

＜文献資料紹介＞

発電所立地のためのスクリーニング・モデル

—— 環境基準と立地点選定モデル ——

David H. Marks and Gerhard H. Jirka, Environmental Screening Model for the Location of Power Generating Facilities, 1973.

根 本 和 泰

発電所の最適立地問題を線型計画法で解くという方法は、これまで普通に行なわれてきたことであり、さほど目新しいことではない。しかし近時の環境問題に対する住民意識の高揚と電源立地難の深刻化は、このような厳密な数学モデルの定式化によっては把握しきれない多くの難問を噴出せしめている。すなわち、大気や水の汚染、あるいは温排水による熱汚染、原子力発電による放射能汚染といった環境へのフィジカルな効果を考慮するだけではなく、地域開発効果といった経済的要因はいうまでもなく、地域の風俗、習慣、あるいは住民意識とか反対運動といった社会的要因までも考慮すべきことが非常に強く要請されている。

ところがこれらの要因を数学的な最適立地モデルとしていかに定式化するかということになるとかなり困難な問題となる。

本論文において特に注目していただきたいのは、著者が電源立地の底流に存在するこのような問題を十分に意識しながら、立地モデルを立地点評価モデルと立地点選定モデルとの2つのサブモデルに分けることを主張している点である。すなわち立地点評価モデルにおいて、環境要因や経済的、社会的要因を評価し、そのアウトプットを立地点選定モデルのインプットに用いるべきだとしている。

ただしここでとり上げられている立地点評価モデルは発電所の温排水による熱汚染に限られており、しかも評価モデルの構造そのものについての解説は、完全に欠落している。それは本論文が、全米 OR 学会（第39回大会）の講演速記録をもととしているためであると考えられる。したがって本論文では、立地点選定モデルの解説が主となっており、それは発電所立地問題の数学的定式化の部分とそれを実際に Connecticut 州に適用した事例研究の部分とで成り立っている。以下にその概略を紹介しよう。

もし発電所立地問題が輸送問題として構成されるならば、問題は商品としての電気の生産と輸送の結合されたコスト (combined cost) をいかに最小化するかということになる。商品としての電気のフローは、ソース（発電所）から中間のネットワーク・ポイント（送変配電設備）を経て、直接にシンク（需要地、消費者）にいたるまでとなる。発電所は容量制約 (capacity constraint) によって特徴づけられ、また他の制約が適用されるようなサブセットに類別される。そしてこのようにいくつかのサブセットに類別されるのは、次のような要件によるのである。

(1) 連続的な凹状の総生産費関数に接近する

ため、代替案として示めされた発電所の数によって、容量の範囲が不連続に区切られる。これらの代替案のうち、ひとつだけが建設されることになる。

- (2) 技術上経営上の理由によって、代替的な各立地点ごとにただひとつの発電所しか建設できないという“相互排他性の制約”が、いろいろと提案された発電所立地地点に加えられるかもしれない。しかし計算手順という点では、そのことと、“相互排他性の制約”が加えられるに至る所以とは別問題である。

この定義によって、発電所立地問題の数学的定式化が次のようになされる。

$$\text{Minimize : } \sum_{i=1}^m F_i y_i + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{p+n} (V_i + t_{ij}) x_{ij} + \sum_{k=1}^p \sum_{j=1}^{p+n} t^*_{kj} x^*_{kj} \quad \dots(1)$$

$$\sum_{j=1}^{p+n} x_{ij} \leq C_i y_i \quad i=1, 2, \dots, m \quad \dots(2)$$

$$\sum_{i=1}^m x_{ik} + \sum_{l=1}^p x^*_{lk} = \sum_{j=1}^{p+n} x^*_{kj} \quad k=1, 2, \dots, p \quad \dots(3)$$

$$\sum_{i=1}^m x_{il} + \sum_{k=1}^p x^*_{kl} \geq D_l \quad l=1, 2, \dots, n \quad \dots(4)$$

$$\sum_{i \in S_r} y_i \leq 1 \quad r=1, 2, \dots, s \quad \dots(5)$$

$$x_{ij} \text{ および } x^*_{ij} \quad \text{非負整} \quad \dots(6)$$

$$y_i = 0, 1 \quad \dots(7)$$

y_i = 数発電所 i が建設されるときは 1

= その他は 0

x_{ij} = 発電所 i から需要地 j までの商品としての電気のフロー

x^*_{ij} = 中継地点 i から需要地 j までの商品としての電気のフロー

t_{ij} = 発電所 i から需要地 j までのフローに対する単位当り輸送費

t^*_{ij} = 中継地点 i から需要地 j までのフローに対する単位当り輸送費

F_i = 発電所 i の単位当り年経費の固定費分

V_i = 発電所 i の単位当り年経費の可変費分
(その大部分は燃料費である)

