

植物群落の大気浄化効果に関する研究（第6報）

小川 和雄 松本 利恵 高野 利一

要 旨

植物群落による大気汚染低減効果の変動要因を明らかにするため、桑群落内外のNO₂濃度垂直分布調査及び桑樹の層別刈り取り調査を実施した。密植桑園と夏切桑園では生産構造が異なり、前者が中層から上層に大量の葉が分布するのに対し、後者は中層から下層を中心に葉が分布した。その結果、密植桑園のNO₂濃度及び風速は比較的上層から低下が大きかったが、夏切桑園では上層から下層にかけて徐々に低下した。夏切及び春切桑園の葉面積指数をX、NO₂低減率をYとすると両者の関係は $Y=5.76X+0.58$ ($r=0.98$)で近似されたが、夏期の密植桑園のNO₂低減率はこれを大幅に上回り、少なくともその差の主原因は群落構造の影響と判断された。

1 はじめに

沿道大気汚染対策の1つと考えられる緩衝緑地帯で、どれだけ窒素酸化物濃度が低減できるかを明らかにするため、1984年から7ヵ所の緑地帯でそれぞれ半年から1年間の実験を行ってきた。^{1)~7)}その結果、各地点とも緑地帯を構成する植物が吸収すると考えられる量よりも大きなNO₂濃度の低下がみられ、NO₂、NO濃度の時間変動パターンや風向との関係を解析した結果、その原因は緑地帯の構造に起因する遮閉効果と緑地帯内外の大気拡散速度のバランスの変動にあり、NO₂については他に緑地帯内外のNO₂生成速度の変化が影響するものと推察された。

1988年は、こうした大気汚染低減効果の変動要因を明らかにするため、植物群落の構造が短期間に変化し、しかもその計測が可能な桑園でNO₂濃度分布等の調査を行ったので、その結果を報告する。

2 調査方法

1988年6月中旬から10月上旬にかけて、熊谷市大幡の蚕業試験場試験桑園のうち、密植夏切桑園（栽植距離0.5×0.5m、以下密植桑園という）、夏切桑園（同2.0

×0.6m）、春切桑園（同2.0×0.6m）を用いて以下の調査を行った。

2・1 自動測定機による密植桑園内外のNO₂、NO、O₃濃度調査

8月23日から9月16日の間に10日間、密植桑園内（高さ1.5m）及び桑園外（その上部高さ3.5m）の大気をテフロンパイプでケミルミNO₂計に導き、タイマーを装着した2組の電磁弁で30分ごとに交互に切り換え、桑群落内外のNO₂濃度を連続測定した。また9月13日から16日にかけて紫外線吸収方式のO₃計を用いて、同一サンプルのO₃濃度を測定した。

2・2 桑園の群落構造とNO₂濃度の垂直分布調査

植物の群落構造がNO₂濃度等の低減効果にあたえる影響を明らかにするため、栽植形式の異なる密植桑園、夏切桑園、春切桑園で6月から9月末にかけて各6回（春切桑園のみ2回）分子拡散型簡易NO₂サンプラー⁸⁾でNO₂濃度の垂直分布を測定した。NO₂サンプラーは、平均的な生長状態の桑を選び、その株間中央に2ヵ所、畝間中央に1ヵ所園芸用のポールをたて、30～40cm間隔でポリエチレン製シェルター内に格

納して吊り下げた。48時間から72時間大気暴露後回収して分析定量し、3点の平均値を求めた。またNO_xサンプラー回収後、ただちに30cm間隔で桑の層別刈り取りを行い、同化器官(葉)、非同化器官(枝、葉柄)別に生重量を秤量後自動葉面積計で葉面積を計測し、熱風乾燥して乾重量を秤量した。

2・3 桑園内外の風速の垂直分布調査

桑群落内の拡散速度の変化を明らかにするため、白金抵抗式プローブ4本を取り付けた多点風速計で密植、夏切桑園内、及びその上部の風速の垂直分布を測定した。多点風速計で得られた瞬時値はラップトップ型パソコンにとりこみ、1分間平均値として連続収録した。

