論　文

輸送手段選択問題への ファジイ線形計画モデルの応用

百合本　茂

１．意思決定問題としての輸送手段選択
２．輸送手段選択の評価基準と総合評価
３．ファジイ線形計画モデルによる評価基準に対するウェイトの算定と輸送手段の選択
４．数値例
５．おわりに

１．意思決定問題としての輸送手段選択

ある荷主が物資をＡ地点からＢ地点に輸送しようとする場合，トラックで運ぶべきか，鉄道や海運を利用すべきかといった問題は，輸送手段の選択問題として，その解決方法が種々考えられてきた。これは運ぶべき物資の品目特性，重量，ロットの大きさ，輸送距離，納期など，貨物の属性や契約条件，荷主・送り先の立地，そして，輸送時間，輸送費用，安全性，利便性，環境負荷などの諸々の輸送手段の特性を考慮に入れて決定されるべき問題である。

輸送手段は，これらの多くの要因を総合的に評価し選択されることになるが，これは，物資を輸送しようとしている荷主にとっての最適な輸送手段を，様々な代替案の中から選択するという，一種の意思決定問題としてとらえることができる。

意思決定の構造を考えると，そこには必ず目的がある。この例ではどのような輸送手段を採用すべきかというのがそれにあたる。また，考えうる輸送手段が代替案である。意思決定者は，複数の代替案の中からどれがもっとも相応しいか，各代替案を評価し，決定することになる。代替案を評価する際には，どのような評価基準，あるいは評価項目を取り上げればよいかという問題もある。そして，それらの評価基準が，意思決定者にとってどれくらい重要であるかといった評価基準の重要度を決める問題も考えなければならない。すなわち，輸送手段の選択という意思決定問題は，以下の①から④に示すような内容を含んでいる。

① 目的の設定

② 評価基準，評価項目の抽出

③ 評価基準に対する重要度の決定

④ 代替案の評価と選択

いま，輸送手段の代替案として，トラック，鉄道，海運，空運などがあるとする。

荷主は輸送手段の選択にあたって，どのような評価基準あるいは評価項目を考慮すべきかを考え，それに関する情報を収集することが必要になる。たとえば，輸送にかかる所要時間，輸送費用，安全性，利便性などが輸送手段を評価する際の基準と考えるならば，各代替案についてこれらに関する調査を行い，情報を得なければならない。

また，意思決定を行う企業にとって，これらの評価基準にどのようなウェイトをおくか，その重要度は，輸送すべき品目の荷姿や性質，荷主の

考え方など，貨物や荷主の属性や契約条件，また，荷主・仕向地の立地などによっても異なってくる。荷主は，選択した評価基準のどれがどのくらい重要であるかを，何らかの形で与えるか，何らかの方法で求めることが必要となる。

最終的には，各代替案についての評価基準に関して得られた情報と，それに対する重要度をもとに代替案を評価し，総合評価値や選好順位を求めることにより，もっとも望ましいと考える代替案を選択することになる。

このような主観を伴う意思決定問題を解く方法としてよく用いられているのが階層化意思決定法（AHP）である[１][２]。ただ，AHPでは，評価基準相互間や，各評価基準についての代替案相互間の一対比較を多数回行う必要があり，評価基準や代替案の数が多くなると，一対比較に関わる手続きが繁雑になり，整合性に問題が生じることもある。

本稿では，輸送手段の選択問題を事例に，AHPで行われるような評価基準間の一対比較を行うことなく，単にそれらの選好順位を与えることにより，評価基準の重要度を算定し，代替案としての輸送手段の評価・選択を行う方法を提示する。

まず次節で，輸送手段の種類，それを選択する際の評価基準，総合評価の方法について述べる。３節では，評価基準間の一対比較によらず，より簡便な方法で評価基準の重要度を求めるモデルを提示する。これは，あいまい性を導入したファジイ線形計画法を応用したもので，これを用いることにより，どの輸送手段がもっとも荷主にとって相応しいかを容易に求めることができる。4節では，このモデルを使った数値例を示す。

2．輸送手段選択の評価基準と総合評価

2．1　輸送手段の種類

代替案として輸送手段を考えていく場合，まず，どのような輸送手段が利用できるのか，そして，それらの輸送手段の特性を調べることが必要である。荷主は輸送したい貨物の属性やどこにどのような形で輸送すべきかに見合った手段を選択することになる。

また，利用可能な輸送手段といっても，たとえば，トラック輸送では，自家用トラックを使用するか，営業用トラックを利用するか，営業用はさらに，複数の顧客の貨物を輸送する特別積合せ，まとまった貨物を運ぶ貸切トラックや小貨物を運ぶ宅配便などもある。

