日緑工誌，J. Jpn. Soc. Reveget. Tech.，45(1)，200–203，(2019)

技術報告 *TECHNICAL REPORT*

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

平林　聡*1)・譚　瀟洋 2)・柴田昌三 2)

1） The Davey Institute, The Davey Tree Expert Company
2） 京都大学大学院 地球環境学舎 景観生態保全研究室

摘要：i-Tree Eco は樹木による生態系サービスの定量的評価を行うシステムである。樹木による医療費および冷暖房費削減モデルを日本国内に適用するためのカスタマイズ手法について，京都市中京区を例として解説する。
キーワード：i-Tree Eco，生態系サービス，医療費，冷暖房費

1. はじめに

樹木による生態系サービスを定量的に評価する i-Tree Eco[27)]（以下 Eco）は世界中で利用されているが，米国外ではモデルの制限事項（米国の気候区分，樹種，パラメータ等）を許容した上での利用となる。日本国内では内部モデルの係数や入力データを改変し川崎市川崎区に適用した事例があり[3)]，本稿ではそれと同様の日本向けカスタマイズについて，京都市中京区（以下，中京区）を例に詳細に解説する。

2. Eco による生態系サービスの推定

Eco では現地測定データから解析した樹林構造に基づいて 1）炭素貯留・固定量，2）大気汚染物質の乾性沈着と 3）それに伴う健康被害削減，4）住宅での冷暖房費削減，5）雨水流出量削減という生態系サービスの評価等が可能である。

1），2），5）の日本向けカスタマイズは 1）は国内の樹種とアロメトリー式，CO_2 排出量取引単価を，2）は国内での気象および大気質データを，5）は国内での雨水管理コスト等を用いることで比較的容易に行える。本稿では，米国独自の 3），4）について，方法論やデータを具体例を用いて解説し，国内向けのカスタマイズ手法についても論じる。

3. Eco の日本向けカスタマイズ

3.1 解析対象地

中京区は人口約 11 万人[11)]，面積約 7.47 km² で京都市街地のほぼ中央に位置し，58,530 戸の住宅が存在する[10)]。中京区の街路樹計 191 本（約 10 本に 1 本の割合）の樹種，樹高，胸高直径等を 2018 年に測定した。それら樹木の樹冠投影面積は約 0.06 km²，建築物[8)]の専有面積は約 4.37 km² であり，区内面積の約 59%を占める。

3.2 大気汚染物質除去に伴う健康被害削減

3.2.1 米国向けの方法

BenMAP[26)]は米国各郡における NO_2，O_3，$PM_{2.5}$，SO_2 の濃度変化に対する健康被害・医療費削減を 85 個の健康影響関数により推定する。各関数は文献に基づく大気汚染物質濃度，年齢層別人口，健康被害件数及び医療費の関係式である。それぞれの大気汚染物質について 2000-2007 年の間に最大の濃度減少を記録した 2 つの年（NO_2，$PM_{2.5}$，SO_2: 2000 年，O_3:2002 年），（NO_2，SO_2:2007 年，O_3:2004 年，$PM_{2.5}$：2006 年）の間での 7 種類の年平均値（日毎の最大濃度：X_1，日毎の平均：N_{24}，日毎の時間帯平均 8-10 時：N_8，6-9 時：N_4，9-16 時：N_8，日毎の 8 時間の最大移動平均：X_8，日毎の平均濃度の 4 半期平均：NQ_{24}）の濃度変化を利用する。健康被害としては喘息の外来受診，呼吸器疾患の入院，急性呼吸器疾患（NO_2，O_3，$PM_{2.5}$，SO_2 に起因），喘息悪化（NO_2，$PM_{2.5}$，SO_2），死亡（O_3，$PM_{2.5}$），急・慢性気管支炎，急性心筋梗塞，心臓血管疾患の入院，上・下気道疾患，労働損失日数（$PM_{2.5}$），登校不可日数（O_3）を扱い，健康被害件数については 2010 年の国勢調査による各郡の年齢層別人口に基づいている。

Eco では米国都市における樹木による大気浄化による健康被害件数・医療費削減を，各郡における健康影響関数より導出した濃度の年平均値変化の単位量（NO_2, O_3, SO_2 は 1 ppb, $PM_{2.5}$ は 1 μg/m³）あたり，年齢層別一人あたりの健康被害係数（IM）および貨幣価値係数（VM）を利用して算出する。例えば NO_2 に起因する呼吸器疾患の入院患者数削減 I_{HAR} は式 1 から算出される。

$$I_{HAR} = IM_{58} \cdot P_{0\text{-}14} \cdot X_1 + IM_{59} \cdot P_{15\text{-}64} \cdot X_1 + IM_{64} \cdot P_{65\text{-}99} \cdot N_{24} \quad (1)$$

