

# 建築用と都市デザイン用の高木の成長速度分析

ブンダリッヒ・ビルフリド<sup>\*1</sup>, マッハ・イリス<sup>\*2</sup>,  
ベリングラート木村園子ドロテア<sup>\*3,4</sup>

## Growth Rates of Large Trees Used for Urban Design and Architecture

by

Wilfried WUNDERLICH<sup>\*1</sup>, Iris MACH<sup>\*2</sup>  
and Sonoko D. BELLINGRATH-KIMURA<sup>\*3,4</sup>

(Received on Sep. 30, 2016, and accepted on Nov. 10 2016)

### Abstract

Global warming has increased interest in the question as to which trees are best for absorbing greenhouse gases. On the other hand, trees planted in public spaces require certain properties to be accepted by citizens and authorities. In this study, we measured the growth rates of tree species grown in the Kantō area by height and thickness and fitted a growth model for the first time. Visualization is an important tool for planning. Growth from sprouts is most economical and provides privacy and shade protection after just three years of growth. The criteria for urban forestation are outlined and would have a large impact on carbon dioxide sequestration, if it became socially acceptable to plant every empty space with robust and sustainable trees such as Japanese oaks.

**Keywords:** Tree growth modeling, Architecture, Urban planning, Biomass production, CO<sub>2</sub> sequestration

### 1. はじめに

高木に対する関心は二酸化炭素濃度の増加や地球温暖化により高まっている。例えば、高木の二酸化炭素の吸収率が高いことは報告されている<sup>1,2)</sup>。具体的に、どのような木に高い吸収能力があるかということは現在の研究課題であるが<sup>3)</sup>、その論文には日本の樹木は含まれていない。他の論文の結論では、植物の成長には、太陽、水、肥料の三つの栄養素が豊富に必要なこと以外、ある地域の森林では、最高濃度のCO<sub>2</sub>ガスを吸収できることが報告された<sup>2)</sup>。その理由は光合成の飽和で説明することができる。高木成長速度は、光合成の量で決まり、木の種類、光の量、水の量、温度、湿度、養分、異木間の関係など、さまざまな理由に依存する<sup>4)</sup>。これらのパラメータ間の相互作用は複雑である<sup>5,6)</sup>。

本研究では建築用と都市デザイン用の高木に焦点を合わせている。関東は、湿度が高く、成長のために適した気候の地域である。神社と寺院には高木が多く、昔から高木を高く評価していた。並木は美しく見え、公園の木はレク

リエーション機能をもつ<sup>7)</sup>。しかし、現在の社会で、若者は自然に対する興味が少なくなった。「植物の管理は手間がかかる」と考え、管理者は「木を残す場合、経費が掛るので、それらを切る」と考える。このような考え方は、社会学で「コモنزの悲劇」と言われている。国立京都国際会館は、1997年に初めて京都議定書でCO<sub>2</sub>ガスの発生を減少することを決定した。しかし、樹木が二酸化炭素ガスを吸収することは、これまであまり考慮されてこなかった。様々な研究により、高木はCO<sub>2</sub>ガスだけではなく、有害な粒子状物質PM2.5を吸収ができることが明らかになっている<sup>7,8)</sup>。2005年に開催された愛知博覧会のマスコットはモリゾーとキッコロであり、「自然を大事にする」、「エコのため木材を使う」、「森と高木を評価する」という目的があった。しかし、10年後には社会的な影響はほぼなくなり、身近な樹木への関心が薄れている。

本研究は、関東の木の分布を分析し、木の成長を測り、社会的なアクセプタンスを増やす三つの目的がある。まず、分布と実験データの観測に基づく高木の成長モデルを説明する。次の章で、関東地区の公園に植えた樹木を説明する。そして、最後の章で、樹木に関する問題を論じ、結果をまとめる。

\*1 工学部材料科学科教授

\*2 ウィーン工科大学准教授 オーストリア

\*3 東京農工大学 (2015年3月まで) 准教授

\*4 ライプニッツ農業景観研究センター一部局長 ドイツ

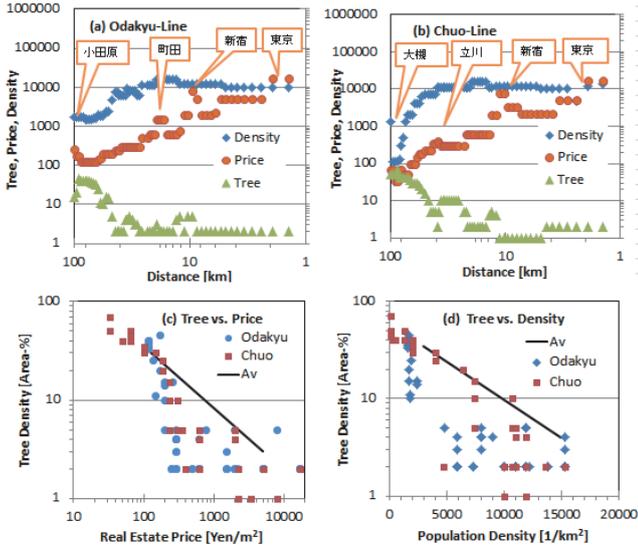


Fig. 1 (a,b) Tree density, real estate price, and population density along two commuter lines, and tree density versus (c) real estate price, and (d) population density.

