

(19) 都市における下水廃熱の利用性に関する研究

RECOVERABILITY OF WASTE HEAT FROM SEWAGE IN URBAN AREAS

三好 伸浩* 楠田 哲也* 井村 秀文*
Nobuhiro MIYOSI*, Tetsuya KUSUDA*, Hidefumi IMURA*

ABSTRACT; A huge amount of energy has been consuming in urban areas. Waste heat brought from consumed energy is in low quality with lower than 50°C and is discharged to either sewer or atmosphere. The recovery of waste heat from sewage is rather easy and is of importance to save energy and to depress the heat island phenomenon in urban areas. The amount of energy consumption and heat flux from heat sources and water supply to groundwater and wastewater treatment plants in Fukuoka were studied in detail. Waste heat transferred to sewer is 9% of the total amount of energy consumption and 37% of the amount of energy consumption by electricity only for water heating in midnight, municipal gas, and liquid petroleum gas in 1988. Recoverable waste heat with more than 5 °C temperature difference from that of atmosphere corresponds to 10% of the total waste heat flux to wastewater treatment plants.

KEY WORDS; waste heat, heat recovery, urban area, sewage, temperature

1. 序論

われわれの暮らしは、エネルギーの豊富な供給によって支えられており、食料生産、物質生産、快適環境の維持、交通体系などすべてエネルギーに大きく依存している。このため、大量の化石燃料が使用され、エネルギー枯渇問題や酸性雨や地球の温暖化に代表される様々な環境問題が起こっている。供給されるエネルギーのすべてを有効に利用することは不可能で、特に暖房や給湯などに使用された熱エネルギーや火力発電の冷却水に移行した熱は利用後はほとんどが廃熱として捨てられている。これらの大部分は50°C以下の低温廃熱であるが、この低温廃熱は様々な都市施設から発生し、温度レベルは低いとその量は膨大なものであり、非常に大きなエネルギーを持っている。このエネルギーを効率よく利用することができれば、都市で消費されるエネルギー量を減らすことができ、化石燃料使用などによる自然環境への影響を軽減することができると考えられる。都市で発生した廃熱は、暖房などの熱のように大気へ捨てられるものと、風呂の湯などの熱のように下水道や河川など水系へ捨てられるものとに分けられる。下水道の普及した都市では、水系へ捨てられる廃熱のほとんどが下水処理水に含まれることになる。¹⁾

本研究は、水系に捨てられる低温廃熱を取り上げ、都市で消費されるエネルギーのうち下水に捨てられる量を明かにし、ヒートポンプなどによる廃熱エネルギーの再利用の可能性を検討するものである。

2. 対象地域

本研究では昭和62年度の福岡市域を対象とした。この年度末の下水道普及率は75%（人口普及率）、下水処理人口は850,900人、処理面積は10,611haであった。また、水道普及率は98.6%であった。

* 九州大学工学部環境システム工学研究センター Institute of Environmental Systems, Kyushu University

3. 消費エネルギー量の検討

都市域で消費されるエネルギーとして、電力、都市ガス、LPG（液化石油ガス、プロパンガス）、LNG（液化天然ガス）、重油、軽油、灯油、揮発油（ガソリン）などが考えられる。このうち、民生用エネルギー源の大半を占めている電力、都市ガス、LPG、灯油についての消費エネルギー量の推定と、そのなかで熱エネルギーとして利用される可能性の高い深夜電力、家庭用の都市ガス、家庭用のLPGについての消費エネルギー量の推定を行った。

3.1 電力

福岡市の電灯、電力の使用量²⁾をもとにし、1kWhあたり860kcalとしてcalに換算した。深夜電力については、福岡市統計書のデータのその他の電力のうち九州電力の需要月報より農事、工事、事業用を250万kWhと推算して残りを深夜電力とした。

3.2 都市ガス

福岡市の月別都市ガス消費量²⁾をもとにし、発熱量は1m³あたり4,500kcalとして換算した。

3.3 LPG

LPGの月別消費量は不明であったが、LPGは都市ガスの未普及地区で使用されていると考え、都市ガスの消費量と熱量換算で同じ値であるとして推定した。

昭和61年10月より昭和62年9月までの1年間の福岡市内での都市ガス使用量は、311,542千m³であった。これは1m³あたり4,500kcalとすると1,400Tcalとなる。また、昭和61年10月より昭和62年9月までの1年間の福岡市内でのLPG販売量は108,554tであった。福岡市内で販売されたLPGがすべて福岡市内で消費されたと考えると、これは1kgあたり12,000kcalとすると1,300Tcalとなる。これは、都市ガスのおよそ93%の熱量となる。これより、LPGの消費エネルギー量は都市ガスの93%であるとした。

