

富山県における樹木の大气汚染物質吸収能力の比較*

近藤 隆之**・神保 高之**・島田 和保**
大西 勝典**・大政 謙次***

キーワード ①大気汚染物質 ②樹木 ③吸収能力 ④気孔コンダクタンス

Abstract

To compare the ability of tree species to absorb air pollutants, such as formaldehyde, C_2 – C_5 aldehydes, phenol, NO_2 , SO_2 , and O_3 , the stomatal conductance of various tree species was measured in Toyama prefecture, Japan. Stomatal conductance was measured in the field by using a diffusion porometer during the daytime in the Botanic Gardens of Toyama (31 species) and the Toyama Forestry and Forest Products Research Center (Forest Experiment Station) (16 species), in June 1998 and September 1999. The mean stomatal conductances of the studied trees ranged from 0.07 (*Acer japonicum*, *Osmanthus fragrans*, *Myrica rubra*, *Camellia hiemalis*) to 0.25 $mol\ m^{-2}\ s^{-1}$ (*Robinia pseudo-acacia*) in the Botanic Gardens of Toyama and 0.07 (*Pasania edalis*) to 0.21 $mol\ m^{-2}\ s^{-1}$ (*Hibiscus syriacus*, *Castanopsis cuspidata*) in the Toyama Forestry and Forest Products Research Center. *Robinia pseudo-acacia*, *Hibiscus syriacus*, and *Lagerstroemia indica* had higher stomatal conductances for deciduous tree species. *Castanopsis cuspidata*, *Cinnamomum camphora*, *Nerium indicum*, and *Quercus myrsinaefolia* had higher stomatal conductances for evergreen tree species. In both measurement sites, the mean stomatal conductance of deciduous species was higher than that of evergreen species and the mean stomatal conductance in June was higher than that in September for deciduous tree species. The single tree of *Zelkova serrata* (total leaf area; 1000 m^2) in urban areas of Toyama prefecture was estimated to absorb 60 mg NO_2 , 82 mg O_3 , 9.7 mg SO_2 , 5.5 mg formaldehyde, 2.4 mg acetaldehyde in one hour in the daytime.

1. 緒 言

平成12年版環境白書¹⁾によれば、近年、全国の NO_2 の環境基準達成率は、大都市地域を中心に依然低い水準である。このため、自動車 NO_x 法が制定され、東京都や大阪府などの特定地域では各種施策が実施されているが、自動車排出ガス測定

局を中心に依然改善がみられない。また、光化学オキシダントについても大部分の測定局で環境基準を達成しておらず、平成11年度の注意報発令延日数は大都市地域を中心に全国で100日にも達している¹⁾。

植物は葉の気孔を介して NO_2 ²⁾、 O_3 ²⁾、 SO_2 ³⁾

*Comparison of Ability of Tree Species to Absorb Air Pollutants in Toyama Prefecture, Japan.

**Takayuki KONDO, Takayuki JINBO, Kazuyasu SHIMADA, Masanori ONISHI(富山県環境科学センター)Toyama Prefectural Environmental Science Research Center

***Kenji OMASA(東京大学大学院農学生命科学研究科)The University of Tokyo, Graduate School of Agriculture and Life Sciences

などの無機大気汚染物質を吸収することが知られており、大政⁴⁾は都市地域の気環境改善手段の一つとして、樹木による排気ガス対策の可能性について提言している。また、環境省においても樹木の気汚染物質吸収能力を活用するため「大気浄化植樹指針」⁵⁾を示し、都市地域の街路樹や公園木を大気浄化に積極的に役立てようとしている。

一方近年、多様な有害化学物質が大気中から検出され、その長期ばく露による健康影響が懸念されている。このため、平成8年5月に大気汚染防止法が改正され、有害大気汚染物質の優先取組物質としてホルムアルデヒドやアセトアルデヒドなど22物質がリストアップされ全国的にモニタリングがなされている¹⁾。平成10年度有害大気汚染物質モニタリング調査結果⁶⁾によれば、全国の沿道測定地点(62地点)のホルムアルデヒド濃度は $0.9\sim 23\mu\text{g m}^{-3}$ (平均 $4.7\mu\text{g m}^{-3}$)、アセトアルデヒド濃度は $0.78\sim 16\mu\text{g m}^{-3}$ (平均 $3.6\mu\text{g m}^{-3}$)である。日本においてはホルムアルデヒドやアセトアルデヒドに対する環境基準はまだ定められていないが、米国EPAが大気環境濃度の指標として示した発がん性 10^{-5} リスク濃度はホルムアルデヒド $0.8\mu\text{g m}^{-3}$ 、アセトアルデヒド $5\mu\text{g m}^{-3}$ であり⁶⁾、平成10年度の沿道測定地点の調査結果と比較するとホルムアルデヒドは全測定地点で、また、アセトアルデヒドも一部の地点でこれを上回っており、都市地域を中心に環境汚染が深刻である。

最近、われわれはホルムアルデヒド^{7,8)}、 $\text{C}_2\text{-C}_5$ アルデヒド(アセトアルデヒド、プロピオンアルデヒド、ブチルアルデヒド、バレルアルデヒド)⁹⁾、フェノール^{10,11)}が気孔を介して樹木に吸収され、その吸収速度が NO_2 などの無機大気汚染物質に対する吸収速度と同程度であることから、樹木がこれらの有害大気汚染物質の重要な沈着源であることを明らかにした。

このように、無機大気汚染物質(NO_2 , O_3 , SO_2)と有害大気汚染物質(ホルムアルデヒド、 $\text{C}_2\text{-C}_5$ アルデヒド、フェノール)がいずれも気孔を介して植物に吸収されることから、気孔コンダクタンスを測定することにより容易にこれらの大気汚染物質吸収能力を比較することができる。本論文では、富山県における大気汚染物質吸収能力の大き