IM の添字は関数番号を，P は年齢層別の人口で添字は年齢層を表す。関数 58，59 はそれぞれ $P_{0\text{-}14}$，$P_{15\text{-}64}$ が X_1 の変化量[12)]に，関数 64 は $P_{65\text{-}99}$ が N_{24} の変化量[2)]に依存することを示す。濃度変化は樹木による大気浄化の結果の値を利用する。医療費削減は式 1 において，対応する VM を利用する。

3.2.2 日本向けカスタマイズ

大気汚染物質の健康への影響は日米で同等と仮定して，

* 連絡先著者（Corresponding author）：Syracuse, New York 13210 U.S.A　E-mail：satoshi.hirabayashi@davey.com

IM, *VM* を中京区での値に修正した。例として式 1 の係数の算出方法を表-1 および表-2 に示す。2010-2015 年の間が中京区では NO_2 の濃度 [9] 減少が最大で，この差および各年での濃度に最も合致する米国リファレンス郡を選定した（表-1）。健康被害件数は中京区 [11]とリファレンス郡との人口比から $I = Ir \cdot P/Pr$, 健康被害 1 件あたり貨幣価値は米国と日本の平均医療費の比率 [18] から $V/I = 0.46Vr/Ir$, 貨幣価値 $V = V/I \cdot I$ とし，それぞれの係数は $IM = I/\Delta C/P$ および $VM = V/\Delta C/P$ から算出した（表-2）。他の健康被害についても同様に計算し，死亡 1 件の貨幣価値は統計上の 1 人当たり生涯生産額から 4.3 億円 [15]，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 [19]から $V/I = 0.65Vr/Ir$ とした。

3.2.3　結果

2015 年の気象 [16]および大気質データ [9]に基づいてカスタマイズ後の Eco を実行した結果，中京区の街路樹 191 本による NO_2，O_3，$PM_{2.5}$，SO_2 の乾性沈着に伴う医療費の削減は年間約 42 万円と推定された。ただし，この結果は中京区の健康被害軽減の実データに基づいているわけではないため参考値として扱うべきである。

3.3　住宅での冷暖房費削減

Eco では McPherson ら [14]に基づき，2 階建て以下の住宅での冷暖房需要は，住宅から 18 m 以内に存在する樹高 6 m 以上の樹木による日除け，防風，蒸散，さらに別の建物による防風の影響を受けるものとし，その効果を算出する。

3.3.1　米国向けの方法

Eco では米国の 11 気候区分について，樹木による日除けおよび防風による冷暖房需要変化に伴う CO_2 排出量変化の基準値を，住宅の断熱性能が異なる 3 つの建築年代（1950 年以前/1950-80 年/1980 年以降），葉の種別（落葉/常緑），樹高（6-10/10-15/15 m 以上），樹木の住宅からの距離（0-6/6-12/12-18 m）と 8 方角の全組み合わせについて，更に樹木からの蒸散および建物による防風による冷暖房需要変化に伴う CO_2 排出量変化の基準値を，都市面積に対する樹木の樹冠投影面積と建築面積の和の割合が 10%，30%，60%の場合についてルックアップテーブルとして保持している [14]。

実際の解析では，対象地が属する気候区分において単木の影響による住宅での CO_2 排出量変化をルックアップテーブルから取得し，電気，ガス，灯油，LPG の利用割合と CO_2 排出係数から消費エネルギー量増減へ，更に単価から貨幣価値への換算を行う。これらの計算を 3 種類の建築年代について行い，建築年代別の戸数の割合で重み付けした後に加算し，その樹木による効果とする。

