

Title	日本の製造業における排熱利用可能性の評価
Sub Title	
Author	西, 裕志(Nishi, Hiroshi) 松橋, 隆治(Matsuhashi, Ryuji) 吉田, 好邦(Yoshida, Yoshikuni) 石谷, 久(Ishitani, Hisashi)
Publisher	慶應義塾大学産業研究所
Publication year	1999
Jtitle	KEO discussion paper. G : 『アジア地域における経済および環境の相互依存と環境保全に関する学際的研究』(KEO discussion paper. G : "Inter-disciplinary studies for sustainable development in Asian countries"). No.G-34
JaLC DOI	
Abstract	概要資源の減少と環境に与える影響を考慮し、人類の持続的発展を実現するために、あらゆる製品、技術、システムに関するライフサイクルアセスメントの必要性が高まってきた。製品や技術のライフサイクルアセスメントをおこなう上で、特に注目すべき項目の一つに廃棄物や排熱の再利用が挙げられる。これは、資源のリサイクルや熱のカスケーディング(多段利用)が、省資源、省エネルギー、廃棄物の減容化などに直接寄与できるからである。本論文では、この中、産業部門の低温排熱に注目し、その業種毎の存在量と排熱有効利用のための技術、さらにはこれを利用した場合のCO2削減可能性についてLCA手法を用いて検討した。特に、臨海部に工場があり、その近郊に低温熱需要の多い都市が存在する場合、各工場での排熱を積極的に回収し、利用することができれば、近郊に立地する建物の民生用熱消費量の大半を工場排熱でまかなうことが可能となる。このような、産業・民生部門間における熱の融通と、それによるエネルギー総合効率の向上、CO2削減率の評価をおこなうことが本論文の課題である。具体的には、工場における排熱についてのアンケートデータを利用し、工場からの排熱の外部利用可能性についての評価をおこなっている。アンケートデータより外部利用の余地の大きい業種の出荷額と排熱エネルギーの関係を求め、その後、その業種における排熱を熱輸送したときの距離別の化石燃料削減効果とそれに伴う二酸化炭素削減効果を求めている。
Notes	表紙上部に"日本学術振興会未来開拓学術研究推進事業複合領域「アジア地域の環境保全」"の表示あり
Genre	Technical Report
URL	<a href="https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=AA12113622-00000034-0001">https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=AA12113622-00000034-0001</a>

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the Keio Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

# 日本の製造業における 排熱利用可能性の評価

西 裕 志  
松 橋 隆 治  
吉 田 好 邦  
石 谷 久

No.G-34

学振未来 WG2-12

# 日本の製造業における排熱利用可能性の評価

西 裕志、松橋 隆治、吉田 好邦、石谷 久

1999年1月

## キーワード

ライフサイクルアセスメント (LCA) ; 限界改善指標 ; 産業部門の低温排熱 ; 回帰分析 ; CO<sub>2</sub> 放出低減可能性 ; 産業連関分析.

## 概要

資源の減少と環境に与える影響を考慮し、人類の持続的発展を実現するために、あらゆる製品、技術、システムに関するライフサイクルアセスメントの必要性が高まってきた。製品や技術のライフサイクルアセスメントをおこなう上で、特に注目すべき項目の一つに廃棄物や排熱の再利用が挙げられる。これは、資源のリサイクルや熱のカスケーディング（多段利用）が、省資源、省エネルギー、廃棄物の減容化などに直接寄与できるからである。

本論文では、この中、産業部門の低温排熱に注目し、その業種毎の存在量と排熱有効利用のための技術、さらにはこれを利用した場合の CO<sub>2</sub> 削減可能性について LCA 手法を用いて検討した。特に、臨海部に工場があり、その近郊に低温熱需要の多い都市が存在する場合、各工場での排熱を積極的に回収し、利用することができれば、近郊に立地する建物の民生用熱消費量の大半を工場排熱でまかなうことが可能となる。このような、産業・民生部門間における熱の融通と、それによるエネルギー総合効率の向上、CO<sub>2</sub> 削減率の評価をおこなうことが本論文の課題である。

具体的には、工場における排熱についてのアンケートデータを利用し、工場からの排熱の外部利用可能性についての評価をおこなっている。アンケートデータより外部利用の余地の大きい業種の出荷額と排熱エネルギーの関係を求め、その後、その業種における排熱を熱輸送したときの距離別の化石燃料削減効果とそれに伴う二酸化炭素削減効果を求めている。

## 1. はじめに

近年、地球環境問題の深刻化への危機感を背景に、この問題への国際的対応が求められている。特に、温室効果ガスの増大による気候変動が深刻な影響をもたらすとの認識が世界的に高まっており、1997年末に開催されたCOP3京都会議において、OECD諸国は2010年における温室効果ガスの排出量を一定程度削減することが盛り込まれた。これによると、例えば日本は、気候変動緩和策として2010年における温室効果ガス排出量を1990年レベルより6%削減することになっている。(1990年度における日本の化石燃料消費に起因するCO<sub>2</sub>放出量は炭素換算で3.13億tであり、これは一人当りにすると2.53tとなる。)