な樹木を明らかにするため、富山県中央植物園と富山県林業技術センター林業試験場において野外に生育している樹木の気孔コンダクタンスを拡散型ポロメータにより測定し、樹木のこれら大気汚染物質の吸収能力を比較するとともに、樹木の大気汚染物質吸収量について試算を試みた。

2. 測定方法

富山県中央植物園(富山県婦負郡婦中町)と富山県林業技術センター林業試験場(富山県中新川郡立山町)において、それぞれ1998年6月と1999年9月に、野外に生育している落葉広葉樹と常緑広葉樹の水蒸気気孔コンダクタンスの測定を行った。調査時期を6月と9月にしたのは、落葉広葉樹の新葉が展開し終えた6月と、紅葉や落葉が始まる前の9月に測定を行い、落葉広葉樹の平均的な気孔コンダクタンスを求めるためである。

樹木の水蒸気気孔コンダクタンスの測定は、拡散型ポロメータ(島津SPB-H4)を用いて行った。このポロメータ法では測定する樹木葉を生育環境とほぼ同じ温湿度条件に保ったまま測定できる。測定は晴または曇りの日の9:30から16:00の間に行い、樹木の東西方向の枝先に近いそれぞれ2枚、計4枚の葉の気孔コンダクタンスを測定して平均し、これを1回の測定値とした。これは、一般に樹冠の南北方向では光条件が偏りすぎるため中間的な東西方向を選んだ。常緑広葉樹では当年生葉と多年生葉の比率が等しくなるよう測定を行った。また、樹木の気孔コンダクタンスは測定時の気象条件の影響を受けることから、測定日や測定時刻を変えて各樹木に対してそれぞれ5~20回(**Table 1, 2**)の測定を行い、富山県の平均的な気象条件下における各樹木の気孔コンダクタンスを求めよう努めた。測定樹木としては、主に街路樹、公園木、庭木などに植栽される樹木を選んだが、一部山間地域にみられる樹木についても測定を行った。

富山県中央植物園は富山市中心から南西方向約5 km地点の平野部にあり、24.7haの園内に約4000種類の植物を有している。富山県中央植物園では、落葉広葉樹としてハリエンジュ(*Robinia pseudo-acacia* L.)、ムクゲ(*Hibiscus syriacus* L.)、サルスベリ(*Lagerstroemia indica* L.)、アオギリ

(*Firmiana simplex* W. F. Wight), クスギ(*Quercus acutissima* Carruth.), イチョウ(*Ginkgo biloba* L.), ミズナラ(*Quercus mongolica* Fisch. ex Turcz. var. *grosseserrata* (Bl.) Rehd. et Wils.), ユリノキ(*Liriodendron tulipifera* L.), ネムノキ(*Albizia julibrissin* Durazz.), ソメイヨシノ(*Prunus yedoensis* Matsum.), トウカエデ(*Acer buergerianum* Miq.), エンジュ(*Sophora japonica*), エノキ(*Celtis sinensis* Pers. var. *japonica* Nakai), ケヤキ(*Zelkova serrata* Makino), プラタナス(*Platanus orientalis* L.), イロハモミジ(*Acer palmatum* Thunb.), ハクモクレン(*Magnolia denudata* Desr.), コナラ(*Quercus serrata* Thunb.), ハウチワカエデ(*Acer japonicum* Thunb.) の計19樹種, 常緑広葉樹としてクスノキ(*Cinnamomum camphora* Sieb.), キョウチクトウ(*Nerium indicum* Mill.), マテバシイ(*Pasania edalis* Makino), スダジイ(*Castanopsis cuspidata* (Thunb.) Schottky var. *sieboldii* (Makino) Nakai), タイサンボク(*Magnolia grandiflora* L.), アラカシ(*Quercus glauca* Thunb.), トウネズミモチ(*Ligustrum lucidum* Ait.), シラカシ(*Quercus myrsinaefolia* Blume), モッコク(*Ternstroemia gymnantheria* Sprague), キンモクセイ(*Osmanthus fragrans* Lour. var. *aurantiacus* Makino), ヤマモモ(*Myrica rubra* Sieb. et Zucc.), カンツバキ(*Camellia hiemalis* Nakai) の計12樹種, 合計31樹種の測定を行った。測定樹木が31樹種と多かったため測定樹木を2つのグループ(**Table 1**)に分け, 第1グループは12回(6月6回, 9月6回), 第2グループは8回(6月5回, 9月3回)測定を行った。なお, アオギリとトウカエデについては, 植物園の都合により1999年9月は測定できなかった。

富山県林業試験場は富山市中心から南東方向約15km地点の丘陵地にあり, 約350種類・23000本の樹木からなる樹木園(13.7ha)が整備されている。富山県林業試験場では, 落葉広葉樹としてムクゲ, オオシマザクラ(*Prunus lannesiana* (Carr.) Wils. var. *speciosa* (Koidz.) Makino), ホオノキ(*Magnolia obovata* Thunb.), ハルニレ(*Ulmus davidiana* Planch. var. *japonica* (Rehd.) Nakai), ブナ(*Fagus crenata* Blume), ミズナラ, モクレン(*Magnolia liliflora* Desr.), カツラ(*Cercidiphyll-*

lum japonicum Sieb. et Zucc.), ケヤキ, イチョウ, プラタナスの計11樹種, 常緑広葉樹としてスダジイ, シラカシ, タイサンボク, モッコク, マテバシイの計5樹種, 合計16樹種の測定を行った。全樹木を1つのグループとし, 1998年6月に6回, 1999年9月に4回測定を行った。