3.4 灯油

福岡県の月別灯油販売量³⁾を灯油販売額⁴⁾によって配分し、推定を行った。ただし、その区域で販売された灯油はその区域内で消費されたとし、販売量を消費量とした。発熱量は1ℓあたり8,700kcalとした。

3.5 消費エネルギー量

以上より推定した福岡市の電力、都市ガス、LPG、灯油の総消費エネルギー量を図-1に、深夜電力と家庭用の都市ガス、家庭用のLPGの消費エネルギー量を図-2に示す。これらは年間ではそれぞれ8,900Tcal、2,110Tcalとなる。

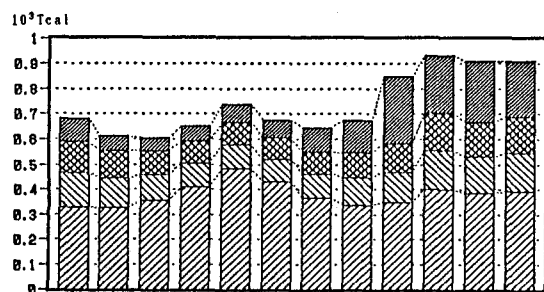


図-2 消費エネルギー量 (1)

■ 電力 ■ 都市ガス ■ LPG ■ 灯油

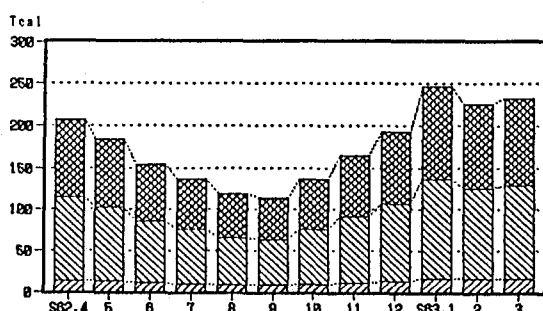


図-3 消費エネルギー量 (2)

■ 深夜電力 ■ 家庭用都市ガス ■ 家庭用LPG

4. 熱収支式

都市域での水収支は複雑であるが、これを簡略化した水収支モデルをもとに、上下水道、雨水、地下水を中心とした熱輸送モデルを考える（図-3参照）。

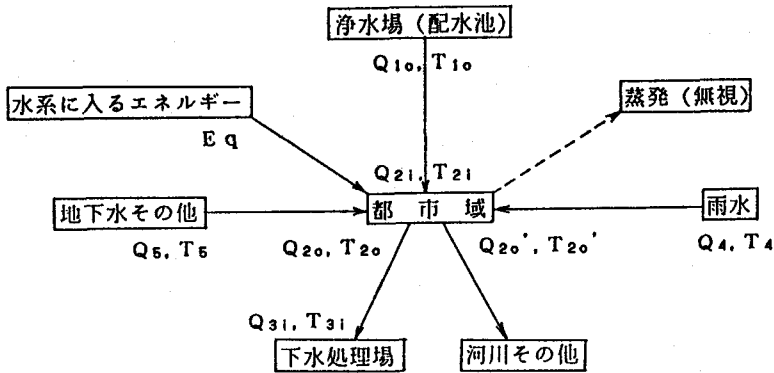


図-3 都市域の熱輸送モデル

これより都市域での熱収支式は

$$C_w Q_{21} T_{21} + C_w Q_4 T_4 + C_w Q_5 T_5 + E_q = C_w Q_{20} T_{20} + C_w Q_{20}' T_{20}' \quad (1)$$

で表される。ここで

E_q : 水系に入るエネルギー量

C_w : 水(汚水)の熱容量

Q_{10}, T_{10} : 浄水場から配水される水道水の単位時間当りの水量とその水温

Q_{21}, T_{21} : 都市に入ってくる水道水の単位時間当りの水量とその水温

Q_{20}, T_{20} : 都市を出る下水の単位時間当りの水量とその水温

Q_{20}', T_{20}' : 河川その他に流出する下水の単位時間当りの流量とその水温 ($T_{20} = T_{20}'$)