鉄道輸送では，貨物ターミナル駅間は鉄道によるが，発着地と貨物ターミナル駅間はトラックによるアクセス・イグレス輸送が併用される。また，鉄道輸送には，コンテナを用いたコンテナ扱と石油輸送やセメントなどの専用車両を用いた車扱がある。

船舶輸送は，港湾間を船舶により輸送するもので，やはりトラックによるアクセス・イグレス輸送と併用される。船舶の種類には，ばら積み貨物船，トレーラなどの車両を運ぶRO-RO船（roll-on/roll-off ship）やフェリー，コンテナを専用に輸送するコンテナ船などがある。

また，長距離輸送で，付加価値が高く，さほど嵩張らない荷物などは航空輸送なども検討されよう。

2．2　輸送手段選択の評価基準

これらの様々な輸送手段から荷主にとって相応しい手段を評価し，選択

しようとする場合，考慮しなければならない点についてまとめてみる。これらは輸送手段を特性づけるものといえる。

・輸送費用

一般に輸送距離が長い場合には，鉄道や船舶による輸送は相対的に費用が安くなり，競争力が高くなるといえる。また，航空輸送は最も費用がかかる。このように，輸送しようとする距離や用いる手段によって輸送費用は変化する。

・輸送時間

長距離を運ぶ場合，航空輸送では，運行ダイヤ・運行経路がうまく合えば，アクセス・イグレス時間を含めても最も輸送時間が少なく迅速性に富む手段といえる。鉄道や船舶においても，運行ダイヤや経路の点では同様であるが，それ自体の輸送時間が航空輸送に比べて長くなり，トラックとの接合点での処理も含めて，トラックだけの輸送と比較して時間がかかってしまうことも多い。トラック輸送は，輸送の融通性が高くJIT輸送も容易に行うことができ，鉄道・船舶より短時間に輸送できる場合もあるが，時に，渋滞などで，到着時間が計画どおりにいかないこともある。

・人件費・保管費

トラック輸送では，ドライバーが常に必要となるので，人件費に関しては最も負担が大きい。また，時間的に柔軟性のないトラック以外の手段においては，ダイヤに合わせて，荷物を保管しておかねばならないとすると保管費用が必要となることもある。

・輸送ロット・輸送力

輸送する荷物の大きさによって採るべき手段も変わってくる。トラックの場合，多様なロットサイズが選択でき，また混載による小口輸送も可能である。鉄道，船舶はサイズが大きい場合に適し，輸送力も大きいが，ロットサイズの融通性には欠けている。反対に，空運では，ロットサイズ

が大きいと費用面で引き合わない場合が多いであろう。

・利便性・サービス

利用のしやすさからみると，鉄道や船舶，航空輸送では運行ダイヤ，発着時刻や便数の制約があり，アクセス・イグレス輸送の手間もかかるが，融通性のあるトラックはドアツードアの輸送で柔軟なサービスが提供でき，利便性の面で優れていると考えられる。

・安全性

道路輸送の場合，他手段と比較して，渋滞の有無や遅延率，輸送中の破損率など，事故に関するリスクを考えなければならないことも多い。このような輸送手段の安全性，荷痛みの多寡，時間の確実性なども考慮に入れることも必要であろう。

・環境負荷

輸送トンキロ当たりのCO_2排出量やエネルギー使用量などの環境面での考慮も必要である。この点からすると，トンキロ当たりでは，空運を除くとトラックは環境負荷の高い手段であるといえる。

このように，荷主は運ぶべき貨物（品目）の属性やロットの大きさ，自分や仕向地の立地などを前提に，上に示したような評価基準に基づいて輸送手段を選択することになる。ただ，評価基準といっても，輸送時間，輸送費用や在庫費用などの物流関連費用，[(1)] CO_2排出量・エネルギー使用量などは容易に数値化が可能なので，比較・評価も容易に行うことができるが，正確性，安全性や利便性などのように，客観的なデータが得にくく，数値化することが難しい基準もある。一方，輸送時間は積替時間や移動時間，利便性は便数や手続きなどのように，評価項目をさらに詳細に分解できる場合もある。

2．3　代替案の総合評価

いま，代替案である輸送手段として，トラック，鉄道，海運の3つ，これらを評価する際の基準として，輸送費用，輸送時間，利便性，安全性，環境負荷の5つを考えよう。これを階層図に示したものが図1である。輸送手段としては，上述のように，さらに分類でき，また，評価基準についても多階層化などによりさらに詳細に分解できるが，本稿の狙いが輸送手段選択そのものより，新たな選択手法についてであるので，ここでは階層図に示すように，この問題を簡素化して扱うことにする。

