

(12) 都市における下水廃熱の利用可能性に関する研究

RECOVERABILITY OF WASTE HEAT FROM SEWAGE IN URBAN AREAS

山下 孝光*、 楠田 哲也*、 井村 秀文**
Takamitsu YAMASHITA , Tetsuya KUSUDA , Hidefumi IMURA

ABSTRACT; The objectives of this study are to establish a computation method on the total amount of energy consumption in urban areas, to estimate the quantity of heat that is transferred into wastewater, ultimately going into wastewater treatment plants, and to examine possibility of waste heat recovery. As a result, waste heat transferred to wastewater is 1.9% of the total amount of energy consumption and 37.3% of the amount of energy consumption by electricity only for water heating in midnight, municipal gas, liquefied petroleum gas, liquefied natural gas in Fukuoka and 4.3% of the former and 63.3% of the latter in Kitakyusyu in 1988. The quantity of recoverable waste heat energy with more than 5°C temperature difference from that of ambient atmosphere corresponds to 10% of the total waste heat flux to the wastewater treatment plants. The availability factor of exergy is 1.7% in both cities. Waste heat is available in particular for air conditioning and snow melting on road in winter in Japan.

Key Words; waste heat, heat recovery, urban areas, wastewater treatment plants, temperature, exergy

1.序論

わが国の現代の都市生活は、化石燃料と資源の大量消費のもとで成り立っている。人口が集中し活動が盛んである都市には、絶えることなくエネルギーや物資が搬入され、加工され、消費され、その結果として廃熱や廃棄物が排出されている。地球温暖化の防止のために二酸化炭素の排出量の削減が唱えられ、そして資源の枯渇を少しでも遅らせるためにその節約が求められている。都市には電力、ガス、石油などのエネルギーが供給され、各種の力学的仕事や熱的仕事をしたのち、廃熱は大気系、水系、土壌系へと放出されている。大気系に排出された熱は速やかに拡散してしまい回収が容易ではない。また土壌系に排出された熱は量的に少なく利用するには適さない。それに引き替え、水系に排出された熱は、ほとんどが下水管に流入し、処理場へと集中してくるので質は低いが回収しやすい。

そこで本研究は都市における全消費エネルギー量、水系や下水道に捨てられている低温廃熱の廃熱量、及びこれらの比率を算定する方法を確立し、この方法を用いて性格の異なる2都市を対象として実際に計算し、その結果を用いて両者を比較し、廃熱エネルギーの再利用の可能性及び、この可能性を高める方法を検討しようとするものである。

*九州大学工学部水工土木学科 Department of civil engineering, Kyushu University

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

2.対象地域の選定

本研究では、人口がほとんど同じで性格の異なる都市における廃熱量を比較するために、福岡市と北九州市を選び、1988年度を対象年度とし検討を加えた。年度末の人口、下水道普及率、下水処理人口、下水道普及面積を表1に示す。

表1 福岡市と北九州市の比較

	福岡市	北九州市
人口 (人)	1,134,513	1,045,624
下水処理人口 (人)	850,900	896,100
下水道普及率 (%)	75.0	85.7
下水道普及面積 (ha)	10,611	11,914

3.都市における消費エネルギー量の検討

わが国の都市で現在使われているエネルギーとして、電力、都市ガス、気体燃料（液化石油ガス、液化天然ガス等）、液体燃料（重油、軽油、灯油、揮発油等）、固体燃料（石炭、コークス等）などが考えられる。そこで各都市の全消費エネルギー量の推定と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の消費エネルギー量の推定を行なった。

3.1 電力

福岡市と北九州市の電灯、電力の使用量^{1) 2)}を基に、1kWhを860kcalとして換算した。福岡市分については電力の需要月報より農事、工事、事業用を推算し、市統計書のデータのその他の電力から、これらを差し引いて、残りを深夜電力とした。