Q_{31}, T_{31} : 下水処理場へ流入する下水の単位時間当りの水量とその水温

Q_4, T_4 : 地下水その他の単位時間当りの下水道への流入水量とその水温

Q_5, T_5 : 下水道に流入する雨水の単位時間当りの水量とその水温

また、上水道管路内での水温の変化は、管内水温と地温との温度差に比例するとして、

$$T_{21} = (T_{10} - T_g) e^{-ht} + T_g \quad (2)$$

と表される。ここで

T_g : 地温

h : 熱伝導に関する係数

t : 水道管内での滞留時間

下水道管路内での水温変化も下水道管路内の場合と同様に

$$T_{31} = (T_{20} - T_g) e^{-h't'} + T_g \quad (3)$$

と表される。ここで

h' : 熱伝導に関する係数

t' : 下水道管渠における流下時間

式(1)(2)(3)を用いて水系に入るエネルギー量 E_q の推定を行うことにする。

5. 下水道に流入するエネルギー量の推定

5.1 浄水場からの配水によるもの

現在、福岡市に配水を行っている6カ所の浄水場の日データ(日単位の配水量と、配水池での水温)⁵⁾を用いた。なお、下原配水池では配水池の水温が測定されていないため、同じ牛頸浄水場から水を送られる夫婦石浄水場の配水池の水温と同じとした。また、端梅寺浄水場は原水の水温を用いた。各浄水場の毎日の(配水量)×(配水池の水温)の1カ月合計を1カ月の総配水量で割ったものを月平均水温とした。浄水場より配水された水は途中漏水などのため水量が減少するが、昭和62年の福岡市内への総配水量は134,337m³であり、この年の福岡市の総使用水量は121,318m³であった。²⁾これより全配水量のうち実際に使用されたの

は90.3%で、9.7%が損失したと考えることにする。

浄水場からの配水が下水道普及区域にのみ行われるとすると総配水量が浄水場からの配水量 Q_{10} となり、下水道普及区域への配水量を Q_{21} とすると、河川その他に流出する下水量 $Q_{20}' = 0$ となり、式(1)は

$$C_W Q_{21}' T_{21} + C_W Q_4 T_4 + C_W Q_5 T_5 + E_q' = C_W Q_{20} T_{20} \quad (1)'$$

と簡略化される。ここで E_q' は下水道に入るエネルギー量である。

5.2 地温の推定

現在、福岡管区気象台では地中温度の測定を行っていない。そのため、過去の気温及び地温のデータをもとに、気温、地温の変動を1年間を周期とした周期関数と考え、フーリエ解析によって各項ごとに気温を基準とした減衰比、位相遅れを求め、気温より地温を推定した。

地表面の温度を気温と等しいとした1次元熱伝導方程式より、気温を

$$U = \frac{U_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} U_n \sin\left(\frac{n\pi t}{p} - \alpha\right) \quad (4)$$

とすると、深さ z での地温は

$$T_s = \frac{U_0 a}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} U_n \exp\left(\frac{\sqrt{n\omega}}{k} z\right) \sin\left(\frac{n\pi t}{p} - \alpha - \frac{\sqrt{n\omega}}{k} z\right) \quad (5)$$

と表される。ここで $2p = 366$ (1年)であり、 $\omega = n\pi/p$ である。また、 k , a は係数である。

これらの式より、昭和34年から昭和38年までの気温と地下1mの地温のデータをもとに減衰比、位相のずれを求め、この結果より $k = 0.35$ とした。また、 a は、地温/気温の平均より $a = 1.11$ とした。ここで、 n は第4項までとした。

5.3 水道管内水温変化

水道管内での水温の変化は式(2)で表される。ここで、熱伝導に関する係数 h は昭和62年度の乙金浄水場の配水地と給水栓の月平均水温⁶⁾より $h = 0.048$ と決め、地温 T_s は気温より推定した地下1mの地温を用いた。また、管内の滞留時間 t は(配水管体積)⁷⁾/(配水量)より求めたが、浄水場から配水される水量と都市に入ってくる水量は途中の漏水などによって変化しているため、その両方より滞留時間を求め、平均値を t とした。年間平均はおよそ9時間30分である。浄水場から配水される水の水温 T_{10} は配水池の月平均水温を用い、月ごとに都市に入ってくる時の水道水の水温 T_{21} を推定した。

5.4 雨水量

合流式下水道の場合、雨水も下水道に流入する。この場合下水処理場へ流入した水の中には雨水も含まれることになる。流入する雨水の量を正確に知ることは不可能であるが、降水量と降雨後の下水処理場の流入水量の増加の関係より、福岡市の場合は(降水量)×(処理区域面積)の8%とした。また、水温は気温と等しいとした。