省エネルギーは、温室効果ガス削減のための重要な方策であるが、二度の石油危機を契機にして進められてきた日本のエネルギー効率改善速度にも、1980年代の後半以降は陰りが見えている。例えば、日本におけるE/GDPの値は、1973年度には189.3(石油換算kL/億円)であり、1986年度には131.0(石油換算kL/億円)まで低下しているが、1993年度の値は130.1(石油換算kL/億円)で殆ど低下していない。特に、産業部門における個別機器の導入による効率改善は、エネルギー価格の長期低迷もあり、新たな費用対効果の高い(投資回収年数の短い)方策が少ないため、伸び悩んでいるものと考えられる。(1)、(2)

上記のような理由から、個別機器の導入による省エネルギーに代わって近年注目を集めているのは、リサイクルやヒートカスケーディング(熱の多段利用)などのいわゆるシステムの省エネルギーである。特に、ヒートカスケーディングやその第一段階としての排熱利用は、各業種内での省エネルギーが限界に近づいている中で、他業種や民生部門と熱のやりとりをおこなうことで、エネルギーシステム全体としての効率改善を図るものであり注目に値する。日本政府によるエコエネプロジェクトも、こうした時代の流れに沿うものであると考えられる。

海外における状況をみると、日本より廃熱利用/地域熱供給が進んでいる国がある。フランスの公立機関であるADEMEによると地域熱供給のための配管総延長は、デンマークが17000km、統一ドイツが12000~15000km、スウェーデン8000km、フィンランド7000km、フランス3000kmである。すなわち、北欧諸国やドイツ圏において、特に地域熱供給が普及している。これには以下のような理由が考えられる。

- 歴史的に石炭以外のエネルギー(例えば天然ガス)が入手しにくく、環境問題から地域熱供給が受入れやすかった。
- 長い時間をかけて温水輸送配管の整備が漸次進められてきたため、配管敷設の維持費が低くなっている。
- 一般に平均気温が低く、冷房より暖房需要が卓越しており、地域熱供給の経済性が上がりやすい地域である。
- 産業排熱がある地域の近傍に、熱需要の大きな都市が存在する。
- 熱需要の季節変化と排熱を供給するプラントの運転パターンが一致している。
- 中央政府、または地方公共団体によって、地域熱供給に対し補助があるか、または供給(持続)義務など、規制制度の有無も地域熱供給の普及に影響する。

このように、排熱利用と地域熱供給の実現可能性には多様な要因が影響するため、日本における可能性を簡単に結論づけるのは難しい。しかし、温室効果ガスの抜本的削減と持続可能なエネルギーシステムの実現のために排熱の有効利用が有望な方策の一つである以上、日本における可能性を検討しておく必要がある。

そこで、本節では、産業部門の低温排熱に注目し、その業種毎の存在量と排熱有効利用のための技術、さらにはこれを利用した場合のCO<sub>2</sub>削減可能性についてLCA手法を用いて検討した。特に、工場近郊に低温熱需要の多い都市が存在する場合、各工場での排熱を積極的に回収し、利用することができれば、近郊に立地する建物の民生用熱消費量の大半を工場排熱でまかなうことが可能となる。このような、産業・民生部門間における熱の融通と、それによるエネルギ

一総合効率の向上、CO<sub>2</sub>削減率の評価をおこなうことが本節の課題である。

具体的には、工場における排熱についてのアンケートデータを利用し、工場からの排熱の外部利用可能性についての評価をおこなっている。アンケートデータより外部利用の余地の大きい業種の出荷額と排熱エネルギーの関係を求め、その後、その業種における排熱を熱輸送したときの距離別の化石燃料削減効果とそれに伴う二酸化炭素削減効果を求めている。

---

\* この研究は、学術振興会未来開拓技術研究推進事業「アジア地域の環境保全」Work Group2 における共同研究としておこなわれた。

† 東京大学大学院工学系研究科 地球システム工学専攻

## 2. 本研究における LCA 手法の概要

### 2.1 LCA 手法の基本的枠組み

LCA の基本的枠組みについては、KEO Discussion Paper No.19 学振未来 WG2-8「技術評価のためのライフサイクルアセスメント手法の基本的枠組みとその問題点」に譲るものとする。

そこでの基本的枠組みは、産業連関分析のデータベースを基調とし、その One process-One product の原則を部分的に拡張し、結合生産を許す形にする。特に、LCAにおいて重要な屑、廃棄物関連の排出とその再利用が表現できるようにすることであった。