3.2 都市ガス

福岡市と北九州市の月別都市ガス消費量^{1) 2)}を基にし、発熱量を1Nm³あたり、4,500kcal（1988年当時）として換算した。

3.3 気体燃料

コークス炉ガス、高炉ガス、転炉ガス、液化天然ガス(LNG)、液化石油ガス(LPG)を取り上げ総熱量消費量を求めた。発熱量を表2に示す。特に、LPGの月別消費量が不明であったので、LPGは都市ガスの未普及地区で使用されていると考え、消費量を推定した。1986年10月より1987年9月までの1年間の福岡市内での都市ガス使用量は、311,542,000 m³であった。これは1 Nm³当たり、4,500kcalとすると1,400Tcalとなる。1986年10月より1987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すると、この発熱量を12,000kcal/kgとして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の月別消費量は都市ガスの93%であるとした。北九州市における消費量比率も同じ値とした。北九州市内の年間LNG消費量は新小倉LNG発電所で使われた量を差し引き、残りを都市ガスの月別消費量に比例配分した。

表2 気体燃料の種類及び発熱量

種類	単位	発熱量
コークス炉ガス	kcal/Nm ³	5,200
高炉ガス	kcal/Nm ³	800
転炉ガス	kcal/Nm ³	4,500
液化天然ガス(LNG)	kcal/kg	13,000
液化石油ガス(LPG)	kcal/kg	12,000

表3 液体燃料の種類及び発熱量

種類	単位	発熱量
A重油	kcal/l	9,200
B重油	kcal/l	9,600
C重油	kcal/l	9,900
灯油	kcal/l	8,900
揮発油	kcal/l	8,600

3.4 液体燃料

A重油、B重油、C重油、灯油、揮発油^{1) 2)}を取り上げ、熱量の換算を行なった。消費熱量を表3に示す。揮発油については、福岡県で消費されたものを、各都市の自家用自動車登録台数で比例配分した。

3.5 固体燃料

石炭、コークス^{1) 2)}を取り上げ、総熱量を計算した。消費熱量を表4に示す。

表4 固体燃料の種類及び発熱量

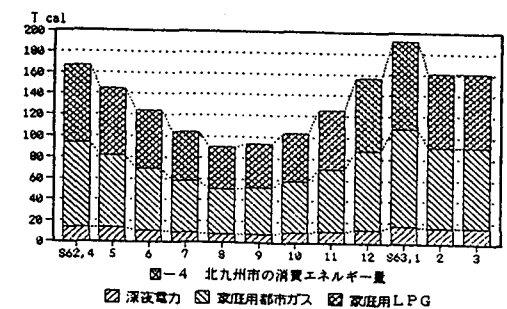
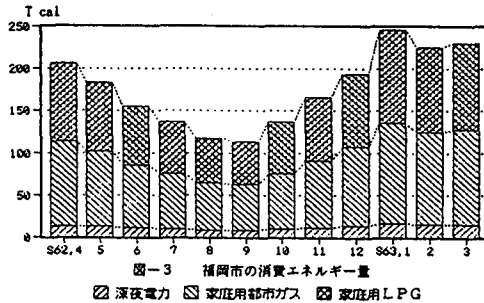
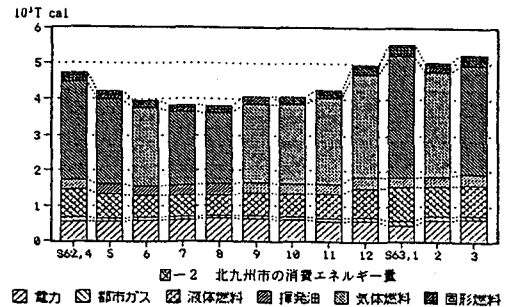
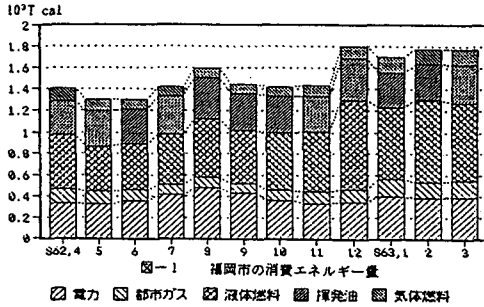
種類	単位	発熱量
石炭	kcal/kg	6,400
コークス	kcal/kg	7,020

