■ 研究論文

大阪府吹田市の樹木健全度調査を用いた i-Tree Eco による街路樹の貨幣価値推定

Estimation of monetary value of street trees by i-Tree Eco using tree health surveys in Suita City, Osaka Prefecture

川口 将武* 平林 聡** 平瀬 耕*** 加我 宏之*** 赤澤 宏樹****
Masatake KAWAGUCHI Satoshi HIRABAYASHI Koh HIRASE Hiroyuki KAGA Hiroki AKAZAWA

Abstract : Street trees in Japan are beginning to be renewed in the face of various problems caused by the enlarged diameter of trees as well as aged trees. In order to promote the renewal without attenuating the value of the current street trees, it is necessary to construct a method that improves the accuracy of tree assessment by employing data easily obtained in Japan and parameters optimized for Japan. In this study, we analyzed the tree structure and estimated tree compensation values based on the tree soundness research data for the street trees in Suita City, Osaka Prefecture. In addition, we quantified and monetized the ecosystem services provided by the street trees by estimating 1) carbon storage, 2) carbon sequestration, 3) air pollutant removal, 4) health incidence and medical cost reductions, and 5) rainwater runoff reduction. As a result, the total number of trees analyzed throughout the city turned to be 8,796, comprised of 100 species. For reference purposes, the estimates are: compensation values of about 770.52 million yen, 1) 1,377 tons, about 28.47 million yen, 2) 90.0 tons, about 1.86 million yen/year, 3) 961.1 kg/year, 4) 26.5 cases/year, about 11.58 million yen/year, and 5) 8917.7 m³/year, about 6.41 million yen/year.

Keywords : street trees, tree soundness research, i-Tree Eco, monetary value

キーワード : 街路樹, 樹木健全度調査, i-Tree Eco, 貨幣価値

1. はじめに

我が国の街路樹は、美しい都市景観の主要素として、昭和の大合併やニュータウン開発など、大きな都市整備の機会を中心に整備されてきた。昭和の大合併から約 50 年、日本最初の大規模ニュータウン開発から約 60 年が経った現在、街路樹の大径木化による歩行空間の圧迫や、剪定や落ち葉清掃など維持管理の労力および経費の負担の増大といった課題が生じている。このような課題に対して、既存街路樹の間引きや、比較的大きく育たない樹種への転換などの措置が日本各地でとられ始めている¹⁾。

一方で、全国の自治体において、中長期的な街路樹の育成や維持管理を定めた計画は少なく、限られたガイドラインやマニュアルに沿って維持管理がなされている²⁾。このような状況で、前述した樹種転換などの措置がとられることによって、街路樹の有する環境保全、景観向上、緑陰形成、交通安全、防災といった多様な機能が一時的または長期的に減衰し、そこから様々な環境リスクおよびそれに伴う健康リスクを負う可能性がある。強剪定に代表される市民要望等の社会的要因、予算削減等の経済的要因も加わって³⁾、維持管理の負担軽減の視点で街路樹の再整備が進むことも想定される中、現在の街路樹が有する生態系サービスの価値、もしくは街路樹そのものが有する価値を把握し、適切なバランスにて街路樹の更新を進めることが求められる。

街路樹を含めた緑の価値算出手法には、代表的なものとしてトラベルコスト法、ヘドニック法、仮想評価法 (CVM)、コンジョイント分析などがあり、直接売買できない公共財の価値を試算してきた。トラベルコスト法を用いて、吉田ら⁴⁾は観光農園の保健休養機能に対する価値を、庄子⁵⁾は自然公園の訪問価値を試算しているが、本手法は定性的な価値を総合的に把握できる反面、街路樹のような身近な公共財の価値推定には用いられない。ヘドニック法を用いては、愛甲ら⁶⁾が住宅地の価格形成における公園緑地の価値を試算し、鈴木ら⁷⁾が住宅地における空地の農

的活用の評価を行っている。本手法は、市街地の中での緑の価値を相対的に抽出するもので、街路樹の市場価値の算出に適しているが、生態系サービスの価値といった市場が認識しにくい価値の推定はできない。仮想評価法やコンジョイント分析についても同様に、内藤ら⁸⁾が集合住宅内植栽地の経済的価値を、上野ら⁹⁾が緑の保全に関わる住民ボランティア育成事業の価値を、武田ら¹⁰⁾が都市公園の経済価値を、松本ら¹¹⁾が CVM を用いて街路樹の景観価値を試算しているが、これらの手法はアンケートの設計や被験者によって精度が異なり、社会インフラとしての街路樹の価値を正確に把握するには課題が残されている。存在価値の上に利用価値が重なる街路樹の価値については、まず微気象調節や炭素蓄積といった存在価値を定量的に試算することによって、社会基盤としての価値の把握の一般化が進むと考えられる。

近年、街路樹を含めたグリーン・インフラストラクチャーが注目され¹²⁾、その生態系サービスの定量的・経済的な評価方法が研究されている¹³⁾。国外では EnviroAtlas¹⁴⁾ や InVEST¹⁵⁾ 等の評価・可視化ツールが政策決定や維持管理において活用されている。国内では都市の樹林地の生態系サービスについての事例的な研究や¹⁶⁾、剪定方法による景観評価と経済評価の向上に関する研究がなされているが¹¹⁾、いずれも目的に応じた学術的なデータ収集や分析が必要であり、既に自治体が得ているデータを用いた総合的な価値算出は行われていない。既存データを活用した研究としては、自治体が記録している市民要望といった質的データを用いたテキストマイニング手法があるが¹⁷⁾、街路樹の維持管理に関する社会的要因およびその対応策の検討に留まっている。

街路樹の総合的な価値を把握する手法として、米国 Forest Service を中心に開発された i-Tree Eco (以下、Eco と記す) が世界的に採用されつつある。Eco は米、加、豪、英国を中心に利用されている^{18), 19)}、様々なスケールでの樹木の生態系サービスと貨幣価値を算出できるツールである。その評価結果を採用国で

*大阪産業大学デザイン工学部 ** The Davey Tree Expert Company/ 米国農務省 Forest Service

大阪府立大学大学院生命環境科学研究科 * 兵庫県立大学自然・環境科学研究所

は樹種選択, 維持管理の優先度決定, 市民への情報提供や教育, 費用対効果分析, 政策の評価と立案, 生態系サービスの基準および目標値設定等, 多岐にわたって活用している^{20), 21)}。ただし, 米国で開発されたことから, 日本ではあまり見られない詳細な毎木データを用い, 採用国の植生, 気候, 社会・経済のパラメータを用いて分析するため, Eco をそのまま国内に適応させることは難しい。国内に適応させる先行研究としては, 神奈川県川崎市川崎区の街路樹 9,679 本のデータを用いて, 生態系サービスおよび貨幣価値を推定した研究がある²²⁾。この研究では, 川崎市川崎区的全街路樹の貨幣価値が年間約 530 万円と, 海外での推定値と比較して低い推定値となっており, Eco を国内に適応するための改善点が残されていることが確認されている。国内の自治体が所有するデータを用い, 国内のパラメータに更新した Eco の分析手法が開発されることによって, 多くの自治体の街路樹の価値が把握でき, 政策立案や維持管理の効率および精度を高めることができる」と期待されている。加えて, その推定手法が一般化され, 街路樹の貨幣価値が広く管理者や市民に理解されることによって, 適切な維持管理や官民協働が進むことが期待される。

以上のことから, 本研究では街路樹の価値算出について, 国内で簡易に得られる街路樹に関するデータとして樹木健全度調査結果を用い, かつ, 国内のパラメータを Eco に用いることで, 街路樹の貨幣価値化による価値の評価結果に基づいて, 街路樹の維持管理の方策について考察することを目的とする。

2. 研究の方法

(1) 研究対象地

大阪府吹田市の街路樹を, 本研究の対象とする。吹田市は人口約 37 万人, 面積 36.1km², 人口密度 10,376 人 / km² の規模を持つ大阪都心部に近接する中核市²³⁾である。1960 年代後半, 千里ニュータウン建設および日本万国博覧会開催に象徴される高度経済成長期を通じて, 基盤整備と共に街路樹による道路緑化が推進され, 今日ではそれらを地域特性に応じて健全に育成する適正管理²⁴⁾が課題となっている。この状況はわが国の都市全体の傾向と符合しており, 吹田市は典型例の一つとして捉えられる。吹田市の土地利用は, 住居系 54.8%, 商業業務 5.6%, 工業系 3.3%²⁵⁾で住宅地の占める割合が高い住宅都市であり, 近年, 低炭素型の健康・医療のまちづくり事業²⁶⁾が進められる中で, 道路や公園のみどりが市民の健康に与える影響が期待されている状況である。

(2) 研究に使用した街路樹データ

1) 吹田市の樹木健全度調査の概要

吹田市の樹木健全度調査²⁷⁾は, 市が管理する街路樹, 公園樹木の倒伏事故を未然に防止し, 予防保全的な維持管理を計画的にすすめるため, 2014 年 12 月 24 日から 2016 年 3 月 31 日の期間に実施された²⁸⁾。吹田市の樹木健全度調査の構成は, 予備診断, 外観診断, 精密診断の 3 段階となっている。本研究では, 市全域の街路樹を対象とした初期診断にあたる予備診断調査を対象とした。予備診断調査の方法は, 国土交通省国土技術政策総合研究所の「街路樹の倒伏対策の手引き」に準拠しており, 樹木形状や活力の異常, 樹体の構造的な欠陥を把握, 評価する「予備診断カルテ」(表-1)の項目に基づき, 樹木医有資格者 1 名以上を含む複数名で外観から 1 本ずつ測定, 診断するものである。調査対象樹木の選定基準は, 基本的に吹田市道路公園部が管理する 3m 以上の高木全てを対象²⁹⁾としている。本研究では, 予備診断調査の結果である 144 路線, 12,134 本の「予備診断カルテ」を基データとした。

2) 樹木健全度調査データの Eco への適用方法

本研究では Eco を用いて解析するにあたっては, まず, 「予備

表-1 予備診断カルテ (吹田市樹木健全度調査)

診断日: 2015 年 9 月 2 日

基本情報	路線名	319 津雲台 36 号線		全景写真
	樹木番号	WA0001	図面番号 1610	
	樹種名	ケヤキ		
	場所	吹田市津雲台		
樹木形状	樹高	9.5m
	幹周	1.42m		
	枝張り	7.0m		
	枝下高	歩道 3.0 m ・ 車道 4.0 m		
	不自然な傾斜	■無 □有 (□安全・□危険)		
	樹高/幹径	21 倍		
活力状況	枝長/枝径	40 ≤ 倍 40 以上
	樹勢	□A ■B □C □D □E		
	病虫害	■無 □有 病名・虫名		
欠陥	枯れ枝	□無 ■有 (1 本、地上約 2m、枝直径約 20cm、枝長約 0.5m)		根元周囲の状況
	ぶら下がりの枝	■無 □有 ()		
	空洞	■無 □有 ()		
	腐朽	■無 □有 ()		
	子実体	■無 □有 ()		
	打診音異常	■無 □有 ()		
	鋼棒貫入異常	■無 □有 ()		
	亀裂	■無 □有 ()		
	不完全結合	■無 □有 ()		
	隆起	■無 □有 ()		
	樹体の揺らぎ	■無 □有 ()		
	特記事項	枯れ枝にキクラゲが発生しているが小さく、概ね問題なし。大枝に穿孔虫害が見られるが小さく、概ね問題なし。細いガードリングルートあり。深植え。		
写真 スケッチ	根元周囲の状況
	枯れ枝			
予備診断の結果	大枝の穿孔虫害			
	外観診断の必要性 □必要 ■不要 理由			
緊急的な改善処置の必要性	理由 枝下高・車道 4.5m 以下・枝長/枝径 40 以上・枯れ枝			
	処置方法 剪定			

