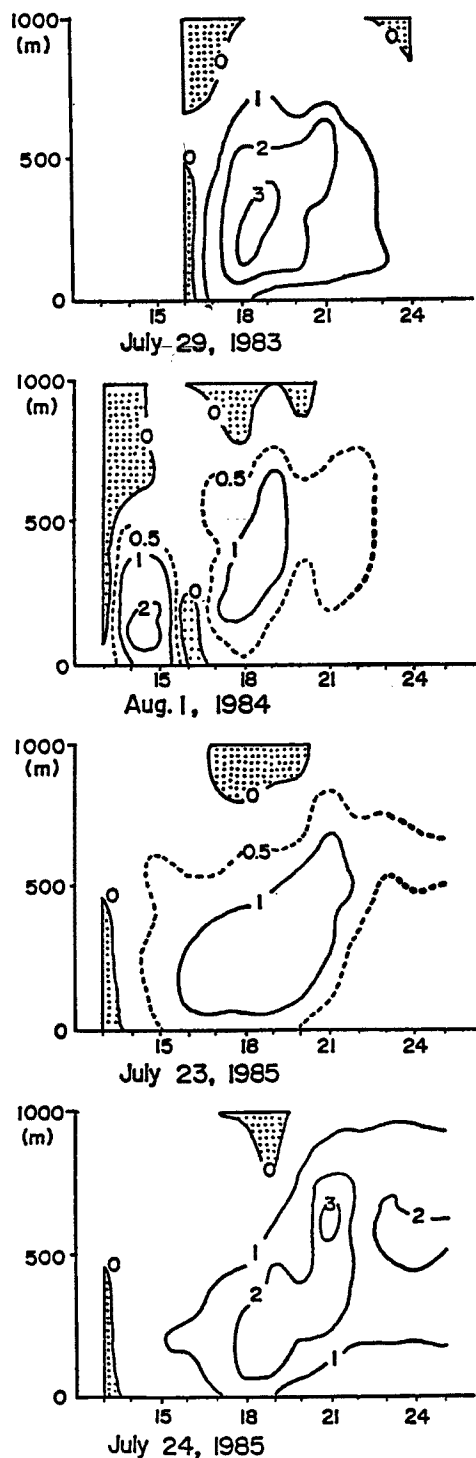


Fig. 6 Same as Fig. 4, but for east-west component of ozone flux ($\text{kg}/\text{hour} \times 13\text{km} \times 50\text{m}$). Stippled area indicates eastward transfer.

から収束へと変化する。収束量は盆地の西部（小諸—東部—立科）の方が大きい。これら3地点の風の鉛直分布を詳細にみても、東部町では午後の東風の吹送時間は、1985年7月23日が16時から19時まで、7月24日が18時のみで、むしろ西風の吹送時間の方が長い。このとき佐久盆地西部で、太平洋側と日本海側からの局地風がぶつかり、大きな収束帯が形成されていたのであろう。

東風の侵入による佐久盆地内の大気の収束量は、高度500mまでで $(-3) \sim (-12) \times 10^{-4}/\text{s}$ の大きさとなっている。地上から500m高度までの収束量が一定で、 $(-4) \times 10^{-4}/\text{s}$ とすると、500m高度での上昇速度は20cm/sとなる。佐久盆地の大きさを $13\text{km} \times 13\text{km}$ の正方形と考えると、盆地上空500m高度での空気平均流出量は $338 \times 10^{-4}\text{km}^3/\text{s}$ となる。一方、東風層の厚さを1km、東風の平均風速を5m/sとすれば、佐久盆地の東端からの東風による空気平均流入量は $650 \times 10^{-4}\text{km}^3/\text{s}$ となる。ごく大雑把な計算であるが、この結果から、佐久盆地へ輸送されてきたオゾンの約1/2の量が、上空へ輸送されたと推定される。

5. あとがき

本稿では、観測事実に基づいて、佐久盆地における局地風と大気汚染の係りについて考察を行ない、次のことが明らかとなった。

佐久盆地における午後のオゾンの高濃度は、地域スケールの局地風である東風に起因することが再度確認された。盆地上空の大気の流れや、収束・発散の状態からみると、関東地方から運ばれてきたオゾンは、佐久盆地を通過してさらに内陸に運ばれるものと、上空に運ばれるものがあり、今回の観測結果からは、その量は同程度であった。今回の解析結果は、一例ではあるが、大気境界層から自由大気への物質輸送に、広域的な局地風系や盆地の局地循環が関連していることを示唆している。