3.6 消費エネルギー量

以上より推定した両市の電力、都市ガス、気体燃料、液体燃料、固体燃料、揮発油の総消費エネルギー量を図1、2に、家庭用の深夜電力・都市ガス・LPGの消費エネルギー量を図3、4に示す。両市での年間消費量を表5に示す。

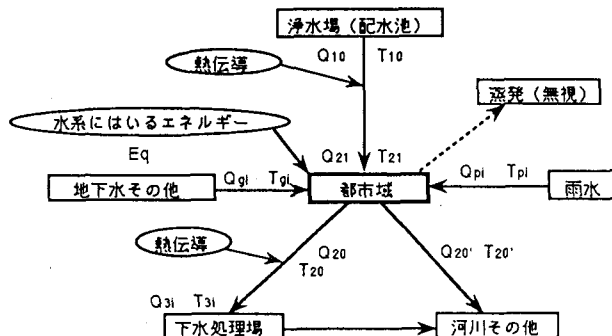
表5 各都市の年間エネルギー消費量

	福岡市	北九州市
総消費エネルギー量 (Tcal)	18,400	53,700
深夜電力、家庭用都市ガス 家庭用LPGの消費量 (Tcal)	2,110	1,620



4. 熱収支式

都市域での水・熱の収支を完全に把握することは容易でないで、簡略化したモデルによって計算する。図5に示すように、水は上水道、地下水(井戸)、降水により供給され、排水は下水道と河川への放流によりなされと考える。蒸発は無視できるものとする。また、熱は都市において消費されたエネルギーの一部が給湯や調理時に水系に流れ込むとともに、配水管や下水管中を輸送されるとき地温と水温の差に由来する伝熱により熱輸送がなされと考える。これより、都市での熱収支式は以下のように表される。



$$Q_{21}T_{21} + Q_{pi}T_{pi} + Q_{gi}T_{gi} + E_q / C_w = Q_{2o}T_{2o} + Q_{2o'}T_{2o'} \quad (1)$$

ここで、

E_q : 水系に入る単位時間当たりの廃熱量

C_w : 水(汚水)の熱容量

Q_{1o}, T_{1o} : 浄水場から配水される水道水の単位時間当た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たりの水量とその水温

Q_{2o}, T_{2o} : 都市を出ていく下水の単位時間当たりの水量とその水温

$Q_{2o'}, T_{2o'}$: 河川その他に流出する下水の単位時間当たりの水量とその水温

ただし、 $T_{2o} = T_{2o'}$

Q_{3i}, T_{3i} : 下水処理場へ流入する下水の単位時間当たりの水量とその水温

Q_{gi}, T_{gi} : 地下水の単位時間当たりの揚水量とその水温

Q_{pi}, T_{pi} : 下水道に流入する降水の単位時間当たりの水量とその水温

また、配水管路内での水温の変化は、管路内水温と地温の温度差に比例すると、管路長さに沿って積分すると、

$$T_{21} = (T_{1o} - T_g) \exp(-h t) + T_g \quad (2)$$

となる。ここで、

T_g : 地温

h : 熱伝導の係数、

t : 管内滞留時間、

下水管路内での水温変化も配水管路内の場合と同様に、

$$T_{3i} = (T_{2o} - T_g) \exp(-h' t') + T_g \quad (3)$$

と表される。ここに、

h' : 熱伝導の係数、

t' : 管内滞留時間、

である。式(1) - (3)を用いると水系に入る廃熱量 E_q を推定することができる。

5. 都市での消費エネルギーによらない下水への輸送熱量

5.1 浄水場からの配水によるもの

北九州市では1987年の市内への総配水量は204,257,000 m^3 、総使用水量は192,000,000 m^3 であった。²⁾これより北九州市では9.4%が漏水したと考えることにする。福岡市については参考論文⁴⁾の結果を用い9.7%とした。

5.2 地温の推定

現在、福岡管区気象台では地温の測定を行っていない。そのため、過去の気温と地温のデータを基に、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。⁴⁾

