

水熱エネルギーを利用した地域冷暖房システムによる排熱・排ガスの削減効果の算定
— 2010年の東京都23区を例として —

Introduction of District Heating and Cooling System using Thermal Energy of River and Sewer Water
into 23 Wards of Tokyo in 2010 for Reduction of Exhaust Heat and Gas Release

河原能久¹

末次忠司²

小林裕明²

木内 豪²

Yoshihisa KAWAHARA

Tadashi SUETUGI

Hiroaki KOBAYASHI

Tsuyoshi KINOUCHI

ABSTRACT; Effects of district heating and cooling system (DHC) introduced into 23 wards of Tokyo as of 2010 are discussed in terms of reduction of anthropogenic heat, CO₂ and NO_x emission which have degraded urban and global environment. The DHC in this paper utilizes thermal energy of urban river and sewer water using water heat pump technology. Based on the estimation of the thermal energy available, energy demand, districts where DHC may be introduced, we evaluate reduction of energy consumption, exhaust heat, CO₂ and NO_x release. It is found that the areas with DHC the annual energy consumption can be decreased by 29%, anthropogenic heat release by 13%, CO₂ and NO_x emission by 40% and 43%, while the reduction effects are limited because many high energy consumption districts do not allow the DHC due to the lack of water resources.

KEYWORDS; DHC, anthropogenic heat, energy consumption, CO₂ emission, Tokyo

1. はじめに

都市における社会・経済活動の活発化に伴い、都市環境は大きく変貌してきている。国内外を問わず多くの都市においてヒートアイランド現象が顕在化しつつあり、有効な対策を施すことが必要な状況に至っている。また、都市でのエネルギー消費の増大や二酸化炭素等の温室効果ガスの排出量の増加は、都市の熱環境のみならず地球環境にまで影響を及ぼしており、省エネルギーの推進や高効率システムの導入等による効果的な対策を行うことが急務となっている。

一方、ヒートポンプを使用し温度レベルの低い未利用エネルギーを活用する地域冷暖房システム（DHC：District Heating and Cooling System）が検討されている^{1),2)}。そのシステムは、従来の空調機と異なり、直接大気に放熱しないため都市のヒートアイランドの緩和に寄与するとともに、建物用途が混在した都市では省エネルギー的にもスケールメリットを得やすく、人工排熱・大気汚染物質の排出を管理する上でも有効であると考えられている。三原³⁾は、河川水を利用した箱崎地区の地域熱供給プラントと下水処理水を用いた幕張地区の地域熱供給プラントに対して、1996年時点における省エネルギー効果（箱崎で約33%、幕張で約40%）とCO₂・NO_x排出量の削減（箱崎で約35%、幕張で約40%）の実績を報告している。

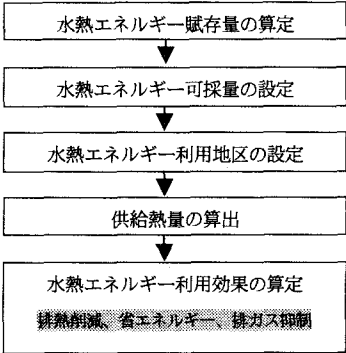
本研究は、建設省土木研究所の重点研究プロジェクト「都市空間におけるヒートアイランド現象の軽減に関する研究」の一部であり、人工排熱の中で大きな割合を占める冷暖房需要に対して、都市における河川や下水の有する水熱エネルギーを活用することによって、人工的な排熱や排ガスをどの程度抑制することが可能かを把握することを目的としている。本研究における検討内容とその手順を図-1に示す。2010年時点で

¹香川大学工学部 Department of Safety Systems Construction Engineering, Kagawa University

²建設省土木研究所 Public Works Research Institute, Ministry of Construction

の東京都 23 区に DHC を導入することを想定して、水熱エネルギーの賦存量の推定、利用可能なエネルギー量（可採量）の設定、地域冷暖房システムの導入が有効な地区の特定、地域冷暖房システムの導入による省エネ効果、排ガスや人工排熱の抑制効果の推定を行っている。これまでに 500m メッシュ単位で現在および 2010 年における人工排熱の時空間分布を推定している^{4),5)}が、本研究はそれらの結果を用いて検討を進めたものである。

本研究では水熱源として、下水（下水処理場、污水ポンプ所、下水幹線）、河川水（荒川、隅田川、神田川、日本橋川、渋谷川）、地下水を対象としているが、紙面の制約上、下水幹線と地下水の利用に関する検討結果は省略する。