C_i = 発電所 i の容量

D_l = 需要地 l の需要

S_r = “立地点” r における代替案 (発電所) のサブセット

m = 代替案 (発電所) の数

s = 立地点 (代替案のサブセット) の数
(ただし $s \leq m$)

p = 中継地点の数

n = 需要地の数

不等式 (2) は、発電所の容量制約の式である。等式 (3) は、中継地点におけるフローの蓄積を表わす。すなわち発電所および他の中継地点から流入するフローの総量であり、それは、他の中継地点ないし需要地へ流出するフローの総量に等しい。不等式 (4) は、需要地における需要の充足を扱うものである。需要は発電所からの直接の輸送と中継地点を経由した輸送によって達成される。

以上において定式化された発電所立地問題は、混合型整数計画問題 (mixed integer programming) であり、したがって線型計画法に直接にはなじまない。すなわち代替案として提示された発電所の固定費や、あるいは代替案としての発電所のサブセットに加えられる“相互排他性の制約”といった 2 つのソースが線型の場合にはうまく機能しないためである。したがって次のような単純化を導入することによって、問題を線型問題に変換することができる。

- (1) 相互排他性の制約, (5) 式を除去する。
- (2) 発電所 i の固定費は, (A) または (B) によって表わすことにする。

(A) 固定費 F_i と可変費 V_i は, 次式のようにならば平均化する。

ただし C_i は発電所 i の容量を示す。

$$\bar{V}_i = F_i/C_i + V_i \quad \dots(8)$$

(B) 可変費 V_i だけを考えることにして、固定費 F_i は直接に目的関数に含める。

平均費用 \bar{V} を用いる (A) の方法では、実際の発電所コストは、最末端を除いて、一般に過少評価されることになる。この (A) という方法は最初 Baumol と Wolfe (1958年) によって紹介されたものである。これに対して (B) の場合、発電所 i は建設されるということがすでに考慮されている、と暗黙裏に是認されているため (ここから、固定費 F_i は目的関数に加えられるのであるが)、ただ可変費 V_i だけが残されることになる。

次にこのように定式化されたモデルが、実際に Connecticut 州の電力システムについて適用されている。ここで用いられるデータは、次のようなものである。

- (1) 9基の既設のプラントについて、その立地点と冷却水の取水源および出力と年経費の可変費分。
- (2) 8地域の需要地とその現在 (1968年) および将来 (1978年) の負荷。
- (3) 立地可能地点8地点における冷却水の取水源、冷却水の種類、温度制約、さらに各立地可能地点に新設予定のプラント (代替案) およびその出力。なお代替案として示されたプラントの総数は23基。
- (4) 23基のプラント (代替案) の出力別の年経費 (固定費および可変費)
- (5) 熱除去のコストについては、資本費 (償却済) が 1,000 \$/MW、可変費 (背圧によるロスおよび冷却器のポンピングのコスト) が 200 \$/MW とされている。
- (6) 発電所から中継地点を經由して需要地に

いたるまでの輸送費 (\$/MW) とそのときの容量 (MW)。

以上のデータにもとづいて、シミュレーションがなされたが、そのケースの数は11個で、それは次のようになる。

- 1回目: 温度規制は全くなし。
- 2回目: 全面的な温度規制。すなわちすべての発電所が完全な熱除去の実行を要請される。
- 3回目: 通常温度制限。ただし Long Island Sound の立地点 S1~S3は、海岸立地 (ocean site) とし、立地点 S4は、河岸立地 (river site) とする。混合領域 (mixing zone) については、河岸立地の場合は50%のパスセージウェイ (passageway)、湖岸立地 (lake site) の場合は半径 300 ft の円状範囲 (circle) とする。
- 4回目: 3回目のケースに同じ。ただし Long Island Sound の立地点 S1~S3は、河口立地 (estuary site) とする。
- 5回目: 4回目のケースに同じ。ただし立地点 S4は河口立地とする。
- 6回目: 4回目のケースにおける温度制限が一律に50%増やされる。
- 7回目: 4回目のケースにおける温度制限が一律に 1°F 増やされる。
- 8回目: 5回目のケースに同じ。ただし、混合領域の定義が変わり、河岸立地の場合はパスセージウェイをなしとし、また湖岸立地の場合は 1,000 ft の円状範囲とする。
- 9回目: 立地点 S2を取り除くことにして、その他は5回目のケースに同じ。