すなわち、方程式では投入係数行列Aと生産・排出行列Eを用いて(2-1)式のように表し、投入係数行列Aは産業連関分析と同じ概念で構成し、生産・排出行列Eには、主産物以外の副産物、屑さらにはLCAで評価すべき排出物を含めて考える。ただし、ここでは $\mathbf{x}$ はプロセスであり、プロダクトを表してはいないことに注意されたい。このような区別が必要になるのは、One process-One product の原則を崩したためである。

$$\begin{aligned} E\mathbf{x} &\geq A\mathbf{x} + \mathbf{f} \\ (E - A)\mathbf{x} &\geq \mathbf{f} \end{aligned} \tag{2-1}$$

ここで、システム全体の状態、すなわち $\mathbf{x}$ を決定するには、現実のシステムに相当する最適化の評価基準、またはロジック関数などのシミュレーション原理が必要である。例えば、現実のシステムが総費用の最小化という原理で決定されている場合、 $c\mathbf{x} \rightarrow \min.(\max.)$ を目的関数として最適化することにより、解 $\mathbf{x}$ が一意に定まる。このときの最適基底を $B_0$ とすると、

$$\mathbf{x} = (E - A)^{-1} \mathbf{f} = B_0^{-1} \mathbf{f} \tag{2-2}$$

(2-2)式のように、システム内部に結合生産や代替性が存在する場合でもプロセスベクトル $\mathbf{x}$ を決定することができる。

$$x = B_o^{-1} f$$

$$x_j = B_o^{-1}{}_{j1} f_1 + B_o^{-1}{}_{j2} f_2 + \cdots + B_o^{-1}{}_{ji} f_i + \cdots + B_o^{-1}{}_{jm} f_m \quad (2-6)$$

$$\frac{\partial x_j}{\partial f_i} = B_o^{-1}{}_{ji}$$

$$\frac{\partial y_k}{\partial f_i} = \sum_{j=1}^m \left( E_{kj} \times B_o^{-1}{}_{ji} \right) \quad (2-7)$$

このように、システム内部に結合生産や代替性が存在する場合でも、システムの状態が一意に決定されれば、このときの逆行列を用いて、ライフサイクルにおける資源消費、環境排出を各製品に配分することができる。(2-7) 式による配分原理を限界配分指標とよぶことにする。

また、あるプロセスから他のプロセスに代替した場合の改善量については以下のように考えられる。いま、新プロセス  $b_j$  を微少単位  $\theta$  だけ導入する場合を想定する。プロセス  $b_j$  に対する排出行列  $E$  の  $j$  列目の列ベクトルを  $e_j$  とする。このときの、元のプロセスベクトル  $x$  とプロダクトベクトル  $y$  の変化量は以下のようになる。

$$B_o x = f$$

$$B_o(x + \Delta x) + \theta b_j = f$$

$$\Delta x = -\theta B_o^{-1} b_j$$

$$\Delta y = -\theta E B_o^{-1} b_j + \theta e_j \quad (2-8)$$

したがって、新プロセス  $b_j$  を単位当り導入したときの、改善量は  $E B_o^{-1} b_j + e_j$  で表される。これを限界改善指標と呼ぶことにする。

## 2.2 本研究におけるLCAの具体的算定法

本研究においては、(2-8)式の限界改善指標を用いて排熱を輸送することによる化石燃料削減効果とそれに伴う二酸化炭素削減効果について算出している。投入係数行列  $A$  としては産業連関表のデータを用い、生産・排出行列  $E$  については、特に各部門からの排熱データを後述するアンケートから推定している。行列  $E$  の CO2 排出データについては、吉岡らによって開発され

た環境 I0 を用いた方が精度が高いと考えられる。しかし、ここでは誘発される化石燃料の消費量から CO2 放出量を求めており、この点は今後の課題とする。

また、ベクトル b としては、熱輸送技術をベクトル化する。ベクトル b の要素としては、熱輸送に必要なポンプ動力（電力）などの投入物はプラスの値で表わすが、熱輸送によって産出されるもの（需要端に送られる熱）についてはマイナスで表わす。

### 3. 製造業における排熱量推定のためのアンケートデータの解析

アンケートは過去のデータの整理に加えて、新たな調査として排熱実態を全国レベルで調査し排熱データベースを提供することを目的として、工業技術院ニューサンシャイン計画のエコ・エネルギー都市プロジェクトの一環として、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託を得て(財)省エネルギーセンターによって実施された。

#### 3.1 アンケートデータの送付先と回収率

①食品・飲料・たばこ産業(食品)②繊維・紡績・染色工業(繊維)③紙・パルプ・紙加工品製造業(パル)④化学工業・ゴム製品製造業(化学)⑤石油製品・石炭製品製造業(石油)⑥プラスチック製品製造業(プラ)⑦窯業・土石製品製造業(窯業)⑧鉄鋼業(鉄鋼)⑨非鉄金属製造業(非鉄)⑩金属製品・機械器具・精密機械製造業(金属)⑪電気・電子機械器具製造業(電気)⑫輸送用機械器具製造業(輸送)⑬電力製造業(電力)⑭ガス・熱供給業(ガス)⑮清掃工場⑯その他  
(カッコ内、図中略称)

