

低炭素社会づくりを支える緑化技術

環境研究部長

岸田 弘之

低炭素社会づくりを支える緑化技術

環境研究部長 岸田弘之

1. はじめに

地球温暖化、生物多様性など地球規模の環境問題は人類が直面している喫緊の課題である。地球温暖化について 2007 年に出された IPCC の第 4 次レポートでは温室効果ガスの排出が地球温暖化の原因として特定されており、とりわけ CO₂ の排出を少なくするような低炭素社会が求められている。わが国の自然特性を考えれば豊かで潤いのある低炭素社会の創出が望まれていると考えられる。また、第 10 回生物多様性条約締約国会議（COP10）が本年 10 月に名古屋で開かれたところであり、生物多様性の保全のためには緑豊かな社会資本整備が今までにも増して必要になってきている。

本稿では、豊かで潤いのある低炭素社会づくりに向けて、私たちの身近に存在するわが国の都市緑化が有している役割を明らかにしつつ、そのための社会資本整備・管理にあたって推進するために必要となる都市緑化技術研究への取り組みに関する現状を概観する。

2. 緑化生態研究の全体像

2.1 緑化生態研究の全体像の俯瞰

緑化生態の研究に関して全体像を俯瞰してみると図-1 のようになる。

大きく分類すれば、低炭素社会づくりを支える緑化技術、美しい景観を支える技術、生物多様性保全を支える緑化技術に分けられる。これらの技術研究は相互に関係しており、一つずつが独立した技術ではないが、逆にそれぞれが非常に奥行きに深い分野でもあるため、一つずつの技術の詳細に研究していくことが望まれる。例えば、生物多様性保全を

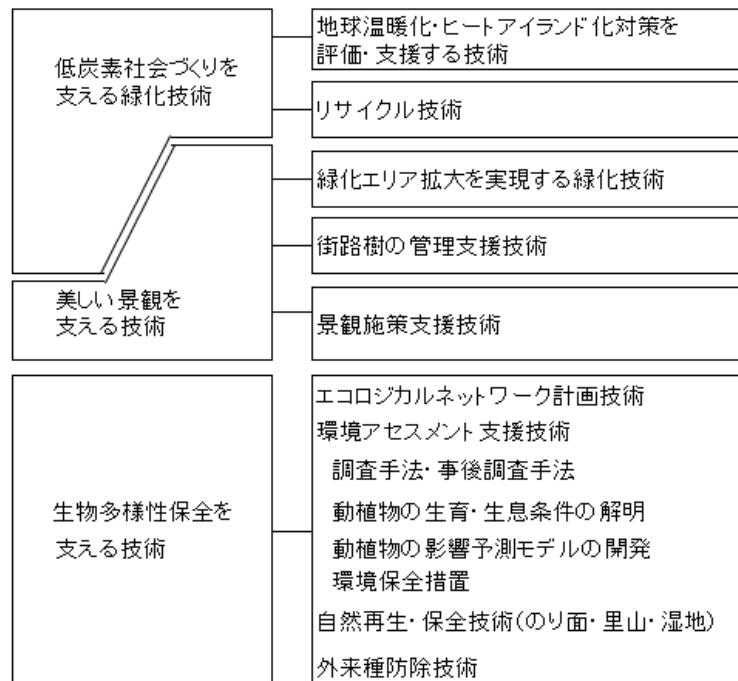


図-1 緑化生態関連研究の取り組み

支える技術では、これまでののり面緑化で行われてきた外来牧草を用いた早期緑化工法に替わり、施工地域周辺の森林の表土に含まれている種子により緑化しようとする「森林表土利用工」や、周辺から飛来する種子によって効果的に緑化しようとする「自然侵入促進工」の技術開発や、特定外来種の防除技術の開発、さらには道路事業等における環境アセスメントを効果的に進めるための支援技術などの研究を進めている。

2.2 低炭素社会づくりを支える緑化技術

これらのうちの喫緊の課題になっている「低炭素社会づくり」に向けては、私たちの都市の中にあってはとりわけ都市緑化の果たすべき役割は重要である。都市緑化としては、豊かで潤いのある低炭素社会を形成していくために次のような役割を担っており、それぞれ役割に応じて緑化技術が存在している（図-2 参照）。

則ち、第一に都市緑化はCO₂を直接吸収する役割を担っている。このことについては次の第3章で詳述するが、2005年2月に発効した「京都議定書」の義務付けに関して政府が示している「京都議定書目標達成計画」（平成17年作成、平成20年全部改定）において、

地球温暖化・ヒートアイランド化対策を評価・支援する技術	・樹木のCO₂吸収固定能力の把握 ・衛星画像を使った樹林地把握技術 ・都市における熱環境の把握と緑による改善手法
リサイクル技術	・剪定枝葉のリサイクル技術 ・下水汚泥・コンポストの堆肥化技術
緑化エリア拡大を実現する緑化技術	・屋上緑化技術 ・道路遮音壁等の壁面緑化技術 ・海岸緑化技術 ・河川護岸緑化技術
街路樹の管理支援技術	・道路緑化技術基準 ・街路樹の生育特性 ・剪定技術 ・根上がり対策 ・腐朽診断技術の開発 ・台風倒木対策 ・景観重要樹木の管理指針 ・街路樹の景観特性

図-2 低炭素社会づくりを支える緑化技術に関する研究

都市緑化等の推進もCO₂の吸収源対策の一つとして明確に位置づけされている。

第二に、都市におけるヒートアイランド現象等に関して、街路樹による緑陰効果や屋上緑化・壁面緑化による屋内の冷房効果の増大が挙げられる。これも第3章で詳述するが、屋上緑化を施すことにより、都市におけるヒートアイランド現象等の緩和にもつながるものである。

第三に、街路樹による美しい景観の創出により、美しい街並みが整備されるだけでなく、豊かで潤いのある都市基盤整備に寄与するものである。

こうした都市緑化の役割はすぐに効果を発現するものと、効果発現には長期間を要するものとがある。ここでは短期間に効果を発現し、私たちの身近に感じられる都市緑化の役割とその推進のために必要となる緑化技術の一部に関する研究について取り上げることにする。

3. 低炭素社会と都市緑化

3.1 都市緑化の有している CO₂ 吸収効果について

3.1.1 背景

都市緑化は、2001 年に開催された第 7 回気候変動枠組条約締約国会議（COP7）において、開発地における植生回復という分野として、京都議定書上の吸収源活動として計上することが可能となった。また、各国の吸収源に対する計上・報告方法については、2004 年に開催された COP10 において IPCC の作成した「土地利用、土地利用変化及び林業に関するグッド・プラクティス・ガイダンス（LULUCF-GPG）」を採用することが合意された。

この LULUCF-GPG には、炭素ストック量の変化は一般に成長量から損失量を差し引いて求めることとし、成長量の算出に当たって Tier1・Tier2・Tier3 の 3 つの階層の算出方法が示されている（表-1 参照）。これら 3 つの階層の算出方法のうち Tier1 は、世界共通のデフォルト値として提示された数値を使用する方法で、樹冠被覆面積当たりの成長量から求める樹冠被覆面積法（Tier1a）と、樹木一個体当たりの樹木成長量から求める樹木成長量法（Tier1b）について、それぞれの考え方及び、アメリカにおける研究事例を基に求められたそれぞれのデフォルト値が示されている。さらに、炭素ストック量における成長量と損失量の関係については、成長量を Tier1 により算出する場合には、平均樹齢 20 年までは損失量は 0 とし成長量のみデフォルト値を使用することができるとする一方、20 年を超えた場合には剪定や枯死による CO₂ 排出の影響を考慮して、成長量と損失量は等しいと仮定してトータル炭素ストック量の変化は 0 として扱うこととしている。しかし、Tier1 は a、b どちらの手法とも世界共通のデフォルト値を使うため精度が低くなり、実際の報告においてはできるだけ各国固有の気候帯別または土地利用別のデフォルト値を使用する方法 Tier2、あるいは新たな精度の高い算出方法 Tier3 の使用が推奨されている。さらに Tier2 の使用に当たっては、炭素ストック量における成長量と損失量の関係に関しては Tier1 で示された仮定に頼らず、明確に算定すべきとされている。

