

下水再利用水を用いた空調システムの導入可能性と熱環境改善効果の解析

ー 建物情報に基づいた東京都区部におけるケーススタディ ー

Analysis of air-conditioning system using reclaimed wastewater and its effect on heat environment improvement

ー A Case study of using building information of Tokyo 23 wards -

平松 あい*

花本啓祐*

荒巻俊也**

Ai HIRAMATSU

Keisuke HANAKI

Toshiya ARAMAKI

ABSTRACT: Anthropogenic heat, one of the heat island's main factors, has temporal, spatial, and qualitative differences from energy consumption. Especially from the point of view of quality -sensible or latent-, aiming the reduction of anthropogenic heat, we can select some air-conditioning systems using water that reduce thermal influence on atmospheric environment. A certain amount of water is necessary for such air-conditioning systems, so using reclaimed wastewater from the sewage plants is assumed in this study. One of the systems is to remove heat to water directly, and another is to add cooling tower exhausting latent heat. First, heat discharge of typical buildings was calculated by DOE-2 (the building energy simulation model) based on the building characteristics. From its result, the distribution of heat discharge from buildings to atmospheric environment in Tokyo 23 wards was estimated based on GIS. Then some scenarios based on the air-conditioning systems indicated above are calculated and analyzed based on the relation between the amount of heat discharges from buildings and the available volume of supplying reclaimed wastewater for the improvement of heat environment.

KEYWORDS: heat island, DOE-2 (the building energy simulation model), reclaimed wastewater, sensible heat, latent heat

1 序論

都市のヒートアイランド現象は人間活動の変化による人工排熱量の増加が大きな原因とされている。最近ではOA機器の普及や顕熱型空調機器の増加によりさらに人工排熱は増加傾向にあり深刻な問題となっている。ヒートアイランド現象の解析に用いる人工排熱量については、これまで一般的にエネルギー消費量をそのまま用いたり、それにCOPなどの原単位をかけて用いていた(一ノ瀬¹⁾)¹⁾が、エネルギー消費量と人工排熱量との間にはいくつかの相違点が存在する(葛原、水野ら²⁾)²⁾。エネルギー消費と熱排出の時間的ずれや位置的なずれが存在すること(時間特性、空間特性)や、また熱は潜熱と顕熱(質的特性)の形態に分けられることである。よって人工排熱量の削減を考えるとときには、人工排熱そのものを減らす方法の他に人工排熱の外気温への影響を減らし寄与を軽減する方法があるといえる。ヒートアイランド現象で問題になる夏期のエネルギー消費量のうち建物から熱を排除する空調システムがその大部分を占めているが、特にこの熱の質的特性に目を向け、水を媒体として熱負荷を外気温に影響を与えないで排出する空調システムを選択する(西村・中村ら³⁾、渡辺・尾島ら⁴⁾、下田ら⁵⁾)³⁾により、ヒートアイランド現象の軽減をはかることができる。ここで重要な媒体である水はある程度の水量が確保されなければならない、下水処理場の処理水を適用することも考えられる。下水処理水は現在おもにトイレの洗浄水、冷却水、親水用等に再利用されているが処理水のうちわずかな量である。本研究ではこの処理水を再利用して空調システムに用い、冷却塔を設置して潜熱で排熱するシステムと、熱を水に放熱して顕熱を大気中に出さずに排出するシステムを想定した。そしてその導入可能性を明らかにすることを目的として東京23区において建物からの排熱発生量と供給可能水量との関係から解析を行った。

* 東京大学大学院工学系研究科：Graduate School of Eng., Univ. of Tokyo.

** 東京大学先端科学技術研究センター：Research Center for Adv. Sci. and Technology, Univ. of Tokyo.

2. 研究の構成

まず建物レベルで空調システムの排熱特性を考慮した排熱シミュレーションを行った。このシミュレーションをふまえ、東京都 23 区の建物情報に基づいて区内の建物群からの大気環境への排熱量を算出する。再利用水を用いた空調システムに基づいて作成したいくつかのシナリオ別に東京 23 区での排熱発生量を算出し、再利用水を用いた空調システムの導入可能性を解析する。(図 1)