以上の業種の資本金 1 億円以上で従業員数 300 人以上の工場を対象に、「工場の未利用エネルギー実態調査」として約 10000 事業所にアンケートを送付し、約 2900 事業所より回答を得た。回収率は 28.9%である。この回答数は 30 人以上の全国製造業の工場数約 45000 工場の約 6.5%に相当するが、従業員規模では 24%、出荷額、エネルギー消費ではともに 30%以上となり、大規模工場からの回答が多かったことを示している。また、アンケートは主として以下の項目の回答を依頼している。

#### (1) 工場または事業所概要

工場のエネルギー

購入エネルギー

自家発電とコージェネレーションの状況

#### (2) 工場排熱

設備稼動状況

排熱の実態



### 3.2 業種別排熱エネルギーの現状の比較

まず、業種別にいくつかの視点から排熱エネルギーの現状についての比較をおこなった。最初に総購入エネルギーに対する総排熱エネルギーの割合について業種別に比較した。また、排熱エネルギーについては、40℃まで排熱を絞り取れるとして以下の式によって求めている。(清掃工場、その他の業種についてはデータが少なく、省略している。)

$$\text{排熱エネルギー} = \text{定常時平均排出量} \times \text{比熱} \times (\text{排出物平均温度} (^\circ\text{C}) - 40) \times \text{稼働率}$$

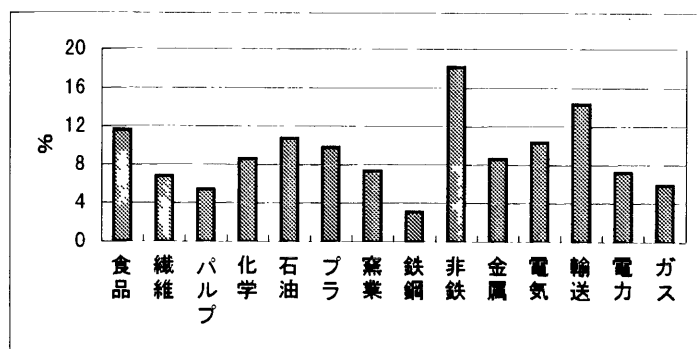


図 3.1 総購入エネルギーに対する総排熱エネルギー

購入エネルギーに対する排熱エネルギーの割合が高い業種においては、外部利用よりもまず、排熱の内部利用についての可能性が高いと考えられる。次に 1 事業所あたりの排熱エネルギーについて業種別に比較した。

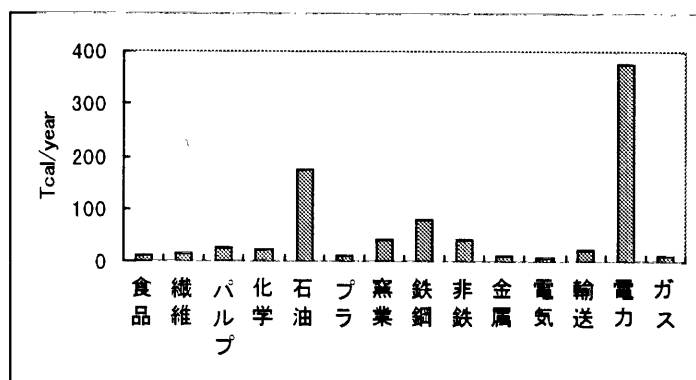


図 3.2 事業所あたりの排熱エネルギー

1 事業所あたりの排熱エネルギーの高い業種においては、排熱の外部利用についての可能性が高いと考えられる。最後に、出荷額あたりの排熱エネルギーを求め、それに産業連関表より得