我が国は、京都議定書に向けてのトライアル報告となる 2006 年 3 月から、2009 年 3 月末時点までの毎年の報告においては、樹木一個体当たりの樹木成長量から求める Tier1b を用いて算出を行っているが、今後、日本独自の年間バイオマス成長量の設定ができた段階で Tier2 により報告するとしている。

そこで、国土技術政策総合研究所では、我が国における京都議定書の報告において Tier2 としての活用を目的に、実際に多く生育している 50 年前後の樹齢までを適用範囲とした、都市緑化に多く使われている樹種の相対成長式および年間 CO₂ 固定量算定式を作成した。

表-1 LULUCF-GPG で示された吸収量の算出方法

Tier		吸収量算出の考え方
Tier 1	Tier 1a 樹冠被覆面積法	樹冠被覆面積に、樹冠被覆面積当たりの成長量を乗じて算出 (デフォルト値: 2.9t-C/ha crown cover/yr)
	Tier 1b 樹木成長量法	樹木本数に、樹木個体当たりの炭酸ストック変化量を乗じて算出 (デフォルト値: 約 0.01t-C/yr/本 樹種クラスにより若干異なる)
Tier 2	Tier 2a 樹冠被覆面積法	Tier 1a と同じであるが、各国固有の気候帯別または土地利用別のデフォルト値を使用
	Tier 2b 樹木成長量法	Tier 1b と同じであるが、各国固有の気候帯別または土地利用別のデフォルト値を使用
Tier 3		提示されていない(GISを活用した精度の高い各国固有の方法など)

3.1.2 方法

(1) 調査対象木

今回調査対象とした樹種は、都市緑化に多く用いられている代表的樹種である、クスノキ、シラカシ、ケヤキ、イチョウ、マテバシイ、プラタナス類、サクラ類の7種類とした。調査木は、関東地方の平野部の圃場等で育成され、最近は剪定されていない15年前後から50年前後（最低でも30年以上）までの樹齢の異なる樹木を最低でも5本以上（サクラ類は3本）選定した。

なお、CO₂固定量の算定対象は、木質化することで長期間固定が継続する幹・枝・根からなる木質部とし、葉は算定対象からは除外した。

(2) 伐倒・根の掘取りと木質部生重の算出

調査木は、できるだけ落葉樹の葉が落葉している冬季に行った。作業はまず、地上部を地際で伐倒した後、幹については地上0.2mの位置から原則1m間隔に階層を区切り、根元側から階層毎（0.2m、1.2m、2.2m・・・）に切断した。次に枝を幹から分枝している位置により階層分類した上で分離した。引き続き、幹については階層別の全生重を測定するとともに、樹幹解析に使用する円板を採取した。枝については、葉を分離した後で、同じく階層別の全生重を測定した。

根は伸長する全範囲を掘取った。掘削には細根まで丁寧に掘り取れるよう、圧縮空気を噴射して土壌を除去するエアースコップを活用した。掘取った根は、土を落とした後で全生重を測定した。

(3) 木質部乾重の算出

次に木質部の乾燥重量を求めるために、幹や枝については階層毎に、根については主根部と細根部からそれぞれサンプルを採取し、生重を測定した。さらに、そのサンプルを恒温乾燥機に入れ、85℃にセットし、それ以上乾燥が進まなくなるまで乾燥させて乾重を測定した。さらに、求めた生重と乾重によりそれぞれの部位・階層別の生乾重比を算出した。最後に、調査木の部位・階層別の全生重に、それぞれの生乾重比をかけ、調査木の器官別の全乾重及びそれらを合わせた木質部全乾重を算出した。

(4) 樹齢の判読

調査対象木の伐倒時点における樹齢は、地上 0.2m の切断面に見られる年輪より判読した。また、得られた各樹木の地上 0.2m から 1m おきに切断した各階層の切断面の年輪を読み取るにより樹幹解析を行い、個々の樹木の生育特性等を調べた。

3.1.3 結果

(1) 樹種毎の成長量算定式の作成

① 胸高直径と木質部乾重との相関関係

一般に、樹木の各器官の重量等の物理量 (Y) と樹木の形状寸法 (X) との間には、相対成長式 $Y=aX^b$ (a、b は定数) が成り立つことが知られている。そこで、樹木の木質部全乾重を Y とし、樹木の形状寸法を X として相対成長式を求めた (図-3)。なお、樹木の形状寸法 (X) としては胸高直径を用いた。

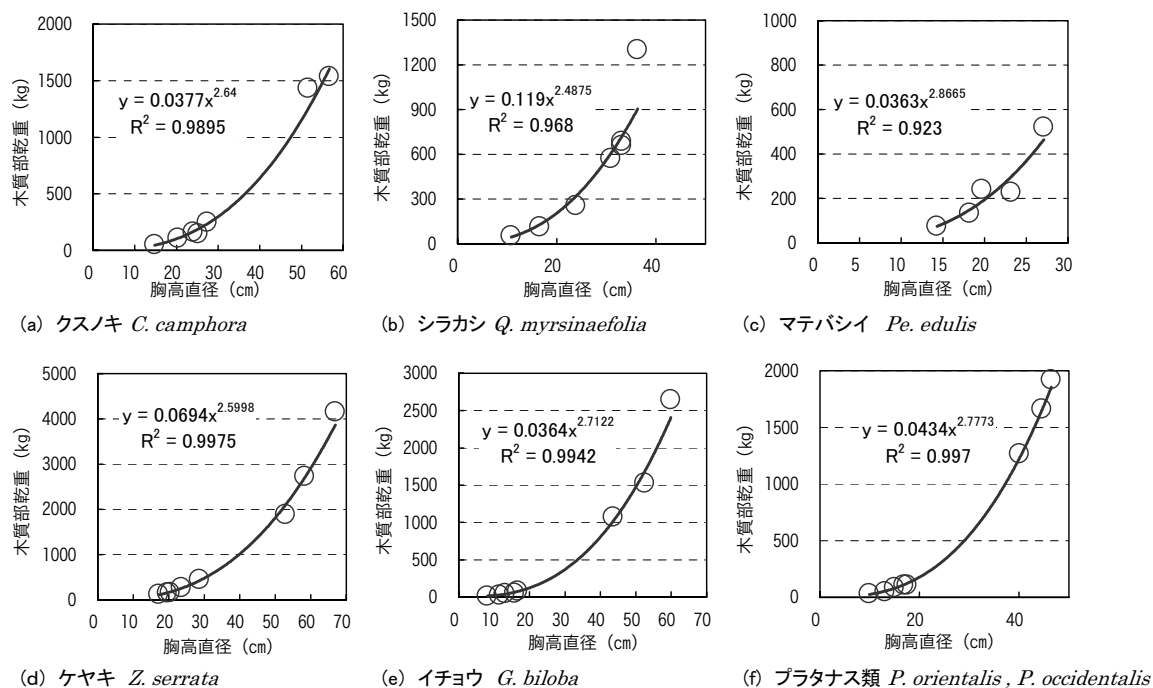


図-3 胸高直径と木質部乾重の相対成長式

解析に用いるデータは調査対象木の本数が5本以上の樹種6種とし、樹種ごとの胸高直径と木質部乾重との関係を求めた。胸高直径と木質部乾重の関係をみると、6種とも決定係数 (R^2) は0.9以上を示し、高い相関があると言える。なお、今回の調査によって得られた階層毎の円盤を基に樹幹解析により求めた個々の樹木の成長曲線は、相対成長式の曲線と近似しており、相対成長式は、樹木の成長をよく示していることが推測された。