図－1 水熱エネルギー利用効果の算定手順

2. 水熱エネルギーの賦存量の算定

2. 1 下水処理場⁶⁾

23 区では、現在 12 の下水処理場が稼働しており、将来計画ではさらに 2 箇所の下水処理場（台東区：蔵前処理場、北区：新河岸東処理場）を建設する予定である。処理場における水熱エネルギーとしては、流入下水（未処理水）よりも機器の耐食・耐久性の面で有利な二次処理以上の処理水の利用を想定した。下水処理場の水熱エネルギー賦存量は次式により算定した。

$$Q = 4.186 \cdot V \cdot \Delta t \cdot c \tag{1}$$

ここで、 Q ：水熱エネルギー賦存量(単位：MJ)、 V ：高級または高度処理水放流量(m^3)、 Δt ：ヒートポンプ設計温度差（ $=5^\circ\text{C}$ ）、 c ：水の比熱（ $=1.0 \text{ (Mcal/ m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$ ）である。なお、将来の放流量については、全処理場の合計処理能力の将来増加率（現状 6,384 千 $\text{m}^3/\text{日} \rightarrow$ 将来 6,894 千 $\text{m}^3/\text{日}$ ：約 1.08 倍）を基に、将来の全処理場からの放流量を算出し、その全放流量を現状の処理区別放流量の比率と処理場別放流量の比率を用いて配分することにより、将来の処理場別放流量を設定した。

2. 2 下水ポンプ所⁶⁾

ポンプ所については、定常的なエネルギー利用が可能な污水ポンプ所を対象とし、雨水ポンプ所は除外した。23 区では現在 55 の污水ポンプ所が稼働している。污水ポンプ所の水熱エネルギー賦存量は式(1)により算出した。ただし、 V ：污水揚水量、 Δt ：ヒートポンプ設計温度差（ $=5^\circ\text{C}$ ）である。将来の施設数は現状維持とし、将来の揚水量は前述の下水処理場での処理量の増加率（約 1.08 倍）を用いて想定した。

2. 3 河川

対象河川は、荒川、隅田川、神田川、日本橋川、渋谷川の 5 河川とした。河川の水熱エネルギー賦存量は、年間を通じて低水流量（または平常時の観測流量の平均値）の全量の温度差を利用すると想定し、式(1)により算定した。ただし、 V ：河川水量、 Δt ：ヒートポンプ設計温度差（ $=5^\circ\text{C}$ ）である。将来の河川流量については現状維持と仮定し、河川毎に水熱エネルギー賦存量を推計した。

2. 4 水熱エネルギー賦存量の比較

水源別の年間水熱エネルギー賦存量は、表－1 に示すように、下水処理場が最も大きく、河川、污水ポンプ所と続く。ただし、ここでは合計量を示しており、1 施設における賦存量としては、下水処理場（森ヶ崎

表－1 各水熱エネルギー賦存量の比較（23 区全体、単位：TJ/年）

水熱源	下水処理場	污水ポンプ所	河川	建物熱需要量
賦存量	34,925	11,755	12,666	218,744

水処理センター東処理施設の 6,110TJ/年) が最も大きい。

3 水熱エネルギーの可採量の設定

3. 1 可採量設定の方針

水熱エネルギー利用を考える場合には、水源の水量変動や取水上の制約条件、及び需給間バランス等を考慮することが必要である。可採量は日量単位で把握することとし、冬期・通常期別に設定するとともに、年間を通じて安定的に利用できる水量や取水制限等を考慮して設定した。

1) 下水処理場

日可採量[GJ/日] = 処理場別賦存量[TJ/年] × 最低日放流量比率 (冬期・通常期別) × 10³

- ・ 高度処理水の年放流量に対する最低日放流量比率を設定し、処理場別賦存量から日可採量を求めた。

2) 汚水ポンプ所

日可採量[GJ/日] = 汚水ポンプ所別賦存量[TJ/年] × 最低日揚水量比率 (冬期・通常期別) × 10³

- ・ 汚水ポンプ所における年間汚水揚水量に対する最低日揚水量比率を設定し、将来の汚水ポンプ所別賦存量から日可採量を求めた。

3) 河川

日可採量[GJ/日] = 利用箇所取水限度量[m³/日] × 利用温度差 (冬期・通常期別) × 4.186 × 10³

- ・ 水熱利用の事例における取水量を参考に、利用箇所当りの取水限度量を設定し、日可採量を求めた。
- ・ 利用箇所合計の可採量が河川毎の合計可採量を越えない範囲で、利用箇所数を設定した。
- ・ 利用水量は通年一定と仮定し、冬期・通常期別には利用温度差を変化させた (冬期 3℃、通常期 5℃)。