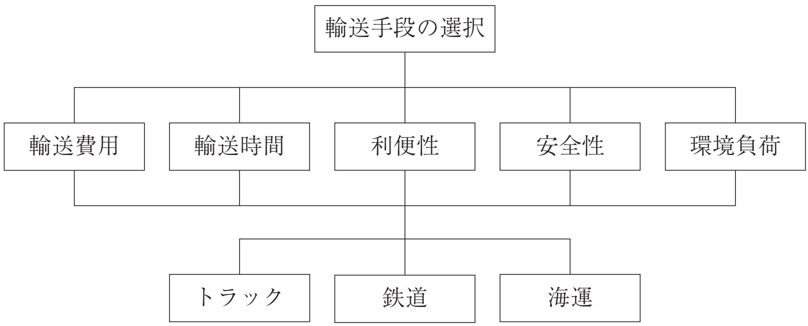

図１　輸送手段選択問題の階層構造

このような問題を解決するもっとも単純な方法は，各評価基準について，それぞれの代替案に関する情報に基づいて点数化など何らかの形で評価値を付与し，一方，各評価基準の重要度も主観的に点数化し，それらを掛け合わせた総合評価値のもっとも大きな代替案を選ぶというものである。

また，階層化意思決定法AHPでは，これらの評価基準に対する意思決定者の考える重要度に応じて，評価基準相互間の一対比較を行い，重要度を表すウェイトを求める。この値と，それぞれの評価基準に関して輸送手段間の一対比較により求めたウェイトから計算した総合評価値の大きさに

よって，輸送手段の評価・選択を行う[４][５]。

代替案の数がこの例のように少ない場合は良いが，代替案が多くなると，行うべき一対比較の回数が増えて，繁雑性や整合性に問題が生じるので，そのような際には，AHPの絶対評価法が用いられる。絶対評価法では，評価基準の代替案に関する情報が数値で捉えることができる場合には，一対比較によることなく，それをそのままの形で用いることができる。

いま，評価基準 j に関する輸送手段 k の評価値 h_{jk} が，何らかの形で得られているものとしよう。たとえば，３つの輸送手段を k（$=a, b, c$），５つの評価基準を j（＝１～５）とし，各手段の総合評価値 H_k を，各基準に対する重要度（ウェイト）w_j と，評価基準別手段別評価値 h_{jk} の線形結合で表すものと仮定すると，各輸送手段の総合評価値は，

$$H_k = \sum w_j h_{jk} \qquad (1)$$

で表され，この値の最も大きな輸送手段を選べばよいことになる。

この場合，評価基準に対するウェイト w_j に関しては，AHPでは基準間の一対比較により求めることが必要である。次節では，各輸送手段の評価基準に関する情報が評価値 h_{jk} という形で得られた時，それに対するウェイトを，AHPで行われるような一対比較によらずに求める方法，及び，それを用いて最適な輸送手段を評価・選択する方法を示す。

３．ファジイ線形計画モデルよる評価基準に対するウェイトの算定と輸送手段の選択

ここではまず，実際にいくつかの輸送手段の中から一つの手段を選択した荷主について，荷主が判断した各評価基準に対する重要性の順位を用いて，結果的に各基準にどのようにウェイトを置いたかを算定するモデルを提示する[６][７]。

荷主は，意思決定に際し，選択した輸送手段を他に検討対象とした複数の手段より何らかの意味で相対的優位性があるとみなしたわけであるが，この選択がどのような要因を重要視した結果であるかをこのモデルにより数量的に捉えることにする。

いま，各評価基準に関する輸送手段 k の情報 h_{jk} が得られているものとしよう。また，荷主の判断した輸送手段の相対的優位性として，選択した輸送手段 a と他の手段（b, c）の総合評価値との差の最小値の最大化，すなわち，次善の輸送手段の総合評価値との差（ ε ）の最大化，

$$\max\{\min(\Sigma w_j h_{ja} - \Sigma w_j h_{jk})\} \qquad ((k=b, c)$$

を考えると，輸送手段（a, b, c）が３つ，評価基準（$j=1\sim5$）が５つの例では，次のような定式化が可能である。

$$\max \quad \varepsilon \tag{2}$$

s.t.

$$\Sigma w_j h_{ja} - \Sigma w_j h_{jb} \geqq \varepsilon \tag{3}$$

$$\Sigma w_j h_{ja} - \Sigma w_j h_{jc} \geqq \varepsilon \tag{4}$$

$$\Sigma w_j = 1 \tag{5}$$

$$\varepsilon,\ w_j \geqq 0 \ (j=1\sim5) \tag{6}$$

制約式(３),(４)は，選択した輸送手段 a の総合評価値が他の輸送手段 b， c の総合評価値を下回らないことを示している。式(５)は評価基準に対するウェイトを正規化するためのものである。

