【土木計画学研究・論文集 No.10 1992年11月】

輸送経路を考慮した2目的ターミナル立地問題

A Two-objective terminal location problem with a route planning

今井昭夫*

by Akio IMAI

Recently, there has been an increasing interest in simultaneous terminal location and routing analysis. This kind of transportation problem is multi-objectives in nature. For instance, a shuttle type of the location-routing problem has two objectives, one of which is total construction and operation costs of a route and those of terminals on it,and the other is accessibility between demand points and their closest terminals.

In this paper, we propose an efficient method for the shuttle type of the location-routing problem on the constraint k shortest path problem and the minimal spanning tree problem basis. An application of the problem to the container ship routing and terminal location is presented.

1．はじめに

近年，欧米ではトラックターミナルの立地問題を考える場合，そこを経由するトラックの配送経路問題(ルーチング問題)と組み合わせて解こうとする研究が活発化している．この問題は一般にロケーション・ルーチング問題(Location-Routing Problem)と呼ばれている．

従来のターミナル立地問題でも配送にかかる費用を目的関数に組み込んではいるが，このような配送経費をより精緻に求めるため，将来の貨物需要を満たす平均的な配送ルートを考慮して立地を決定しようとするものがロケーション・ルーチング問題である．この問題にはさまざまな形態が提案されているが[10]，大別すると次の2つになる．

(a)これは中央ターミナルからトラックが複数の下位ターミナルへ順番に貨物を集配して回って中央ターミナルに戻り，さらに各下位ターミナルからそれぞれ何台かの別のトラックが出発していくつかの顧客を順番に集配してもとの下位ターミナルに戻る形態である．このときターミナル費用とトラック運行費用の合計を最小にするターミナル配置とトラック配送経路を求める．

(b)先と同様にトラックが中央ターミナルから下位ターミナルに集配するが，各ターミナルからは最寄りの各顧客にそれぞれトラック1台ずつで集配するものである．

さらにこれら両形態から中央ターミナルを取り除き，下位ターミナルと顧客の集配のみを考える単純なロケーション・ルーチング問題もある．また(a)，(b)の問題は中央ターミナルを場所が異なる始点と

キーワード　2目的最適化，ネットワーク計画，ルーチング問題，ロケーション問題

＊　正会員　工博　神戸商船大学助教授
商船学部輸送システム工学講座
(〒658 神戸市東灘区深江南町5－1－1)

終点に分ければ，始点と終点を各下位ターミナルを寄りながら往復する形態になり，たとえば広域をカバーする宅配便に代表される路線トラックサービスの問題になる．

ところで形態(b)を中央ターミナルの代わりに異なる始点と終点に分けたもの(以下，往復型ロケーション・ルーチング問題と呼ぶ)はさまざまな輸送問題に適用可能である．たとえば鉄道の路線計画を行う場合，そのルートと駅の立地を同時に計画する問題がこれに当てはまる．また路線トラックのルートとそれが立ち寄るトラックターミナルの立地を考える問題や，コンテナ船の配船ルートとその寄港先を決定する問題もこの形態になる．

この問題はネットワークの最適計画の一種であるが，このような最適計画を交通システムの計画者と利用者の2レベルの最適化問題として解く方法が提案されている[1]．この方法では計画者の代替案に対する利用者均衡を記述モデルとして内生化しており，道路網計画のような公共交通システムではこのアプローチには妥当性がある．しかし往復型ロケーション・ルーチング問題が対象とするような輸送システムでは多少事情が違う．つまり先の例で述べたようにこの問題は鉄道路線，トラック路線，海上輸送計画に適用可能であるが，これら計画者は公共性を持ってはいるが，実際は民間企業であり通常同業他社が存在する．本問題を2レベル最適化問題とするには計画者の代替案に対する利用者の行動をモデル化する必要があるが，それには同業社の代替案も組み込む必要があり，モデル化は容易ではない．

一方，さまざまな現実の問題を最適化する場合，目的関数が複数あることは少なくなく，輸送に関する最適化問題についても多目的アプローチがなされている[5]．たとえばCurrentらはある輸送機関(パイプラインや送電網でもかまわない)のルートを決定する場合，可能な限り多くの需要を満足させるという2目的問題[4]やそのようなルートを需要者のそのルートへのアクセス時間(または距離)を最小化するように決定する2目的問題[6]等を検討している．またOsleebら[12]は石炭の輸入ルートの決定で，輸送費用とターミナルでの荷役時間という2つの目的の最小化問題を提案している．