## 2. 関東での木密度の分布を分析

現在、世界中の人々の 70% 以上は都市に住んでいる。商業上の理由により、ある特定の公共スペース区域だけに高木を植えることができる。新しいアーバンデザインや都市林業の目的は、人々の居心地の良さとレクリエーションのため、なるべく多数の樹木を植えることである。

本研究は、Google Earth の写真で木の面積と地面の割合を測った。東京駅から約 100km 圏内にある鉄道の小田急小田原線と中央線の沿線で計ったデータを、Fig. 1 (a)と (b)に示す。森林の面積の割合、人口密度、地価を示す。人口密度は通勤範囲 50km<sup>9)</sup>まであまり変わらないが、地価は距離によって減少する。中央線沿線での減少は、小田急線より早い。逆に森林の面積の割合は増え、広くても狭くても、飽和率 30%に当たる。例えば、どの大学のキャンパスでも、木の割合が約 30%以上になる。そして山手線内側も、木の割合が 3%以上になる。逆に、高層住宅の場合は木の割合が約 20%以下になる。

地価は、人口密度より木の割合と関わる事が Fig. 1 (c)と (d)で分かる。図内での黒線は、都市開発により、木の割合は年々減少していることである。この分析の結論は、「木を切ることは「コモンスの悲劇」の一例である」といえる。

## 3. 高木成長のモデル化

高木の成長をモデル化し成長速度を調べ、それを可視化することは、将来を計画するための重要なツールとなる。

本研究では、実験データと観測に基づく高木の成長モデルを説明する。次の章で、関東地区の公園に植えられた樹木を説明する。そして、最後の章で樹木に関する問

題を論じ、結果をまとめる。植物の成長は、成育歴、光、灌漑、栄養供給、環境条件などに依存し、生命進化の Backham 方式に関係がある。

ここから、三つの測定方法を説明する。最初に Fig.2 と Table 1 に示すように、日本で最も高い木の六種類は原本データから得られた<sup>10,11)</sup>。そして、樹木の高さとその樹齢は Fig.2 (a)に文献データ<sup>12)</sup>と一緒に書いた。そのデータの元は、1964年に設立した東海大学湘南キャンパスで植えられた木の現在の高さと直径である。これらのデータは、樹齢と高さの関数で別の二つの測定方法と一緒に次の章で説明する。さらに成長モデリングのため、木の高さ  $H$  と、農林業でよく使用される胸高直径  $dbh$  と樹齢  $t$  の関数で高木の体積つまりバイオマス体積  $V$  を計算することができる：