3 結果

3・1 密植桑園内外のNO₂、NO、O₃濃度

自動測定機による調査期間中の密植桑園内外のNO₂、NO、O₃濃度測定結果を平均値で表1に示す。調査地点は東北にあり、特定の発生源から離れているため、高濃度のNO_xを含む汚染気塊の移流は少ないものと考えられ、NO_xレベルは低く、調査期間中密植桑園の上下部のNO₂濃度は12.7ppb、NO濃度は7.3ppbであった。一方群落内部のNO₂濃度は群落上下分布より2.8ppb、22%低かったが、NO濃度は群落内部が7.6ppbで群落上下部と同レベルかわずかに上回る傾向がみられ、前報で報告した与野公園での夏期の測定結果と類似の傾向を示した。

表1 密植桑園内外のNO₂、NO、O₃濃度測定結果

	(単位ppb)			
	桑園上部	内部	濃度差	低減率(%)
NO ₂	12.7	9.9	2.8	22.0
NO	7.3	7.6	-0.3	-4.1
NO _x	20.0	17.5	2.5	12.5
O ₃	18.6	17.1	1.5	8.0

備考) n=220hr, 但しO₃は36hr

また9月13日以降に測定したO₃濃度は、群落上部の濃度レベルが低かったものの群落内では幾分低下することが確認された。

なお、各時間の測定結果についてはNO₂計、O₃計と

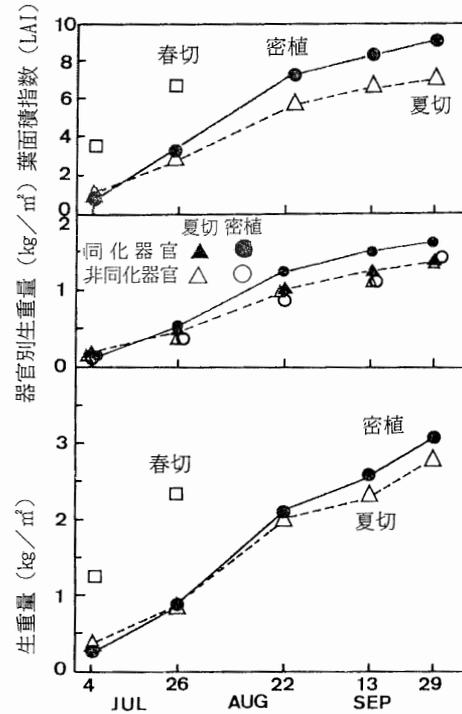


図1 桑園別地上部生重量、葉面積指数の推移

も測定機が各1台のため群落の内外で30分のタイムラグがあり、そのまま比較できないが、平均値としては機差が無いので、群落内外のNO₂、O₃濃度のそれぞれの相対的な関係は信頼できよう。

3・2 桑園の群落構造とNO₂濃度及び風速の垂直分布

3・2・1 桑の生長と群落構造の変化

7月4日から9月29日までの間に5回行った桑樹地上部の伐採調査結果をもとに、桑園別地上部の生重量等の推移を図1に示す。ここで、春切桑園は前年秋に伐採して春の発芽後無伐採のもの、密植及び夏切桑園は春の発芽後、5月下旬に基部伐採した後の生長を示している。

同一日に伐採された密植桑園と夏切桑園について比較してみると、1m²当りの生重量では夏切桑園を100とすると、密植桑園は7月4日は56で小さかったが、7月26日以降夏切桑園を上回り、9月13日には112となっ