5.5 地下水その他

都市内では水道水の他に地下水、伏流水などが使われている。これらの使用量は分からないためすべてをまとめて地下水その他とした。この量は下水処理場へ流入した水量から対象区域の下水道普及区域に配水された水量と下水道に流入する雨水量を除いた残りの量とし、下水道管内に漏れて来る地下水もこれに含まれている。また、水温は地温に等しいとし、気温から推定した地下1mの地温を用いた。

5.6 下水処理場での流入下水

各家庭やビルなどで使用される水の量や使用用途は時刻によって違う。このため下水処理場へ流入する下水の水量と水温は1日の間、1カ月の間で常に変化している。1カ月の総流入量と水温の1カ月平均を単純に掛け合わせただけでは実際の流入水の持つ熱量との間に誤差が出て来ると思われる。このため、福岡市東部下水処理場の月データ、日データ、毎時間のデータより求まる熱量と月データより求まる熱量の間の補正を行った。

東部下水処理場では流入量は1時間単位で測定しているが、水温は1日1回午前9時にしか測定されていない。このため、1時間おきの流入水の水温を知るために東部下水処理場で実際に水温測定を行った。測定は、東部下水処理場の最初沈澱池入口の手前と最終沈澱池出口の2カ所において平成元年11月28日より12月25日まで1時間おきに行った。その結果、

$$\frac{1 \text{ 日毎の (水温) } \times (\text{流入水量}) \text{ の 1 日合計}}{(1 \text{ 日の総流入水量}) \times (\text{午前9時の流入水温})} = 1.05$$

であった。これより、実際の流入水の持つ熱量は下水処理場の日データより求まる値の1.05倍とした。また、昭和60年度から昭和63年度までの4年間の日データと月データより

$$\frac{(1 \text{ 日の総流入水量}) \times (\text{午前9時の流入水温}) \text{ の 1 カ月合計}}{(1 \text{ カ月の総流入水量}) \times (\text{月平均水温})} = 0.999$$

であった。これより、日データから求めた流入水の熱量と月データから求めた熱量との間に誤差は無いとした。以上より、実際の流入水の持つ熱量は月データより求まる熱量の1.05倍とした。

福岡市内にある8カ所の下水処理場の月データ（月総流入量と月平均水温）⁸⁾をもとに解析を行い、各下水処理場の流入下水量の合計を福岡市の流入下水量としたが、御笠川終末処理場については、全処理人口と福岡市内の処理人口より総流入下水量のうち60%が福岡市内からの流入量とした。また、各下水処理場の（1カ月の総流入下水量）×（月平均水温）×1.05の合計を福岡市の1カ月の総流入下水量で割ったものを月平均水温とした。

5.7 下水道管内での水温変化

下水管渠内の水温変化は水道管の場合と同様に式(3)で表される。これより、都市を出る時の水温 T_{20} は

$$T_{20} = (T_{31} - T_s) e^{h' \cdot t'} + T_s \quad (3)'$$

と表される。

熱伝導に関する係数 h' は水道管の場合と同様に $h' = 0.048$ とし、地温も同じく気温より推定した地下1mの地温を用いた。また、流下時間 t' は1時間とした。下水処理場への流入水温 T_{31} は下水処理場の月平均水温を用い、月毎に都市を出る下水の水温 T_{20} を推定した。

5.8 流入エネルギー量

以上より求めた都市への配水量と水温、雨水の水量と水温、地下水その他の水量と水温、都市を出る下水の水量と水温を熱収支式（式(1)）に代入し、下水道に入るエネルギー量の推定を行った。ここで、昭和62年度の福岡市の下水道普及率が75%であったことより下水道に入るエネルギーは水系に入るエネルギー量の75%であったと推定される。これより福岡市で廃熱のうち水系に入るエネルギー量は図-4に示す通りであり、年間で788Tcalと推定された。

5.9 消費エネルギー量との関係

電力、都市ガス、LPG、灯油の消費エネルギー量に対して、水系に入るエネルギー量は年間でその約9%であった。また、深夜電力、家庭用の都市ガス、家庭用のLPGの消費エネルギー量に対しては約37%であった。