$$V(t) = f(H, dbh, t) \quad (1).$$

次の Fig. 2 (b) にプロットされる実験データはシラカシのようなアメリカの常緑カシでの文献<sup>13,14)</sup>から得

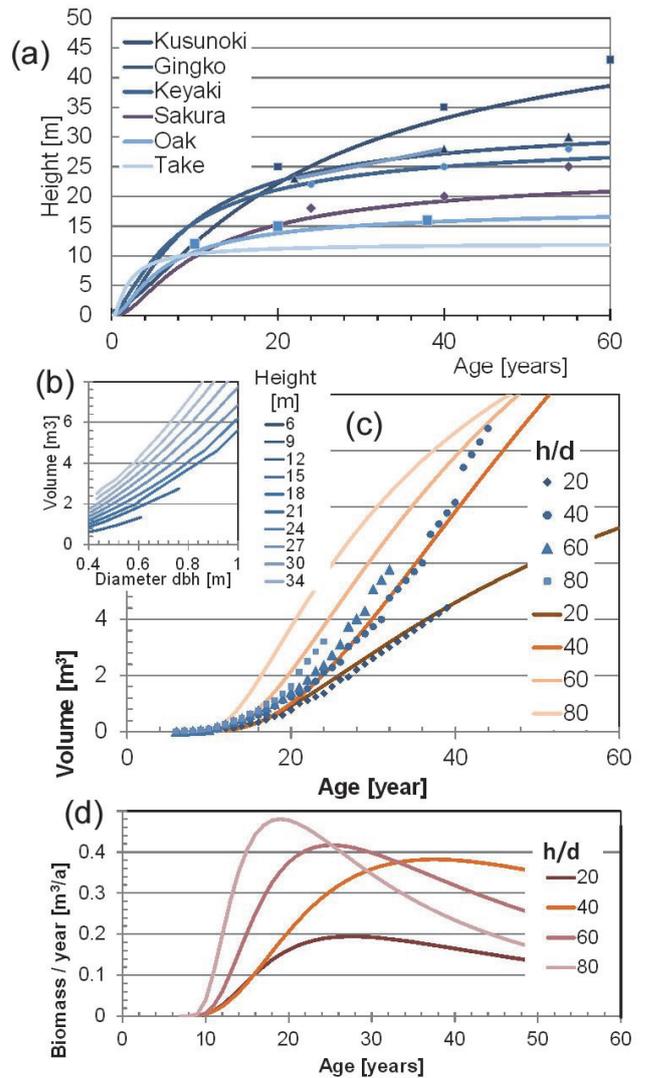


Fig. 2 Growing behavior of six dominant trees in Kantō area, such as Camphor (クスノキ), Gingko (イチョウ), Keyaki (ケヤキ), Japanese Cherry (サクラ), evergreen Oak (カシ) and giant Bamboo (マダケ) : (a) height as a function of age, (b) volume as function of diameter and height, (c) volume and (d) biomass production per year.

られた固有データを示す. この図で見ると, どんな木でも高さ  $H$ , 胸高直径  $dbh$  と体積  $V$  に関係があることが分かる. したがって, 木の相乗比  $H/dbh$  つまり  $h/d$  を提議しながら, 樹齢と相乗比によって, その木に合った体積と樹齢を書くことができる. そして, Fig. 2 (a)と(b)のデータは一緒に組み合わせ, Fig. 2 (c)に書いた. 四つの相乗比  $H/d$  を書き,  $H/d = 20$  で定義する<sup>6)</sup>:

$$\text{Log}(\text{Growth}) = k * \text{Log}^2(\text{time}) \quad (2)$$

特に, 林の高さは Chapman-Richards 方式で表現することが可能である<sup>6,9,11)</sup>:

$$H(t) = A \exp(h-f/(st+sp*(t-sh))) \quad (3)$$

そのパラメーターは  $A$ ,  $h$  高さの関係,  $f$  木の衰弱度,  $st$  誘導期間,  $sp$  成長速度,  $sh$  時間シフトである. つまり, 40 が普通の木, 60 が細くて幅が狭い木, 80 が太くて幅が広い木のデータである. データ曲線方式 (2) よりも, その体積÷樹齢のデータセット  $V(t)$  の方が似ているが, 異なるパラメーターが取り付けられた. 最後に Fig.2 d で示したように, 下記の導関数で毎年測定している木の体積変化, つまりバイオマス量を計算することができる:

$$Y(t) = dV(t) / dt \quad (4)$$

結果として木は, Fig. 2 (c)のように誘導期間の後に最もよい状態で成長することができる. 最大のバイオマス生産は, 樹齢 20~40 年の間は安定する. しかし,  $H/d=20$  をもつ細い木は最短の成育期間で, 最大の葉量を得る. 樹齢 40 年ほどの木は, 成長やバイオマス生産量増加速度が遅くなる. したがって, 森林で樹齢が古い木を伐採することにより, より若い木をより速く成長させることが, 賢明な森林管理といえる. このデータから得られる最も重要な結論は, 他の植物より, 三次元の高さを持つ木は樹齢 20~40 年の間, 最大量のバイオマスを得り, その期間に二酸化炭素の吸収量が多いことが最も重要な結論として得られる. 次の章で考察する樹齢が若いプランテーションと比べ, 高木森林はより多くの  $\text{CO}_2$  量を吸収することができる. また, 最近注目されている再生可能エネルギー源のバイオマスを用いる. それを使うことによって, 焼却炉及びバイオマス発電機により, 高い変換効率で同時に, 湯, 熱, 電気を作ることができる.

#### 4. 成長データの図説

Fig. 3 はこの 5 種類の樹木の樹齢 5, 15, 30, 40 年の間の成長を示す. このような図説が, 建築<sup>15)</sup>, 庭園や公園を造る計画のために役立つ<sup>16)</sup>. 木の高さを比較するため, 戸建ておよびマンションを入れた. そして, 挿入図はその木の葉の形を示す. 一本のクスノキ, ケヤキ, ソメイヨシノ (サクラ) は, 枝葉が非常に大きく広がるが, イチョウは上に高く成長する. ところが, 竹は別の成長パターンを持っている. 毎年 4 月に出てくる「筍」は, 成長速度が速く, 2 週間以内に若竹の高さになる. 全ての木の中で最も速く成長する. その理由から, 東アジアでは, 成長速度が速く強度のある竹を, 建築材料として使