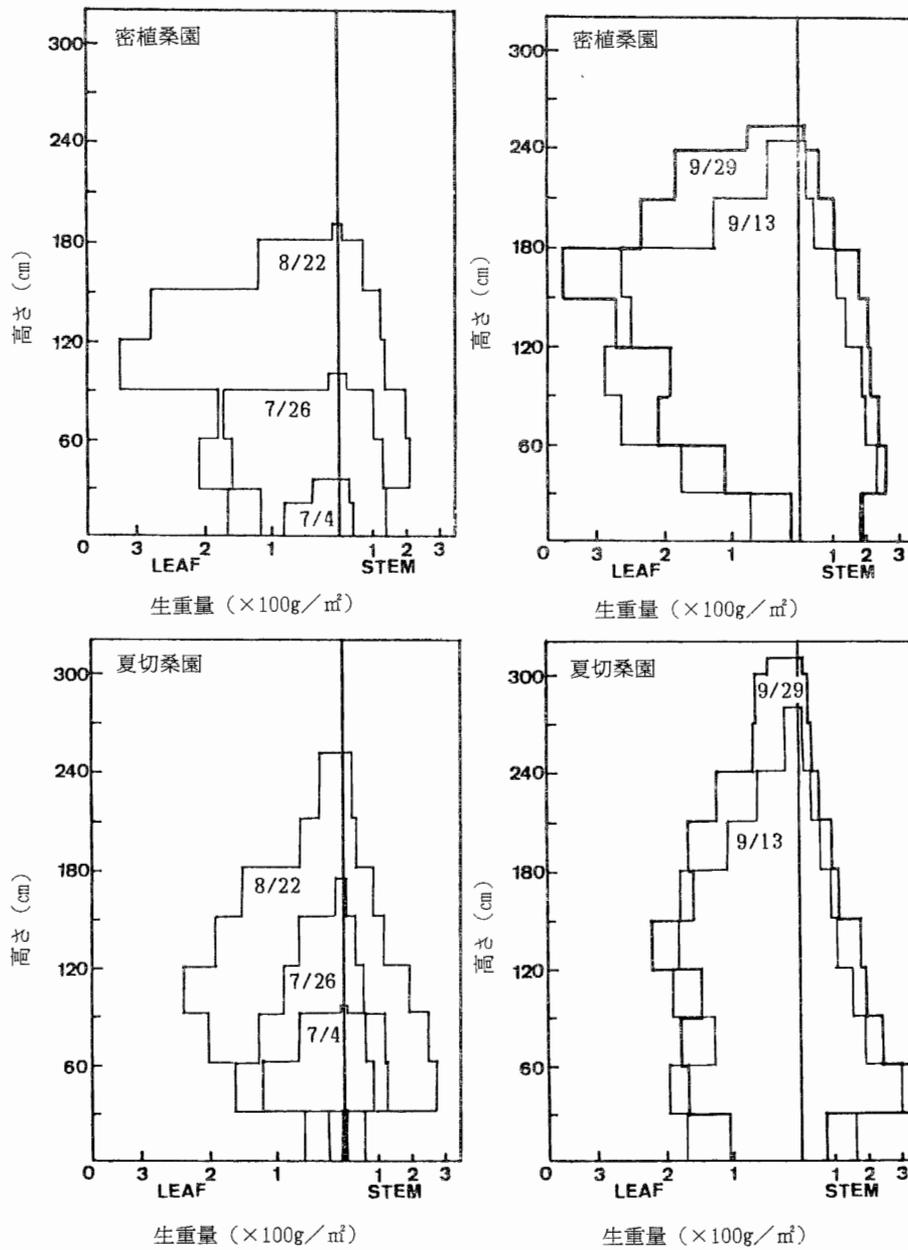


図2 密植及び夏切桑園の生産構造の推移

た。これを同化器官と非同化器官別に分けてみると、その差は主に同化器官の量の差に起因していることが示されており、葉面積指数の推移でも調査終了時の9

月29日で、夏切桑園が6.98に対し密植桑園は9.06に達するなど、一層明確になっている。

図2に密植桑と夏切桑を層別刈り取りして作成した

生産構造の推移を示す。これは1 m²あたりの生重量で同化器官と非同化器官の垂直分布を示したもので、群落構造の特徴を表している。

密植桑園の同化器官、すなわち葉量では発芽伸長後間もない7月4日は高さ20cmの株の回りに多く分布したが、7月26日では株の上部30cmから90cmまでの各層に、均等に分布し、8月22日には高さ90cmから150cmまでの2層がそれぞれ300g/m²前後に達し、他の層を大幅に上回った。9月に入っても伸長とともに中、上層に多く分布する傾向が続いた。一方夏切桑園では伸長生長は大きかったが、各層の葉量は密植桑園に比べて少なかった。夏切桑の株高は約40cmで最下層の分布が少ないのは当然であり、その層を除けば、夏切桑園は8月22日頃までは下層から中層に多く分布するピラミッド型を示し、それ以降は伸長生長によって下層から中層にかけてほぼ均等に分布した。非同化器官は、密植桑園では下層から比較的上層まで概ね均等に分布したが、夏切桑園は下層ほど多く分布する傾向を示した。

