33. 都市緑化による CO₂ 固定量算出のための原単位設定

A basic calculating unit to estimate an amount of carbon fixation by a planted tree

藤原 宣夫*・山岸 裕*・村中 重人**

Nobuo FUJIWARA, Yutaka YAMAGISHI, Shigehito MURANAKA

ABSTRACT; A basic calculating unit is needed to estimate an amount of carbon fixation by planted trees in urban area, therefore three species, fifteen planted trees were analyzed by means of the stem analysis, and the growth process were clarified. Wood Growth had close correlations to Tree Height and Trunk Diameter at the height of 1.2m, and two Regression Curve Expressions were made. Furthermore, Tree Height and Trunk Diameter were proportional to Tree Age. According to these correlations, the expressions for calculation of Annual Wood Growth were made. The Annual Wood Growths are useful as a basic calculating unit for various size trees of each species. The form of expressions are as follows, $Y = a\{(X+c)^b - X^b\}$; Y: Annual Wood Growth (kg/y); X: Tree Height (m) or Trunk Diameter (cm) at the height of 1.2m; a, b and c: constants as each species.

KEYWORDS; urban greening, planted tree, carbon fixation, annual wood growth, stem analysis.

1. はじめに

植物による CO₂ の吸収固定は、地球温暖化の防止に少なからず貢献するものと考えられ、京都議定書では、CO₂ 排出量の算定に際し、植林による固定量を算入することとされた。しかし、都市化が進み、林業による植林を多く望めない国からは、都市公園や街路樹などの都市緑化による植栽樹木も、CO₂ 吸収源として算入されることが要望されている¹⁾。

算入のためには、植栽樹木の CO₂ 固定量を、広く実行可能な方法で算出できることが前提とされる。森林については、既に IPCC から算出の原単位となる森林面積当たりの年間バイオマス成長量が提示されている²⁾。しかし、都市緑化による植栽樹木は、森林形状を有しない単木や列状のものが多く、森林の原単位を適用できる範囲は限られてしまうため、樹木本数当たりの原単位設定が必要と考えられる。単木の CO₂ 固定量算定については、半田らによる研究³⁾があり、樹幹解析により樹木の成長量を明らかにすることにより、CO₂ 固定量を算出することが可能であることを報告している。しかし、データの蓄積が少なく、未だ有効な原単位の提示に至っていないのが現状である。

都市緑化には、様々な樹種、大きさ（樹齢）の樹木が用いられるため、原単位はそれらに応じたものである必要がある。著者らは、半田らの手法を参考とし、我が国で都市緑化に多用される樹種を対象に、樹幹（年輪）解析を行うことにより、その成長過程を明らかにし、特定の大きさの樹木が、特定の 1 年間に、あるいはその大きさに達するまでの間に、植物体内に蓄積する CO₂ 量を推定する算定式を作成した。算定式から得られる CO₂ 量は、都市緑化による CO₂ 固定量算出のための原単位の一部となるものと考えている。

本稿では、主として、この算定式の作成過程について報告する。

* 建設省土木研究所 Public Works Research Institute, Ministry of Construction

** ジオグリーンテック株式会社 Geo Green Tech CO., LTD

2. 方法

2.1. 植栽樹木のCO₂固定量算出の前提条件

(A) 算定の対象とする植物体部位

植物は、光合成により大気中のCO₂を体内に取り込み、炭水化物を生成する。そして、炭水化物は、植物体の形成物質として植物全体に蓄積される。しかし、葉は、落葉により比較的短期間に失われるため、ここでは、木質化することにより長期に渡り固定が継続する幹・枝・根をCO₂固定量算出の対象とする。

(B) 木質部のC含有量

植物体に含まれるCは、そのほぼ全てが大気中の、CO₂に由来する。木質部のC含有量は、これまでの多くの分析結果から、樹種に関わらず乾燥重量比にして50%程度であることが知られている⁴⁾。そこで、ここでは、木質部の乾燥重量を算出までを行うこととする。なお、CO₂固定量は、CO₂とCの分子量の比から乾燥重量に1.83を乗じたものとなる^{注1)}。