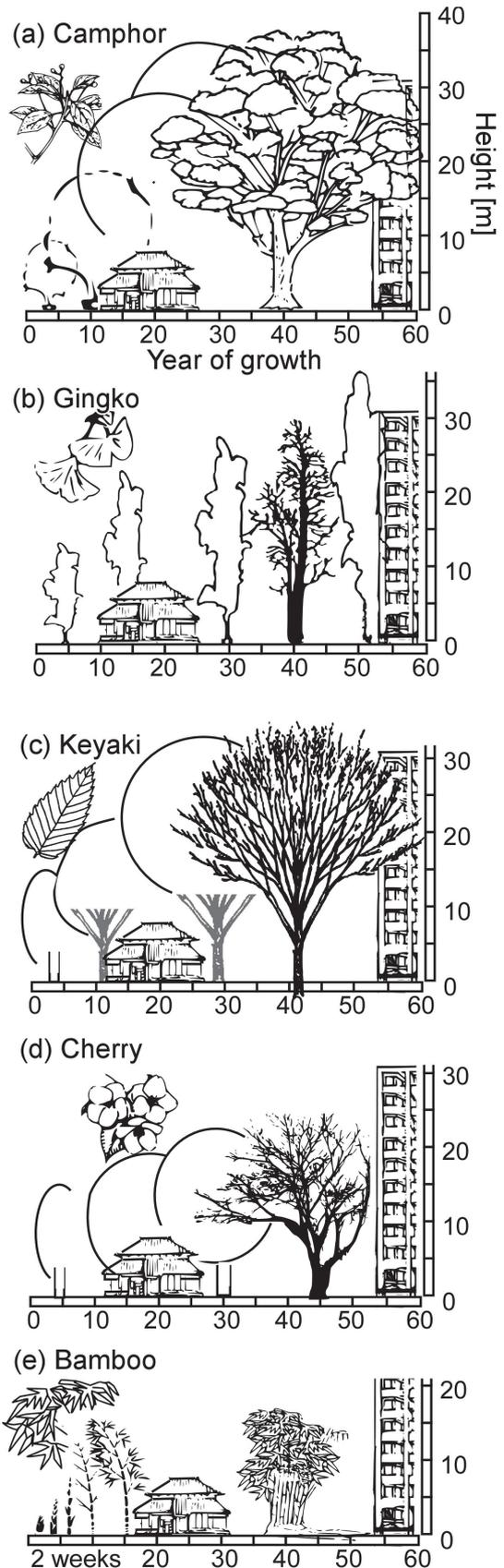


Fig. 3 Height as a function of growing years for five trees, (a) Camphor(クスノキ), (b) Ginkgo (イチョウ), (c) Keyaki(ケヤキ), (d) Japanese Cherry (ソメイヨシノ) and (e) Giant Bamboo (マダケ), showing their leaves as inset.



Fig. 4 Tree growth in months or years after planting the sprouts, (a) 4 and (b) 6 month, (c) 1 year 5 months, (d) 2 years, (e) 8 years after plantation at a different place, (f) with tree names for (e).

っている。しかし、次の章で説明しているように都市林業にはほぼ適していない。なぜなら、街路樹や公園に使用される木は、保守および植え替えを減らすために成長が遅い木が必要であるからである。

平塚市にある「進和ルネッサンス」という会社は、自動車のパーツ製造から始まり、自然環境を守るために高木を植える産業の大切さを考えた<sup>17)</sup>。それは工場内や公共にある沿道やスペースに、植物の必要性を考えた。「いのちの森づくり」という子会社で温室で、ドングリから高さ約 20 cm の苗木を生産している。その方法は、横浜国立大学名誉教授の宮脇昭先生が提案している<sup>18)</sup>。特に、複数の種類の木を植えると、虫や病気を減少させることの研究している。関東の自然の森の主役であるドングリから育てやすい「シイ・タブ・カシ」類の高木をはじめ、中木・低木を合わせ 60 種類以上、約 8 万本の広葉樹を育てている。

本研究で、その若木の成長の測定結果を報告する。東海大学湘南キャンパス付近の耕地整理の影響で、2014 年 11 月に苗木を植えた。4 ヶ月後と、6 ヶ月後の写真は fig.4 (a)と(b)に示す。冬の間は、苗木がほとんど成長していなかった。これにより<sup>6)</sup>、シラカシが特に春と秋に大きく成長率を伸ばすであろう。これとは別に、三鷹市にある国際基督教大学の (ICU) キャンパスで<sup>12)</sup>、森の中にある若木の高さ、胸高の中計、また体積を測定した。その結果、影にある木の成長は、日光が当たる木に比べ 2 倍成長が遅くなることが分かった。乾燥地や肥沃な土地の場合は、より成長が 2 倍遅くなる。隣の木に当たると、直径は変わり始まる。その影響で、強い木が勝ち、成長速度が早くなる。

次の春にも (Fig. 3 (c)), 木が成長を続けながら、大きくなる。夏に (Fig. 3 (d)), 葉の量が増えるので、2 年後に雑草の成長を防ぐことができる。この後、森はほぼメンテナンスフリーになり、成長していく。Fig. 4 (e) と (f) は、同じく平塚市の別の場所で、2006 年に植え 8 年間成長した木を示す。左下には、2009 年と 2011 年の違いを示す。この分析では、大きく成長する木は成長速度が速いことが分かった。植えるとき、木と木の距離は大体 10 cm 以上であり、半年後にチェックすることが必要である。距離が近過ぎる木は、場所を変えた方がよい。したがって、植えた木はすべて関東地域によくある在来種のため、早く成長する。スペースが 2 m 以上の場合、3 年後には密度が高い植物のフェンスになる。これらにより、高木、中木、低木から成り立つ森林が形成され、これらの森林は継続する。