ところで先に述べた往復型ロケーション・ルーチング問題はCurrent[7]により1目的問題として検討されている．しかしながら本問題の当事者であるシステム計画者と利用者はそれぞれ別の目的を有する．たとえばこれを鉄道路線問題とした場合，路線と駅の建設ならびに運用に要する費用は鉄道会社の目的であり，駅へのアプローチ時間(費用)は利用客の評価尺度である．またこれを定期コンテナ船の配船問題とした場合，荷主はコンテナ船に貨物を積み込んだ時点で船会社から発行される船荷証券(B/L)により輸出品の代金が得られることから，最寄りの積み出し港からコンテナ船寄港地までのフィーダ時間が問題になる．そのため船会社にとってはルートとターミナルに関わる費用が目的関数になり，荷主にとってはフィーダ時間が評価値になる．

いままでこのような往復型ロケーション・ルーチング問題を2目的問題として取り扱った研究例はないが，これを解く場合これら2目的は互いにトレード・オフの関係にあることが少なくなく，したがって解のパレート集合をいかに求めるかが問題になる[3]．そこで本研究では2目的往復型ロケーション・ルーチング問題のパレート解の集合を効率的に求める方法を提案し，これを定期コンテナ船の配船と寄港すべきコンテナターミナルの立地問題に適用する．

2．問題の構造

図1(a)のようなノードとアークからなる無向ネットワークを考える．輸送機関を利用する顧客はこれらのノードのいくつかに存在する．輸送機関はある始点sと終点tをいずれかのアーク上を通って往復するが，途中のいくつかのノードに顧客の貨物を積み卸しするターミナルを設ける．顧客は貨物需要地点と最寄りのターミナル間をいずれかのアークを経由して貨物を運ぶ．

トラック輸送のように既存の道路上にルートを作る場合は図1(a)のようなランダムネットワークになるが，鉄道路線の新設や海上輸送のルート設定では，あらゆる地点間を直通できるルートが設定可能なので，各ノード間がアークで直結された図1(b)のような完全ネットワークになる．

最小化すべき目的関数は輸送機関側は輸送ルート費用(建設費用と運用費用またはそのいずれか)とターミナル費用(内訳はルート費用に同じ)で，顧客側

は貨物需要の発生地点から最寄りのターミナルまでのアクセス費用(時間または運賃)である.

この問題は以下のように定式化される.

Minimize (Z_1, Z_2) (1)

subject to

$$\sum_{j\in M_i} u_{ij} - \sum_{j\in N_i} u_{ji} = \begin{cases} 1 & (i=s) \\ 0 & (i\neq s,t) \\ -1 & (i=t) \end{cases} \quad (2)$$

$$\sum\sum_{i,j\in Q} u_{ij} \leqq |Q|-1 \quad (Q\subset N, |Q|\geqq 2) \quad (3)$$

$$\sum_{j\in N_i} y^k{}_{ji} - \sum_{j\in M_i} y^k{}_{ij} - \sum_{j\in M_i} u_{ij} + \alpha^k{}_i = 0 \quad (i\neq k, i\neq t, k\in K') \quad (4)$$

$$\sum_{j\in N_t} y^k{}_{jt} \leqq 1 \quad (k\in K') \quad (5)$$

$$\sum_{j\in N_i} y^k{}_{ji} - \sum_{j\in M_i} y^k{}_{ij} = -1 \quad (i=k, k\in K') \quad (6)$$

$$u_{ij} = (0,1) \quad (7)$$

$$y^k{}_{ij} = (0,1) \quad (8)$$

$$Z_1 = \sum\sum_{i,j\in N} C_{ij} u_{ij} + \sum_{i\in S} T_i\left(\sum_{k\in L_i} I^k, \sum_{k\in L_i} X^k\right) \quad (9)$$

$$Z_2 = \sum_{k\in K} (I^k + X^k) \sum\sum_{i,j\in N} D_{ij} y^k{}_{ij} \quad (10)$$

$$L_i = \{k \mid \sum_{j\in N_i} y^k{}_{ji} = 1\} \cup \{k \mid i=k\}$$

$$S = \{i \mid \sum_{k\in K} \sum_{j\in N_i} y^k{}_{ji} \geqq 1, \sum_{j\in M_i} u_{ij} = 1\} \cup \{i \mid i=k\in K, \sum_{j\in M_i} u_{ij} = 1\}$$