2.2. 木質部成長量(材積増加量)の算出方法

(A) 幹の年間材積増加量の算出方法

幹については、樹幹解析により得られる樹齢別の樹高と各高さの幹半径から年間材積増加量を算出し、別途求める乾材比重を用いて乾燥重量に変換する。樹幹解析は一般的な方法⁵⁾に従い、高さ0.2mから1.0m毎の高さの年輪幅を計測する(図1参照)。

(B) 枝・根の年間材積増加量の算出方法

枝・根の成長は、年輪による解析は困難であるため、幹と同様の割合で成長すると仮定し、別途求める幹・枝・根の部位別乾燥重量比を、幹の年間材積増加量に乘じるにより、枝・根の年間材積増加量とする。

(C) 部位別乾燥重量比および乾材比重の算出方法

樹幹解析供試木の幹・枝・根それぞれの全乾燥重量を測定し、各部位の乾燥重量比を算出する。また、樹幹解析から得られる幹の材積量と幹の乾燥重量から、乾材比重(g/cm³)を算出する

2.3. 樹幹解析供試樹木

街路樹としての使用本数の多い樹種から、ケヤキ(*Zelkova serrata*)、イチョウ(*Ginkgo biloba*)、プラタナス(*Platanus orientalis*)の3種を選定し^{注2)}、各5本を供試木とした。全供試験木の形状寸法を表1に示す。

図1 樹幹解析の階層

表1 樹幹解析供試樹木一覧

樹種	ケヤキ					イチョウ					プラタナス				
植栽地	茨城県東茨城郡小川町下吉影					茨城県鹿島郡鉾田町鳥栖新田					茨城県つくば市福田坪				
樹木No.	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5
樹高 m	10.0	9.0	8.0	7.5	7.0	7.3	8.0	6.0	5.5	9.0	8.0	9.0	6.0	7.0	9.5
形状寸法															
幹周(0.2m高) cm	102.5	92.0	75.0	71.0	78.0	53.5	65.0	47.0	32.0	66.0	66.0	59.0	40.0	51.0	61.0
幹周(1.2m高) cm	90.0	74.0	61.5	54.0	64.0	41.0	49.5	36.0	25.5	52.5	55.0	47.0	31.0	41.0	53.0
枝張り(最大) m	9.3	8.3	7.7	6.2	8.3	3.9	4.9	3.0	3.2	5.2	6.6	6.8	5.3	4.6	6.7
枝張り(最小) m	7.1	5.5	6.2	5.5	6.5	3.1	4.0	2.2	2.2	4.6	6.2	6.4	4.6	3.8	6.2

注1) CO₂の分子量は44、Cは12なので、CO₂固定量は乾燥重量の50%の44/12、すなわち1.83倍となる。

注2) 1997年の全国の街路樹調査で、使用本数の順位はイチョウ1位、ケヤキ3位、プラタナス類6位であり、3種の合計本数は全街路樹本数の19.8%となっている⁶⁾。

表2 部位別乾燥重量・乾燥重量比・乾材比重の測定・算出結果

樹種		ケヤキ					イチョウ					プラタナス				
伐採解体年月日		1999.11.10-12					1999.11.13-16					1999.11.7-8				
樹木No.		No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5
乾重 (kg)	幹	117.7	82.2	51.8	45.4	55.6	19.9	28.4	12.4	6.3	37.6	49.6	40.5	13.1	26.0	53.8
	枝	259.3	119.7	66.2	46.5	69.7	7.3	11.4	4.4	2.7	18.5	36.5	26.7	9.5	12.5	32.8
	根	70.7	64.8	34.6	30.5	36.0	20.5	11.5	5.7	3.1	23.0	22.2	16.9	7.0	10.8	20.5
乾重比 (%)	幹	25.3	30.8	33.9	37.1	34.5	41.6	55.4	55.1	51.6	47.5	45.8	48.2	44.3	52.7	50.2
	枝	58.7	44.9	43.4	38.0	43.2	15.3	22.2	19.6	22.1	23.4	33.7	31.7	32.1	25.4	30.6
	根	16.0	24.3	22.7	25.0	22.3	43.1	22.4	25.3	26.2	29.1	20.5	20.1	23.6	21.9	19.1
乾材比重 (g/cm3)		0.66	0.71	0.70	0.68	0.69	0.49	0.47	0.53	0.55	0.50	0.70	0.69	0.61	0.67	0.66

