ごみ焼却発電施設の広域運用

正員 土屋 幸男 (八戸高専)

准員 星川 宗好 (豊橋技術科学大学)

正員 榊原 建樹 (豊橋技術科学大学)

Wide-Area Operation of Refuse Fired Power Plants

Yukio Tsuchiya, Member (Hachinohe National College of Technology), Muneyoshi Hoshikawa, Associate, Tateki Sakakibara, Member (Toyohashi University of Technology)

With economic growth, municipal refuse as well as electric energy consumption of the refuse disposal plants are rapidly increasing. Therefore, the improvement of refuse disposal plants and the conservation of energy have become the most important issues in the refuse disposal sector in Japan. Recently, the refuse fired power plants have been constructed at many local municipalities. However, some plants can not help disposing of the refuse at a high cost.

In this paper, in order to minimize the total cost necessary for refuse disposal, a linear programming model of the wide-area operation is presented on the basis of the ten existing refuse disposal plants in Aichi prefecture. This operation cuts down the total cost by about 6 hundred million yen and increases the total electric energy by about 3 GWh compared with the actual values under the electricity sales price 10 yen/kWh and the unit price of transportation of refuse 43 yen/ton/km.

キーワード：ごみ焼却発電，広域運用，線形計画法，輸送単価，販売電力量単価

1. まえがき

経済成長に伴い，わが国のごみの発生量は増加し続け，環境保全施設であるごみ焼却施設の焼却量と施設の消費電力量が急激に伸びている⁽¹⁾。ここでは，ごみ焼却施設で必要とする熱需要と電力需要は可能な限りごみ焼却熱と同発電とによるエネルギーで賄うことが求められる。これにより火力発電所等で使用する化石燃料消費量の節減が可能になり，地球温暖化等の環境保護問題への貢献が期待できる。さらに，施設の大規模化と高効率化を押し進めると，ごみ焼却発電で生じた余剰電力の電力系統への逆潮流が可能となり，広い意味でのエネルギーリサイクルが達成できる。

ここ数年の間に，わが国のごみ焼却発電施設は急激な伸びを示し，1992年現在で発電機を設置するごみ焼却施設の数134（清掃工場全体の約7%），合計の発電容量は589MVAになっている⁽²⁾。さらに西暦2010年には合計の発電容量は3GWを越えるとの試算があり^{(1)，(3)}，今後の発展が期待できる。

一方，現行ではごみ焼却施設の建設と運用に関わる事務は

主として個別の地方公共団体に任されているため，上述の理念とは別に以下に述べるいくつかの問題がある。

① 発電を行う本格的な余熱利用のためには今まで以上に初期投資がかかり，小さな公共団体では導入が困難であること。

② ごみ資源が分散しているために，発電設備を備えるほどの大きな施設を建設できないこと。

③ ごみ焼却施設運用にかかる費用は施設により様々であり，例えばごみの輸送に高い費用をかけて処理せざるをえない施設があること。

④ また一方では，新設の清掃工場は将来的なごみの増加を見越して建設計画が立てられるので，焼却能力に余裕のある施設があること。

このような課題に対しては，複数の施設の運用を上手に組み合わせること，すなわち行政上の広域運用により，頭書のエネルギーリサイクルの効率化を達成することが望ましい。

以上の点に注目し，現在稼働中の複数のごみ焼却施設を広域運用し，全体としてのごみ焼却処理費用を最小にする

問題 (4)~(7), 自家発電最適運用のコスト要因と潮流モードの問題⁽⁸⁾等を検討した。本研究では, これまでの研究をもとに, ごみ輸送に関わる基本料金をあらたに考慮し, 現状と最適化を行った場合の費用の比較検討を行い, 広域運用の効果と課題を明らかにする。

具体的な検討では, ごみ焼却施設の広域運用の対象として愛知県内の10施設を取り上げ, これらの運用を線形計画問題として定式化し, 各施設の最適輸送量と焼却量を求める。その上で, 最適焼却量によって得られる発電電力量を定め, ごみの輸送単価および販売電力量単価の影響を考察する。なお, 本研究を進める上で必要となるごみ焼却処理施設の実際の運用データは, 公表された資料⁽⁹⁾をもとに, 現地調査ならびにアンケートを実施することにより入手した。

2. モデルの構築

本論文で述べる広域運用システムでは施設全体の利益を第一に考え, 各市町村の枠組みはないものとして互いに協力するシステムを考える。このシステムの特徴はごみを輸送して処理することにより, 従って施設全体で余分にかかる費用はごみの輸送単価のみとなる。これを実現するためには輸送する側が, 相手側の焼却処理費用に加えて輸送費を負担することが考えられる。しかし, 発電電力量の算定では, 焼却する施設の焼却量がもたれているため, 便宜上, 焼却施設の焼却処理価格に含めて輸送価格を計上するものとして定式化する。