なお, 富山県中央植物園, 富山県林業試験場ともに, 同一グループ内の樹木は同じ測定日に連続して順次測定を行い1回の測定とした。

3. 結果および考察

3.1 樹木の気孔コンダクタンスの比較

富山県中央植物園と富山県林業試験場における樹木の気孔コンダクタンス測定結果を**Table 1**, **Table 2**に示す。富山県中央植物園における測定樹木の1998年6月と1999年9月の気孔コンダクタンスの平均値は0.07 (ハウチワカエデ, キンモクセイ, ヤマモモ, カンツバキ)~0.25mol m⁻² s⁻¹ (ハリエンジュ)の範囲にあり, 落葉広葉樹の平均気孔コンダクタンスは0.14mol m⁻² s⁻¹, 常緑広葉樹の平均気孔コンダクタンスは0.11mol m⁻² s⁻¹であった。また, 調査時の気象条件は, 平均日射量1.58MJ m⁻² h⁻¹, 平均湿度58.1%, 平均気温25.3℃であった。

富山県林業試験場における測定樹木の1998年6月と1999年9月の気孔コンダクタンスの平均値は0.07 (マテバシイ)~0.21mol m⁻² s⁻¹ (ムクゲ, スダジイ)の範囲にあり, 落葉広葉樹の平均気孔コンダクタンスは0.15mol m⁻² s⁻¹, 常緑広葉樹の平均気孔コンダクタンスは0.12mol m⁻² s⁻¹であった。また, 調査時の気象条件は, 平均日射量2.07MJ m⁻² h⁻¹, 平均湿度67.7%, 平均気温26.9℃であった。

このように, 富山県中央植物園と富山県林業試験場の測定樹木の気孔コンダクタンスはほぼ同程度の範囲にあり, また両地点とも落葉広葉樹の平均気孔コンダクタンスが常緑広葉樹に比べ大きかった。個別の樹種としては, 落葉広葉樹ではハリエンジュ, ムクゲ, サルスベリ, アオギリ, クスギ, オオシマザクラ, ホオノキなど, 常緑広葉樹ではスダジイ, クスノキ, キョウチクトウ, シラカシなどが大気汚染物質吸収能力の大きい樹木といえる。

Table 1 Stomatal Conductance of Tree Species in the Botanic Gardens of Toyama.

Tree species	Group	n	Stomatal conductance/mol m ⁻² s ⁻¹		
			June-98	September-99	Mean
Deciduous broad-leaved trees					
<i>Robinia pseudo-acacia</i>	2	8	0.29±0.17 ^{a)}	0.21±0.01 ^{a)}	0.25
<i>Hibiscus syriacus</i>	1	11	0.25±0.10	0.19±0.03	0.22
<i>Lagerstroemia indica</i>	2	8	0.25±0.08	0.18±0.05	0.22
<i>Firmiana simplex</i>	1, 2	11	0.19±0.07	—	0.19
<i>Quercus acutissima</i>	1	12	0.17±0.04	0.20±0.07	0.19
<i>Ginkgo biloba</i>	2	8	0.18±0.04	0.12±0.01	0.15
<i>Quercus mongolica</i>	2	6	0.16±0.04	0.13±0.04	0.15
<i>Liriodendron tulipifera</i>	1, 2	14	0.14±0.06	0.15±0.05	0.15
<i>Albizia julibrissin</i>	2	8	0.12±0.05	0.17±0.03	0.15
<i>Prunus yedoensis</i>	2	8	0.21±0.07	0.07±0.02	0.14
<i>Acer buergerianum</i>	2	5	0.12±0.03	—	0.12
<i>Sophora japonica</i>	1	12	0.13±0.03	0.10±0.03	0.12
<i>Celtis sinensis</i>	1	12	0.12±0.03	0.10±0.02	0.11
<i>Zelkova serrata</i>	1, 2	20	0.14±0.03	0.06±0.01	0.10
<i>Platanus orientalis</i>	2	8	0.09±0.04	0.11±0.02	0.10
<i>Acer palmatum</i>	2	8	0.11±0.04	0.06±0.01	0.09
<i>Magnolia denudata</i>	1	12	0.05±0.01	0.12±0.02	0.09
<i>Quercus serrata</i>	1	11	0.07±0.03	0.08±0.01	0.08
<i>Acer japonicum</i>	2	8	0.10±0.03	0.04±0.01	0.07
Mean			0.15	0.12	0.14
Evergreen broad-leaved trees					
<i>Cinnamomum camphora</i>	1	12	0.16±0.05	0.17±0.02	0.17
<i>Nerium indicum</i>	1, 2	20	0.17±0.08	0.14±0.03	0.16
<i>Pasania edalis</i>	1	12	0.12±0.03	0.13±0.02	0.13
<i>Castanopsis cuspidata</i>	1	12	0.12±0.03	0.11±0.03	0.12
<i>Magnolia grandiflora</i>	1	12	0.13±0.04	0.08±0.05	0.11
<i>Quercus glauca</i>	1, 2	20	0.11±0.04	0.09±0.03	0.10
<i>Ligustrum lucidum</i>	1	12	0.10±0.03	0.10±0.04	0.10
<i>Quercus myrsinaefolia</i>	1	12	0.10±0.02	0.09±0.02	0.10
<i>Temstroemia gymnantheria</i>	1	12	0.06±0.03	0.10±0.02	0.08
<i>Osmanthus fragrans</i>	2	8	0.08±0.02	0.06±0.02	0.07
<i>Myrica rubra</i>	2	8	0.08±0.03	0.06±0.02	0.07
<i>Camellia hiemalis</i>	1	12	0.08±0.02	0.06±0.02	0.07
Mean			0.11	0.10	0.11
Solar radiation/MJ m ⁻² h ⁻¹			1.70	1.46	1.58
Relative humidity/%			61.4	54.8	58.1
Temperature/°C			23.3	27.3	25.3

a) Mean value and standard deviation.

