

街路樹と都市気候

境田清隆*

街路樹は都市における貴重な緑地空間であり、コンクリートに覆われて高温・乾燥化する都市気候を緩和する働きをもつ。この論文では仙台市中心部の定禅寺通の観測結果等をもとに、街路樹が夏季の日中を中心に地上気温を1℃以上低下させている事実を示す。しかし大気汚染の観点からは、街路樹が汚染物質を地上付近に滞留させやすい微気候を形成していることがわかった。街路樹等による快適な気候環境を享受するためには、風通しのよい町づくりが必要である。

Effect of Street Trees on Urban Climate

Kiyotaka SAKAIDA*

Street trees provide greenspace for urban area, play a role of controlling urban climate by means of evapotranspiration. This paper presents the temperature of street space with thick trees is about 1.0°C lower than that of the central business district in Sendai. The deviation of temperature increases in the afternoon on sunny days, when ground inversion is developed under the canopy. Street trees have the effect of absorbing pollutant but on the other hand form climatic environment of stagnating polluted air. Our enjoying greenspace of urban area requires well-ventilated urban structure.

1. 都市気候とは

都市がその周辺に比べ特異な気候を呈する現象を都市気候と呼んでいる。都市気候は人間による最大の気候改変であると同時に、この現代社会においては、(皮肉なことに)最も身近な気候環境になっているともいえる¹⁾。

都市気候のうちで最も顕著な現象は、都市内が周辺に比べ高温になる、都市気温あるいはヒートアイランドと呼ばれる現象である。ヒートアイランド(熱の島)とは、都心が最も高温となり、都市縁辺部で気温が急激に低下する等値線図が、島の等高線を連想させることからの命名である。都市気温はすでに19世紀から知られた現象である²⁾が、ヒートアイラ

ンドという命名は、1954年のダッグワースによるもので、その頃から世界的に注目を集め、実態や成因について、地理学や都市工学の分野で研究が進められてきた³⁾。

都市内外の気温差は、東京では8℃、中小都市でも3～5℃に及ぶことがあり、風の弱い晴天日の夜間に大きくなる傾向がある。ヒートアイランド現象の成因としては、①人為起源の排熱、②地表の被覆の変化に伴う蒸発量の減少、③建物や汚染大気からの下向き放射量の増加、などが挙げられる。都市域が拡大し、人間活動が増大するにつれ、ヒートアイランド現象は年々その強度を増している。

熱汚染という言葉があるが、ヒートアイランド現象が、大気汚染のように一方的に阻止・軽減すべきものかどうかは必ずしも自明ではない。ヒートアイランド現象は北国の冬の朝の冷え込みを和らげ、水道管や道路の凍結を少なくすることも事実であろう。しかし夏の日中のコンクリートジャングルの暑さは

* 東北大学大学院理学研究科助教
Associate Professor, Graduate School of Science,
Tohoku University
原稿受理 1996年1月22日

耐えがたいものがあり、その暑さが夜間にまで持ち越される結果、近年、東京などでは最低気温が25℃を下回らない熱帯夜が顕著に増加してきている。寝苦しい夜に窓を開けても涼風は得られず、各家庭は冷房装置に頼ることになる。建物や自動車の冷房装置から吹き出される熱風が、都市の温度をますます上昇させる。その結果、冷房の普及に拍車がかかる。これは快適な気候環境にとっても、またエネルギー消費の観点からも悪しき循環が生じているといつてよいであろう。

2. 街路樹と気温

2-1 公園緑地の気温

夏の日中の炎天下、公園や緑地の樹木に涼を求めた経験は誰もがもっているであろう。都市内部の大小さまざまな緑地がもたらす相対的低温域をクールアイランドと呼ぶことがあるが、そこでは樹木が作る日陰以上の降温効果が期待できる。

前に述べたように、ヒートアイランドの原因の一つが、自然の地表面をアスファルトやコンクリートで覆ってしまったことにあるならば、ヒートアイランド緩和の近道は、自然の地表面を回復させることであろう。水を帯びた地面があること、その上を樹木や草が覆っていることは、太陽エネルギーを蒸発という形で消費する装置が存在することを意味する。同じ緑地という名で呼ばれても、芝地に比べ樹林地における降温効果ははるかに大きいものがある。樹木は、地表に日陰を作り、大地に張りめぐらした根から吸い上げた大量の水分を葉面の無数の気孔から大気に蒸発(蒸散)させるからである。