5.3 水道管内での水温変化

水道管内での水温の変化は式(2)で表される。熱伝導に関する係数を $h=0.0481/hr$ とし、地温 T_g は気温より推定した地下1mの地温を用いた。また、管内の滞留時間を福岡市では9時間半、北九州市では8時間とした。⁴⁾

5.4 降水にとともうもの

合流式下水道の場合、雨水も下水道に流入する。流入する雨水の量を正確に知ることは不可能であるが、降水量と降水後の下水処理場への流入水量の増加の相互関係より、福岡市の場合には(降水量×処理区域面積)の8%、北九州市では11%とした。降水の水温は気温に等しいとした。

5.5 地下水その他によるもの

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。これらの正確な使用量は不明なので、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に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降水量を除いた残りの量とし、下水道管内に漏れてくる地下水も含めた。また、侵入してくる水の水温は気温から推定した地下1mの地温に等しいとした。

5.6 下水道管内での水温変化

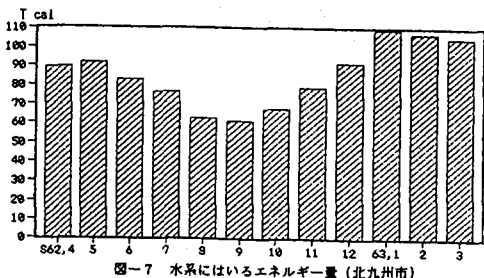
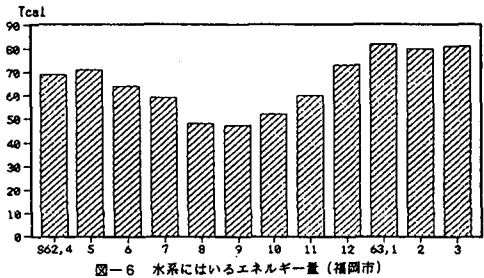
都市において下水道に流入する熱量は、下水処理場に流入する下水の水温と水量から逆算することになる。したがって、下水処理場に流入した下水が都市を出たときの水温は、式(3)を変形し、

$$T_{20} = (T_{30} - T_g) \exp(h't') + T_g \quad (3')$$

として求められる。ここで下水処理場の月平均流入水温を与え、熱伝導に関する係数を $h'=0.0481/\text{hr}$ と置き、流下時間は $t'=1\text{hr}$ とした。

6. 都市から下水道への流入熱量と消費エネルギー量の関係

以上より求めた都市への配水量と水温、降水の水量と水温、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、下水道に入る熱量の推定を行なった。これより両市で生じた廃熱のうち、水系に入った熱量は図6、7に示すとおりであり、年間でそれぞれ788Tcal、1,025Tcalと推定された。水系に入る熱量は全消費エネルギーに対して、それぞれ4.3% (福岡)、1.9% (北九州) であり、特に熱エネルギーとして利用される可能性の高い深夜電力、家庭用都市ガス、家庭用LPGのエネルギー消費量に対して、それぞれ37.3% (福岡)、63.3% (北九州) であった。もし、各都市の下水道普及率が100%になれば、単純計算ではそれぞれ50% (福岡)、74% (北九州) になる。

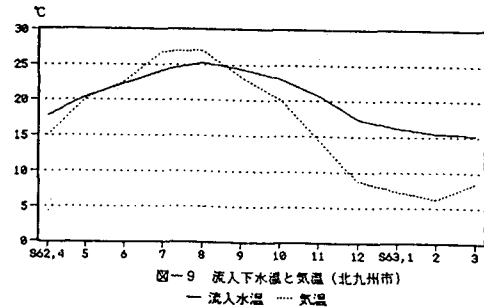
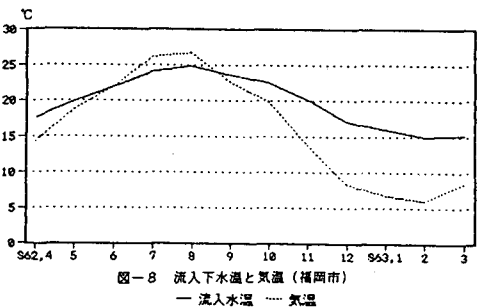