Fig. 3 と Fig. 4 (f) に示していない木の種類は、20 年後の状態 Fig. 5 に示す。図にある木は、すべて強いので高さ 20 m まで成長する。その中でもスタジイは異なり、太陽が強くあたる南向きであると、高さ 40 m に成長する。特にシラカシ (Jpn. Evergreen Oak), タブノキ (Japanese Bay tree), マテバシは成長速度が速く、強い葉を持つ常緑樹である。この理由から、水が十分にあれば、砂漠地域でも、成長することが考えられる。そこから、二酸化炭素を減らすことに繋がる。



Fig. 5 Popular trees used in Kanto area for urban forestation additional to those shown in Fig. 2 and 3.

関東地域で並木に使われている開花木は、ダイセンボク (Magnolia), 4月に咲くハナミズキ, 盛夏に咲くサルスベリ (Lagerstroemia), 紅葉で知られるモミジとカエデ, 冬に咲くツバキ (Camelia) である。この種類は、公園、公共スペース、高速道路沿いなどに植えられ、人々に潤いをもたらす。温室効果ガスを吸収するために、なるべく多く木の植えることが必要になる。しかし、次の章で説明している理由から実現しない。

### 5. 高木の使用

現在の関東の木の管理方法を Fig. 6 に示す。高い山々がある場所では、Fig. 6 (a) のような地滑りを守る対策が必要である。長い根をもつ樹木は、地滑りを防ぐことができる。近頃は、地滑りの対策のため、コンクリートの壁及び木の棒が入れた。庭用の木は Fig. 6 (b) のように、形を整えるために切られた。その木は、シラカシ、マキノ木、マツ、などである。実を収穫するため、ミカン、ク

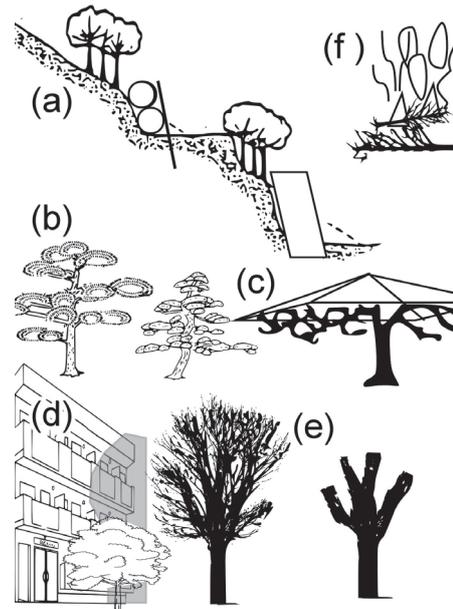


Fig. 6 Present common practice concerning trees in Japan. (a) Plan-ting at slopes to protect sliding, (b) tree cutting for aesthetics, (c) tree cutting for harvesting (d) trees for shade or privacy protection, (e) cutting for typhoon prevention, (f) burning leftovers.

リ、クルミ、ブドウ、ナシなどの木は、剪定し、枝を固定している。

日本には盆栽の文化があるので、木を切ることはよくある。グリーンカーテンのように木が影を作ることは Fig. 6 (d) に示す。マンションの1階が見えないようにとプライバシーを守る木も植えられる。木の枝は台風で折れないように剪定しなければならない。スケッチ Fig. 6 e で示した、枝は春や秋に一定の制限下で剪定され、不自然な形に見える。しかし、ほとんどの樹木は驚くほど

Table 1 Properties of dominant trees in Kantō area, given by their Japanese, biological and English names. Density, modulus of rupture, Elastic modulus, crush strength in compression tests and judgement of maintenance and emotional appearance over the whole year on a scale of 1 (severe-bad) to 5 (easy-good).

Japanese name	Biological name	English name	Density [g/cm <sup>3</sup> ]	Modulus Rupture [MPa]	Elastic Modulus [Gpa]	Crush Strength [MPa]	Maintenance / Apperance
クスノキ	Cinnamom camphora	Camphor	0.52	80.5	11.56	40.1	5 4
イチョウ	Ginkgo biloba	Ginkgo	0.55	71.0	4	40.0	3 4
ケヤキ	Zelkova serrata	Keyaki	0.69	101.0	11.8	49.0	3 4
ソメイヨシノ	Cerasus yedoensis	Japanese Cherry	0.60	84.8	10.3	49.0	2 4
マダケ	Phyllostachys bambus	Giant Bamboo	0.85	168.0	20	93.0	1 3
スダジイ	Castanopsis sieboldii	Jpn. Chinquapin	0.61	90.0	10	45.0	5 5
シラカシ	Quercus myrsinifolia	Jpn. Evergreen Oak	0.83	131.0	15.5	64.0	5 5
コナラ	Quercus serrata	Konara oak	0.67	99.0	10.5	46.5	3 4
タブノキ	Machilus thunbergii	Japanese Bay tree	0.69	70.0	9	40.0	5 5
モクレン	Magnolia acuminata	Magnolia	0.48	85.0	12.5	43.5	4 5
サルスベリ	Lagerstroemia spp.	Crepe Myrtle	0.71	97.4	10.8	64.1	4 5
カエデ	Acer	Maple	0.67	96.5	10.5	43.5	3 5