謝 辞

本研究は、文部省科学研究費環境科学特別研究「内陸域における大気汚染の動態」（代表者、木村竜治・浅井富雄）で、われわれが担当した観測の結果に基づいて、解析・考察を加えたものである。1985年の現地観測には、長野種畜牧場、小諸東中学校、浅科中学校の関係者に御協力・御援助を受けた。観測には本研究技官、多河英雄・北川吉男両氏、理学研究科大学院生・秋山孝治・近藤裕史、西憲敬

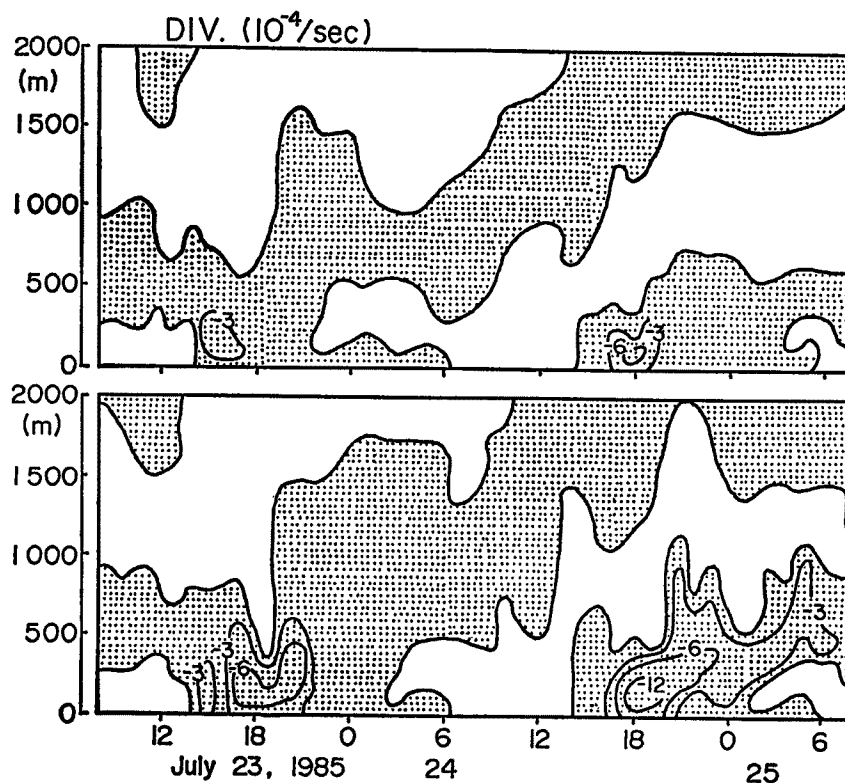


Fig. 7 Variations with height and time of horizontal divergence over the Saku Basin from 23 to 25 July 1985. The upper part is the one over domain B, and the lower part, domain A.

補佐員大野富子の諸氏のほか、滋賀大学地理学教室・地学教室の学生諸氏の御協力を得た。以上の方々に謝意を表します。また、中島暢太郎名誉教授および災害気候研究室の方々に研究遂行の過程で討論して頂いた。

参 考 文 献

- 1) 田中正昭・枝川尚資：佐久盆地千曲川の谷地形における冷えこみと山風の形成，京都大学防災研究所年報第28号 B-2, 1985, pp. 133-145.
- 2) 田中正昭・枝川尚資：佐久盆地の局地風循環，内陸域における大気汚染の動態，「環境科学」研究報告 B280-R11-2, 1986, pp. 82-88.
- 3) 栗田秀実・植田洋匡：沿岸地域から内陸の山岳地域への大気汚染物質の輸送および変質過程，大気汚染学会誌，21, 1986, pp. 430-441.
- 4) 「内陸域における大気汚染の動態」研究班：内陸域における大気汚染の動態，「環境科学」研究報告 B280-R11-2, 1986.