② 胸高直径と樹齢の相関関係

次に、胸高直径が年と共にどのように成長するかを明らかにするため、各調査対象木の樹齢と胸高直径の関係を調べた。樹齢と胸高直径の関係をグラフに示すとほぼ直線関係を示したため、直線回帰式を求めた(図-4)。その結果、全ての樹種において決定係数 (R^2) は0.9前後と高く、今回調査した樹齢の範囲においては、胸高直径は毎年ほぼ一定量増加すると見なすことが出来た。

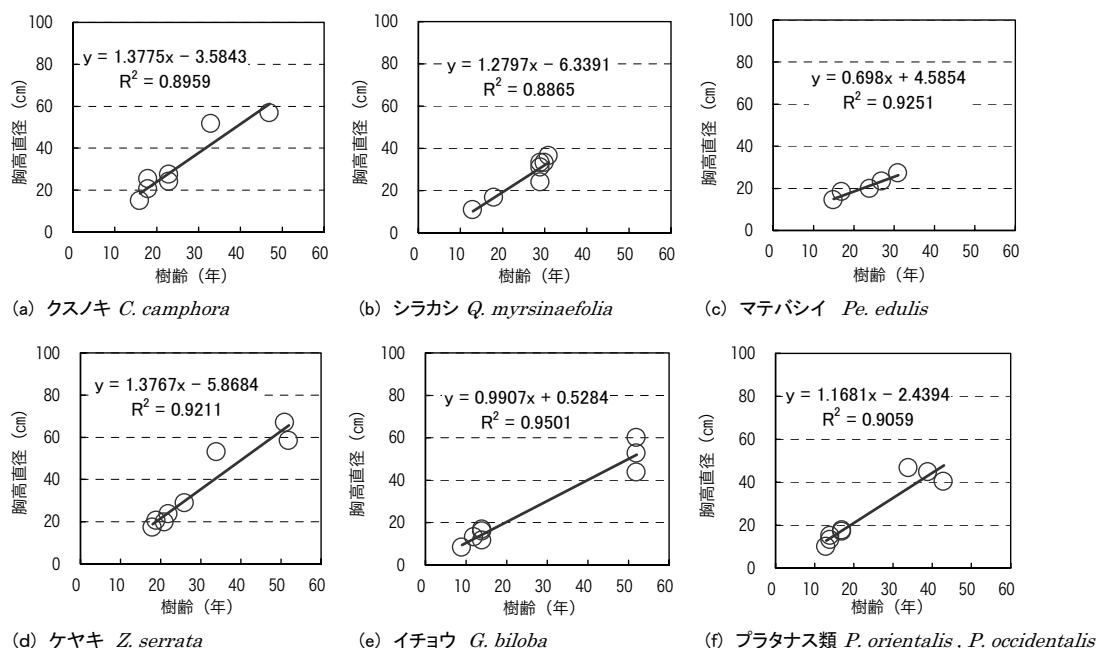


図-4 樹齢と胸高直径の関係

③ 年間木質部乾重成長算定式の作成

②で求めた相対成長式 $Y=aX^b$ (a , b は定数) において、1年後の胸高直径の増加量を c とすると1年後の木質部乾重は $Y=a(X+c)^b$ となり、その1年間の木質部乾重の成長量を Y とすると、以下の式となる。

$$Y=a(X+c)^b - aX^b = a\{(X+c)^b - X^b\} \cdots \cdots (1)$$

X : 胸高直径(cm)

a, b : 木質部乾重と胸高直径との相対成長式から得られる定数

c : 樹齢との回帰式から得られる胸高直径の年間成長量(cm)

この式により各樹種の胸高直径 X cm の樹木に期待される年間木質部乾重成長量を求めると表-2 に示すようになる。

また木質部の炭素含有量は、樹種に関わらず乾燥重量の約 50%程度であることが知られているため、木質部乾重成長量に 50%を乗じることにより年間の炭素固定量を求めることが出来る。さらに、ここで求まる年間の炭素固定量の値に、CO₂ と C の分子量の比 (44/12) を乗じることにより樹種毎の年間 CO₂ 固定量算定式を求めるとことができる (表-3)。

表-2 年間木質部乾重成長量算定

対象樹種	胸高直径による算定式
クスノキ	$Y=0.0377\{(X+1.4)^{2.64}-X^{2.64}\}$
シラカシ	$Y=0.119\{(X+1.3)^{2.4875}-X^{2.4875}\}$
マテバシイ	$Y=0.0363\{(X+0.7)^{2.8665}-X^{2.8665}\}$
ケヤキ	$Y=0.0694\{(X+1.4)^{2.5998}-X^{2.5998}\}$
イチヨウ	$Y=0.0364\{(X+1.0)^{2.7122}-X^{2.7122}\}$
プラタナス類	$Y=0.0434\{(X+1.2)^{2.7773}-X^{2.7773}\}$

Y:年間木質部乾重成長量(kg)
X:胸高直径(cm)

表-3 年間 CO₂ 固定量算定式

対象樹種	胸高直径による算定式
クスノキ	$Y=0.0691\{(X+1.4)^{2.64}-X^{2.64}\}$
シラカシ	$Y=0.218\{(X+1.3)^{2.4875}-X^{2.4875}\}$
マテバシイ	$Y=0.0666\{(X+0.7)^{2.8665}-X^{2.8665}\}$
ケヤキ	$Y=0.127\{(X+1.4)^{2.5998}-X^{2.5998}\}$
イチヨウ	$Y=0.0667\{(X+1.0)^{2.7122}-X^{2.7122}\}$
プラタナス類	$Y=0.0796\{(X+1.2)^{2.7773}-X^{2.7773}\}$

Y:年間CO₂固定量(kg)
X:胸高直径(cm)

(2) 樹種統合の成長量算定式の作成

(1)においては、樹種毎の年間木質部乾重成長量算定式及び年間 CO₂ 固定量算定式を求めたが、この成長量算定式で我が国における都市樹木の CO₂ 固定量を算出するためには樹種毎に算定式を使い分ける必要がある。そこで、ここでは算定式の摘要を容易にできるよう、先の 6 種に都市緑化樹木として多く用いられているサクラ類のデータを含めた 7 種の全データを用いて調査対象樹種統合の成長量算定式を求めた。

まず、調査対象木の全データより、胸高直径と木質部乾重の関係を先に示した相対成長式で近似させた (図-5)。その結果、7 種統合の相対成長式も決定係数 (R²) は 0.96 と高く、樹種に関係なく胸高直径と木質部乾重の間は高い相関関係にあることが示された。

また同様にサクラ類を含めた 7 種全体のデータを用いて、樹齢と胸高直径の直線回帰式を求めた (図-6)。その結果、決定係数 (R²) は 0.87 と樹種ごとより若干低下したものの、高い数値を示しており、今回の樹種・樹齢の範囲においては胸高直径は毎年ほぼ一定量増加することが確認された。

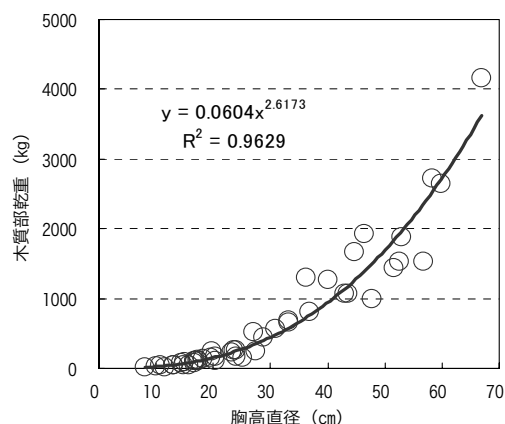


図-5 樹種を統合した場合の胸高直径と木質部乾重の相対成長式

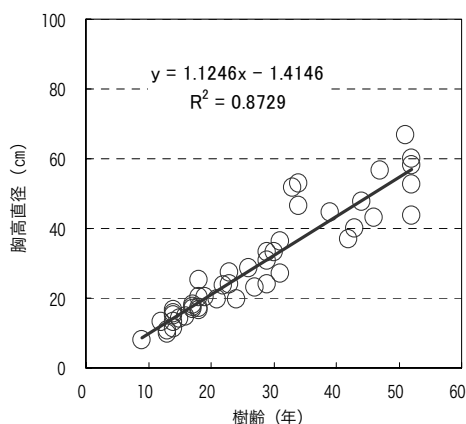


図-6 樹種を統合した場合の樹齢と胸高直径の関係

次に、図-5 によって得られた近似式 ($Y=0.0604X^{2.6173}$) と図-6 の回帰式 ($Y=1.1246X-1.4146$) によって得られた年間の平均的な胸高直径成長量約 1.1cm を用いて、(1) の③と同様の方法で全樹種統合の年間木質部乾重成長量算定式を求めると、

$$Y=0.0604\{(X+1.1)^{2.6173}-X^{2.6173}\} \cdots \cdots (2)$$

Y:年間木質部乾重成長量(kg) X:胸高直径(cm)