3.3.2　日本向けカスタマイズ

中京区での過去 30 年間の気象データ [16]から算出した年平均の暖房度日（1,719），冷房度日（1,052），年間降水量（1,529 mm）[7]と最も合致するジョージア州アトランタがある米国南東部を中京区に割り当てた [13]。米国では各気候区分の既定住宅について，各部位の熱抵抗値（R 値）が定義されている [14]。一方日本では省エネルギー基準として住宅全体としての熱損失係数（Q 値）が定義されている [25]。これらに基づいて日米の住宅の断熱性能を照合した。アトランタの 1980 年以降建築の 2 階建て既定住宅 [14]の壁，天井，窓，床の R（m^2K/W）をその逆数の熱貫流率 U（W/m^2K）に変換し，それぞれの面積を乗じて算出した熱損失の合計を延べ床面積で除算することで，Q（=2.5 W/m^2K）に変換した（表-3）。この値は日本の次世代省エネルギー基準 Q=2.7（1999 年）[25] と同等となり，同様の計算により米国の 1950 年以前の基準 Q=3.8 が日本の新省エネルギー基準 Q=4.2（1992 年）[25]と同等となった。中京区での建築の時期別住宅数 [10]から新省エネルギー基準に該当する住宅（35,540 戸：60.7%）を米国の 1950 年以前に，次世代省エネルギー基準に該当する住宅（22,990 戸：39.3%）を米国の 1980 年以降に対応させた。

ここで樹高 12 m，枝の枯死率 7.5%で 1980 年以降建築の住宅から西 10 m に位置する常緑樹についての冷暖房費増減の計算例を示す。まず日除けによる冷房需要変化に伴う CO_2 排出量変化は，表-4 から該当する気候区分，葉種別，樹高，

表-1　NO_2 の濃度変化に基づく中京区の米国リファレンス郡

濃度種類	中京区での濃度 (ppb)		米国リファレンス		米国での濃度 (ppb)	
	2010 年	2015 年	州	郡	2000 年	2007 年
X_1	34.48	28.98	NY[a]	Erie	34.12	28.68
N_{24}	18.64	15.47	UT[b]	Sanpete	18.39	15.33

a: ニューヨーク州，b: ユタ州

表-2　NO_2 に起因する呼吸器疾患の入院患者数およびその医療費算出のための中京区での係数算出結果

関数	年齢層	リファレンス郡 人口 *Pr* (人)	リファレンス郡 健康被害 *Ir* (件)	リファレンス郡 貨幣価値 *Vr* ($)	米国平均 *Vr/Ir* ($)	日本平均 *V/I* ($)	京都市中京区 濃度変化 ΔC (ppb)	京都市中京区 人口 *P* (人)	京都市中京区 健康被害 *I* (件)	京都市中京区 貨幣価値 *V* ($)	健康被害係数 *IM* (件/ppb/人)	貨幣価値係数 *VM* ($/ppb/人)
58	0 - 14	165,613	12.6	367,595	29,097	13,444	5.5	11,539	0.88	11,795	1.4E-05	0.19
59	15 - 64	624,838	58.1	1,695,028	29,108	13,449	5.5	71,558	6.65	89,428	1.7E-05	0.23
64	65 - 99	2,901	1.5	46,661	31,680	14,638	3.2	27,688	14.09	206,281	1.6E-04	2.35

樹木と住宅の距離，方角から樹木 1 本あたりの CO_2 排出量の変化 134.8 kg を得る。次に枝の枯死率を用いた調整係数 0.5 + （0.5×（100 – 7.5) / 100)=0.96 を乗じることで 129.7 kg と調整する。同様に暖房に関しては表-4 から得た-63.6 kg を調整し-61.2 kg となる。1950 年以前建築住宅は表-4 の値に 0.52（冷房），0.63（暖房）を乗じて，1950-80 年建築住宅は表-4 の値に 0.68（冷房），0.71（暖房）を乗じて断熱性能の差を調整する [14]。防風による暖房需要変化に伴う CO_2 排出量変化は表-5 より得られる樹木 1 本あたりの CO_2 排出量の変化 42.6 kg を枝の枯死率で調整し 41.0 kg となる。蒸散と建物の防風による冷暖房の需要変化に伴う CO_2 排出量変化は，中京区での樹木および建物 [8]の被覆率合計 59%を用いて，表-5 の被覆率 30%と 60%の値から補間した後に枯死率で調整し，それぞれ 12.6 kg, 5.5 kg を得る。暖房需要変化に伴う CO_2 排出量変化は，国内家庭部門でのエネルギー源比率 [22]（表-6）に応じて，例えば上記日除けによる CO_2 排出量変化 -61.2 kg は，電気（-30.9 kg），ガス（-12.7 kg），灯油（-10.7 kg），LPG（-6.9 kg）と，さらに表-6 に示すエネルギー源毎の CO_2 排出係数と価格に基づいて CO_2 排出量変化は消費エネルギー変化および貨幣価値に換算する（表-7）。