3. 2 水源別可採量の設定と分布

水源別・施設別に設定した水熱エネルギー可採量を表-2 に示す。水量変動や利用温度差を考慮した結果、冬期の日可採量は通常期に比べて低いこと、1 施設・利用箇所当りの可採量には大きな差があることが知られる。

図示はしないが、水源別の水熱エネルギー可採量の分布には次のような特徴がある。下水処理場は 23 区内に適度に分布するが、武蔵野台地を除いた河川または海沿いに位置している。他の水熱源に比べて施設当たりの可採量が大きく、周辺メッシュでの有効利用が期待される。一方、汚水ポンプ所については、分布の偏りが顕著であり区部の東半分へ集中している。熱量的には中・小規模の施設が多くなっている。河川については河川別の可採量と利用箇所当りの可採量を考慮すると、河川毎での利用地区数は制限されることになる。ちなみに荒川で 19 箇所、隅田川で 9 箇所、神田川と日本橋川は合わせて 10 箇所、渋谷川で 1 箇所程度となる。

表-2 各水源別水熱エネルギー可採量 (23 区全体)

	施設数	合計可採量(GJ/日)		施設別可採量(GJ/日)	
		冬期	通常期	冬期	通常期
下水処理場	15	61,978	70,546	49~11,298	86~13,061
汚水ポンプ所	55	20,503	23,027	1~2,738	1~3,141
河川	5	20,821	34,702	628(荒川、隅田川) 314(神田川、日本橋川) 260(渋谷川)	1,047(荒川、隅田川) 523(神田川、日本橋川) 434(渋谷川)

4 水熱エネルギー利用地区の設定

エネルギー需給間の位置的関係や熱量的バランス等を考慮し、水熱エネルギー利用地区を次のように設定

した。

- 1) 候補となるメッシュは、熱源水の搬送距離を考慮して水熱エネルギー源から周囲1メッシュの範囲内（1km以内）とする。ただし、河川や運河等により水熱源と分断されるメッシュは除く。
- 2) 熱量的バランスは将来の夏期冷房ピーク日を基準に考えるものとし、需要側は8月代表日の冷房需要量、水熱源側は通常期の可採量をもとに検討する。
- 3) 周囲1メッシュ範囲内での利用地区及び利用水源の設定に関しては、以下ように行った。
 - ・ 水熱源側から周囲1メッシュ範囲内のうち、大規模な開発計画のあるメッシュ（開発メッシュと呼ぶ）及び既存の地域冷暖房地区（DHCメッシュと呼ぶ）のみを供給対象とする。
 - ・ 水熱源別の優先順位を、下水処理場、ポンプ所、河川の順とし、利用地区の設定を行う。
 - ・ 周囲1メッシュ内に複数の開発メッシュまたはDHCメッシュが存在する場合は、可採量の範囲内で熱需要の高いメッシュから順次設定していく。

水熱源との位置的・熱量的バランスを検討した結果、図-1に示すように、水熱エネルギーの利用地区数は59メッシュ、利用箇所数は54箇所となった。なお、23区全体では2738メッシュある。