られる国内生産額をかけることにより、年間の排熱エネルギーを推定した。

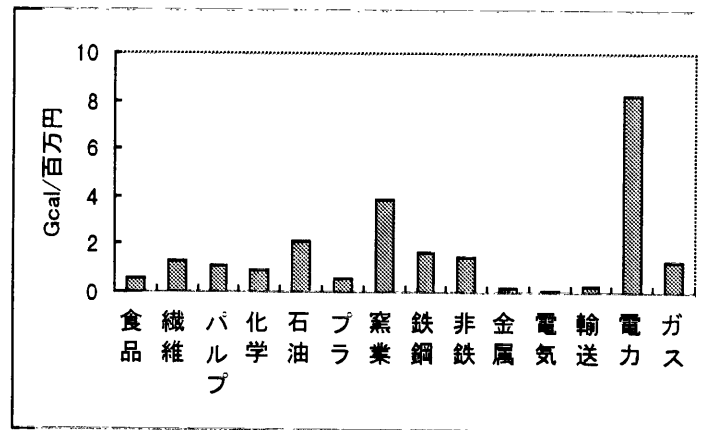


図 3.3 出荷額あたりの排熱エネルギー

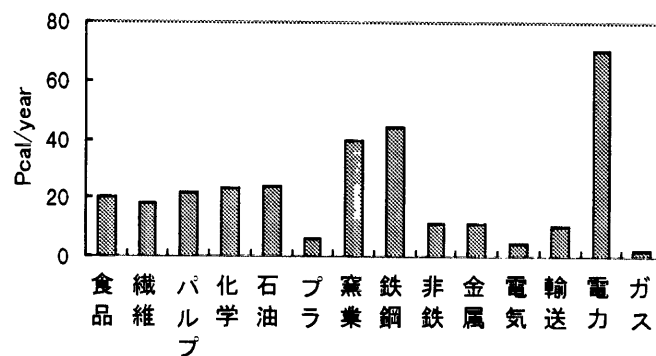


図 3.4 推定された業種毎の年間の排熱エネルギー

以上の結果より、1事業所あたりの排熱エネルギー、年間の排熱エネルギーが高い上位4つの業種(電力製造業、窯業・土石製品製造業、鉄鋼業、石油・石炭製品製造業)について、排熱の外部利用可能性が高いと考えられる。そこで、さらにこれら四業種について精度の高い出荷額と排熱エネルギーの関係を求めるために回帰分析をおこなった。

### 3.3 四業種における出荷額と排熱エネルギー

以上より、電力製造、窯業・土石製品製造業、鉄鋼業、石油・石炭製品製造業について回帰分析をおこなった。以下に四業種における出荷額と排熱エネルギーの関係について示す。分析において、(1)出荷額が0のデータ、(2)購入エネルギーに対する排熱エネルギーの割合が100%を超えるデータは、データに不備があるとして捨象している。

式(10)～(13)は各業種の出荷額を  $x$ 、排熱エネルギーを  $y$  とした場合の回帰式を表わす。そしてそれぞれ式の下にあるカッコ内の数字は  $t$  値を、 $r^2$  は決定係数を表わしている。

窯業・土石製品製造業において決定係数が 0.52 とあまり高い数字ではない。しかし、出荷額の係数の  $t$  値についてはある程度高い値が得られているので、式(10)～(13)の 4 つの式を用いて各業種の年間の総排熱エネルギー量を算出する。これらの式の  $x$  に産業連関表から得られる国内生産額を代入することにより、各業種の国内における総排熱エネルギーが求められる。

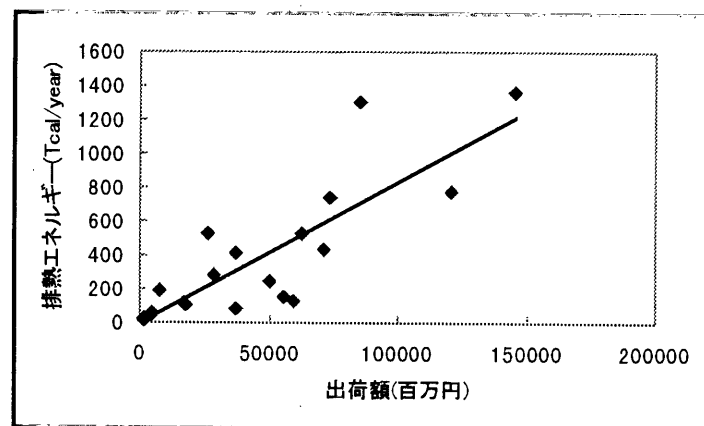


図 3.5 出荷額と排熱エネルギー(電力製造業)

$$y = 0.0084x - 4.66 \quad (r^2 = 0.70) \quad (10)$$

(6.45) (-0.06)

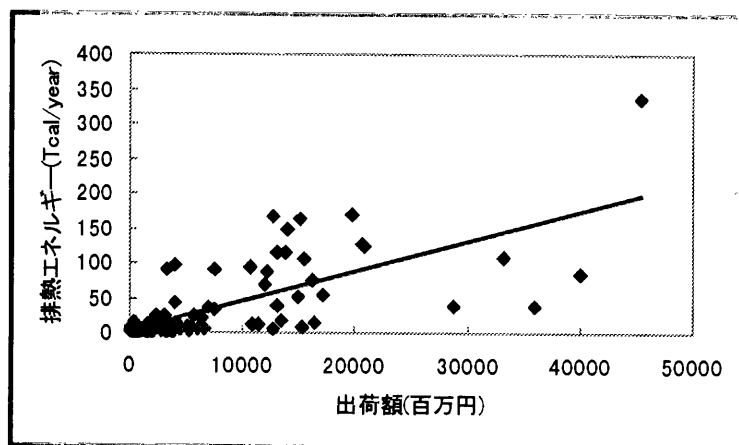


図 3.6 出荷額と排熱エネルギー(窯業・土石製品製造業)

$$y = 0.0043x + 2.96 \quad r^2 = 0.50 \quad (11)$$

(9.47) (0.56)