K :需要地点の集合

K' :需要地点で輸送ルートがそこを通過していないものの集合

L_i :輸送ルート上のノード i が担当する需要地点の集合

M_i :ノード i から発生するアーク(i,j)で結ばれているノード j の集合

N_i :ノード i に集中するアーク(j,i)で結ばれているノード j の集合

N :ノードの集合

Q :集合Nの空でない部分集合，|Q|:Qの濃度

S :輸送ルート上のターミナルの集合

C_{ij} :アーク(i,j)にかかる輸送ルート費用(ただし$C_{ij}=C_{ji}$)

D_{ij} :アーク(i,j)にかかるアクセス費用(ただし$D_{ij}=D_{ji}$)

$T_i(\cdot)$:ノード i でのターミナル費用(需要量の関数)

I^k :需要地点 k の集中貨物量

X^k :需要地点 k の発生貨物量

i,j :ノード番号

k :需要地点，s :始点ノード，t :終点ノード

u_{ij} :輸送ルートとしてアーク(i,j)が選択されたことを表す変数で，選択されるとき1，選択されないとき0

$y^k{}_{ij}$:需要地点 k から輸送ルート上の最寄りのノードへのアクセス経路としてアーク(i,j)が選択されたことを表す変数で，選択されるとき1，選択されないとき0

$\alpha^k{}_i$:需要地点 k と輸送ルート上のノード i に対する非負のスラック変数

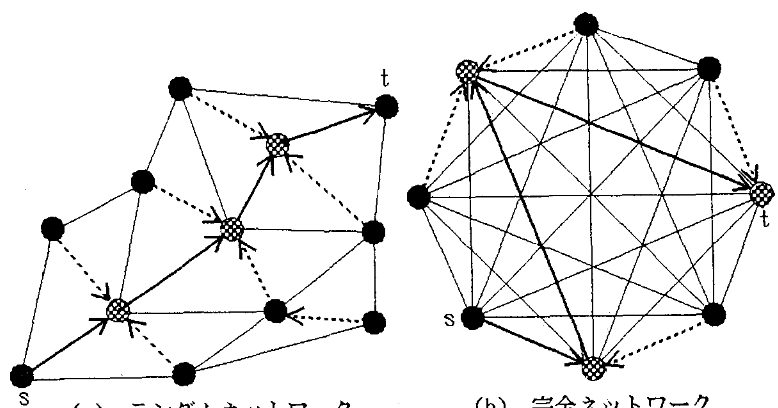

図1 対象ネットワーク

なおアークの輸送ルート費用とアクセス費用は比例すると仮定する.

式(1)は目的関数で，式(9)に示す輸送ルートにかかる費用とターミナル費用の和であるZ_1と，式(10)に示すような需要量とその地点から輸送ルート上の最寄りのノードまでのアクセス費用の積であるZ_2の2目的である.制約条件式(2),(3)は始点から終点までの輸送ルートの制約条件

で，ループのない(つまり同じノードを２度以上通過しない)ことを保証する．式(4)〜(6)は各需要地点から輸送ルート上の最寄りのノードまでのアクセスルートを示し，先の輸送ルートと同様，ループしないことを保証している．

３．解法

３．１　基本的な考え方

最短路問題の概念を拡張したものにｋ最短路問題がある．これはｋの値を与件として第１最短路からｋ番目までの最短路を順次求める問題である．この問題は２目的ネットワーク問題の解法にも使われている[2),6)]．このうちCurrentら[6)]は階層構造を持ったネットワークの最短路問題を取り扱っている．ここでは主最短路の代替案をｋ最短路問題でいくつか列挙し，それに対する主最短路費用と従最短路費用を計算して解のパレート集合を求めている．

基本的にこの方法は本研究に適用可能である．しかしこの方法だと完全なパレート集合を求めるには始点から終点に至るループのないすべてのルートをｋ最短路問題で列挙する必要があり，計算量は膨大なものになりきわめて非効率的である．

ところで著者はｋ最短路問題と類似した問題である制約ｋ最短路問題を定義し，これの効率的な解法を提案した[9)]．ｋ最短路問題は求めるべき経路の数が与件であるが，現実の問題ではその数が与件でなく，代わりに経路長の上限が与えられることが多い．たとえばある目的地に行くいくつかの経路代替案を求めるときに，輸送時間の上限が与えられるのが普通である．このように求めるべき経路数ではなく経路長の許容値が与件のとき，効率的にその許容範囲内の全経路を求める問題を制約ｋ最短路問題と定義した．

ｋ最短路問題の解法はいくつかあるが，非負のアーク長のネットワークでループのない経路を求めるものは，第１〜第ｋ最短路まで経路を逐次求めるため，解法を若干改良すれば許容長を越えた時点で停止するようにでき，十分大きな値のｋを与えれば制約ｋ最短路問題に適用可能である．しかし文献９での計算実験によると，このような改良を施したｋ最短路問題の解法よりも制約ｋ最短路問題の方がはるかに計算効率が優れていることが分かった．

