

ヒートアイランド対策のための (都市涼化) モデル分析

佐藤 公敏[†]

1 ヒートアイランドとは何か

ヒートアイランドは「熱の島(*Heat Island*)」, またはフランス語で「熱の小島, 区画, 区域 (*Îlot de Chaleur*)」のことを言い, エネルギー消費の増大, 緑と水の激減等の理由にため, 地表がアスファルトやコンクリートに覆われた都市に発生する高温化現象である。等高線と類推した等温線で結ばれた形が周囲から浮き上がった島のように見えることから, 周辺より高温の地域をもそう呼ぶ。東京の大手町, 新宿, 池袋, 渋谷, 新橋等の, 面積が数平方キロメートルの高温の地域は, 熱の島と呼ぶに相応しい。今やヒートアイランドになりつつある都市は日本全国に点在しており, 日本はむしろ(ヒートアーキペラゴウ), 「熱列島(*Heat Archipelago*)」とも呼びうる。5月31日に気象庁が, 過去50年間の1月の各都市の平均気温の分析結果を発表した。それによると, 東京は50年で2.62, 日本の平均1.06, 札幌2.02, 仙台1.75, 京都1.64, 名古屋1.85, 下関1.76, 福岡1.79の気温上昇であった。

向都性向による安易で無秩序な人口増加とそれに伴う家と車の激増のせいで, 緑と水を急速に失いつつある巨大都市東京は現在, 空の太陽だけでなく【もう一つの太陽】が地表に存在していると言っても過言ではなく, 巨大な熱エネルギーを地表に蓄えていると言える。アスファルトとコンクリートは太陽熱を吸収し赤外線として放出して都市を暑くするのであるが, 東京にはこれらの地表面被覆がありすぎるからである。ヒートアイランドの原因は, 地表面被覆からの顕熱と人間の活動による排熱であり, 東京が大気に放熱する顕熱は, 1,721TJ(テラジュール)である。森山(2004)を参照されたい¹⁾。

ヒートアイランドという現象は, Howard(1833)という医者であった英国のアマチュア気象

[†] 日本ヒートアイランド学会副会長

1) 東京の近未来のシミュレーションは, Saitoh et al.(1996), Saitoh and Yamada(1999), (2000) ならびに(2001), 齋藤(1992), (1997), (2005), 齋藤他(2006)を参照されたい。また, ヒートアイランドに起因すると考えられる東京における近年の諸事象, ならびにそれに対処する種々の技術的(都市涼化)方法は, Sato(2006b)に列挙されている。顕熱とは, 温度上昇に与る熱のことである。

研究家が恐らく初めて計測したのであろう。彼は1807～1816年のロンドンの気候データに基づいて、都市の内外の気温差が3.7もあることを既に計算していた。この温度差を、「ヒートアイランド強度(*Heat Island Intensity*)」と呼ぶ。わが国でも、福井・和田(1941)による移動観測により、都心部と郊外の気温差が、戦前既に5あったことが報告されていた。鈴木(1995)には、大手町と八王子間の冬場の温度差を示す図がある。Yamashita(1988)も御参照いただきたい。

都市の大気は窒素、酸素、水素を初めとして、数種類の微量な温室効果ガス(*Greenhouse gases*: GHGs)である二酸化炭素(CO_2)、メタン(CH_4)、フロン(CFCs)、亜酸化窒素(N_2O)等で組成されている。これらの濃度の上昇が、地球温暖化(*Global Warming*)をもたらすものとして現在問題になっている。その解決のため、2005年2月16日に京都議定書が漸く発効した。

本研究では、二酸化炭素等の温室効果ガスを「ガス状属性(*gaseous attributes*)」と見なす。本研究で最も重要な熱も属性の一つである。熱と併せて「無体属性(*intangible attributes*)」と呼ぶことにするが、大気がこれらの属性の複合体(*complex*)であることを認識して、ヒートアイランドの分析を行う。大気の組成に関しては、Lansberg(1970)ならびに(1981)を参照されたい。なぜ、二酸化炭素もモデルに導入するかと言えば、地球温暖化が部分的にもたらす都市の昇温の影響も取り入れたいと考えたからである。

生産者は財を構成する「有体非ガス状属性(*tangible nongaseous attributes*)」ならびに、生産の際に副産物として発生する無体属性である熱とガスを結合生産すると考えられる。これらの属性は客観的で、都市にいるすべての経済主体にとって共通の公共財である。都市住民はどこに住み、どこで働いているかでその影響は異なるが、いずれにしても都市温暖化の影響を受ける。従ってヒートアイランドの分析には、公共財の最適供給量決定の理論が応用可能である。ここで、都市温暖化による種々の悪影響もすべて公共財と見なしうるのだが、地域的差異があるので、地域的公共財(*regional public goods*)と考えるのが妥当である²⁾。また、ヒートアイランドから受ける健康等のダメージは各人で異なるので、Sen(1985)の“functionings”の概念を導入して人々を差異化して議論する³⁾。

本研究では、都市熱汚染対策として屋上緑化と壁面緑化等によりヒートアイランドに対処するだけでなく、コンクリートだらけの無味乾燥な都市空間に潤いを持たせ、都心のあまりにも冷え切った人間関係を改善し、来るべき地震にも備えうる都市防災にも配慮し、親水という意味で子どもたちの情操教育にも重要な水と緑を都市に呼び戻し、都市再生のための(都市涼化)モデルを提示する。そのため、動植物種を「生物属性(*biological attributes*)」と見なして、単にヒートアイランド緩和のための緑化のみならず、鳥や昆虫、草花等の動植物が人々にもた

2) 「公共財」、「外部性」等の経済学の概念に関しては、佐藤(2007b)を参照されたい。

3) 以下で議論されるモデルは、地球温暖化の分析にも応用可能である。これについては、Sato(2000)、(2001)ならびに(2007a)を参照されたい。

らず便益も、同様に大きいものであることを認識しうるモデル分析を行う。

Sato(2008a)は、Gorman(1958/1980)ならびにLancaster(1966)による(新しい消費者理論(New Consumer Theory))を精緻化したDreze and Hagen(1978)の分析フレームワークならびにSenの潜在能力(Capability)アプローチを援用し、Laffont(1982)のdifferential methodを採用し、財の生産品質ならびに大気質の最適化のインセンティブを適切に与え、属性としての排熱を削減するためのヒートアイランド緩和のための課税・補助金システムを提示した。また、各街区ごとにヒートアイランドの測度として、Riemann和による重積分を援用した*Heat Island Integral*という概念を定義した。都市を(涼化)するためのヒートアイランド税ならびに補助金のスキームの下で、都市居住者が「幸福関数」を最大化するための条件を導出し、彼等の依頼で緑化を行うランドスケープ・ガードナーならびに、生産者であるオフィス、ホテル、製造業者、都市内農場等が利潤最大化をするための必要条件を導出した。

本稿はSato(2006a)および(2006b)のモデルをいくつかの点で拡張し、ランドスケープ・ガードナーにより植えられた樹木のCO₂固定量を明示的にモデルに導入して、より現実的なものにする。本論文の構成は以下の通りである。2章でモデルを提示し、必要な概念を説明する。3章で都市居住者、生産者ならびにランドスケープ・ガードナーの最適化条件、および(都市涼化)のためのヒートアイランド税ならびに補助金のスキームを提示する。

2 メトロポリスにおけるヒートアイランド

2.1 ヒートアイランド・モデル

本節では、Sato(2008a)のThe Attributes/Functionings Modelを導入する。Gorman-Lancasterian New Consumer Theoryでは、「すべての財は特性(characteristics)または属性(attributes)で構成される」と考える。以下では主に属性という用語を使用する。熱およびGHGsは「無体属性(*intangible attributes a la Gorman-Lancaster*)」であり、後のGHGsは「ガス状属性(*gaseous attributes*)」と見なしうる⁴⁾。Sato(2006a)では、都市温暖化の主因である熱も大気を構成する属性の1種と見なして分析を行い、ヒートアイランド・モデルを提示した。本稿では住宅やオフィス、工場等、民有地ならびに公有地の各街区に存在する、樹木植栽余地に植樹された木々により異なる年間CO₂固定量をモデルに導入し、ランドスケープ・ガードナーの緑化による(都市涼化)を更に具体的なものにする。

理論モデルとして、von Thünenの(孤立国)的な「気候的に閉じた都市」である単一中心的メトロポリス(Thünian monocentric metropolis)を仮定する。von Thünenモデルに関しては、Samuelson(1983)、ならびにHurriot(1994)が興味深い。ここでCavailhes等(2003)、

4) “characteristics”という概念は、Gormanにより導入されたものと考えられる。Gorman and Myles(1987)も参照せよ。

(2004)の「ペリアーバン(periurban)」という概念を導入する。彼らは都市を urban-periurban-rural と区分しており、periurban は、都心と田舎の中間の「都市辺縁」のことで、ヒートアイランドが問題になるのは田舎ではなく、アーバンとペリアーバンであり、都心と田舎という従来の区分ではないとの認識で、この概念を採用する。最近のフランスに関する彼らの調査では、periurban には都市内農場と都心へ通勤する居住者が混在している。

簡単化のため、本稿で都市はアーバンとペリアーバンの2地域のみで構成され、各ブロック $\beta \in \beta = \{1, \dots, B\}$ に分割され、ブロックのサイズは自由に選択可能であると仮定する。Cavailhes 等のモデルを拡張し、ペリアーバンには都市居住者と都市内農場以外に、製造業者およびランドスケープ・ガードナーが存在するものとする。アーバン地域である Central Business District(CBD)には、オフィス、ホテル、デパートならびに、劇場、図書館、美術館、コンサートホール、病院等の公共または民間の施設がある、以下では、上記のすべてと製造業者ならびに農場等を併せて企業または生産者と呼ぶことにする。地方自治体もサービスを提供する際、熱とガスを共に排出する生産者である。「気候的に閉じた」と言うのは、他地域からの気候的影響を受けない von Thünen の「孤立国」に見立てた(孤立都市 (The Isolated City a la Thünen))で、外部性が存在しないという便宜上の仮定である。しかし現実には、埼玉に発生する光化学スモッグは東京の気候の影響を受けていると言えるし、栃木に降る酸性雨は都心の自動車から排出される窒素酸化物と硫黄酸化物が原因であることが観測されている。

メトロポリスには N 人の居住者(residents)があり、各人を $i \in N = \{1, \dots, N\}$ で表現するが、ここで N はペリアーバンに住む居住者の集合である。 i は世帯(household)と考えてもよい。各人は財またはサービス j を消費する際、熱とガスを排出する。居住者は郊外生活をエンジョイし、CBD またはペリアーバン内の企業に通勤して働く。 $J = \{1, \dots, J\}$ を財ならびに企業の集合とし、簡単化のため、企業 j は財 j を生産するものとする。財は C 種類の「有体非ガス状属性(tangible nongaseous attributes)」, $c \in C = \{1, \dots, C\}$ の複合体(complex)であり、 C をその属性の集合とする。 q_{jc} は j 財 1 単位が含有する属性 c の量である。例えば、都市内農家が生産するトマトが持つ成分が有体非ガス状属性であり、自動車メーカーが作る乗用車のパーツもパソコンやテレビの部品も同様である。

都市居住者 i がランドスケープ・ガードナー ℓ に、土地の一部の緑化を $\sigma_{i\ell}(n_{i\ell})/m^3$ のコストで依頼するものとし、 $\Lambda = \{1, \dots, \Lambda\}$ をランドスケープ・ガードナーの集合とする。緑化の副産物としてもたらされる、ランドスケープ・ガードナー ℓ が緑化した $1 m^3$ に存在する動植物種 s の 1 個体の biomass を $q_{\ell s}$ としよう。すべての緑地面積は少なくとも 1 種類の生物属性 ℓ を保有すると仮定し、 $q_{\ell\ell} = 1$ と正規化する。ランドスケープ・ガードナー ℓ が植物を植えることにより、野生の動植物が繁殖するようになり、小動物、昆虫、鳥が来て、もし池も作られたとすれば水生生物も存在し、土壌には無数の微生物等もいる。 $S = \{1, \dots, S\}$ を生物属性(biological attributes)としての動植物種の集合とする。

x_{ij} は居住者 i の財 j の消費量, $A_{i\ell}$ はランドスケープ・ガードナー ℓ に緑化させる体積とすると, $x_i = (x_{i1}, \dots, x_{ij}, A_{i\ell})$ が個人 i の消費ベクトルとなる。

ゆえに都市居住者 i は, 彼/彼女の敷地内の緑地を専有することにより, 以下の通り, 生物属性を消費することができる。すなわち住民は樹木や花々, それに集まる鳥, 昆虫等を嫌いではなければ楽しむことができる。住民 i が消費可能な $A_{i\ell} m^3$ に存在する各動植物種の個体の biomass は

$$z_{is} = q_{\ell s} A_{i\ell}, \quad \forall i \in \mathbf{N}, \quad \forall s \in \mathbf{S}, \quad \forall \ell \in \Lambda \quad (1)$$

で与えられる。

メトロポリスの政府の任務は, *Urban heat island tax/subsidy scheme* を導入することにより, 都市温暖化を緩和することである。von Thünen モデルをヒートアイランドの分析のために現代風にアレンジした Non-Thünian Model を作るため, 以下の仮定を置く。