ここでいま，荷主の各評価基準に対する選好性を反映させるために，各基準に対しての重要性の度合いを順位で与え，これを制約条件として付加することを考える。たとえば，５つの評価基準の重要性の順位を，基準１，２，３，４，５の順のように判断したとすると，次のようになる。

$$w_1 \geqq w_2 \geqq w_3 \geqq w_4 \geqq w_5 \tag{7}$$

結局，式(７)を追加してこのモデルを解くことにより，選択すべき輸送

手段の相対的優位性を最大化するウェイトw_j（j＝１～５）が求められる。この問題は，通常の線形計画法によって容易に解くことができる。

このようにして求められたウェイトw_jは，荷主が輸送手段を選択した際の，各評価基準に対する選好の度合いを数値化したものとみなすことができる。

ただ，現実の荷主の評価基準に対する判断に際しては，これらの基準間の順位には，かなりの差がある場合もあるし，ほとんど同じと考える場合もあるだろう。このように現実の判断ではあいまい性が存在する。そこで，このあいまい性をそのままの形で意思決定に取り入れることを考え，ファジイ理論の考え方を導入する。単に順序関係を不等式で示すより，この方がより現実的であるし，荷主の評価基準に対する選好の度合いを，より忠実にモデルに反映させることができる。

そこでここでは，荷主が各評価基準をどのように重視しているかを順位の形で与えるが，このときその選好の度合いにあいまい性を導入し，基準１と基準２の関係を，

１の方をかなり重視している　$w_1 \succ\succ w_2$　（８）

１の方を少し重視している　$w_1 \succ w_2$　（９）

ほぼ同じくらいである　$w_1 \approx w_2$　(10)

の３通りで判断することにする。記号$\succ\succ$は，“かなり重視”，$\succ$は，“少し重視”，$\approx$は，“ほぼ同様”を表すファジイ記号とする。これらの関係式を，式(７)の代わりに上記の問題に付加し，これらのもとで，式(２)を最大にする$\boldsymbol{w}$を求めれば良いことになる。

このようなファジイ環境における意思決定は，R.E. BellmanとL.A. Zadehにより，ファジイ目標とファジイ制約を統合した決定集合を定義する形で理論づけが行われた[８]。その後，H.J. Zimmermannは，ファジイ目標とファジイ制約のある線形計画問題を定式化した[９],[10]。これは，意思

決定者が主観的に定めるメンバシップ関数を線形関数と仮定し，ファジイ決定に対する最大化決定を採用すれば，ファジイ線形計画問題は通常の線形計画問題として解けるというものである[11]。

この考え方を応用し，ここでも，各評価基準の選好順序を表すファジイ制約とともに，選択した輸送手段と次善の手段との総合評価値の差を最大化するように輸送手段を選定する際，この差がだいたいある値以上というファジイ目標を設定し，荷主が主観的に定めるメンバシップ関数に線形関数を仮定する。このとき，ファジイ制約とファジイ目標との共通集合であるファジイ決定に対して，その集合に帰属する度合いを最大にするような$\boldsymbol{w}$を選ぶという最大化決定を行うものと仮定すると，ファジイ線形計画問題は通常の線形計画問題に変換でき，容易に解を得ることができる。

たとえばいま，評価基準が５つあり，それぞれその重要度を，

$$w_1 \succ\succ w_2 \approx w_3 \succ w_4 \succ w_5 \tag{11}$$

のように判断したとする。制約式では，これらの関係は

$$w_1 - w_2 \succ\succ 0 \tag{12}$$

$$w_2 - w_3 \approx 0 \tag{13}$$

$$w_3 - w_4 \succ 0 \tag{14}$$

$$w_4 - w_5 \succ 0 \tag{15}$$

として表されるが，これをファジイ制約と考えると，これを特性づけるメンバシップ関数が必要になる。ここでは，次のような線形メンバシップ関数を用いることにする（図２）。

$$m_i(f_i(\boldsymbol{w})) = \begin{cases} 0 & ;\ f_i(\boldsymbol{w}) \leqq b_i - d_i \\ 1 - \dfrac{b_i - f_i(\boldsymbol{w})}{d_i} & ;\ b_i - d_i \leqq f_i(\boldsymbol{w}) \leqq b_i \\ 1 & ;\ f_i(\boldsymbol{w}) \geqq b_i \end{cases} \tag{16}$$

ここで，$f_i(\boldsymbol{w})$は，式(12)～(15)に示されるようなファジイ制約式，

$m_i(f_i(\boldsymbol{w}))$は，それらに関するメンバシップ関数で，制約式(12)のように，“かなり重視”している場合にはb_iの値は大きく，制約式(14)(15)のように，“少し重視”している場合には小さな値に設定される。