ある程度まとまった樹林地をもつ都市内緑地において、その内外でどの程度の気温差が生じているのかを調査した例は多い。晴天の日中を中心として内外気温差はかなり大きく、新宿御苑や明治神宮・代々木公園のような規模(50~100ha)の緑地で3.5~4.5℃、小石川植物園や六義園程度の規模(10ha)でも2.0~3.5℃に達する^{4,5)}。また都市内緑地で生成された冷気は、緑地周辺の市街地に拡散する(滲み出す)ことも知られている。このことから都市内部に一定量以上の緑地を適切に配置することによってヒートアイランド現象を中心とする都市気候を緩和しようとするのは自然な発想である。

それでは現実の緑地はその周辺に対して、どの程度の寄与をしているのだろうか。それを明らかにする一つの試みとして、山田・丸田⁶⁾は、杉並区を例



Fig.1 仙台市定禅寺通のケヤキ並木(1995年10月21日撮影)

に丁目単位に緑被率と気温との関係を重回帰分析によって求め、緑被率が10%増加すると、日最高気温で0.32℃、日最低気温で0.25℃の低下が期待できるとしている。

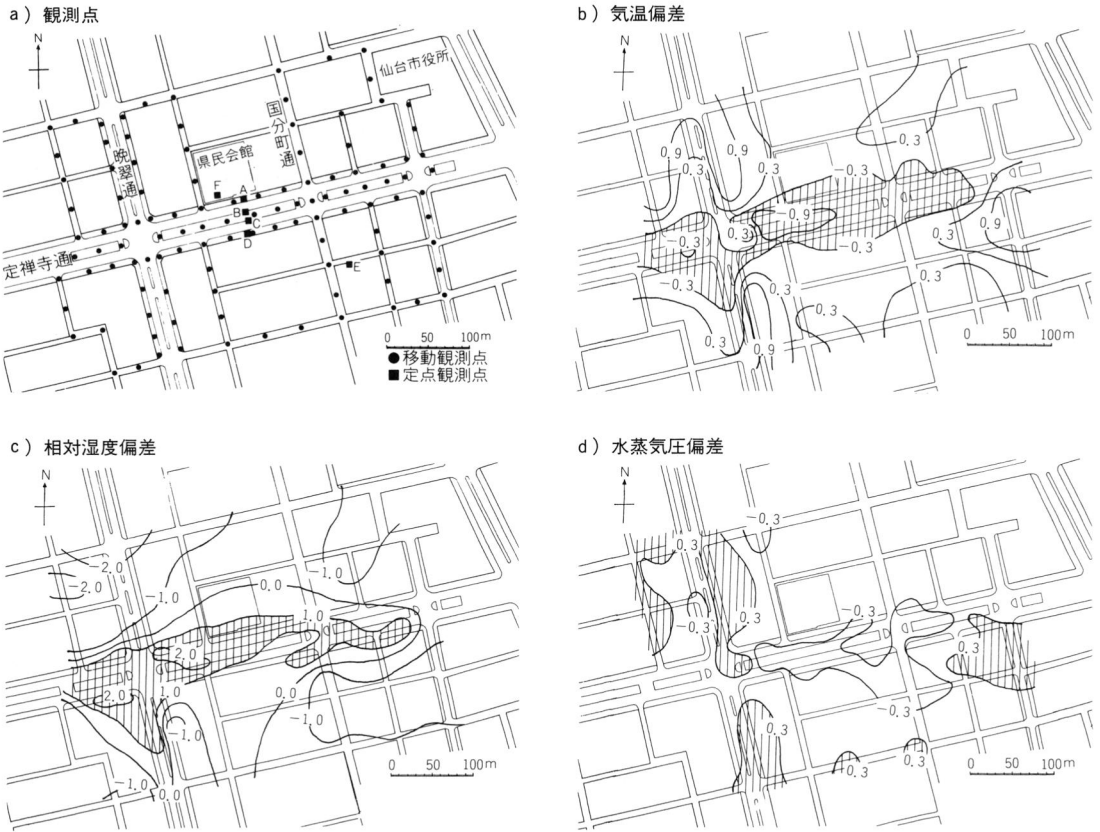
2-2 仙台市定禅寺通の気温

街路樹は公園緑地に比べ当然その規模は小さいものの、建物が密集した市街地においては貴重な緑地空間であり、今後の改変可能性を考えれば、その効果は注目に値する。しかし交通量が多く、オフィスビルが軒を並べる都心の街路樹における緑地効果を調査した例はきわめて少ない。ここでは仙台市定禅寺通の調査を例として、街路樹がつくる気候環境についてみよう。