- H 1. 都市は必ずしも円形ではない異質的地域の複合体で, ブロックごとに気候が異なりうる。
- H 2. アーバンならびにペリアーバンの交通システムは, いかなる方向にも利用可能である。
- H 3. 都市の土地はすべて不在地主が所有している。
- H 4. ペリアーバンの居住者は, 都心部のオフィスやホテル, 病院や学校, 図書館や美術館等の公共または民間施設で働くか, 製造業, あるいはサービス業に従事するために通勤する。また, 生徒, 学生である居住者は, 交通機関を利用して通学する。
- H 5. ランドスケープ・ガードナーは, ペリアーバンにある居住者の土地の一部を依頼により緑化する。
- H 6. 製造業者は財を, 農場は農作物を生産し, アーバンならびにペリアーバンへ輸送し販売する。

仮定 H 1 は従来の都市経済学のものとは異なるが, ヒートアイランドの問題を取り扱うために必要である。Thünen Ring で表される同心円上の都市では, 土地の同質性の仮定により, 都心から等距離であれば同一地代であるという前提で議論がなされていた。それに対して本稿では, 等距離であっても土地ごとに気候的差異があるので, 必ずしも同一地代とは限らないと考えて同心円の仮定を外している。齋藤他(2006)は, 東京都心部の気温および放射が局地的な変化をしていることを明らかにしたが, 本稿ではブロックのサイズを自由に選択できる。一方, 仮定 H 2 と H 3 は都市経済学の常套的な仮定である。但し, Thünen にはペリアーバンという区分はない。仮定 H 5 は, 本研究の特徴的存在であるランドスケープ・ガードナーに関連している。

ところで都市の大気は, 生産ならびに消費活動で発生した熱とガスの無形属性の複合体である。 N_2 , O_2 , H_2 は定常的であると仮定するのが自然であるから, 本稿では熱および微量なガスの

量に焦点を置く。 j 財1単位を生産する際に、結合生産される g 番目のガス状属性であるガスの量を q_{jg} とし、排熱量を q_{jE} とする。 $q_{jE}x_j$ および $q_{jg}x_j$ は、生産者 j が x_j 単位の財 j を生産する際の排熱量もしくはガス排出量になる。例えば、企業(= j)としてのTOYOTAが、ハイブリッド車のPriusを10000台(= x_j)生産した時の排熱ならびに排ガス量である、ここで、 $G = \{C+1, \dots, C+G\}$ をガス状属性の集合とする。Dreze and Hagen(1978)と同様に、すべての財は少なくとも1つの属性を j を持ち、それにより他の属性の量を測ると仮定し、 $q_{jj} = 1$ と正規化する。これは命題2と3の証明の際の数学的要請である。

ランドスケープ・ガードナーもまた工作上、窒素肥料を使用したり、樹木を運搬したり、うっかり枯死させたりして熱とガスを排出する。 $q_{\ell E}, q_{\ell g} \geq 0, \forall g \in G$, はランドスケープ・ガードナー ℓ の熱とガスの単位排出量であり、 ℓ が $A_\ell m^3$ を緑化する際の排熱または排ガスの量は、各々 $q_{\ell E}A_\ell$ と $q_{\ell g}A_\ell, \forall g \in G$, である。例えば、ガードナー(= ℓ)が樹高3m, 胸高直径25cmの樹木10本(= A_ℓ)を植樹した時の排熱ならびに排ガス量である。ここで、 $A_\ell = \sum_{i \in N_\ell} A_{i\ell}$ はランドスケープ・ガードナー ℓ が緑化を依頼される総樹木量、 N_ℓ は ℓ に依頼する居住者の集合であり、 $\cup_{\ell \in \Lambda} N_\ell \subset N$ である。

2.2 ヒートアイランド・インテグラル

次の問題は、メトロポリスのヒートアイランドをいかに表現するかである。太陽熱に晒される人工建造物の屋上ならびに壁面、路地裏、樹冠、路上等の温度には、同一ブロックでも差異があるが、赤外線カメラやリモート・センシングにより、地表面被覆の温度差は容易に測定可能である。Sato(2006a)が提示した概念を以下に導入しよう。

M_β をブロック β の面積、 S_β をその水平面投影面積(level surface projection), すなわち太陽熱を受ける地表面被覆の面積とする。よりわかりやすく言えば、 M_β に存在する道路、樹木、ビルの屋上ならびに壁面等の展開面積が S_β であり、人工建造物である高層のコンクリートビルが多ければ多いほど M_β と S_β は乖離する。東京は今まさにそのような外れの都市再開発によるビル建設を行っていて、ヒートアイランドはますます加速化されるであろう。

u と w を座標軸、 $\tau_\beta(u, w)$ を S_β の表面温度、 $\alpha_\beta(u, w)$ を S_β の上空の大気温とし、Riemann和の概念を応用して、Heat Island Integralという概念を導入しよう。任意の $\beta \in \beta$ に対して、以下を定義しよう。

$$\mathbf{r}_\beta = \frac{1}{S_\beta} \left\{ \iint_{S_\beta} \tau_\beta(u, w) dudw - \iint_{M_\beta} \alpha_\beta(u, w) dudw \right\}. \quad (2)$$

言うまでもなく、 $\tau_\beta(u, w)$ ならびに $\alpha_\beta(u, w)$ は領域 S_β および M_β において連続かつコンパクトであるから上記の重積分は存在し、上式は次のように理解する。 $\mathbf{r}_\beta S_\beta = [S_\beta$ を底面とする熱量を表す体積] - $[M_\beta$ を底面とする熱量を表す体積]である。 \mathbf{r}_β は経済主体の人為

的な排熱ではなく、メトロポリスの地表面被覆の熱の測度であり、 Υ_β はブロック β の 1 m^2 のヒートアイランドの強さを測るものである。大気温よりもコンクリートやアスファルトの温度が高いことは、夏場によくあることである。というのは、前述の通り、いずれの素材も太陽熱を吸収し蓄熱するからである⁵⁾。図で説明しよう。 M_β のすべての地点で大気温よりも地表面

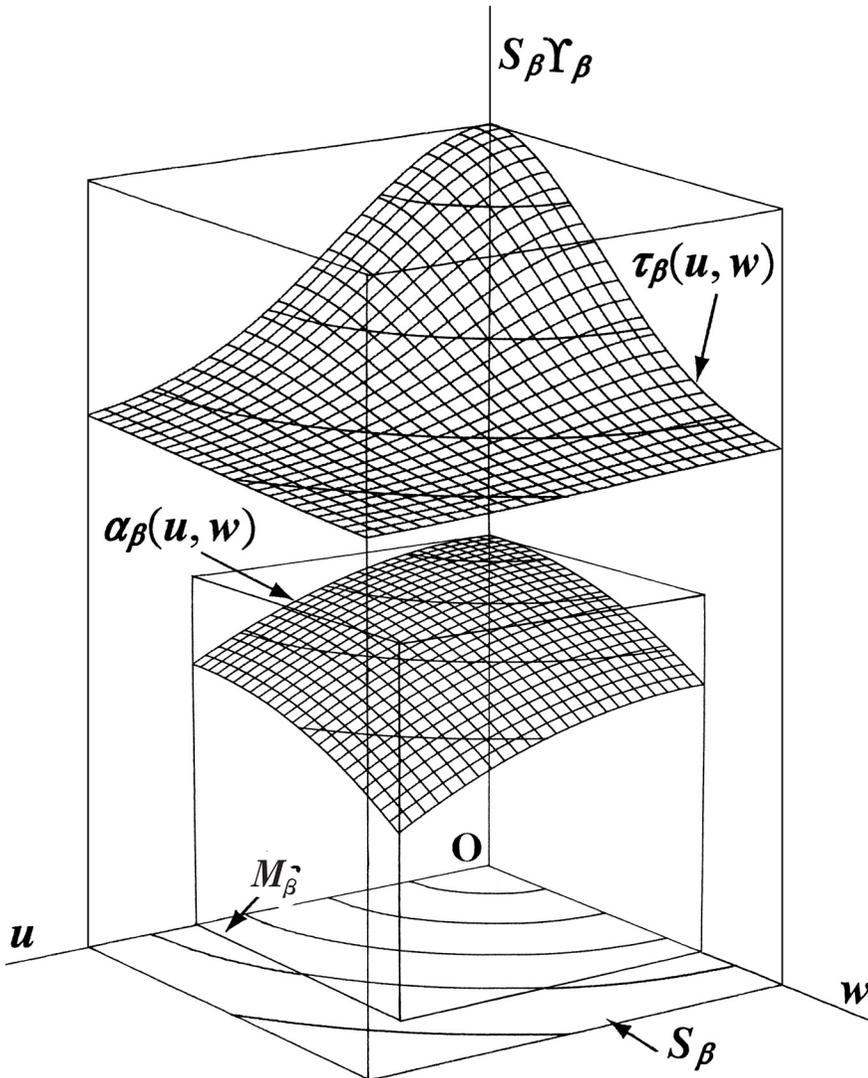


図1 Heat Island Integral のイメージ

5) コンクリートの表面温度抑制のための高アルベド塗料に関する研究は、平野他(2004)を参照されたい。

の気温が高くなっている例である。ヒートアイランド・インテグラルは、 S_β を底面とする体積が、 A_β を底面とする体積より大きければ大きいほど、ヒートアイランドが強いことを意味する⁶⁾。

具体例を挙げよう。2002年6月6日14:00、新宿では気温が27.5 であったが、コンクリートのビルで38、アスファルトの道路で45、路地裏で42を観測した場所があった。新宿の中心部は $M_\beta = 4\text{km}^2$ であるが、 $S_\beta = 9.3\text{km}^2$ と2倍以上の面積になり、後者の面積が太陽熱に晒されているのである。リモート・センシングにより $\tau_\beta(\cdot)$ と $\alpha_\beta(\cdot)$ も測定可能であり、新宿のすべての地表面温度を測定し、上式に数値を代入することにより Υ_β も算定可能である。

次式を提案しよう。ブロック β の顕熱フラックス(流量)[*Sensible Heat Flux*(ε_β)] = *Heat Island Integral*(Υ_β) \times 対流熱伝導率[*Convective Heat Conductivity*(κ)], $\forall \beta \in \beta$, ここで κ の値は温度により可変である, $\Upsilon_\beta > 0$, $\forall \beta \in \beta$, のときは、ブロック β を *Heat Island* と言い, $\Upsilon_\beta \leq 0$, $\forall \beta \in \beta$, のときは、ブロック β を「*Cool Island* (涼の島)」と言うことにしよう。例として皇居、明治神宮、ならびに新宿御苑は周辺より涼しい涼の島と呼びうる場所である⁷⁾。武蔵大学や学習院大学、目白大学のように、都心にあっても自然環境に恵まれている大学も涼の島と呼んでよい。夏場にこれらの大学を訪れると、正門を入るとすぐに体感温度が明らかに下がるのが実感できる。逆に、校舎が建て込み、既にヒートアイランドの様相を呈しつつある大学も残念ながら存在し、両者の環境アメニティの差は今後ますます大きくなるであろう。学び舎としての良好な自然環境の確保のためにも早急に改善が望まれる。学校ビオトープと比較して、巨木が1本あるだけでも、校内環境は大きく異なるという興味深い研究がある[野上・嶽山(2005)]。一方、川は上記のいずれの場所よりも涼しいことが多い。キャンパスに川や池を持つ上記の大学も同様に涼しい。今後は大学でもヒートアイランド対策は必須である。既に大学を凌ぐ対策を開始している小中高の学校の事例はいくらでもあるのである。

或る日、新宿の中心部で顕熱フラックスが $300\text{W}/\text{m}^2$ 、新宿御苑では $200\text{W}/\text{m}^2$ が環境省により測定された。新宿御苑のユリノキ(tulip tree)には、1本で160台の家庭用エアコンの冷却効果に匹敵するものもあると言う。新宿御苑を観測した成田他(2004)は、「日中の緑地において体感される涼しさは、気温差によるものではなく、放射環境による差異であることを定量的に示した」。彼等は、ヒートアイランド対策効果の評価で重要となる熱収支パラメータ、「蒸発効率」を算定し、緑陰内外の温熱環境を比較したところ、日中の純粋な気温差は1に満たないことを突き止めた。成田他(2004)の図5「芝生面における熱収支測定結果」には、顕熱フラックス等のグラフがある。また、平均放射温度は樹林地では気温とほぼ同等であるが、芝生地、アスファルト面では気温より遥かに高くなっていることも彼らの図11から読み取れる。本條他

6) 作図にあたり、Truchon(1987)のFIGURE 7.7および8.7を使用した。

7) 明治神宮に関しては、神田他(1997)を参照されたい。

(2000)も参照していただきたい。

2.3 都市における植栽および水

上で具体的に確認したように、都市を涼化する重要な働きをする植栽、ならびに水について本節では考察しよう。 L_i, L_j および L_ℓ を、居住者 i 、生産者 j 、ランドスケープ・ガードナー ℓ の、不在地主からの借地面積とする。ヒートアイランド緩和のためその一部の緑化を促したいのであるが、例えば東京では、新築または改築の建造物の屋上の少なくとも20%の緑化を義務付けている。都市内農場ならびにランドスケープ・ガードナーは工作上、緑化活動をしているとみなしうるので、自宅の緑化の義務は免除されているものとする。