3・2・2 層別葉面積とNO₂濃度の垂直分布

密植及び夏切桑園の土地1 m²当りの層別葉面積とNO₂濃度垂直分布を図3に示し、そのときの気象条件等を表2に示す。以下文章中のNO₂低減率は次式による。

$$(C_T - C_B) / C_T \times 100(\%)$$

ただし、C_Tは群落上外部のNO₂濃度、C_Bは群落内最下部のNO₂濃度

表2 NO₂濃度調査時の気象条件

	風速 (m/s)	気温 (°C)	湿度 (%)	積算日射量 (Cal/cm ²)
7/4 - 7/6	1.40	21.5	85.6	427.8/48hrs
7/26 - 7/28	1.02	20.4	90.6	304.7/50hrs
8/22 - 8/24	1.51	29.2	78.5	—
9/13 - 9/16	1.63	23.8	84.2	—
9/29 - 10/1	0.91	18.4	90.8	—

生長初期の葉面積は密植、夏切桑園とも小さく、NO₂低減率もそれぞれ6%、7%と同程度であったが、7月26日の密植桑園は地表から高さ90cmまで、30cm間隔の各層の葉面積が約1 m²/m²を示し、NO₂濃度は約

40%低下したが、夏切桑園のNO₂低減率は18%であった。夏切桑園の樹高は170cmを越えて密植桑園の1.7倍に達し、30cmから60cmの最下層の葉面積が1 m²/m²となったものの上層ほど葉面積が減少し、総葉面積では密植桑園の86%にすぎなかった。8月22日以降、密植桑園の中層から上層の葉面積は1.5 m²/m²に達するほど大きく、NO₂濃度は比較的上層部から低減する傾向をみせた。同時期の夏切桑園では、各層の葉面積は下層から中層まで1 m²/m²程度で均等に分布し、NO₂濃度は上層から下層にかけて徐々に低下する傾向を示した。

3・2・3 桑園内風速の垂直分布

これまで耕地内の風速分布は高度変化が著しく、乱流状態にあることが知られている。⁹⁾ CO₂やNO₂、水蒸気等の垂直分布は、この風速分布に密接に関係していると考えられることから、密植桑園、夏切桑園、およびその対照である裸地で、風速の垂直分布を測定した。

図3のうち8/22-8/24、9/13-9/16の部分については桑園上外部の風速を1とした、群落内風速の垂直分布(相対値)を示したが、密植桑園の方は群落上層部の多量の葉の部分から弱まるのに対し、夏切桑園は上層から下層にかけての葉の積算の効果によって、徐々に弱まる傾向を示した。また密植、夏切桑園の高さ別風速の時刻変動を示した図4でも、密植桑園の群落内部の風速変動は夏切桑園に比べて小さく、高さ1mではきわめてわずかとなり、群落上外部の風速変動の影響は小さかった。なお、桑園の外縁から6m離れた対照の裸地でも、高さが低くなるにしたがって風速が低下したが、高さ2.6m以下の低下は少なかった。

これまで作物群落の風速u(z)の高度分布は混合距離の考え方にもとづく次式⁹⁾であらわされている。

$$u(z) = (V_* / \kappa) \cdot \ln [(z-d)/z_0] \quad (1)$$

ただしV_{*} = (τ/ρ)^{1/2}、摩擦速度 (cm/s);

κ=0.4,カルマン係数; d,地面修正量 (cm);

z₀,粗さ (cm); ρ,空気の密度(g/cm³);

τ,風の摩擦応力 (dyne/cm²)