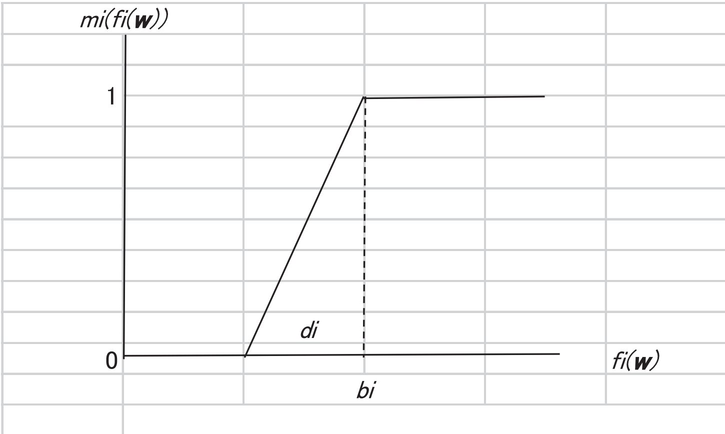

図２　メンバシップ関数（“かなり重視”の場合）

ここで問題になるのは，基準１が基準２よりかなり重要であるとしても，これがウェイトの差としてどのくらいになるかということである。これは意思決定者の主観によって様々な値をとるものと考えられる。たとえば，“かなり重視”する場合のb_iを0.3, d_iを0.15とみなせば，２つの要因のウェイトに0.3以上の差があると，“かなり重視”という集合の帰属度が１となり，メンバシップ関数の値は１となる。また，その差が0.15（$=b_i-d_i$)以下の場合には，“かなり重視”とはいえないことになる。

“少し重視”するという場合には,少なくとも差があればいいことになるので，b_iとd_iを同じ値にすればよい。すなわち，図３のようになる。

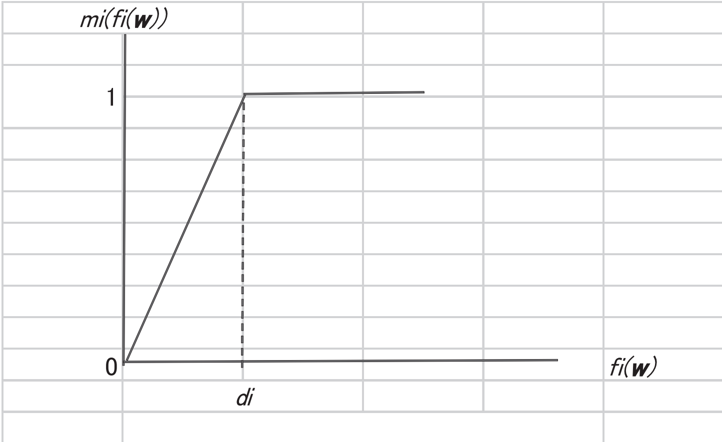

図 3　メンバシップ関数（“少し重視”の場合）

制約式(13)のような，“ほぼ同等”という場合のメンバシップ関数としては，次のような関数が考えられる（式(17)，図 4 ）。

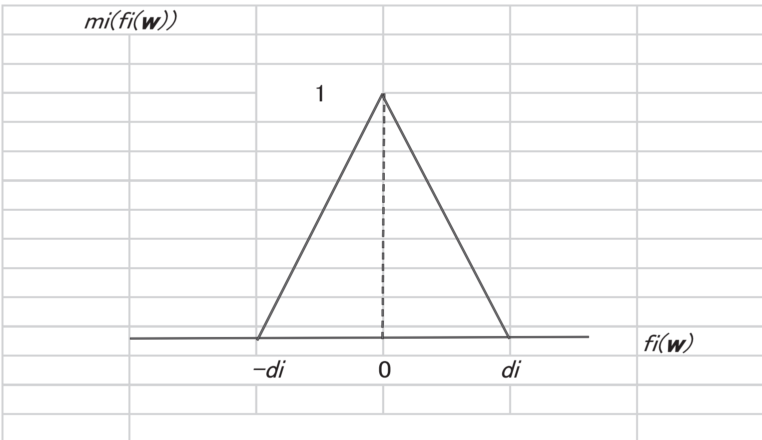

図 4　メンバシップ関数（“ほぼ同等”の場合）

$$m_i(f_i(\boldsymbol{w}))=\max(0,\ 1-\frac{|f_i(\boldsymbol{w})|}{d_i}) \tag{17}$$

すなわち，

$$m_i(f_i(\boldsymbol{w}))=\begin{cases} 0 & ;\ f_i(\boldsymbol{w})\leqq -d_i \\ 1+\dfrac{f_i(\boldsymbol{w})}{d_i} & ;\ -d_i\leqq f_i(\boldsymbol{w})\leqq 0 \\ 1 & ;\ f_i(\boldsymbol{w})=0 \\ 1-\dfrac{f_i(\boldsymbol{w})}{d_i} & ;\ d_i\geqq f_i(\boldsymbol{w})\geqq 0 \\ 0 & ;\ f_i(\boldsymbol{w})\geqq d_i \end{cases} \tag{18}$$