オフィス、ホテル、デパートならびに製造業等の企業の緑地担当部門も同様に、 $A_j m^3$ の植林を $\sigma_j(A_j)/m^2$ のコストで緑化をするものとしよう。ここで、樹木の本数のベクトルを $n_j = (n_{j1}, \dots, n_{jT})$ としよう。 J_r は緑化をする生産者の集合であり、 $J_r \subset J$ である。また、 A_β を各街区において公共事業により整備された街路樹ならびに芝生緑地帯の樹木量とし、 $\Gamma_\beta(A_\beta)$ をそのためのコストとする。これらの樹木量を総和すると

$$A = \sum_{i \in N_\ell} \sum_{\ell \in \Lambda} A_{i\ell} + \sum_{j \in J_r} A_j + \sum_{\beta \in \beta} A_\beta \quad (3)$$

になる。「消費外部性」として、通行人が他人の家の生垣や植栽、または公園の美しい景観を楽しむことができ、子供たちもあちらこちらにある地元の小さな公園、学校の里山やピオトープで遊ぶことができる。これらの緑地は「都市アメニティ」と見なすことができ、一部は「クラブ財」か「排除可能な公共財」の場合もある。子供たちの想像力や感受性を養うには大切な「価値欲求財(merit wants)」でもある。

次に、樹種により異なるCO₂固定量をモデルに導入する。各樹種を γ 、樹種の集合を $T = \{1, \dots, T\}$ 、 $z_{\gamma g}$ を樹種 γ のCO₂固定量(kg)、 V_γ を樹種ごとに異なる係数、 d_γ を胸高直径(cm)、 ρ_γ をそれに関する係数、 v_γ を決定係数とすると、一般に

$$z_{\gamma g} = V_\gamma d_\gamma^{\rho_\gamma}, R^2 = v_\gamma, \forall \gamma \in T \quad (4)$$

であることが知られている。上式の数値は樹種により異なり、藤原(2004)によれば、最も決定係数の大きい銀杏は、 $z_{\gamma g} = 0.005 d_\gamma^{2.496}$ 、 $R^2 = 0.957$ 、小澤他(2005)によれば、白樫は、 $z_{\gamma g} = 0.6059 d_\gamma^{2.1225}$ 、 $R^2 = 0.9133$ である。彼等の算出によると、樹高4.5m、胸高直径25cmの白樫が25年生であると仮定した場合、 $z_{\gamma g}$ は約30 kg CO₂/年・本となる。道路緑化に焦点を当てた彼等の結果は以下の通りである。すなわち、幅10m、延長100m、上下線2本の盛土法面に白樫が植えられている場合、約1,500本/haの植栽密度で、約40t CO₂/年・haのCO₂固定量になるという。ここで固定量は、ロジスティック関数を考えており、時間の関数である。

本稿ではそれぞれの木の樹高を h_γ , n_γ を木の本数としよう。樹高4.5m, 胸高直径25cm を各々 $h_\gamma = 1$, $d_\gamma = 1$ と正規化し, 他の樹高ならびに胸高直径を持つ木, n_γ 本のCO₂固定量を以下のように換算する。

$$z_{\gamma g} h_\gamma d_\gamma n_\gamma = V_\gamma d_\gamma^{2r} h_\gamma d_\gamma n_\gamma, R^2 = v_\gamma, \forall \gamma \in \mathbf{T}. \quad (5)$$

以下では, これから植栽される樹木のためのCO₂固定量を考慮する。

藤原によれば, 東京都豊島区には約18万本の樹木植栽余地があり, これを5年間で植栽すると, 5年後には年間固定量998t CO₂が期待され, 屋上緑化が最も大きいCO₂固定量を示したという。近年の少子化により, 足立区では小学校等の公共施設の20%以上も使用されなくなっていると報道された。従って, その跡地の一部でも緑化することはヒートアイランド緩和につながる。大都市の市区町村の樹木植栽余地を早急に調査し, 植栽を開始すべきである。緑化の効果は単にヒートアイランド対策というだけではなく, 防音, 防災, 心身面の多方面に価値を持つからである。

次に, 樹木によるCO₂固定量の総量を表現してみよう。住民 i がランドスケープ・ガードナー ℓ に植栽を依頼する樹種 γ の本数を $n_{i\ell\gamma}$, 生産者が依頼する γ の本数を $n_{j\ell\gamma}$, 公共事業による植栽本数を $n_{\beta\gamma}$ としよう。都市居住者と生産者が ℓ に依頼した緑化ならびに, 公共事業としての緑化により植栽されたすべての樹種によるCO₂固定量は

$$\sum_{\gamma \in \mathbf{T}} z_{\gamma g} h_\gamma d_\gamma n_\gamma = \sum_{\gamma \in \mathbf{T}} z_{\gamma g} h_\gamma d_\gamma \left\{ \sum_{i \in \mathbf{N}_\ell} \sum_{\ell \in \mathbf{A}} n_{i\ell\gamma} + \sum_{j \in \mathbf{J}_\ell} n_{j\ell\gamma} + \sum_{\beta \in \mathbf{B}} n_{\beta\gamma} \right\} \quad (6)$$

であり, ランドスケープ・ガードナーは, 緑化計画書ならびに実施書を政府に提出する義務を負う。これは, ヒートアイランド補助金額を決定する際に重要である。補助金の支給は, 「ヒートアイランド対策緑化条例」とでも言うべきものが施行された後の緑化を対象とする。

緑地があるお蔭で飛来した蝶やトンボ等の昆虫, ならびに雀や鶯等の鳥をも s で表現するものと考え, ビオトープに生息する水生昆虫ならびに水生動植物も表す。自宅以外の緑地で個人が楽しめる動植物種 s も存在する。一般開放されている緑地の場合, 消費外部性の典型例であり, これに関して住民は対価の支払いをする必要はないが, 有料の公園などでは自然を享受するための入場料が必要である。蚊やカラス, および外来種の植物等, 人々にとって害になる動植物を除けば, 季節の美しい花々等が益になることは大いにありうる。ヒートアイランドに起因する昆虫の害に関しては稿を改めて論ずる⁸⁾。

植物はまさに「水の塊」というべきもので, 植物があることと水があることはほぼ同義であ

8) Sato(2008b)は, 都市温暖化ならびにヒートアイランドに帰因するバイオハザード(生物災害)ならびに健康リスクを事例を用いて分析している。

る。住宅地よりも近くの菜園の方が10%も低い練馬区の例も報告されている。植物は気孔で蒸散を行い、木々を通る風や川面を吹く風は、人工被覆のコンクリートやアスファルトを吹く風よりも涼しい。（水と緑と風の三位一体のコラボレーション）、ならびに人口規模の適正化（すなわち、土地面積に相応しい人口）が、都市冷却には必要不可欠である。混雑は私たちに何一つ良いものをもたらさないからである。

メトロポリスに存在する自然の水量も都市を冷却するためには欠かせない重要なものである。したがって、暗渠化している河川を開渠化し復活させなければならない。 W を自然が与えるメトロポリスの総水量（供給量）、 W_β は $\Omega_\beta(W_\beta)$ のコストで公共事業が回復させるブロック β における水量としよう。例えば、開渠化された河川の水量ならびに、道路の透水性舗装による保水量であるとする、都市内の総自然水量は

$$W = \sum_{i \in N} W_i + \sum_{j \in J} W_j + \sum_{\ell \in A} W_\ell + \sum_{\beta \in \beta} W_\beta \quad (7)$$

で与えられる。ペリアーバンの林や森の伐採等により保水量自体減少しうが、 W_i は住民の庭にある池の水、井戸水、タンクに貯水した雨水等が挙げられる。また、緑化等のため住民の庭に散水される雨水を含む水の量である。 W_j は各企業の敷地内緑化のため使用される雨水、工場内の池や小川の水量、ならびに都市内農場の水田の保水量、牛舎の冷却のために必要とされる水量である。また、 W_ℓ は各ランドスケープ・ガードナーが植物を栽培させるために利用する水量である。住民が庭木に水やりをする際、雨が降れば使用する水道量は少なくてすむ。したがって両者は補完関係にある。

植物がある地下には水が存在し、植物自体も保水しているわけであるから、緑地における植栽量と水量が多いほど都市は涼しくなる。いずれも地域的公共財で、他のブロックにその（涼化）の便益が外部性またはスピルオーバーとして及ぶ。緑化で重要なことの一つに、給水とその採算の問題がある。本研究では植栽に焦点を置いて分析を行い、都市の水管理の分析は他の研究で行った⁹⁾。

2.4 都市温暖化関数

都市居住者 i の時間を「価値尺度属性」という意味で（ニューメレール(numeraire)属性) z_{i0} とし、彼または彼女はこの属性の利用により、財ならびに緑地を構成している属性を消費すると考える。換言すれば、何を消費するにも時間がかかり、時間を使って得た収入で財を購入し、その財の持つ属性を消費者が消費できることを意味する。時間という視点は従来の経済学ではベッカー等の例外を除いて欠落している。

9) Sato(2006b)は、より詳細な都市内の水をモデルに導入している。

個人 i が消費する財ならびに大気を構成する属性の量を以下のように表現しよう。非ガス状属性ならびにガス状属性の消費量は以下の通りである。

$$z_{ic} = \sum_{j \in J} q_{jc} x_{ij}, \quad \forall c \in C \quad (8)$$

$$z_g = \sum_{j \in J} q_{jg} \sum_{i \in N} x_{ij} + \sum_{\ell \in \Lambda} \sum_{j \in J_r} q_{jg} A_j + \sum_{\ell \in \Lambda} q_{\ell g} \sum_{i \in N_\ell} A_{i\ell} \\ + \sum_{\ell \in \Lambda} \sum_{i \in N_\ell} q_{ig} \sum_{j \in J} x_{ij} + \sum_{\ell \in \Lambda} \sum_{i \in N_\ell} q_{ig} A_{i\ell} - \chi_g \sum_{\gamma \in T} z_{\gamma g} h_\gamma d_\gamma n_\gamma \quad (9)$$

$$\chi_g = 1 \text{ if } g = \text{CO}_2 \text{ and } \chi_g = 0, \quad \forall g \in G - \{\text{CO}_2\}.$$

上式で z_{ic} はすべての財 x_{ij} 単位の含有する属性 c の量であり、 z_g はすべての生産者、ランドスケープ・ガードナーならびに、居住者が排出する g 番目のガス状属性の総量である。 z_g の式の右辺第1項および第2項は生産者の財の生産ならびに緑化の際の排ガス量、第3項はランドスケープ・ガードナーの緑化の際の排ガス量、第4項、第5項は居住者の財ならびに緑地の消費の際の排ガス量である。第6項はガスが CO_2 である場合の樹木による固定量である。 z_g , $\forall g \in G$, の値はトン単位で測定可能である。因みに東京都の CO_2 排出量は日本全体の2分の1にも達し、2003年4月～2004年3月の1年間で、過去32年間で最高の6,700万 $t \text{ CO}_2$ であった。オフィスならびにホテルから33%、自家用車、船舶等の運輸部門が32%、家庭からの排出が24%増加した。都では大規模オフィスの CO_2 削減計画を強化することにした。

ヒートアイランドはまさに地域的公共財の恰好の例である。財から属性へ変換する上記の2式を、(属性利用可能性関数 (*attributes availability functions*)) と呼ぼう。すなわち、各消費者が財を消費することにより、最終的に属性を消費していることになる。各財の任意の属性の量は客観的で、すべての消費者に共通のパラメータで公共財であるので、居住者は品質を所与とした“quality taker”として行動し、 x_{ij} ならびに $A_{i\ell}$ の消費を通じて、 z_{ic} , z_{ig} および z_{is} の消費の最適化を行う。生産者とランドスケープ・ガードナーのみが、財または緑地を構成する属性のコンビネーションの変更によりその生産品質を変えることができる。

ところで、ガスの排出総量の一部、 $\eta_g z_g$ ($0 < \eta_g < 1, \forall g \in G$) が都市大気に留まり、残りの $(1 - \eta_g) z_g$ が消散することが観察されている。ここで、海洋と樹木が吸収する CO_2 の量が消散量に一致すると仮定すると、 $(1 - \eta_g) z_g = \chi_g \sum_{\gamma \in T} z_{\gamma g} h_\gamma d_\gamma n_\gamma$ である。ガス g の消散率ないしは寿命の逆数を λ_g ($0 < \lambda_g < \eta_g, \forall g \in G$) とすると、都市大気に残留する g 番目のガスは $(\eta_g - \lambda_g) z_g, \forall g \in G$ で表される。 θ_g をガス g の存在量 (ton/year) から濃度 (ppmv) への変換パラメータとし、 $z_g(\gamma)$ を時点 γ の g 番目のガスの量とすると、時点 t_0 から t 迄に蓄積されたガスの濃度は

$$\zeta_g^t = \int_{t_0}^t \theta_g (\eta_g - \lambda_g) z_g(\gamma) d\gamma, \quad \forall g \in G \quad (10)$$