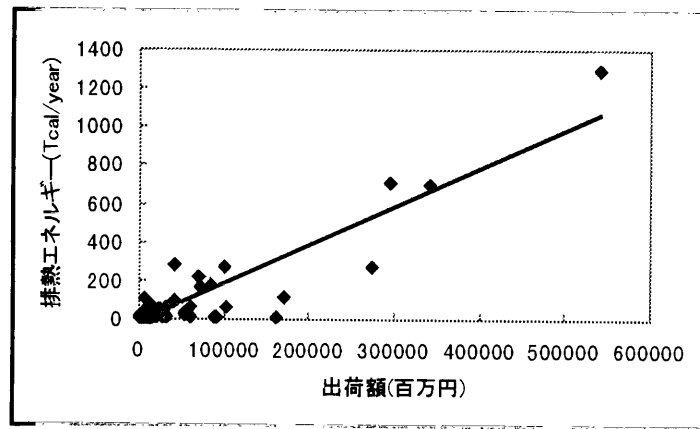


図 3.7 出荷額と排熱エネルギー(鉄鋼業)

$$y = 0.0020x - 16.45 \quad (r^2 = 0.83) \quad (12)$$

(17.86) (-1.44)

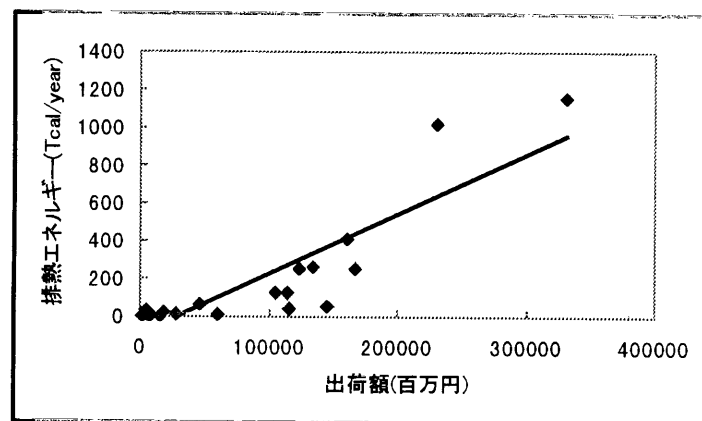


図 3.8 出荷額と排熱エネルギー(石油・石炭製品製造業)

$$y = 0.0031x - 84.02 \quad (r^2 = 0.77) \quad (13)$$

(8.26) (-1.84)

窯業・土石製品製造業において決定係数が 0.50 とあまり高い数字ではない。しかし、出荷額の係数の  $t$  値についてはある程度高い値が得られているので、式(10)～(13)の 4 つの式を用いて各業種の年間の総排熱エネルギー量を算出する。これらの式の  $x$  に産業連関表から得られる国内生産額を代入することにより、各業種の国内における総排熱エネルギーが求められる。ただし、電力製造業については、計算に用いているデータは全て火力発電所のものであったので、国内生産額に火力発電所の全体に対する構成比を用いて、火力発電所の国内生産額としている。

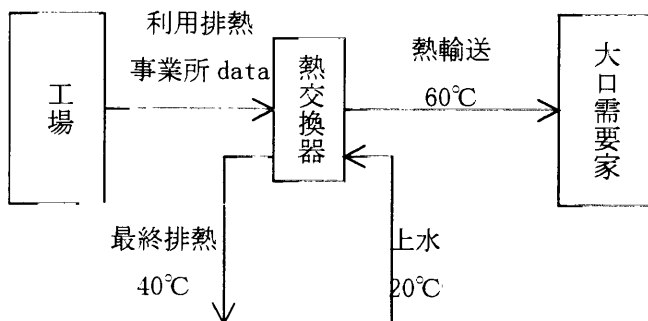
表 3.1 業種別の国内総排熱エネルギー

	国内生産額 (百万円)	総排熱エネルギー (Tcal/Year)
電力製造(火力)	8,512,680	71,366
窯業・土石	10,193,580	43,693
鉄鋼業	26,679,224	53,289
石油・石炭	11,087,614	34,720

#### 4. 排熱利用効果の推定

##### 4.1 熱輸送の前提条件

本研究において想定しているシステムは本研究において想定しているシステムは工場排熱を熱交換器を通して回収し、これを温水パイプラインにより、需要家側に輸送するものである。本研究における主な前提条件は以下の通りである。アンケートデータにおいては様々な温度レベルの排熱が存在するが、本研究では総排熱エネルギーで計算するため、低い温度設定とした。また、配管を埋設することを考慮するとコストが地理的要因によって大きく異なっているなどの不確定性が多いことから配管を埋設することは考慮していない。



熱輸送媒体：温水 (60℃、10[kgf/cm<sup>2</sup>])