日本での良い生育条件により回復する。一方で、まだ Fig. 6 (f) のように、庭や畑で木の枝、藁、ごみなどを燃やし、不要な温室効果ガス、煙灰を発生し、嫌な臭いを出し、咳や他の病気の原因になる。木を植える目的は粒子状物質 PM2.5 を吸収するが、燃える場合、逆に増えることになる。例えば、名古屋と他の都市では禁止になったが、環境に対して悪い態度が無くならない理由は、不十分な教育と考える。不要な火を停止することができれば、焼却炉およびバイオマス発電所は、経済的な原動力を与える。

公共スペースに植える木は、特に子供の安全を考え、有毒な植物、棘、鋭い葉を持たないことが必要である。また、果実が落下しやすい種類は適していない。神奈川県伊勢原市のあるマンションにはレモンの木があるが、誰もそのレモンを収穫しない。Table 1 の最後の縦 2 列に「メンテナンスと外観」を呼ばれる木の評価を示す。メンテナンスとは、管理者が枝を剪定し、落ちた葉を集めるために労力を要することである。外観とは、木の花や葉の美しさを見えることである。竹の根は強く厄介なので、維持するため多くの労力を必要とする。一方で、竹の最高強度は 168MPa であり、コンクリートの中の鉄筋の代替になると考えられている<sup>20)</sup>。最後の章で、自分の実験を示す。

桜の木は、早春にピンクや白い花を咲かせ、また秋に美しい紅葉をするため、日本の多くの場所で植えられた。50 年後、そのほとんどの桜の木は寿命まで伸びる。ただ、新しいものと植え替えることはなかなか難しい。その理由は、ある種類の昆虫および幼虫を引き付けることで、歩行者が不安になることである。ヨーロッパでは影を作るため、そして温度を下げるために、道路、駐車場に木を植えることがある。しかし、日本では駐車場には木が少ない。その理由は、車に鳥の糞が落ちて、車の所有者からのクレームを心配することだと考えられる。

高いメンテナンスコストは税金の負担になるので、木の種類は限られてくる。したがって、高い強度を持つ、カシ、タブノキ、ブナなどが普及することになった。Table 1 に示すように、カシ以外の木材は、より高い強度をもつ。Fig. 2 ~5 を示すように、関東地域では約 20 種の木が適しており、

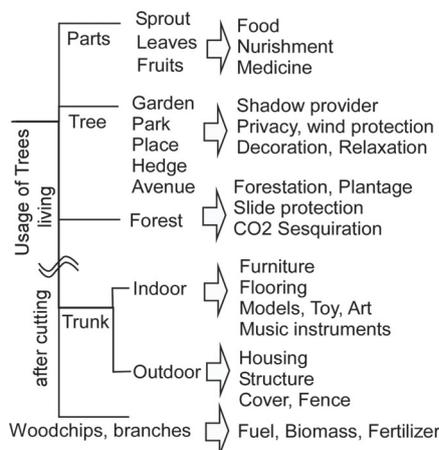


Fig. 7 Usage of trees has many applications during their life cycle, parts, the tree itself, the forest or after cutting as wood for indoor or outdoor architecture or even as biomass.

人気になった。それ以外にも、自然には約 300 の在来種がある。歴史的な背景もあり、江戸時代にはシルクを作るために、蚕が好きなクワの木を植えた。昭和時代には、燃料にするために、平均 4 kWh/kg より乾燥しやすい木として、コナラが人気となった。その後、硬いスギが人気となったが、花粉アレルギーの問題を予測することはできなかった。江戸時代には、木を切った後ですぐに若木を植える習慣があった<sup>21)</sup>。そのルールはオーストリアのウィーン市でもある。そしてインターネットの地図上で、その木の名前や樹齢などについて調べることができる<sup>22)</sup>。Fig. 7 に示すように、樹木の仕様は多様である<sup>6)</sup>。

## 6. 社会的なアクセプタンスを増やす

「環境問題を大事に考える」ために、PRが必要である。東海大学工学部建築学科は、2009 年の夏に平塚市の海水浴場で竹から作ったビーチハウスプロジェクト<sup>23)</sup>を実現し、新聞で「エコ加工法」の高い評価を得られた。その目的は、簡単で安い組み立て方法を考えることである。世界の貧しい国の多くの人々の生活は高木に依存している。エネルギー供給のために木を燃やし、コンクリートより木材から家を作ることは、より環境にやさしいことと考えられる。日本では、木材を 2000 年以上も屋外、または屋内の家を使った<sup>24)</sup>。