※太枠は表-2 の i-Tree Eco に適用させたデータ

表-2 樹木健全度調査データと i-Tree Eco の必要データとの対応関係

樹木健全度調査データ	形式 / 単位	i-Tree Eco 必要データ	形式 / 単位
樹種名	和名	Species Name	code
樹高	m	Crown Top Height	m
枝張り	m	Crown Width (E./W.)	m
枝張り	m	Crown Width (S./N.)	m
枝下高 (歩道・車道)	m	Crown Base Height	m
樹勢	A-E	Crown Condition	0-100
全景写真	写真	Crown Missing	%
全景写真	写真	Crown Light Exposure	0-5
幹周	m	DBH	cm
路線名・樹木番号	番号	Land use	class

診断カルテ」144 路線, 12,134 本のデータから, Microsoft 社 Excel を用いて Eco にインポートするデータベースを作成した。Eco での解析に必要なデータ項目は, 樹木 1 本における i) Species Name (樹種名), ii) Crown Top Height, *H* (樹高), iii) Crown Width, *CD* (枝張り), iv) Crown Base Height, *BH* (枝下高), v) Diameter at Breast Height, *DBH* (胸高直径), vi) Crown Condition, *CC* (樹勢), vii) Crown Missing, *CM* (樹冠欠損率), viii) Crown Light Exposure, *CLE* (日当たりのよい樹冠面積), ix) Land use, *LU* (土地利用) の 9 項目である。表-2 は, 吹田市の樹木健全度調査で得られた「予備診断カルテ」内のデータと Eco の必要データとの対応関係

を示したものである。以下、順に Eco へのデータ入力・適用方法、計測方法について詳述する。

i) Species Name (樹種名)

「予備診断カルテ」内の樹種名は和名であるため、米国の樹種名に基づく Eco に適用させるため、英名に変換した後、Eco に実装されている樹種データベース中の学名樹種コードに適用させた。和名から英名に変換する際、種名で一致できない場合は、植物分類階級の上位（種－属－科）で一致させた³⁰⁾。

ii) Crown Top Height (樹高)

「予備診断カルテ」内の「樹高」の数値そのままを使用し、入力した。

iii) Crown Width (枝張り)

Eco では、南北と東西の両方の枝張りが必要であるが、「予備診断カルテ」には「枝張り」の項目があるものの、道路縦断方向の 1 方向しか計測していないため、南北と東西方向の両方に同じ数値を使用し、入力した。

iv) Crown Base Height (枝下高)

Eco では、1 つのデータを入力すれば良いが、「予備診断カルテ」には歩道側と車道側の 2 点で計測しているため、平均値を求めて入力した。但し、交通上の制約等からデータの記入がないものは、道路構造令の建築限界と吹田市の維持管理（剪定）方法のヒアリングを基に、歩道側 2.5m、車道側 4.5m の平均 3.5m として入力した。

v) DBH (胸高直径)

Eco では直径、「予備診断カルテ」では幹周であるため、幹周から直径を計算して入力した。

vi) Crown Condition (樹勢)

「予備診断カルテ」の活力状況に「樹勢」項目があり、A（良い）、B（普通）、C（少し悪い）、D（悪い）、E（枯死）の 5 段階で評価されている。これに対して Eco では 100～0 の数値入力であり、内部的には各数値に加えて、数値から変換されるカテゴリ値も利用している。この数値からカテゴリ値への変換では最大値 100 および最小値 0 についてはそれぞれ Excellent（最上）、Dead（完全に枯死）としており、それ以外の値は等間隔に Good（良）、Fair（可）、Poor（脆弱）、Critical（危機的）、Dying（瀕死）としている。予備診断カルテを確認した結果、吹田市では、Excellent や Dead に相当する極端な街路樹は確認できなかったが、A（良い）や E（枯死）と評価された樹木の中には、Excellent（最上）、Dead（完全に枯死）に近い状況のものも確認された。このことから、最大値を 90、最小値を 10 として、90～10 の間を等間隔に区切ることとして A を 90、B を 70、C を 50、D を 30、E を 10 として入力した。

vii) Crown Missing (樹冠欠損率)

Eco での樹冠欠損率とは、街路樹の樹冠形状における枝葉が欠けている、言い換えると枝葉の占められていない割合を表すものである。その計測において、Eco では 100% を完全な枯死、0% を樹冠全体の枝葉に欠けた所がない完全な状態とし、現地で 2 名の観察者によって目視測定するとある。「予備診断カルテ」には、この項目がないため、「予備診断カルテ」内のカラーの「全景写真」を用いて、樹冠欠損率を 5% 区切りで計測した。具体的には、i-Tree Eco Field Guide v.6.0 にある樹冠欠損率の測定方法（図－1）を基に、まず、樹冠を構成する枝葉の最高点と最低点に基準線を引き、次にその間の樹木の枝張りや枝葉のまとまりから樹冠のアウトラインを引く³¹⁾。その後、樹冠全体を 20 等分（幹を中心左右 10 等分）に分割し、その 1 個分を 5% の目安として、空白部分（欠損部）をカウントして欠損率を求めた。本研究では樹冠欠損率の判断担当者を 2 名置き、吹田市の街路樹で主要なケヤキ、クスノキ、ナンキンハゼ等を対象として、複数路線の約

図－1 樹冠欠損率の測定方法 (i-TreeEco フィールドガイド内の図を引用)

表－3 各樹冠欠損率のサンプル画像

樹冠欠損率	常緑樹	落葉樹	樹冠欠損率	常緑樹	落葉樹
0%			55%		
5%			60%		
10%			65%		
15%			70%		
20%			75%		
25%			80%		
30%			85%		
35%			90%		
40%			95%		
45%			100%		
50%			※常緑樹は、95%、100%がシイノキ、それ以外はクスノキ。 落葉樹は30%、50%、60%、95%がケヤキ、それ以外はナンキンハゼ。		

— 樹冠外郭線

図-2 日当たりのよい樹冠面数のカウント方法
(i-TreeEco フィールドガイド内の図を引用)

100本をサンプルに樹冠欠損率の判断にズレがないか予備計測を行い、80%以上で同じ判断ができるまでキャリブレーションを繰り返した。それらのキャリブレーションに使用した写真から、標準となる樹冠欠損率のサンプル画像（表-3）を作成し、図を参照しながら各個人で樹冠欠損率の測定を行った。なお、「全景写真」が背後の街路樹の並木と重なり、樹冠のアウトラインが引けない場合や歩道幅員等空間的な制約で樹冠全体が写っていない写真、落葉後の写真等は、分析対象から外した。

viii) Crown Light Exposure（日当たりのよい樹冠面数）

Ecoでの日当たりのよい樹冠面数とは、東西南北と頭頂部の合計5方向から樹木に対して、0から5のいくつ方向から光が当たっているかを計測するものである。「予備診断カルテ」には、この項目がないため、「予備診断カルテ」内のカラーの「全景写真」を用いて、日当たりのよい樹冠面数をカウントした（図-2）。具体的には、対象樹木の樹高と同等かそれ以上の高さをもつ樹木やその他構造物が接している場合、方角を見極め、その数を差し引いた。樹木の頭頂部は、隣接する樹木の樹冠が覆いかぶさる、あるいは樹高以上の構造物が近接している場合、方角を見極め、その数を差し引いた。留意点は、写真の明るさを判断基準にせず、物理的な障害物の有無で判断すること、また、対象樹木の前後が重なり、奥行き方向からの光が当たるか否かの判断に迷う場合は、対象樹木と奥側の樹木の幹との植栽間隔を基準に、樹高を考慮して総合的に判断した。

ix) Land use（土地利用）

Ecoでは街路樹が位置する沿道の土地利用が必要となるが、「予備診断カルテ」には、この項目がないため、街路樹の路線名と樹木番号を基に、街路樹路線図と街路樹位置図とを使用してその場所を特定し、吹田市がweb上で公開している「都市計画情報サイト」³²⁾の用途地域を基に、住居系地域、商業系地域、工業系地域の3つに分類して入力した³³⁾。

（3）Ecoの概要と適用

Ecoは樹木測定データに基づきバイオマス、葉面積等、樹木の構造解析を行い、これらに基づいて樹木による生態系サービスの定量的評価およびその貨幣価値換算を行うシステムである。Ecoの構成要素はプログラムソースとその入力データおよび算出に用いるパラメータ（係数）である。

現在、欧米各国、メキシコ、コロンビア、韓国等正式サポート対象となる約40か国について、地理、人口、大気質等のデータをEcoの実行サーバー上に保持しており、それらの国では樹木データのみを用意することで解析が可能となっている。一方、上記の国以外でのEco実行においては、Ecoの実行サーバー上で保持する全世界の気象³⁴⁾および高層気象データ³⁵⁾を用い、さらに

表-4 各モデルの入力データおよびパラメータ

モデル	入力データ/パラメータ	年
炭素蓄積・固定量	CO ₂ の社会的費用 5,640 (円/t) ^{59, 60)}	2018
大気汚染物質除去	緯度 (34.7594)	
	経度 (135.5164)	
	世界標準時との時差 (+9)	
	毎時気象データ (豊中測定局) ³⁴⁾	2016
	0/12時高層気温、気圧、高度 (和歌山県潮岬測定局) ³⁵⁾	2016
	着葉日 4月4日 (大阪管区気象台) ⁶⁶⁾	2016
	落葉日 12月14日 (大阪管区気象台) ⁶⁶⁾	2016
	毎時全天日射量 (吹田市北消防署測定局) ⁷¹⁾	2016
	毎時放射収支量 (兵庫県浜甲子園測定局) ⁷¹⁾	2016
	毎時一酸化炭素 (CO) 濃度 (吹田簡易裁判所測定局) ⁷¹⁾	2011 - 2016
	毎時二酸化窒素 (NO ₂) 濃度 (吹田市川園、吹田市垂水、吹田市北消防署、吹田簡易裁判所測定局) ⁷¹⁾	2011 - 2016
	毎時光化学オキシダント (O ₃) 濃度 (吹田市川園、吹田市垂水、吹田市北消防署測定局測定局) ⁷¹⁾	2011 - 2016
	毎時PM _{2.5} 濃度 (吹田市北消防署、吹田簡易裁判所測定局) ⁷¹⁾	2011 - 2016
	毎時二酸化硫黄 (SO ₂) 濃度 (吹田市川園、吹田市北消防署、吹田簡易裁判所測定局) ⁷¹⁾	2011 - 2016
	毎時降雨量 (豊中測定局) ⁹⁶⁾	2016
健康被害軽減	年齢別人口 ⁸⁶⁾	2016
	医療費 米国の46% ⁸⁷⁾	2018
	賃金 米国の65% ⁸⁸⁾	2018
	死亡時のVSL (Value of a Statistical Life 統計上の1人当たり生涯生産額) 4.3億円 ⁸⁹⁾	1991 - 2007
雨水流出量削減	毎時気象データ (豊中測定局) ³⁴⁾	2016
	非舗装率 20% ⁹³⁾	2014 - 2016
	透水性舗装雨水処理費用 719 円/m ³ ⁹⁴⁾	2016
	毎時降雨量 (豊中測定局) ⁹⁶⁾	2016

i-Tree Database (ITDB)¹⁸⁾により現地の大気質および降雨量データ、地理関連の係数（緯度・経度、世界標準時との時差、着葉・落葉日、都市の総人口）をサーバーにアップロードして利用することが可能である。ただし、この方法ではプログラムソースやその他のパラメータの改変は不可能である。なお、プログラムソースは一般には公開されていないが、Ecoを用いた結果は多くの査読付き論文として発表されている。個々の項目の算出モデルやその算出式についてもi-Treeの公式ウェブサイト¹⁸⁾で公開されており、これらを参照して利用者が独自にそれぞれのローカルデータに対応したプログラムソースを開発することも可能である。日本国内においては、ITDBによる制約を一部取り去り、プログラムソースとパラメータに大幅な改変を行うことで川崎市川崎区²²⁾および京都市中京区³⁶⁾に適用した事例がある。

