

工業開発地の選定とその規模の決定法に関する研究

A CHOICE METHOD OF THE AREA FOR INDUSTRIAL DEVELOPMENT

長尾 義三*・森 杉 寿芳**・佐藤 信秋***

By Yoshimi Nagao, Hisayoshi Morisugi and Nobuaki Sato

1. 緒 言

昭和 30 年代後半までのわが国における工業開発は、地域開発のためのほとんど唯一ともいえる手段として、各地方自治体の推進しようとしたことであった。これは、昭和 30 年代の後半の新産都市の指定が、当初数箇所の大規模な臨海工業地帯を建設しようとする政府の計画とはうらはらに、全国で約 40 の地域が誘致運動を強力に推進したために最終的には 15 の地域が指定されたという歴史的事実によってもうかがうことができる¹⁾。

一方、人間の健康を害する産業廃棄物を発生し、自然およびその他の環境を破壊する工業開発に対して、昭和 40 年前後から全国的にまきおこった公害反対運動は、その是非をきびしく追求するにいたっている。

他方、経済をより拡大成長させ、より豊かな生活を営なもうとするかぎり、いわば国民生活の台所ともいえる工業生産の拡大の必要性は続くものと思われる。特に、低所得で人口流出のはげしい過疎地域における所得の向上、雇用機会の向上をめざすためには、重大な環境破壊が発生しない範囲内の工業開発は進められねばならないものと思われる。

このような工業開発と環境破壊という問題に対して、從来、大別して 3 つのアプローチがなされてきた。第 1 は、大気汚染や水質汚濁の発生機構や自然の浄化能力などを解明することによって、汚染源の汚染物質を減少させようといふいわば純粋な科学技術的アプローチである。第 2 は、社会科学的アプローチともいえるもので、産業廃棄物の法的規制、被害者に対する救済、被害防止対策の費用負担などにみられる。そして、第 3 のアプローチは、土地利用計画的アプローチともいえるもので

ある。これは、もしも工業開発を必要とするのであれば、これを実現するための環境破壊をより少なく、かつ、国土や資源の有効利用を図るために、工業地帯内の土地利用計画や全国的な工業地帯の配置計画をいかに策定すればよいかという問題に答えようとするアプローチである。

本研究は、第 3 の立場をとり、そして、その基本的な考え方方は次のとおりである。

一般に、公共投資の評価基準として費用便益基準が提唱されている。本研究で問題にしている工業開発の便益の一部は産業連関分析や計量経済モデルで計測可能であるが^{2),3)}、これらの計測可能な便益がそのすべてではないし、その帰属の分析も困難であるのが現状である。したがって、本研究では、費用有効度基準を採用し、有効度の指標として造成工業用地面積を採用する。そして、工業地帯造成にともなう総費用の最小という基準を設けて、工業開発地点の選定を行なう。

計上すべき費用としては、提示される工業開発の候補地点の各代替案によって変動する費用のみを対象とし、いずれの候補地のいずれの代替案を採用しても変動しない費用は考察の対象外とする。計上の対象となる費用は、主として、開発地点の土地の機会費用、公共諸施設の建設費、工業および生活関連用地造成費、社会的費用および製品輸送費からなる。

これらの諸費用を計算するためには、開発候補地内の土地利用計画を必要とする。工業開発は単に工業用地のみを造成すればよいわけではないから、一定規模の工業用地造成にともなう公共施設の整備、流入人口の増加にともなう生活関連施設の整備を必要とし、これらの諸施設配置と土地利用が、社会的費用をも含めて低廉な費用で、快適な生活ができるようになされねばならない。このような候補地内の土地利用計画を行なうにあたって、特に注意を要することは、次の 2 点である。

(1) 工業用地造成および産業基盤の計画と流入人口

* 正会員 工博 京都大学教授 工学部交通土木工学科

** 正会員 京都大学助手 工学部交通土木工学科

*** 正会員 工修 建設省東北地方建設局

および地元住民の生活に直結する新都市開発計画とを合理的に結合すること。

(2) 新都市開発費用および社会的費用を定量化して、工業開発に必要な費用として総費用に算入すること。

こうして、工業開発に必要な費用が候補地ごとに、そして、その候補地に造成される工業用地の規模ごとに与えられると、工業開発地の配置と規模を決定する工業開発地点の選定計画のための計画目標として与えられる総工業用地需要を満たしたうえで、最小の費用となる工業開発地の配置とその開発規模を決定することができる。この工業開発地の選定システムを策定することが、本研究の主要な目的である。

このため、2. では工業開発に必要な諸費用の分析を行ない、特に2.(2)においては、従来なされていなかつた社会的費用の定量化の一例として大気汚染による経済的損失と汚染源との関係を統計的手法で分析する。次に、3. および4. において推定された費用関数に基づいて工業開発地の選定モデルの定式化とその解法を示し、5. においては選定モデルの感度分析を行なう。さらに、6. においては、算定例を示すことによって本モデルの実用性を検討する。

2. 工業開発費用

(1) 工業開発費用の列挙

一般にわが国における主要な工業地帯は港湾を中心とする臨海工業地帯である⁴⁾。この事実は、資源の乏しいわが国においては今後も変わらないものと思われるので、本研究においても主として臨海工業開発を対象とする。

工業開発の費用を分析するには、まず対象とする候補地に、ある規模の工業用地を造成する場合の対象地域内の工業用地およびそれに関連する生活関連施設を含む諸機能の空間的配置計画、すなわち、土地利用計画がなされていなければならない。工業開発のためには、工業用地、生活関連施設、公園などの公共用地、港湾、道路、鉄道などの諸施設を必要とする。さて、工業開発の費用は、いずれの候補地であろうと同じ規模の造成用地に対して一様に必要とする不変費用と、同一規模であっても候補地のもつ立地条件によって変動する変動費用とに分類される。前者は、工場や住宅などの建築物建設費や工業の原材料費などであり、後者は、用地造成費、公共諸施設建設費、土地の機会費用、公害などの社会的費用などを示す。本研究では、工業開発地の選定を行なうための費用を分析する目的をもつて、後者の変動費用のみ

表-1 工業開発費用の分類

費用分類	備考
変動費用	1. 用地造成費用 工业用地、新都市建設用地、公園、緑地などの造成費用
	2. 公共施設建設費用 港湾、道路、鉄道、工業水道、上下水道などの建設費
	3. 土地の機会費用 既存の土地利用の収益を犠牲にする費用であって、一般に補償費の根拠とされる
	4. 製品輸送費用 工業の製品を市場に運ぶ費用
	5. 社会的費用 大気汚染、水質汚濁、自然破壊などの公害の金額換算値であり、一般に計測が困難
不変費用	建築物建設費、原材料輸送費など