藤沼ら¹²⁾は、茨城県において各種樹木の葉面拡散抵抗値を測定し、落葉広葉樹が常緑広葉樹に比べ大気汚染物質吸収能力が大きいと報告している。今回の測定樹木は藤沼らの測定樹木と同一ではないものの、富山県においても落葉広葉樹が常

緑広葉樹に比べ大気汚染物質吸収能力が大きく、藤沼らと同様の結果であった。

また、ケヤキ、ムクゲ、プラタナス、イチヨウ、ミズナラ、スダジイ、モッコク、マテバシイ、シラカシ、タイサンボクの10樹種は富山県中央植物

Table 2 Stomatal Conductance of Tree Species in the Toyama Forestry and Forest Products Research Center (Forest Experiment Station).

Tree species	n	Stomatal conductance/mol m ⁻² s ⁻¹		
		June-98	September-99	Mean
Deciduous broad-leaved trees				
<i>Hibiscus syriacus</i>	9	0.24±0.11 ^{a)}	0.17±0.04 ^{a)}	0.21
<i>Prunus lannesiana</i>	10	0.23±0.06	0.15±0.01	0.19
<i>Magnolia obovata</i>	10	0.21±0.06	0.17±0.01	0.19
<i>Ulmus davidiana</i>	10	0.15±0.05	0.18±0.15	0.17
<i>Fagus crenata</i>	10	0.19±0.05	0.12±0.01	0.16
<i>Quercus mongolica</i>	10	0.22±0.11	0.07±0.02	0.15
<i>Magnolia liliflora</i>	10	0.15±0.06	0.14±0.03	0.15
<i>Cercidiphyllum japonicum</i>	10	0.17±0.07	0.09±0.01	0.13
<i>Zelkova serrata</i>	10	0.12±0.04	0.11±0.02	0.12
<i>Ginkgo biloba</i>	10	0.14±0.07	0.08±0.02	0.11
<i>Platanus orientalis</i>	10	0.10±0.03	0.10±0.03	0.10
Mean		0.17	0.13	0.15
Evergreen broad-leaved trees				
<i>Castanopsis cuspidata</i>	10	0.24±0.05	0.17±0.02	0.21
<i>Quercus myrsinaefolia</i>	10	0.20±0.08	0.12±0.02	0.16
<i>Magnolia grandiflora</i>	10	0.07±0.02	0.13±0.08	0.10
<i>Ternstroemia gymnantheria</i>	10	0.06±0.01	0.09±0.02	0.08
<i>Pasania edulis</i>	10	0.06±0.03	0.08±0.02	0.07
Mean		0.13	0.12	0.12
Solar radiation/MJ m ⁻² h ⁻¹		1.89	2.24	2.07
Relative humidity/%		76.5	58.8	67.7
Temperature/°C		25.9	27.9	26.9

a) Mean value and standard deviation.

園と富山県林業試験場で共通して測定した樹木であるが、両地点におけるこれら樹木の気孔コンダクタンスの間には危険率5%で有意な正の相関関係($r=0.550$)が認められ、両地点の樹木の気孔コンダクタンスには同じような傾向がみられた。

なお、富山地方気象台によれば1998年6月と1999年9月の富山市の月間降水量はそれぞれ135.0mm¹³⁾、424.5mm¹⁴⁾と十分な降水があり、また、4日以上連続して降雨がなかった調査日はなかった。

3.2 樹木の気孔コンダクタンスの季節変化

富山県中央植物園の測定結果(**Table 1**)では、落葉広葉樹の平均気孔コンダクタンスは6月調査0.15mol m⁻² s⁻¹、9月調査0.12mol m⁻² s⁻¹であり、17樹種のうち11樹種で6月調査の気孔コンダクタンスが9月調査に比べ大きかった。また、

常緑広葉樹の平均気孔コンダクタンスは6月調査0.11mol m⁻² s⁻¹、9月調査0.10mol m⁻² s⁻¹であり、12樹種のうち8樹種で6月調査の気孔コンダクタンスが9月調査に比べ大きかったが、平均値では大きな季節変化はみられなかった。

富山県林業試験場の測定結果(**Table 2**)では、落葉広葉樹の平均気孔コンダクタンスは6月調査0.17mol m⁻² s⁻¹、9月調査0.13mol m⁻² s⁻¹であり、ハルニレとプラタナス以外は6月調査の気孔コンダクタンスが9月調査に比べ大きかった。一方、常緑広葉樹の平均気孔コンダクタンスは6月調査0.13mol m⁻² s⁻¹、9月調査0.12mol m⁻² s⁻¹であり、スダジイ、シラカシでは6月調査、その他の3樹種は9月調査の測定値が大きく一定の傾向はみられなかったが、平均値では大きな季節変化はみられなかった。

以上のように、落葉広葉樹の気孔コンダクタンスはおおむね6月が9月に比べ大きく、6月調査に対する9月調査の平均気孔コンダクタンスの減少率は両地点とも約20%であった。一方、常緑広葉樹の平均気孔コンダクタンスには両地点とも大きな季節変化はみられなかった。また、個別の樹種としては、落葉広葉樹ではユリノキ、プラタナス、コナラ、クムギ、エノキ、モクレン、ハルニレ、ホオノキ、常緑広葉樹ではトウネズミモチ、クスノキ、キョウチクトウ、アラカシなどが気孔コンダクタンスの季節変化が比較的小さく、大気汚染物質吸収能力が安定している樹木といえる。

3.3 樹木の気孔コンダクタンスと気象条件の関係

樹木の気孔コンダクタンスは日射量、湿度、気温などの気象条件の影響を受けることが知られているが¹⁵⁾、個別の樹種では気象条件から受ける影響も樹種毎に異なると考えられる。このため、個別の樹種の気孔コンダクタンスを目的変数、測定時の日射量、湿度、気温を説明変数として重回帰分析を行った。富山県中央植物園と富山県林業試験場における重回帰分析結果をそれぞれ **Table 3**、**Table 4** に示す。