本研究では、川崎市川崎区²²⁾および京都市中京区³⁶⁾に適用した事例と同様に、プログラムソースと個々のパラメータを以下で

述べるように改変を施した Eco により大阪府吹田市の街路樹の樹木健全度調査データに基づいて樹木構造を解析し、1) 樹木補償額、2) 炭素蓄積量、3) 年間炭素固定量の推定を行った。さらに 2016 年の気象および大気汚染物質濃度の年間時別データを用い 4) 乾性沈着による大気汚染物質除去量と 5) それに伴う健康被害軽減、6) 雨水流出削減量の推定を行った。表-4 に本研究で用いた各算出モデルの入力データおよびパラメータを示し、以下にその改変について概略を述べる。

1) 樹木補償額

樹木補償額は、2) 以降で述べる樹木による生態系サービスの貨幣価値化に比して最も直接的な樹木の貨幣価値化の方法である。本研究では、Eco に実装されている樹木の損傷または枯死に関する訴訟での金銭的解決、保険金請求、および所得税控除等に利用される樹木の補償的価値算出モデルである CTLA (Council of Tree and Landscape Appraisers) 方式³⁷⁾を改変なしに利用した。Eco では樹木個体の基礎価格を樹種、健康状態、植栽場所で調整することで現状存在する樹木を再生するための費用が算出される³⁸⁾。International Society of Arboriculture (ISA) により米国の州毎に植栽樹木の幹断面積 TA_R (cm^2)、幹単位価格 BP ($\text{US}\$/\text{cm}^2$)、樹木と植栽価格の合計 RC ($\text{US}\$$) が規定されており³⁹⁾、これらを利用して基礎価格 (BV) が算出される。まず再生しようとする現存樹木の幹断面積 TA_A (cm^2) が TA_R 以下の場合、以下の式により幹単位の価格 (RC/TA_R) と TA_A の積から算出される。なお TA_A 、 TA_R 、 BP は胸高 (地上 1.37 m) での値である。

$$BV = RC/TA_R \cdot TA_A \quad (1)$$

TA_A が TA_R より大きい場合、以下の式により幹断面積成長量 ($TA_A - TA_R$) と BP の積を RC に加算することで算出される。

$$BV = RC + BP \cdot (TA_A - TA_R) \quad (2)$$

本研究では、Eco で算出される BV に米国の州毎に設定された樹種係数 SPF ⁴⁰⁾、健康状態 CC 、土地利用毎の評価額係数 (住宅系が 0.6、商業業務および工業系が 0.75 等) を掛け合わせた最終的な樹木補償額 ($\text{US}\$$) を $1\text{US}\$ = 110$ 円として円換算した。上記の既定値については改変が不可能であったことから、生活費が大阪市と同等であるニューヨーク市⁴¹⁾があるニューヨーク州の値 (TA_R は 81 cm^2 、 BP は $3.49 \text{ US}\$/\text{cm}^2$ 、 RC は $775 \text{ US}\$$ 、 SPF はケヤキが 0.8、トウカエデが 0.6 等) を利用した。

2) 炭素蓄積量

樹木の炭素蓄積量は、日本国内でも一般的に用いられる樹木の乾燥重量の半分^{42), 43)}として算出するモデルであり、これは改変なしにそのまま利用した。当モデルでは、乾燥重量は落葉樹は木質部のみ、常緑樹は木質部と葉部の乾燥重量の和としている⁴⁴⁾。木質部乾燥重量、 WB (kg) は以下の 2 つのアロメトリー式のいずれかを利用して算出される^{45), 46)}。

$$\ln(WB) = a + b \cdot \ln(X) \quad (3)$$

$$WB = aX^b \quad (4)$$

a 、 b は樹木の実測値に基づいた回帰分析により得られた係数で樹種により異なる。 X は胸高直径 DBH (cm)、樹高 H (m)、 $DBH^2 H$ (m^3) のいずれかである⁴⁷⁾。

葉の乾燥重量、 LB (kg) は以下の式により算出される^{48) ~ 50)}。

$$LB = LA/CF \quad (5)$$

LA は葉面積 (m^2)、 CF は樹種毎の比葉面積 (m^2/g : 葉乾燥重量あたりの葉面積) である⁵²⁾。

LA (m^2) は H と BH (m) の差である樹冠高 CH (m) が、 $1\text{m} < CH < 12\text{m}$ で、かつ $1\text{m} < CD < 14\text{m}$ の場合、以下の回帰式により算出される^{45), 53)}。

$$\ln(LA) = b_0 + b_1 CH + b_2 CD + b_3 SF + b_4 S + mse/2 \quad (6)$$

$b_0 - b_4$ は都市公園および街路の開放空間における生育樹木 54 本⁴⁵⁾ および 34 本⁵³⁾ について行われた回帰分析により得られた係数 ($b_0 = -4.3309$, $b_1 = 0.2942$, $b_2 = 0.7312$, $b_3 = 5.7217$, $b_4 = -0.0148$)、 mse は平均二乗誤差で 0.2317 である。 SF (Shading Factor) は樹種毎の着葉状態での樹冠による光の遮蔽率 (0-1)^{54), 55)}、 S は以下の式により算出される^{45), 53)}。

$$S = \frac{\pi CD(CH+CD)}{2} \quad (7)$$

樹木サイズが $1\text{m} < CH < 12\text{m}$ かつ $1\text{m} < CD < 14\text{m}$ の範囲内にない樹木については、以下から LA が推定される。

$$LA = \pi \left(\frac{CD}{2} \right)^2 \cdot L_{avg} \quad (8)$$

$\pi \left(\frac{CD}{2} \right)^2$ は樹冠投影面積 GA (m^2)、 L_{avg} は式 6 により推定される葉面積指数 (LAI)⁴⁸⁾ である。

式 6 または 8 により算出された LA は、 CLE に基づく葉面積調整係数 LF により以下のように調整される⁴⁸⁾。

$$LA = LA \cdot LF \quad (9)$$

$$LF = LAI_{new} / LAI_{org} \quad (10)$$

LAI_{org} は以下の式により算出される。

$$LAI_{org} = LA/GA \quad (11)$$

$CLE = 0-1$ の場合、生育地の林冠は閉鎖していると見なされ、 LAI_{new} は以下の式により林冠葉層による光の減衰から推定される⁴⁹⁾。

$$LAI_{new} = LAI_{0-1} = \ln(I/I_0)/-k = \ln(1-SF)/-k \quad (12)$$

I 、 I_0 はそれぞれ樹冠下・上での光強度、 k は光減衰係数で、広葉樹は 0.65、針葉樹は 0.52 である⁵⁷⁾。

$CLE = 4-5$ の場合、樹木は孤立しているとみなされ、以下の式から算出される。

$$LAI_{new} = LAI_{4-5} = LAI_{org} \quad (13)$$

$CLE = 2-3$ の場合、 LAI_{new} は上記 LAI_{0-1} と LAI_{4-5} の平均となる。さらに樹冠欠損率 (CM) に基づき $(100-CM)/100$ を LA に乗ずることで最終的な LA の推定値が得られる。

貨幣価値の推定には、Eco での既定値である 2018 年の二酸化炭素の社会的費用 $\text{US}\$51.2/\text{t}$ ^{59), 60)} を、 $1\text{US}\$ = 110$ 円として円換算した $5,640$ (円/t) を利用した。なお、参考までに 2006 年の国内の公共事業における被害費用に基づく方法での貨幣価値原単位⁶¹⁾ は $2,891$ 円/t である。これを 2016 年での国内企業物価指数⁶²⁾ により調整した場合 $2,884$ 円/t となり、これにより算出される貨幣価値は上記 Eco での推定値の約半分となる。

3) 炭素固定量

炭素固定量の算出モデルでは、各樹木について、1 年間の成長後の DBH および H の推定値から上記 2) により炭素蓄積量を算出し、現状との差を年間炭素固定量とされており、本研究では、これも改変なしに利用した。

現状を y 年とし、その DBH_y (cm) に基づいて 1 年後の DBH_{y+1} (cm) は以下の式から算出される⁴⁸⁾。

$$DBH_{y+1} = DBH_y + GR_s \cdot CC/E \quad (14)$$

GR_s は年間標準成長率 (cm/年)、 E は CLE に基づく調整係数で $CLE = 0$ または 1 の場合 2.26 、 $CLE = 2$ または 3 の場合 1.78 、 $CLE = 4$ または 5 の場合 1 である。 GR_s は米国北部における土地利用毎の年間成長率 GR (cm/年)⁶³⁾ と樹木の成長期の日数 (F_s : Frost-free Days, 日間) を基準として、解析地での成長期の日数 F (日間) で調整した値である。本研究では、表-4 に示すように吹田市での着葉・落葉日⁶⁶⁾ の差から $F = 254$ (日) を利用した。

$$GR_s = GR \cdot F/F_s \quad (15)$$

y 年における樹高 H_y (m) に対して 1 年後の樹高 H_{y+1} (m) は以下の式により算出される⁶⁴⁾。

$$H_{y+1} = H_y + (h_{y+1} - h_y) \quad (16)$$

h_y , h_{y+1} は y 年および $y+1$ 年における DBH に基づいて算出される樹高 (m) で、それぞれ以下の式により算出される。

$$h_y = aDBH_y + b \quad (17)$$

$$h_{y+1} = aDBH_{y+1} + b \quad (18)$$

a , b は米国東部ニュージャージー州における計 600 本以上の樹木の実測値に基づく回帰分析により得られた係数 ($a = 8.984$, $b = 0.1008$)⁶⁷⁾ である。本研究での貨幣価値への換算には上記 2) と同様の係数を用いた。

4) 乾性沈着による大気汚染物質除去量

大気汚染物質除去量の算出モデルでは、大気中にガス態として存在する CO , NO_2 , O_3 , SO_2 , さらに粒子態として存在する $PM_{2.5}$ について、樹木の葉への乾性沈着をインファレンシャル法^{68)~70)} により、乾性沈着速度 V_d (m/時) と大気汚染物質濃度 C ($\mu g/m^3$) に基づいて推定される。すなわち、単位樹木被覆あたりの時間あたり乾性沈着量 F ($\mu g/m^2/時$) が以下の式で推定される。

$$F = V_d \cdot C \quad (19)$$

C について、本研究では吹田市における特別測定値⁷¹⁾ を利用した。ITDB を利用する場合には、当該都市に対して各大気質の測定局を 1 カ所のみ利用できるが、今回は複数の測定局が存在する場合、それぞれについて吹田市全体で大気汚染物質除去量の算出を行い、年間値としてはそれらの平均を取ることをプログラムソースの改変により可能とした。