〈2.1〉 目的関数と制約式 全施設のごみ焼却費用の総和 C の最小化を目的関数に設定する。

$$\text{Minimize } C = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n P_{ij} X_{ij} \quad \dots\dots (1)$$

制約条件

$$\sum_{j=1}^n X_{ij} = E_j \quad \dots\dots (2)$$

$$\sum_{j=1}^n X_{ij} \leq B_i \quad \dots\dots (3)$$

$$X_{ij} \geq 0 \quad \dots\dots (4)$$

ここで

n : 総施設数,

i : ごみ焼却施設番号,

j : ごみ収集施設番号,

P_{ij} : 施設 j から輸送され施設 i で焼却処理される
ごみ焼却処理単価 [円/t],

X_{ij} : 施設 j から施設 i へ輸送されるごみ量 [t],

E_j : 施設 j の収集量 [t/年],

B_i : 施設 i の焼却上限量 [t/年]。

なお, (2)式は j 施設で収集するごみは, 自己施設と他施設への輸送量に等しいことを意味する。また(3)式は, 各施設の焼却量はそれ自身の焼却上限量以下であることを意味する。

〈2.2〉 ごみ焼却処理単価 まず各施設毎の年間にかか

るごみ焼却処理費用を施設 i の焼却処理費用 (焼却費と埋め立てにかかる費用), 輸送費, 施設 j の収集費の3つに区分する。この3つの費用をそれぞれ焼却量で割ると, ごみ1tあたりのごみ焼却処理単価 (以下, ごみ焼却処理単価) が定まる。すなわち,

$$P_{ij} = P_{Ii} + P_{Tij} + P_{Gj} \quad \dots\dots (5)$$

ここで,

P_{Ii} : 施設 i の焼却処理単価 [円/t],

P_{Tij} : 施設 j から施設 i への輸送単価 [円/t],

P_{Gj} : 施設 j の収集単価 [円/t]。

ただし, 本論文では調査データの曖昧さから P_{Gj} を除外している。

〈2.3〉 施設 i の焼却処理単価 さらに, P_{Ii} は販売電力量料金をパラメータとして, 次式で与える。ただし, 電力購入の基本料金は契約形態で異なることが考えられる⁽⁸⁾の

$$P_{Ii} = \frac{\text{施設整備費} + \text{燃料費} + \text{購入電力量料金}}{\text{焼却量}} - \frac{\text{販売電力量単価} \times \text{販売電力量}}{\text{焼却量}} \quad \dots (6)$$

ここで施設整備費, 燃料費, 購入電力量料金, 焼却量, 販売電力量の各データは調査によって定める。

なお発電設備を持たない施設では(6)式は右辺第1項のみになる。同じく, 発電設備を有しても販売電力が不可の施設では, 発電機出力が自己施設の需要電力以下になるようにあらかじめ建設段階で設計されているため, 販売電力量は零になり, (6)式は右辺第1項のみになる。

〈2.4〉 輸送単価 輸送単価の算定では現在の商用ベースとして, 一般貨物運送事業の貸し切り運賃の中部運輸局管内運賃料金⁽¹⁰⁾ (以後, 一般貨物運賃とする) を用いる。この一般貨物運賃は10t車の実績データがもとになっているので, 本論文ではごみの輸送であることを考慮し, 一般貨物の4割増しと仮定したものを図1に示す。同図の関係を一

図1 ごみの輸送単価

Fig.1. Unit price of transportation of refuse.

表1. 施設の諸元
Table 1. Specifications of facilities.

施設 番号 i, j	焼却 能力 (t/日)	焼却 上限量 (kt/年)	収分量 (kt/年)	焼却処理 単価 (千円/t)	単位 発電量 (kWh/t)	自家発電 設備規模 (kW)	販売 電力
1	450	164.3	125.3	11.9~15.4	306	6,000	可
2	450	164.3	115.7	13.6~15.8	239	4,950	可
3	450	164.3	108.5	15.2			
4	600	219.0	145.6	15.0			
5	900	328.5	226.8	15.6	52	2,500	不可
6	444	162.1	93.5	13.1	56	1,500	不可
7	300	109.5	72.2	9.8			
8	150	54.8	24.9	12.4			
9	150	54.8	25.2	13.3			
10	410	149.7	90.7	7.8	68	1,400	不可

次式と見なすと

$$P_{Tij} = P_T + P_{TD} D_{ij} \dots\dots\dots (7)$$

となる。ここで

P_T : 輸送基本料金単価 [円/t],
 P_{TD} : t・kmあたりの輸送単価 [円/t・km],
 D_{ij} : 施設 i と施設 j の距離 [km].