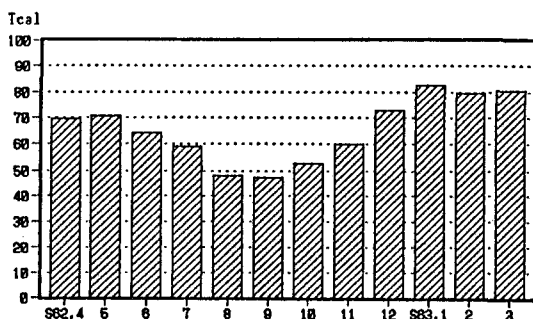


図-4 水系に入るエネルギー量

6. 回収可能エネルギー量についての検討

6.1 気温と流入下水温の温度差

5.6より求めた福岡市の月平均流入下水温と月平均気温を図-5に示す。

6.2 回収可能エネルギー量

下水処理場においてヒートポンプによる廃熱回収を気温±0℃、2℃、5℃、8℃以上の範囲で行った場合の回収可能エネルギー量を図-6に示す。ここで、回収可能エネルギー量は(流入水温-(気温±0℃、2℃、5℃、8℃))×(汚水の熱容量)より求め、図は上から気温+0℃、2℃、5℃、8℃での回収可能エネルギー量を示している。実際に廃熱回収を行う場合には気温±5℃以上程度の温度差が必要であり、夏期の冷熱としての利用可能性はきわめて低いと言える。

6.3 消費エネルギーに対する検討

回収可能エネルギー量は気温+0℃以上を回収した場合、年間で深夜電力と家庭用のガスの消費エネルギー量の約30%、+2℃以上で約20%、+5℃以上で約10%、+8℃以上で約2%であった。実際に気温+5℃以上の温度差で廃熱の回収を行った場合年間で10%程度であるが冬期に限った場合には約20%が回収可能であった。これらは下水道普及率が75%の場合であるが、これが100%であったとすると気温+5℃以上で冬期には深夜電力と家庭用のガスの消費エネルギー量の25%程度の熱が回収可能と推定された。

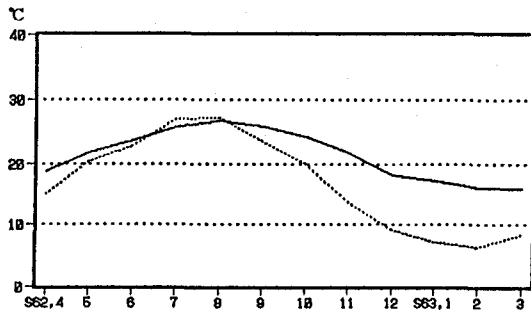


図-5 流入下水温と気温

— 下水処理場流入水温 — 気温

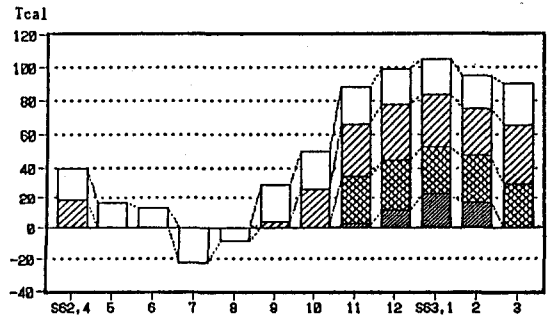


図-6 回収可能エネルギー量

□ 0< ▨ 2< ▩ 5< ■ 8<

7. 結論

- (1) 福岡市で消費される電力、都市ガス、LPG、灯油の全消費エネルギーの約9%が水系に捨てられる。
- (2) 消費エネルギーとして深夜電力と家庭用の都市ガス、LPGを対象とした場合には水系に捨てられる量は約37%である。
- (3) 下水処理場での廃熱回収は+0℃以上で深夜電力と家庭用の都市ガス、LPGの消費量の30%、+2℃以上で20%、+5℃以上で10%のエネルギーが回収可能と推定される。また、冬期の場合は+5℃以上で20%のエネルギーが回収可能と推定される。しかし、夏期の冷熱としての利用可能性は極めて小さいと言える。

本研究の遂行にあたり、資料を提供下さった福岡市水道局、福岡市水道局給水部水質試験所、福岡市下水道局、東部下水処理場、中部下水処理場、西部下水処理場、福岡県建築都市部公園下水道課、九州電力、福岡管区気象台の関係各位に厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 岩崎臣良・中里卓治・榎本邦夫：下水処理排熱利用、下水道協会誌、Vol. 24, No. 274, pp. 57-68, 1987
- 2) 福岡市統計書、昭和63年度版
- 3) 福岡県統計年鑑、昭和62年版
- 4) 福岡県企画振興部調査統計課：福岡県の商業、昭和63年商業統計調査結果表
- 5) 福岡市水道局：福岡市浄水月報、昭和62年4月～昭和63年3月
- 6) 福岡市水道局給水部水質試験所：水質試験年報、第13集、昭和62年度版
- 7) 福岡市水道局：福岡市水道事業統計年報
- 8) 福岡市下水道局管理部水質試験所：昭和62年度試験結果集