3. 結果

3.1. 重量測定結果

全供試樹木の乾燥重量、部位別乾燥重量比、および、乾材比重を表2に示す。

3.2. 樹幹解析結果

樹幹解析の結果を、ケヤキ1を例として樹幹解析図の形にして図2示す。図2中の折れ線は各年の年輪であり、ケヤキ1は樹齢26と推定される。また、折れ線と縦・横の軸に囲まれる部分が各樹齢での幹の半分の断面形状を表しており、この断面の縦軸を回転軸とした回転体の体積を算出することにより各樹齢の材積量が算出される。このようにして算出したケヤキ5樹木の樹齢と幹材積量の関係を図3に示す。

3.3. 材積成長量算出結果

前項で算出した幹の材積量に、表2の乾材比重を乗じて乾燥重量とし、さらに同表の部位別乾重比から枝・根の乾燥重量を算出し、各樹木の全木質部乾燥重量を算出したものを図4.1に示す。また、同様な操作をイチョウ、プラタナスについて行い木質部乾燥重量を算出したもの図4.2および図4.3に示す。

樹高(m)

図2 ケヤキ1の樹幹解析図

4. 算定式の作成

4.1. 樹木形状寸法項目と木質部乾燥重量の関係

以上の結果から、植栽樹木の特定の樹齢での木質部の乾燥重量が推定可能となる。しかし、都市に植栽される樹木個々の樹齢を、樹幹解析などの方法で推定することは実質的に困難である。そのため、容易に測定可能な樹木形状データから木質部乾燥重量を導き出す必要がある。

通常、植栽工事において、表示される樹木形状寸法の項目は、樹高、胸高幹周（高さ1.2m）、枝張であり、これらの項目は、

図3 ケヤキ幹材積成長

図4.1 ケヤキ木質部成長量

図4.2 イチョウ木質部成長量

図4.3 プラタナス木質部成長量

表3 樹木形状寸法項目と木質部乾燥重量の相関関係

	樹高	胸高直径	0.2m幹周	1.2m幹周	胸高断面積	枝張
ケヤキ(n=5)	$y=0.1914x^{3.3086}$ $R^2=0.8243$	$y=0.0437x^{2.8017}$ $R^2=0.9308$	$y=7E-05x^{3.3785}$ $R^2=0.9865$	$y=0.003x^{2.6432}$ $R^2=0.9833$	$y=0.0614x^{1.4009}$ $R^2=0.9308$	$y=0.5492x^{3.0362}$ $R^2=0.4873$
イチョウ(n=5)	$y=0.0311x^{3.5998}$ $R^2=0.96$	$y=0.0607x^{2.5625}$ $R^2=0.9451$	$y=0.0027x^{2.4085}$ $R^2=0.9185$	$y=0.0035x^{2.5003}$ $R^2=0.9387$	$y=0.0827x^{1.2813}$ $R^2=0.9451$	$y=2.1212x^{2.2551}$ $R^2=0.8886$
プラタナス(n=5)	$y=0.2439x^{2.7403}$ $R^2=0.8341$	$y=0.1838x^{2.2557}$ $R^2=0.9868$	$y=0.0009x^{2.8006}$ $R^2=0.9653$	$y=0.0076x^{2.3955}$ $R^2=0.9788$	$y=0.2414x^{1.1278}$ $R^2=0.9868$	$y=1.5991x^{2.1605}$ $R^2=0.6279$
3樹種(n=15)	$y=0.0131x^{4.269}$ $R^2=0.6539$	$y=0.0342x^{2.8603}$ $R^2=0.9568$	$y=0.0003x^{2.9946}$ $R^2=0.9266$	$y=0.0013x^{2.8297}$ $R^2=0.9551$	$y=0.0484x^{1.4301}$ $R^2=0.9568$	$y=1.7936x^{2.3015}$ $R^2=0.8142$