定禅寺通は宮城県庁・仙台市役所庁舎などがある仙台の中心業務地区をほぼ東西に貫く全長約1.1kmの街路である。戦後の復興事業により、道幅が歩道を含め約46mに拡幅され、幅約12mの中央分離帯には遊歩道が設けられブロンズ像が配置されるなど都市公園化が計られている⁷⁾。

定禅寺通には推定樹齢40~47年、樹高約15mのケヤキが、南北歩道に各1列、中央分離帯に2列の、計4列に、約10m間隔で植栽されている。この付近のケヤキの平均樹冠幅は12.3~14.8mに及ぶので、繁茂期には樹冠部は互いに接触し、トンネル状の様態を呈している(Fig.1)。南北の歩道は街路樹周辺を除いてはコンクリートの敷石で覆われているが、中央歩道部はほぼ全面にわたって土壌が露出し、一部では下草も繁茂している。

仙台市では1973年の旱魃年にケヤキの一部が枯れたことを機に、ケヤキの保護を目的とした環境調査がはじめて実施され、その後もほぼ5年おきに調査が続けられている。このように定禅寺通においては、調査にあたって市の全面的な協力があり、実際の街路樹空間における気象・土壌・生物にわたる貴重な



注) 数値はそれぞれ112地点の平均値 (24.1°C, 45.4%, 13.9mb) に対する偏差値を示す。

Fig.2 定禅寺通付近の気象分布⁸⁾ (晴天日1992年6月27日の14時頃)

データが得られている⁸⁾。

このような定禅寺通で、梅雨の晴れ間の午後、徒歩による気温と湿度の移動観測を行った。その結果は Fig.2のとおりで、気温などの分布は全地点の平均値に対する偏差値の分布として表わされている。(b)から定禅寺通と市街地との気温差は最大2.0°Cとなるのがわかるが、このうち、定禅寺通の街路樹の寄与分は、同じ東西方向の道路との比較から、1.2°C程度と考えられる。相対湿度(c)の分布は気温とは逆の分布となり、定禅寺通は市街地に比べ約3%高くなっている。相対湿度は水蒸気の絶対量が変わらない場合、気温の下降とともに高くなるのは当然である。そこで気温と相対湿度から水蒸気圧を求め、分布図を描いてみると、街路樹下の水蒸気量は市街地に比べ、必ずしも多くはない(d)。すなわち定禅寺通では低温であることによって相対湿度が高くなっているのであって、積極的に水蒸気が供給された状態ではないことがわかった。

次にさまざまな気象条件下における緑地の効果を

みるために、定禅寺通と市街地に設置された温度計によって得られた気温変化を比較したのが Fig.3である(設置場所はFig.2(a)のCとE)。両者を比較すると、日中と夜間を問わず市街地の方が高温になっており、気温差はほぼ0.5~1.5°Cの間で推移している。時刻別では日中から夜間にかけて気温差が大きく、朝(8~9時)に小さくなる傾向がある。また天気との関係では晴天日に大きく(たとえば9月11~13日)、曇天日に小さく(たとえば8月21~22日)なる。定禅寺通の気温が、日中ばかりではなく、夜間においても市街地に比べ低温であるのは、少し奇異かもしれない。確かに街路樹は夜間に地表面からの放射冷却を抑制するはずであるが、その効果は小さく、むしろ熱を効率よく上空に逃していると考えられる。

定禅寺通は昼夜を問わず市街地に比べ1°C前後は低温であり、やはり昼夜を問わず出現するヒートアイランド現象を緩和していることは事実である。定禅寺通は細長く伸びたわずか5 ha程度の緑地であるが、東京の六義園(面積: 9 ha)⁴⁾にも匹敵する緑地