を対象とする。変動費用の分類は、表-1 に示すとおりとし、各項目について若干の説明を加えると以下のとおりである。

a) 用地造成費

工業用地の造成費は、主として埋立方式か、掘込方式かで異なり、いずれの方式においても水深や背後地の地形条件によって変動する。住宅用地の造成費は主として地形条件によって異なるが、加うるに、対象地域に既存の都市が存在するか否かによって変動する。既存の都市があるところでは、新たに流入してくる人口を既存の都市に収容できるが、既存都市がない場合には新都市を建設せねばならない。

b) 公共諸施設建設費

主として、港湾、鉄道、道路、工業水道の建設費が変動する。いずれも地形条件と既存施設の有無によって異なる。

c) 土地の機会費用

これは、工業開発のために転用される土地が、もし工業開発に使用されなかつたら得られたであろう収益から土地以外の諸費用を控除したものであり、一般に補償額の基準とされる。この考え方は、漁業権に対しても適用される。

d) 製品輸送費

主として、立地工業が負担すべき費用であり、市場への接近性という意味をもつ。製品の輸送先は、主として東京、大阪、名古屋などの大都市である。

e) 社会的費用

ここにいう社会的費用とは、カッブ (K. W. Kapp) の定義にしたがい、大気汚染、水質汚濁、自然環境の破壊などの公害の貨幣換算値である⁶⁾。当然のことながら、これらはいずれも候補地の地形および気象、海象条件により異なるが、同時に、被害を受ける人口および生活条件によっても異なる。しかし、大気汚染を除いて、他の公害の程度を貨幣タームで表示することは至難である。このため、これらの被害の程度をそれぞれの測度で表示し、それらの下限値（上限値）をあらかじめ決定しておき、この範囲からはずれる代替案または候補地を工業開発の予定地から排除しておく必要がある。

(2) 社会的費用の計測例

(1)において分類した5種類の費用のうち、a)～d)の費用は、開発計画案が提示されれば計算可能な費用であるが^{7),8)}、e)の社会的費用については、従来特定の地域における大気汚染の経済的被害の調査がなされたすぎなく、新たな工業開発地の社会的費用の推定はなされていない。したがって、本節では、社会的費用の計測例として大気汚染をとりあげ、統計的手法に基づく、その計算法を示す。

大気汚染による被害の程度は、汚染源と被害地点の空間的位置、気象条件、汚染源における汚染物質の排出量、被害地点における人口密度などの人や物の存在状況によって影響されることは周知の事実である。しかし、これらの関係を分析することはきわめて困難である。特に、大気汚染の経済的損失の調査には、次の2点における困難さがつきまとめる。

第1に、損失の中に貨幣タームでは計測が困難なものが存在する。たとえば、人命、自然的景観の破壊、不快感などの精神的被害などである。これらの被害は、大気汚染以外の公害と同様、上下限値を個別に決定する以外にない。

第2に、たとえ貨幣タームで測定可能な被害であっても、大気汚染を原因とする過剰支出であるのか、それとも他の原因に基づく過剰支出であるのかという判定の困難性である。

わが国における唯一の調査と思われる、大阪市での昭

和41年に行なわれた調査⁹⁾では、経済的損失として計量できない部分については除外し、総理府統計局の家計調査の対象とされた家計支出項目を参考とし、大気汚染による影響がおよぶとみなされる経常的な支出項目を選び、さらに特別な家計支出と資産損失分を加えて調査項目を限定している。そして、(1) 大気汚染による追加的支出として分離されうる項目としては、電灯料金、塗料類めりかえ費用、電気製品購入費、娯楽費、家賃、引越し費用および資産損失分を計上している。(2) 大気汚染被害分を直接には分離しえない項目としては、水道代、洗濯材料費、ワイヤシャツなどの衣服費およびクリーニング料、入浴料、化粧品料、掃除材料費、住宅設備修理費および医療費が含まれ、これらの項目は、住吉区のレベルにおいて正常であると仮定して超過分を大気汚染による被害とみなしている。そして、(1) および(2) の各項目の合計値を大気汚染の被害額として計算し、その結果は表-2に示すところとなっている。なお表-2には大阪市の調査当時、同時に行なわれた区別の燃料使用量と同じく大阪市の調査より著者らが整理した各区別の交通量を載せている。

本研究では、ある地域にある一定規模の工業開発のための土地利用計画が提示されたときの、大気汚染による社会的費用を統計的に推測するためのモデルを策定するという目的に沿って、表-2の項目(5)の1家計あたりの被害額を外生変数とし、原因と思われる項目(1)、(2)、(3)および交通量、さらに、汚染源と被害地点間の空間距離を内生変数として統計解析を行なった結果、

表-2 相関解析要因表

項目 区名	石炭 (t) (1)	重油 (kL) (2)	灯油 (kL) (3)	燃料使用量 (1)+(2)+(3)	SO ₂ 濃度 年平均 (4)	世帯当たり被害 金額(円) (5)	企業当たり被害 金額(円) (6)	被害金額 (円) (4)+(5)	交通量 (台, km) (7)	面積 (ha)
1. 浪速	551	11 012	197	11 760	0.80	30 425	133	30 558	685 740	383
2. 西成	7 719	143 645	769	152 133	0.87	29 652	1 645	31 297	279 898	742
3. 港	820	21 051	102	21 973	1.45	13 493	115	13 608	229 208	826
4. 大正	3 316	309 791	61	313 168	1.24	26 242	31 296	57 538	258 061	910
5. 西淀川	7 790	118 301	895	127 186	1.82	26 441	35 871	62 312	188 823	1 116
6. 東成	1 333	13 698	913	15 944	1.03	9 122	1 042	10 164	507 177	451
7. 生野	973	13 076	815	14 864	1.25	7 433	8 226	15 659	582 562	824
8. 北	13 136	45 104	560	58 800	1.56	13 613	7 247	20 860	1 150 086	558
9. 都島	47 405	52 395	64	99 864	1.34	19 573	3 174	22 747	617 273	586
10. 福島	21 354	43 562	85	65 001	1.19	38 530	3 367	41 897	757 357	468
11. 此花	41 793	113 933	21 378	177 113	1.53	15 843	18 484	34 327	227 740	1 043
12. 東	7 384	26 640	263	32 287	1.16	4 165	1 806	5 971	473 604	592
13. 西	2 433	4 963	54	7 450	1.32	29 953	582	30 535	541 677	572
14. 天王寺	1 088	11 785	153	13 026	0.91	4 706	27 358	32 064	473 604	467
15. 南	5 317	7 573	164	13 054	0.83	6 443	14 672	21 115	509 914	296
16. 大淀	2 156	41 852	19	44 027	1.09	1 364	336	1 700	292 164	447
17. 東淀川	12 725	129 644	909	143 278	1.03	7 697	21 914	29 611	956 515	2 610
18. 旭	2 522	13 703	48	16 273	0.67	16 518	25 881	42 399	468 880	607
19. 城東	1 987	106 080	1 440	109 507	0.83	12 599	70 018	82 617	866 695	1 658
20. 阿倍野	1 563	3 062	221	4 846	0.85	7 359	0	7 359	425 654	606
21. 住吉	2 095	52 842	939	55 876	0.78	4 098	11 702	15 800	774 616	1 999
22. 東住吉	4 124	21 462	466	22 052	1.12	3 173	2 259	5 432	724 489	2 502