と記される。これ以降、時間変数 t は省略する。

GHGs の濃度のベクトルは

$$\mathbf{Z} = (\zeta_1, \dots, \zeta_G) \quad (11)$$

と表現でき、これがペリアーバン・メトロポリスにいるすべての居住者ならびに生産者に影響を及ぼす。

ところで、地表面被覆からの顕熱流束 (*Sensible heat flux*) は以下のように表現される。

$$\sum_{\beta \in \beta} \varepsilon_{\beta} = \kappa \sum_{\beta \in \beta} \Upsilon_{\beta}. \quad (12)$$

この関数は緑地 A および保水量 W に依存するが、 A と W の2つの変数が地表面被覆を冷却することによりヒートアイランド・インテグラル Υ_{β} の値を低下させる。

$\varepsilon_i, \varepsilon_j$ ならびに ε_{ℓ} を居住者 i , 生産者 j , ランドスケープ・ガードナー ℓ の排熱量としよう。これらはいずれも A と W の関数である。メトロポリスのすべての経済主体に影響を及ぼす総排熱 E は以下で表現できる。

$$E = \sum_{i \in \mathbf{N}} \varepsilon_i + \sum_{j \in \mathbf{J}} \varepsilon_j + \sum_{\ell \in \Lambda} \varepsilon_{\ell} + \sum_{\beta \in \beta} \varepsilon_{\beta}. \quad (13)$$

最初の3項は各々、居住者、生産者、およびランドスケープ・ガードナーによる人為的な排熱で、最終項は各ブロックの地表面被覆から生ずる顕熱である。この式は植栽のある緑地ならびに水量に依存するので次の仮定を置く。

仮定1. 関数 E は凹かつ C^2 級であり、 $\partial E / \partial A < 0, \partial E / \partial W < 0, \partial^2 E / \partial A^2 < 0, \partial^2 E / \partial W^2 < 0$ である。

ヒートアイランドは都市温暖化と地球温暖化が相俟って生じていると考えられる。総排熱ならびにストックとしての GHGs の濃度が都市温暖化を決定するので、以下の関数を（都市温暖化関数）とする。

$$U = U(\mathbf{E}, \mathbf{Z}). \quad (14)$$

ここで e は、メトロポリスの任意の排熱者 (emitter) に付される一般的なインデックスである。

仮定2. 関数 U は凹かつ C^2 級の関数であり、 $\partial U / \partial \varepsilon_e > 0, \forall e \in \mathbf{N} \cup \mathbf{J} \cup \Lambda, \partial U / \partial \varepsilon_{\beta} > 0, \forall \beta \in \beta$ かつ $\partial U / \partial \zeta_g \geq 0, \forall g \in G$ である。

都市居住者は財を消費する際に熱とガスを排出する。したがって、熱もガスも財ならびに緑化サービスの消費および生産活動から発生し、メトロポリスのすべての主体にとって共通の公共財である。各居住者は自分だけではなく他のすべての主体の排出量をも消費させられることになるからである、したがって、都市居住者の熱の消費量は全員に共通であり、上記の式は更に詳細に以下で与えられる。

$$z_E \equiv E = \sum_{j \in J} q_{jE} \sum_{i \in N} x_{ij} + \sum_{j \in J_r} q_{jE} A_j + \sum_{\ell \in \Lambda} q_{\ell E} \sum_{i \in N_\ell} A_{i\ell} + \sum_{\ell \in \Lambda} \sum_{i \in N_\ell} q_{iE} \sum_{j \in J} x_{ij} + \sum_{\ell \in \Lambda} \sum_{i \in N_\ell} q_{iE} A_{i\ell} + \sum_{\beta \in \beta} \varepsilon_\beta. \quad (15)$$

都市温暖化は或る地域内で非競合的かつ非排除可能な局所的公共財(local public good)の典型例であることは疑う余地がないのだが、その影響も同様である。なぜなら各経済主体の地理的条件によりその影響は千差万別であり、居住地ならびに勤務地の街区によって当然異なりうるからである。次節では居住者についてまず見てみよう。

2.5 ヒートアイランドの影響下にあるペリアーバンの居住者の functionings

Gorman-Lancasterian Attributes Theory は、特に大気のように完全にガス状属性としての組成成分に分解可能な財の分析に適している。属性利用可能性関数はすべての人に適用するが、各居住者の身体的特徴、物理的ならびに居場所の気候的条件は異なるので、個人の差異が表現可能な、“functionings”を導入しなければならない。functionings は Sen(1985)の Capability Theory の重要な概念の一つで、人はこれらを使って属性の消費を行う。「機能」と訳されるが、それより広い概念であると思われるので原語のまま表記する。消費者の行為はすべてこの概念で表現可能であると以下では考える。例えば消費者はパソコン、プリンター、ファックス、エアコンを使用し、車を運転し、料理をする。テレビを見、音楽を聴き、スーパーやコンビニで買い物をして、大型冷蔵庫に冷凍食品を入れる。これらすべては functionings と呼ぶうるものである。したがって都市居住者は functionings を使うことにより、熱とガス(GHG)を排出する。最近では、パソコンやクーラーを24時間つけっぱなしで、待機電力を使用し、夜も大気に放熱している個人がいるし、オフィスがある。このような行為や待機電力の使用は、かなりのCO₂を排出することが観測されている。

ここで忘れてならない事実は、上記の多くの functionings が、日々の生活の目の利益と利便性、快楽ならびに物質的快適さを優先するがあまり、心身を心地よく保つというような他の functionings に悪影響を与えているということである。すなわち、functionings の利用可能性には個人差があるが、優先順位が異なることを意味している。ヒートアイランドはまさにそれが原因で生じたと言える。近視眼的かつ短絡的思考に陥りがちな人間のメンタリティこそが、この問題の最大の原因であると言ってよい。ヒートアイランドによる蒸暑の最大の被害者

は都市生活者であるが、同時にまた最大の加害者でもあるという事実を忘れてはならない。

例えば体内の2～3%の脱水症状で【熱中症(*Hypertermia*)】になるが、これは文字通り、「熱に中(あた)る」ということで、【暑気中(り)】に含まれる。古くは、^{えつびょう} 暈病、^{かくらん} 霍乱と言った。人が熱中症になりやすい環境は27℃以上、湿度70%以上の、風がなく日差しが強い時で、体温が上昇して汗を掻いて脱水し、だるさ、疲労感、めまい、吐き気、意識混濁等の症状が現れる。血圧を保つために脳が汗を止めるため、体内の熱を外に出せなくなった状態で意識障害が起こり、通常は丸い形の血小板が変化して突起が出て血栓になる。2005年7月27日には、1都5府県で42人の救急車による搬送者が出たが、26日現在で262人が熱中症と診断された。熱中症になるというのも functioning の一つである。心筋梗塞も脳梗塞も夏場に多い。

これから夏場は「衣服気候」にも十分注意しなければならない。通気性ならびに吸湿性のよい素材で、熱を吸収しにくい白がよく、有害な紫外線を避けるため、屋外では帽子とサングラス、サンバイザーが必須になってくる。また、気温が30℃の日に子どもの顔は38℃、犬などのペットは40℃、路上のアスファルトは55℃になりうるというデータも気象庁により公表されている。真夏の炎天下での行動の仕方(水分補給等)にも十分気をつけなければならない。これらの行動も医学的知識もすべて functioning と考えてよい。

都市を熱くする functionings ばかりではなく、涼しくする functionings も存在する。屋上緑化、壁面緑化やガーデニング、雨水や井戸水を路上や屋上に散水するの一例である。一般に熱の20～30%は窓から流入し、その10%が流出するので、部屋に熱を入れず熱を出さない工夫も必要である。例えば紫外線カット率も高く、エアコンの電気代を節約できる遮熱ガラス、表面がステンレス層できている光反射生地¹⁰⁾の遮熱カーテン、チタン粒子を使用して作られた、窓に貼る遮熱用 UV カットフィルム、日射熱をカットするサンシェード、ベランダの直射熱と照り返しをカットする庇やブラインド、自然の風を模倣しうる最新の高性能扇風機等を使用するのも良い方法である。今や昔ながらの簾は、現在の蒸し暑さには全く役に立たないのが事実である。それに反して、胡瓜、南瓜、糸瓜、苦瓜のような蔓性の植物を、ベランダの、例えば10cm角のメッシュのネットに繁茂させると、日差しを約8割もカットし、クーラーも不要になるという、東京都練馬区のある家庭での体験談も報告されている。この方法は、クーラーのように室内の冷却が同時に屋外への排熱に直結しないという画期的なものである。これは今後大いに一般に普及させるべき方法である。都市住民が快適に過ごすための知識と意識を持って行動することも、重要な functionings である。人がやらなくても、蒸し暑い夏に自分が涼しく過ごし、戸外に排熱しないために個人的にできることは沢山あり、あとは意欲と知識があればよいのである。そのためにも学校教育、セミナー、マスコミ等、一般に周知させるべき手立てが是が非でも必要となる¹⁰⁾。

次に、ベクトルをそれぞれ $z_i^C = (z_{i1}, \dots, z_{iC})$, $z_i^G = (z_{iC+1}, \dots, z_{iC+G})$, $z_i^S = (z_{iC+G+1}, \dots,$

10) 佐藤(2007a)および(2007c)を参照されたい。

z_{iC+G+S}) であるとしよう。すると、都市居住者 i の消費ベクトルは以下で与えられる。

$$z_i = (z_{i0}, z_i^C, z_i^G, z_i^S, z_E). \quad (16)$$

緑地に存在するのは生物属性である植物と、そこに飛来したり生息している生物の複合体であると言える。植栽 A と水量 W は都市を冷やすだけでなく、味気ない都市生活に潤いを与えて心を癒してくれるし、人々の心にゆとりを与えて人間関係も豊かにしうる。それゆえ、都市住民 i の属性の消費ベクトルにどちらも公共財として入ってくるのである。

Sen と異なり、居住者の「ありよう (beings)」は、functioning のベクトルで生成すると考えよう。 b_i を居住者 i の functioning のベクトルとし、住民 i の functioning の集合を K_i とする。言うまでもなく、functioning の総数 K_i は個人により異なる。彼/彼女は functioning, $f_{ik}, \forall k = 1, \dots, K_i \in K_i$, のベクトル $(f_{i1}, \dots, f_{iK_i})$ を選択することにより being が決まる。

都市居住者 i のありよう (being) は

$$b_i = (f_{i1}(z_i, U), \dots, f_{iK_i}(z_i, U)) \quad (17)$$

で表され、 K_i は住民 i の個人的特徴 (体力等) ならびに、彼/彼女が住み、または働くブロックに大きく依存する。それゆえ以下の仮定が必要となる。

仮定 3. 都市居住者 i の任意の functioning, $k \in K_i$ に対して、 f_{ik} が閉凸消費集合 M_i 上で凹かつ C^2 級である。

都市温暖化を分析するために本稿で Attributes/Functionings Approach を選択した最も大きな理由は、ヒートアイランドの最大の被害者であると同時に加害者であるのが都市居住者であり、彼等の行為としての被害と加害を明示的にモデルに取り入れるのが可能なことにある。従来の効用関数理論では、財の消費数量のみが重要で消費者の行為が隠伏的であるため、それが不可能であることに注意したい。

2.6 都市居住者の Happiness Function と Personal Well-Being の評価

都市居住者 i は都市に住むことにより、各人各様の幸せを持っていると考えられる。Happiness Function は彼/彼女の being に依存すると考えられるので、以下のように表される。

$$H_i = H_i(b_i(z_i, U)). \quad (18)$$

都市住民 i は numeraire 属性と functionings を利用して属性を消費することにより、ある being を獲得し自らの幸福を得ることができる。そのために、以下の微分可能性の仮定を置く。

仮定4. 都市居住者 i にとって, H_i は厳密に擬凹かつ C^2 級で, 少なくとも1つの $k \in K_i$ に対して $(\partial H_i / \partial f_{ik})(\partial f_{ik} / \partial z_{i0}) \neq 0$ である。

numeraire 属性 z_{i0} の変化は, 居住者 i の少なくとも1つの functioning を変化させる。すなわち時間 z_{i0} を使い, functioning を利用することにより, 個人 i の幸福が変化するものとする。 $\partial f_{ik} / \partial z_{ic}$ ならびに $\partial^2 f_{ik} / \partial z_{ic}^2$ は, 属性 c が個人 i にとって良いか, 無関係か, 悪いかで変化し, $\{+, 0, -\}$ のいずれかの符号になる。もし c が熱であれば, 真夏の暑苦しさや寝苦しさを経験した多くの個人がマイナスの評価をするかもしれないので, $\partial f_{ik} / \partial z_{iE} < 0$, $\partial^2 f_{ik} / \partial z_{iE}^2 < 0$ であると考えてよい。しかし, 夏の暑さが好きで海に行きたくて人にとっては, $\partial f_{ik} / \partial z_{iE} > 0$, $\partial^2 f_{ik} / \partial z_{iE}^2 > 0$ であるかもしれない。また, 夏が好きでもあまりに暑くなりすぎるのは困るという人にとっては, ある閾値 $\hat{E} \geq E$ の E に対して, $\partial f_{ik} / \partial z_{iE} > 0$, $\partial^2 f_{ik} / \partial z_{iE}^2 > 0$, $\partial f_{ik} / \partial z_{i\hat{E}} < 0$, $\partial^2 f_{ik} / \partial z_{i\hat{E}}^2 < 0$ という可能性もある。これらはすべて各人の be-
ing に関わる。