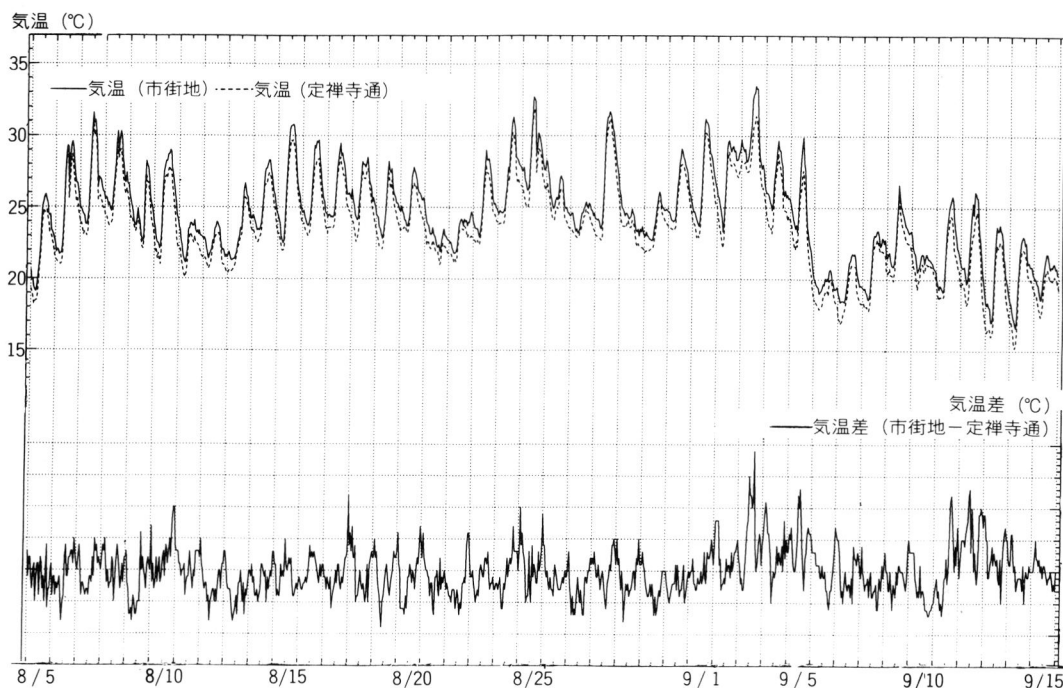


Fig.3 定禅寺通と市街地の気温の比較⁹⁾ (1992年8月5日～9月15日)

効果を発揮しているといえよう。

2-3 街路樹下の気温の鉛直構造

前にも述べたように、街路樹下で低温となる第一の理由はそこが日陰であること、第二の理由は蒸発散による潜熱消費効果である。しかしこの第一の理由は、見方を変えると、太陽エネルギーの受熱面が地表から十数m上空の樹冠部に移ったことを意味する。もちろん(第二の理由から)樹冠部は日向のアスファルト舗装面ほどは高温にならないものの、日の当らなくなった街路樹下の路面よりは温度が高くなっている。

今回の調査の5年前に青葉通で行った調査では、樹冠部などの表面温度を測定し、また無浮力気球を放って都市キャニオン(ビル間空間)内部の空気循環を可視化することを試みた⁹⁾。その結果、夏季の日中では、南向きの建物の壁面とケヤキの樹冠部とが受熱面となって、そこで生成された高温な空気が樹冠部付近に滞留していることが明らかになった。

このような青葉通と定禅寺通の観測結果をまとめて、晴天日のビル間空間の模式断面図を描いたのが次頁 Fig.4 である。無葉期(4月)には、太陽高度がまだ低いこともあって、日射を受ける道路北側で暖気、南側で冷気が形成されるが、他方、壁面に当って反流する風の影響を受け、暖気塊と冷気塊は