注：参考文献 9) より抜き

次式をえた。

$$Y_i = 1290.7 + 0.2716 \left(\sum_{j=1}^{K_{\max}} \frac{X_j}{D_{ij}^2} \right) \quad \text{ただし } \rho = 0.607, K_{\max} = 7 \quad \text{.....(1)}$$

ここに、 Y_i : i 地区住民 1 世帯あたりの年間被害額
(円/世帯)

X_j : j 地区年間重油消費量 (kl)

D_{ij} : i, j 地区間距離 (km)

K_{\max} : (X_j/D_{ij}^2) の値の大きいものから順に番号をつけ、相関係数が最大となる番号

ρ : 相関係数

式(1)による回帰を行なうにあたって注意した諸点は次のとおりである。

1) 汚染源と被害地点との間の距離の影響が含まれていること。

2) 汚染源としては、主として工場である重油使用地点のほかに、石炭、灯油の使用地点、自動車の排気ガスなどが考えられる。本研究においては、式(1)と類似させてこれらの要因を導入して重回帰分析を行なったが、相関係数は、ほとんど上昇せず、係数が負となったりして、あまり意味のある推定値が得られなかつたため、式(1)を採用した。

3) 風の影響については、各地区別のデータが得られなかつたため無視した。

4) D_{ij}^2 で除したのは拡散理論から示唆を得たものである¹⁰⁾。式(1)に、対象とする地域における土地利用計画案の距離、重油使用量を代入すれば、経済的損失を求めることができ、 Y_i にその地域の世帯数を乗ずることによって、求める大気汚染の社会的費用を計算することができる。

しかしながら、統計的手法に基づく測定法である本方法は、厳密にいえば、昭和 41 年当時の大阪市の排出基準と生活様式のもとでの結果を用いたものであり、排出基準、生活様式、さらに気象や交通量などにおいても新たな工業開発候補地においては異なる可能性がある。したがって、本研究における社会的費用の計測は、依然として一応の目やすとし、特殊な立地条件のもとでは、それ相当の考慮が必要であることはいうまでもない。

(3) 工業開発費用関数の性質

(1) および (2)において考察した開発費用は、開発規模に対応する土地利用計画がなされなければ計測できるものであり、観念的には、開発規模に応じた合理的な土地利用計画がただ 1 つ策定でき、これに応じて費用の計測が可能となることになる。しかしながら、実際問題としては規模の連続関数として開発費用関数を作成すること

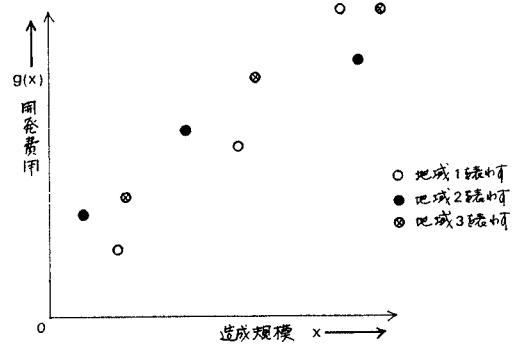


図-1 離散的費用関数

とは不可能に近い。なぜならば想定された一定規模の開発のための土地利用計画案ですらもほとんど無数にあり、これらの案の中からただ 1 つの最適な案を探すには、多くの時間と労力を費やして資料を収集し、分析しなければならない。したがって、図-1 に示すように、想定される開発水準は、時間、労力の制約などにより多くとも 4, 5 個が最大限であり、この数個の開発水準に対応する費用水準しかえられないのが現状である。

ここに、いくつかの離散的な規模に対応する費用水準しかえられていないときに、想定されない規模に対応する費用水準をどのようにして作成すべきかという問題が発生する。この問題に対するもっともらしい解答としては、次の 2 つの解決法が考えられる。

1) 図-2 に示すように、あらかじめえられている開発水準に対応する費用関数の点を直線で結び、各点間においては開発水準に比例して費用が増加するという仮定をもうける。

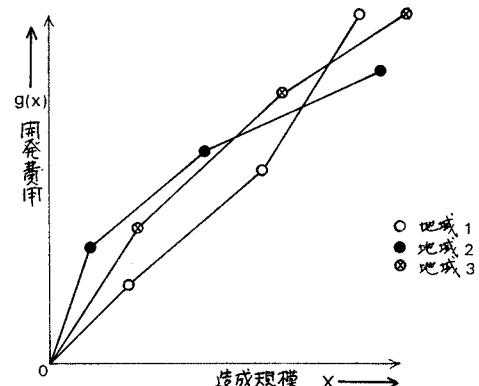


図-2 折線状費用関数

2) 図-3 のようにあらかじめ得られている開発水準を越える造成を行なうには、その超過量のいかんにかかわらず、想定された開発水準の中で、次に大きい規模に対応する費用に等しい費用を必要とするという仮定をもうける。

結論的にいえば、著者らは 2) の仮定を設ける方が望

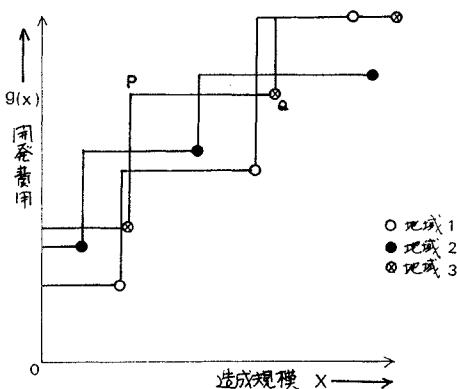


図-3 階段状費用関数

ましいと考える。その理由は以下のとおりである。

第1の理由は、各規模に対応する土地利用計画の独立性である。すなわち、ある候補地において、たとえば50単位の規模の工業用地を造成するための土地利用計画1は、100単位の規模を目標とする土地利用計画2の一部分をなしていると考えるべきでないということである。なぜならば、50単位の規模を造成するために用意された防波堤、岸壁あるいは住居地との通勤交通施設はあくまでも50単位の規模に対応したものであり、あと50単位を工業用地として追加すれば、100単位の造成を目標とする土地利用計画となるという性質のものではないからである。100単位の規模の土地利用計画は、50単位のそれとは別途に工業用地、防波堤、住居地などの位置そのものの再検討を必要とする。したがって、50単位の造成規模に対応する費用水準から、100単位の費用水準へ直線的に変化すると考えるのは無理がある。