日射量についてみると、富山県中央植物園では全樹種で日射量の偏回帰係数はプラスとなり、ミズナラ、キョウチクトウ、スダジイ、タイサンボク、ヤマモモの5樹種については1%の危険率で、クスギ、エノキ、アラカシ、トウネズミモチの4樹種については5%の危険率で日射量との間に有意な正の相関関係が認められた。また、富山県林業試験場においてもオオシマザクラ、ホオノキ、ミズナラ、イチヨウを除くその他全樹種で日射量の偏回帰係数はプラスとなり、ブナ、モクレン、ケヤキの3樹種については5%の危険率で日射量との間に有意な正の相関関係が認められた。

湿度についてみると、富山県中央植物園では約85%の樹種で湿度の偏回帰係数はプラスとなり、アオギリ、ミズナラ、タイサンボク、モッコクの4樹種については5%の危険率で湿度との間に有意な正の相関関係が認められた。また、富山県林業試験場ではタイサンボクとモッコクを除くその他全樹種で湿度の偏回帰係数はプラスとなり、ブナ、ミズナラ、カツラの3樹種については1%の危険率で、オオシマザクラについては5%の危険

率で湿度との間に有意な正の相関関係が認められた。

気温についてみると、富山県中央植物園では約70%の樹種で気温の偏回帰係数はプラスとなり、ハクモクレンについては1%の危険率で、モッコクについては5%の危険率で気温との間に有意な正の相関関係が認められた。また、富山県林業試験場では約60%の樹種の偏回帰係数はマイナスとなり、オオシマザクラについては5%の危険率で気温との間に有意な負の相関関係が認められた。

このように、個別の樹種の気孔コンダクタンスに対する重回帰分析の結果から、日射量は多くの樹木にとって気孔コンダクタンスを増加させる気象因子といえる。また、湿度についてもおおむね樹木の気孔コンダクタンスを増加させる気象因子といえ、これは樹木が日中水ストレスの影響を受けているためと考えられる。一方、気温については明確な傾向はみられなかった。

また、富山県中央植物園では、ミズナラ、ハクモクレン、タイサンボク、ヤマモモの4樹種が危険率1%で、アオギリ、クスギ、キョウチクトウ、スダジイ、アラカシの5樹種が危険率5%で今回得られた重回帰式が有意であった。また、富山県林業試験場では、オオシマザクラ、ブナ、カツラの3樹種が危険率1%で、ミズナラ、ケヤキが危険率5%で今回得られた重回帰式が有意であった。このことから、これらの樹種の気孔コンダクタンスは比較的気象条件の影響を受けやすいといえる。

3.4 樹木による大気汚染物質吸収量の試算

大政¹⁶⁾は植物群落の大気汚染物質吸収量の試算を行っているが、植物群落では群落の内部と外部、また内部でも群落上面からの深さにより日射量、風速、大気汚染物質濃度などが変化するため、群落内の植物葉の気孔コンダクタンスや葉面境界層コンダクタンスはそれぞれの位置により異なり、このため植物群落の大気汚染物質吸収量を求めるには拡散モデルによる複雑な計算が必要となる。今回は、ケヤキ群落内の1本のケヤキに吸収される大気汚染物質吸収量の試算を試みたが、簡略化のため樹冠部の光強度は水平面に対しては一樣とするが鉛直方向では上部から下部にかけて減少しそれに対応して気孔コンダクタンスも減少するも

Table 3 Regression Coefficient of Multilinear Regression Analysis for Stomatal Conductance in the Botanic Gardens of Toyama.

Tree species	n	R	Regression coefficient			
			Solar radiation	Relative humidity	Temperature	Constant
Deciduous broad-leaved trees						
<i>Robinia pseudo-acacia</i>	8	0.641	0.0325	-0.0090	0.0150	0.429
<i>Hibiscus syriacus</i>	11	0.333	0.0213	-0.0002	-0.0036	0.283
<i>Lagerstroemia indica</i>	8	0.814	0.0624	0.0009	0.0016	0.031
<i>Firmiana simplex</i>	11	0.825*	0.0278	0.0054*	0.0188	-0.633
<i>Quercus acutissima</i>	12	0.792*	0.0351*	0.0032	0.0101	-0.299
<i>Ginkgo biloba</i>	8	0.654	0.0288	0.0033	-0.0039	-0.010
<i>Quercus mongolica</i>	6	0.997**	0.0592**	0.0027*	0.0016	-0.137
<i>Liriodendron tulipifera</i>	14	0.589	0.0297	0.0013	0.0076	-0.165
<i>Albizia julibrissin</i>	8	0.481	0.0022	-0.0024	0.0046	0.174
<i>Prunus yedoensis</i>	8	0.690	0.0828	0.0023	-0.0214	0.389
<i>Acer buergerianum</i>	5	0.967	0.0045	0.0036	0.0289	-0.822
<i>Sophora japonica</i>	12	0.751	0.0175	0.0013	-0.0032	0.099
<i>Celtis sinensis</i>	12	0.767	0.0211*	0.0010	-0.0014	0.054
<i>Zelkova senata</i>	20	0.523	0.0200	0.0007	-0.0046	0.148
<i>Platanus orientalis</i>	8	0.790	0.0238	0.0018	-0.0061	0.098
<i>Acer palmatum</i>	8	0.468	0.0081	0.0018	0.0058	-0.179
<i>Magnolia denudata</i>	12	0.893**	0.0100	0.0009	0.0102**	-0.237
<i>Quercus senata</i>	11	0.487	0.0112	0.0003	0.0016	-0.004
<i>Acer japonicum</i>	8	0.461	0.0184	0.0011	0.0000	-0.027
Evergreen broad-leaved trees						
<i>Cinnamomum camphora</i>	12	0.659	0.0211	-0.0002	0.0033	0.051
<i>Nerium indicum</i>	20	0.698*	0.0517**	0.0016	0.0029	-0.095
<i>Pasania edalis</i>	12	0.622	0.0197	0.0006	0.0021	0.002
<i>Castanopsis cuspidata</i>	12	0.806*	0.0329**	0.0006	-0.0002	0.023
<i>Magnolia grandiflora</i>	12	0.901**	0.0483**	0.0060*	0.0033	-0.377
<i>Quercus glauca</i>	20	0.689*	0.0202*	0.0019	0.0048	-0.165
<i>Ligustrum lucidum</i>	12	0.750	0.0290*	0.0035	0.0057	-0.279
<i>Quercus myrsinaefolia</i>	12	0.651	0.0133	0.0003	0.0006	0.042
<i>Temstroemia gymnantheria</i>	12	0.777	0.0031	0.0041*	0.0093*	-0.378
<i>Osmanthus fragrans</i>	8	0.388	0.0102	-0.0004	-0.0052	0.208
<i>Myrica rubra</i>	8	0.975**	0.0293**	0.0003	-0.0040	0.100
<i>Camellia hiemalis</i>	12	0.504	0.0125	0.0012	0.0010	-0.039