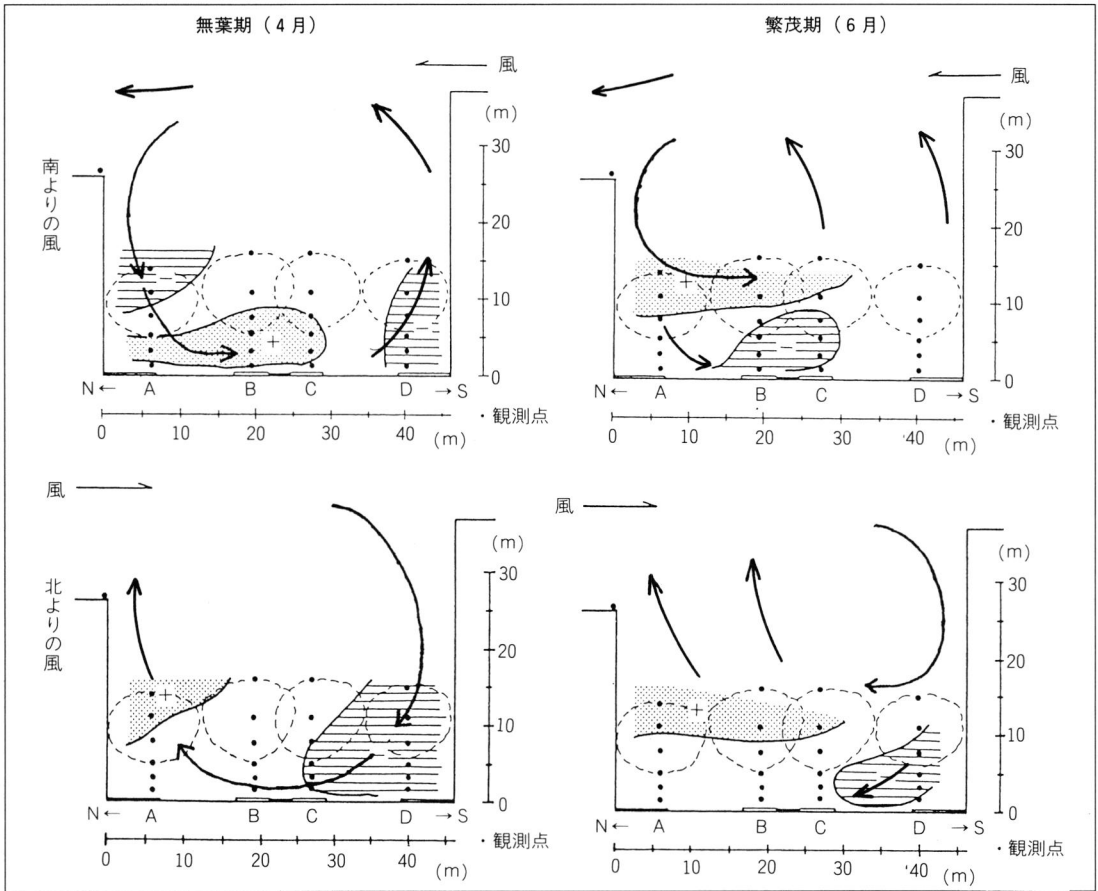
大きく変形する。これに対して繁茂期(6月)では、反流する風は樹冠部で遮られる。日射を受けた樹冠部付近には暖気が滞留し、地表面付近は冷気となる。その結果、風による変形はあまり認められず、上暖下冷の気温分布が安定して存在することになる。

3. 街路樹と大気汚染

3-1 樹木と大気汚染物質

街路樹などの植物体は二酸化炭素を酸素に変え、またさまざまな大気汚染物質を浄化する期待を持たれている。確かに汚染物質は、風とともに樹木を通り抜ける際に、葉面や樹幹に付着することが知られている。また葉面や土壌面に重力落下してそのまま付着するものもある。これらの過程を称して乾性沈着と呼ぶ。乾性沈着物質は雨などによって「洗浄」され、土壌に溶けこむが、これが森林の酸性雨被害の原因の一つとなることは広く知られている¹⁰⁾。

またこれとは別に、葉面の気孔から汚染物質が植物体に吸収されており、この結果、気孔の開閉の調節機能や二酸化炭素の固定機能に障害をもたらすことが知られている。また個々の汚染物質によって、葉肉組織が壊死したり(亜硫酸ガス)、酸化されて生理代謝機能に障害を起こしたり(オキシダント)、葉色に変化を生じたり(窒素酸化物)することもある。



(注) +は高温部、-は低温部、矢印は推定される循環。

出典) 参考文献8) に加筆。

Fig.4 季節別・風向別のビル間空間の気温分布模式図

このような種々の大気汚染被害を蒙る街路樹は、道路における大気環境の指標物としての役割をも担わされている。

しかし一方、気孔から吸収された二酸化窒素は、硝酸イオンからアンモニア、最終的にはタンパク質にまで同化されて、根からの硝酸イオンの吸収と同様に、植物体にとって窒素吸収の重要なプロセスとなっているといわれる。また二酸化硫黄ガスを無害化する酵素を持つ、耐性の高い植物の存在も知られている。このように、汚染物質の吸収能力が高く、植物活性が低下しない植物は大気浄化機能が高い植物とされ、こうした植物の機能をバイオ技術により人為的に高めて、大気環境の保全に積極的に利用しようという研究も始まっている¹¹⁾。