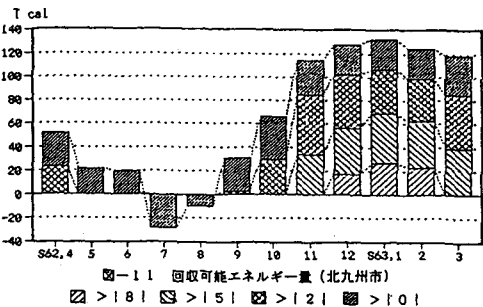
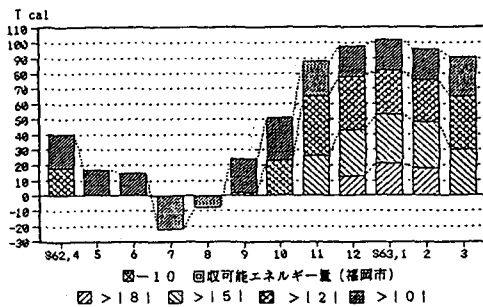
7. 利用可能熱量についての検討

7.1 熱量としての検討

福岡市と北九州市の月平均流入下水水温と月平均気温を図-8、9に示す。両市間で気温、地温の差はほとんどないことが分かる。気温との温度差と流入量が多いほど利用可能熱量は多くなる。

下水処理場への流入下水の熱量を下水水温と気温差 ($\pm 0^\circ\text{C}$ 、 $\pm 2^\circ\text{C}$ 、 $\pm 5^\circ\text{C}$ 、 $\pm 8^\circ\text{C}$) で表したものが図10、11である。この図10、11が示す熱量は、環境温度を気温にとり、熱源である下水の水温との差で表したものであり、流入下水量を全量使えるものとして計算している。





現在、ヒートポンプを用いて熱回収を行なおうとする場合、ヒートポンプ設計温度は5℃差に設定されているため、図10、11の利用可能熱量の5℃以上の部分が利用できるにとどまっている。今後、ヒートポンプの性能の向上、環境温度の設定等を考慮した熱回収システムができれば、利用可能量は増すものと思われる。

7.2 エクセルギーとしての検討

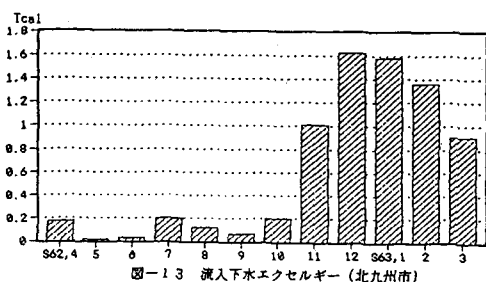
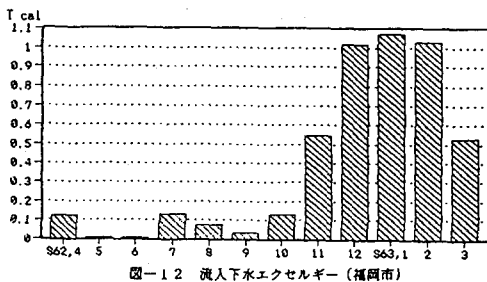
熱が行なえる力学的仕事はエクセルギーとして検討されなければならない。気温の絶対温度を T_{ak} 、下水水温の絶対温度を T_{3ik} とすると、そのエクセルギーは熱回収に伴う下水水温変化を考慮して

$$\eta = 1 - T_{ak} / (T_{3ik} - T_{ak}) \ln (T_{3ik} / T_{ak}) \quad (4)$$

$$E = \eta \cdot \rho \cdot Q \cdot C_w \cdot (T_{3ik} - T_{ak}) \quad (5)$$

ここで、 η ；有効比、 ρ ；密度である。

図10、11をエクセルギーで表現すると図12、13のようになり、エクセルギー量は回収可能熱量として求めたときの約100分の1になる。このことから、下水廃熱を利用しようとする時は、エクセルギーとして回収するよりも、融雪のように、単なる熱として利用の方が効率が良いことが解かる。