R: Multiple correlation coefficient * : Signif. LE. 5% ** : Signif. LE. 1%

の、樹冠の各部位における葉面境界層抵抗、大気汚染物質濃度、葉面積密度は一定と仮定して大まかな試算を行った。

吸収量の試算を行ったのはケヤキ群落内の1本のケヤキとし、樹高20m、胸高直径50cmの成木で、樹冠部は高さ11m、幅14mの円筒形で、その総葉面積は胸高直径が50cmの落葉広葉樹高木の推定値である1000m² (片側)¹⁷⁾と仮定した。今回

の測定で得られたケヤキの水蒸気気孔コンダクタンスは、枝先近くの光条件がもっとも良好な位置での測定値であり、ケヤキ葉の最大の気孔コンダクタンスを示しているといえる。このことから、樹冠最上部の水蒸気気孔コンダクタンスを富山県中央植物園と富山県林業試験場における測定結果の平均値である0.11mol m⁻² s⁻¹と仮定した。また、試算の対象とした大気汚染物質は富山市市街

Table 4 Regression Coefficient of Multilinear Regression Analysis for Stomatal Conductance in the Toyama Forestry and Forest Products Research Center(Forest Experiment Station).

Tree species	n	R	Regression coefficient			
			Solar radiation	Relative humidity	Temperature	Constant
Deciduous broad-leaved trees						
<i>Hibiscus syriacus</i>	9	0.642	0.0050	0.0039	-0.0090	0.178
<i>Prunus lannesiana</i>	10	0.944**	-0.0028	0.0032*	-0.0086*	0.207
<i>Magnolia obovata</i>	10	0.338	-0.0032	0.0006	-0.0042	0.269
<i>Ulmus davidiana</i>	10	0.326	0.0244	0.0000	-0.0072	0.298
<i>Fagus crenata</i>	10	0.966**	0.0216*	0.0045**	0.0016	-0.230
<i>Quercus mongolica</i>	10	0.878*	-0.0149	0.0087**	-0.0078	-0.214
<i>Magnolia liliiflora</i>	10	0.783	0.0480*	0.0013	0.0014	-0.075
<i>Cercidiphyllum japonicum</i>	10	0.955**	0.0167	0.0044**	-0.0052	-0.062
<i>Zelkova serrata</i>	10	0.888*	0.0271*	0.0009	-0.0026	0.071
<i>Ginkgo biloba</i>	10	0.768	-0.0016	0.0032	-0.0051	0.037
<i>Platanus orientalis</i>	10	0.639	0.0223	0.0014	0.0044	-0.167
Evergreen broad-leaved trees						
<i>Castanopsis cuspidata</i>	10	0.760	0.0129	0.0027	-0.0044	0.112
<i>Quercus myrsinaefolia</i>	10	0.654	0.0172	0.0045	0.0092	-0.420
<i>Magnolia grandiflora</i>	10	0.676	0.0531	-0.0014	0.0020	0.034
<i>Ternstroemia gymnantheria</i>	10	0.762	0.0170	-0.0007	0.0007	0.061
<i>Pasania edalis</i>	10	0.688	0.0238	0.0003	0.0001	-0.008

R: Multiple correlation coefficient * : Signif. LE. 5 % ** : Signif. LE. 1 %

地で継続的に大気濃度のモニタリングが行われている NO₂, O₃, SO₂, ホルムアルデヒド, アセトアルデヒドの5物質である。

樹冠最上部の樹木葉1枚当たりの大気汚染物質吸収速度は、その葉面積、葉の内部と外部の大気汚染物質濃度差、大気汚染物質の気孔抵抗と葉面境界層抵抗から式(1)により求められる^{8,18)}。

$$Q = F_l \cdot (P_a - P_i) / (r_{gs} + r_{ga}) \quad (1)$$

ここに、Qは樹木葉1枚当たりの大気汚染物質吸収速度($\mu\text{g s}^{-1}$)、F_lは葉面積(m^2)、P_aは大気中の大気汚染物質濃度($\mu\text{g m}^{-3}$)、P_iは葉内部の気孔底界面における大気汚染物質濃度($\mu\text{g m}^{-3}$)、r_{gs}は大気汚染物質の気孔抵抗(s m^{-1})、r_{ga}は大気汚染物質の葉面境界層抵抗(s m^{-1})である。

そして、大気汚染物質の気孔抵抗 r_{gs} と葉面境界層抵抗 r_{ga} の代わりに、それぞれの逆数である大気汚染物質の気孔コンダクタンス g_{gs} と葉面境界層コンダクタンス g_{ga} を用いると、式(1)は式(2)