任意の有体属性 c , 生物属性 s , ならびに無体属性 g と E に対する居住者 i の限界的評価を, “Hedonic Shadow Price(HSP)” と呼び, 以下で定義する。これは, “Hedonic Marginal Willingness-to-Pay(HMW)” と呼ぶことにしよう。各々任意の $c \in C$, $s \in S$, ならびに $g \in G$ に対して以下が成立する。

$$\pi_{ic} = \frac{\sum_{k \in K_i} (\partial H_i / \partial f_{ik})(\partial f_{ik} / \partial z_{ic})}{\sum_{k \in K_i} (\partial H_i / \partial f_{ik})(\partial f_{ik} / \partial z_{i0})} \quad (19)$$

$$\pi_{is} = \frac{\sum_{k \in K_i} (\partial H_i / \partial f_{ik})(\partial f_{ik} / \partial z_{is})}{\sum_{k \in K_i} (\partial H_i / \partial f_{ik})(\partial f_{ik} / \partial z_{i0})} \quad (20)$$

$$\pi_{ig} = \frac{\sum_{k \in K_i} (\partial H_i / \partial f_{ik})(\partial f_{ik} / \partial U)(\partial U / \partial \zeta_g)(d\zeta_g / dz_g)}{\sum_{k \in K_i} (\partial H_i / \partial f_{ik})(\partial f_{ik} / \partial z_{i0})} \quad (21)$$

$$\pi_{iE} = \frac{\sum_{k \in K_i} (\partial H_i / \partial f_{ik})(\partial f_{ik} / \partial U)(\partial U / \partial \varepsilon_i)}{\sum_{k \in K_i} (\partial H_i / \partial f_{ik})(\partial f_{ik} / \partial z_{i0})}. \quad (22)$$

π_{ic} , π_{is} , π_{ig} , ならびに π_{iE} は, 各属性が住民 i の functionings を通じて彼/彼女の限界幸福にいかに関与するかを numeraire 属性 z_{i0} によって表現したものである。効用関数理論的には, 各属性と numeraire 属性間の「限界代替率」に対応しているが, その意味は大きく異なる。すなわち, 限界代替率には, functionings で表現する人間の行為とその矛盾が入ってこない。例えば, 外の蒸し暑さは嫌だが, 部屋ではクーラーを付けたいという矛盾である。

都市居住者 i の消費ベクトルの集合を X_i としよう。 x_i ならびに U を所与として, ヒートア

イランドの下での実行可能な being のベクトル, あるいは住民 i の *capability set* は

$$B_i(x_i, U) = \{b_i \mid b_i = (f_{i1}(z_i, U), \dots, f_{iK_i}(z_i, U)), \\ \text{for some } f_{ik} \in K_i \text{ and for some } x_i \in X_i\} \quad (23)$$

で与えられる。これは都市温暖化の制約の下に, 居住者 i が選択しようと思えば選択しうる being の集合である。各住民は $B_i(x_i, U)$ から各時点で1つの *being* を選択し, その流れが彼/彼女の生活であり人生になる。上に列挙した, 夏に涼しく過ごす様々な方法を用いて快適に過ごす人もあれば, 手をこまねいて何もせずに漫然と過ごす人もいる。それらすべてを $B_i(x_i, U)$ は含んでいる。今後, ヒートアイランドが加速化する場合, $B_i^{t+1}(x_i^{t+1}, U^{t+1}) \subset B_i^t(x_i^t, U^t), \forall t, \forall i$, と, being の可能性を表現する Capability の集合が時間と共に縮小していかないとも限らない。

3 ヒートアイランドの影響下にある居住者, 生産者, ならびにランドスケープ・ガードナーの最適化

3.1 ペリアーバンの居住者

都市居住者の中にはヒートアイランドによる人為的な将来のリスクを知り, これからも住み続けるであろうメトロポリスで自分の well-being を実現するために, 都市大気の最適化, すなわち, 暑くなりすぎないようにしようとするインセンティブを持っている人もいれば, 環境を考えずに毎日を快適に暮らしたいという人も存在する。今から, ペリアーバンの居住者について見ていこう。

理論モデルの記号を導入する。 δ_i を CBD から自宅迄の距離, $r_i(\delta_i)$ を土地 $1 m^2$ の地代とすると, $r_i(\delta)L_i$ は借地が L_i のときの地代である。居住者 i は自家用車, またはバス, 地下鉄, 市電等の公共輸送機関を利用して通勤または通学し, 自分一人が家族とともに CBD にある美術館やコンサートホール, あるいはペリアーバンにある自然公園等に出掛ける。通勤費は彼/彼女の勤務先から支払われており, 所得に含まれていると考えるのが自然なので, $\xi_i(\delta_i)$ を通勤以外の交通費とする。この点は従来の都市経済学とは異なる。

居住者 i の排熱削減費用 $\nu_i(\varepsilon_i(\alpha_i))$ は彼/彼女の排熱量で決まるが, 最終的には排熱削減パラメータ $\alpha_i \in \mathbb{R}$ に依存する。 α_i は幾通りもの解釈が可能であるが, 原油に換算した化石燃料の消費削減量と考えてもよい。 ν_i はランドスケープ・ガードナーに支払う緑化以外のすべてのコストである。例として, 車の代わりに自転車や公共輸送機関を利用することが考えられる。というのは, 自動車で $1 km$ 移動する時に排出される CO_2 は約 $190 g$ で, 1台当たり1年間に $2 l$ のペットボトルに換算して58万本もの CO_2 を排出し, カーエアコンからの排熱も大きく都市熱汚染に関連しているからである。ところが自転車なら全く排出しない。ヒートアイランドが加速化するにつれて, より性能のよいエアコンに買い換えることによっても排熱を削減し節

電できる。このように、居住者の functionings に関連する値として上記の 2.5 に列挙した例で、 α_i を説明しようと考えている。すなわち、熱を屋内に入れず屋外に出さない工夫をするために支出をする住民の α_i ならびに ν_i の値は大きくなり、 ε_i の値は小さくなる。 α_i は本人しか知りえないかまたは部分的に観察可能である。というのは、2.5 に列挙した「防熱グッズ」を置いてあるベランダに住む人は、それに対して支出をしたことにより排熱を抑える努力をしていることが客観的にわかるからである。

都市の大気がこれ以上高温化して屋外が耐えがたい住みにくさにならないために、居住者 i はヒートアイランド税 $t_i(\alpha_i)$ を支払う義務を負うが、その税額は自分の削減努力により減額しようと考えているので、 α_i の関数と仮定している。例えば、たとえ隣り合って住んでいて周辺の環境は全く同様であっても、各住民の環境意識により、省エネ行動は全く異なるのが現実である。緑化をする家族もあればしない家族もある。藤原(2004)が示したように、屋上緑化はCO₂固定量が最大で最も効果的な(都市涼化)の方法の一つであり、現在多くの試みがなされている。 $\sum_{\gamma \in T} n_{i\ell\gamma} = n_{i\ell}$ と定義すると、ランドスケープ・ガードナー ℓ に依頼した住民 i の緑化コスト $\sigma_{i\ell}(A_{i\ell})$ は、 $A_{i\ell}m^3$ 当たり $n_{i\ell}$ 本の様々な木々を植えるためのコストである。それは植栽量により決まる。 $A_{i\ell}m^3$ を緑化することにより $\sum_{\gamma \in T} n_{i\ell\gamma}$ 本の木が住民 i の庭の緑地に植えられて、 $\sum_{\gamma \in T} z_{\gamma g} h_{\gamma} d_{\gamma} n_{i\ell\gamma}$ のCO₂が固定される。

財の集合 J は電気、ガス、水道等の財・サービスを含むが、土地、交通は除外されており、 p_j は財 j の単位価格である。都市居住者 i の numeraire 属性の初期配分を ω_i とすると、予算制約式は

$$\omega_i = z_{i0} + \sum_{j \in J} p_j x_{ij} + \sigma_{i\ell}(A_{i\ell}) + \nu_i(\varepsilon_i(\alpha_i)) + t_i(\alpha_i) + r_i(\delta_i)L_i + \xi_i(\delta_i) \quad (24)$$

である。上式の左辺は numeraire 属性の初期配分の価値、すなわち個人 i の所得である。 ω_i も z_{i0} も価格が 1 と正規化されている。

仮定 5. 都市居住者 $i \in N$ に対して、 $\sigma_{i\ell}$ および ξ_i は凸かつ C^2 級、 ν_i 、 ε_i 、 t_i および r_i は凹かつ C^2 級で、 $d\sigma_{i\ell}/dA_{i\ell} > 0$ 、 $\partial\nu_i/\partial\varepsilon_i < 0$ 、 $d\varepsilon_i/d\alpha_i < 0$ 、 $dt_i/d\alpha_i < 0$ 、 $dr_i/d\delta_i < 0$ 、ならびに $d\xi_i/d\delta_i > 0$ である。

$\sigma_{i\ell}$ は $A_{i\ell}$ の増加関数、 $r_i(\delta_i)$ は距離 δ_i の減少関数、 $\xi_i(\delta_i)$ は距離の増加関数である。排熱が増加すれば都市は暑くなり、ヒートアイランド税の支払い等のコストがかさむことを、仮定 5 は示している。都市居住者の中には、税額の削減のための様々な努力をする人も存在する。

各居住者は、以下の幸福関数最大化問題を解くと仮定する。

$$\begin{aligned} \text{Max } H_i &= H_i(b_i(z_i, U)) \\ \text{s.t. } w_i &= z_{i0} + \sum_{j \in J} p_j x_{ij} + \sigma_{i\ell}(A_{i\ell}) + \nu_i(\varepsilon_i(\alpha_i)) + t_i(\alpha_i) + r_i(\delta_i) L_i + \xi_i(\delta_i) \end{aligned} \quad (25)$$

最初の結論は以下の通りである。

補題 1. 都市居住者にとり、*Gorman-Lancaster* 的有体非ガス状属性で構成された財、生産の副産物として排出された無体属性としての熱およびガス状属性であるガス、ならびに生物属性の複合体としての緑地の個人的最適消費は、以下のように特定化される。

$$\begin{aligned} \sum_{c \in \text{CUGU}\{E\}} \pi_{ic} q_{jc} &\leq p_j, \left(\sum_{c \in \text{CUGU}\{E\}} \pi_{ic} q_{jc} - p_j \right) x_{ij} = 0, \quad \forall i \in N, \quad \forall j \in J \\ \sum_{c \in \text{SUGU}\{E\}} \pi_{ic} q_{\ell c} &\leq \frac{d\sigma_{i\ell}(A_{i\ell})}{dA_{i\ell}}, \left\{ \sum_{c \in \text{CUGU}\{E\}} \pi_{ic} q_{\ell c} - \frac{d\sigma_{i\ell}(A_{i\ell})}{dA_{i\ell}} \right\} A_{i\ell} = 0, \quad \forall \ell \in \Lambda \\ \frac{dt_i}{d\alpha_i} &\leq -\frac{d\nu_i}{d\varepsilon_i} \frac{d\varepsilon_i}{d\alpha_i}, \left(\frac{dt_i}{d\alpha_i} + \frac{d\nu_i}{d\varepsilon_i} \frac{d\varepsilon_i}{d\alpha_i} \right) \alpha_i = 0 \\ L_i &\leq -\frac{d\xi_i/d\delta_i}{dr_i/d\delta_i}, \left(L_i + \frac{d\xi_i/d\delta_i}{dr_i/d\delta_i} \right) \delta_i = 0. \end{aligned}$$

これらの Kuhn-Tucker 条件は、関数に置かれた仮定により必要十分条件である。 π_{ic} は居住者 i が自分の *numeraire* 属性、ならびに *functionings* を利用することにより得られる属性 c の限界的評価である。第 1 式の左辺は j 財 1 単位に含まれるすべての非ガス状属性、ならびに財の生産の際に排出された熱およびガス状属性に対する、居住者 i の限界的評価の総和であり、それが右辺の単位価格に一致する。 $\sum_{c \in \text{CUGU}\{E\}} \pi_{ic} q_{jc}$ ならびに $\sum_{s \in \text{SUGU}\{E\}} \pi_{ic} q_{jc}$ を、それぞれ個人 i の財ならびに緑地に対する〈ヘドニック限界支払意志関数 (Hedonic Marginal Willingness-to-pay Functions)〉と呼ぶことにしよう。したがって、最初の 4 式は、価格線と限界支払意志曲線の交点で、財ならびに緑地の植栽量の最適消費量が決定されるという、消費者余剰最大化の 1 階の条件に一致する。換言すれば、1 式、2 式は、財 j のすべての属性が居住者 i の *functionings* を介して彼/彼女の幸福に与える限界的貢献の総和と、財 j の単位当たり価格が一致することを示している。

第 3 式、第 4 式は均衡緑化量を決定するものである。第 3 式の左辺は、居住者 i がランドスケープ・ガードナー ℓ に緑化を依頼した植栽量 $A_{i\ell}$ に存在する生物属性としてのすべての動植物種 s 、ならびに緑化の際に化学肥料や運搬等により発生したガス状属性の限界的評価の総和であり、それが右辺の 1 m^3 当たりの緑化費用に一致し、それは植栽を依頼した樹木量に依存する。4 つの式は、各住民に各財ならびに緑化の消費選択の可否の判断を与えるものである。