3.3.3　結果

中京区の平均住宅面積 68.9 m^2 を参考 [24]にフットプリント 100 m^2 以下の建物を 2 階建て以下の住宅として扱った。樹高および住宅との距離の制約により，街路樹 120 本が 508 件の住宅の冷暖房需要に影響した。これら樹木について，上記の計算を米国の 1950 年以前および 1980 年以降と同等の断熱性能の住宅について行い，それぞれ住宅数の比率 60.7%および 39.3%を掛け合わせた後に合算した結果，住宅の冷暖房費は年間約 5 万円の削減と推定された。

なお，従来は樹木測定時に近隣住宅が 2 階建て以下であるか目視により判断し，樹木と住宅の距離，方位の測定を行うが，今回これらは未測定であったため，GIS での解析によって導出した。この手法では住宅が 2 階建て以下であるかの判断について不確実性が高いため，算出結果は参考値として扱うべきである。従来通り住宅に関する測定を行っている場合には，今回以上の計算精度が期待できる。

表-3　建築年 1980 年以降の住宅の R 値から Q 値への変換

住宅部位	熱抵抗値 R (m^2K/W)	熱貫流率 U (W/m^2K)	面積 (m^2)	熱損失 (W/K)	熱損失係数 Q (W/m^2K)
壁	1.94	0.52	653.7	337.4	2.5
天井	4.75	0.21	205.5	43.2	
窓	0.40	2.50	24.5	61.3	
床	3.35	0.30	205.5	61.4	

表-6　エネルギー源の係数

	電気	ガス	灯油	LPG
エネルギー源 [22]	50.5%	20.8%	17.5%	11.2%
CO_2 排出係数	0.509[4)a]	53.70 [1)b]	71.53 [5)b]	62.25 [17)b]
価格	25[6)c]	3,705 [20)d]	2,662 [23)d]	7,382 [21)d]

a: kg-CO_2/kWh，b: kg-CO_2/MBTU，c: 円/kWh，d: 円/MBTU

表-7　住宅での冷暖房使用料の増減

空調種別		冷房	暖房			
エネルギー源		電気	電気	ガス	灯油	LPG
CO2 排出量変化 (kg)	日除け	129.7	-30.9	-12.7	-10.7	-6.9
	防風	0.0	20.7	8.5	7.2	4.6
	蒸散・防風	12.6	2.8	1.1	1.0	0.6
消費エネルギー変化 [a]	日除け	254.9	-60.7	-0.24	-0.15	-0.11
	防風	0.0	40.7	0.16	0.10	0.07
	蒸散・防風	24.7	5.48	0.02	0.01	0.01
貨幣価値（円）	日除け	6,291	-1,499	-878	-399	-813
	防風	0.0	1004	588	267	545
	蒸散・防風	609.7	135.2	79.3	36.0	73.4

a: 電気の単位は kWh，ガス・灯油・LPG の単位は MBTU

表-4　1980 年以降建築住宅からの方角毎の樹木の日除けによる冷暖房需要の変化に伴う樹木 1 本あたりの CO_2 排出量変化

気候区分	葉種別	樹高 (m)	樹木と住宅の距離 (m)	空調種別	日除けによる CO2 排出量変化 (kg) 北	北東	東	南東	南	南西	西	北西
南東	常緑	>10, <= 15	> 6, <= 12	冷房	0	0.8	48.8	9.2	13.5	25.5	134.8	8.8
				暖房	0	0	-38	-75.6	-148.6	-108.3	-63.6	-0.1

表-5　樹木の防風と樹木の蒸散および建物の防風による冷暖房需要の変化に伴う樹木 1 本あたりの CO2 排出量変化

気候区分	建築年代	葉種別	樹高 (m)	空調種別	防風による CO_2 排出量変化 (kg)	蒸散・防風による CO_2 排出量変化 (kg) 樹木+建物被覆率 10%	30%	60%
南東	1980 年以降	常緑	>10, <= 15	冷房		14.1	12.6	13.1
				暖房	42.6	59.7	17.9	5.3

4. まとめ

本研究により確立された Eco の医療費・冷暖房費削減モデルの国内向けカスタマイズ手法により，今後 Eco の国内他都市へのさらなる適用が期待できる。しかし，依然課題は存在する。本手法では国内都市との差異が最小となる米国の郡・都市をリファレンスとして利用しているが，場所によっては差異が大きくなり，解析結果の精度が低下する可能性がある。よって，国内の同様なモデルが利用できれば，その結果との比較検証が今後の課題である。