(7) 式より、輸送単価 P_{TD} が増加すると (5) 式のごみ焼却処理単価が増加し、(6) 式の焼却処理単価が低い場合でも輸送が行われないケースが生じる。

＜2.5＞ 総発電電力量 広域運用の対象になる発電設備の総発電電力量は、各施設の単位発電量を実績データからあらかじめ求めておく。次いで最適化された各施設への輸送量を

(1) ~ (4) 式から求め、各施設の焼却量を定める。その上でこれら両者の積を求め、計画施設全体の総発電電力量 W を次式で求める。

$$W = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n X_{ij} W_j \dots\dots\dots (8)$$

ここで W_j : 施設 j の単位発電量 [kWh/t]。

3. シミュレーション

＜3.1＞ シミュレーションの方法 シミュレーションでは輸送基本料金単価 P_T を 2,000円/t に固定し、販売電力量単価とごみ輸送単価の変化に対する反応を調べる。はじめに、輸送単価 P_{TD} (以下では記号 P_{TD} を省略し、単に輸送

単価) を固定し、販売電力量単価を変えた場合の反応を調べる。続いて、販売電力量単価を固定し、輸送単価を変えた場合の反応を調べる。ここでは現実的な値を想定し、販売電力量単価は 1~20円/kWhの範囲で、また輸送単価は 1~100円/t・kmの範囲でそれぞれを変化させる。

＜3.2＞ 施設の諸データ 本論文で計算対象とした愛知県内10施設の主要データを表1に示す。なお (5) 式に従った場合、販売電力量単価が 1~20円/kWhの範囲で変わることでより販売電力の可能な施設 1, 2 の焼却処理単価に幅が見られる。

＜3.3＞ 施設間距離 表2は、施設相互の距離である。

4. 計算結果

＜4.1＞ 販売電力量単価に対する反応 輸送単価を 43円/t・kmとして販売電力量単価を変化させ、ごみ焼却処理総費用を最小にする輸送形態と、そのときの総発電電力量を計算する。

(1) 各施設の最適焼却量 まず、最適輸送状態での各施設の焼却量を図2に示す。本図より、販売電力量単価の増大に伴い施設 1 および 2 の焼却量は次第に増加し、施設 4 および 5 は次第に減少していくことがわかる。これは販売電力量単価が増加すると、電力の販売の可能な施設 1 および 2 でのごみ焼却処理単価が低減し、これらの施設への輸送が多くなるからである。施設 7, 8 および 10 については焼却処理単価が他の施設に比べて安いので、販売電力量単価が変化しても、施設の焼却上限量で常に焼却が行われている。施設 6, 9 については、比較的焼却処理単価が安いのであるが、施設の設置場所が離れているため、輸送を行うと逆に費用がかかり輸送が行われず、焼却量は一定である。

また、施設 1 が焼却上限量まで利用できるのは、13円/kWh以上の場合である。

(2) ごみ焼却処理総費用と総発電電力量 上記の最適化された輸送形態でのごみ焼却処理が行われたときのごみ焼却処理総費用と総発電電力量の結果を図3に示す。本図から

表2. 施設間距離

Table 2. Distance between facilities.

施設 番号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.0									
2	9.1	0.0								
3	12.3	15.8	0.0							
4	15.0	11.1	11.0	0.0						
5	6.4	14.9	10.1	17.4	0.0					
6	73.6	76.8	61.8	67.2	70.9	0.0				
7	21.2	17.0	15.2	6.3	23.0	65.4	0.0			
8	24.0	23.4	13.1	12.6	23.1	56.0	9.9	0.0		
9	32.8	38.6	24.8	35.8	30.6	54.7	38.9	32.5	0.0	
10	26.2	18.1	25.2	14.2	30.3	77.1	12.5	22.3	49.9	0.0

単位 (km)

図2 販売電力量単価が変化したときの各施設の
ごみ焼却量 (輸送単価: 43円/t・km)
Fig. 2. The quantity of incineration as a
function of electricity sales price.

図3 販売電力量単価に対する総発電電力量と
ごみ処理総費用 (輸送単価: 43円/t・km)
Fig. 3. Total electric energy and total cost of
refuse treatment as a function of electric
sales price.