括弧内がゼロの時、限界的評価の総和と単位価格が一致し、住民 i は財 j を x_{ij} 単位、植栽量を $A_{i\ell}$ 単位消費し、限界的評価の総和が単位価格よりも低い時には消費しないことを意味している。

ここで注意すべきことがある。居住者 i は j 財ならびに植栽量を 1 単位消費する際に、非ガス状属性のみならず熱およびガス状属性をも考慮しているように数式の上では見えるが、実際のところ、個人が消費行動を行う時に、自分が買う財が生産された時に排出された熱やガスに思いを馳せるような人は果たしてどれだけいるだろうか、財や植栽の有形非ガス状属性 $c \in C$ および $s \in S$ のみを考えて多くの人は消費しているのではないだろうか。生産や運搬の際に排出される、マイナスの評価を下されうる副産物である熱やガスを考慮に入れないからこそ

$$\sum_{c \in C \cup G \cup \{E\}} \pi_{ic} q_{jc} < \sum_{c \in C} \pi_{ic} q_{jc} \leq p_j \quad (26)$$

であり

$$\sum_{c \in S \cup G \cup \{E\}} \pi_{ic} q_{lc} < \sum_{c \in S} \pi_{ic} q_{lc} \leq \sigma_{i\ell}(A_{i\ell}) \quad (27)$$

となりうるのではないか、(26)式は、環境に配慮しなければ、人は財を消費し過ぎることを意味している。また、(27)式は動植物による環境改善能力を考慮に入れないため緑化をせず、それゆえ環境を悪化させていることを示している。したがって、十分広い土地を持ちながらも緑化せずにいる住民もいるだろうし、狭いながらも緑化して楽しく暮らす人もいるわけである。ここに両者の環境意識の差異が生ずるのである。

t_i に関する限界的条件は、住民 i の 1 単位の排熱の限界的評価が、彼/彼女の排熱 1 単位当たりのヒートアイランド税に一致することを示すものである。この式は、税と排熱削減費用の最小化問題の 1 階の条件でもある。2.5 で列挙したとおり、例えば自分でできる方法で室内を涼しくすることにより、エアコン代を減らすことができる。この項はあくまでも、ランドスケープ・ガードナーに依頼する緑化以外の手立てに関する費用である。自宅以外の緑地面積や近隣の保水量が増加し、都市温暖化が緩和されるにつれ、この費用は少なくなる。

最後の条件は、住民が不在地主から借用する借地面積を決定するものであり、住居立地の均衡条件である。借地面積は都心からの距離、地代、ならびに交通費により決定されることが容易にわかる。

3.2 生産者ならびに都市内農場

次に、消費者にパレート最適生産品質を持つ財を供給するための、各生産者の利潤最大化条件を提示しよう。ここで「生産者」とは非常に広い意味で使用しており、CBDのオフィス、デパート、ホテル、製造業、病院、学校、美術館等の民間ならびに公共施設、公企業等の、都市内に建造物を持ち、生産活動を行うすべての経済主体が該当すると考えている。大規模事業

者から小規模事業者まですべて含む。

生産者 j は労働 x_{j0} , 土地 L_j , 水 w_j をインプットとして財 j を生産するが, 労働の利用可能性, $\sum_{j \in J} x_{j0} \leq \sum_{i \in N} z_{i0}$ という関係が成立すると仮定している。水を生産に必要とする例として, オゾン層を破壊するフロンに替わり, 高温の蒸気で半導体を洗浄するために必要とする水, ならびに農業用水がある。

生産者 j の input-output vector を

$$y_j = (x_{j0}, L_j, w_j, x_j, q_{j1}, \dots, q_{jC}, q_{jC+1}, \dots, q_{jC+G}, q_{jE}) \quad (28)$$

とすると, 生産者は生産関数

$$\phi_j = \phi_j(x_{j0}, L_j, w_j, x_j, q_{j1}, \dots, q_{jC}, q_{jC+1}, \dots, q_{jC+G}, q_{jE}) \quad (29)$$

を制約として利潤最大化をする。ここで, $q_{jc}, \forall c \in G$ は j 財 1 単位を生産する際に大気に放出されるガス状属性としての熱ならびにガスであり, $(q_{jC+1}, \dots, q_{jC+G}, q_{jE})$ はそのベクトルである。一方, (q_{j1}, \dots, q_{jC}) は財 j の 1 単位に含まれる非ガス状属性のベクトルである。各生産者は 2 種類の属性を結合供給していることになる。生産関数は非凸の可能性もあるが, ここでは凸性を仮定し, 以下の仮定を置く。

仮定 6. 生産者 $j \in J$ にとり, ϕ_j は閉凸の生産集合 Y_j 上で凸かつ C^2 級で, $\partial x_{j0} / \partial q_{jc} > 0$, $\forall c \in C \cup G \cup \{E\}, c \neq j$, である。更に, $x_j > 0$ が $x_{j0} > 0, L_j > 0$ ならびに $w_j > 0$ を含意し, $\forall \Delta \in \mathbf{R}_+, \{y_j | \phi_j(y_j) \leq 0, x_{j0} \leq \Delta, L_j \leq \Delta, w_j \leq \Delta\}$ は compact である。

ここで住民の限界的评价 π_{ic}, π_{ig} および π_{iE} は, 生産者により観察可能であると考えている。というのは, すべての財が私的財もしくはガス, 水道, 電気等の公的供給財であり, 価格ないしは公共料金を支払わなければ利用できないからである。したがって, いかなる居住者も free riding は不可能である。Dreze and Hagen(1978)に倣って, $x_j > 0$ の場合, 命題 1 により, $p_j = \sum_{c \in C \cup G \cup \{E\}} \pi_{ic} q_{jc}$ として得られるので, 生産者の利潤最大化問題は以下で与えられ, P_j は利潤である。

$$\begin{aligned} \text{Max } P_j &= \sum_{i \in N} x_{ij} \sum_{c \in C \cup G \cup \{E\}} \pi_{ic} q_{jc} - x_{j0} - r_j(\delta_j) L_j - p_w w_j - \nu_j(\varepsilon_j(\alpha_j)) \\ &\quad - t_j(\alpha_j) - \mu_j(x_j) - \chi \sigma_j(A_j) + (1 - \chi) w L_{jF} \\ \chi &= 0 \text{ if } j \in J_F \text{ and } \chi = 1 \text{ if } j \notin J_F. \end{aligned} \quad (30)$$

ここで右辺第 1 項は収入(供給量 \times 計算価格), x_{j0} は雇用量, $r_j(\delta_j) L_j$ は地代, L_j はインプットの一つである土地, p_w は単位水道料, $p_w w_j$ は水道料金, δ_j は CBD から生産者の立地ま

での距離である。 $\nu_j(\varepsilon_j(\alpha_j))$ は生産者 j の排熱削減コストで、 $\alpha_j \in \mathbf{R}$ は生産者 j のみが知りうる排熱削減パラメータである。 α_j は居住者の場合と同様、原油に換算した化石燃料の消費削減量と考えてよい。生産者 j が j 財を $x_j = \sum_{i \in \mathbf{N}} x_{ij}$ 単位、生産、運搬する際に、ハイブリッド車または燃料電池車に切り替えるとか、オフィスの節電のため日中は不必要に照明を明るくしすぎたりせず消灯して、省エネ基準をクリアしたパソコンや家電に買い換え、待機電力を極力抑える等の努力が α_j に表れる。緑地への給水のための水道料は ν_j に含まれ、 t_j はヒートアイランド税である。また、財 x_j の輸送費は $\mu_j(x_j)$ であり、生産者は生産物を CBD にもペリアーバンにも運んで販売する。

$n_{j\gamma}$ は生産者 j により植えられた樹種 γ の本数とすると、例えばホテル、オフィス、工場内敷地等に植栽される樹木量の CO_2 固定量は、 $\sum_{\gamma \in \mathbf{T}} z_{\gamma g} h_{\gamma} d_{\gamma} n_{j\gamma}$ である。 $\sigma_j(A_j)$ は生産者 j の緑化費用であり、植栽量に応じて増加する。

生産者に含まれる都市内農場 j の農地 $L_{jF} \equiv Q_j L_j$ で、 $0 < Q_j < 1$ は L_j に占める農地の割合である。 wL_{jF} ($0 < w < 1$) は農地を宅地化せずに緑被率を保つことに貢献した報酬として、政府が農場 j に与える補助金である。 J_F を農場の集合とする。農場は緑化義務を免除されている。

仮定 7. 生産者 $j \in \mathbf{J}$ に対して、 $r_j, \nu_j, \varepsilon_j$ ならびに t_j は凹かつ C^2 級、 σ_j ならびに μ_j は凸かつ C^2 級で、 $dr_j/d\delta_j < 0, \partial\nu_j/\partial\varepsilon_j < 0, d\varepsilon_j/d\alpha_j < 0, dt_j/d\alpha_j < 0, d\sigma_j/dA_{j\ell} > 0$, および $\partial\mu_j/\partial x_j > 0$ である。

ここで $A_j = \rho_j L_j$, $0 < \rho_j < 1$ としよう。熱とガスを排出して生産された、非ガス状属性が構成する財に関して次の帰結が得られる。

補題 2. 生産者にとり、熱、ガス状および非ガス状属性で表現されたパレート最適生産品質の必要条件は以下の通りである。 $\forall j \in \mathbf{J}, \forall c \in \mathbf{C} \cup \mathbf{G} \cup \{E\}, c \neq j$:

$$\begin{aligned} \sum_{i \in \mathbf{N}} \pi_{ic} x_{ij} &\leq \frac{\partial x_{j0}}{\partial q_{jc}} + r_j \frac{\partial L_j}{\partial q_{jc}} + p_w \frac{\partial w_j}{\partial q_{jc}} + \frac{d\mu_j}{dx_j} \frac{dx_j}{\partial q_{jc}} \\ 0 &= \left(\sum_{i \in \mathbf{N}} \pi_{ic} x_{ij} - \frac{\partial x_{j0}}{\partial q_{jc}} - r_j \frac{\partial L_j}{\partial q_{jc}} - p_w \frac{\partial w_j}{\partial q_{jc}} - \frac{d\mu_j}{dx_j} \frac{dx_j}{\partial q_{jc}} \right) q_{jc} \\ \frac{dt_j}{d\alpha_j} &\leq -\frac{d\nu_j}{d\varepsilon_j} \frac{d\varepsilon_j}{d\alpha_j}, \left(\frac{dt_j}{d\alpha_j} + \frac{d\nu_j}{d\varepsilon_j} \frac{d\varepsilon_j}{d\alpha_j} \right) \alpha_j = 0 \\ L_j &\leq -\frac{d\delta_j}{dr_j}, \left(L_j + \frac{d\delta_j}{dr_j} \right) \delta_j = 0 \end{aligned}$$

$$r_j \leq \frac{d\mu_j}{dx_j} \frac{\partial x_j}{\partial L_j} + \chi \frac{d\sigma_j}{dA_j} P_j(1-\chi)wQ_j, \left\{ r_j - \frac{d\mu_j}{dx_j} \frac{\partial x_j}{\partial L_j} - \chi \frac{d\sigma_j}{dA_j} P_j(1-\chi)wQ_j \right\} L_j = 0$$

$$\chi = 0 \text{ if } j \in \mathbf{J}_F \text{ and } \chi = 1 \text{ if } j \notin \mathbf{J}_F.$$

最初の2式は Samuelson's Conditions を想起させるが、それは属性が公共財だからである。第1式は生産者 j が供給する財が持つ各非ガス状属性ならびに、その財の生産の際に排出される熱および各ガス状属性のパレート最適量を決定するものである。左辺は限界収入であり、財 j の社会的限界価値とも言い、財 x_j を生産する際の属性の限界的变化に対する評価の総和である。右辺は q_{jc} を生産するための numeraire 属性、土地、水ならびに限界輸送費 (marginal transportation cost : MTC) の4項からなる。第1, 第2, および第3項は生産のための x_{j0} , L_j , および w_j の限界費用、そして第4項は財 j を x_j 単位運送する際の MTC である。すなわち、初めの2式は利潤最大化条件である、限界収入 = 限界費用を意味する。

両式において $c = g$ であるなら、各ガス状属性のパレート最適量を決定している。左辺は g 番目のガスまたは熱の社会的限界価値、右辺は限界費用である。 $c = E$ の場合、右辺は排熱のための限界費用を意味する。命題1と同様に、 t_j は生産者 j のヒートアイランド税である。 L_j の式は j の均衡土地面積を決定する。最後の2式は均衡地代を決定するが、それは農場以外の生産者 $j \notin \mathbf{J}_F$ の MTC, ならびに限界緑化費用に一致する。他方、農場 $j \in \mathbf{J}_F$ に与えられる報酬 wQ_j の金額は、幾分でもヒートアイランドを緩和すると期待される、ペリアーバンにある農地を保全する都市内農場 j に与えられる補助金である。