V_d は CO , NO_2 , O_3 , SO_2 について以下の式により推定される⁷²⁾。

$$V_d = \frac{1}{R_a + R_b + R_c} \quad (20)$$

R_a , R_b , R_c はいずれも汚染物質輸送に対する抵抗値を表し、 R_a は樹冠内部の空気移動抵抗、 R_b は樹冠天蓋表面に直接隣接する境界層での準層流境界層抵抗、 R_c は樹冠天蓋表面の化学的および生物学的吸収能力を示す表面抵抗である⁷³⁾。 R_c の成分としては、葉での光合成に伴うガス交換を気孔から行う際の気孔抵抗値があり、この算出には樹冠部を 30 の水平な層に分割し、各層での葉面積指数および直達・散乱日射量中の可視領域成分 (有効光合成放射量) が用いられる⁷⁸⁾。Eco では太陽定数と大気中の太陽光の散乱、吸収に基づいて葉に到達する日射量の推定を行っているが⁷⁹⁾、吹田市での全天日射量の測定値⁷¹⁾ が利用可能であったことから、日射量の推定を行わず、測定値を入力して利用するために、本研究では、プログラムソースの改変を行った。

$PM_{2.5}$ の $ILAI$ あたりの V_d は、文献で報告されている風速に従う沈着速度測定値の中央値に基づいて決定されている⁸⁰⁾。 V_d と LAI の積および C から $PM_{2.5}$ の葉表面への時間あたり F を算出し、風による葉から大気への粒子の再浮遊 (re-suspension) および降雨による葉から地面への洗い流し (wash-off) を考慮して年間の大気からの除去量が推定される⁸⁰⁾。なお、葉表面に蓄積された $PM_{2.5}$ の再浮遊率は風速により決定され、洗い流しは葉による雨水の樹冠遮断の最大値を超えた場合に、葉表面に蓄積されていた $PM_{2.5}$ が雨水の滴下と共に地面へ到達し、これにより $PM_{2.5}$ が大気中から削減されるものと捉えられている。

5) 大気汚染物質除去に伴う健康被害軽減

ここでは、米国環境保護庁が全米での多数の医療現場での実績、大気質測定データ、そしてそれらの統計的解析に基づく知見を集約して開発した BenMAP⁸¹⁾ に基づいて樹木による大気汚染物質除去に伴う健康被害人数の削減およびその貨幣価値が算出される。これは本来米国のみで適用可能であるが平林ら³⁶⁾ と同様のプログラムソースの改変を施し、日本国内で適用可能とした。

BenMAP では 13 種類の健康被害⁸²⁾ について NO_2 , O_3 , SO_2 , $PM_{2.5}$ の大気中濃度⁸³⁾ の変化 ΔC_i (NO_2 , O_3 , SO_2 は ppb, $PM_{2.5}$ は $\mu g/m^3$) と年齢層別の健康被害件数の変化 ΔI_i (件) およびそれに伴う医療費等の変化 ΔV_i (US\$) との関連を、実績値および推定値に基づいて米国各郡について計 85 の健康影響関数 (添え字 i は関数番号を表す) として保持されている。例えば $i=58$ は NO_2 の日別最大濃度の年間平均の変化と年齢層 0-14 歳の呼吸器系疾患による入院件数および医療費の変化との関係から規定⁸⁴⁾ され、当該年齢層人口 P_i (人) が全米最大 (約 200 万人) のカリフォルニア州ロサンゼルス郡では、 $\Delta C_{58} = 12.3 \mu g/m^3$ に対して、 $\Delta I_{58} = 228$ 件、 $\Delta V_{58} = US\$663$ 万となっている。 P_i は 2010 年の米国国勢調査の各郡の結果、 ΔC は各郡について 2000-2007 年において各大気汚染物質の年間平均濃度最大 (ベースライン年) と最小 (コントロール年) の間での濃度変化である。

BenMAP を Eco へと統合する際に、85 健康影響関数における ΔI_i , ΔV_i , P_i , ΔC_i に基づき ΔC_i の単位量あたり年齢層別一人あたりの健康被害係数 IM_i (件/人/ppb または件/人/ $\mu g/m^3$)、貨幣価値係数 VM_i (US\$/人/ppb または US\$/人/ $\mu g/m^3$) が米国各郡を対象として以下の式により算出される。

$$IM_i = \frac{\Delta I_i}{P_i \cdot \Delta C_i} \quad (21)$$

$$VM_i = \frac{\Delta V_i}{P_i \cdot \Delta C_i} \quad (22)$$

これらに基づき Eco で推定される樹木による大気汚染物質 (CO は BenMAP での解析に含まれておらず、 NO_2 , O_3 , SO_2 , $PM_{2.5}$ のみ) 除去の結果の ΔC_i と解析対象地での P_i および IM_i , VM_i から、健康被害の削減件数 ΔI およびその貨幣価値 ΔV が算出可能となっている。一例として NO_2 に起因する呼吸器疾患の入院について、0 歳から 99 歳までを網羅する算出式を以下に示す。

$$\Delta I = IM_{58} \cdot P_{58} \cdot \Delta C_{58} + IM_{59} \cdot P_{59} \cdot \Delta C_{59} + IM_{64} \cdot P_{64} \cdot \Delta C_{64} \quad (23)$$

P_{58} , P_{59} , P_{64} はそれぞれ年齢層 0-14 歳, 15-64 歳, 65-99 歳の人口を、 ΔC_{58} , ΔC_{59} はともに日別最大濃度の年間平均の変化⁸⁴⁾ を、 ΔC_{64} は日別平均濃度の年間平均の変化⁸⁵⁾ を示す。貨幣価値の算出は式 23 において、対応する VM_i が利用される。

本研究では、大気汚染物質の濃度変化と人の健康との関係性について、日米で同等と仮定して、 IM_i , VM_i を吹田市での値に修正した。2010 年, 2016 年をそれぞれベースライン年, コントロール年とし、各大気汚染物質について、この間の年間平均濃度の差および各年での濃度に最も合致する米国の郡をリファレンスとして選定した。健康被害件数は吹田市⁸⁶⁾ とリファレンス郡との人

口比から算出し、健康被害1件あたり貨幣価値は日米での平均医療費の比率から米国の46%⁸⁷⁾、労働損失日数、登校不可日数に関しては日米での1人当たり収入比率⁸⁸⁾から米国の65%、死亡1件の貨幣価値は統計上の1人当たり生涯生産額について国内の文献から得た額の中央値を用いて4.3億円⁸⁹⁾とし、式21,22からそれぞれの係数を算出して、式23のように各健康影響関数に用いた。

6) 雨水流出削減量

Ecoの算出モデルではTOPMODEL^{90), 91)}の既製の樹冠遮断パラメータ等に基づいて算出を行っている。まず現存する樹木について、雨水の樹冠遮断および蒸発散、滴下、地表面に達した雨水の凹地貯留、浸透、表面流出を時間単位で計算し、年間での雨水流出量が算出される。この過程においてEcoでは放射収支量の推定値を用いた蒸発散量を算出するが⁷⁸⁾、本研究では放射収支量の推定を行わず、兵庫県での測定値⁷¹⁾を入力して利用するために、プログラムソースの改変を行った。次に、現存する樹木全てが存在しない場合での年間での雨水流出量を算出し、これらの差から樹木が存在する場合の雨水流出の削減量が推定される。なおEcoでは土壌の分類や水分量等の情報を利用しないことから、舗装面などの不透水性土地被覆に到達した雨水は全て表面流出により流出し、浸透性土地被覆では全てが浸透するものとして推定が行われている⁹²⁾。本研究では、吹田市全域について高解像度土地利用土地被覆図⁹³⁾における”都市”カテゴリの土地被覆率(80%)を不透水性とみなし、それ以外の20%を浸透性土地被覆率として用いた。

吹田市における2016年度の透水性舗装の施工実績を基に、その年換算設置費用と年間での貯留・浸透可能な雨量から雨水1m³あたりの設置費用を算出し、貨幣価値係数とした。具体的には、透水性舗装は人力施工で設置済み舗装の撤去にかかる費用も含め11,000円/m²であり、設置面積2,295m²の総費用は25,245,000円であった⁹⁴⁾。雨水浸透施設の耐用年数を定率法における10年⁹⁵⁾とすると、年換算での設置費用は2,524,500円であった。透水性能1mm/秒=3600mm/時は、2016年の吹田市での特別降雨量の最大値が39mm/時⁹⁶⁾であることから、時間毎の降雨は透水性舗装の性能内に収まり、年間降雨量1,529mm×2,295m²=3,509m³も全て貯留・浸透可能であったと考えられる。よって年間での雨水処理にかかる貨幣価値として2,524,500円/3,509m³=719円/m³として雨水流出量の削減を貨幣価値化した。

3. 研究の結果

(1) 吹田市における街路樹構造

吹田市の樹木健全度調査の144路線、12,134本の「予備診断カルテ」を基に作成したEco用のデータベースを、前章で詳述した吹田市内にパラメータ設定されたEcoにインポートして解析できたのは141路線、8,796本であった⁹⁷⁾。その結果を次に述べる。

表-5は、吹田市の樹木健全度調査データに基づいてEcoによる街路樹構造を分析した結果を吹田市全体及び樹木本数上位10樹種毎に示している。

表-5より、分析した樹木総本数8,796本において、樹種は100樹種であることが分かる。100樹種のうち樹種別本数の上位10種を見ると、ケヤキが1,223本と最も多く、次いでクスノキが1,062本と多く、次いで、ナンキンハゼ932本、サクラ類913本、トウカエデ833本、イチョウ770本、これらに加えて、ハナミズキが502本、アメリカフウが370本と続いている。これら上位10種で7,020本あり、全体の約80.0%を占めており、上位10種において、常緑広葉樹は、クスノキのみに限定され、その他9種は全て落葉樹であり、落葉広葉樹が優占し、イチョウのみが落葉針葉樹である。

表-5 街路樹構造(樹木本数上位10樹種)

樹種	樹木本数(本)	樹高平均(m)	枝下高平均(m)	胸高直径平均(cm)	枝張り平均(m)	葉面積	
						合計(1,000m ²)	平均(m ²)
ケヤキ	1,223	9.1	3.6	27.7	7.1	146.7	119.9
クスノキ	1,062	8.3	3.6	33.1	5.7	93.1	87.7
ナンキンハゼ	932	8.8	3.6	31.2	6.1	102.8	110.3
サクラ類	913	5.2	2.9	17.0	4.4	29.2	32.0
トウカエデ	833	8.6	3.2	24.2	5.9	120.8	145.0
イチョウ	770	8.6	3.3	23.7	5.6	58.8	76.4
ハナミズキ	502	4.1	2.1	8.9	2.6	6.8	13.6
アメリカフウ	370	10.8	3.0	35.2	5.6	57.4	155.2
ユリノキ	221	8.4	2.7	27.0	4.2	23.5	106.5
シンジュ	194	8.1	3.7	29.4	4.0	10.1	52.3
その他(90種)	1,776	6.9	2.7	20.5	4.3	125.6	70.7
全体	8,796	7.8	3.1	24.8	5.3	774.9	88.1

表-6 樹木補償額の推定値(樹木本数上位10樹種)

樹種	樹木本数(本)	樹木補償額	
		合計(円)	平均(円)
ケヤキ	1,223	114,459,234	93,589
クスノキ	1,062	120,480,600	113,447
ナンキンハゼ	932	95,360,151	102,318
サクラ類	913	46,630,498	51,074
トウカエデ	833	67,882,400	81,491
イチョウ	770	59,324,166	77,044
ハナミズキ	502	9,867,567	19,657
アメリカフウ	370	81,303,980	219,740
ユリノキ	221	19,231,384	87,020
シンジュ	194	10,393,065	53,572
その他(90種)	1,776	145,583,719	81,973
全体	8,796	770,516,764	87,599