である。

さて，目的関数として，選択された輸送手段と次善の手段との総合評価値の差を最大化するように手段を選択するモデルを考える場合，ここにもこの差がだいたいある値以上というファジイ目標を取り入れると，そのメンバシップ関数は，図２と同様に以下のようになる。

$$m_g(f_g(\boldsymbol{w}))=\begin{cases} 0 & ;\ f_g(\boldsymbol{w})\leqq b_g-d_g \\ 1-\dfrac{b_g-f_g(\boldsymbol{w})}{d_g} & ;\ b_g-d_g\leqq f_g(\boldsymbol{w})\leqq b_g \\ 1 & ;\ f_g(\boldsymbol{w})\geqq b_g \end{cases} \tag{19}$$

ここで，$f_g(\boldsymbol{w})$は式（２）のような目的関数，$m_g(f_g(\boldsymbol{w}))$はそれに関するメンバシップ関数である。意思決定者はこれらをもとに，ファジイ制約とファジイ目標との共通集合であるファジイ決定に対して，その集合に帰属する度合いを最大にするような$\boldsymbol{w}$を選ぶという最大化決定を行うものと仮定すると，ファジイ線形計画問題は，

$$\max\{\min(f_g(\boldsymbol{w}),f_i(\boldsymbol{w})\}$$

を満足する$\boldsymbol{w}$を求める問題になる。すなわち，選択した輸送手段と次善の手段との総合評価値の差を最大化するモデルのファジイ化は，

$$\max \quad \varepsilon \tag{20}$$

s.t.

$$\Sigma w_j h_{ja} - \Sigma w_j h_{jb} \geqq \varepsilon \tag{21}$$

$$\Sigma w_j h_{ja} - \Sigma w_j h_{jc} \geqq \varepsilon \tag{22}$$

$$w_1 - w_2 \succ\succ 0 \tag{23}$$

$$w_2 - w_3 \approx 0 \tag{24}$$

$$w_3 - w_4 \succ 0 \tag{25}$$

$$w_4 - w_5 \succ 0 \tag{26}$$

$$\Sigma w_j = 1 \tag{27}$$

$$\varepsilon,\ w_j \geqq 0 \quad (j = 1, 2, 3, 4, 5) \tag{28}$$

により与えられ，これは次の線形計画問題を解けばよいことになる。

$$\max \quad \lambda \tag{29}$$

s.t.

$$\Sigma w_j h_{ja} - \Sigma w_j h_{jb} \geqq \varepsilon \tag{30}$$

$$\Sigma w_j h_{ja} - \Sigma w_j h_{jc} \geqq \varepsilon \tag{31}$$

$$\frac{\varepsilon}{d_g} \geqq \lambda \tag{32}$$

$$1 - \frac{b_1 - (w_1 - w_2)}{d_1} \geqq \lambda \tag{33}$$

$$1 - \frac{(w_2 - w_3)}{d_2} \geqq \lambda \tag{34}$$

$$1 - \frac{(w_3 - w_2)}{d_2} \geqq \lambda \tag{35}$$

$$\frac{(w_3 - w_4)}{d_3} \geqq \lambda \tag{36}$$

$$\frac{(w_4-w_5)}{d_3} \geqq \lambda \tag{37}$$

$$\Sigma w_j = 1 \tag{38}$$

$$\lambda,\quad \varepsilon,\quad w_j \geqq 0 \ (j=1, 2, 3, 4, 5) \tag{39}$$

制約式(32)は，ファジイ目標に関するメンバシップ関数で，ε は最適輸送手段と次善の輸送手段の総合評価値の差を表しており，ここでは，図３の形の関数を採用し，少なくとも０以上であればよいので，式(19)のb_gとd_gを同値とした。また，式(33)は，ファジイ制約式(23)に，式(34)(35)は式(24)に，式(36)(37)は式(25)(26)にそれぞれ対応している。また，目的関数の λ の値は，制約条件と目的関数を満たす解集合への帰属度を表し，０以上１以下の値をとることになる。

この問題を解くことにより，荷主の各評価基準に対する重要度，すなわち，ファジイ制約式(11)を満たす各評価基準に対するウェイト$\boldsymbol{w}$を求めることができる。また，このようにして得られたウェイトは，荷主が輸送手段を選択した際の各評価基準に対する選好の度合いを数値化したものといえる。

この方法により，荷主が評価基準に対し，どのようにウェイトを置いて輸送手段を選択したかが求められるが，このモデルを輸送手段選択問題に使用するには次のようにする。すなわち，上の例での輸送手段 a を，他の手段 b，c に置き換え，それぞれ手段の数だけ線形計画問題を解き，目的関数値のもっとも大きな輸送手段を選択すればよい。この場合，制約条件の関係から実行不可能なケースも出てくる可能性がある。荷主の考える重要性の順位では，どのようなウェイトの置き方をしても，その手段の総合評価値が他の手段の値より大きくならず，制約条件を満たすことができない場合である。そのような輸送手段は，荷主の選好に合致せず，対象外と