確かに、外国の研究者は、竹とコンクリートの複合材料を考えている<sup>25)</sup>。一方で、竹は早い成長速度とコンクリートより高い強度をもつ (Table 1)。Fig. 8 に示すように、内の研究でも、複合材料を作った。目的は、他の研究<sup>25)</sup>とは違い、竹の繊維ではなく、棒をそのまま使うことである。失敗から、竹をポルトランドセメントにそのままに入れると、界面から亀裂がはいることが分かった。そして、セメントを竹の穴に入れても、穴には入らないということも分かった (Fig. 8 a,d,e)。界面の強度を上げるために木の棒を入れると、亀裂が生まれる可能性がある (Fig. 8 b,e,h)。成功した方法は、Fig. 8 (c,f,i) に示す。それは、ポルトランドセメント以外 2 : 1 の割合でゼオライト石<sup>26,27)</sup>を入れると、乾燥することで亀裂がなくなる。その理由は、ゼオライト石は水を吸収することができるからである。他の方法としては、木の棒の数を減らし、表面に対して角度が直角ではなく、Fig. 8 (c) のようにバラバラにすることが大切である。竹の棒でも良いが、割り箸も十分な強さをもつ。そのように、竹とセメントの複合材料は、強く、使いやすい、どんな形にもなるという三つの利点をもつ。祭りやイベント、また東アジアの住宅の構造など、その簡単な加工法で作った自然な建物は社会で大きなインパクトがあると思われる。そして、自然、高木、エコの教育のために、影響があるはずである。

結論として、少なくとも一本でも木を植えることは、なにもないより良いことと考える。そして、木が枯れるまで二酸化炭素を吸収することができ、自然環境に良く、住民の居住性が高くなる。それ故、多くの木を愛する人は木がどのように早く育ち、何が成長率に影響するのかについて関心を寄せている。現在、世界中の人々の 70% 以上は

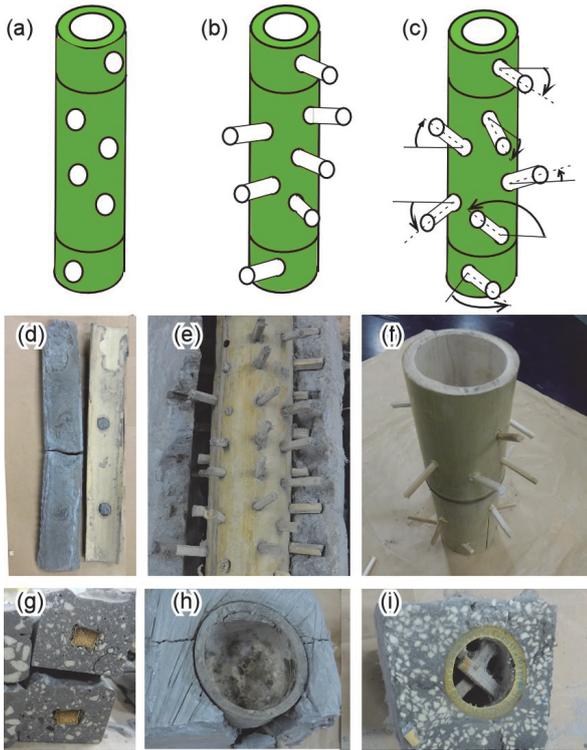


Fig. 8 Fabrication of concrete and bamboo composite materials, by (a,d,e) drilling holes, (b,e,h) using parallel wooden sticks or (c,f,i) tilted sticks as strengthener for the bamboo-concrete interface.

都市に住んでいる。商業上の理由により、ある特定の公共スペース区域だけに高木を植えることができる。

新しいアーバンデザインや都市林業の目的は、人々の居心地の良さとレクリエーションのため、なるべく多数の樹木を植えることである。関東地域では、都市計画で環境に優しい電車<sup>9)</sup>だけではなく、並木と公園の数が多し。それらは完璧に管理されている。都市部で見られる公共の樹木は、審美的な効果をもたらす、メンテナンスコストが低いことが必要である。その中で、被子植物、特に桜、モクレン、サルスベリなどの開花木が良く使われている。世界的に有名なカラフルな開花木は、ノウゼンカズラ科の紫花をもつ南アフリカのジャカランダ、ブラシルの黄色のスオウ、インドの赤色ホウオウボクなどがある。東京都にある「夢の島熱帯植物館」は、木立朝鮮朝顔という花を輸入し、育てる研究を進めている。しかし、低温で湿気が多いため、花より葉の量が多く、木があまりきれいに見えない。しかし、珍しい木を増やすと、社会に影響があると考えている。

## 7. まとめ

この研究では、建築用と都市用樹木について、下記のことを検討した。

- 1) 最大の高さと木の樹齢が分かっている場合、樹木の成長速度を調べ、モデル化することができた。
- 2) 日本で最も高い木の六種類は、初めて成長モデルを使用した。その高木の成長は計画のために図説した。