ここで、空気力学的粗さをあらわすz₀は密な群落ほど大きくなることから、(1)式は密植ほどu(z)が小さくなり、本調査結果を裏付けている。

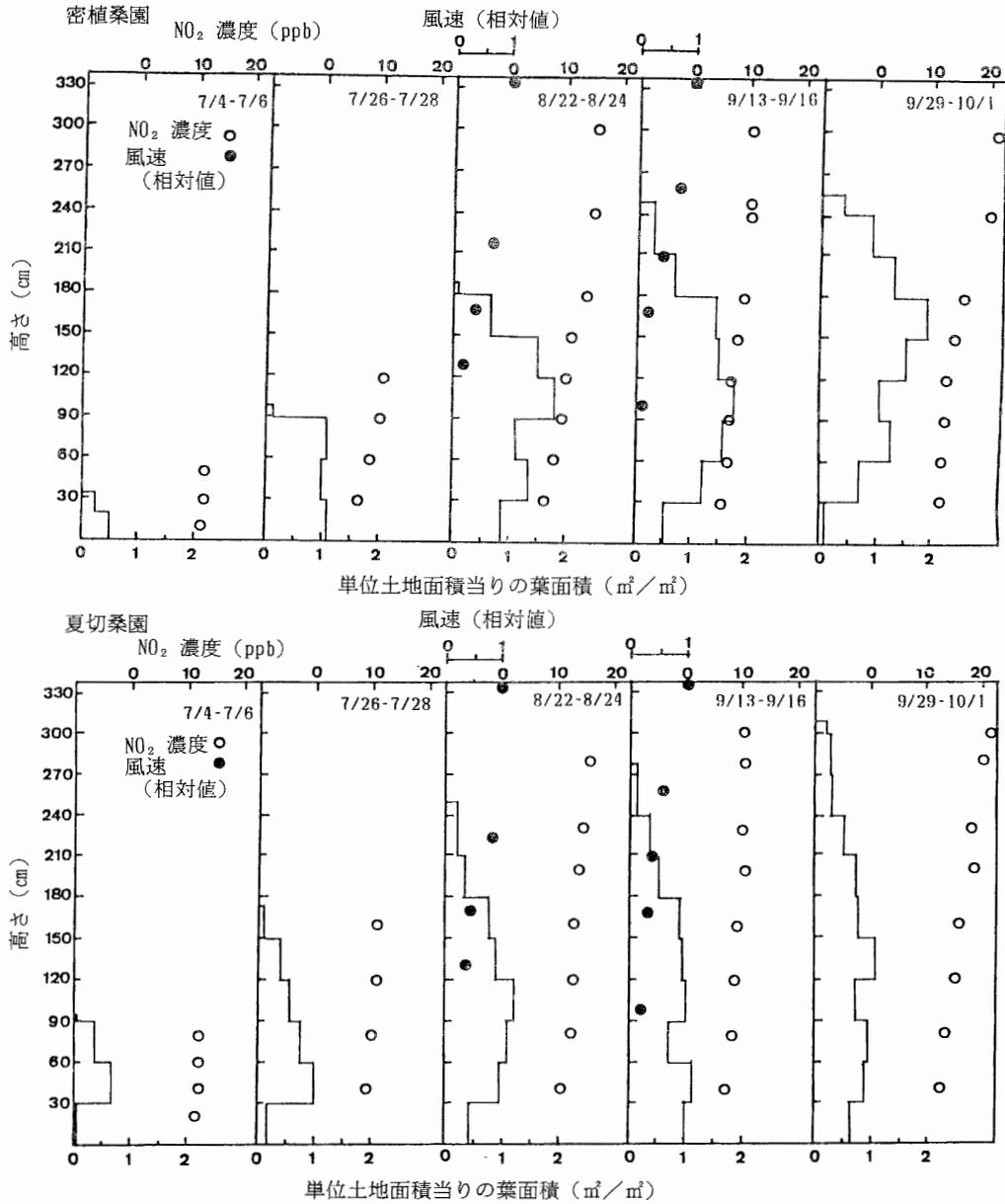


図3 密植、夏切桑園の層別葉面積とNO₂濃度の垂直分布

3・3 桑園群落におけるNO₂低減効果について

図5に密植、夏切、及び春切桑園内のNO₂低減率と、そのときの各桑園の葉面積指数の関係について示す。栽植距離が等しい夏切桑園と春切桑園は、その葉面積指数をX、NO₂低減率(%)をYとすると最小自乗

法による回帰式は $Y=5.76X+0.58$ ($r=0.98$)となり、両桑園ともそれぞれ伐採時期が異なるにも係わらず、原点付近を通る同一直線で近似され、同一栽植距離であれば葉面積指数とNO₂低減率は比例関係にあることが示された。これに対し密植桑園は、成育初期の葉面積指数が1未満であった7月4日は夏切、春切桑園