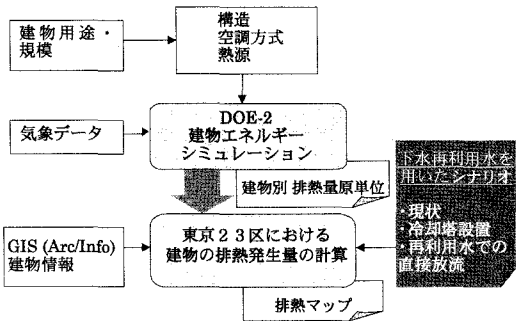


図 1 研究の構成

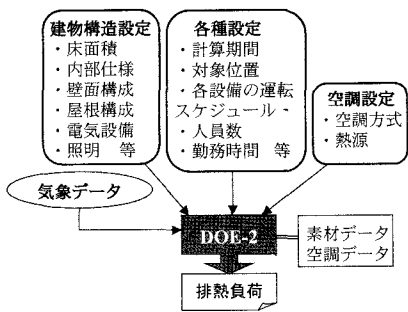


図 2 DOE-2 プログラム・フロー

3. 建物用途別排熱量計算 (DOE-2 エネルギーシミュレーション)

3. 1 モデルの設定

本研究では、建物レベルでの人工排熱のシミュレーションに DOE-2 を用いる。DOE-2 はアメリカの政府機関が開発したプログラムで、現在は民間の会社が商用化して開発を行っている。時間毎の建物のエネルギー利用量やエネルギーコストを、時間毎の気象情報と建物の構造・空調設備・各機器設備の情報に基づいて予測することができる。(図 2)

本研究での気象データは 1995 年大手町 (緯度 35.41、経度 139.46、海拔 35m) のものを用い、計算期間は気象データとあわせて 1995 年 1 年間とし、出力は最高気温日の排熱量をとした。建物の標準モデルは全国の建物の実態調査データから設定した^{6) 7)}。内部発熱量は建物内の人員数、照明、電気設備等の 1 日のタイムスケジュールの平均的なものを適用している⁸⁾。建物の空調方式は表 1 のように設定した⁷⁾。

表 1 建物モデルの空調方式設定

建物モデル	延床面積 (m ²)	空調方式
事務所	5000-10000	空冷ヒートポンプパッケージ方式
	10000-	直焚吸収式冷温水機
商業施設	5000-10000	空冷ヒートポンプパッケージ方式
	10000-	直焚吸収式冷温水機
戸建住宅	all	空冷ヒートポンプパッケージ方式
集合住宅	all	空冷ヒートポンプパッケージ方式

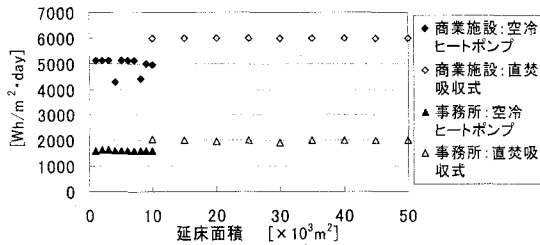


図 3 空調方式別延べ床面積当りの排熱量

3. 2 シミュレーション結果

同じ空調システムで規模を変えた場合について、図 3 に示した。これらから延床面積は 2 倍～10 倍違うものがあるにもかかわらず、同じ空調方式を使った場合に排熱量はほぼ同じ値をとっていることがわかる。空冷ヒートポンプパッケージ方式と直焚吸収式では常に直焚吸収式が上回っている。2つのグラフから、排熱量は建物規模よりも空調設備の種類によって大きく影響を受けることがわかった。

建物用途による排熱量の違いであるが、先の結果を踏まえ、事務所と商業施設で 2つのシステムの境界に

ある延床面積 10,000m²の建物を例にとって時間帯ごとの延べ床面積あたり排熱量を比較してみる(図4)。空冷ヒートポンプパッケージ方式と直焚吸収式では稼動時間中は大体 50W/m²・h ほど吸収式の方が高い。これはガスを用いる吸収式は COP が低いため(約 0.8)、エネルギー消費量が大きくなることによるものであろう(ヒートポンプの場合 COP は 3~4)。住宅は戸建て住宅とマンション(共にファミリータイプ)の排熱量を計算した。事務所や商業施設に比べ排熱時間帯は長いが排熱量は最も少なく(およそ事務所建築の 2 分の 1)変動が少ない。