第2の理由は、スレッシュホールド (Threshold) の存在である。スレッシュホールドとは、ある一定以上の規模を造成しようとするとそれまでの費用に比べて不連続的に費用が増大する現象をいう¹¹⁾。このような限界は、包蔵水量、地形、気候などの自然条件、大型船の接岸に要する航路水深、幅員、泊地の広さなどの技術的条件などにみられるが^{12), 13)}、最も端的には、次のような例によって示される。

いま、当該地域で50単位の規模を造成するためには、既存の工業地帯を拡張することが最適であるとする。しかし、50単位を超過するような規模の工業開発を行なうために、既存工業地帯を拡張しようとすると、港湾能力の不足による待ち現象、用水の不足、周辺住宅地への複合大気汚染の顕著化などの社会的費用の拡大などによって、急激に費用が増大するものとする。かくして、このスレッシュホールドを乗り越えるために、大きな社会的費用と生産性の低下を覚悟の上で既存の工業地帯の拡張を行なうか、もしくは、既存工業地帯の拡大を

押えて、別途に工業開発計画を策定するかといった決定にせまられる。したがって、50単位以上の規模の工業用地を造成する場合には、いずれにしても50単位において限界費用が急激に上昇するとするスレッシュホールド・コストが存在する。このことは、図-2のような折線状の費用関数ではなく、図-3のような階段状の費用関数の方がより一般的であることを示す。

以上が、図-3のような階段状の費用関数を想定する理由であるが、本費用関数は、さらに次の性質をもつ。すなわち、図-3における任意のx軸に平行な線分PQにおいて、Q以外の点の費用はQに等しく、造成規模はQより小さい。したがって、一定規模を達成するための代替案としてのQは、Q以外の線分PQ上の任意の点と比較して無条件に効率がよい。したがって、開発地の選定とその開発規模を求めるための代替案としては、Qのように垂直線と水平線の交点に対応する代替案のみを考察すればよく、代替案の規模も費用も離散的である選定モデルを考える必要がある。したがって、以下の議論でいう代替案とは、Qのような直線の交点に対応する代替案のみを代替案と呼ぶこととする。

3. 工業開発地選定モデルの定式化

以上に考察したように、任意の候補地の任意の代替案の費用を計測することができたので、次に、多候補地多代替案の中から、与えられた工業用地需要を満足したうえで、総費用を最小にする開発地とその地域における造成規模とを決定する工業開発地選定モデルの定式化を行なう。

いま、経済計画にしたがって、計画目標年度までにDだけの工業用地を造成するという計画目標が設定されたものとする。Dを達成するためにN個の候補地が選定されて、候補地*i*にはM_i個の規模の異なる代替案が提示されており、*i*地域*j*番目の代替案で造成される工業用地規模をA_{ij}、その造成に必要な費用をC_{ij}とする。このとき、用地需要Dを満足したうえで、費用最小なる開発地の選定とその規模の決定を行なう選定モデルは、以下のように定式化される。

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{M_i} A_{ij} x_{ij} \geq D \dots \dots \dots \dots \dots \dots \quad (2.a)$$

$$0 \leq \sum_{j=1}^{M_i} x_{ij} \leq 1 \quad (i=1, \dots, N) \dots \dots \dots \dots \dots \dots \quad (2.b)$$

$$x_{ij} = 0 \text{ または } 1 \dots \dots \dots \dots \dots \dots \quad (2.c)$$

のもとで

$$= \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{M_i} C_{ij} x_{ij} \dots \dots \dots \dots \dots \dots \quad (2.d)$$

を最小にする0-1ベクトル{x_{ij}}を求める0-1整数計画として定式化される。ここに、x_{ij}は、*i*地域*j*代替

案を採用するとき 1, そうでないとき 0 となる 0-1 変数である。また、式 (2.a) は、選定された候補地の代替案の造成規模の合計値が、計画目標である工業用地需要を満たさねばならないことを示し、式 (2.b) は、各候補地の代替案の中からは、多くとも各地域ごとに 1 つしか選択できないという代替案の相互排他性 (exclusivity) を示す。そして式 (2.d) は、目的関数である離散的費用関数を示している。

4. 選定モデルの解法

候補地が少なく、かつ、代替案も少ない場合には、式 (2.a)～(2.c) の制約条件を満足するあらゆる解の組合せを考えることも容易であり、簡単に式 (2) の解を求めることができる。しかし、候補地数 N と代替案数 M_i の増加とともに、組合せの数は急上昇する。たとえば、候補地が 10 個、代替案が各候補地ごとに 6 個ずつ存在する場合であっても、 10^6 個の組合せが存在する。したがって、式 (2) の解を求めるには、一般に数理計画法の導入を必要とする。

さて、式 (2) は、0-1 整数計画 (0-1 Integer Programming I.P.) および動的計画法 (Dynamic Programming D.P.) でいうところの 1 次元ナップザック問題 (Knapsack Problem)^{14), 15), 16), 17)} に制約式 (2.b) が付加されたものであり、分岐限定法 (Branch and Bound)^{18), 19), 20)} と動的計画法^{15), 16)} のいずれにても解き得る。

(1) 分岐限定法による解法

式 (2) のサフィックスを書きなおすために

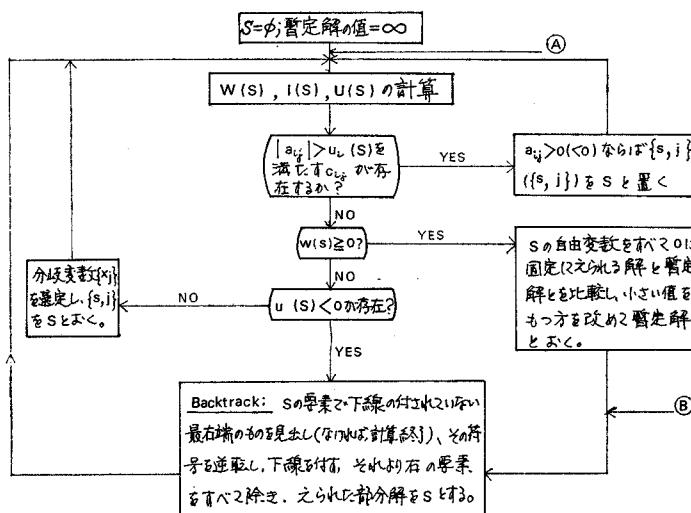


図-4 0-1 全整数計画問題のアルゴリズムの1例 (分岐限定法)
注: 参考文献 18) より抜き

$$\left. \begin{array}{l} k = \sum_{l=1}^{i-1} M_l + j \\ K = \sum_{l=1}^N M_l \end{array} \right\} \dots \dots \dots \quad (3)$$