3-2 定禅寺通の大気汚染

しかし現実の街路樹は浄化能力をはるかに越えた厳しい環境に置かれている。仙台市の定禅寺通も路

線バスをはじめとする車輛交通が頻繁で、交通量は平日の日中で、1時間当たり約1,000台に及ぶ。ケヤキ並木は常に排気ガスにさらされ、傷めつけられている。樹幹にはススが付着しているために、1976年からはしばしば石灰硫黄合剤を用いた洗浄が行われている。また歩道の雨水浸透性を高めるなど生育環境の改善が図られているが、少雨年の夏季には不時落葉が目立ち、また根系調査においては、すべての調査木で根頭がしゅ細胞が観察されている⁷⁾。

Fig.5は定禅寺通の街路樹下における窒素酸化物(NOx)濃度の分布を示したもので、12点(3高度×4地点)の平均値に対する濃度の比率(%)で表わしている。このうちa)は1990年7月20日11:30のもので、道路の南側(D地点)で高濃度となっている。上空の風は南風であり、Fig.4で見たように、反流して北風となった地上風が排気ガスを南側に集めたものと推察される。b)は10月18日11:30のもの

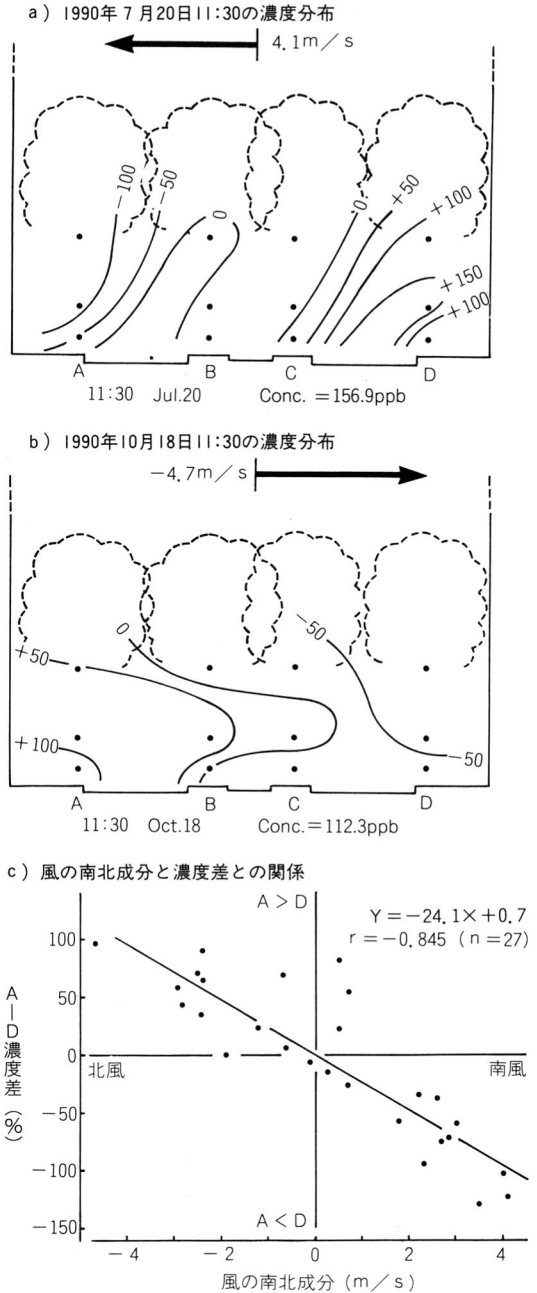
で、逆に上空の北風が排気ガスを道路の北側に集めた結果である。c)は27個の観測例について、上空の風の南北成分と、道路のどちら側で相対的に高濃度になったかを示したもので、上述の現象がかなり一般的に観察されることを示している。

上記の二つの例 a) b)における街路樹下12点の平均濃度は157ppbと112ppbであった。これらの濃度は同時刻における一般環境レベルに比べ1桁高く、また大きな交差点における(自動車排ガス局の)レベルよりも高濃度であった¹²⁾。これは定禅寺通が両側に並ぶビルと街路樹により閉鎖的空間になっているため、それに加えて上述の上暖下冷の気温分布が、大気鉛直運動を抑制した結果であると考えられる。一般に窒素酸化物は夏季に低濃度であるとされているのに、定禅寺通では夏季に秋・冬季と変わらない高濃度が出現していることは、繁茂しすぎたケヤキ並木が大気汚染物質を滞留させやすい微気候を形成していることを示唆している。