図4 輸送単価が変化したときの焼却量
(販売電力量単価: 10円/kWh)
Fig. 4. The quantity of incineration as a
function of transport price.

図5 輸送単価に対する総発電電力量とごみ処理
総費用 (販売電力量単価: 10円/kWh)
Fig. 5. Total electric energy and total cost of
refuse treatment as a function of transport
price.

は、ごみ焼却処理総費用は販売電力量単価が増加するにつれて次第に減少していることがわかる。

また、総発電電力量は3~5, 7~8, 12~13円/kWhの範囲で不連続に増加している。この原因は次のようである。販売電力量単価が高くなると、自家発電設備を有し、電力を販

売している施設 (施設1および2) での焼却処理単価が安くなる。それによって、他の施設からの輸送が促進されるからである。

逆に、販売電力量単価にかかわらず総発電電力量が一定

に留まる箇所がある。これは各施設での焼却量に変化が見られないためである。

広域運用が行われていない現状の実績は、平成3年度では販売電力量単価が約5円/kWhで、ごみ焼却処理総費用が約143億円、総発電電力量が約89GWhである。これらの数値を図3の最適値（約139億円、78GWh）と比較すると、広域運用を行うことによってごみ焼却処理総費用は約4億円節減でき、総発電電力量は11GWh減少することがわかる。しかし、平成4年度からは非電気事業者の発電する余剰電力の電気事業者による買取り、いわゆる逆潮流が本格化したため、買取り単価の改訂が行われ、この地域では約10円/kWhに増えた。これにより最適値は約137億円、92GWhとなる。よって平成3年度の実績と比較すると、ごみ焼却処理総費用は約4%（約6億円）の削減、総発電電力量は約3%（約3GWh）の増加が期待できる。

＜4.2＞ 輸送単価に対する反応 今度はごみ焼却処理施設が電気事業者に売電するときの販売電力量単価を10円/kWhに固定し、輸送単価を変化させ、ごみ焼却処理総費用を最小にする輸送形態を求める。その際、ごみ焼却処理総費用および総発電電力量を計算する。

（1）各施設の最適焼却量 まず、各施設の焼却量を図4に示す。本図によると、輸送単価の増加に伴い施設5の焼却量は次第に増加するが、施設4、6および9の焼却量は減少していくことがわかる。これは輸送単価が増加すると施設の位置関係から、より近くて安い施設へ輸送が行われるからである。施設5は最も焼却処理単価が高いのであるが、他施設との距離が離れているので、輸送単価が増加するにつれて自己施設での焼却量が増加する。電力販売の可能な施設1、2ではより安く処理できるが、輸送基本料金単価が負担になり、輸送単価に関わらず収集量と同量の焼却が行われる。また焼却処理単価の安い施設7、10では、輸送単価に関わらず常に焼却上限量に位置する。焼却処理単価が中位にある施設8および9では輸送単価が安いときには利用され、逆に高くなるにつれて各施設の収集量分だけの処理に移行する。施設3については一度減少して、再び増加する。これは輸送単価が低い場合は施設5から施設8への輸送がみられるものの、輸送単価が増加すると、施設5からの輸送が停止し、施設3からの輸送が行われるためである。さらに輸送単価が増加すると施設3からも輸送されなくなる。

（2）ごみ焼却処理総費用と総発電電力量 上述の最適輸送状態でのごみ焼却処理総費用と発電電力量の結果を図5に示す。

本図から、ごみ焼却処理総費用は輸送単価が増加するにつれて次第に増加していることがわかる。ごみ焼却処理総費用が輸送単価の増加に伴って増加するのは、輸送単価が増加するとたとえ安く処理できる施設があったとしても輸送コストが負担となって輸送できず、各施設が単独処理に近づ

くためである。

一方、総発電電力量は8～9円/t・kmで一旦減少するものの、増加傾向にあることがわかる。なお、8～9円/t・kmで減少する理由は、単位発電量の若干高い施設6への輸送が伸びず、施設5自身で焼却されるためである。輸送単価が11円/t・kmを超えて再び総発電電力量が増加しているのは、施設3、4、9から施設5への輸送が増え、その焼却量が増えるためである。さらに輸送単価が46円/t・kmで、総発電電力量が上限に達する。

また輸送単価が46円/t・km以上では、総発電電力量が飽和している。これは＜4.1＞の販売電力量単価に対する反応と同様、輸送単価が増加しても発電施設での焼却量に変化が見られないためである。