とし、 x_{ij}, A_{ij}, C_{ij} を $x_k, a_{N+1,k}, C_k$ に変換し

$$a_{ik} = \begin{cases} k \leq \sum_{l=1}^{i-1} M_l, k \geq \sum_{l=1}^i M_l \text{ ならば } 0 \\ \sum_{l=1}^{i-1} M_l \leq k \leq \sum_{l=1}^i M_l \text{ ならば } -1 \end{cases} \dots \dots \dots \quad (4)$$

とすると、式 (2) は次式のように書きなおすことができる。

$$\sum_{k=1}^K a_{ik} x_k \geq -1 \quad (i=1, \dots, N) \dots \dots \dots \quad (5.a)$$

$$\sum_{k=1}^K a_{N+1,k} x_k \geq D \dots \dots \dots \quad (5.b)$$

$$x_k = 0 \text{ または } 1 \dots \dots \dots \quad (5.c)$$

のもとで

$$z = \sum_{k=1}^K C_k x_k \rightarrow \min. \dots \dots \dots \quad (5.d)$$

式 (5) は、一般的な 0-1 整数計画の問題とみなしえる。この問題の分岐限定法による解法の詳細は、参考文献^{19), 20)} にゆずり、そのアルゴリズムのみを 図-4 に示し、図-4 について若干の説明を加える。

0, 1 を要素とする任意の K 次元ベクトル X を解し、式 (5) の制約条件 (5.a) および (5.b) を満足する解を許容解、許容解のうち z を最小にするものを最適解とする。要素のいくつかが 0 または 1 に固定された X の部分集合 S を部分分解、 S において固定された変数を固定変数と呼び、自由変数の集合を F_S で示す。

図-4 における $w_i(S)$, $l_i(S)$, $u_i(S)$ は部分解のテストのために用いられる諸量で次式で示される。

$$w_i(S) = \sum_{x_k \in F_S} a_{ik} \cdot x_k - b_i \dots \dots \dots \quad (6.a)$$

$$l_i(S) = \sum_{x_k \in F_S} a_{ik} \cdot x_k + \sum_{\substack{a_{ik} < 0 \\ x_k \in F_S}} a_{ik} - b_i \\ = w_i(S) + \sum_{\substack{a_{ik} < 0 \\ x_k \in F_S}} a_{ik} \dots \dots \dots \quad (6.b)$$

$$u_i(S) = \sum_{x_k \in F_S} a_{ik} \cdot x_k + \sum_{\substack{a_{ik} > 0 \\ x_k \in F_S}} a_{ik} - b_i \\ = w_i(S) + \sum_{\substack{a_{ik} > 0 \\ x_k \in F_S}} a_{ik} \dots \dots \dots \quad (6.c)$$

ただし、 $i=1, \dots, N+1, b_i$ は式 (5.a), (5.b) の右辺を示す。

式 (6) からわかるように、 $w_i(S)$ は部分解 S の i 番目の制約式の左辺の右辺に対する不足量、 $l_i(S)$ および $u_i(S)$ はそれぞれ S を固定したときの i 番目の制約式の左辺の下限値および上限値を示す。

また図-4に示したアルゴリズムは、線形探索法を採用し、目的関数の値は考慮外において、できるだけ効率よく許容解に到達しようとするものであり、分岐変数の決定にあたっては、すべての自由変数 x_k に対し、

$$d(k) = \sum_{i=1}^{N+1} \min\{w_i(S) + a_{ik}, 0\} \quad (\leq 0) \dots (7)$$

を計算し、 $d(k)$ を最大にする変数 x_{j_0} を分岐変数とする。そして、新しい部分解を $\{S, k_0\}$ とする²¹⁾。

しかし、以上で説明した図-4に示されるアルゴリズムは、著者らの経験では収束がきわめて遅いので、実用的でない。そこで暫定解 \bar{z} の値による制約条件

$$-\sum_k C_k x_k \geq -\bar{z} \dots (8)$$

を付加し、新しい暫定解が得られるたびに \bar{z} を更新するアルゴリズムに修正した。すなわち、図-4のⒶ、Ⓑに新しい制約図-5を付け加えた。このアルゴリズムは0-1 整数計画に対してすべて適用できる。

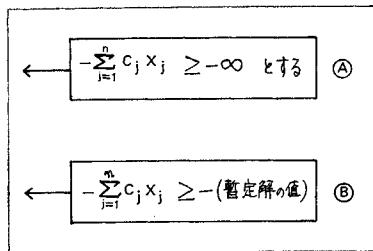


図-5 分岐限定法の改良部分

しかし、この修正アルゴリズムにおいても、式(5)で示す特殊問題を解くためには非能率であるため、本研究では、さらに次のように再修正したアルゴリズムをつくった。すなわち、式(2.b)を独立な制約条件として取り扱わず、計算の内部でルーチン化することによって、収束を早めた。すなわち、部分解 S のときの分岐変数として x_{ij} が選択され、 $x_{ij}=1$ が決定されたとする。このときグループ i に属する他の変数は、すべて0でないと許容解とはなりえない。新しい部分解は

$\{S, \underline{-x_{i1}}, \dots, \underline{-x_{i,j-1}}, x_{ij}, \underline{-x_{j,j+1}}, \dots, \underline{-x_{iM_i}}\}$ となり、一般的アルゴリズムの部分解が $\{S, x_{ij}\}$ となるのに比較して、より効率的となる。ここに $\underline{-x_{ij}}$ とは、 $x_{ij}=0$ であって（マイナス記号）、かつ $x_{ij}=1$ なる解はテスト済み（下線）であることを示す。

なお、分岐変数として $x_{ij}=0$ が採用された場合には、新しい部分解は $\{S, -x_{ij}\}$ となり、一般的アルゴリズムの場合と変わらない。

(2) 動的計画法による解法^{15),16)}

関数 $F_k(w)$ を、計画目標値を w と仮定し、1番目から k 番目までの候補地だけを考えたときに、実行する最適政策によって得られる条件付最適解の値と定義す