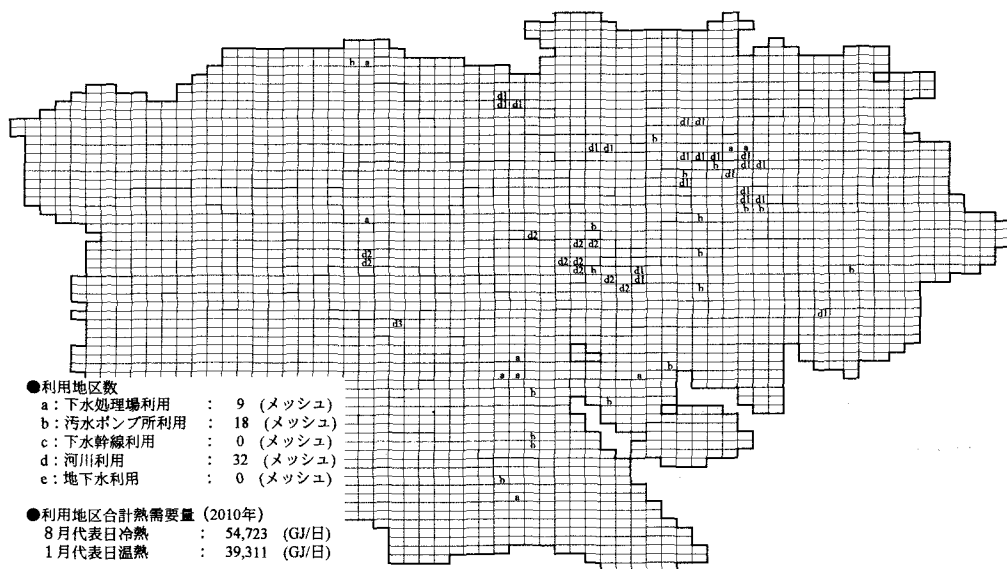


図-1 水熱エネルギー利用地区と水熱源

a: 下水処理場, b: 汚水ポンプ所, d: 河川(d1: 荒川・隅田川, d2: 神田川・日本橋川, d3: 渋谷川)

5 水熱エネルギー利用効果の算定

5.1 効果算定の手順

(1) 供給熱量の算定

各利用地区における月別の熱需要変動及び可採量をもとに水熱源ヒートポンプ（WHP）を介して製造可能な冷温熱量を把握し、利用地区別・季節別に両者を比較して実質的な供給熱量を求めた。また、それを積算して年間値を算出した。

可採量から製造可能熱量の算定及び熱需要量との比較による供給熱量の把握については、月別の日量単位の熱量を基準とした。また、可採量をもとに製造する熱については、23区全体の月別冷温熱需要量の比率を

考慮して、5月～10月期は専ら冷熱製造、11月～4月期は温熱製造のみを行うこととした。

(2) 燃料消費量の算定

燃料消費量については、WHP 利用に必要な電力消費量及び水熱エネルギー利用後に不足する熱需要分を従来システムで補うのに必要な各種燃料消費量を算出した。なお、燃料消費量に、燃料別の1次エネルギー換算値、CO₂排出原単位、NO_x排出原単位(表-3)を掛けることにより、省エネルギー量及び環境負荷削減量を算定した。

表-3 燃料種別の各種原単位

	燃料消費量 換算値	1次エネルギー 換算値	CO ₂ 排出 原単位	NO _x 排出 原単位	備 考
電力	1/860 kWh/kcal	2400 kcal/kWh	0.326 kg-CO ₂ /kWh	0.143 g/kWh	H8東京電力実績 (CO ₂ 、NO _x は全電源ベース)
都市ガス	1/9940 Nm ³ /kcal	11000 kcal/Nm ³	2.355 kg-CO ₂ /Nm ³	1.208 g/Nm ³	東京都環境保全局資料 (NO _x :60ppm,O ₂ =0%)
灯油	1/8300 m ³ /kcal	8800 kcal/m ³	2.488 kg-CO ₂ /m ³	1.38 g/m ³	東京都環境保全局資料 (NO _x :80ppm,O ₂ =0%)
LPG	1/11460 kg/kcal	12000 kcal/kg	3.007 kg-CO ₂ /kg	0.89 g/kg	空調調和衛生工学便覧 (CO ₂ は環境庁資料より推計)
重油	1/8600 m ³ /kcal	9200 kcal/m ³	2.623 kg-CO ₂ /m ³	1.413 g/m ³	東京都環境保全局資料 (NO _x :80ppm,O ₂ =0%)

5. 2 供給熱量

月別・利用地区別の供給熱量を算定した。WHP による年間の供給熱量を集計した結果、冷熱 3,658TJ/年、温熱 3,673TJ/年であり、年間熱需要量に占める供給熱量(冷温熱合計)の割合は、利用地区においては約 64%、23 区全体に対しては約 3.4%である。なお、冷温熱製造(供給)のために WHP で消費した電力量は 529GWh/年である。

5. 3 燃料消費量

供給熱量の製造に要する WHP 消費電力量及び水熱利用後に不足する熱需要量を従来システム(熱源機器)により賄った際の燃料消費量について、熱源機器の燃料消費効率を用いて、冷房暖房給湯需要別、住宅非住宅需要別に計算した。23 区全体の年間建物燃料消費のうち、都市ガス、灯油、LPG、重油についての削減量は「水熱利用なし」の場合に比べて 2～4%程度となった。