ところで本研究で求めるべき解のパレート集合は２目的の解空間では図２の中の実線でつながった点で表される．もし何らかの方法でアクセス費用最小(つまりゼロ)となる輸送ルートの最小値が容易に求められれば，その値を許容値にして制約ｋ最短路問題を使って始点から終点へ至る輸送ルートで図２の破線より下にあるものだけを効率的に求められる．そしてこの各輸送ルートに対してターミナルを決定してZ_1とZ_2を求め，その中からパレート集合を求めればよい．

３．２　許容長の導出

先に述べたようにアクセス費用をゼロにする輸送ルートの費用を求めるには，始点から出発して各需要地点を１度ずつ

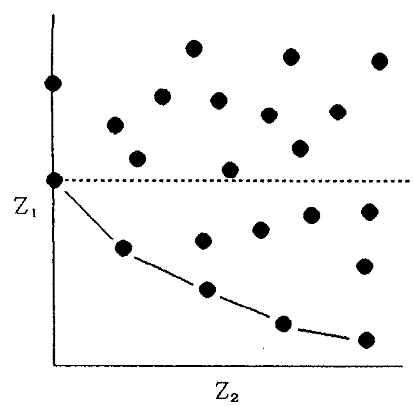

図２　２目的問題の解空間

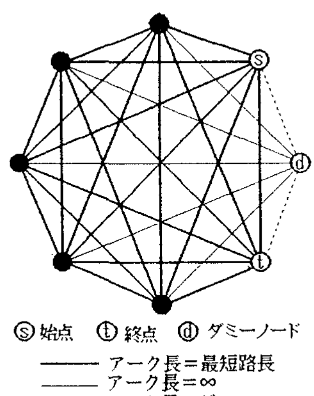

図３　ＴＳＰのネットワーク

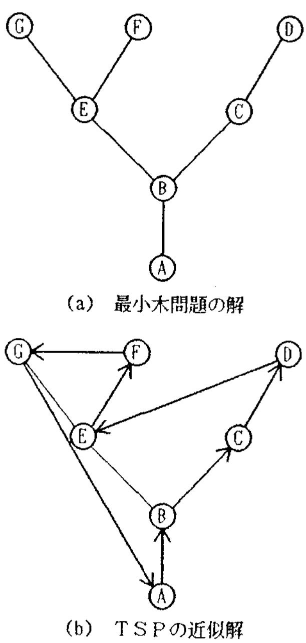

図４　ＴＳＰの近似解法

訪問して終点に至る輸送ルートを求めればよい．しかしこのようなルートは一般に複数あり，その中で最小の輸送ルート費用のものが得られれば制約ｋ最短路問題の許容長が最小になり，その結果，図２の破線以下の範囲が狭くなる．

いま一つのダミーノードを用意し，それと始点，終点ならびに需要地点（始点または終点が需要地点にもなっている場合はそれらは除く）からなる図３のような完全ネットワークを作れば，このルート問題はダミーノードから出発ノードをまず訪問し，つづいて全需要地点を一度ずつ訪問したのち終点を経てダミーノードに戻る対称巡回セールスマン問題（以下，ＴＳＰと呼ぶ）に帰着する．ここで始点，終点および需要地点間のアーク長はそれらを結ぶもとのネットワークでの最短路長である．またダミーノードと始点および終点間のアーク長はゼロ，そしてダミーノードと残りの需要地点間のアーク長は∞とする．

このＴＳＰの厳密解を求めれば制約ｋ最短路問題への許容長が最小になるが，ＴＳＰはＮＰ困難な問題[11]で，その厳密解を効率的に求めることは難しい．そこで本研究では最小木問題を利用したＴＳＰの近似解法を用いる．最小木問題はＴＳＰの厳密解を分枝限定法で求めるときに，きわめて強い（つまり大きい）下界値を与えるものであり[11]，また計算時間はアーク数とノード数の積に比例する程度である．したがって最小木から得たＴＳＰの経路長はかなりよい制約ｋ最短路問題への許容長になると期待できる．