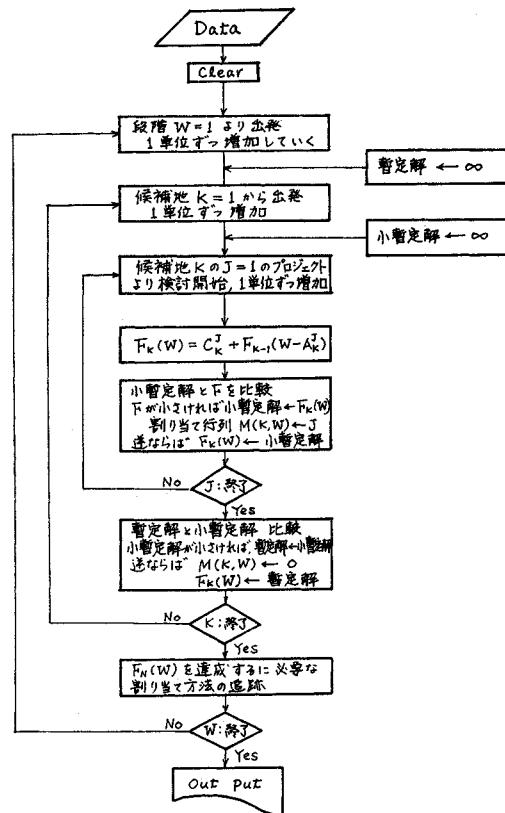


図-6 動的計画法による解法

ると、式(2)は、最適性の原理より、式(8)のような関数方程式に変換される。

$$F_k(w) = \min[F_{k-1}(w), \min_{\{j\}} \{C_{kj} + F_{k-1}(w - A_{kj})\}] \dots (8.a)$$

ここに、

$$\begin{aligned} F_1(w) &= C_{1j} \quad \text{ただし } A_{1,j-1} \leq w \leq A_{1j} \\ F_k(w) &= 0 \quad \text{ただし } 0 \geq w, k=1, \dots, N \end{aligned} \quad \dots (8.b)$$

かくして、式(8.b)の条件下で式(8.a)の帰納的繰り返し関係を用い、 k および代替案の数 M によって決定される変域を走査することによって式(8.a)の最適値 $F_N(D)$ が求まり、逆の経路をたどることによって最適解のベクトル X を得ることができる。このアルゴリズムのフローチャートを図-6に示す。

5. 感度分析に関する考察

ここでいう感度分析とは次の項目について分析を行なうことをいう。

- 1) 候補地の数の増減による最適解の受ける影響
- 2) 計画目標である工業用地需要 D の増減による最適解の受ける影響

- 3) 代替案の費用の増減による最適解の受ける影響
- 4) 代替案の造成規模の増減による最適解の受ける影響
- 5) 任意の候補地の代替案の数の増減による最適解の受ける影響

以上の項目のうちで、1) および 2) については、動的計画法による解法の場合のパラメーターである W と N が、その答を提示する。すなわち、動的計画法による解法では、候補地数 N と需要 D との関数として最小費用が与えられるので、1) および 2) の解は、最適解を求める計算途中に自動的に計算される。一方、分岐限定法では、入力データの変更を必要とする。

次に、3) における代替案の費用の変化を、 Δ 地域 q 代替案 (p, q) の費用 C_{pq} が ΔC_{pq} だけ変化したものと想定する。まず、 (p, q) が最適解を構成している場合について述べる。いま、 (p, q) を含んでいない解集合のうちで、最小の費用となる解の目的関数の値を f_2 、最適値を $f_{0,p}$ とすれば、

$$f_2 < f_{0,p} + \Delta C_{pq} \text{ ただし } f_2 \geq f_{0,p} \dots \dots \dots (9)$$

なる関係が成立するような C_{pq} ならば、 f_2 が最適解となり、 f_2 に対応する解が最適解となる。式 (9) からわかるように、 (p, q) が最適解を構成している場合に、最適解が変わることの可能性があるのは、 ΔC_{pq} が正の場合のみである。

次に、 (p, q) が最適解に含まれていない場合について述べる。 (p, q) を含む解集合の中で最小の費用となる解の目的関数の値を f_3 とすれば、 (p, q) の変動 ΔC_{pq} が、

$$f_3 + \Delta C_{pq} < f_{0,p} \text{ ただし } f_2 > f_{0,p} \dots \dots \dots (10)$$

なる関係を成立させるととき、 f_3 が最適解となる。この場合には、式 (10) からわかるように、最適解が変わるのは ΔC_{pq} が負のときのみである。

したがって、3) に関する感度分析を行なうためには、解の離散性によって生ずる費用関数の最適値、次善値…といった費用関数の値を小さい順に並べた一覧表とそれに応じた解を情報としてえなければならない。この一覧表の作成は、分岐限定法においては比較的容易である。すなわち、図-4、5において、最適解の近傍にいたったならば、図-5における ε の値を固定し、最適解のいくつかの許容解をすべてプリントするようにすればよい。しかしながら、1) および 2) に関する感度分析の場合とは逆に、動的計画法による解法で、3) の感度分析を行なうことはきわめて困難となる。動的計画法では、最適性の原理そのものによって、条件的最適解を逐次選択しているために、次善解以下の順序は不明となる。

- 4) および 5) は、階段状費用関数の不連続点が移動

し、これに対応する費用水準が変動することを意味する。この場合の感度分析には、現在のところ、入力を変更して再計算する必要がある。

したがって式 (2) を解くには、分岐限定法あるいは動的計画法のいずれの手法も用いることができるが、1)、2) および 3) に関する感度分析についていえば、いずれの手法においても一長一短があるので、両者の解法で解いておくことが望ましい。

6. 選定モデルの実用性に関する検討

表-3 および 図-7 に交通投資効果研究会によって試算された工業開発費用を載せている¹⁾。この試算例よりおおよその工業開発費用のオーダーがわかるので、表-4 のような候補地 10 個、1 候補地あたりの平均代替案数 4.3 個からなる入力データを作成し、以下に試算した結果についての考察を行なう。

表-3 工業開発費用の積算例

区分	項目	地域		A		B		C	
		規模	用地	C: 費用 (億円)	A: 規模 (ha)	C: 費用 (億円)	A: 規模 (ha)	C: 費用 (億円)	A: 規模 (ha)
1	工 业 用 地	1 353	4 150	2 223	5 350	737	1 050		
	住 宅 用 地	719		1 008		162			
	計	2 072		3 231		899			
		A/C		2.0		1.66		1.17	
2	工	2 642	7 550	5 554	11 980	2 475	3 340		
	住	1 291		2 130		492			
	計	3 933		7 684		2 967			
		A/C		1.92		1.56		1.13	
3	工	5 154	12 460	9 636	18 410	4 847	5 870		
	住	2 251		3 473		592			
	計	7 405		13 109		5 439			
		A/C		1.68		1.40		1.08	
4	工			13 479	24 060				
	住			4 664					
	計			18 143					
		A/C		1.32					