また、木質部乾重を CO_2 固定量に換算することにより、全樹種統合の年間 CO_2 固定量算定式

$$Y=0.111\{(X+1.1)^{2.6173}-X^{2.6173}\} \cdots \cdots (3)$$

Y:年間 CO_2 固定量 (kg) X:胸高直径(cm)

が得られた。

(3) 成長量算定式のグラフ化

表-2 の樹種毎の年間木質部乾重成長量算定式と、式 (2) の樹種統合の年間木質部乾重成長量算定式は、それぞれ求めたい胸高直径を式の X に代入することにより、その年の年間木質部乾重の成長量を算定することが可能である。しかし、式のみでは樹種毎の違い等を比較することが困難なため、胸高直径を X 軸にとってグラフ化を試みた (図-7)。なお、右側の目盛りは年間 CO_2 固定量に換算した値であり、グラフ上でそれぞれの曲線が示されている範囲は、今回調査を行った範囲である。これらの胸高直径の範囲では、どれも胸高直径が大きくなるほど年間成長量は大きくなること、同じ胸高直径では、ケヤキ、プラタナス類、シラカシが他の樹種より成長量が大いことが示された。

また、今回の調査によって得られた階層毎の樹幹解析を基に、直接胸高直径とその年の年間木質部乾重成長量の関係を求めた曲線は、ここで求めた曲線と同様の傾向を示すことが確認され、今回求めた曲線は胸高直径と年間木質部乾重成長量の関係をよく示しているものと考えられた。

次に、これに図-6 で求めた樹齢と胸高直径の関係を代入することにより、X 軸に樹齢をとって同じく算定式をグラフ化すると図-8 のようになる。

これも今回調査を行った範囲では、どれも樹齢が高くなるほど年間成長量が大きくなる傾向が示された。

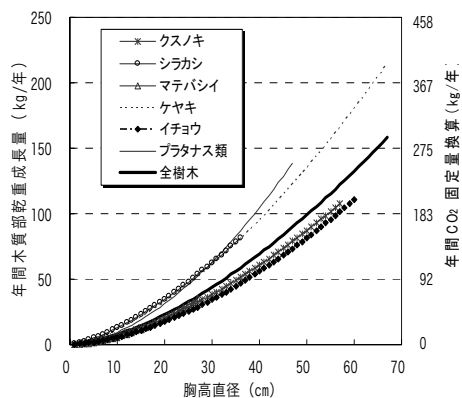


図-7 胸高直径と年間木質部乾重成長量の関係

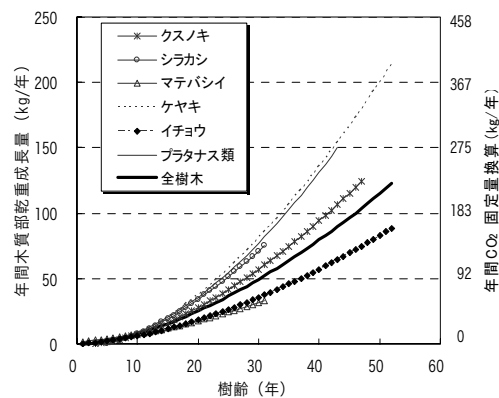


図-8 樹齢と年間木質部乾重成長量の関係

3.1.4 LULUCF-GPG との比較と今後の課題

今回得られた式の作成手法と、先に示した LULUCF-GPG に示されている Tier1b のデフォルト値の算出手法を比較するために、Tier1b のデフォルト値の算出方法を確認したところ、両者はほぼ同様の方法がとられており、今回の成長量算定式は、我が国の樹木の成長特性を示した算出手法として、代替性があるものといえる。

ただし、今回の調査樹木として最近は剪定を行われていない樹木を選定して行ったため、剪定を受けている樹木との比較において、吸収量や損失量がどれだけ異なるかについては、今後明らかにしていく必要がある。

また今回の研究において対象とした樹種は、2007 年の全国の街路樹調査によると、全国の高木本数の約 1/3 を占めているが、それ以外の樹種でも同じような固定量を示すかは不明であり、今後樹種を増やして精度を高めていく必要がある。さらに今回のデータは関東地方の平野部の圃場等におけるデータに限られており、今回の結果が日本全土にそのまま適用できるのか、生育環境の違いや管理の仕方によってどのような違いが生じるのかについては、今後の研究で明らかにしていく必要がある。

3.2 屋上緑化によるヒートアイランド現象の緩和

ヒートアイランド現象の緩和を目的として実施した屋上緑化によって空調の消費電力量が削減され、CO₂の排出抑制にも貢献した研究事例について以下に述べる。

(屋上緑化の概要)

北九州市小倉北区の地下1階・地上8階建ての業務ビルでは、平成19年12月～平成20年1月にかけて屋上緑化が施工された(写真-1)。屋上全面積約800㎡に対して、屋上緑化面積は約400㎡である。植栽用土には軽量土を使用し、芝、草花に加えて木本も植樹されている。植栽用土中には散水パイプを設置して散水を行っている。

(効果計測の内容)

屋上緑化の効果の計測として、赤外線サーモグラフを用いて屋上表面の温度を計測し、緑化部分と非緑化部分を比較した。また、最上階の室内においては、データロガー温度計を用いて屋根裏温度と室内温度を、消費電力計測器を用いて空調の消費電力量をそれぞれ屋上緑化施工前後の約1ヶ月間連続計測した。夏期のほか、冬期にも計測を実施している。

なお、対策効果の算出(対策前後における温度や消費電力量の差分)にあたっては、気象条件が同等と考えられる日における比較となるように、計測期間中の全データの中から集計に適するデータの抽出を行った。