全国及び近畿圏で植えられている上位10樹種⁹⁸⁾と比較すると、全国及び近畿圏の優占種であるイチョウに加えて、サクラ類、ケヤキ等の7種が同様の樹種であり、特に近畿圏の優占種であるケヤキ、クスノキが吹田市でも同様に多く、一方で全国及び近畿圏で最も優占するイチョウが少ないことが特徴である。

次に、表-5より、街路樹の樹木形状について樹木1本あたりの平均で見ると、樹高は、全体の7.8mに対して、アメリカフウが10.8mと最も高く、次いで、ケヤキが9.1mと高く、ナンキンハゼが8.8mと続いており、一方、ハナミズキは4.1mと最も低い。枝下高は、全体の3.1mに対してケヤキ、クスノキ、ナンキンハゼは3.6mと高く、一方、ハナミズキは2.1mと最も低い。胸高直径は、全体の24.8cmと比較して、アメリカフウが35.2cmと最も太く、次いで、クスノキ33.1cm、ナンキンハゼ31.2cmの順で続いており、一方、ハナミズキは8.9cmと最も細い。次いで、枝張り及び葉面積を見ると、枝張りでは、全体の5.3mと比較して、ケヤキが7.1m、次いでナンキンハゼ6.1m、トウカエデ5.9m、クスノキ5.7mと続いており、ここでもハナミズキは2.6mと最も小さい。葉面積を見ると、全体の88.1m²と比較して、アメリカフウが155.2m²と最も大きく、次いでトウカエデが145.0m²と

大きく、枝張りの大きいケヤキやナンキンハゼは119.9m²、110.3m²とアメリカフウやトウカエデと比較してやや小さく、クスノキは87.7m²と全体平均と同程度であり、ハナミズキは葉面積でも13.6m²と他と比較して非常に小さい。

以上のことから、本研究で分析の対象とした吹田市の街路樹8,796本では、上位10種の樹木が全体の約8割を占め、これらの樹種は、全国及び近畿圏で植栽されている樹種と同様であるものの、全国及び近畿圏と比較してイチョウが少なく、近畿圏でよく植えられているケヤキやクスノキが優占していることが特徴である。樹木形状では、アメリカフウは、平均樹高が10.8mと最も高く、胸高直径が平均35.2cmと最も太く、葉面積も平均155.2m²と他の樹種と比較して多いことが分かる。葉面積では、アメリカフウに次いで、トウカエデも平均145.0m²と多い。樹木本数の多いケヤキやクスノキを見ると、ケヤキは、樹高の平均が9.1m、枝張りの平均が7.1m、葉面積の平均も119.9m²と多いことが特徴であり、一方、クスノキは、胸高直径の平均が33.1cmと太いものの、枝張りは平均5.7m、葉面積は平均87.7m²と他の樹種と比較して少ないことが特徴である。一方、ハナミズキは、樹木形状の全ての項目において、平均値を大きく下回り、依然として成長段階にあるため小さいことが分かる。

(2) 街路樹の樹木補償額の推定

表－6は、吹田市の街路樹が消失した場合に、現在の状態に再

生するための金額を樹木補償額として分析した結果を吹田市全体及び樹木本数上位10樹種毎に示している。

表－6より、本研究で対象とした吹田市全体の8,796本に対する樹木補償額は、770,516,764円、樹木1本あたりの平均は87,599円であることが分かる。

表－6より、樹種別本数の上位10種について、樹木1本あたりの平均の樹木補償額を見ると、アメリカフウが219,740円と最も高く、次いでクスノキ113,447円、ナンキンハゼ102,318円、ケヤキ93,589円が高い。一方、ハナミズキは19,657円と最も低くサクラ類も51,074円と低い結果となった。

(3) 街路樹の生態系サービスの推定

表－7は、吹田市における街路樹の生態系サービスとして、炭素蓄積量、炭素固定量、大気汚染物質除去量、雨水流出削減量の4項目について推定した結果を吹田市全体及び樹木本数上位10樹種毎に示している。

表－7より、吹田市全体では、炭素蓄積量は総量で1,376.8t、樹木1本あたりの平均は、156.5kgとなり、炭素固定量は、1年間あたり、90.0t/年、樹木1本あたりの平均は10.2kg/年と推定できる。炭素蓄積量について、樹種別に樹木1本あたりの平均で見ると、クスノキは284.4kgと最も大きく、ナンキンハゼが240.4kgと多く、次いで、シンジュ194.1kg、ケヤキ181.4kgが続いている。次に、1年間あたりの炭素固定量では、炭素蓄積量

表－7 各生態系サービスの推定値（樹木本数上位10樹種）

樹種	樹木 本数 (本)	炭素蓄積		炭素固定		大気汚染物質除去		雨水流出削減	
		合計 (t)	平均 (kg)	合計 (t/年)	平均 (kg/年)	合計 (kg/年)	平均 (g/年)	合計 (m ³ /年)	平均 (m ³ /年)
ケヤキ	1,223	221.9	181.4	13.4	10.9	151.1	123.5	1,606.0	1.3
クスノキ	1,062	302.0	284.4	15.6	14.7	223.0	210.0	1,357.0	1.3
ナンキンハゼ	932	224.0	240.4	13.1	14.1	105.9	113.6	1,125.5	1.2
サクラ類	913	108.4	118.8	7.3	8.0	30.1	32.9	319.7	0.4
トウカエデ	833	111.4	133.7	9.6	11.6	124.4	149.3	1,322.4	1.6
イチョウ	770	100.1	130.0	8.4	10.9	60.6	78.7	644.1	0.8
ハナミズキ	502	7.5	14.9	1.3	2.7	7.1	14.0	74.9	0.1
アメリカフウ	370	56.4	152.4	3.3	9.0	59.1	159.9	628.7	1.7
ユリノキ	221	29.4	133.2	1.8	8.3	24.2	109.7	257.7	1.2
シンジュ	194	37.7	194.1	2.5	13.1	10.5	53.9	111.1	0.6
その他(90種)	1,776	178.0	100.2	13.5	7.6	165.1	93.0	1,470.5	0.8
全体	8,796	1376.8	156.5	90.0	10.2	961.1	109.3	8,917.7	1.0

表－8 各生態系サービスの貨幣価値（樹木本数上位10樹種）

樹種	樹木 本数 (本)	炭素蓄積		炭素固定		大気汚染物質除去		雨水流出削減	
		合計 (円)	平均 (円)	合計 (円/年)	平均 (円/年)	合計 (円/年)	平均 (円/年)	合計 (円/年)	平均 (円/年)
ケヤキ	1,223	4,589,080	3,752	276,560	226	2,084,129	1,704	1,154,694	944
クスノキ	1,062	6,245,156	5,881	321,806	303	1,764,007	1,661	975,708	919
ナンキンハゼ	932	4,632,483	4,970	271,316	291	1,460,650	1,567	809,261	868
サクラ類	913	2,242,151	2,456	150,457	165	414,838	454	229,838	252
トウカエデ	833	2,303,906	2,766	199,274	239	1,716,107	2,060	950,794	1,141
イチョウ	770	2,069,675	2,688	172,922	225	835,869	1,086	463,106	601
ハナミズキ	502	154,294	307	27,800	55	97,259	194	53,886	107
アメリカフウ	370	1,166,327	3,152	68,709	186	815,902	2,205	452,044	1,222
ユリノキ	221	608,907	2,755	38,090	172	334,475	1,513	185,313	839
シンジュ	194	778,695	4,014	52,361	270	144,184	743	79,884	412
その他(90種)	1,776	3,681,540	2,073	279,765	158	1,909,199	1,075	1,057,320	595
全体	8,796	28,472,214	3,237	1,861,415	212	11,576,621	1,316	6,411,847	729

表－9 年間健康被害軽減とその貨幣価値

大気汚染物質除去	健康被害軽減	削減件数 (件/年)	貨幣価値 (円/年)
NO ₂	入院-呼吸器系疾患	0.024	36,518
NO ₂	救急外来-喘息	0.009	192
NO ₂	喘息悪化	5.299	22,476
NO ₂	急性呼吸器症状	0.386	619
NO ₂ 合計		5.718	59,805
O ₃	急性呼吸器症状	10.645	46,250
O ₃	入院-呼吸器系疾患	0.020	31,492
O ₃	死亡	0.008	3,468,866
O ₃	登校不可日数	2.222	15,603
O ₃	救急外来-喘息	0.004	94
O ₃ 合計		12.899	3,562,305
PM _{2.5}	急性気管支炎	0.006	26
PM _{2.5}	急性心筋梗塞	0.005	24,650
PM _{2.5}	急性呼吸器症状	4.019	20,023
PM _{2.5}	喘息悪化	2.575	10,640
PM _{2.5}	慢性気管支炎	0.004	60,858
PM _{2.5}	救急外来-喘息	0.004	80
PM _{2.5}	入院-心臓血管系	0.003	5,917
PM _{2.5}	入院-呼吸器系疾患	0.004	6,200
PM _{2.5}	下気道症状	0.071	188
PM _{2.5}	死亡	0.018	7,812,726
PM _{2.5}	上気道症状	0.056	128
PM _{2.5}	労働損失日数	0.667	6,580
PM _{2.5} 合計		7.432	7,948,015
SO ₂	急性呼吸器症状	0.051	82
SO ₂	喘息悪化	0.417	1,662
SO ₂	救急外来-喘息	0.002	53
SO ₂	入院-呼吸器系疾患	0.003	4,699
SO ₂ 合計		0.473	6,496
全体		26.522	11,576,621

と同様に、クスノキが14.7kg/年、ナンキンハゼが14.1kg/年と大きく、次いで、シンジュ13.1kg/年に加えて、トウカエデ11.6kg/年やケヤキ・イチヨウ10.9kg/年が続いている。一方、サクラ類は、炭素蓄積量、1年間あたりの炭素固定量は118.8kg、8.0kg/年と低く、ハナミズキは、14.9kg、2.7kg/年と最も低い。

次いで、表－7より、大気汚染物質除去量と雨水流出削減量を見ると、吹田市全体の1年間あたりの大気汚染物質除去量は961.1kg/年、樹木1本あたりの平均は109.3g/年となり雨水流出削減量は、8,917.7m³/年、樹木1本あたり1.0m³/年と推定できる。これらを樹種別に樹木1本あたりの平均でみると、1年間あたりの大気汚染物質除去量では、クスノキは210.0g/年と最も大きく、次いで、アメリカフウ159.9g/年、トウカエデ149.3g/年も大きい。1年間あたりの雨水流出削減量では、アメリカフウ1.7m³/年と最も多く、次いで、トウカエデ1.6m³/年、クスノキ・ケヤキ1.3m³/年も多いことが分かる。一方、サクラ類は、大気汚染物質除去量、雨水流出削減量はともに32.9g/年、0.4 m³/年と低く、ハナミズキは、14.0g/年、0.1g/年とここでも最も低い。

(4) 街路樹の貨幣価値の推定

1) 街路樹の生態系サービスに関わる項目の貨幣価値の推定

表－8は、吹田市における街路樹の生態系サービスとして、炭素蓄積、炭素固定、大気汚染物質除去、雨水流出削減の4項目について貨幣価値を推定した結果を吹田市全体及び樹木本数上位10樹種毎に示している。

表－8より、吹田市全体では、炭素蓄積は総額で28,472,214円、樹木1本あたりの平均は、3,237円となり、炭素固定は、1年間あたり、1,861,415円/年、樹木1本あたりの平均は212円/年と推定できる。炭素蓄積について、樹種別に樹木1本あたりの平均で見ると、クスノキは5,881円と最も大きく、ナンキンハゼが4,970円と大きく、次いで、シンジュ4,014円、ケヤキ3,752円が続いている。次に、1年間あたりの炭素固定では、炭素蓄積と同様に、クスノキが303円/年と最も大きく、ナンキンハゼが291円/年と続いており、次いで、シンジュ270円/年に加えて、トウカエデ239円/年、ケヤキ226円/年と続いている。一方、ハナミズキは、炭素蓄積、1年間あたりの炭素固定は、307円、55円/年と最も低い。