3-3 汚染大気を滞留させる街路樹

3-1で述べたように、植物が生体防御能力の範囲内で大気浄化に寄与していることは、人工気象室を用いた実験などでは明らかであるが、野外において、実際にどの程度の大気汚染低減効果を持つかについて明らかにした研究は極めて少ない。ここではその数少ない調査例¹³⁾を紹介して樹木と大気汚染との関係を考えることにする。

調査は埼玉県新座市の平林寺に隣接する約5haの雑木林内と、そこから約600m離れた林外の対照地点とを比較することにより行われた。約半年間にわたる調査期間の平均値では、雑木林内は対照地に比較して、NO₂で11.1%、ダストで17.4%の低減率となった。しかしながら低減率の時刻変化および季節変化は複雑な挙動を示し、植物のガス交換が活発となる日中や夏季に必ずしも低減率が大きくなるとは限らないことがわかった。執筆者たちはこれを雑木林の遮蔽効果が関与しているためとしている。すなわち、日中や夏季に対照地では地表面が日射を受けて対流が起り、自動車の排気ガスの鉛直的な拡散が進む結果、地表付近では濃度が低下するのに対して、葉をつけた雑木林内ではそのプロセスがじゅうぶんに働かないというわけである。確かに室内実験では、気温が高いほど、日射量が多いほど、風速が強いほど、植物のガス交換量は増加する。野外においてもその傾向は存在するにはちがいないが、樹木のない対照地において、晴天・高温・強風下で濃度が低下



注1) a) b)の等値線は街路内平均濃度に対する比率(%)。

2) c)の風は仙台管区気象台(地上52.1m)資料
 出典) 菊地立氏のデータによる。

Fig.5 定禅寺通における窒素酸化物(NOx)濃度

するため、それらが有効に働かない雑木林内では相対的に高濃度になり、大気浄化作用の効果は消されてしまう結果になる。

これは定禅寺通で危惧された事態と基本的には同様である。しかし野外における樹木と大気汚染の関

係は、これらの例でもわかるように、きわめて複雑であり、今後さまざまな場所、さまざまな気象条件で、観測結果を積み重ねていく必要がある。仙台のケヤキもかなり大幅に整枝を進めており、その成果の検証、また定禅寺通と平行し街路樹（イチヨウ）の繁茂がより少ない広瀬通との比較観測なども進められている。

4. 風の道—風通しのよい町への提言

街路樹という都市砂漠における貴重なオアシス、それがヒートアイランドを緩和し都市に潤いをもたらす反面、夏季の日中を中心に汚染大気を滞留させやすい微気候を形成するという事実をみてきた。

また、街路樹やビルより大きな空間規模である都市全体において、数値シミュレーションによって、緑化による気候制御効果を見積ることも行われている。たとえばロサンゼルスでは、緑被を実現可能な範囲で増加させることによって、約1.0°Cの気温低下が期待できるという結果が得られている。しかしこのシミュレーションは同時に、緑化によって海風が弱まり、境界層高度（鉛直的な拡散が行われる高度を示す）が下がるなど、大気汚染にとって好ましくない結果を招く可能性をも示唆している¹⁴⁾。

結局、緑被を増やして都市の昇温の緩和を企図する場合、汚染物質の排出を極力減らすことが前提である。しかしそれが達成されない場合、次善の策として有効な対策は、おそらく都市の風通しをよくすることであろう。近年、南ドイツの諸都市では、郊外の新鮮で冷涼な空気を都市内に導入するような都市計画を立てることが盛んに行われている。シュトゥットガルトは人口56万人の南ドイツ第二の都市であるが、自動車産業の発達に伴って大気汚染が深刻化したため、市当局では都市計画に気候学者を加え、南部の丘陵地の冷気を導入すべく、丘陵地の樹林を保全し、幅100mの「風の道」を確保するなどの都市計画を実行に移している¹⁵⁾。また人口30万人のカールスルーエでも同様の計画が進行中である¹⁶⁾。

ドイツに比べ一般に風が強い日本では、伝統的に強風災害に対する関心は高いものの、静穏（無風）と大気汚染を結びつける思考は不足しがちであった。昭和40年代に至って大気汚染に対する関心が高まる中で、福岡¹⁷⁾は日本国内で2 m/s以下の静穏（無風）の出現率の分布を求め、中部・近畿地方の内陸部で高くなっていることを示した。このことを逆に考えると、海岸では海陸風の交替などによって、一