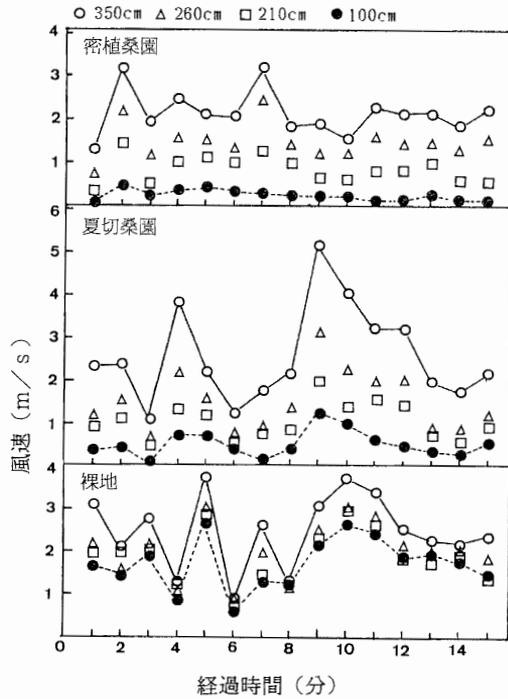


図4 密植, 夏切桑園の高さ別風速時刻変動
(注) 各桑園の測定時刻は異なる。

と同一直線上にあったが, 7月26日, 8月22日にはNO₂低減率が大幅に上昇し, 夏切, 春切桑園を上回った。

これまで行ってきた沿道での調査結果^{4, 5, 7)}では, 緑地帯によるNO₂低減効果は, 植物による吸収のほかに, 群落構造に起因する遮閉効果, それに群落内外のNOからNO₂への反応速度の変化等によって決定されるものと推察された。一方, 特定の煙源のない本調

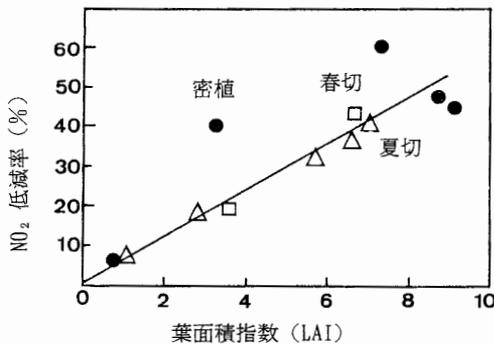


図5 桑園別葉面積指数とNO₂低減率

査地点のような耕地では, 植物による吸収を主要因と考えた場合, 同一植物であれば, 葉面積指数が等しければNO₂吸収量は等しく, NO₂低減率も等しいものと考えられる。しかし実際には7月26日, 8月22日に栽植距離の異なる密植桑園のNO₂低減率が夏切, 春切桑園のNO₂低減率を大きく上回った。このことから少なくとも同一葉面積指数の桑園のNO₂低減率の差の原因は群落構造の差に求めざるを得ないが, それは3・2・2で明らかにしたように, 密植桑園が夏切桑園にくらべ群落上層部に葉量が多く, 群落内上部でのNO₂濃度の低減が大きいことに現れている。

こうした群落内のNO₂濃度の低減に大きな影響を及ぼすのは風の分布で, 3・2・3で述べたように密植桑園と夏切桑園とでは風の乱流状態の変化により, 風速の垂直分布がやや異なる。即ち密植桑園は比較的上層部に葉が多く分布するため, 群落内の上部で風速の低下が大きく, 桑園上外部の風速を1とした群落内の相対風速と積算葉面積指数の関係を示した図6によれば, 8月22日は積算葉面積指数が2程度で相対風速は密植桑園が0.15まで低下し, 夏切桑園の0.35を大きく下回った。9月13日では夏切桑園の相対風速が低下し, 密植桑園との差はやや少なくなったが依然としてその値は密植桑園の方が小さかった。この結果は夏切桑園の方が密植桑園よりも大気が拡散しやすく, ガスの強制混合が進むことを意味しており, そのためNO₂の低減率は小さくなるものと考えられる。

なおO₃がNO₂の生成速度に与える影響については, NOが過剰にある地域では定量的な評価が可能であるが¹⁰⁾, 本調査地点はNO濃度レベルが低く, 複雑な光化学反応を想定しなければならないため, その影響は解析できなかった。ただ, 3・1で述べたように9月中旬であっても群落内のO₃濃度は外部よりも低く, これがNO₂生成を遅らせていることは推察される。

次に, 図5で9月13日と9月29日の密植桑園のNO₂低減率が低下したことについて検討する。

一般に光合成量と葉面積の大きさは比例関係にあるが, ある程度葉面積が増加すると群落下層への光量が不足し, 群落全体の光合成量の増加がにぶってくる。また, 葉の光合成速度を比較するため, 単位葉面積あたりの乾物重の増加量(純同化率, NAR)を次式¹¹⁾により求めた。

$$NAR = (\ln A_2 - \ln A_1) / (\tau_2 - \tau_1) \times (W_2 - W_1) / (A_2 - A_1) \quad (\text{mg/cm}^2/\text{day})$$