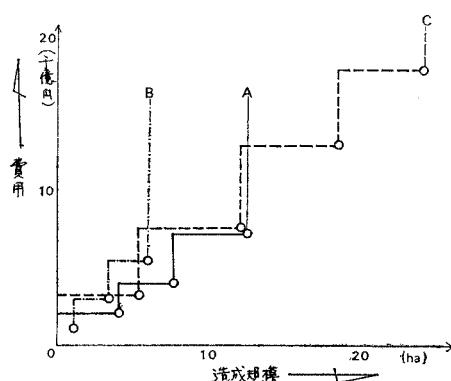


図-7 工業開発費用積算例

表-4 選定モデルの入力データ

プロジェクト	地域	1		2		3		4		5		6		7		8		9		10	
		C費用 (億円)	A規模 (ha)	C	A	C	A	C	A	C	A	C	A	C	A	C	A	C	A	C	A
1		240	500	123	300	1320	2200	384	800	539	1100	264	600	225	500	1372	2800	750	1500	912	1900
2		720	1200	848	1600	3717	5900	1887	3300	1924	3700	1007	1900	550	1100	3417	6700	1760	3200	2279	4300
3		1218	2100	2604	4200	6570	10500	4332	7600	3127	5900	1856	3200	936	1800	7056	11200	3186	5900	6300	10500
4		2880	4500	4640	8000	11700	18000	9394	15400	4570	8200	3111	5100	1458	2700			6344	10400		
5		4745	7300	7552	12800			12880	23000	7680	12000			2279	4300						
6										11628	17100										

(1) 解法の比較

表-4 の入力データの場合の式 (2) を、1) 一般的分岐限定法、2) 再修正分岐限定法、3) 動的計画法による解法により、京都大学大型計算機 FACOM-230-60 を使用して解いた結果、1) が 18 分、2) が 8 分、3) が 17 秒の計算時間を要した。これから次の結果を得る。

- 1) 分岐限定法における代替案相互排他性制約式 (2) b) を内部ルーチン化した再修正プログラムは、一般的なプログラムに比較して、約 1/3 強の計算時間の短縮が可能である。
- 2) 動的計画法による解法は、分岐限定法によるそれに比較してきわめて計算時間が短く、この種の整数計画法を解くことに関しては有利である。

表-5 解法の比較

順番	計算法	D.P. (億円)	分岐限定法 (億円)		計算法 順番	D.P. (億円)	分岐限定法 (億円)
			6	12 928			
1		12 928			6	13 304	12 993
2		12 988			7	13 542	
3		13 020			8	13 627	
4		13 195			9	13 793	
5		13 255			10	13 806	

表-5 における D.P. の欄は、計画目標値を 25 000 ha に固定させたときの動的計画法における関数テーブルの中で費用関数値の小さい順に 1 番から 10 番までを順に列挙したものである。また、分岐限定法の欄は、最適値の近傍を探索して、同じく小さい順に 1 番から 6 番目までを列挙したものである。表-5 より、動的計画法においては次善解以下がいかに埋没しているかがよくわかる。逆にいえば、動的計画法の計算時間の短縮化はこのような次善値より大なる解を、あらかじめ消去していく最適性原理の有効性によるものであることがよくわかる。しかし、感度分析 3) を行なうためには、この有効性が逆に障害となり、分岐限定法のほうが好ましいことが実例によってわかった。

(2) 解の安定性

表-6 は、感度分析 i を行なった結果である。すなわち計画目標値 D の変化に対応する最適解の変化を示して

表-6 解の安定性

ケイズ	計画目標 (ha)	最適値 (億円)	地域									
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	25 000	12 928	1	2	0	1	3	1	2	2	3	1
2	24 900	12 863	1	2	0	1	3	1	2	2	3	2
3	24 000	12 855	1	2	0	1	2	1	5	2	3	2
4	23 000	11 837	1	1	0	1	3	1	1	2	3	1

注: 表中地域欄の記入された番号は、最適解として選択された対応する地域のプロジェクト番号を示す。

いる。また本例題に関するかぎり、解が安定的であることがわかるが、これは入力データの性質によるものであり、一般的には、安定性について論ぜられない。なお、表-6 は、動的計画法による解法の結果である。

(3) 費用関数の相違

本研究では、図-3 のような階段状の費用関数を仮定して議論を進めてきたが、場合によっては、図-2 に示したような折線型の費用関数である場合もありうるであろう。そこで表-4 の入力データを用い、それぞれの代替案の間を直線で結んだ費用関数(図-2 の型)の場合と、階段状の場合の選定モデルをそれぞれ動的計画法で解き、その計算結果を表-7 および図-8 に示した。

表-7 費用関数の相違による最適値の変化

費用 関数 D (ha)	階段状費用 関数 (億円)	折線状費用 関数 (億円)	費用 関数 D (ha)	階段状費用 関数 (億円)	折線状費用 関数 (億円)	1		2		3	
						1	2	3	4	5	6
250	12 928	12 893	210	10 746	10 676						
249	12 863	12 839	200	10 153	10 133						
248	12 854	12 784	100	4 809	4 809						
247	12 729	12 729	90	4 344	4 309						
246	12 724	12 675	80	3 819	3 814						
230	11 837	11 775	70	3 358	3 324						
220	11 256	11 223	60	2 872	2 834						

表-7 からわかるように最適解は折線型の費用関数の場合のほうが小さくなっている。地域の開発最適規模の変化は図-8 からわかるように、関数形によって若干の相違がみられるがほとんど両者は類似している。このことは、変数が多く、計画目標値に比較して各変数の制約条件の左辺の係数 A_{ij} が小さい場合には、両者の計算結果は類似するということを示している。

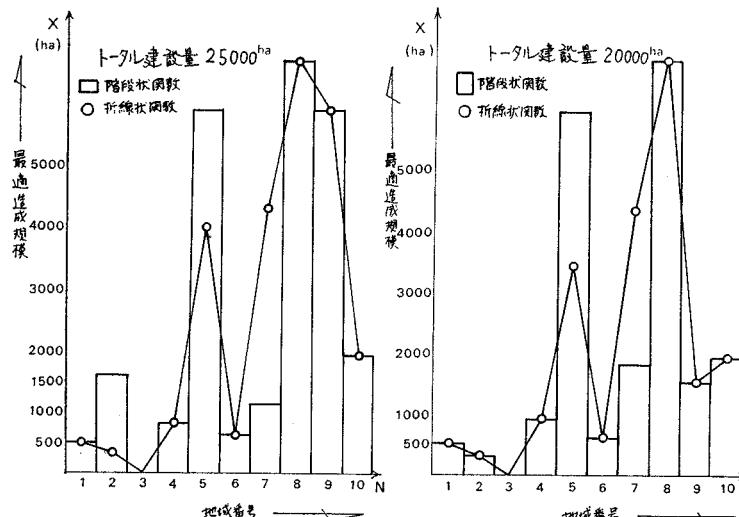


図-8 (a) 費用関数の相違による最適解の変化

図-8 (b) 費用関数の相違による最適解の変化

7. 結 言

本研究は、経済計画から想定される工業用地需要を満たし、かつ環境破壊を生じさせないようにしながら多数の候補地の多数の代替案の中から、適性な工業開発地の選定とその規模の決定を行なうためにはいかにすればよいかを問題とした。そして、これを達成するために、