３．３　ＴＳＰの近似解法

ここでは最小木を用いたＴＳＰの近似解法を述べる．なお以下の説明で木アークとは最小木の解として選ばれたアークをさす．

いまＴＳＰのネットワークに対する最小木問題の解が図４の(a)とする．このときまず任意のノードでそこから木アークが一つしか出てないもの（図中のＡ）を選ぶ．そしてそこから選ばれた木アークを進み，行き止まりになればそこへ至る途中のノードで最も近い木の分岐ノード（Ｂ）から派生している他の木アークの終端ノード（Ｅ）を捜す．そして行き止まりのノード（Ｄ）から（Ｅ）へのアークを進む．以下同様にして図４(b)のようなＡ→Ｂ→Ｃ→Ｄ→Ｅ→Ｆ→Ｇ→Ａの巡回路を得る．

以上の手順を詳細に書くと以下のようになる．ただしＧ(Ｖ,Ａ)はＴＳＰのネットワーク,Ｖはそのノード集合，Ａはアーク集合とする．さらにＨを求める巡回路のアーク集合とする．

Step 0：Ｈを空集合にする．

Step 1：Ｇ(Ｖ,Ａ)の最小木問題を解く．

Step 2：Ｎの中で，最小木問題の解として選ばれた木アークが一つだけつながっているノードを見つけ，考察中ノードとする．

Step 3：Ａの中の木アークで考察中ノードを始端ノードとしているものを一つ選択する．それをＡから削除してＨに登録し，さらにそのアークの終端ノードを考察中ノードとする．

Step 4：木の行き止まりになり，これ以上木アークが選択できなければ次のStepへ，さもなければStep 3へ戻る．

Step 5：行き止まりのノードから逆行して，最も近い木の分岐ノードを始端ノードとしている木アークでＡにあるものを捜す．もしそのような分岐ノードがあればStep 6へ，さもなければStep 7へ行く．

Step 6：行き止まりノードからその木アークの終端ノードへのアークをＨに登録し，さらに終端ノードを考察中ノードにして，当該木アークをＡから削除する．Step 3へ戻る．

Step 7：行き止まりノードを始端ノード，Step 2で見つけたノードを終端ノードとするアークをＨに登録する．手順終了．

３．４　制約ｋ最短路問題[9]

ここでは制約ｋ最短路問題の解法の概要を述べる．いま図５のようなネットワークを考え，始点ｓから終点ｔへ許容長以下の長さを持つループのない経路をすべて求める．この問題に関して以下のような基本解法と分割解法を提案する．

基本解法は列挙法の一種で，まずｓから出ているアークを用いて図６のような分枝木を作る（この木の頂点番号は図５のネットワーク上で対応するノード番号である）．そしてその分枝の一つを任意に選んで，図６上で対応するノードから派生しているアークを用いて分枝木を成長させる．このようにして分枝木の頂点が終点ｔに相当すれば，分枝木のルート頂点

からその頂点までの一連のアークを一つの経路とする．なお分枝途中で，ある頂点までの経路長が許容長を越えていたり，その頂点がすでに訪問したノードであれば，その頂点は分枝停止とする．

ところで大規模ネットワークで許容長が大きい場合，図６の楕円部のように得られた経路に同じ部分経路を持つものが多くなり，それだけ基本解法の計算に無駄が多くなる．そこで次のような分割解法を考える．まず図５の破線のようにノードの数でネットワークを概ね２等分する．そして両ネットワークでの経路を基本解法で求め，その経路を合成して最終的にｓからｔへの許容長以下の経路を求める．

３．５　２目的往復型ロケーション・ルーチング問題の解法

以上の各問題を基礎にした２目的往復型ロケーション・ルーチング問題のパレート解集合を求める手順は以下のようになる．

Step 1：輸送ルート費用C_{ij}をアーク費用として，集合Ｋの各需要地点から集合Ｎの各ノードへの最短路を求める．

Step 2：Ｋの全需要地とダミーノード一つをノードとする完全ネットワークを作る(第３．２節で詳述)．

Step 3：この完全ネットワークに対して，最小木問題を利用してＴＳＰを解く(第３．３節で詳述)．

Step 4：ＴＳＰの経路長を許容長として，始点ｓから終点ｔまでの制約ｋ最短路問題を解く．

Step 5：得られた各輸送ルート(つまり各経路)に対して以下のことを行う．輸送ルート上のノードの中で各需要地点の最寄りのものを見つける(Step 1で求めた最短路から容易に見つけられる)．それらノードをターミナルとし，集貨量を計算してターミナル費用を求め，これと輸送ルート費用の合計を輸送費用とする．さらに各需要地点から最寄りターミナルへのアクセス費用を求める(これはStep 1で求めた最短路のアーク費用をアクセス費用D_{ij}としたときの経路長である)．