3.3 ペリアーバンのランドスケープ・ガードナー

次に、ペリアーバンのランドスケープ・ガードナーの効率性条件を導出する。彼らの仕事は住民の依頼によりその土地の一部を緑化することであり、そのため彼ら自身には緑化義務はないと仮定してある。彼らは生物属性である植物をペリアーバンで育ててトラックで運搬することにより、熱および CO_2 等のガス状属性である温暖化ガスを出す。他方、緑化により都市が涼化され、各経済主体の冷房費が節約され、植物の光合成の増加により CO_2 が減少し、蒸散により熱が減少することに貢献している。

δ_ℓ は CBD からランドスケープ・ガードナーの立地までの距離である。 $r_\ell(\delta_\ell)L_\ell$ を地代とするが、ここで $r_\ell(\delta_\ell)L_\ell$ はランドスケープ・ガードナー ℓ が支払う 1 m^2 の地代、 L_ℓ は借地面積である。 $\nu_\ell(\varepsilon_\ell(\alpha_\ell))$ は ℓ の排熱削減費用で、 $\alpha_\ell \in \mathbf{R}$, は ℓ しか知らない技術的パラメータであり、前節と同様、原油に換算した化石燃料の消費量と考えてよい。 ℓ の活動として、排熱が少ない新しいテクノロジーで屋上緑化、壁面緑化等により居住者に緑地を提供しようという例が挙げられる。または草木の運搬を天然ガス車やハイブリッド車で行うという例も考えられる。

$\mu_\ell(A_\ell)$ は輸送費である。一般にランドスケープ・ガードナー ℓ に緑化を依頼する住民が複数存在するので、 ℓ による緑化の総体積は $A_\ell = \sum_{i \in N_\ell} A_{i\ell}$ である。

ランドスケープ・ガードナーは、住民に緑化サービスを行うことにより、以下の生産関数

$$\phi_\ell = \phi_\ell(x_{\ell 0}, L_\ell, w_\ell, A_\ell, q_{\ell C+1}, \dots, q_{\ell C+G}, q_{\ell C+G+1}, q_{\ell C+G+S}, q_{\ell E})$$

の制約の下に、次の最大化問題を解く。

$$\begin{aligned} \text{Max } P_\ell = & \sum_{i \in N_\ell} \sigma_{i\ell}(n_{i\ell}) A_{i\ell} - x_{\ell 0} - r_\ell(\delta) L_\ell - p_w w_\ell \\ & - \nu_\ell(\varepsilon_\ell(\alpha_\ell)) - t_\ell(\alpha_\ell) - \mu_\ell(A_\ell) \end{aligned} \quad (31)$$

この問題を解くには2つの仮定を必要とする。

仮定8. ランドスケープ・ガードナー $\ell \in \Lambda$ に対して、 ϕ_ℓ は閉凸生産集合 Y_ℓ 上で凸かつ C^2 級であり、 $\partial x_{\ell 0} / \partial q_{\ell c} > \forall 0, \forall c \in \text{SUGU}\{E\}, c \neq j$ である。更に、 $A_\ell > 0$ は $x_{\ell 0} > 0, L_\ell > 0$ ならびに $w_\ell > 0$ を含意し、 $\forall \Delta \in R_+, \{y_\ell | \phi_\ell(y_\ell) \leq 0, x_{\ell 0} \leq \Delta, L_\ell \leq \Delta, w_\ell \leq \Delta\}$ は compact である。

仮定9. ランドスケープ・ガードナー $\ell \in \Lambda$ に対して、 $r_\ell, \nu_\ell, \varepsilon_\ell, t_\ell$, ならびに μ_ℓ は凹かつ C^2 級で、 $dr_\ell/d\delta_\ell < 0, \partial \nu_\ell / \partial \varepsilon_\ell < 0, d\varepsilon_\ell/d\alpha_\ell < 0, dt_\ell/d\alpha_\ell < 0$, ならびに $d\mu_\ell/d\delta_\ell < 0$ である。

第3の結論は以下の通りである。

補題3. ランドスケープ・ガードナーにとり、生物属性の複合体としての植栽のパレート最適品質の必要条件は以下で与えられる。 $\forall \ell \in \Lambda, \forall c \in \text{SUGU}\{E\}, c \neq j$:

$$\begin{aligned} \sum_{i \in N_\ell} \pi_{ic} A_{i\ell} & \leq \frac{\partial x_{\ell 0}}{\partial q_{\ell c}} + r_\ell \frac{\partial L_\ell}{\partial q_{\ell c}} + p_w \frac{\partial w_\ell}{\partial q_{\ell c}} + \frac{d\mu_\ell}{dA_\ell} \frac{\partial A_\ell}{\partial q_{\ell c}} \\ & = \left(\sum_{i \in N_\ell} \pi_{ic} A_{i\ell} - \frac{\partial x_{\ell 0}}{\partial q_{\ell c}} + r_\ell \frac{\partial L_\ell}{\partial q_{\ell c}} - p_w \frac{\partial w_\ell}{\partial q_{\ell c}} - \frac{d\mu_\ell}{dA_\ell} \frac{\partial A_\ell}{\partial q_{\ell c}} \right) q_{\ell c} \\ \frac{dt_\ell}{d\alpha_\ell} & \leq - \frac{d\nu_\ell}{d\varepsilon_\ell} \frac{d\varepsilon_\ell}{d\alpha_\ell}, \quad \left(\frac{dt_\ell}{d\alpha_\ell} + \frac{d\nu_\ell}{d\varepsilon_\ell} \frac{d\varepsilon_\ell}{d\alpha_\ell} \right) \alpha_\ell = 0 \\ L_\ell & \leq - \frac{d\delta_\ell}{dr_\ell}, \quad \left(L_\ell + \frac{d\delta_\ell}{dr_\ell} \right) \delta_\ell = 0 \\ r_\ell & \leq \frac{d\mu_\ell}{dA_\ell} \frac{\partial A_\ell}{\partial L_\ell}, \quad \left(r_\ell + \frac{d\mu_\ell}{dA_\ell} \frac{\partial A_\ell}{\partial L_\ell} \right) L_\ell = 0. \end{aligned}$$

第1式はランドスケープ・ガードナー ℓ が供給する緑化サービスによる植栽に存在する生物属性ならびに、緑化の際に排出される熱および各ガス状属性のパレート最適量を決定する。左辺は限界収入であり、植栽 A_ℓ の社会的限界価値とも言い、緑地を供給する際の生物属性ならびにガス状属性の限界的変化に対する評価の総和である。右辺の第1, 第2, および第3項は $q_{\ell c}$ 生産のための $x_{\ell 0}$, L_ℓ , および w_ℓ の限界費用, そして第4項は緑化のために植物や肥料を運送する際のMTCである。すなわち, 最初の2つの式は利潤最大化条件である, 限界収入 = 限界費用を意味する。

2つの式において $c = g$ であるなら, 各ガス状属性のパレート最適量を決定する。左辺は g 番目のガスの社会的限界価値, 右辺は限界費用である。 $c = E$ の場合, 右辺は排熱のための限界費用を意味する。 t_ℓ はランドスケープ・ガードナー ℓ のヒートアイランド税である。 L_ℓ の式は ℓ の均衡土地面積を決定する。最後の2式は均衡地代を決定しているが, それはランドスケープ・ガードナー ℓ のMTCに等しい。

3.4 メトロポリスのヒートアイランド課税/補助金システム

ヒートアイランドによる金銭的損失を以下のように定義する。公共的損失は各ブロックの総被害額, $\Phi \equiv \sum_{\beta \in \beta} D_\beta(U(E))$, ならびに私的損失は経済主体による排熱削減費用の総和, $\Psi \equiv \sum_{e \in N \cup J \cup A} \nu_e(\varepsilon_e(\alpha_e))$ である。既に種々の例を示した通り, ヒートアイランドによる人間の健康被害や家畜の損失, 都市型集中豪雨による地下鉄の浸水, 道路の冠水, 河川の増水, 住宅の床上・床下浸水等が挙げられる。したがって, ヒートアイランドによる社会的損失は $\Phi + \Psi$ となり, それに対処するための費用と併せて, 社会的費用最小化問題は

$$\text{Min} \{ \Phi + \Psi + \Gamma + \Omega \}$$

で与えられる。ここで, $\Gamma = \sum_{\beta \in \beta} \Gamma_\beta(A_\beta)$ ならびに $\Omega = \sum_{\beta \in \beta} \Omega_\beta(A_\beta)$ である。次の仮定を必要とする。

仮定10. D_β は凹かつ C^2 級で, $dD_\beta/dE > 0$, $\partial \Gamma_\beta / \partial A_\beta > 0$, ならびに $d\Omega_\beta / dW_\beta > 0$, $\forall \beta \in \beta$, である。

社会的に最適な植栽, 水, 排熱の量を決定するための必要条件は

$$\frac{dD_\beta(U)}{dU} \frac{\partial U}{\partial E} \frac{dE}{dA_\beta} + \frac{d\Gamma_\beta}{dA_\beta} = 0, \quad \forall \beta \in \beta \quad (32)$$

$$\frac{dD_\beta(U)}{dU} \frac{\partial U}{\partial E} \frac{dE}{dW_\beta} + \frac{d\Omega_\beta}{dW_\beta} = 0, \quad \forall \beta \in \beta \quad (33)$$

および

$$\sum_{\beta \in \beta} \frac{dD_{\beta}(U)}{dU} \frac{\partial U}{\partial E} + \sum_{e \in NUJUA} \frac{dv_e(\varepsilon_e(\alpha_e))}{d\varepsilon_e} = 0 \quad (34)$$

である。(32)式の第1項は1 km²の緑地が失われたときの限界損失で、第2項は1 km²を緑化するための限界費用である。同様に、(33)式の第1項は1 トンの水が都市から失われるときの限界損失で、第2項は1 トンの水を都市に復活させるときの限界費用である。

ここで定理を提示する。

定理. インセンティブ・コンパティブルなヒートアイランド税は *Groves Mechanism* タイプで、以下の式で与えられる。任意の $e \in NUJUA$ に対して

$$t_e(\alpha_e) = - \int_0^{\alpha_e} \frac{dv_e(\varepsilon_e(a_e))}{d\varepsilon_e} \frac{d\varepsilon_e}{da_e} da_e + Q_e(a_{-e})$$

であり、ここで、 $Q_e(a_{-e})$ は a_e から独立した積分定数である¹¹⁾。

証明は Laffont(1982)の differential method により、補題 1 ~ 3 から

$$\sum_{e \in NUJUA} \left\{ \frac{dv_e(\varepsilon_e(a_e))}{d\varepsilon_e} \frac{d\varepsilon_e}{da_e} + \frac{dt_e(\alpha_e)}{d\alpha_e} \right\} = 0 \quad (35)$$

が得られ、これを積分すると

$$\sum_{e \in NUJUA} t_e(\alpha_e) = - \sum_{e \in NUJUA} \left\{ \int_0^{\alpha_e} \frac{dv_e(\varepsilon_e(a_e))}{d\varepsilon_e} \frac{d\varepsilon_e}{da_e} da_e + Q_e(a_{-e}) \right\} \quad (36)$$

となる。

上記の社会的費用最小化問題に唯一の解が存在すると仮定すると、導出すべきは社会的最適に対応するヒートアイランド税であるから、上記の社会的最適性の(34)式を上式に代入することにより

$$\sum_{e \in NUJUA} t_e(\alpha_e) = \sum_{\beta \in \beta} \int_0^{\alpha_e} \frac{dD_{\beta}(E)}{dE} \frac{d\varepsilon_e(a_e)}{da_e} da_e + \sum_{e \in NUJUA} Q_e(a_{-e}) \quad (37)$$

を得ることができる。

11) Groves Mechanism については、例えば Groves(1976)を参照されたい。

結果的に、ヒートアイランド税の総和は

$$\sum_{e \in \text{NUJUA}} t_e(\alpha_e) = \sum_{\beta \in \beta} D_\beta(E) + R \quad (38)$$

となり、ここで R は積分定数である。

ここで重要なことは、上式の右辺が完全には観察可能でない個人情報 α_e , $\forall e \in \text{NUJUA}$, に間接的にしか依存しないということである。したがって、いかなる居住者、生産者、ならびにランドスケープ・ガードナーにも上記の課税システムは操作不能であるという意味で、インセンティブ・コンパティブル(incentive compatible)である。モニタリングに関しては、各主体の電気ならびにガスの需要量から排熱量 ε_e , $\forall e \in \text{NUJUA}$, の推定が可能であると前提して議論している。ゆえに、上記の課税システムは耐戦略的(strategy proof)である。このシステムのもう一つの特徴は、課税額が社会的損失を十分カバーし、課税額の余剰 R を都市涼化の協力者に再分配できることである。

$\varphi_i \sigma_{i\ell}(A_{i\ell})$ は住民 i の緑化努力に対して、 φ_i の割合で緑化コストの一部を返還する金額としよう。 φ_i の値は例えば、各居住者の CO_2 固定量に比例して

$$\varphi_i = \varphi_i \left(\sum_{\gamma \in \mathbf{T}} z_{\gamma g} h_\gamma d_\gamma n_{i\ell\gamma} \right) \quad (39)$$

により決定されるものとする。ここで、最も簡単な線形の φ_i を仮定してもよい。貢献度に応じて緑化コスト返還率が高くなる、同様に、 $\varphi_j \sigma_j(A_{j\ell})$ は緑化努力に対して企業 j に返還される金額であり、ここで住民の場合と同様に

$$\varphi_j = \varphi_j \left(\sum_{\gamma \in \mathbf{T}} z_{\gamma g} h_\gamma d_\gamma n_{j\ell\gamma} \right) \quad (40)$$