いうことになる。

4．数値例

前節で提示したファジイ線形計画モデルを用いた数値例を示そう。2.3節の図１に従い，３つの輸送手段，５つの評価基準の場合について，モデルのあてはめを行う。

いま，800km離れた出荷先に貨物を届けようとしている荷主に，輸送手段の選択に際しての評価基準に関する選好順位を尋ねた所，前節の例で示したように以下のようだったとする。

$$w_1 \succ\succ w_2 \approx w_3 \succ w_4 \succ w_5 \tag{40}$$

すなわち，輸送費用を最も重視し，かなりの差で，輸送時間と利便性が同列で続き，以下，安全性，環境負荷の順になると判断した場合である。

また，各評価基準に関する原データは，表１に示される。輸送費用，時間，そして環境負荷の代理指標として考えられる輸送トンキロ当たりエネルギー使用量に関しては，具体的なデータが得られるのでそれをそのまま用いることにし，利便性，安全性については，統計指標をそのままの形で使用するには無理があるので，10段階評価の値を付与した。[2]

これらの原データを，評価基準ごとに最良値が１となるように基準化した数値が表２で，これらを評価値として使用する。

表１．輸送手段の属性値（原データ）

輸送手段	輸送費用	輸送時間	利便性	安全性	ｴﾈﾙｷﾞ使用量
トラック	9000	10.4	10	7	1.413
鉄道	8000	9.4	5	10	0.459
海運	6000	18.4	3	8	0.555

表２．原データを最良値が１になるようデータを基準化（h_{jk}）

輸送手段	輸送費用	輸送時間	利便性	安全性	ｴﾈﾙｷﾞ使用量
トラック	0.66667	0.90385	1	0.7	0.32484
鉄道	0.75	1	0.5	1	1
海運	1	0.51087	0.3	0.8	0.82703

これをもとにモデル（式(29)～(39)）を適用した結果は，表３のようになった。[(3)] この表の数値は，各輸送手段を選択した場合の評価基準に対する重要度（ウェイト）を示している。いずれも式(40)の選好順位を満たしている。また，目的関数値に示されるように，λの大きさは，１位海運，２位鉄道，３位トラックの順となり，この荷主にとって，海運が最適な輸送手段ということができる。

表３．ファジイLPの適用結果１

評価基準		トラックtwj	鉄道rwj	海運mwj
輸送費用	w1	0.4993	0.4585	0.6364
輸送時間	w2	0.2253	0.1681	0.1284
利便性	w3	0.2340	0.1713	0.1284
安全性	w4	0.0413	0.1245	0.0784
環境負荷	w5	0.0000	0.0777	0.0284
	計	1.0000	1.0000	1.0000
目的関数値　λ		0.8266	0.9359	1.0000

なお，この例では，“かなり重視”を表す図２のb_iを0.3，d_iを0.15，“やや重視”を表す図３のd_iを0.05，“ほぼ同等”を表す図４のd_iを0.05として設定している（次の例でも同様)。すなわち，ウェイトの差が0.3以上ある場合に“かなり重視”と考え，“少し重視”では0.05以上の差がある場合，“ほぼ同等”は，±0.05以内の差の場合であるとする。[(4)]

表４．総合評価値

	Σ twj*hjk	Σ rwj*hjk	Σ mwj*hjk
トラック	**0.7995**	0.7327	0.7328
鉄道	0.7582	**0.7997**	0.7767
海運	0.7177	0.7529	**0.8267**

表４は，表３の重要度（ウェイト）を用いて計算した総合評価値を示している。すなわち，表２，表３のデータから式(１)により求めた値である。

表３では，最適解への帰属度を表す目的関数値 λ の最も大きい海運が，輸送手段として選択されることになったが，この値が複数の代替案で１となるような場合も理論的にはありうる。これは，制約条件と目的関数を満たす解集合への帰属度が１で，ともに完全に満たしている場合である。そのような場合には，表４に示した総合評価値の大きさによって最適な代替案を選べばよい。

次に，別の荷主の選好順位，式(41)に基づいて，モデルを適用した結果を表５に示す。

$$w_1 \succ w_5 \succ w_3 \succ\succ w_4 \approx w_2 \tag{41}$$

すなわち，輸送費用を最も重視し，以下，環境負荷，利便性と続き，かなり離れて安全性と輸送時間が同列で続くという場合である。

表５．ファジイLPの適用結果２

評価基準		トラックtwj	鉄道rwj	海運mwj
輸送費用	w1	実行不能	0.3575	0.4938
輸送時間	w2		0.0272	0.0000
利便性	w3		0.2807	0.2384
安全性	w4		0.0156	0.0000
環境負荷	w5		0.3191	0.2678
	計		1.0000	1.0000