次いで、表－8より、大気汚染物質除去と雨水流出削減を見ると、吹田市全体の1年間あたりの大気汚染物質除去は11,576,621円/年、樹木1本あたりの平均は、1,316円/年となり、雨水流出削減は、1年間あたり、6,411,847円/年、樹木1本あたりの平均は729円/年と推定できる。これらを樹種別に樹木1本あたりの平均で見ると、大気汚染物質除去では、アメリカフウは2,205円/年と最も大きく、次いで、トウカエデが2,060円/年、ケヤキ1,704円/年、クスノキ1,661円/年と続いている。雨水流出削減では、アメリカフウは1,222円/年と最も大きく、次いで、トウカエデ1,141円/年、ケヤキ944円/年、クスノキが919円/年と続いている。一方、ハナミズキは、大気汚染物質除去、雨水流出削減は、194円/年、107円/年とここでも最も低い。

2) 健康被害削減件数とその貨幣価値の推定

表－9は、吹田市における大気汚染物質NO₂、O₃、PM_{2.5}、SO₂の濃度減少に起因する疾患、症状等の分類毎に健康被害削減件数とその貨幣価値の推定した結果を大気汚染物質毎に示している。

表－9より、吹田市全体では、NO₂、O₃、PM_{2.5}、SO₂の乾性沈着に伴う医療費の削減は、1年間あたり、削減件数約26.5件/年、11,576,621円と推定できる。のど、気管、肺などの呼吸器に悪影響を与えるNO₂除去による健康被害削減について、1年間あたり、削減件数約5.7件/年、59,805円と推定できる。健康被害削減件数別に詳しくみると、NO₂除去による喘息悪化の軽減が1年間あたり約5.3件/年、22,476円と最も高い。次に、目の痛みや吐き気、頭痛などを引き起こすO₃除去による健康被害削減について、1年間あたり、削減件数約12.9件/年、3,562,305円と推定できる。健康被害削減件数別に詳しくみると、O₃除去による急性呼吸器症状の軽減が1年間あたり約10.6件/年、46,250円と最も高く、登校不可日数の軽減が1年間あたり約2.2件/年、15,603円と続いている。次いで、呼吸器疾患や肺がんを引き起こすPM_{2.5}除去による健康被害削減について、1年間あたり、削減件数約7.4件/年、7,948,015円と推定できる。健康被害削減件数別に詳しくみると、PM_{2.5}除去による急性呼吸器症状の軽減が1年間あたり約4.0件/年、20,023円と最も高く、喘息悪化の軽減が1年間あたり約2.6件/年、10,640円と高い。最後に、気管支炎や喘息を引き起こすSO₂除去による健康被害削減について、1年間あたり、削減件数約0.5件/年、6,496円と推定できる。

4. 考察

本研究では、日本国内の吹田市を事例に、街路樹の価値算出について、国内で簡易に得られる街路樹に関するデータとして樹木健全度調査結果を用い、米国を標準とした算出式と計算パラメー

タを基に、Ecoを独自に改変したプログラムソースによって、街路樹の貨幣価値を算出した。得られた結果を正確な実測値との比較検証はできないものの、本研究で得られた結果を基に、街路樹の価値の推定に用いるデータの観点、国内向けに改変したEcoの推定の観点に加えて、推定値を参考にした街路樹の再整備や維持管理の方針の観点から、以下に個別の考察を述べるとともに、今後の課題をまとめる。

(1) 街路樹の価値の推定に用いるデータ

本研究で用いた樹木健全度調査データは、欧米と比較して街路樹データベースの整備が遅れている日本国内において、今後の整備が現実的なものである。このデータに2章で述べた樹冠欠損率の確認と日当たりのよい樹冠面数を追加することによって、世界的に普及しつつあるEcoを用いて街路樹の生態系サービスから貨幣価値まで比較的容易に推定できることが確認できた。今後、樹木健全度調査を自治体が採用する際に、本研究で行った樹冠欠損率の判定と日当たりのよい樹冠面数の測定も行うことで、容易にEcoを用いた分析が可能となり、街路樹に関する施策判断に活用できる推定が行えることとなる。

(2) 国内向けに改変したEcoでの推定

Ecoを構成するプログラムソース、入力データ、パラメータの3要素について通常のユーザーがITDBを利用することで改変が可能となるのは、入力データとしてローカルデータを利用することのみである。これに対して、本研究ではEco開発者の協力を得て、パラメータの改変を伴うプログラムソースの大幅な改変を行った。この結果、米国での実績に基づいた概算による日射量、放射収支量の推定値を吹田市近辺での実測値に置き換えての大気汚染物質除去および雨水流出削減の推定が可能となった。また、吹田市内での複数の大気質測定局のデータを利用することで、市内全体の大気質の情報に基づいての大気汚染物質除去の算出も可能となった。

健康被害軽減に関しては、ITDBを利用しての解析は非常に限定的で、Ecoにより算出された米国大陸部の郡毎の結果に基づいて人口密度から貨幣価値を推定する回帰式⁹⁹⁾による算出のみが可能である。その内訳としての各健康被害の削減件数およびその貨幣価値を日本国内のローカルデータを用いての算出は不可能であった。これに対して本研究では、米国と日本において、「大気汚染物質による人の健康被害は同等である」という前提に基づき、吹田市での大気質の実測値を用い米国でのリファレンス郡を選定し、そこでの係数を吹田市用に調整することで、被害件数の削減およびその貨幣価値を算出可能とした。しかし、これがBenMAPに従って吹田市で行える推定の限界でもあり、将来的には、Ecoでの解析に囚われることなく、BenMAP同様、日本国内での実績とその統計的解析に基づいて、同様の解析を行えるような知見の蓄積を行うことが望ましい。

(3) 推定値を参考にした街路樹の再整備及び維持管理の方針

街路樹の機能は、今回推定した生態系サービスや健康被害軽減に加えて、微気象緩和、景観、火災延焼防止、交通安全、レクリエーションなど多岐にわたる。以上を踏まえた上で、今回推定した生態系サービスおよびその貨幣価値から維持管理の方針について考察する。

今回の吹田市のデータでは、生態系サービスの分析方法および推定値から、胸高直径が大きい、すなわち樹幹の容積が大きいクスノキ、ナンキンハゼ、アメリカフウといった樹種が炭素蓄積及び固定の推定値が高かった。このことは大径木化による通行や安全確保の困難の問題と相反しており、生態系サービスの観点からは道路幅員が確保できる箇所についてはこれら樹種の健全な樹勢に十分配慮しつつ、全体の樹形回復を行いながら、高さは抑え樹冠を確保しつつ、健全な樹勢に十分配慮し、全体の樹形回復を行

う必要があるであろう。胸高直径は標準であるが本数が多いケヤキについては、関東と比較して大径木化の傾向が少ない関西においては、自然樹形仕立てで維持する生育管理によって生態系サービスの確保が望まれる。一方で、全国的に街路樹に採用されるイチョウ及びシンジュは、吹田市のその他上位樹種と比較して大きさは類似するものの、今回推定した生態系サービスの値は総じて低いため、土質と乾燥といった環境ストレスによる枯損・枯死の際には、地域の環境に適合しつつ総合的に生態系サービスの価値が高くなる樹種への転換を検討する余地がある。樹勢が弱いものについては、中長期的な生育方針に基づいて維持管理による樹勢回復、補植による更新、樹種転換などを判断する必要がある。近年、樹種転換の候補として多く見られるハナミズキは、生態系サービスは著しく低い値を示しており、将来的に十分な大きさが期待できる樹種でもないため、景観や維持管理費の削減に特化した方針の元での植栽にする必要があると言えよう。

(4) 今後の課題

今回は、既知の樹木健全度調査とその補完データに限って分析したため、Ecoに実装されて推定可能な街路樹による住宅の冷暖房使用量の節約に関する分析はできなかったが、住宅建築年、戸数、歩道幅員などの都市計画部局が有するデータと合わせることで、居住者の生活に近い微気象緩和機能の貨幣価値の推定も行える。これによって、冷暖房使用量の削減が見込める場合には、強剪定などの市民要望を街路樹の貨幣価値の理解の下で抑え、協働管理の可能性も広がることが期待される。あわせて、今回は算出していない維持管理費の増加といった支出面との比較を行うことで、推定した貨幣価値との費用対効果をふまえた街路樹の価値の最大化が検討できるであろう。

また、今回は吹田市の街路樹を対象としたため、現状の樹種による分析となった。今後、より広域または他地域での分析結果を積み重ねることで、多くの樹種の環境緩和機能やその貨幣価値が把握され、適切な街路樹の再整備や維持管理に関する個別具体的な知見が得られると考えられる。

今回得られた結果は、正確な実測値が存在しない街路樹の貨幣価値を推定したものである。今後、大気汚染物質の周辺濃度の増減や乾性着着などの実測値との比較を通じた精度検証や、近隣住民の景観価値に対する支払い意思額の採用などによりより総合的な貨幣価値の推定などが求められる。

謝辞：本研究の遂行にあたり、吹田市土木部公園みどり室、土木部道路室、下水道部水循環室の方々に資料提供等のご協力を頂いたことに謝意を表す。また、本研究は大阪産業大学デザイン工学部 Tran Duy Chien 氏の卒業研究にて整理したデータを基にしている。本研究は文部科学省科学研究費基盤研究(C)(18K05711)の成果の一部である。

補注及び引用文献

- 1) 国土技術政策総合研究所(2016): 街路樹再生の手引き第2編 国土技術政策総合研究所資料: No.885, 89-148
- 2) 川口将武・赤澤宏樹・武田重昭・松尾薫・加我宏之(2020): 地方自治体の街路樹に関する維持管理計画および住民参加制度の状況: ランドスケープ研究 83(5), 509-514
- 3) 一般社団法人日本造園建設業協会(2007): 都市緑化ハンドブック(街路樹編)美しい街路樹をつくるー樹形のつくり直しー: 環境緑化新聞, 45-52
- 4) 吉田謙太郎・宮本篤実・出村克彦(1997): 観光農園のもつ保健休養機能の経済的評価ートラベルコスト法の適用: 農村計画学会誌 16(2), 110-119
- 5) 庄子康(2001): トラベルコスト法と仮想評価法による野外レクリエーション価値の評価とその比較: ランドスケープ研究 64(5), 685-690
- 6) 愛甲哲也・崎山愛子・庄子康(2008): ヘドニック法による住宅地の価格形成における公園緑地の効果に関する研究: ランドスケープ研究 71(5), 727-730
- 7) 鈴木雅智・浅見泰司(2014): 住宅地における空閑地の農的活用の評