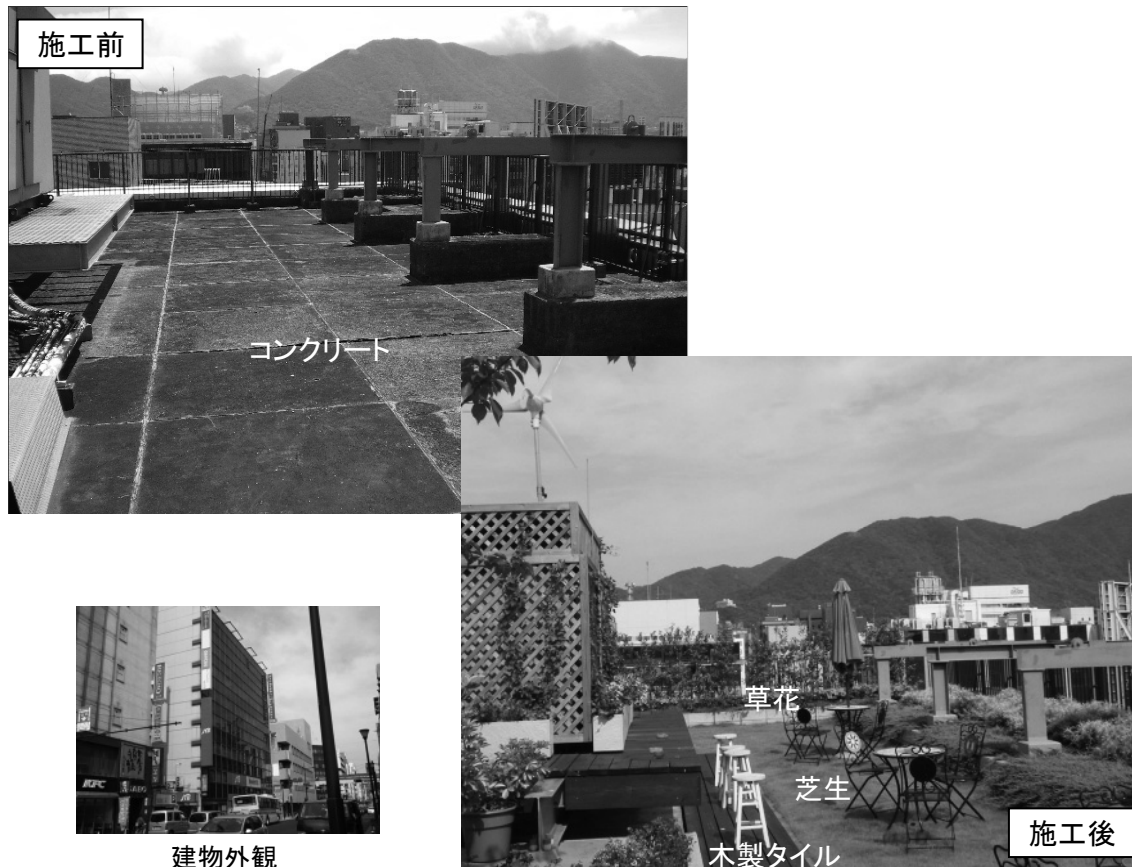


写真-1 屋上緑化施工前後の状況

(調査結果)

赤外線サーモグラフィによる屋上表面温度の計測例（夏期）を写真-2 に示す。午前 6 時と正午の温度差は、非緑化部分である木製タイルにおいては 41.2°C ($23^{\circ}\text{C} \rightarrow 64.2^{\circ}\text{C}$) となった一方、緑化部分である芝生では 16.6°C ($22.7^{\circ}\text{C} \rightarrow 39.3^{\circ}\text{C}$) となり、芝生の温度上昇抑制効果が顕著に見られた。真夏日（最高気温 $30 \sim 35^{\circ}\text{C}$ の日）の執務室（ 140 m^2 ）の消費電力量を図-9 に示す。対策前（平成 19 年度）の電力料金は 2,189 円/日であったのに対して、対策後の電力料金は平成 20 年度が 2,041 円/日、平成 21 年度が 1,889 円/日となり、150～300 円/日安くなった。平成 21 年度は平成 19 年度に比べて $7,219\text{g}/\text{日}$ の CO_2 排出抑制に相当すると換算される。屋根裏温度と室内温度の最高温度を表-4 に示す。空調の温度設定は毎年同じであるが、それぞれ約 1°C 低下している。

冬期（最高気温 $10 \sim 15^{\circ}\text{C}$ の日）の消費電力量を図-10 に示す。対策前（平成 19 年度）の電力料金は 1,684 円/日であったのに対し、対策後（平成 20 年度）の電力料金は 1,604 円/日となり、80 円/日安くなった。屋根裏温度と室内温度は表-4 に示すとおり保たれており、屋上緑化には副次的な効果として冬期の保温性能も備わっていると考えられる結果である。