計測が比較的容易であり、計測値が、工事記録や各種の台帳として記録されていることが多い。そこで、まず、このような、一般的な形状表示項目と木質部乾重との相関関係を確認する。

一般に樹木各部位の重量等の物理量(Y)と、樹木形状寸法(X)との間には、相対成長式 $Y=aX^b$ (a と b は定数) が成り立つことが知られている⁷⁾。そこで、樹幹解析供試樹木 15 本について、木質部乾燥重量と、樹高、

幹周、枝張のほか、いくつかの形状寸法項目との関係を、相対成長式を当てはめ、実測値との相関関係を確認した。結果を表3に示す。

表3より、胸高直径など幹の太さに関わる形状が、いずれも高い相関を示していることがわかる。また、枝張はケヤキ、プラタナスでの相関が低く、樹高は個々の種では、良い相関が認められるが、3 樹種のデータでは相関が低くなっている(図5)。一方、胸高直径では、各樹種、全樹木でも高い相関が見られる(図6)。このような結果から、乾燥重量を推定する項目として、3 樹種に共通の形状寸法項目となりうるという点からは、幹の太さに関わる項目が適していると言える。

図5 樹高と木質部乾重の関係 (3樹種)

図6 胸高直径と木質部乾重の関係 (3樹種)

図7 樹高と木質部乾重の関係
(樹幹解析全データ)

図8 胸高直径と木質乾重の関係
(樹幹解析全データ)

4.2. 樹幹解析データを用いた相関解析

前項において良い相関が得られた項目である樹高と胸高直径について、樹幹解析から得られた全ての値を用いて相対成長式を求めた。結果を表4示す。両項目とも、各樹種、また3樹種の全データにおいても、高い相関が得られた。散布図の例として、3樹種全データのものを図7および図8に示す。

これらの式からは、特定の樹高あるいは胸高直径の樹木が、その大きさになるまでに蓄積した、木質部乾燥重量、すなわち CO₂ 固定量の算出が可能である。

しかし、この式から、特定の樹高あるいは胸高直径の樹木が、一年間にどのくらい成長するかを明らかにするには、樹高、胸高直径の年間成長量を明らかにする必要がある。

4.3. 樹高・胸高直径と樹齢の相関関係

樹幹解析の全データを用いて、樹高と樹齢の関係を見たものが図9、胸高直径と樹齢の関係をみたものが図10である。

図9より、樹高は樹種毎に樹齢と直線的な関係があると見える。しかし、3樹種のデータを合わせると、相関は低くなる。それに対して、図10からは、胸高直径と樹齢との直線関係は、3樹種とも非常に近似したものとなっており、先の15樹木の解析からも示唆されたように、ここでも、一つの回帰式により、3樹種について胸高直径と樹齢の関係を示すことができる。

さて、これらの関係からは、両項目とも一定の速度で成長をしているように見えるが、実際には、毎

表4 樹高・胸高直径と木質部乾燥重量の相対成長式
(樹幹解析全データ)

	樹高	胸高直径
ケヤキ	$y = 0.0192x^{4.1842}$ $R^2 = 0.9409$	$y = 0.1596x^{2.2961}$ $R^2 = 0.9657$
イチョウ	$y = 0.0128x^{3.5402}$ $R^2 = 0.9177$	$y = 0.0799x^{2.2494}$ $R^2 = 0.925$
プラタナス	$y = 0.0104x^{3.9664}$ $R^2 = 0.9257$	$y = 0.1271x^{2.155}$ $R^2 = 0.9631$
3樹種	$y = 0.0135x^{3.9938}$ $R^2 = 0.8901$	$y = 0.1179x^{2.2893}$ $R^2 = 0.9465$