で表わされる。

$$Q = F_l \cdot (P_a - P_i) / ((1/g_{gs}) + (1/g_{ga})) \quad (2)$$

まず、水蒸気気孔コンダクタンスが $0.11 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ である時の各大気汚染物質に対する気孔コンダクタンス g_{gs} の推定であるが、われわれが行った樹木のホルムアルデヒド⁸⁾とアセトアルデヒド⁹⁾の吸収速度の測定結果から、蒸散による水蒸気の気孔通過速度と吸収によるホルムアルデヒドとアセトアルデヒドの気孔通過速度はおおのこの分子拡散係数に比例することが明らかになっている。また、大政らは NO₂²⁾、O₃²⁾、SO₂³⁾について、蒸散と吸収の間に同様な関係があることを報告している。このことから、これら試算対象の大気汚染物質の気孔コンダクタンス g_{gs} は式(3)から求められる。

$$g_{gs} = g_{ws} (D_g / D_w) \quad (3)$$

ここに、g_{gs} は大気汚染物質の気孔コンダクタンス ($\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)、g_{ws} は水蒸気の気孔コンダク

タンス ($\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), D_g と D_w は, それぞれ大気汚染物質と水蒸気の空気中での分子拡散係数である。

また, D_g / D_w の比は大気汚染物質分子量に対する水分子量の比の平方根に等しいと仮定でき, 式(4)より求められる。これは, 気孔からの CO_2 の吸収によく用いられる仮定である¹⁹⁾。

$$D_g / D_w = (M_w / M_g)^{1/2} \quad (4)$$

ここに, M_w は水の分子量, M_g は大気汚染物質の分子量である。

以上のように, 式(3), 式(4)から, ケヤキの水蒸気気孔コンダクタンスが $0.11 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ の時の各大気汚染物質の気孔コンダクタンスを求めることができる。また, 気孔コンダクタンスの単位系を $\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ から m s^{-1} に変換すると 25°C , 1気圧では $1 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ は 0.025 m s^{-1} である²⁰⁾。ケヤキの水蒸気気孔コンダクタンスが $0.11 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (0.0028 m s^{-1}) の時, 単位系を m s^{-1} に変換した各大気汚染物質の気孔コンダクタンスは NO_2 0.0018 m s^{-1} , O_3 0.0017 m s^{-1} , SO_2 0.0015 m s^{-1} , ホルムアルデヒド 0.0022 m s^{-1} , アセトアルデヒド 0.0018 m s^{-1} となる。また, 葉面境界層コンダクタンスは一定と仮定し, 代表的な値¹⁶⁾である 0.01 m s^{-1} を葉面境界層コンダクタンスとした。

つぎに, 富山市市街地の大気汚染物質濃度として, NO_2 は富山城址局(自動車排ガス測定局)の平成11年度年平均値²¹⁾である 0.022 ppm ($42 \mu\text{g m}^{-3}$) と仮定した。また, その他の大気汚染物質については, 富山芝園局(一般環境観測局)の11年度年平均値²¹⁾を用い, O_3 濃度 0.030 ppm ($60 \mu\text{g m}^{-3}$), SO_2 濃度 0.003 ppm ($8.0 \mu\text{g m}^{-3}$), ホルムアルデヒド濃度 $3.2 \mu\text{g m}^{-3}$, アセトアルデヒド濃度 $2.8 \mu\text{g m}^{-3}$ と仮定した。なお, 富山芝園局で測定しているのは O_3 ではなく光化学オキシダントであるが, 光化学オキシダント濃度はその主成分である O_3 濃度に等しいと仮定した。

ここで, NO_2 ²⁾, O_3 ²⁾, SO_2 ³⁾, ホルムアルデヒド⁸⁾については葉内部の気孔底界面における気相濃度はゼロと仮定でき, 葉の内部と外部の濃度差は NO_2 $42 \mu\text{g m}^{-3}$, O_3 $60 \mu\text{g m}^{-3}$, SO_2 $8.0 \mu\text{g m}^{-3}$, ホルムアルデヒド $3.2 \mu\text{g m}^{-3}$ となる。また,

アセトアルデヒドについては気孔底界面における気相濃度が大気中濃度の約40%に相当すると推定⁹⁾されることから, 葉の内部と外部の濃度差は $1.7 \mu\text{g m}^{-3}$ となる。

以上の仮定のもと, 式(2)から樹冠最上部におけるケヤキ葉1枚当たりの大気汚染物質吸収速度が求められる。しかし, 樹冠最上部から下部にかけて樹木葉の受ける光強度は小さくなり, 気孔抵抗も変化する。光強度と気孔抵抗の関係は, 葉に水ストレスがない場合経験的に式(5)で近似される¹⁶⁾。

$$r_s = ((1 + I_c) / I) \cdot r_{s, \text{min}} \quad (5)$$

ここに, r_s は光強度 I のときの気孔抵抗, I は光強度, $r_{s, \text{min}}$ は気孔が全開のときの気孔抵抗, I_c は植物の種類, 生育状態, 環境条件等により異なる定数である。また, 自然条件下の群落内での光強度は近似的に式(6)で与えられる¹⁶⁾。

$$I/I_0 = \exp(-F \cdot A) \quad (6)$$

ここに, I は群落内水平照度, I_0 は群落上における水平照度, F は対象とする面より上層の葉面積指数, A は群落吸光係数である。ここで I_c と A をそれぞれ平均的な値である $I_c = 0.4$, $A = 0.8$ とし¹⁶⁾, 式(2)の Q を樹冠部の高さに対して積分すればケヤキの単木全体の大気汚染吸収速度が求められる。このようにして求めたケヤキの単木全体の各大気汚染物質吸収速度は, NO_2 $17 \mu\text{g s}^{-1}$, O_3 $23 \mu\text{g s}^{-1}$, SO_2 $2.7 \mu\text{g s}^{-1}$, ホルムアルデヒド $1.5 \mu\text{g s}^{-1}$, アセトアルデヒド $0.68 \mu\text{g s}^{-1}$ であり, ケヤキ単木に1時間に吸収される大気汚染物質の量は, NO_2 60 mg , O_3 82 mg , SO_2 9.7 mg , ホルムアルデヒド 5.5 mg , アセトアルデヒド 2.4 mg と試算される。