なお、北九州市小倉北区では大規模商業施設においても屋上緑化の効果計測を行ったが、本事例と同様に空調使用量の削減が確認された。

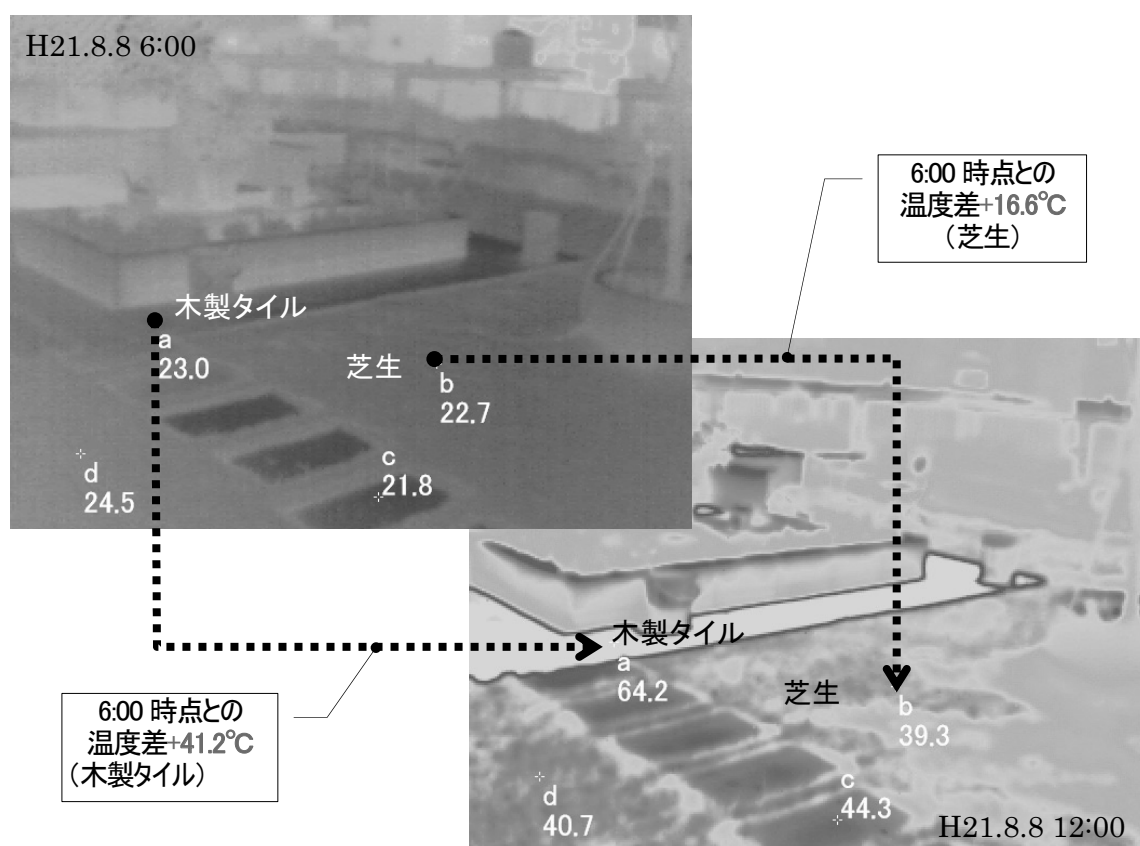


写真-2 赤外線サーモグラフィによる屋上表面温度の変化（夏期）

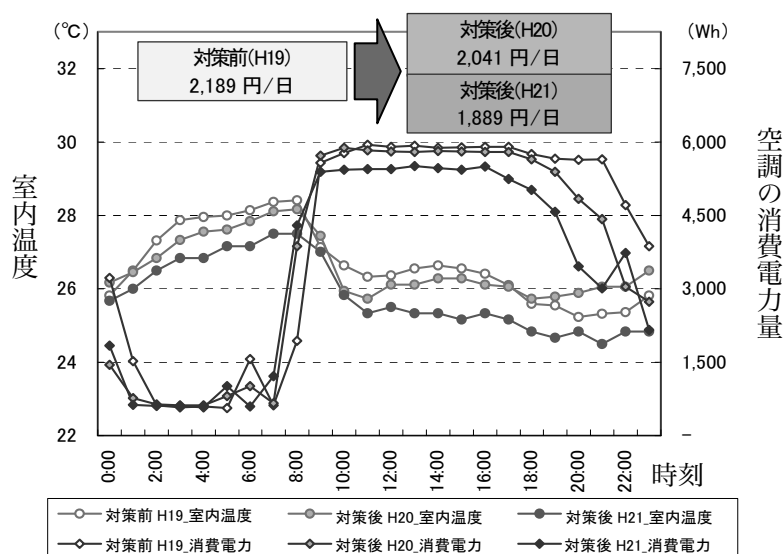


図-9 室内温度と空調の消費電力量（夏期）

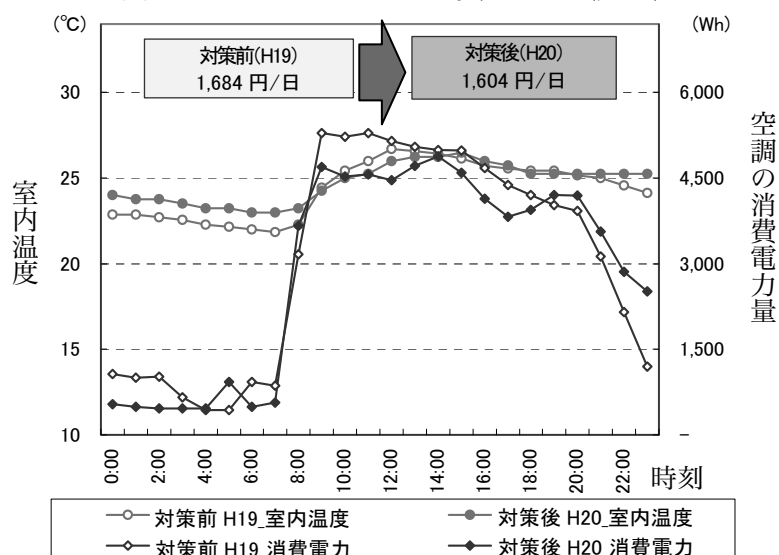


図-10 室内温度と空調の消費電力量（冬期）

表-4 屋上緑化の効果（総括）

		屋根裏温度 (最高温度)	室内温度 (最高温度)	消費電力量 (円換算/日)
夏期	対策前(H19)	28.2°C(8時)	28.4°C(8時)	2,189円
	対策後(H21)	27.2°C(8時)	27.5°C(8時)	1,889円
	差分	-1.0°C	-0.9°C	-300円
	CO ₂ 削減量	-7,219g CO ₂ /日		
冬期	対策前(H19)	23.6°C(14時)	26.7°C(12時)	1,684円
	対策後(H20)	24.6°C(15時)	26.5°C(15時)	1,604円
	差分	+1.0°C	-0.2°C	-80円
	CO ₂ 削減量	-1,929g CO ₂ /日		

4. 豊かで潤いのある低炭素社会づくりを支える緑化技術

豊かで潤いのある低炭素社会づくりを推進していくためには、私たちの身近にある街路樹が良好な状態に維持管理されていることが緊要である。そのためには街路樹の特性をしり、適切な維持管理をしていくことが望まれる。第4章ではこのための必要となる技術として現在取り組んでいる研究の成果について述べる。

4.1 街路樹の特性を知る ― 街路樹の危険度評価と診断技術の開発を例として

街路樹のもつ景観形成や緑陰形成、二酸化炭素固定などの効果は、樹木が大きく成長するのにしたがって、その効果を発揮させるものである。しかし道路のような限られた生育空間のなかでは、周辺の工事や強剪定等により生じた大枝や根の傷口から木材腐朽菌に感染し、腐朽の進行により樹木の強度が失われ、倒伏（根返り、幹折れ）に至ることもある。さらに街路樹の倒伏により、人命が奪われるなど人身傷害、器物破損、交通障害も発生しており、道路管理に当たってはその責任の重要性を十分に認識しておく必要がある。



写真-3 街路樹の倒伏（(財)東京都公園協会）

一方樹木の倒伏は、強風や降雪など、通常有している支持強度を超える外力が加わることにより、健全に生育していても発生することはあるものの、その多くは、樹幹や根元、根系に腐朽や空洞などの欠陥のある樹木で占められており、樹木の欠陥を事前に把握して適切な改善的処置を行うことができれば、倒伏等による危険性を小さくし、同時に樹木の健全な生育を確保することができると考えられる。そこで、以下に示す街路樹の危険度評価手順のとりまとめと、街路樹の危険度評価に必要な診断機器の開発を行った。

4.1.1 街路樹の危険度評価

街路樹の危険度評価は、まず樹木健全度を調査し、生育条件や障害対象を考慮した上で危険度を評価して、その改善的処置を実施するものである。なお危険度評価は、樹木の成長と植栽場所の特徴が経年的に変化していくため、定期的の実施することが必要である。

(1) 樹木健全度調査

① 外観調査

樹木の健全度は、樹形、活力状況、地上部の欠陥、根系状況等について、まず目視や簡単な器具により調査（外観調査）する。この際、事前に植栽年や管理履歴、障害履歴等の樹木情報を把握しておく。

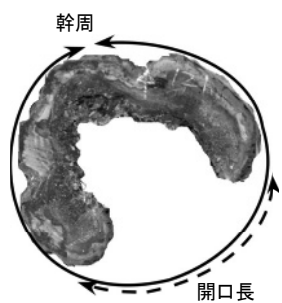
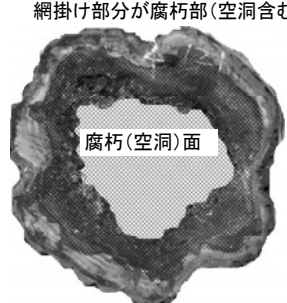
木材腐朽は、腐朽菌により分解されて、木材強度が失われているものであり、開口空洞や外部に晒されている場合は、外観から直接見つけることができるが、腐朽が外部に達していなくても傷、幹の隆起、キノコの発生や昆虫（ハチやアリ等）の営巣、打音異常の存在は、内部に腐朽や空洞があることが予測できる重要なサインとなる。亀裂は、幹が裂ける途中段階であり非常に危険な状態にある。幹や枝の結合は、その結合部に樹皮が挟まれていて完全な結合とならないことから裂け易い。また枯れ枝や折れてぶら下がったままの枝、剪定等によって幹や枝の先端の枝葉密度が片寄っている枝等も、落枝の危険性が容易に判断できる。

② 詳細調査

外観調査により腐朽や空洞が直接確認され、あるいは「傷、隆起、キノコの発生、打音異常、樹体の揺れ、昆虫の営巣」等の異常から推測された場合には、腐朽診断機器を使用して腐朽割合や健全材の厚さを調査する。

詳細調査による危険度判定は、開口空洞が中心に達している場合は、その開口長を

表-5 詳細調査による危険度基準値

		開口空洞	腐朽・空洞割合
		開口空洞部の周囲長比率 (開口長／幹周)	幹の断面積に対する腐朽・空洞部の割合 (腐朽面積／幹断面積)
判定指標			
		網掛け部分が腐朽部(空洞含む)	腐朽(空洞)面
評価基準	A	0	0
	B	中心に達していない周囲長比率が33%未満、かつ活力度が普通以上	1%以上20%未満
	C	中心に達していない周囲長比率が33%未満、かつ活力度が少し悪い以下	20%以上40%未満
	D	中心に達している周囲長比率が33%未満、あるいは中心に達していない周囲長比率が33%以上	40%以上50%未満
	E	中心に達している周囲長比率が33%以上	50%以上

評価基準 A : 「健全」
 B : 「僅かな異常がある」
 C : 「欠陥が認められるが、危険性はない」
 D : 「危険性を有しているが、すぐには倒伏、枝折れはしない」
 E : 「非常に高い危険性があり、すぐに倒伏、枝折れに繋がる恐れがある」