10回目：5回目のケースと同じ。ただし、熱除去のコストは一律に50%増やすことにする。

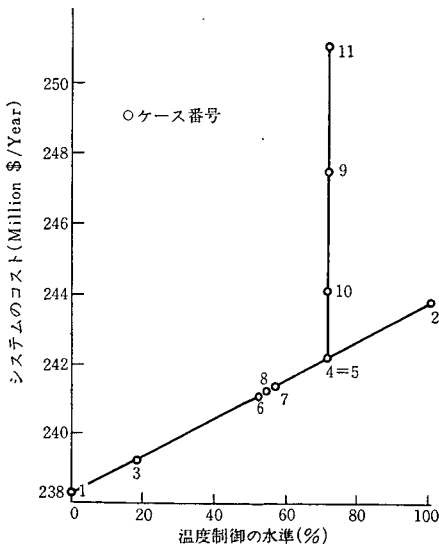
11回目：5回目のケースと同じ。ただし、輸送費が一律に50%増やされる。

以上のシュミレーション結果について、特にシステムのコスト (functional value) とその感度のみを取り上げて示すと次のようになる。

表 システムのコスト (年経費)

| ケース番号 | 年経費 (\$/year) |
|-------|---------------|
| 1 | 238,243,800 |
| 2 | 243,163,800 |
| 3 | 239,203,400 |
| 4 | 242,201,600 |
| 5 | 242,201,600 |
| 6 | 241,253,700 |
| 7 | 241,349,700 |
| 8 | 241,314,900 |
| 9 | 247,571,700 |
| 10 | 244,181,000 |
| 11 | 251,144,100 |

システムコストの感度



すべてのランにおいて、ただし9回目のケースを除き、同じようなシステムの最適な形状が得られた。すなわち次のような新しい発電所が

建設されることになった。

立地点 S2 の代替案 A6 (全容量 1,300 MW で使用)

立地点 S3 の代替案 A10 (全容量 1,400 MW で使用)

立地点 S5 の代替案 A15 (全容量 600 MW で使用)

立地点 S8 の代替案 A23 (全容量 800 MW で使用)

立地点 S2 は 9 回目のケースにおいては落されているので、コストの増大と共に他とは異った形状になっている。また代替案 A10 (ただし現在、1,300 MW でしか運転されていない) と A15 および A23 に加えて、立地点 S6 の代替案 A17 (全容量 600 MW で使用) が、最適な形状に現われた。

温度規制との関連でシステム・コストをグラフ化するため、その両端にケース 1 とケース 2 を選ぶことにした。それはこの両ケースが温度制御の水準 0% (熱除去を全く行わない) の場合と 100% (完全に熱除去を行なう) の場合だからである。またケース 3 からケース 8 までは、生産費 (発電所の年経費) と輸送費を全く変えないで、要するに温度規制をいろいろと変えただけのケースである。しかも同じようなシステムの形状がこれらのケースに対して得られた。そこでケース 3 からケース 8 は、それぞれのコストの高さに応じて、ケース 1 とケース 2 とを結ぶ直線上にプロットされる。またケース 9 からケース 11 は、ケース 5 と同じ温度制限であるので、ケース 5 の点を通る垂直線上にプロットされる。

データの有効性には制約があるため、モデルのアウトプットとして決まるシステム・コストは、必ずしも絶対のものとして完全に把握さ

れているわけではない。そのため、温度規制の関数としての相対的なコスト変化も、そのシステムにおいて特有なものであって一般的でない場合もある。しかし同様に、絶対的な値に関心をもつ現実のシステム管理においては、データ有効性の欠如などといったことはあり得ない、ということも注意すべきである。

熱除去を全くやらない場合のシステム・コストに対して熱制御を行なうことによるコスト増大ということを仮りに考えると、そのパーセントは十分な熱除去を行なう場合に対して約2%ほど増加する。ケース4と5は、通常温度制限を表わすので、温度制御の水準は、事実、非常に高く、約70~75%である、ということが分る。実際には、あらゆる場合に、熱除去を十分に行なうことが義務づけられているようである。現在、適用されている基準の緩和は、いくばくかのコスト減少（しかしあまり多くないが）をもたらす。そしてもし発電所立地が、何も温度基準のないような所で行なわれるならば（たとえばケース4の海岸立地など）、そのコ

スト節約は大変なものとなろう。

温度制御にともなう増分コストについては、もし他の要因も同じように考慮されるとすれば、もっと議論されてしかるべきであろう。たとえば他の点では都合のよい立地地点の否定は、十分な熱除去を行なうためのコストよりかなり高いコストとなる。同様にケース11におけるがごとく輸送費の増大は、都市地域においてはむしろ決定的な要因となるが、しかし、環境制御コストよりも大きくなる。この研究には直接に含まれていないが、しかしシステム・コストに大きな影響を与える他の要因として、資本投資の金利と運転費（熱料単価）の変化などがあげられる。

熱制御の増分コスト（将来の発電所のすべてに通常の基準が実施されたとした場合、標準的なシステムに対しては約1.5%ほどになる）は、あまり重要ではないし、他の要因よりも小さい。

（ねもと かずやす・電力経済研究部）