- 価とその空間配置の適正化に関する考察：都市計画論文集 49(3), 609-614
- 8) 内藤志帆・高橋新平・近藤三雄 (2003)：維持管理費からみた集合住宅内植栽地の経済的価値評価について：ランドスケープ研究 66(5), 783-788
 - 9) 上野芳裕・小松尚美・平田富士男 (2014)：簡略型 CVM による緑の保全に関わる住民ボランティア育成事業評価の試行：ランドスケープ研究 77(5), 677-680
 - 10) 武田ゆうこ・藤原宣夫・米澤直樹 (2014)：コンジョイント分析による都市公園の経済的評価に関する研究：ランドスケープ研究 67(5), 709-712
 - 11) 松本綾乃・福井亘・疋嶋大作 (2019)：街路樹の二段階判定による景観創出に対する景観評価と経済的評価：ランドスケープ研究オンライン論文集 12, 76-82
 - 12) Konstantinos, T., Kalevi, K., Stephen, V., Vesa, Y., Aleksandra, K., Jari, N. and Philip, J. (2007): Promoting ecosystem and human health in urban areas using Green Infrastructure: A Literature review. *Landscape and Urban Planning* 81, 167-178
 - 13) Bolund, P. and Hunhammar, S. (1999): Ecosystem services in urban areas. *Ecological Economics* 29, 293-301
 - 14) United States Environmental Protection Agency.: EnviroAtlas: <http://www.epa.gov/enviroatlas>, 2020.3.20 更新, 2020.3.31 参照
 - 15) Natural Capital Project.: InVEST: integrated valuation of ecosystem services and tradeoffs”: <http://www.naturalcapitalproject.org/invest>, 2020.3.26 更新, 2020.3.31 参照
 - 16) 神田学・森脇亮・横山仁 (1997)：明治神宮の森の気候緩和機能・大気浄化機能の評価 (2) 森林環境気象モデルによるシミュレーション：天気 44, 723-731
 - 17) 赤澤宏樹・川口将武・藤本真里・上田萌子・大平和弘・田原直樹 (2015)：東大阪市におけるテキストマイニングを利用した街路樹管理への市民要望の把握：ランドスケープ研究 78(5), 741-744
 - 18) i-Tree: Learn about i-Tree: <http://www.itreetools.org>, 2020.03.30 更新, 2020.1.23 参照
 - 19) 平林聡 (2019)：緑の価値の客観的評価と波及効果－欧米諸国における i-Tree の実例を踏まえて－：日本緑化工学会誌 44(3), 460-464
 - 20) Baro, F., Chaparro, L., Gomez-Baggethun, E., Langemeyer, J., Nowak, D. J. and Terradas, J. (2014): Contribution of ecosystem services to air quality and climate change mitigation policies: the case of urban forest in Barcelona : Spain. *AMBIO* 43, 466-479
 - 21) Rogers, K., Jaluzot, A. and Neilan, C. (2011): Green benefit in Victoria business improvement district: an analysis of the benefit of trees and other green assets in the Victorian business improvement district : Victoria Business Improvement District, London.
 - 22) 平林聡・徳江義宏・伊藤綾・ELLIS Alexis・HOEHN Robert・今村史子・森岡千恵 (2016)：川崎市川崎区を事例とした i-Tree Eco による街路樹の生態系サービスおよびその貨幣価値の推定：日本緑化工学会誌 42(1), 44-49
 - 23) 2020 年 4 月 1 日中核市に移行
 - 24) 吹田市土木部道路室・公園みどり室 (2018)：吹田市道路・公園樹木適正管理指針：<https://www.city.suita.osaka.jp/home/soshiki/div-doboku/kouenmidori/keikaku-kaitei_copy.html>, 2020.3.30 更新, 2020.03.25 参照
 - 25) 吹田市都市計画室 (2017)：吹田の都市計画：<https://www.city.suita.osaka.jp/home/soshiki/div-toshikeikaku/toshikeikaku/suitatokei/suitatokei.html>, 2020.03.30 更新, 2020.03.25 参照
 - 26) 北大阪健康医療都市推進室：北大阪健康医療都市のまちづくりホームページ <https://www.city.suita.osaka.jp/home/soshiki/div-kenkoiryo/kento/seibijigyoku.html>, 2020.03.30 更新, 2020.03.25 参照
 - 27) 吹田市 (2015)：樹木健全度緊急調査業務
 - 28) 予備診断の期間において、パイロット調査が、2015 年 1 月 8 日から 10 日に、吹田市道千里北公園古江線（通称：三色彩道）の 179 本で実施された。その後、2015 年 7 月 21 日から 2015 年 12 月 4 日に残りの 11,953 本の調査が実施された。さらに、2016 年 1 月 23 日と 3 月 11 日にそれぞれ 1 本ずつ追加の調査が実施された。
 - 29) 調査対象樹木の選定基準（吹田市道路公園部が管理する 3m 以上の高木全て）に、樹木の維持管理及び人・物への影響の程度を考慮し、次のとおり例外を設けた。道路並木・道路緑地帯の樹木の別によらず、樹高 3m 以上であっても、低木性の樹木（胸高直径 10cm・樹高 5m を超えるものを除く）は対象から除いた。また、道路緑地帯の樹木に限り、切り株から萌芽再生している樹木（概ね樹高 5m 以上のものを除く）、若しくは、市の植栽木でない高木又は生垣状に植栽された樹木（胸高直径 10cm 以上のものを除く）は対象から除いた。反対に、道路並木に限り、樹高 3m 未満であっても、市の植栽木のうち高木性の樹木、並びに、市の植栽木ではない樹木のうち、現に市が管理行為を行っているものは調査対象とした。
 - 30) 特に上位 10 種の樹種については、サクラ類以外は種レベルで日本の樹種が Eco 樹種データベースに適合した。ただし、アメリカフウは“モミジバフウ”として、シジュは“ニワウルシ”として種名レベルで適合した。サクラ類は、多くの品種が確認されたため、Eco 樹種データベースの“Plum Species”に置き換えている。
 - 31) ここでのアウトラインは、ケヤキの盃形といったような樹種固有の樹形タイプを基にしたアウトラインではなく、あくまで樹木の現状の生育状況を基にしたアウトラインである。また、生育状況が悪く、ひこばえが樹冠のように見えるほど生育している場合は、画像を拡大して判断した。
 - 32) 吹田市都市計画部都市計画室：都市計画情報サイト：<https://www2.wagmap.jp/suita/PositionSelect?mid=1>, 2020.03.30 更新, 2019.10.16 参照
 - 33) 住居系地域は、第一種低層住居専用地域、第二種低層住居専用地域、第一種中高層住居専用地域、第二種中高層住居専用地域、第一種住居地域、第二種住居地域、準住居地域とした。次に、商業系地域は、近隣商業地域、商業地域とした。工業系地域は、準工業地域、工業地域とした。
 - 34) National Centers for Environmental Information: Climate Data Online: <https://www.ncdc.noaa.gov/cdo-web/>, 2020.03.30 更新, 2020.01.23 参照
 - 35) Earth System Research Laboratory.: NOAA/ESRL Radiosonde Database: <https://ruc.noaa.gov/raobs/>, 2020.03.30 更新, 2020.1.23 参照
 - 36) 平林聡・譚瀟洋・柴田昌三 (2019)：i-Tree Eco の医療費・冷暖房費削減モデルの日本向けカスタマイズ：日本緑化工学会誌, 45(1), 200-203
 - 37) Council of Tree and Landscape Appraisers (CTLA) (1992): Guide for Plant Appraisal (8th ed.): International Society of Arboriculture, Champaign, IL.
 - 38) Nowak, D. J., Crane, D. E., Dwyer, J. F. (2002): Compensatory value of urban trees in the United States: *Journal of Arboriculture* 28(4), 194-199
 - 39) ACRT, Inc (1997): Large tree model technical manual. Cuyahoga Falls, OH: ACRT, Inc
 - 40) 文献に基づき例えばニューヨーク州においては 156 樹種、その内訳として 40 属、2 木質種別（広葉樹または針葉樹）についての SPF を Eco 実行サーバー上の樹種 DB に保持している。BV の算出対象となる樹木について、SPF が樹種レベルで存在する場合はそれを、種レベルではなく属レベルでのみ存在する場合はそれらの平均値を、それも存在しない場合は木質種別での平均値を利用して BV の算出を行っている。
 - 41) Worldwide Cost of Living (2019): Which global cities have the highest cost of living? A report by The Economist Intelligence Unit, 14
 - 42) Chow, P., Rolfe, G.L (1989): Carbon and hydrogen contents of short-rotation biomass of five hardwood species. *Wood and Fiber Science*, 21(1), 30-36.
 - 43) 佐藤顕信 (2013)：第 1 章 森林炭素量の把握：<http://redd.ffpri.affrc.go.jp/pub_db/course_materials/img/2013_applieda/2013_applieda_chap01.pdf>, 2017.07.05 更新, 2020.03.30 参照
 - 44) Nowak, D. J., Greenfield, E.J., Hoehn, R.E., Lapoint, E. (2013): Carbon storage and sequestration by trees in urban and community areas of the United States: *Environmental Pollution* 178, 229-236
 - 45) Nowak, D.J. (1996): Estimating leaf area and leaf biomass of open-grown deciduous urban trees: *Forest Science* 42(4), 504-507
 - 46) Nowak, D.J., Crane, D.E., Stevens, J.C., Ibarra, M. (2002): Brooklyn's Urban Forest. GTR-NE-290. Newtown Square, PA. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northeastern Research Station, 107
 - 47) 文献に基づき 56 樹種、その内訳として 22 属、2 木質種別（広葉樹または針葉樹）についてのアロメトリー式を樹種 DB に保持している。WB の算出対象となる樹木について、アロメトリー式が樹種レベルで存在する場合はそれを利用し、種レベルではなく属レベルでのみ存在する場合は、それらにより算出された結果の平均値として、それも存在しない場合は木質種別で算出された結果の平均値として WB の算出を行っている。
 - 48) Nowak, D.J., Hoehn, R.E., Crane, D.E., Stevens, J.C., Walton, J.T., Bond, J. (2008): A ground-based method of assessing urban forest structure and ecosystem services: *Arboriculture and Urban Forestry* 34(6), 347-358
 - 49) Smith, F.W., Sampson, D.A., Long, J.N. (1991) Comparison of leaf area index estimates from allometrics and measured light interception. *Forest Science*, 37(6): 1682-1688.
 - 50) 森林内での植生密度を前提として葉の乾燥重量の推定が行われる。この場合と比較して、都市部の街路樹のように植生密度が低く、剪定等の管理がなされた樹木については、一般的に地上部の乾燥重量が少なくなる。そこで 0.8 を乗ずることで、この調整を行っている³¹⁾。
 - 51) Nowak, D.J. (1994): Atmospheric carbon dioxide reduction by Chicago's urban forest. In: McPherson, E.G.; Nowak, D.J.; Rowntree, R.A., eds. Chicago's urban forest ecosystem: results of the Chicago Urban Forest Climate Project. Gen. Tech. Rep. NE-186. Radnor, PA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northeastern Forest Experiment Station: 83-94.
 - 52) CF は文献に基づき 217 種、その内訳として 103 属、5 葉種別（Broadleaf, Conifer-Dense, Conifer-Sparse, Herbaceous, Palm）について樹種 DB に保持している。LB の算出対象となる樹木について、CF が樹種レベルで存在すればそれを利用した結果を、種レベルではなく属レベ