であるとしよう。

提案. ヒートアイランド補助金 R は、緑化活動の協力者に以下のように補助金としてリファンドされる。

$$R = \sum_{i \in \mathbf{N}} \sum_{\ell \in \mathbf{A}} \varphi_i \sigma_{i\ell}(A_{i\ell}) + \sum_{j \in \mathbf{J}_\gamma \mathbf{J}_F} \varphi_j \sigma_j(A_j) + \sum_{j \in \mathbf{J}_F} \omega L_{jF}.$$

ここで、第1項、第2項は緑化コスト返還金であり、(ヒートアイランド(緩和)補助金)と呼ばれるものである。というのは、都市涼化のために、居住者の緑化努力に対して支払われる報酬だからである。土地が緑化され、排熱が減少するにつれて住み心地がよくなる。自分の土地

の一部を屋上緑化，または壁面緑化，ならびにガーデニングをすることにより，室内を涼化しクーラー代を下げられるので，夏場の日中の冷房のための電気代を節約できる。したがって，すべてのとは言えないまでも，居住者には自宅の一部を緑化するという適切なインセンティブを利己心に基づいて与えることができると言えるだろう¹²⁾。

また，本稿は課税にまつわる種々の難問である公平性等は考慮に入れていない。ヒートアイランド税により更に所得格差が出るようなことは勿論あってはならない¹³⁾。

R はメトロポリスを熱くなりすぎないようにするための，ヒートアイランド緩和のための補助金である。第1項および第2項は，居住者ならびに，公共施設，オフィス，ホテル，製造業等の生産者に，彼らの土地に植えられた樹木によるCO₂固定量に応じて，緑化を実施した彼らの協力の報酬として与えられる。Sato(2008a)と異なる点は，補助金額が緑地面積ではなく緑化量 A_{it} ならびに A_j と，そこに植栽されたすべての樹種のCO₂固定量により決定されることである。因みに，現在の排出権取引では4,000円/t CO₂程度であるという。第3項は都市内農場に，彼らの農地を宅地転換しなかった報酬として与えられる総額である。これも緑化と同様の効果があることが観測済みだからである。また，一般の税金は， $\Gamma_\beta(A_p)$ ならびに $\Omega_\beta(W_\beta)$ ， $\forall \beta \in \beta$ に配分されるものと考えている。

† 本論文は2005年9月18日に開催された日本経済学会(中央大学)で報告されたが，事前にハーバマン・エネルギー戦略研究所代表，日本ヒートアイランド学会会長であり，東北大学名誉教授である齋藤武雄氏ならびに，学会セッションにて名城大学の伊藤志のぶ教授から有益で貴重なコメントを数々戴いた。また，10月9日に開催された環境経済・政策学会(早稲田大学)にて報告した折，慶應義塾大学の大沼あゆみ教授にも数々の有益で貴重なコメントを戴いた。ここに記してお三方に感謝したい。

Sato(2008a)に関して重要なコメントを戴いた，カナダのMcGill UniversityのChristopher Green教授(日本ヒートアイランド学会特別顧問)にもここで感謝したい。Green教授には，2007年10月12日に，McGill Universityのセミナーでこの論文を報告する機会を与えて戴いた。ここに記し，深く感謝したい。

最後になったが，これまでたびたび利用し，本稿でも用いた可微分アプローチを考案した，フランスの誇る世界的に著名な数理経済学者であるJean-Jacques Laffont教授の早すぎる死を悼み，心より哀悼の意を表したい。御縁があって不確実性に関する氏の著作の翻訳を出版するという栄誉を与えられたことを，改めてここで感謝し，本稿をLaffont教授に捧げたい。

12) この問題は，佐藤(2007b)で取り上げられている。

13) 環境良化のための課税の問題に関しては，Sandmo(2000)を参照されたい。

参考文献

- Cavailhes, J., D. Peeters, E. Sekeris and J.-F. Thisse(2003), "La Ville Periurbaine," *Revue Economique*, 54, 5 24.
- Cavailhes, J., D. Peeters, E. Sekeris and J.-F. Thisse(2004), "The Periurban City: Why to Live between the Suburbs and the Countryside," *Regional Science and Urban Economics*, 34, 681 703.
- Dreze, J. and K. Hagen(1978), "Choice of Product Quality: Equilibrium and Efficiency," *Econometrica*, 46, 493 513.
- Gorman, W.(1956/1980), "A Possible Procedure for Analyzing Quality Differentials in the Egg Market," Journal paper N.3129, Iowa Agricultural Experiment Station, 1956; *Review of Economic Studies*, 47, 1980, 843 856.
- Gorman, W. and D. Myles (1987), "Characteristics," in *The Palgrave Dictionary*, Macmillan, London, 403 406.
- Groves, T.(1976), "Information, Incentives, and the Internalization of Production Externalities," in Lin, S.(ed.), *Theory and Measurement of Economic Externalities*, Academic Press, New York, 65 83.
- Howard, L.(1833), *Climate of London Deduced from Meteorological Observations*, 3rd ed., Harvey and Darton, London.
- Huriot, J.-M.(1994), *Von Thünen: Economie et Espace*, Economica, Paris.
- Laffont, J.-J.(1982), *Cours de Theorie Microeconomique, Vol. I- Fondements de l'Economie Publique*, Economica, Paris; the revised version translated as Bonin, J. and H.(1988), *Fundamentals of Public Economics*, The MIT Press, Cambridge.
- Jean-Jacques Laffont, *Cours de Theorie Microeconomique, Vol. II: Economie de l'Incertain et de l'information*, Economica, Paris, 1985,
- Lancaster, K.(1966), "A New Approach to Consumer Theory," *Journal of Political Economy*, 74, 132 157; reprinted in Lancaster(1991), Chapter 2.
- Lancaster, K.(1971), *Consumer Theory: A New Approach*, Columbia University Press, New York.
- Lancaster, K.(1991), *Modern Consumer Theory*, Edward Elgar, Hants.
- Lansberg, H.(1970), "Meteorological Observations in Urban Areas," *Meteorological Monograph*, 33, 91 92.
- Lansberg, H.(1981), *The Urban Climate*, Academic Press, New York.
- Levy-Garboua, L.(1976), "La Nouvelle Theorie du Consommateur et la Formation des Choix," *Consommation*, 3, 83 99.

- Saitoh, T., T. Shimada and H. Hoshi(1996), "Modeling and Simulation of the Tokyo Urban Heat Island," *Atmospheric Environment*, 30, 3431-3442.
- Saitoh, T. and N. Yamada(1999), "Improved Modeling of Urban Warming in Tokyo and Numerical Projection to 2030," Proceedings of the 34th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, Vancouver, August 2-5.
- Saitoh, T. and N. Yamada(2000), "Improved Modeling of Urban Warming in Tokyo and Numerical Projection to Future Urban Environments in Tokyo," Symposium on Energy Engineering in the 21st Century: SEE2000, Hong Kong, Jan. 9-13, Vol. 3, 1233-1240.
- Saitoh, T. and N. Yamada(2001), "Evaluation of Effective Temperature Scale under Urban Heat Island Formation," *JSME International Journal*, Series B, 44, 111-118.
- Samuelson, P.(1983), "Thünen at Two Hundred," *Journal of Economic Literature*, 21, 1468-1488.
- Sandmo, A.(2000), *The Public Economics of the Environment*, The Lindahl Lectures, Oxford University Press, Oxford.
- Sato, K.(2000), "Optimizing the Global Atmosphere as a Composite of Gaseous Attributes: A Planning and Capability Approach," delivered at the annual meeting of the Society for Environmental Economics and Policy Studies held at Ritsumeikan University, September 25, 1999. The revised version presented at the spring meeting of the Japanese Economic Association held at Yokohama City University, May 13.
- Sato, K.(2001), "Global Warming as an Outcome of Intertemporal Noncooperative Incentive Game," presented at the annual meeting of the Society for Environmental Economics and Policy Studies held at Tsukuba University, September 30, 2000. The revised version presented at the spring meeting of the Japanese Economic Association held at Hiroshima Shudo University, May 19, 2001.
- Sato, K.(2006a), "Urban Heat Island: An Environmental Economic Modeling," *Journal of Heat Island Institute International*, 1, 40-45.
- Sato, K.(2006b), "Beautifying and Reviving Urban Heat Island by Means of Vegetation and Technological Innovations," presented at the autumn meeting of the Japanese Economic Association held at Osaka City University, October 22.
- Sato, K.(2007a), "Incentives in the Hedonic MDP Procedures for the Global Atmosphere as a Complex of Gaseous Attributes," presented at the Workshops of

- the Environment held at CORE, Universite Catholique de Louvain, Belgium, April 19, 2007; revised version presented at the Regional Science Workshop in Sendai held at the Graduate School of Information Sciences, Tohoku University in July 26; also at the autumn meeting of the Japanese Economic Association held at Nihon University, September 24.
- Sato, K.(2007b), "Urban Heat Island Virtual Game: Who Wins to Enjoy His/Her Pleasant Microclimate?" presented at the spring meeting of the Japanese Economic Association held at Osaka Gakuin University, June 3.
- Sato, K.(2008a), "Cooling the Metropolis: An Economic Analysis to Alleviate Urban Heat Island," *Journal of Heat Island Institute International*, 3, 1 15.
- Sato, K.(2008b), "Biohazards and Health Risks due to Urban Heat Islands," presented at the spring meeting of the Japanese Economic Association held at Tohoku University, June 1; also presented at the Public Economics Seminar held at Keio University, June 20.
- Sen, A.(1985), *Commodities and Capabilities*, Elsevier Science Publishers B. V., Amsterdam.
- von Thünen, J.(1826), *Der Isolierte Staat in Beziehung auf Landtschaft und National-ökonomie*, Hamburg. English translation by Wartenberg, C.(1966), *von Thünen's Isolated State*, Pergamon Press, Oxford.
- Truchon, M.(1987), *Theorie de l'Optimisation Statique et Differentiable*, Gaëtan Morin Editeur, Quebec, Canada.
- Yamashita, S.(1988), "Some Studies of Heat Island in Japan: With Special Emphasis on the Climatological Aspects," *Geographical Review of Japan*(Ser. B), 61, 1 13.
- 小澤徹三・大内千秋・吉田祐介(2005), 「地球温暖化抑制策としての道路緑化の効果と展望」, 『高速道路と自動車』48, 58 64.
- 神田学・森脇亮・高柳百合子・横山仁・浜田崇(1997), 「明治神宮の森の気候緩和機能・大気浄化機能の評価(1)1996年夏期集中観測」, 『天気』, 44, 713 722.
- 齋藤武雄(1992), 『地球と都市の温暖化』, 森北出版.
- 齋藤武雄(1997), 『ヒートアイランド』, 講談社ブルーバックス.
- 齋藤武雄(2005), 「快適で安心な都市を構築するためのエネルギー・環境技術 - ヒートアイランドを軽減するための自然エネルギーを活用しよう - 」, 日本学会会議環境工学講演会, 東京, 2月.
- 齋藤武雄, 伊藤聡, 山田昇(2006), 「都市街路空間の熱環境計測とヒートアイランドシミュレー

- ション」,『日本ヒートアイランド学会設立記念特集号』, 30 42.
- 佐藤公敏(2007a),「東京メトロポリスのヒートアイランド」,『立教経済学研究』, 60, 125 145.
- 佐藤公敏(2007b),「公共財」,「外部性, 外部経済」,『現代倫理学辞典』所収, 弘文堂, 106 107, 263 264.
- 佐藤公敏(2007c),「ヒートアイランドの経済学～微気候を改善して快適に真夏を乗り切る(個人的防暑)の方法」,『経済セミナー』, 7月号, 日本評論社.
- 鈴木路子編(1995),『くらしの科学としての人間環境学』, 福村出版.
- 成田健一・三上岳彦・菅原広史・本條毅(2004),「新宿御苑における蒸発効率と温熱環境の実測」,『環境情報科学論文集』18, 253 258.
- 野上加代・嶽山浩志(2005),「学校内の巨木におけるチョウとトンボの出現と巨木の温度環境との関係について」,『環境情報科学論文集』19, 19 24.
- 平野勇二郎, 新津潔, 大橋唯太, 一ノ瀬俊明(2004),「高アルベド塗料を塗布したコンクリート面の表面温度と熱収支の観測」,『環境情報科学論文集』18, 247 252.
- 福井英一郎・和田憲夫(1941),「本邦の大都市における気温分布」,『地理学評論』17, 354 372.
- 藤原宣夫(2004),「都市緑化によるCO₂削減量の評価 - 東京都豊島区におけるケーススタディ」,『環境情報科学論文集』18, 241 246.
- 本條毅, 菅原広史, 三上岳彦, 成田健一, 桑田直也(2000),「新宿御苑のクールアイランド効果の実測」,『環境情報科学論文集』14, 273 278.
- 森山正和編(2004),『ヒートアイランドの対策と技術』, 学芸出版社.
- ジャン・ジャック・ラフォン著, 佐藤公敏訳『不確実性と情報の経済学』, 東洋経済新報社, 1992年.