図9 樹高と樹齢の関係

年の気候の変動などにより、各年の成長量は、違ったものとなる。また、樹齢によってもその成長速度に差があるものと思われる。ここでこの式が意味するのは、解析対象とした樹木のこれまでの成長を、平均的速度で表したものと解釈される。

4.4. CO₂固定量の推定

以上の解析から、木質部乾重と樹高・胸高直径と樹齢の関係を整理すると次の式で表される。

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

Y : 木質部乾燥重量 X : 樹高 (または胸高直径)

a, b : 木質部乾燥重量と樹高 (または胸高直径) 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の年間成長量

ケヤキの樹高を例にして述べると、平均的な1本のケヤキが、これからの1年間に平均的な成長をす

るとした場合、期待される樹高成長量は、図9の回帰式 ($y = 0.3864x + 0.9464$) から、0.3864mである。

樹高 X(m)のケヤキが1年間に成長すると期待される木質部成長量は、樹高 X(m)のケヤキと、樹高 X+0.3864(m)のケヤキとの木質部乾重の差となり、表4のケヤキ樹高の相対成長式 $y = 0.0192x^{4.1842}$ から、その差を求める式は、 $Y = 0.0192 \{ (X + 0.3864)^{4.1842} - X^{4.1842} \}$ となる。同様にケヤキの胸高直径については、 $Y = 0.1596 \{ (X + 1.0818)^{2.2961} - X^{2.2961} \}$ が得られる。これらの式を用いて、樹幹解析を行ったケヤキ5 (樹高 7.0m、胸高直径 20.4cm) の木質部乾燥重量を算出すると、樹高からは 16.3kg/年、胸高直径からは 20.4kg/年という値が得られた。ちなみに 1.83 倍し CO₂ に換算すると、それぞれ、30.4kg/年、37.4kg/年となる。

5. おわりに

以上述べたように、CO₂ 固定量算定の原単位となる、特定の樹高または胸高直径における樹木の年成長量 (木質部乾燥重量) を算出した。しかしながら、この原単位については、わずかな樹種と比較的若齢の樹木に限定される、適応の拡大には、他の樹種や大木での解析が必要とされるほか、気候や地域の差による変化などの補足データが必要である。

また、都市内全域の植栽樹木の CO₂ 固定量を算出しようとする場合、植栽樹木の樹種や大きさ、総本数をどのように把握するかが重要な問題であり、原単位設定も、測定が可能でなければ、その役割を果たし得ないことになってしまう。本稿で検討した樹木単位の原単位の設定は、類似の成長特性を有する植物種の統合や、様々な要因による差の簡単な補正方法などが整備されなければならないと考えている。

参考文献

- 1) 藤原宣夫：COP4 報告－吸収源としての土地利用・森林に関する討議結果について－、土木技術資料、40-1、pp.68-71、1999
- 2) IPCC：Revised 1996 IPCC Guideline for National Greenhouse Gas Inventories, Workbook(volume 2), pp.5.22, 1996
- 3) 半田真理子ほか：道路緑化樹木の二酸化炭素固定に関する研究、土木研究所資料、3059 号、建設省土木研究所、1992
- 4) 三浦伊八郎、西田吃二：木材の元素組成、「木材化学」、丸善出版、pp.35-38、1933
- 5) 梶原幹弘：樹木の生長量の測定、「森林計測学」大隅眞一ほか共著、養賢堂、pp.118-138、1971
- 6) 藤原宣夫、田中隆、木部直美：わが国の街路樹Ⅳ、土木研究所資料、3666 号、建設省土木研究所、1999
- 7) 佐藤大七郎：陸上植物群落の物質生産Ⅰa－森林－、共立出版、1973

図10 胸高直径と樹齢の関係