空調設備の排熱方式に着目すると空冷ヒートポンプパッケージ方式と直焚吸収式では排熱量そのもの(絶対量)は直焚吸収式の方が大きくなる。しかし空冷ヒートポンプパッケージ方式は、空気対空気の熱交換となりほとんどが顕熱で外気へと放出されて気温上昇へ寄与する。逆に絶対量が大きい直焚吸収式では冷却塔をつけて空気対水で熱を放熱するシステムを選ぶことができる。この場合、大部分を潜熱として排熱することによって周辺気温への影響を大幅に軽減することが可能になる。

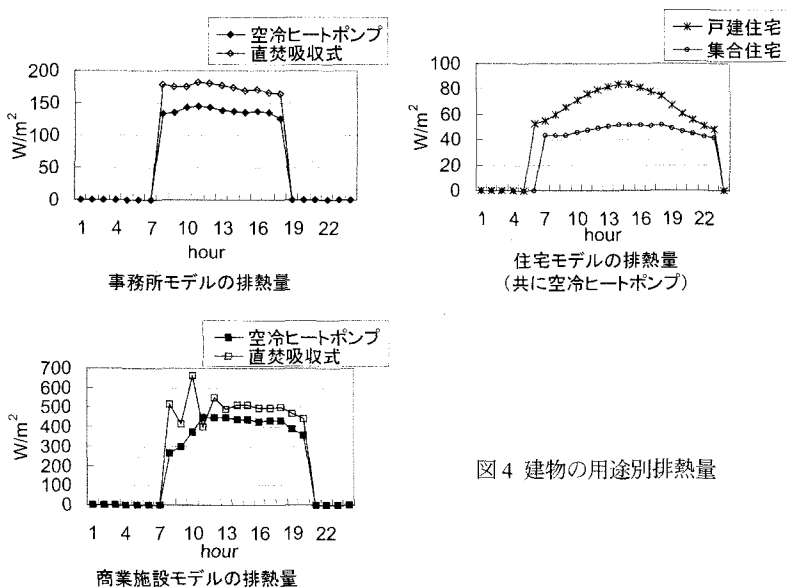


図4 建物の用途別排熱量

4. 東京 23 区でのシナリオ別排熱発生量

4. 1 東京 23 区の総排熱量、事務所・商業施設の排熱量

前章では DOE-2 を用いて建物レベルでの排熱量を計算し、建物用途、規模とそれに伴う空調設備による違いを比較した。この章では、GIS (地理情報システム) にある東京都区部内の建物情報 (利用用途、床面積、座標) を利用し、前章で求めた排熱量を原単位として実際の建物情報に入力して区部での人工排熱発生量を算出する。東京 23 区の建物個数は住宅兼商店も含めると住宅が大部分 (約 80%) を占め、住宅と事業系施設を合わせると 90% 近くを占める。

まず東京 23 区での建物群の人工排熱量を東西 2.5km×南北 1.5km のメッシュ毎に算出した。図 5、6 をみると東京 23 区では新宿、渋谷、銀座、丸の内、神田付近で 5,000[MWh/day・mesh] 以上の大きい値を示し、次いで区部の中心部とその付近で排熱量が 3,000~5,000[MWh/day・mesh] と大きく、中心部から遠くなるにつれて排熱量が減っている。図 6 から、区部の中心部の排熱量は大部分が事務所・商業施設によるものであることがわかる。中心部から離れるにつれて住宅が多く存在するようになるため事務所・商業施設からの排熱発生

量は相対的に小さくなる。

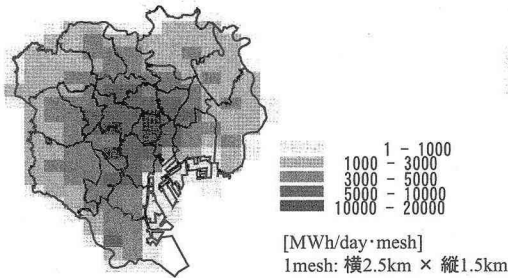


図5 総排熱量

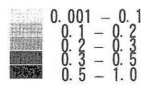


図6 事務所、商業施設の排熱量とその割合

4. 2 下水再利用水を用いた空調システムのシナリオ設定

以下のシナリオ評価では、下水処理場の高度処理水を用い、冷却塔での潜熱放熱、あるいは水への直接放熱を行う空調システムを導入することによってヒートアイランド現象を軽減することを考える。対象建物はこれらのシステムの導入可能性を考えて、事務所と商業施設とする。空調用水として利用可能な処理水の水量としては、各下水処理場の処理水量の晴天時日平均下水量（1991-1995年）の平均値（図7）を用いる。かく下水処理場の位置は図8に示すとおりであるが、1995年の時点を基準にし、有明下水処理場はここでは芝浦下水処理場に、また、中野下水処理場も水量的にわずかであるため落合下水処理場に含まれるものとして設定する。