エクセルギーを11月～3月までに限り、暖房として利用しようとするると以下ようになる。

環境（外気）温度を月別平均気温、室内温度20℃の場合、有効比は表6のようになる。これから明らかに、この程度の有効比で済むのに電力や燃料のエネルギーを直接費やすことは無駄である。理想効率で熱を仕事に変えることができるとし、暖房負荷が 100W/m^2 ($86\text{kcal/m}^2\text{h}$)¹²⁾、1世帯の広さが 100m^2 、そして24時間暖房したとすると、暖房できる世帯数は表7のようになる。

表6 有効比

月	北九州市	福岡市
11	0.011	0.010
12	0.020	0.020
1	0.023	0.022
2	0.024	0.024
3	0.020	0.020

表7 暖房できる世帯数（世帯/日）

月	北九州市	福岡市
11	15,000	9,000
12	12,000	8,400
1	10,000	7,800
2	9,700	6,900
3	7,000	4,300

理論計算上でも、1万戸程度の暖房にしか供しえないが、原油換算で約800klとなる。相対的な量は少ないが地域冷暖房方式とし、処理場周辺のみを対象とすると、かなりの効果があるといえる。北九州市の方が、福岡市に比べて、同程度の水温であるのに水量が多いため回収できる熱量が多くなっている。一般家庭の使用水量は両市間でほとんど差がないので、工場排水の影響が主因と思われる。

8. 考察

下水廃熱の利用形態には、2通りあり、1つは力学的エネルギーとして、他は熱を熱自体として利用する方法である。力学的エネルギーとして回収利用する場合には、エクセルギーとしての評価が必要であり、表6の有効比から明らかなように、そう大きな値とはならない。とはいえ、室内冷暖房に電力や化石燃料のエネルギーを直接利用することは、エネルギーの質からみて、好ましい使用方法ではない。一方処理水を流して融雪するような場合には、下水の熱は熱エネルギーの形態のまま利用されるので、その有効性は極めて高くなる。

都市システムとして、都市廃熱を積極的に利用しようとする場合、大気や水系に放出する以前に、温度低下にしたがったカスケード型使用が最も望まれる。最終的に、廃熱の排出は大気系、水系、土壌系のいずれかになされるが、大気系はすぐに拡散され、土壌系は熱伝導率が高くないので、いずれも、回収には問題がある。それに引きかえ水系からは熱を回収しやすいので、都市の最終廃熱をできるだけ水系、いいかえれば、下水に移すシステムを構築することが望ましい。このシステムを都市全体でみれば、現在、問題になっているヒートアイランド現象を抑える方向に向かわせることになる。特に、このシステムとして、冷蔵庫、冷房装置、各種熱機関を水冷化し、暖められた冷却水を下水道に入れること等が考えられる。

熱の需要と供給のバランスの点からみれば、熱供給支援施設としての下水処理場は、熱需要の高い地域に近接して建設することが望ましい。固形廃棄物焼却場等についても同様である。

9. 結論

(1) 水系に入るエネルギーは、各都市で消費される全消費エネルギー量の4.3% (福岡)、1.9% (北九州) であり、家庭で熱エネルギーとして消費される量のそれぞれ37.3% (福岡)、63.3% (北九州) であった。

(2) 下水廃熱はエクセルギーとして利用するよりも、熱として利用の方が有効である。

(3) 熱エネルギー供給支援施設として下水処理場を用いる場合、熱需要の大きい都市の中心部に建設するのが望ましい。

参考文献

- 1) 福岡市統計書 (昭和63年度版)
- 2) 北九州市統計書 (昭和63年度版)
- 3) 福岡県統計年鑑 (昭和62年度版)
- 4) 三好伸浩・楠田哲也・井村秀文、下水廃熱の利用可能性に関する研究；環境システム研究 Vol.18(1990)
- 5) 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
- 6) 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
- 7) 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
- 8) 福岡市水道局：福岡市水道事業統計年報
- 9) 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
- 10) 北九州市下水道局：運転月報、昭和62年4月～昭和63年3月
- 11) 資源エネルギー庁編：21世紀を目指す未利用エネルギー活用システム、通産政策広報社、1989
- 12) 押田 勇雄；エクセルギー講義、太陽エネルギー研究所