配管内流量：4000[m<sup>3</sup>/h]

配管材：配管用炭素鋼鋼管

配管外径：914.4[mm]

配管内径：889[mm]

配管質量：282[kg/m]

(文献[1][2]を参照に設定)

配管の耐用年数：30 年

熱交換器効率：0.9

ポンプ動力：効率 0.75

(文献[4]を参照に設定)

#### 4.2 圧力損失の計算

Darcy-Weisbach の式に基づき圧力損失を計算した。(以下式は文献[1]より引用した。)

$$\frac{\Delta P_f}{\gamma} = \lambda \frac{l}{d} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (14)$$

$\Delta P_f$ ：圧力損失

$\lambda$ ：管摩擦係数

$d$ ：管径

$l$ ：管長さ

$\gamma$ ：比重量

$v$ ：管内流速

<注>

$\lambda$  はレイノルズ数、管径、管内面粗さの関数であり、以下のムーディの式によって求められる。

$$\lambda = 0.0055 \left[ 1 + \left( 20000 \frac{k}{d} + \frac{10^6}{\text{Re}} \right)^{1/3} \right] \quad (15)$$

$\text{Re}$ ：レイノルズ数

$$\left( \text{Re} = \frac{vd}{\nu} \right)$$

$K$ ：管内面粗さ

以上の式によって求められた圧力損失より、ポンプ動力が以下の式によって計算される。

$$Le = \frac{\gamma Q \left( \frac{\Delta P_f}{\gamma} \right)}{6120\eta} \quad (16)$$

$Le$ ：ポンプ動力

$Q$ ：ポンプ流量

$\eta$ ：ポンプ効率

#### 4.3 熱損失の計算

一般に、長さ  $dL$  の配管中で  $dQ$  の熱損失があった場合、次の関係式が成立する。(以下、式は

文献[1]より引用した。)

$$dQ = \pi \cdot d_i \cdot K_i \cdot T \cdot dL \quad (17)$$

T : 管内流体温度と管外部温度の差

D<sub>i</sub> : 管内径

K<sub>i</sub> : 管内面基準熱通過率

ここでK<sub>i</sub>は、以下の式より求められる。

$$\frac{1}{K_i} = \frac{1}{\alpha_i} + d_i \cdot \sum_{n=1}^n \frac{1}{2\lambda_n} \cdot \left( \log_e \frac{d_n}{d_{n-1}} \right) + \frac{d_i}{\alpha_0 \cdot d_0} \quad (18)$$

α<sub>i</sub> : 管内面側表面熱伝達率

α<sub>0</sub> : 管外面側表面熱伝達率

d<sub>n</sub> : 第 n 層の管外径

λ<sub>n</sub> : 第 n 層の管材の熱伝達率

<注>

α<sub>i</sub> は、鉛管内乱流に対するディッタスらの式

$$\frac{\alpha_i \cdot d_i}{\lambda} = 0.023 \left( \frac{v \cdot d_i}{\nu} \right)^{0.8} \cdot \text{Pr}^{0.4} \quad (19)$$

v : 管内流速

ν : 流体の動粘度

Pr : 流体のプラントル数

λ : 流体の熱伝導率

により算出する。

この時、管内を流れる流量 W の温水がこのために dT だけ温度低下したとすると、

$$dT = -\frac{dQ}{1000W} = -\frac{\pi \cdot d_i \cdot K_i \cdot T \cdot dL}{1000W} \quad (20)$$

なる変数分離系の微分方程式が成り立つ。

これから、初期条件を与えることにより、以下に示す配管内外の温度差関数が得られる。

$$T = T_1 \cdot \exp \left( -\frac{\pi \cdot d_i \cdot K_i \cdot L}{1000W} \right) \quad (21)$$

T<sub>1</sub> : 配管始点における管内外の温度差

これらの式により、距離別の熱輸送効率を求めた。

表 4. 1. 距離別熱輸送効率

距離 (km)	1	5	10	15	20
効率 (%)	99.3	96.3	92.8	89.4	86.1

## 4.4 熱輸送ベクトルの各成分の設定

熱輸送ベクトルにおいて、産出物は輸送される排熱エネルギーである。輸送される排熱エネルギーは以下の式によって求められる。

輸送される排熱エネルギー=排熱エネルギー×熱回収率×熱輸送効率

これを産業連関表から求めた熱料金 25 円/Mcal を用いて金額に換算し、そしてそれを産出物として熱供給業の部門に代入する。表 3.1、4.1 より、輸送される 4 業種合計の輸送距離別の排熱エネルギー量求め(表 4.2)、それを金額に換算すると表 4.3 のようになる。

表 4. 2. 輸送距離別の総排熱エネルギー量(Tcal)

1km	5km	10km	15km	20km
181,396	176,040	169,567	163,332	157,326

表 4. 3. 輸送距離別の総排熱エネルギー量(10<sup>3</sup> 百万円)