Step 6：Step 5で計算した各輸送ルートの輸送費用とアクセス費用から輸送ルートのパレート集合を求める．手順終了．

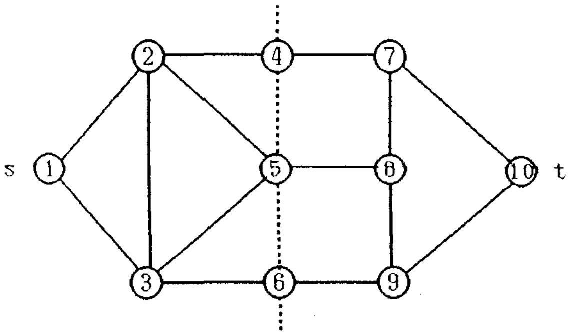

図５　制約ｋ最短路問題のネットワーク

４．適用事例

本問題の事例として，日本からアジア地域を経由して南アフリカへ至るコンテナ船定期航路計画を考える．寄港地の決定という観点からみた場合，日米間のように貿易量が多い航路は，両国の主要港を寄港する単純な航路で十分であるが，貿易量がさほど多くない第３国への航路計画は単純ではない．それはコンテナ航路は資本集約的で，荷主の満足度を上げつつ，少ない寄港地を短時間で回り，かつ最大の貨物量を確保することが重要になるからである．

たとえば日本－南ア間のように互いに交易量の少ない国々が途中にある場合は，できるだけ本船寄港地を絞り込み，本船寄港地と他の港間は別会社のフィーダ船でコンテナ貨物を輸送するのが理想とされている．このとき船会社の目的関数は本船の運行費用とターミナルの立地および運用費用であり，荷主

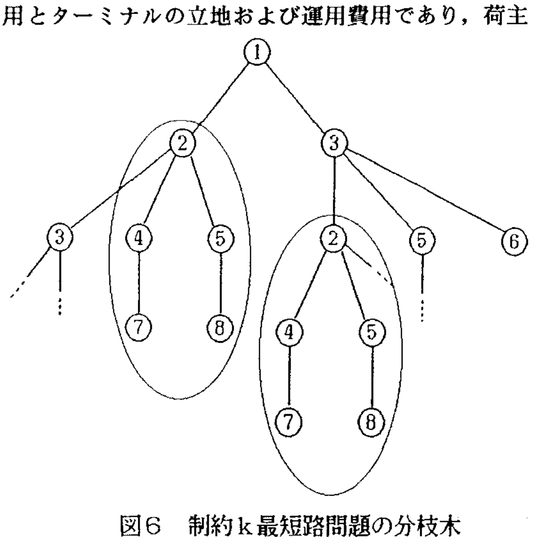

図６　制約ｋ最短路問題の分枝木

のそれは仕出港および仕向港と本船寄港地間のアクセス時間である．一般に荷主の目的関数は仕出港から仕向港への輸送時間と考えられるが，海上輸送の場合，貨物が本船に船積みされる時点で発行される船荷証券(B/L)の入手時間，換言すれば貨物発生地と本船寄港地間のアクセス時間の方が重要であることが多い．

4．1　問題の前提

本事例では以下の前提を設ける．

(a)各港間を船は自由に航行できるので，対象ネットワークは図1(b)のような完全ネットワークとし，各港間のアクセス時間D_{ij}は表1のとおりとする．

(b)Kobe, Cape Townを起点とする航路に2千TEU積み船を配船する．各港の貨物需要は，昭和58年度の海上コンテナの輸送実績[13]をもとに，表2のようにその輸出入別の合計がほぼ2千TEUになるように基準化した値を用いた．なお輸送実績では貨物のODは不明なため，各港とも日本向け(および日本発)とする．

(c)荷主の目的関数は需要地点と本船寄港地間の経路に含まれるアークのアクセス時間D_{ij}の合計とする．

(d)船会社の目的関数は輸送ルート費用とターミナル費用の合計とする．ここで輸送ルート費用は，式(11)で示される各アークの航海時間(アクセス時間と同値)D_{ij}に時間当りの本船1隻の運行費用[8]をかけたアーク費用C_{ij}を，始点から終点への輸送ルートに含まれるアーク分合計したものとする．なお本船の建造費はいずれの代替案でも一定の隻数とするので目的関数にはいれてない．