- 1) 社会的費用を工業開発費用の中にできるだけ定量化して導入すること。
- 2) 都市開発計画を工業開発計画に導入し、工業用地との適合性を保ち、住民に快適な環境を準備すること。

の2点を強調し、1) および 2) を導入するための接点となる大気汚染の経済的損失と汚染源との関係を明らかにした。これはまだ不十分な解析ではあるが、今後の研究の方向の第一歩を踏み出しえたと考えられる。

そして、社会的費用および都市開発費用を工業開発費用に導入したうえで、多数の候補地の多数の代替案の中から計画目標である工業用地需要を満足し、かつ最小の費用となる代替案の組合せを選択するための選定モデルを0-1整数計画法によって定式化し、計算例を示すことによって、本モデルの実用性を検討した。その結果から、次のような結論を得る。

- 1) 費用関数は、階段状の関数とみなした方が望ましい。
- 2) 選定モデルの解法としては、分岐限定法と動的計画法があり、単に解を求めるだけならば、後者の方が効率的である。
- 3) 候補地の数および計画目標値の変動に関する感度

分析には、動的計画法が有効であるが、費用関数の変動に関するそれのためにには、分岐限定法の方が効率的である。したがって、選定モデルの解法としては両者とも一長一短があるので、両者で解いておく方が望ましい。

- 4) 同じ目的をもつプロジェクトの選択問題（たとえば、水資源の開発、都市開発プロジェクトの選択などに繁雑にあらわれる）に対しても本研究の定式化とその解法はきわめて有効であろうと考える。
- 5) 社会的費用の計測がごく限られた部分にしか可能でない現状では、一定以上の環境破壊をもたらすような工業開発プロジェクトを

あらかじめふるい落すことが大切であり、そうすることによって、本モデルのより望ましい利用法が実現できるであろう。

- 6) 本研究では、需要と投資の時間的流れを考慮していない。時間の流れを考慮した選定モデルも、0-1整数計画法によって定式化することができるが²²⁾、本研究の範囲を越えるので次の機会に発表したい。
- 7) 都市開発計画を含む工業開発地域内の土地利用計画の策定法についても、本研究では十分に分析されていない。これも今後の研究課題である²³⁾。

なお、本論文の作成にあたって交通投資効果委員会の諸委員の方々より、有益な助言と資料をいただき、特に、京都大学 尾上久雄教授、神戸大学 伊賀隆教授、同志社大学 笹田友三郎教授、神戸商科大学 阪本靖郎講師、また運輸経済研究センター 喜田健一郎、中田邦夫両氏より助言およびご援助をいただいたことに対し衷心から感謝の意を表す次第である。

参 考 文 献

- 1) 経済企画庁総合開発局：新産業都市の現状、大蔵省印刷局、pp. 3~4、昭和 44 年。
- 2) 長尾義三・森杉泰寿・吉野達夫：工業港の投資効果に関する研究、土木学会第 24 回年次学術講演会講演概要第 4 部、pp. 145~146、昭和 44 年 9 月。
- 3) 折下 功：地域経済学、中央経済社、pp. 56~80、昭和 41 年。
- 4) 長尾義三：港湾工学、共立出版、pp. 11、昭和 43 年。
- 5) 北海道開発庁：苫小牧東部大規模工業基地港湾計画調査報告書、添付図面、昭和 46 年。
- 6) K.W. カップ著（篠原泰三訳）：私の企業と社会的費用、pp. 15、昭和 34 年。
- 7) 運輸経済研究センター：港湾投資の地域開発に及ぼす効果に関する調査報告書——港湾投資効果モデルによる効果測定と問題点——、pp. 173~244、昭和 46 年。
- 8) 日本工業立地センター：大規模工業基地のコスト比較調

- 査, 昭和 45 年.
- 9) 大阪市: 公害による経済被害調査結果報告書, pp. 4~14, 昭和 41 年.
 - 10) 大阪府公害室: ほい煙等に係る規制基準改正関係資料等, pp. 75~86, 昭和 45 年.
 - 11) Malisz, B.: Implication of Threshold for Urban and Regional Planning, Journal of Town Planning Institute, Vol. 55, No. 2, pp. 108~110, 1969.
 - 12) Lean, W.: An Economist's Note on the Validity of Urban Threshold Theory, J.T.P.I., Vol. 55, No. 3, pp. 311, 1969.
 - 13) Kozlowski, J.M.: Optimization Method—A Case for Research, J.T.P.I., Vol. 56, No. 4, pp. 134~137, 1970.
 - 14) 萩木俊秀: 整数計画法(2), オペレーションズ・リサーチ, Vol. 15, No. 9, pp. 59, 1970 年 9 月.
 - 15) Bellman, R. and Dreyfus, S.E.: Applied Dynamic Programming, Princeton University Press, 1962.
 - 16) Dantzig, G.B.: Discrete-variable Extremum Problems, Operations Research, Vol. 5, pp. 266~277, 1957.
 - 17) Gilmore, P.C. and Gomory, R.E.: The Theory and Computation of Knapsack Function, Operations Research, Vol. 14, pp. 1045~1074, 1966.
 - 18) 萩木俊秀: 整数計画法(3), オペレーションズ・リサーチ, Vol. 15, No. 11, pp. 51~57, 1970 年 11 月.
 - 19) Lawler, E.L. and Wood, D.E.: Branch-and-bound Method; A Survey, Operations Research, Vol. 14, pp. 699~719, 1966.
 - 20) Mitten, L.G.: Branch-and-bound Methods; General Formulation and Properties, Operations Research, Vol. 18, pp. 24~34, 1970.
 - 21) Balas, E.: An Additive Algorithm for Linear Programs with Zero-one Variables, Operations Research, Vol. 13, pp. 517~546, 1965.
 - 22) 長尾義三・森杉寿芳・佐藤信秋: 多地域多段階の工業開発モデルについて, 土木学会第 27 回年次学術講演会概要第 4 部, 昭和 47 年 10 月.
 - 23) 森杉寿芳・佐藤信秋: 大気汚染を考慮した土地利用計画モデルについて, 土木学会第 27 回年次学術講演会概要第 4 部, 昭和 47 年 10 月.

(1972.5.17・受付)