- ルでのみ存在すれば、それらにより算出された結果の平均値を、存在しない場合は葉種別の CF により算出された結果の平均値として LB の算出を行っている。
- 53) Gacka-Grzesikiewicz, E. (1980): Assimilation surface of urban green areas: *Ekol. Polska* 28(4), 493-523
 - 54) McPherson, E.G. (1984): Planting design for solar control, 141-164 (in McPherson, E.G. (ed.) *Energy-conserving site design*. Am. Soc. Of Landsc. Arch., Washington, DC)
 - 55) 文献に基づいて 47 樹種、その内訳は 31 属、1 葉種別 (広葉樹) についての SF を樹種 DB に保持している。 LA の算出対象となる広葉樹について、 SF が樹種レベルで存在する場合はそれを、種レベルではなく属レベルでのみ存在する場合はそれらの平均値を、それも存在しない場合は 47 広葉樹種での平均値を利用して LA の算出を行っている。またマツ科を除く針葉樹については、 $SF=0.91^{56)}$ を、マツ科には $SF=0.83$ を利用している^{57), 58)}。
 - 56) Barbour, M.G., Burk, J.H. and Pitts, W.D. (1980): *Terrestrial Plant Ecology*. Benjamin/Cummings, Menlo Park, CA, 604
 - 57) Jarvis, P.G., Leverenz, J.W. (1983): Productivity of temperate, deciduous and evergreen forests. In: Lange, O.L.; Nobel, P.S.; Osmond, C.B.; Ziegler, H., eds. *Physiological plant ecology IV*, encyclopedia of plant physiology, volume 12D. Springer-Verlag, Berlin, 233-280
 - 58) Leverenz, J.W., Hinckley, T.M. (1990): Shoot structure, leaf area index and productivity of evergreen conifer stands. *Tree Physiology*. 6, 135-149.
 - 59) Interagency Working Group on Social Cost of Greenhouse Gases, United States Government (2016): Technical Support Document: Technical Update of the Social Cost of Carbon for Regulatory Impact Analysis Under Executive Order 12866 : <https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-12/documents/sc_co2_tsd_august_2016.pdf>, 2016.12.23 更新, 2020.01.23 参照
 - 60) 所定の年の二酸化炭素排出量の増加に起因する将来の損害額を現在価値として貨幣価値化したものが炭素の社会的費用である。米国省庁間作業部会により推定され、継続的にその推定精度の向上が図られている⁴²⁾。将来と現在の貨幣価値の調整には、将来の一人当たり消費の年割引率として 5%, 3%, 2.5% の 3 種類を適用しており、Eco は 3% の割引率の社会的費用を用いている。
 - 61) 国土交通省 (2009) : 公共事業評価の費用便益分析に関する技術指針 (共通編)
 - 62) 日本銀行 : 時系列統計データ検索サイト : <[https://www.stat-search.boj.or.jp/ssi/cgi-bin/famecgi2?cgi=\\$nme_a000&lstSelection=PR01](https://www.stat-search.boj.or.jp/ssi/cgi-bin/famecgi2?cgi=$nme_a000&lstSelection=PR01)>, 2020.07.29 参照
 - 63) 例えば森林部 0.38 cm/年⁶⁴⁾、公園・墓地・ゴルフ場 0.61 cm/年⁶⁵⁾、街路 0.83 cm/年⁴⁴⁾ である。
 - 64) Smith, W.B., Shifley, S.R. (1984): Diameter growth, survival, and volume estimates for trees in Indiana and Illinois. *Res. Pap. NC-257*. St. Paul, MN: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, North Central Forest Experiment Station
 - 65) deVries, R.E. (1987): A preliminary investigation of the growth and longevity of trees in Central Park. New Brunswick, NJ: Rutgers University. M.S. thesis.
 - 66) 気象庁 : 生物季節観測 : < <https://www.jma-net.go.jp/osaka/kansoku/seibutsukisetsu.html>>, 2020.03.24 更新, 2020.1.23 参照
 - 67) Fleming, L.E (1988): Growth estimation of street trees in central New Jersey: New Brunswick, NJ: Rutgers University, 143, M.S. thesis.
 - 68) 福山力・泉克幸・内山政弘 (2004) : 大気エアロゾルの乾性沈着 - 最近の文献拾い読み : エアロゾル研究 19(4), 245-253
 - 69) 松本光弘・村野健太郎 (1998) : インファレンシャル法による樹木等への乾性沈着量の評価と樹木衰退の一考察 : 奈良市における通年観測 : 日本化学会誌 7, 495-505
 - 70) Hirabayashi, S., Kroll, C.N., Nowak, D.J. (2011): Component-based development and sensitivity analyses of an air pollutant dry deposition model. *Environ. Model. Softw.* 26, 804-816.
 - 71) 国立環境研究所 : 環境数値データベース : <<https://www.nies.go.jp/igreen/index.html>>, 2020.03.24 更新, 2020.3.30 参照
 - 72) Baldocchi, D. (1988): A multi-layer model for estimating sulfur dioxide deposition to a deciduous oak forest canopy: *Atmospheric Environment* 22, 869-884
 - 73) R_a と R_b はともに温度、風速、太陽角度、雲量の気象条件に基づいて算出される。 NO_x , O_3 , SO_2 の V_d 算出に用いる R_a は big-leaf モデルと多層林冠沈着モデル (multilayer canopy deposition models) とのハイブリッドモデル^{74) ~ 76)} を利用し、葉面積指数等の樹木の生物物理量および温度、圧力、相対湿度、日射等の気象変数に基づいて計算される。CO の乾性沈着は葉表面における気体交換には基づかないため着葉時は 50,000 s/m、落葉時は 1,000,000 s/m を利用している⁷⁷⁾。
 - 74) Baldocchi, D.D., Hicks, B.B., Camara, P. (1987): A canopy stomatal resistance model for gaseous deposition to vegetated surfaces. *Atmospheric Environment* 21(1), 91-101
 - 75) Baldocchi, D. (1988): A multi-layer model for estimating sulfur dioxide deposition to a deciduous oak forest canopy. *Atmospheric Environment* 22(5), 869-884
 - 76) Norman, J.M. (1980): Interfacing leaf and canopy light interception models. In: Hesketh, J.D., Jones, J.W. (Eds.), *Predicting Photosynthesis for Ecosystem Models*, vol. II. CRC Press, Boca Raton, FL, 49-67
 - 77) Bidwell, R.G., Fraser, D.E. (1972): Carbon monoxide uptake and metabolism by leaves. *Canadian Journal of Botany* 50(7), 1435-1439
 - 78) Hirabayashi, S., Kroll, C.N., Nowak, D.J. (2015): i-Tree Eco Dry Deposition Model Descriptions. : <http://www.itreetools.org/eco/resources/iTree_Eco_Dry_Deposition_Model_Descriptions.pdf>, 2015.2.27 更新, 2020.03.30 参照
 - 79) Hirabayashi, S., Endreny, T. : Surface weather and upper air preprocessor description.pdf : <https://www.itreetools.org/documents/554/Surface_weather_and_upper_air_preprocessor_description_CXBdq6c.pdf>, 最新更新日不明, 2020.03.10 参照
 - 80) Nowak, D.J., Hirabayashi, S., Bodine, A., Hoehn, R. (2013): Modeled $\text{PM}_{2.5}$ removal by trees in ten U.S. cities and associated health effects. *Environ. Pollut.* 178, 395-402.
 - 81) United States Environmental Protection Agency. : Environmental Benefits Mapping and Analysis Program - Community Edition (BenMAP-CE) : < <https://www.epa.gov/benmap>>, 2020.03.30 更新, 2019.4.22 参照
 - 82) 13 種類の健康被害について、それらを引き起こす大気汚染物質との関係に基づき計 25 種類を扱う。その内訳は NO_x , O_3 , $\text{PM}_{2.5}$, SO_2 に起因する喘息の外来受診、呼吸器疾患の入院、急性呼吸器疾患 (12 種類)、 NO_x , $\text{PM}_{2.5}$, SO_2 に起因する喘息悪化 (3 種類)、 O_3 , $\text{PM}_{2.5}$ に起因する死亡 (2 種類)、 $\text{PM}_{2.5}$ に起因する急性気管支炎、慢性気管支炎、急性心筋梗塞、心臓血管疾患の入院、上気道疾患、下気道疾患、労働損失日数 (7 種類)、 O_3 に起因する登校不可日数 (1 種類) である。
 - 83) 1 日の最大濃度、平均濃度、時間帯 (8-10 時) 平均濃度、時間帯 (6-9 時) 平均濃度、時間帯 (9-16 時) 平均濃度、3 時間の最大移動平均濃度、それぞれの年間平均値または 1 日の平均濃度の 4 半期平均が利用されている。
 - 84) Luginaah, I.N., Fung, K.Y., Gorey, K.M., Webster, G., Wills, C. (2005): Association of ambient air pollution with respiratory hospitalization in a government designated "area of concern": the case of Windsor, Ontario. *Environ. Health Perspect.* 113(3), 290-296.
 - 85) Fung, K.Y., Khan, S., Krewski, D., Chen, Y. (2006): Association between air pollution and multiple respiratory hospitalizations among the elderly in Vancouver, Canada. *Inhal. Toxicol.* 18(13), 1005-1011.
 - 86) 吹田市 : 毎月末全市域年齢別人口 : <https://www.city.suita.osaka.jp/home/soshiki/div-somu/somu/001411/004511/_68168.html>, 2020.03.30 更新, 2020.01.23 参照
 - 87) OECD : Health spending : <<https://data.oecd.org/healthres/health-spending.htm>>, 2020.03.27 更新, 2020.01.23 参照
 - 88) OECD Better Life Index : Income : <<http://www.oecdbetterlifeindex.org/topics/income/>>, 2020.03.20 更新, 2020.01.23 参照
 - 89) 宮里尚三 (2010) : 労働市場のデータを用いた Value of a statistical life の推計 : 日本経済研究 (63), 1-28.
 - 90) Beven, K., Lamb, R., Quinn, P., Romanowics, R. and Freer, J. (1995): TOPMODEL. In: Computer Models of Watershed Hydrology, V.P. Singh (Editor). Water Resources Publications, Colorado, 627-688.
 - 91) Wang, J., Hassett J.M., Endreny, T.A. (2005): An object oriented approach to the description and simulation of watershed scale hydrologic processes. *Comput. Geosci.* 31(4): 425-435.
 - 92) Hirabayashi, S. (2013): i-Tree Eco Precipitation Interception Model Descriptions: <http://www.itreetools.org/eco/resources/iTree_Eco_Precipitation_Interception_Model_Descriptions.pdf>, 2013.1.30 更新, 2020.03.30 参照
 - 93) 宇宙航空研究開発機構 (JAXA) : 高解像度土地利用土地被覆図ホームページ : <https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/lulc/lulc_jindex_v1803.htm>, 2019.03.14 更新, 2020.03.25 参照
 - 94) 2020 年 1 月 20 日吹田市土木部道路室から情報提供を受けた。
 - 95) 内閣府 : 租税特別措置等に係る政策の事前評価 : <<https://www8.cao.go.jp/hyouka/h24sozei/h24sozei-09.pdf>>, 2018.11.20 更新, 2020.03.30 参照
 - 96) 気象庁 : 過去の気象データ検索 : <<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>>, 2020.03.30 更新, 2020.01.23 参照
 - 97) 分析対象から結果が減少した理由は、樹木健全度調査結果の「予備診断カルテ」内にある「全景写真」を用いて、Eco 解析に不足する樹冠欠損率と日当たりの良い樹冠面についてデータを補足する際、落葉期の写真、歩道幅員等空間的な制約で樹冠全体が写っていない写真、背後の街路樹の並木との重なりで分析対象樹木が判別できない写真があったため、分析対象から外したためである。本研究の目的の一つに大規模な再調査をせず、既存のデータを用いて分析する意義から、減ったデータのまま分析をした。
 - 98) 飯塚康雄・舟久保敏 (2017) : わが国の街路樹Ⅷ : 国土交通省国土技術政策総合研究所, 国総研資料第 1050 号, 23-28
 - 99) Nowak, D.J., Hirabayashi, S., Bodine, A., Greenfield, E. (2014): Tree and forest effects on air quality and human health in the United States. *Environ. Pollut.* 193, 119-129.

(2020.3.31 受付, 2021.1.21 受理)