$$C_{ij}=21.085 \times D_{ij} \quad (\text{万円}) \tag{11}$$

(e)ターミナル費用は各港とも式(12)で示すものを用いる．この式は昭和56年の日本の主要コンテナふ頭の規模，取り扱い可能コンテナ数および賃貸料のデータを重回帰分析[8]して得たもので，それを本船が週1回寄港するとして，賃貸料の1週間分とした．なお式中のコンテナ数I^k, X^kはTEU単位である．コンテナターミナルの運用は通常別会社が当たり，船会社が負担するターミナル運用費用はコンテナ1個当り費用となる．したがって本問題の各代替案とも総ターミナル運用費用は一定になるため，ターミナル費用には運用費用は含めていない．また全貨物のODが各港－Kobe間であり，Kobeのターミナル規模はいずれの代替案でも一定なので，Kobeのターミナル費用は目的関数に含めない．

$$T_i(\cdot)=736.937 \times \mathrm{MAX}\left(\sum_{k\in L_i} I^k,\ \sum_{k\in L_i} X^k\right)+5857228.8 \quad (\text{万円／週}) \tag{12}$$

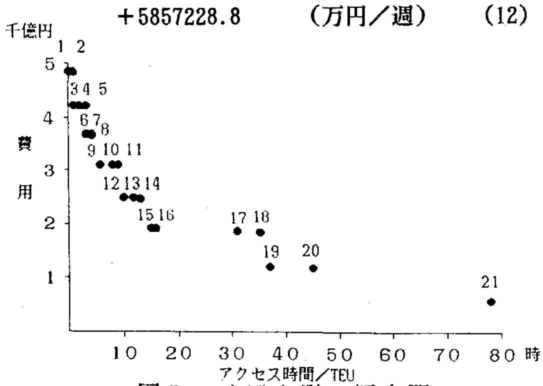

図7　適用事例の解空間

表1　港間航海時間（時）

	BU	KE	HO	MA	JA	SI	PE	BA	CA
KO	32	44	66	76	156	133	151	136	412
BU		36	58	73	147	124	143	128	406
KE			22	37	112	89	107	92	371
HO				35	90	72	90	74	349
MA					81	70	88	71	336
JA						26	45	63	259
SI							19	38	282
PE								57	265
BA									320

KO-Kobe, BU-Busan, KE-Keelung
HO-Hong Kong, MA-Manila, JA-Jakarta
SI-Singapore, PE-Penang, BA-Bangkok
CA-Cape Town

表2　輸出入貨物量（TEU）

	BU	KE	HO	MA	JA	PE	BA	CA
輸出	166	650	104	241	138	366	180	122
輸入	166	711	141	171	15	386	220	190

表3　パレート解の集合

解番号	輸送費用（億円）	アクセス時間	平均アクセス時間	輸送ルート
1	4,850	0	0.0	KO-BU-KE-HO-MA-BA-PE-JA-CA
2	4,849	3,978	1.0	KO-BU-KE-HO-MA-BA-SI-PE-CA
3	4,264	5,390	1.4	KO-BU-KE-MA-BA-PE-SI-JA-CA
4	4,262	6,885	1.7	KO-BU-KE-HO-MA-BA-PE-CA
5	4,252	10,624	2.7	KO-KE-HO-MA-BA-PE-SI-JA-CA
6	3,677	12,275	3.1	KO-BU-KE-MA-BA-PE-CA
7	3,666	16,014	4.0	KO-KE-MA-BA-PE-JA-CA
8	3,664	17,509	4.4	KO-KE-HO-MA-BA-PE-CA
9	3,079	22,899	5.8	KO-KE-MA-BA-PE-CA
10	3,075	31,258	7.9	KO-KE-BA-PE-JA-CA
11	3,074	35,236	8.9	KO-KE-BA-SI-PE-CA
12	2,488	38,143	9.6	KO-KE-BA-PE-CA
13	2,487	49,524	12.5	KO-KE-BA-SI-CA
14	2,486	50,436	12.7	KO-KE-SI-PE-CA
15	1,899	60,943	15.4	KO-KE-PE-CA
16	1,898	64,724	16.3	KO-KE-SI-CA
17	1,841	122,815	31.0	KO-BA-PE-CA
18	1,828	140,790	35.5	KO-PE-JA-CA
19	1,238	147,675	37.2	KO-PE-CA
20	1,237	177,030	44.6	KO-JA-CA
21	601	309,810	78.1	KO-CA

4．2　適用結果

この配船計画のパレート解の集合は表3のようになった．輸送費用最小の解はKobe－Cape Town間をノンストップで結ぶ極端な代替案になっている．この配船形態では，たとえばJakartaの貨物は表1より最も近い本船寄港地はKobeなので，そこまでフィーダ船で輸送されるというきわめて非現実的なものである．逆にアクセス時間最小の解はSingaporeを除く各港を寄港する配船形態になっている．