ただし, A₂, A₁はある時間τ₂, τ₁の葉面積, W₂,

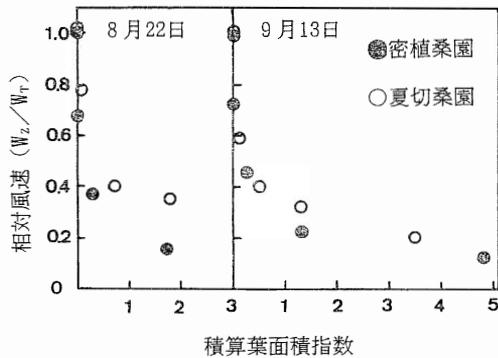


図6 群落内相対風速と積算葉面積指数の関係
*群落上外部最高位の風速に対する各測定位置の相対風速。W_rは8/22が310cm, 9/13が350cm

W₁は同じ時間の乾物重を表す。

その結果、密植桑園のNARは7月4日から7月26日までの間は3.7g/m²/dayであったものが9月13日から9月29日の間は0.29g/m²/dayに低下したのに対し、夏切桑園は同時期に2.6g/m²/dayから1.5g/m²/dayに低下したが、密植桑園にくらべては約5倍のNARを維持した。

即ち前述のように群落構造的には密植桑園も夏切桑園も葉面積が大きくなり、ガス拡散の大きさは差が小さくなるのに対し、光合成能力をあらわすNARは密植桑園の低下が著しく、したがってNO₂の吸収もきわめてわずかだったものと考えられる。

3・4 夏切桑園のNO₂吸収量について

これまで、道路近傍等の局地的大気汚染対策として、どれだけNO₂濃度の低減ができるのかという視点から調査を実施してきたが、広域的な対策を考えた場合、吸収量そのものが問題となる。そこで本調査を実施した夏切桑園をモデルに、どれだけNO₂量が吸収されたかを試算した。

汚染ガスの沈着速度は植物の気孔拡散抵抗に律速されるので各汚染質の吸収量の比は葉面積指数や群落構造にかかわらず一定になる¹²⁾と考えられることから、植物群落のNO₂吸収量は、刈り取り法によって求めたCO₂固定量から推定することができる。

光合成は次式であらわされるが、



呼吸の基質をデンプンと考えればC₆H₁₂O₆から水

分を除き、炭酸ガスとの重量比を求めた値、1.63を乾物重に乗じたものがCO₂の固定量となる。

ここで、CO₂の固定量は呼吸による消費量を除いた純生産量(Pn)であるから真の光合成量(総生産量、Pg)を求める必要がある。夏切桑園は5月下旬に基部伐採後9月末までに乾物量で900kg/10a増加したが、5月下旬の伐採時に通常その2分の1は収穫されるので、夏切桑園の年間収穫量は、1350kg/10a程度と考えることができる。増田¹³⁾らは桑園で、PgとPnの関係は生長によって変化し、葉面積指数が4~5の時PgはPnの約1.3倍という結果を示している。

ここで桑園の平均的葉面積指数を4~5と仮定し、この結果をあてはめるとPgは1750kg/10aとなり、CO₂吸収量はそれに1.63を乗じた値、即ち2850kg/10aとなる。

NO₂の吸収量は、戸塚¹⁴⁾がHill¹⁵⁾の各種汚染ガス沈着速度の実測を用いてSO₂等の吸収を求めた方法によれば、以下のとおりとなる。

気温を24℃とすると、単位体積あたりの重量はCO₂が1.8×10⁻³g/m³、NO₂が1.89×10⁻⁶g/m³であるから、Hillによる沈着速度実測値、NO₂1.9cm/s、CO₂0.33cm/sからCO₂、350ppmのときのCO₂吸収速度は
[CO₂]=0.33×10⁻²×1.8×350×3600=7484mg/m²/hr
同様にNO₂19ppb(調査地点の実測平均値)の吸収速度は
[NO₂]=1.9×10⁻²×1.89×10⁻³×19×3600
=2.456mg/m²/hr

そこでCO₂350ppmとNO₂19ppbの吸収速度の比を求めると、R[NO₂/CO₂]=0.382mgNO₂/gCO₂となる。

したがって夏切桑園10a当りの年間NO₂吸収量は
W(NO₂)=2850kgCO₂×0.328mgNO₂/gCO₂=935gとなった。

これは埼玉県で作成した乗用車のNO_x排出係数¹⁶⁾、0.49g/km(s63,平均車速35km/h)を用い、日平均トリップ長を20kmとすると95日分に相当する。ただしすでに明らかなようにNO₂レベルが高い地域では濃度に比例してNO₂吸収量も増加するので、NO₂濃度が30ppbのところでは10a当り約150日分を吸収することになる。