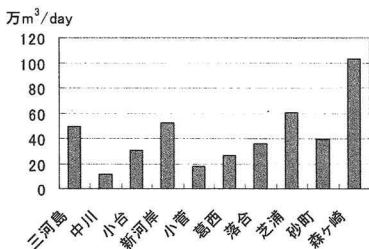


図7 晴天時日平均下水量（'91-'95年平均）

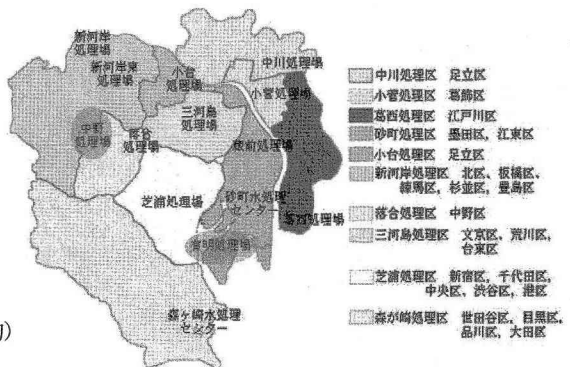


図8 東京都23区の下水処理場の位置（東京都下水道局）

吸収式に冷却塔をつけた場合（今回は事務所・商業施設の延床面積1万m²以上のものに設置）、顕熱が5

～20%、残りは潜熱での放熱となる（中村ら）。ここで潜熱85%とした場合、排熱状況は図9のようになり、実際に外部環境に影響を与える熱は住宅と同程度まで減少する。実際のエネルギー消費量は空冷ヒートポンプパッケージ方式より吸収式の方が大きいですが、潜熱で放出することにより外気温への影響は顕熱で出す空冷ヒートポンプパッケージ方式の方がはるかに大きくなる。

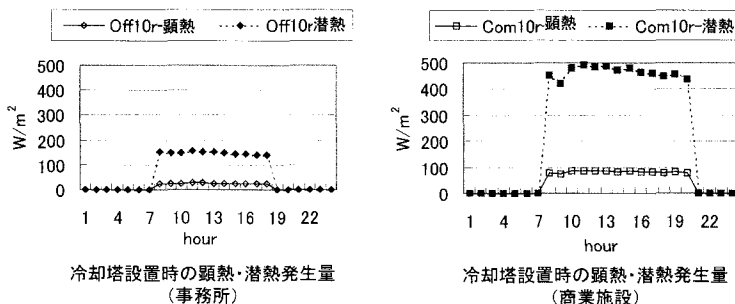


図9 冷却塔設置時の排熱特性による排熱発生量の比較

また下水再利用水を直接放熱に用いる場合は、顕熱は0%になる。利用可能な処理水量が十分あれば、冷却塔を設置する空調システムよりも直接放熱の方が外気温上昇に寄与しないという面ではよい。このシステムでは必要な水量が多くなることもあって、処理場あるいは基準点として設定した位置を中心にその周りにある事務所と商業施設に適用することにする。冷却塔は1万m²以上の建物にしか適用しないのと比べると、メッシュ内で適用できる建物の数も増えるため効率的である。水への放熱による水温上昇についてその許容上昇温度を t (°C) としてそれに基づいて空調システムに必要な水量を計算し、利用可能な処理水量との関係から適用範囲が決定されるようにする。

4. 3 シナリオ別排熱発生量の算出 (図10)

(1) 延床面積1万m²以上の事務所、商業施設に冷却塔を設置した場合

排熱量の大きかった区部の中心部の顕熱発生量が大きく削減された。その分の湿度上昇が考えられるが、東京を含め全国十数箇所の都市では気温上昇と水蒸気圧低下の2つの効果があわさり相対湿度は年々低下していることが確認されており、ヒートアイランドと共に都市の乾燥化が進んでいるとされる（中村ら）ため、乾燥化を防ぐ意味もあると考えられる。区部の中心部から離れるにつれ削減率は減少して20%以下になっている。これは事務所・商業施設が周辺部において少なくなるからである。