5. 4 省エネルギー及び環境保全効果

供給熱量と燃料消費量の算定結果に基づき、2010 年時点における水熱エネルギー利用による省エネルギー効果(1次エネルギー削減効果)、環境保全効果(CO₂、NO_x排出量の削減効果)を算定した結果を表-4 に示す。水熱エネルギー利用地区における効果をみると、水熱エネルギー利用前後での省エネルギー率は約 29%、CO₂、NO_x削減率については約 40%、43%と高い値を与えている。一方、23 区全体でみると、水熱エネルギー利用による年間の省エネルギー効果は 1.4%、CO₂、NO_x排出量の削減効果はそれぞれ 1.9%、2.1%の削減が期待される。なお上記の算定においては、電気式の熱源機器の利用に伴う発電所での燃料消費、環境負荷(CO₂、NO_x)排出分を考慮している。

5. 5 排熱量の削減効果

WHP 利用分の排熱(水熱利用による供給熱量分からの排熱)と従来のシステム利用分の排熱(水熱利用後の不足熱量分からの排熱)の双方を考慮した建物排熱量を計算し、「水熱利用なし」の場合と比較して排熱量の削減効果を把握した。なお、将来の建物「総エネルギー需要ベース」とそれから照明動力等の電力需要分を除く「熱需要ベース」での効果を評価対象とした。

WHP 利用分からの排熱については、5月～10月の冷熱供給期では水源をヒートシンクとして利用するた

表－4 水熱エネルギー利用による省エネルギー・環境保全・排熱削減効果

		利用地区	23区全体
		水熱利用なし／あり	水熱利用なし／あり
1次エネルギー消費量	(TJ/年)	14,788／10,551	296,127／291,890
省エネルギー率	(%)	28.7	1.4
CO ₂ 排出量	(t-C/年)	187,359／112,729	3,878,169／3,803,540
CO ₂ 削減率	(%)	39.8	1.9
NO _x 排出量	(t /年)	337／194	6,937／6,793
NO _x 削減率	(%)	42.5	2.1
建物排熱量 (熱需要ベース)	(TJ/年)	9,422／6,994	179,961／177,533
建物排熱量 (総エネルギー需要ベース)	(TJ/年)	18,817／16,389	329,035／326,607
排熱削減率 (総エネルギー需要ベース)	(%)	12.9	0.7

めに、大気への排熱量はゼロとなる。一方、11月～4月の温熱供給期では水源をヒートソースとした取得熱と投入電力の合計（＝供給温熱量）が大気への損失熱となるため、排熱量＝供給温熱量であると考えられる。

結果を表－4に示す。水熱エネルギー利用地区に対象を限った場合の効果は、排熱削減率は、熱需要ベースで約26%、総エネルギー需要ベースで約13%となる。23区全体での年間建物排熱量に対する排熱削減率は、熱需要ベースで1.3%、総エネルギー需要ベースで0.7%である。エネルギー消費量の極めて高い地区（都心や副都心など）における水熱エネルギー利用が限られているため、23区全体での削減効果は顕著ではなくなっている。

6 おわりに

2010年の東京都23区に水熱エネルギー利用の地域冷暖房システムを導入した場合について、その省エネルギー・環境保全・排熱削減効果を算定した。本研究ではコスト面の検討を行っていないが、水源からの可採量や利用地区の設定、需給間の熱量バランス等に関して現実性の高い検討を行った。

今後、地域冷暖房システムのコスト面の検討と気温緩和効果の算定を進め、ヒートアイランド対策としての有効性を明らかにする予定である。

参考文献

- 1) (社)日本地域冷暖房協会：地域冷暖房技術手引書，1997.
- 2) (財)日本地域開発センター：下水熱利用システム計画マニュアル，1998.
- 3) 三原一伸：都市域のエネルギー利用，雨水技術資料，第35号，43-51，1999.
- 4) 河原能久，小林裕明，末次忠司，木内 豪(1999)：東京都23区における人工排熱の時空間分布の推定，環境システム研究，Vol.27，715-720.
- 5) 河原能久，小林裕明，末次忠司，木内 豪(2000)：都市における人工排熱の時空間分布の推定－東京都23区の現在と将来－，土木技術資料，第42巻，第3号，44-51.
- 6) 東京都下水道局：東京都下水道事業年報，平成8年度，1998.