1km	5km	10km	15km	20km
4,535	4,401	4,239	4,083	3,933

## 4.5 計算結果

以上より、熱輸送ベクトル b を作成し、化石燃料削減効果を算出した。投入物としては、総ポンプ動力量を金額換算して電力部門に、輸送配管の総素材量を金額換算して鉄鋼部門に代入した。

表 4. 4. 化石燃料削減効果(百万円)

	1km	5km	10km	15km	20km
石炭	62,411	60,143	57,383	54,706	52,108
原油	95,408	91,341	86,373	81,532	76,811
天然ガス	113,152	108,783	103,459	98,284	93,253

化石燃料の発熱量、価格、二酸化炭素原単位より求めた産業連関表における化石燃料の二酸化炭素原単位(kg-CO<sub>2</sub>/百万円)は以下の通りである。



表 4. 5. 化石燃料の二酸化炭素原単位 (kg-CO<sub>2</sub>/百万円)

	石炭	原油	天然ガス
二酸化炭素原単位	257,092	133,562	92,914

以上の表 4. 4, 4. 5 より、排熱エネルギーを輸送することによる輸送距離別の二酸化炭素削減効果が算出される。1994 年度の日本全体の二酸化炭素排出量(13. 42 億 t)に対する割合とともに以下に示す。

表 4. 6. 二酸化炭素削減効果 (10<sup>3</sup>t-CO<sub>2</sub>)

	1km	5km	10km	15km	20km
石炭	16,045	15,462	14,753	14,064	13,396
原油	12,743	12,200	11,536	10,890	10,259
天然ガス	10,513	10,107	9,613	9,132	8,665
合計	39,302	37,769	35,902	34,086	32,320
削減率(%)	2.93	2.81	2.68	2.54	2.41

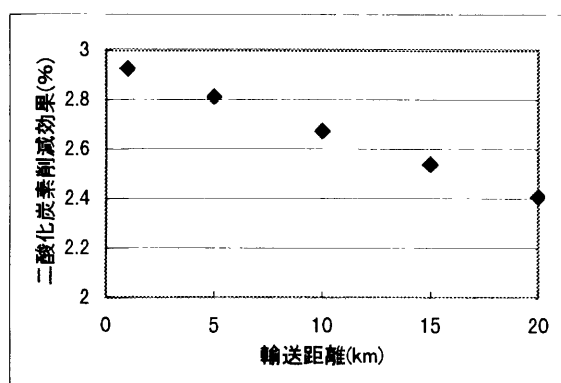


図 4. 1. 距離別の二酸化炭素削減効果

## 5. おわりに

アンケートデータから得られる業種別の排熱の現状比較によると、排熱エネルギー量から見て排熱の外部利用の余地が大きい業種として、電力製造、窯業・土石製品製造業、鉄鋼業、石油・石炭製品製造業の 4 業種が挙げられる。そしてこれら 4 業種の排熱を 20km 輸送して利用することにより、日本全体の二酸化炭素排出量の約 2.4%を削減できることが分かった。これらの値は需要側の必要な温度レベルなどについては考慮されていない。つまり、究極的な排熱利用可能

性を示しているといえる。実際に排熱輸送するときの地理的条件、排熱の種類、温度レベルなどについても考慮しなければならない。そのため、実際の排熱利用可能性としては本研究の計算よりも小さくなると考えられる。しかし、その一方で、今回のアンケートデータにおいては40℃以上となる排熱しか考慮されておらず、電力製造における低温の温排水など、低温排熱の利用可能性も残されている。

今後の方向性としては、

- ・配管径を輸送距離によって変化させる
- ・温水系以外の熱輸送システムについての評価
- ・配管を埋設したときの評価
- ・温度レベル別の評価

などを考えている。

#### 参考文献

- [1] 千葉孝男著「蒸気・高温水システム-配管径の設計から施工まで」(財)省エネルギーセンター編 1990 年第 1 版
- [2] 小河内美男著「配管工学」工学図書株式会社版 1971 年第 11 版
- [3] (財)省エネルギーセンター「工場群のエネルギーシステムに関する調査研究 平成 9 年度 成果報告書」1998 年
- [4] 長谷川秀夫「熱輸送媒体に着目した各種排熱輸送システムの分析に関する研究」東京大学修士論文 1996 年
- [5] 若林龍成「日本の工業炉における熱効率の統計的解析とその改善による CO<sub>2</sub> 削減量の分析」東京大学修士論文 1998 年
- [6] (財)通商産業調査会 経済統計情報センター「産業連関磁気テープ等利用のしおり」
- [7] 宮沢健一編「産業連関分析入門」日本経済新聞社 1995 年第 6 版
- [8] (財)省エネルギーセンター「エネルギー・経済統計要覧」日本エネルギー経済研究所 エネルギー計量分析センター編 1997 年