このパレート集合を輸送費用とアクセス時間の2次元空間で示したものが図7である．目的関数のアクセス時間は式(9)のようなのべ時間であるが，この図のアクセス時間は理解が容易なようにこれを総輸送コンテナ数で除したコンテナ1TEU当りの平均値(以下，平均アクセス時間と呼ぶ)である．各解は黒丸で示され，近くの数字は表3での解番号である．

ところで，一般に貨物を出荷してからB/L発行までに要する時間は日単位で考えれば十分である．表3を見ると解1～16までは平均アクセス時間が1日以下である．また図7から各解を結ぶ漸近線は解15付近で大きく勾配が変化する．したがって解1～21までが船会社にとってはパレート解であるものの，現実的なアクセス時間の許容値と輸送費用の削減効果を考慮すると，解15か16，つまり，Kobe-Keelung-Penang(またはSingapore)-Cape Townが最も妥当な配船形態と考えられる．

なお，本事例では各ターミナル費用は日本での実績値で一律に与えているが，実際にはターミナル間で相当な差があると想像される．したがって各ターミナルの実績値を用いれば，低額なターミナルを多数寄港する代替案がパレート集合に現れると考えられる．また荷主のアクセス時間にはフィーダ船の待ち時間等は考慮されていないが，これを実際の配船計画に適用する場合，待ち時間を$D_{ij}, i \in K'$に含めればよい．

5．おわりに

本研究では近年研究が盛んなロケーション･ルーチング問題のうち往復型ロケーション･ルーチング問題を検討した．ネットワークの最適計画問題を計画者と利用者の2レベルの最適化問題として解く方法が提案されているが，我々の問題が対象とする現実の物流サービスでは2レベル最適化問題として解くことが必ずしも容易ではない．そこでこれを計画者と利用者という異なる評価主体の2目的最適化問題として取り扱い，その解のパレート集合を求めた．

本問題の解法は，基本的には計画者の提供可能な輸送ルートを列挙し，その中からパレート集合を求めるものであるが，列挙数をできるだけ抑えるために，需要地点をすべて回る巡回セールスマン問題を解き，その値を許容長として輸送ルートの代替案を制約K最短路問題で求める方法を提案した．これは文献6の方法に比べて劣解の列挙を最小限に抑えられ，計算時間において効率的な解法と考えられる．

今後の課題としては，今回は始点と終点間の1ルートの往復輸送ルートを前提としたが，鉄道ネットワークに見られるような複数始点･複数終点の輸送ルートを対象とした往復型ロケーション･ルーチング問題を検討する余地がある．

<参考文献>

1）朝倉康夫，"利用者均衡を制約とする交通ネットワークの最適計画モデル",土木計画学研究・論文集, No.6, pp1-19,1988.
2）J.C.N.CLIMACO and E.Q.V.MARTINS, "A Bicriterion Shortest Path Algorithm,"Eur.J. Opnl.Res.11,pp399-404,1982.
3）J.L.COHON,"Multiobjective Programming and Planning," Academic Press, New York, 1978.
4）J.CURRENT et al.,"The Maximum Covering/ Shortest Path Problem:A Multiobjective Network Design and Routing Formulation," Eur.J.Opnl. Res.21,pp189-199,1985.
5）J.CURRENT and H.MIN,"Multiobjective Design of Transportation Networks:Taxonomy and Annotation," Eur.J.Opnl.Res.26,pp187-201,1986.
6）J.CURRENT et al.,"The Median Shortest Path Problem:A Multiobjective Approach to Analyze Cost vs. Accessibility in the Design of Transportation Networks," Trans. Sci.,21,pp188-197,1987.
7）J.CURRENT,"The Design of a Hierarchical Transportation Network with Transshipment Facilities," Trans. Sci.,22,pp270-277,1988.
8）今井昭夫，"コンテナ輸送システムにおける設備計画の最適化に関する研究"，京都大学学位論文，1989.
9）A.IMAI and X.CAI,"The Constrained k Shortest Path Problem,"submitted to Trans.Sci.
10) G.LAPORTE,"Location-Routing Problem," in Vehicle Routing:Methods and Studies,pp163-198, B.L.Golden and A.A.Assad(eds.), North-Holland, Amsterdam, 1988.
11) E.L.LAWLER et al.,"The Traveling Salesman Problem," John Wiley & Sons, New York, 1985.
12) J.P.OSLEEB and S.J.RATICK,"A Mixed Integer and Multiple Objective Programming Model to Analyze Coal Handling in New England," Eur.J. Opnl.Res.12,pp302-313,1983.