今回の試算結果を, 都市地域における大気汚染物質の主要な発生源である自動車排ガスの大気汚染物質排出係数と比較した。東京都²²⁾の報告によると, 乗用車の時速 40 km 走行時の大気汚染物質排出係数は NO_2 0.171 g/km , SO_2 0.019 g/km である。また, 米国 EPA²³⁾では1995年における自動車からの平均的なホルムアルデヒドとアセトアルデヒドの排出係数をそれぞれ 0.0234 g/mile (0.0146 g/km), 0.0071 g/mile (0.0044 g/km) と

推定している。これらの排出係数をもとに計算すると、先に試算したケヤキ単木の1時間当りの大気汚染物質吸収量は、自動車走行距離にしてNO₂ 0.35km, SO₂ 0.51km, ホルムアルデヒド0.38km, アセトアルデヒド0.55km 走行したときに排出される量に相当すると試算される。なお、ここで得られた試算結果は、樹木が比較的日当たりがよいと考えられる条件下で生育している場合の試算であり、実際の生育環境によってはこの試算結果を下回る可能性がある。

4. 謝 辞

本研究を行うにあたり、樹木の測定等に多大な便宜を賜っていただいた富山県中央植物園、富山県林業技術センター林業試験場、富山県果樹試験場に深く感謝いたします。

— 参 考 文 献 —

- 1) 環境庁：平成12年版環境白書（各論），pp. 14-46、ぎょうせい、東京、2000
- 2) 大政謙次、安保文彰、名取俊樹、戸塚績：植物による大気汚染物質の取着に関する研究（Ⅱ）NO₂、O₃あるいはNO₂+O₃曝露下における取着について、農業気象、**35**、77-83、1979
- 3) 大政謙次、安保文彰：植物による大気汚染物質の取着に関する研究（Ⅰ）SO₂の局所取着と可視障害発現との関係、農業気象、**34**、51-58、1978
- 4) 大政謙次：都市緑化の最新技術、第3章樹木による排気ガス対策の可能性、pp. 468-477、工業技術会、東京、1993
- 5) 環境庁大気保全局：大気浄化植樹指針、第一法規、東京、1989
- 6) 有害大気汚染物質測定の実際編集委員会：有害大気汚染物質測定の実際、pp. 1-39、日本環境衛生センター、川崎、1999
- 7) T. Kondo, K. Hasegawa, R. Uchida, M. Onishi, A. Mizukami, and K. Omasa, Absorption of formaldehyde by oleander. *Environ. Sci. Technol.*, **29**, 2901-2903, 1995
- 8) T. Kondo, K. Hasegawa, R. Uchida, M. Onishi, A. Mizukami, and K. Omasa, Absorption of atmospheric formaldehyde by deciduous broad-leaved, evergreen broad-leaved, and coniferous tree species. *Bull. Chem. Soc. Jpn.*, **69**, 3673-3676, 1996
- 9) Takayuki Kondo, Kiyoshi Hasegawa, Ryutaro Uchida, and Masanori Onishi, Absorption of Atmospheric C₂-C₅ Aldehydes by Various Tree Species and Their Tolerance to C₂-C₅ Aldehydes. *The Science of the Total Environment*, **224**, 121-132, 1998
- 10) Takayuki Kondo, Kiyoshi Hasegawa, Chiharu Kitagawa, Ryutaro Uchida, and Masanori Onishi, Absorption of Atmospheric Phenol by Evergreen Broad-leaved Tree Species, *Chem. Lett.*, 997-998, 1996
- 11) Takayuki Kondo, Kiyoshi Hasegawa, Hisako Kurokawa, Chiharu Kitagawa, Ryutaro Uchida, and Masanori Onishi, Absorption of Atmospheric Phenol by Various Tree Species and Their Tolerance to Phenol. *TOXICOLOGICAL AND ENVIRONMENTAL CHEMISTRY*, **69**, 183-200, 1999
- 12) 藤沼康美、町田孝、岡野邦夫、名取俊樹、戸塚績：大気浄化植物の検索—広葉樹種における葉面拡散抵抗特性の種間差異—、国立公害研究所研究報告、**82**、13-28、1985
- 13) 富山地方気象台：富山県農業気象月報、平成10年6月、1998
- 14) 富山地方気象台：富山県農業気象月報、平成11年9月、1999
- 15) 宮地重遠：光合成、pp. 75-97、朝倉書店、東京、1992
- 16) 大政謙次：植物群落の汚染ガス取着機能—現象の解析とそのモデル化—、国立公害研究所研究報告、**10**、367-385、1979
- 17) ブレック研究所：大気浄化植樹マニュアル、pp. 49-77、公害健康被害補償予防協会、東京、1995
- 18) P. J. Hanson, K. Rott, G. E. Taylor, Jr., C. A. Gunderson, S. E. Lindberg, and B. M. Ross-Todd, NO₂ deposition to elements representative of a forest landscape, *Atmos. Environ.*, **23**, 1783-1794, 1989
- 19) P. G. Jarvis, "The estimation of resistances to carbon dioxide transfer. In Plant Photosynthetic Production. Manual of Methods. Chapter16," ed by Z. Sestak, J. Catsky, and P. G. Jarvis, p. 566, Dr. W. Junk N. V., The Hague, 1971
- 20) 大政謙次、近藤矩朗、井上頼直：植物の計測と診断、pp. 107、朝倉書店、東京、1988
- 21) 富山県：平成12年版環境白書、pp. 179-261、富山、2000
- 22) 東京都：自動車排出大気汚染物質の排出係数調査—排出係数の算出方法—、現代企画社、1997
- 23) U. S. Environmental Protection Agency, Motor vehicle-related air toxics study, April 1993