測定して開口長が幹周の33%以上ある場合に評価基準（E）の「非常に高い危険性があり、すぐに倒伏、枝折れに繋がる恐れがある」と判断する（表-5 参照）。開口空洞の開口長が幹周の33%未満の場合には、腐朽・空洞割合を測定し、腐朽割合（樹幹断面積に対する腐朽面積）が50%以上の場合は同じく危険（E）と判断する。なお、測定にあたっては、腐朽割合が最も大きいと予測される断面位置を外観から特定する必要がある。

③ 根系調査

根系に「地上部と関連する異常、根系の切断、露出根の腐朽、キノコの発生、鋼棒貫

入（根元部の腐朽を確認するために鋼棒で根元周囲を突くこと）の異常」等の欠陥から腐朽等が予測された場合には、土壌掘削（地表面から 30cm 程度の深さ）による根系調査を実施して、根系腐朽状況を把握する。そして主要根の 33%以上が腐朽等で不完全な場合には、危険性が高いと判断する。

(2) 生育条件調査

樹木の倒伏等の発生は、樹木の植栽されている地形条件・気象条件がどのような場所であるかによっても影響を受ける。このような倒伏等の発生しやすい場所がどこなのかを把握するために、地形条件、気象条件等をこれまでの発生箇所の記録とともに調査する。また、設置した支柱、踏圧防止板の保護材が機能を果たしていないために障害が生じたり、保護材の損傷によって障害が発生することのないよう設置状況を調査しておくことも重要である。

(3) 障害対象調査

道路空間は、自動車や歩行者が常時利用しているだけでなく、沿道には住居等の建築物や、架空線、水道管等のライフライン等が存在しているため、倒伏、枝折れが生じた際の障害を事前に予測しておくことにより、倒伏、枝折れの発生に対する改善策を立てることができ、障害事故を未然に防止することが可能となる。

(4) 改善的処置

危険度評価の結果から倒伏等の危険性が高いと評価された樹木については、その解消あるいは低減するための処置を実施する必要がある。その際、街路樹としての機能を十分に継続して発揮できることに配慮するものとするが、改善的な処置を施しても機能が回復できないと考えられる場合には、伐採して更新することを考えることが重要である。強度な剪定等により本来の樹種特性を乱した小さくいびつな樹冠形状にすることは、生育不良や剪定箇所からの腐朽侵入に繋がるだけでなく、緑陰形成や景観上からも好ましくない。改善的処置の方法としては、樹木の各部位に応じた、危険を解消あるいは低減できる改善的処置について、伐採更新、剪定、保護材の復旧または撤去、樹木活力の向上から最適な方法を選択して、迅速に実施する。

なお、この街路樹の危険度評価手法は、次期道路緑化技術基準の改定等に規定されるように準備しているが、九州地方整備局等では既に独自の基準に取り込んでいる。

4.1.2 腐朽診断機の開発

樹木腐朽は、幹や根元内部で生じていることが多く、外観からは腐朽進行状況を確認することが難しい。これに対応するため、これまでは樹幹に径 3mm 程度の細い錐を電動で押し込み、その際の貫入抵抗値を測定して、その抵抗値の違いにより腐朽状況を診断

する方法が行われてきた。しかしながら、この方法では樹木に傷を付けてしまうことや、錐を貫入した1本の線の部分しか測定できないことが問題となっている。そこで、この問題を解決するため、非破壊で樹幹断面に対して面的に定量的な診断が可能な γ 線（線源は3.7MBqの微量放射線源を使用）を利用した腐朽診断機を開発した(図-11 参照)。

(1) 診断原理

放射線は物質を透過する際に、物質による吸収等によって線量が減少し、その減少の値は物質の厚さや密度によって変化する。このうち樹木の厚さによる変化は樹幹の断面形状の測定で把握できるため、それ以外の変化がみられる場合には主に密度の違いにより差が生じていることになる。腐朽木は、木材の密度が低下していることから放射線の透過線量が健全木に比較して多くなるため、多く検出された部分の大きさと腐朽割合を予測することが可能となる。

(2) 測定方法

測定は、樹幹を挟んで放射線源と放射線検出器を水平にスライドさせながら、刻々の透過線量をパソコンに取り込み、樹木が健全である場合の透過線量推定値（計算値）と比較を行うことにより、内部腐朽状況を推測するものである。操作はパソコン上で対話方式により行い、腐朽状況を現場でパソコン上に図化・表示するとともに保存も可能なものとしている。

なおこの技術は、伊勢神宮の遷宮に当たり使用する御神木候補が、木材腐朽のない健全材であることを事前に確認するために、その診断に依頼されるなど、高い信頼性を得ており、北海道から、沖縄に至るまで各地の街路樹等の腐朽診断等に活用され始めている。

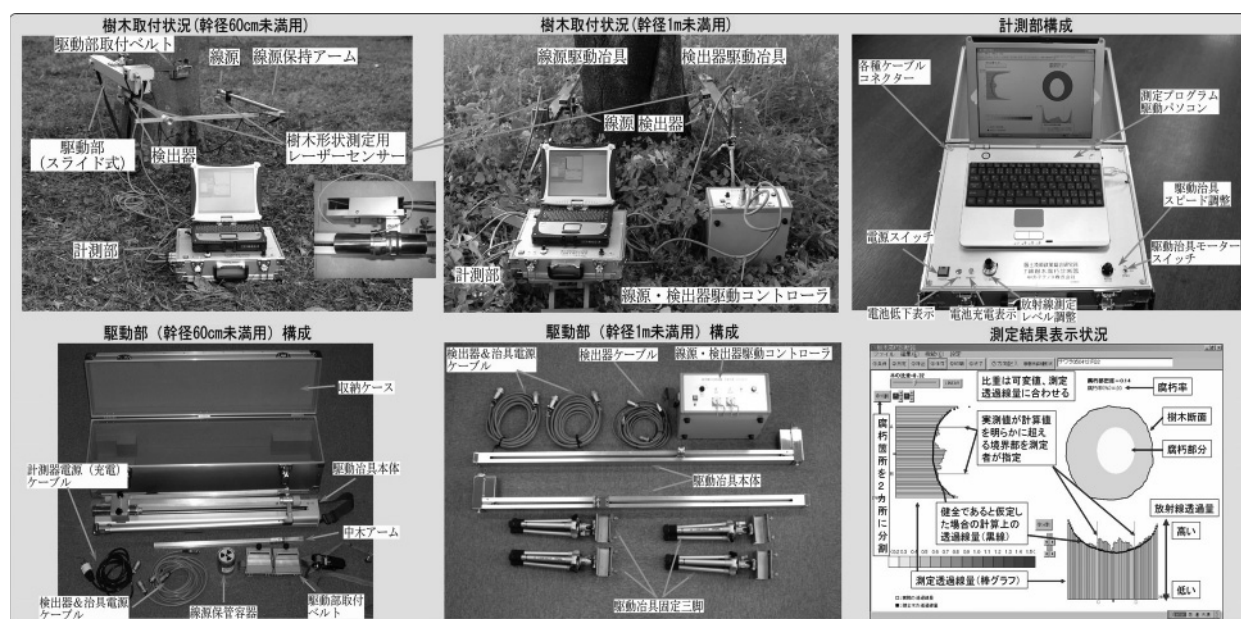


図-11 γ 線を利用した樹木腐朽診断機

4.2 街路樹の適正な維持管理のための技術 ―根上がり対策技術

街路樹の根系は、地上部が成長するにしたがって根域も広がるため、植樹帯を超えて歩道下にも伸長していくこととなる。伸長した根は、樹木の成長とともに肥大化して縁石や舗装を持ち上げる障害を発生させるため、ユニバーサルデザイン化を進めるにあたって大きな問題となっている。この問題に対応するため、根系による障害の実態を把握して発生要因を抽出するとともに、根上り時の対応策について対策技術を研究している。