時的な風を除けば、きわめて静穏とはなりにくいことを示している。

海風は日中のヒートアイランドの緩和にはきわめて有効である¹⁸⁾。盛夏においても、仙台では11時頃に海風が優勢になると30°C前後で昇温が停止してしまう。陸地の昇温に対応して天然の冷房装置が稼動するようなものである。都心の流れ海に下る河川は、このような海風の通り道になって、新鮮で冷涼な空気を運びこみ、ヒートアイランドを寸断し、縮小させる効果をもっている。この河川と類似の効果は、街路樹を伴った幅の広い道を、海風の風向に沿って配置することによっても期待できよう。その点、海岸に近接した日本の諸都市は、内陸の丘陵地に立地する南ドイツの諸都市より、ずっと条件に恵まれているはずである。

人口Pの都市で、ヒートアイランドを消滅させる風速 U_c は、

$$U_c = 3.4 \log P - 11.6$$

と経験的に求められているが¹⁹⁾、この U_c の値を下げるような、すなわち風が効果的にヒートアイランドを緩和するような都市計画が立てられて然るべきである。ただし前述の理由により、街路樹は繁茂しすぎないように、整枝など適切な管理が必要である。また都市計画の立案にあたっては、綿密な観測によって、都市内外の大きささまざまなスケールの風系を適切に把握することが必要であることは言うまでもない。

[謝辞]

本稿の執筆にあたり、大気汚染については東北学院大学の菊地立教授、風の道については東京大学の武内和彦教授に文献のご教示を賜った。記して感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 田宮兵衛「都市気候」和達清夫(監)『気象の事典』東京堂出版、pp.381~384、1993年
- 2) 吉野正敏「都市気候学小史(1)(2)」『天気』4、pp.21~25、51~55、1957年
- 3) 河村武(編)『都市の大気環境』東京大学出版会、1979年
- 4) 三上岳彦「都市内部における公園緑地の気候」『お茶の水女子大学人文科学紀要』35、pp.21~36、1982年
- 5) 浜田崇・三上岳彦「都市内緑地のクールアイランド現象—明治神宮・代々木公園を事例として

- 一) 『地理評』 67A、pp.518～529、1994年
- 6) 山田宏之・丸田頼一「緑地による都市気象緩和作用の定量的解析」『造園雑誌』 54、pp.299～304、1991年
- 7) 日比野紘一郎「街路樹」仙台市史編纂委員会編『仙台市史特別編自然』 pp.406～417、1994年
- 8) 境田清隆・鈴木雅幸「密生した街路樹をもつ路上空間における晴天日の気温分布」『地理評』 67A、pp.506～517、1994年
- 9) 田坂郁夫・高橋日出男・設楽寛「都市キャニオンにおける気温分布および空気循環の観測」『地理評』 61A、pp.541～559、1988年
- 10) 大喜多敏一編著「酸性雨(Ⅱ)」『気象研究ノート』 182、pp.119～126、1994年
- 11) 入船浩平・森川弘道「都市の緑地環境」福岡義隆編著『都市の風水土』朝倉書店、pp.74～85、1995年
- 12) 菊地立・石川勲・境田清隆「ケヤキ並木をとまなう街路における微気象と大気汚染の動態」宮城県緑化研究会編『仙台市ケヤキ街路樹保護総合調査報告書』仙台市、pp.13～47、1991年
- 13) 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」『全国公害研究会誌』 11、pp.141～146、1986年
- 14) Sailor, D. J. : Simulated urban climate response to modifications in surface albedo and vegetative cover. *Journal of Applied Meteorology*, 34, pp.1694～1704, 1995
- 15) 一ノ瀬俊明「シュトゥットガルトにおける「風の道」—都市計画で都市気候を制御する試み—」『天気』 40、pp.691～693、1993年
- 16) 丸田頼一「都市緑地の計画」『公園緑地』 47-4、pp.14～26、1986年
- 17) 福岡義隆「静穏形成に関する気候学的考察」『地理評』 44、pp.740～750、1971年
- 18) 片山忠久「都市の風と熱環境」『気候影響・利用研究会会報』 11、pp.74～87、1995年
- 19) Oke, T. R. : *Boundary layer climates*. Methuen, London, 1987