(2) 処理場を中心に再利用水を直接放熱に用いた場合 ($t=1^{\circ}\text{C}$ 、 3°C 、 5°C)

許容上昇温度 t が高くなるにつれて水に放熱できる排熱量は増え、23区の北側と南側で排熱削減が見られるメッシュが多くなり、削減率も30%を超えるところもある。しかし、適用する地域が拡大するにつれ処理場からの距離が遠くなり、大量の水を運搬しなくてはならないため効率が悪くなると思われる。また、区部全体で見ると、このシステムでの必要水量が非常に大きいと排熱量が多い区部の中心部には適用できず、依然顕熱のまま排出されることになり都心部でのヒートアイランドの軽減という点では効果は小さくなる。

(3) 再利用水への直接放熱と冷却塔を混在させた場合 (小台・三河島・小菅・中川： $t=3^{\circ}\text{C}$ 、新河岸・芝浦・森ヶ崎・砂町・葛西： $t=8^{\circ}\text{C}$ 、落合：冷却塔の補給水)

河川沿いにある殆どの処理場において許容上昇温度を 3°C 、東京湾沿いの処理場では 8°C として計算を行った。冷却塔を設置することにより排熱量の高い区部の中心部とその付近で顕熱発生量が大幅に減っている。また周辺部では直接放熱を適用することで、冷却塔のみを全体に導入した場合と比べて集中的に排熱量を削