(1) 根上りの発生要因

街路樹の樹木の特性としては

- ・ 成長に伴い根の伸長範囲は広がる。
- ・ 侵入出来る隙間があればどこへでも根を伸長させる。
- ・ 縁石下に根が伸長できる隙間がある場合には、この隙間から歩道舗装の下まで伸長させる（写真-4 参照）。
- ・ 歩道舗装下に伸びた根は、肥大成長の進行に伴い、舗装条件（厚さ、路盤の硬さ）に応じて、樹種により異なる伸長特性（串団子のような瘤を作ったり、異常に屈曲を繰り返す）を示しながら根を伸長させる（写真-5 参照）。
- ・ この肥大成長にともなって、舗装を持ちあげひび割れを作ったり（写真-6 参照）、平板やブロック等を持ち上げるようになってしまう（写真-7 参照）。
- ・ これらの障害は、植栽基盤が狭いほど、樹木に構造物が近いほど、樹木が大きくなるほど顕著になってくる。



写真-4 縁石下の隙間に伸びた根



写真-5 路盤の隙間に合わせて瘤を作る



写真-6 舗装にできたひび割れ



写真-7 舗装平板の持ち上げ

(2) 根上がりの対応策

①海外で実施されている一般的な対策

海外においては、根系肥大による歩道等への損害・被害については、舗装・縁石等の修繕費用の増大のみならず、利用者の被害に対する高額な訴訟にまで及んでいるのが現状といえる。そのため、様々な樹木管理の方法や対策工法が試みられており、一般的には以下の対策があげられる。

A. 回避対策 (Avoidance Strategies)

歩道形態や線形を変更改修するか、樹木自体の位置を変更（移植、植替え）することで、舗装等の損害を回避しようとする対策である。

B. 誘導対策 (Guidance Strategies)

根が構造物から離れて健全な生育が行えるように根系誘導を行う対策である。これは積極的に根域を形成していく方法と、プラスチック等の資材で遮断誘導を行う方法の2つの方向がある。

また、直接的な誘導ではないが、樹木管理の一環として、枝葉の剪定と同様に根系の剪定が一般的に行われている。

C. 耐性対策 (Resistance Strategies)

根等の拡張に耐えうる構造物の導入を行うという対策である。剛構造として舗装自体の強度向上（コンクリート床版等）、舗装端部の強度向上や一体構造化、または柔構造として、可動構造（ゴム床やレンガ+メッシュ鋼材等）等が上げられている。

D. 混合対策 (Hybrid Strategies)

前述の3つの対策は、コストのミニマム化や複数の条件に対応するため、いくつかを組合せて用いることが一般的であり、これらを複合対策としている。多くは回避対策からはじめて誘導対策に移行し、最後の手段として耐性対策を用いることで、コストを最小限にできるとされている。

②設計段階からの対応策

新規に植栽する場合、将来的な根上りを防ぐためには、樹木根系の将来的な発達を当初より見越して、十分な植栽基盤を確保することが必要である。このため、植栽基盤の形状は、制約のない広場等が最適であり、制約を受ける場合でも植栽樹より連続する植樹帯とすることが望ましい。また、構造物を樹木からなるべく離して整備することが基本となる。

土地利用等の関係から、止むを得ずに樹木に近接して構造物を設置する場合には、構造物の地下部に根系が進入しないような対策を施すとともに、植栽後の維持管理で根上りが発生しないようにすることが重要である。

具体的な対応策は以下のとおりである。

- A. 構造物における対策（樹木との隔離、構造物の強化）
- B. 植栽基盤整備における対策（適切な植栽基盤の整備、根系誘導耐圧基盤※、根系誘導、根系遮断）（図-12 参照）

※植栽地周辺の舗装構造物の下部に、路床としての耐圧性を備えつつ、根系伸長を促すように調合された基盤材を敷設する方法

- C. 樹木における対策（植栽地に適した樹種選定）
- D. 上記の複合対策

③管理段階での対応策

根上り樹木への対策の基本は、「樹木の根上りによって生じた舗装構造物への影響（浮上りや損壊など）による歩行障害や事故を未然に防ぐ」、ということが重要である。利用者の快適性を確保しつつ、樹木の良い生育を図る必要がある。

対策工を講じるためには、根上がりの程度と影響の程度を把握し、構造物等の種類と老朽の程度を考慮しながら、具体的方法を考えることが重要である。根上りによる影響は、①縁石の浮上り、②舗装面の浮上り、③舗装面のひび割れ、④縁石のひび割れという段階的な発生順序を辿ることが多く、初期の段階で対応を確実に行っていれば、大きな被害となることはほとんどない。このため、根上りが確認された場合は、出来るだけ速やかに対策を講じるべきで、放置しておけばおくほど、根系範囲は拡大し、影響の程度は甚大となる。

初期段階での対策は比較的容易であり、安価に収まる可能性も高い。また、具体の

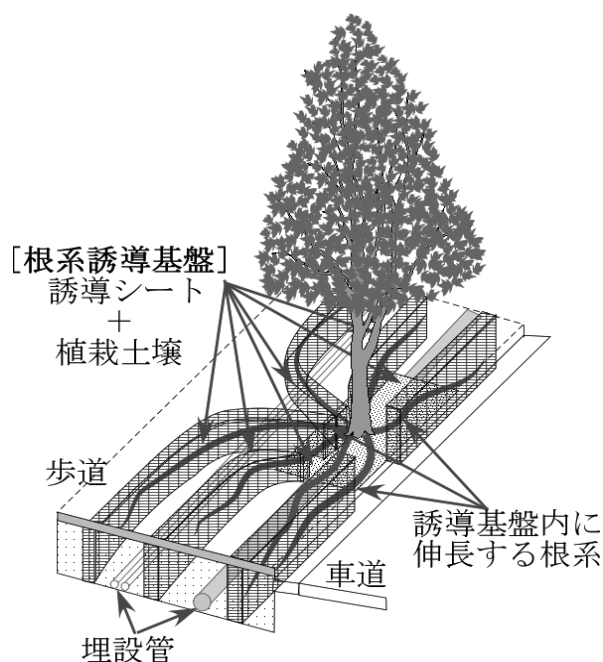


図-12 根系誘導

対策工では根系の切断を要する場面も多く、このような場合、切断する根系が細いほど、樹木の生育や腐朽菌による影響等が軽減されやすい。

具体的な対応策は以下のとおりである。

- A. 構造物における対策（構造物の移動、改修）
- B. 植栽基盤整備における対策（植栽基盤の拡大、土壌改良、根系遮断、根系誘導）
- C. 樹木における対策（根系切断、樹種の転換）
- D. 上記の複合対策

5. おわりに

豊かで潤いのある低炭素社会づくりに向けて推進すべき課題は、多方面にわたっており、大学、企業とも合わせて様々な取り組みが求められている。

国土技術政策総合研究所では、私たちの身近にある都市の緑が有している機能を適正に把握するとともに、都市の中にあつてそれらの機能を十分に発揮させ、自然と共生する社会を作り出すことにより、低炭素社会の実現に必要な基礎的・汎用的な技術について取り組んできている。今回は、それらに関して取り組んでいる調査・研究の成果の一部を紹介した。これらの研究成果の詳細については研究所の HP にも掲載しているので、詳しくはそちらを参照して頂ければ幸いである。

現在は、街路樹等のライフサイクル CO₂ の算出手法の確立や、緑化樹木に対するアセットマネジメント手法等の検討により、限られたスペースを有効に活用して、効率的に低炭素社会づくりを実現するための植栽計画や管理計画を提案するための研究を進めている。また今後は、のり面や芝生地など高木以外の CO₂ 固定量についても算出手法の確立を目指しており、それに伴う効果的な緑化計画の実現を目指して研究を推進していきたいと考えている。さらに、社会資本整備のみにかかわらず、一般国民が、最も身近な吸収源対策として体感し参加できる緑化活動に対しても、わかりやすく評価できる指標づくり等を確立させるなど、都市緑化として望まれている役割や技術について、新しい視点からアプローチしながら、広範で長期的な課題についても新しい研究に取り組んでいきたいと考えている。