- 3) 三次元で大きな体積をもつ高木は、若木より高い量の温室効果ガスを吸収することが分かった。
- 4) 高木は都市デザインだけではなく、有害物質に影響を与える。
- 5) 新芽の成長速度は、環境によって決まる。同時に異なる種類の木が植えられている場合も、同様である。
- 6) 日本の都市デザインのために使われる樹木は、海外へ良いビジネスチャンスになる可能性がある。
- 7) 環境問題を理解するために、もっと詳しい教育が必要であることが分かった。
- 8) 竹をポルトランドモルタルに入れる前に、竹とセメントの間の界面を強くする対策をすれば、強い複合材料を作成することができる。

## 謝辞

この論文のアイデアは、国際基督教大学でのヒッツェル・エクハルト、大野 正彦、ランガガー・マーク、宮崎 修行、木部 尚志 教員が担当したセミナー<sup>12,13)</sup>、また東京理科大学 総合化学専攻の宮澤薫一研究者の議論で生まれた。本論文の校閲にご協力いただいた東海大学工学部建築学科の杉本洋文教授と材料科学科の学生、田中良佳君、三浦正太君、須藤貴弘君に感謝する。

## 参考文献

- 1) Y. Pan, et al., Science 333 988-993 (2011).
- 2) N. L. Stephenson: Nature 507 90-93 (2014).
- 3) Center for CO<sub>2</sub>-Study: [http://www.co2science.org/data/plant\\_growth/photo/photo\\_subject.php](http://www.co2science.org/data/plant_growth/photo/photo_subject.php) (2016年9月30日に参照).
- 4) P. v. d. Sleen: Nature Geoscience 8 24-28 (2015).
- 5) E. G. Reekie, F. A. Bazzaz: Oecologia 79 212-222 (1989).
- 6) E. Assmann: The principles of Forest Yield study, Pergamon press 1970 New York, US (available on web)
- 7) T. Nguyen et al., J. Environm. Sci. 27 (2015) 33-41.
- 8) S. Jin et al., Atmosph. Environm. 99 (2014) 277-287
- 9) W. Wunderlich, S. Tanemura: Proc. School of Eng. Tokai Univ., Ser. E 34 5-10 (2009).
- 10) B. Strimbu: Lecture notes FOR 425 Forest growth and yield, <http://www.latech.edu/~strimbu> (2016年9月30日に参照).
- 11) H. Takahashi: 日本の巨樹木 Excel file, <http://www.kyoboku.com/top50/> (2016年8月30日に参照).
- 12) S.D. Bellingrath-Kimura: Re3buildicu Seminar notes: 2014-09-02 <https://re3buildicu.wordpress.com/> (2016年9月30日に参照).
- 13) M. Ohno: Re3buildicu Seminar notes 2015-01-14, downloaded from <https://re3buildicu.wordpress.com/> (2016年8月30日に参照).
- 14) B. E. Schlaegel, R. B. Willson: Nuttall Oak volume and weight tables, US Dept. Agricul. Research SO-1 86 (1983).
- 15) R.M. Teck. D.E. Hilt, Individual Tree diameter growth model, US Dept. Agriculture, Res. Paper NE-649

- (1990).
- 16) 品川 恭一, 藤井 衛, 東海大学寄与工学部 52 [2] 171-177 (2012).
  - 17) <http://www.gartencreart.de/html/planungshilfen.html> (2016年8月30日に参照).
  - 18) <http://www.shinwa-gakuen.or.jp/runerune> (2016年9月30日に参照).
  - 19) <http://ja.wikipedia.org/wiki/宮脇昭> (Akira Miyawaki) (2016年9月30日に参照).
  - 20) K. Ghavami: Cement & Concrete Composites 27 637-649 (2005).
  - 21) S. Dobson, S. Saaler: Under the Eyes of the Prussian Eagle, Prussian Expedition to Japan, Iudicium Publisher (2011).
  - 22) Baumkataster Wien: <http://www.wien.gv.at/umweltgut/public/grafik.aspx> (2016年9月30日に参照).
  - 23) 杉本 洋文, 東海大学工学部建築学科 Beach House project <http://deka.challe.u-tokai.ac.jp/cap/works09.html> (2016年9月30日に参照).
  - 24) I. Mach: Steeldoc, 03+04 46 - 51 (2011), [http://publik.tuwien.ac.at/files/PubDat\\_203833.pdf](http://publik.tuwien.ac.at/files/PubDat_203833.pdf) (2016年9月30日に参照).
  - 25) K. Ghavami: Cement Concrete Comp. 27 637-649 (2005).
  - 26) N. Otsu, K. Watanabe: "Experimental Study on Composite Cement Materials with High Fluidity and Toughness Containing Fine Aggregates from Natural and Recycled Sources," Proc. School of Eng., Tokai University, 55, (2015), pp. 43-49. (in Japanese).
  - 27) M. Hirata, I. Jimbo: Utilization of Concrete Wastes to Capture CO<sub>2</sub> with Zeolites, Proc. School of Eng. Tokai Univ., Ser. E 34 (2016).