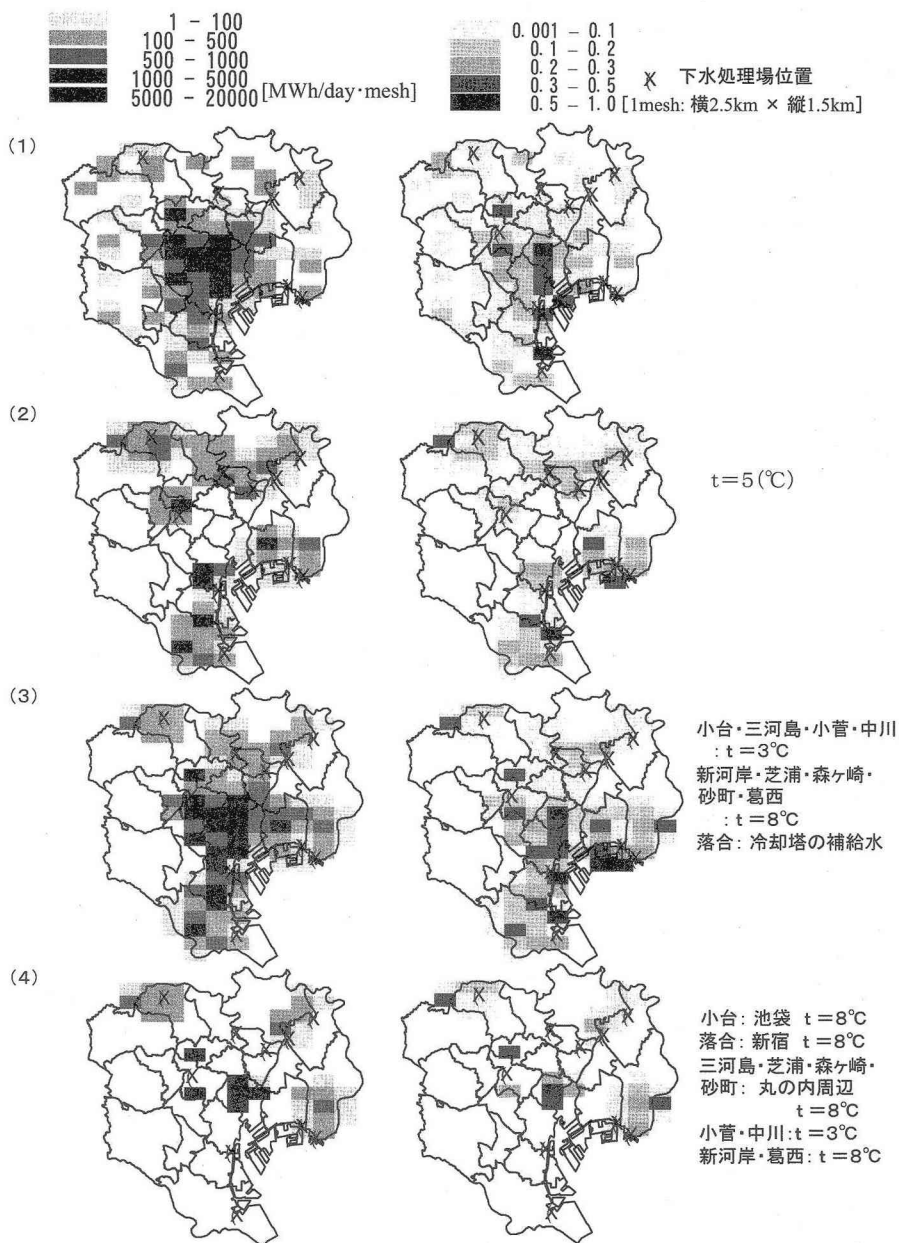


図10 シナリオ(1)－(4)の結果 (左:排熱削減量、右:総排熱量に対する削減率)

減できており水の運搬を考えると効率性も改善されていると思われる。

(4) 排熱量の多い区域で再利用水への直接放熱をした場合

これは排熱量の大きい新宿、池袋、丸の内周辺を中心に直接放熱を行った場合を計算した。水量の制限から限られた部分しか削減できないが、処理場の再利用水を最大限利用した場合の結果なので排熱発生量の削減量は総量としては他の直接放熱の場合と同じになる。この場合、よりコンパクトで集中した適用範囲になる方がより効率的になるといえる。本来は処理場に近いところが好ましいが、排熱量削減の必要性という観点から都心部で行うことが重要な意味をもつと考えられる。東京都においては、排熱が集中している地域と処理場が存在する地域が一致しないためにこれらの要素を考えながら最適なところを選んでいく必要がある。

5. まとめ

本研究より、建物からの排熱量は規模より空調システムによる発生量が大きく、人工排熱の発生量を考える際は空調システムの排熱特性を考慮することが重要であることがわかった。

また建物群での排熱発生量削減の需要と水量の供給との関係で見た場合、再利用水を直接放熱に用いる場合に顕熱削減量が大きくなり、水量が足りる場合には排熱量が大きいところへ集中的に持っていくほうがよい。しかし、建物群の排熱量の分布が広範囲に渡り直接放熱のシステムでは水量が足りない場合（今回の東京 23 区の中心部）には冷却塔を用いることを検討する必要がある。

今後の課題として、再利用水を用いた空調システムとしては、直接放熱に利用した後の水の行き先やそこでの影響の検討、運搬時のコストや環境影響の検討などがある。また熱の排出時以降の都市の熱環境の推移を解析し、顕熱と潜熱の違いを考慮した人工排熱の削減が都市の熱環境に与える影響についての研究が残されている。

【参考文献】

- 1) 一ノ瀬俊明（国立環境研究所地球環境研究センター）：東京 23 区の人工排熱(エネルギー消費)時空間分布
- 2) 葛原浩美、水野稔：建物のエネルギーシステムの廃熱特性の予測に関する研究、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集、209-212、1990
- 3) 西村浩一、中村泰人：空調システムによる暖冷房負荷の外気への放熱特性、日本建築学会計画系論文集、第 498 号、81-88、1997
- 4) 渡辺浩文、尾島俊雄：河川水熱利用地域冷房施設の大気への熱的影響に関する研究、日本建築学会計画系論文集、第 460 号、61-69、1994
- 5) 亀谷茂樹、水野稔、下田吉之、他：空調システムをもつ建物からの熱環境負荷に関する研究（第 2 報）、空気調和・衛生工学会論文集、No.64、49-59、1997
- 6) 日本建築学会、地球環境委員会、LCA 指針策定小委員会：建物の L C A 指針(案)～地球温暖化防止のための LCCO₂を中心として～、丸善、1999
- 7) 建築設備技術者協会：建築設備士 1989.12、1994.12、1997.12
- 8) 尾島俊雄研究室：建築の光熱水原単位、早稲田大学出版部、1995