まとめ

植物群落による大気汚染低減効果の原因を明らかにするため、1988年6月から10月まで蚕業試験場試験桑園で桑群落内外のNO₂濃度分布調査及び層別刈り取り調査等を実施した。主な結果は以下のとおりである。

- (1) 8月から9月にかけて、自動測定機で密植桑園内外のNO_x、O₃濃度を測定した結果、群落内のNO₂濃度は9.9ppbで群落上外部の12.7ppbより22%低く、O₃濃度も同様に17.1ppbで上外部より1.5ppb、8%下回った。
- (2) 密植桑園の乾物生長は、生長初期以外夏切桑園を上回ったが、その差は主に同化器官量の差に起因し9月29日の葉面積指数は夏切桑園が6.98に対し、密植桑園は9.06に達した。
- (3) 密植桑園と夏切桑園は生産構造に特徴的な差があり、密植桑園は中層から上層に大量の葉が分布するのにに対し、夏切桑園は伸長量が大きく、葉は中層から下層を中心に分布した。
- (4) NO₂濃度及び風速の垂直分布調査の結果、密植桑園はNO₂濃度、風速とも比較的上層から低下が大きかったが、夏切桑園ではいずれも上層から下層にかけて徐々に低下する傾向を示した。密植桑園内の風速変動は夏切桑園にくらべて小さかった。
- (5) 夏切及び春切桑園の葉面積指数をX、NO₂低減率をYとすると、 $Y=5.76X+0.58$ ($r=0.98$) で近似されたが夏期の密植桑園はこれを大幅に上回り、少なくともその差は群落構造の影響と考えられた。
- (6) 夏切桑園の年間のNO₂吸収量を刈り取り法をもとに試算した結果、大気中のCO₂濃度を350ppm、NO₂濃度を19ppbとすると10aあたり935g (CO₂吸収量は2850kg) であった。

謝辞 本調査の実施にあたり、多大なご協力を賜った
蚕業試験場栽桑部の方々に謝意を表します。

文 献

- 1) 小川和雄・高野利一：植物群落の大気浄化効果に関する研究（第1報），埼玉県公害センター年報，〔12〕，45-51,1985
- 2) 小川和雄・高野利一：植物群落の大気浄化効果に関する研究（第2報），埼玉県公害センター年報，〔13〕，56-62,1986
- 3) 小川和雄・高野利一：植物群落の大気汚染低減効果に関する研究，全国公害研会誌，11(3)，33-38，1986
- 4) 小川和雄・高野利一：植物群落の大気浄化効果に関する研究（第3報），埼玉県公害センター年報，〔14〕，48-54，1987
- 5) 小川和雄・高野利一：植物群落の大気浄化効果に関する研究（第4報），埼玉県公害センター年報，〔15〕，63-71，1988
- 6) 松本利恵・小川和雄・高野利一：植物群落の大気浄化効果に関する研究（第5報），埼玉県公害センター年報，〔15〕，72-79，1988
- 7) 小川和雄・高野利一：沿道緑地帯による窒素酸化物低減効果の変動要因，日本環境学会誌，14(3)，3-11，1989
- 8) 平野耕一郎ら：NO・NO₂の簡易測定法，環境と測定技術，12(12)，32-39，1985
- 9) 宇田川武俊・内嶋善兵衛：風と光合成，作物の光合成と物質生産，206-211，1971
- 10) 秋本肇：大気中における窒素酸化物の化学的挙動，第26回大気汚染学会講演要旨集，91-99，1985
- 11) 田崎忠良・田口亮平：実験植物生理生態学実習，204-209，1970
- 12) 大政謙次：植物群落の汚染ガス収着機能，国立公害研究所研究報告，〔10〕367-385，1979
- 13) 増田裕・高野稔：栽植密度を異にする桑園の物質生産，埼玉蚕試研報〔51〕8-12，1979
- 14) 戸塚緒：植物の生産力に基づく各植物群落のガス吸収量の評価，国立公害研究所研究報告〔108〕19-24，1987
- 15) A.Clyde Hill:A Sink for Atmospheric Pollutants, J.Air Pollut. Control Assoc., 21, 341-346,1971
- 16) 移動発生源排出係数と交通量伸び率設定調査報告書，埼玉県環境部，1987