また，冷暖房費削減に関しては，元々のモデルの制約があり，3 階建て以上の住宅や業務系・商業系の高層ビル等への適用は不可能である。これを改善するには，McPherson ら[14] が米国において行ったのと同様に，日本国内における気候区分毎の代表都市についての詳細なフィールド実験，それらに基づいたモデル作成，さらにその検証が必要となり，相当な労力を要する。よって現状では，今回のカスタマイズ手法を用いることが得策と考える。将来的に樹木による医療費・冷暖房費削減モデルを国内のモデルで置き換えることが出来れば，より国内に適した樹木による生態系サービスの定量的評価が可能となる。

引用文献

1) Daigas Group. “都市ガス使用の場合の CO_2 排出量の算定” http://www.osakagas.co.jp/company/efforts/eco/co2/evaluation.html (参照: 2019 年 4 月 22 日).
2) 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.
3) 平林　聡・徳江義宏・伊藤　綾・Alexis Ellis・Robert Hoehn・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.
4) 環境省. “電気事業者別排出係数－平成 28 年度実績－” https://www.env.go.jp/press/files/jp/107786.pdf (参照: 2019 年 4 月 22 日).
5) 環境省. “燃料別の二酸化炭素排出量の例” https://www.env.go.jp/council/16pol-ear/y164-04/mat04.pdf (参照: 2019 年 5 月 30 日).
6) 関西電力. “料金単価” https://kepco.jp/ryokin/menu/dento_a (参照: 2018 年 8 月 6 日).
7) 気象庁. “過去の気象データ検索” http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php (参照: 2019 年 4 月 22 日).
8) 国土地理院. “基盤地図情報サイト” http://www.gsi.go.jp/kiban (参照: 2019 年 4 月 25 日).
9) 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 (参照: 2019 年 1 月 6 日).
10) 京都府. “平成 28 年京都府統計書 6-18.建築の時期別住宅数” http://www.pref.kyoto.jp/tokei/yearly/tokeisyo/ts2015/tokeisyo2015a0618.xls (参照: 2019 年 4 月 22 日).
11) 京都市. “京都市統計ポータル” http://www2.city.kyoto.lg.jp/sogo/toukei/ (参照: 2019 年 4 月 22 日).
12) 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.
13) McPherson, G. E. (2010) Selecting reference cities for i-Tree Streets. Arboriculture & Urban Forestry, 36(5): 230-240.
14) McPherson, G. E. and Simpson, J. R. (1999) Carbon dioxide reduction through urban forestry: guidelines for professional and volunteer tree planters. Pacific Southwest Research Station, Forest Service, U.S. Department of Agriculture, Albany, CA.
15) 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.
16) National Climatic Data Center. “Integrated surface database” https://www.ncdc.noaa.gov/isd (Accessed: 22-Apr-2019).
17) 日本 LP ガス協会. “CO_2 排出係数について” http://www.j-lpgas.gr.jp/nenten/co2.html (参照: 2019 年 4 月 22 日).
18) OECD. “Health spending” https://data.oecd.org/healthres/health-spending.htm php (Accessed: 22-Apr-2019).
19) OECD Better Life Index. “Income” http://www.oecdbetterlifeindex.org/topics/income/ (Accessed: 22-Apr-2019).
20) 大阪ガス. “一般料金” http://home.osakagas.co.jp/price/menu/general_rate/index.html (参照: 2018 年 8 月 31 日).
21) 石油情報センター. “一般小売価格 液化石油(LP)ガス 速報：毎月調査” http://oil-info.ieej.or.jp/price/price_ippan_lp_maitsuki.html (参照: 2018 年 8 月 31 日).
22) 資源エネルギー庁. “平成 25 年度エネルギーに関する年次報告(エネルギー白書 2014)” https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2014html/2-1-2.html (参照: 2019 年 4 月 23 日).
23) 資源エネルギー庁. “石油製品価格調査” https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/petroleum_and_lpgas/pl007/results.html (参照: 2019 年 4 月 22 日).
24) スマイティ. “京都の住宅面積ランキング” https://sumaity.com/town/ranking/kyoto/living/?page=2 (参照: 2019 年 5 月 29 日).
25) 遠山　仁 (2013) 省エネルギー基準の変遷と今後の法制化の動き. ニチアス技術時報, 360: 6-9.
26) United States Environmental Protection Agency. “Environmental Benefits Mapping and Analysis Program - Community Edition (BenMAP-CE)” https://www.epa.gov/benmap (Accessed: 22-Apr-2019).
27) United States Forest Service. “i-Tree”. http://www.itreetools.org (Accessed: 22-Apr-2019).

(2019 年 7 月 7 日受理)