5. むすび

近年のごみ焼却施設の立地の困難性、また計画的な施設整備、資源の有効利用や省エネルギー等の観点から、ごみ焼却発電はますます重要性を増している。本研究ではごみ焼却施設の広域運用という考えに基づき、計画施設全体の処理費用低減化の方策を検討した。結果として、広域運用を行うことにより、ごみ焼却処理総費用の削減と総発電電力量の増加が期待できることを示した。

今回検討の対象とした、特定の地域のごみ焼却施設の広域運用について、得られた知見を要約すると次のようである。

（1）輸送単価を固定した場合、販売電力量単価の増加とともにごみ焼却処理費用は単調に減少する。また総発電電力量は不連続に増加し、焼却量の限界で上限に達する。一例として、輸送単価を43円/t・kmとしたとき、販売電力量単価13円/kWh以上で全ての発電施設の焼却量が上限に達し、総発電電力量は飽和する。

（2）販売電力量単価を固定した場合、輸送単価の増加とともにごみ焼却処理総費用は単調に増加する。また総発電電力量は不連続に増加し、焼却量の限界で上限に達する。一例として販売電力量単価10円/kWhとすると、輸送単価が46円/t・km以上で総発電電力量が上限に達する。

（3）販売電力量単価10円/kWh、輸送単価を43円/t・kmの場合、広域運用を行わない単独処理実績（平成3年度）と比較し、ごみ焼却処理総費用で約4%の削減、総発電電力量で約3%の増大が期待できる。

本研究の課題としては以下のことが挙げられる。

- （1）広域運用で得られた利益の公正な利益配分。
- （2）運転稼働率の変化によりコストが変化するもののモデル化。
- （3）発熱量変化や熱収支を考慮する発電電力量の算出。
- （4）発電以外の余熱利用の利益評価。

終わりに、本研究を行うにあたりご協力頂いた名古屋環境事業局、豊橋市資源化センターの関係者各位に対し、

感謝の意を表します。

(平成6年7月18日受付、同年11月14日再受付)

文 献

- (1) Y.Tsuchiya, T.Sakakibara: "A Model for Evaluating the Reverse Power Flow Energy of Refuse Fired Power generation in Japan", *IEEE Trans. on Energy Conversion*, pp.681-687, Vol.8, No.4, Dec. 1993.
- (2) 厚生省生活衛生局水道環境部編:「廃棄物処理事業・施設年報・平成5」:環境産業新聞社, 1994.
- (3) S. Fukuda, H. Haneda: "Power Generation System Utilizing Refuse Derived Fuel from Municipal Solid Waste", *An International Conference on Power Industry Technology and Management Strategies for the 21st Century*, pp.203-208, May, 1992.
- (4) 星川, 土屋, 榑原:「ごみ焼却発電の広域処理モデルの構築」, 平成5年電気学会全国大会, No.1639.
- (5) 星川, 土屋, 榑原:「輸送コストを考慮したごみ焼却施設の広域運用」, 平成5年電気学会電力エネルギー部門大会, No.236.
- (6) 星川, 土屋, 榑原:「全国ごみ焼却発電施設の総合利益と発電機出力」, 平成5年電気関係学会東海支部連合大会, No.107.
- (7) 星川, 土屋, 榑原:「販売電力量単価および輸送単価を考慮したごみ焼却施設の広域運用」, 平成6年新・省エネルギー研究会, ESC-94-6.
- (8) 土屋, 榑原:「逆潮流許容下での自家発電最適運用のコスト要因と潮流モード」, 電気設備学会誌, 13巻6号, pp.548-554(1993).
- (9) 厚生省生活衛生局水道環境部編:「廃棄物処理施設データブック平成3」:環境産業新聞社, 1991.
- (10) 「建設単価」:建設物価調査会, p.771(1993年4月).

土 屋 幸 男

(正員) 1971年3月八戸工業高等専門学校電気工学科卒業。同年4月富士電機製造株式会社入社。1977年7月八戸工業高等専門学校助手, 1988年4月 同講師。1991年4月豊橋技術科学大学講師。1993年4月八戸工業高等専門学校助教授, 現在に至る。工学博士。エネルギー・資源学会, 計測自動制御学会, IEEE会員。

星 川 宗 好

(准員) 1969年4月15日生。1992年3月豊橋技術科学大学工学部電気電子工学科卒業。1994年3月同大学大学院電気電子工学専攻修了, 同年4月日立中部ソフトウェア(株)入社, 現在に至る。

榑 原 建 樹

(正員) 1972年名古屋大学大学院工学研究科電気工学博士課程修了。同年4月同大学助手。1978年4月豊橋技術科学大学講師, 1980年4月同助教授, 1986年同教授, 現在に至る。工学博士。応用物理学会, 日本太陽エネルギー学会, IEEE会員。