目的関数値 λ		0.7676	0.5891

この例では，目的関数値を見ると１位鉄道，２位海運となり，トラックに関しては，式(41)に示される制約条件を満たすことができず，実行不能という結果となった。すなわち，この選好順位では，トラックの総合評価値は他の輸送手段の評価値を超えることができないという例である。この荷主にとって，トラックは輸送手段として相応しくないことになる。

５．おわりに

輸送手段の選択問題は，物資を輸送しようとしている荷主にとって最適な代替手段を決定するという意思決定問題として捉えることができる。

本稿ではまず，輸送手段の種類と特性，手段を選択する際の評価基準と総合評価の方法を述べ，評価基準に対する重要度を表すウェイトを算定するためのモデルを提示した。この方法では，従来，AHPなどで行われていたような評価基準間の一対比較などの繁雑な手間を必要とせず，荷主の考える選好順位のみを与えて重要度を評価し，最適輸送手段を決定することができる。手法としては，意思決定のあいまい性を考慮したファジイ線形計画法を利用している。これを解くことにより荷主の評価基準に対する重要度が求められ，もっとも相応しい輸送手段を評価・選択することが可能となる。最後に，このモデルを用いた数値例を事例として示した。

注

（１）［３］では，物流関連費用として，輸送費用，輸送中の価値低減費用，在庫費用などをあげて，国際輸送手段の選択についての議論を行っている。

（２）輸送費用：輸送距離500kmにおけるトン当たり費用。

輸送時間：輸送距離750kmにおける輸送時間（トラック・鉄道は平均80km/h，海運は22ノット，また，鉄道，海運の両端トラック輸送距離10km未満の場合のもの。

エネルギー使用量：トラックは10トントラック（積載率100%）のトンキロ当たり発熱量（単位；メガジュール），鉄道，海運は従来トンキロ法による。これらの

数字（輸送費用，輸送時間，エネルギー使用量）は[12]の資料集を参照。

利便性，安全性：それぞれの輸送手段の特性から，主観的に10段階で値を付与している。

（3）　今回の数値例のように，変数や制約の数がさほど多くない場合には，Excelのソルバーを用いて線形計画問題を解くことができる。以下の表は，式(40)の選好順位に従って「海運」を選択した荷主の，評価基準に対するウェイトを求めたソルバーの結果を示している。表の下にある問題の解を示す変数欄の数字（w1～ w5）が，表3の「海運」の列の数字mwj（「海運」を選択した際の評価基準jに対するウェイト）になっている。表3は，同様の計算を「鉄道」と「トラック」についても行った結果をまとめたものである。

海運										
		w1	w2	w3	w4	w5	e	λ	制約式	定数
	制約1	0.333333	−0.39298	−0.7	0.1	0.502186	−1		0.043877	0
	制約2	0.25	−0.48913	−0.2	−0.2	−0.17297	−1		0	0
dg=0.05	選好順序1						1	−0.05	0	0
d1=0.15 b1=0.3	選好順序2	1	−1					−0.15	0.357944	0.15
d2=0.05	選好順序3		1	−1				−0.05	−0.05	−0.05
d2=0.05	選好順序4		−1	1				−0.05	−0.05	−0.05
d2=0.05	選好順序5				1	−1		−0.05	0	0
d2=0.05	選好順序6			1	−1			−0.05	0	0
	正規化(=1)	1	1	1	1	1			1	1
	変数	0.636355	0.128411	0.128411	0.078411	0.028411	0.05	1		
			d1=0.15 b1=0.3				目的セル	1		

（4）　これらのメンバシップ関数のパラメータは，意思決定者の主観によって与えられるべきものである。

参考文献

［1］ Saaty, T.L., The Analytic Hierarchy Process, McGraw-Hill,（1980）

［2］ 刀根薫，真鍋龍太郎編，『AHP事例集』，日科技連出版社，（1990）

［3］ 坪井竹彦・兵藤哲朗・脇田哲也，「物流費用を考慮した海上－航空国際貨物輸送モード選択モデル試案」，運輸政策研究，Vol.12-4, pp.32-41,（2010）

［4］ 谷村秀彦・歳森敦・ 吉村英俊，「北部九州圏における航空貨物の経路選択に関する研究」，（財）国際東アジア研究センター Working Paper Series Vol.2005-22,（2005）

［5］ 百合本茂・片山直登・増田悦夫，『ロジスティクスの計画技法』（第11章 輸送機関選択），流通経済大学出版会，2015

［6］ 百合本茂・増井忠幸，“ファジイ線形計画モデルによる立地選好度の同定とその応用”，日本経営工学会誌，Vol.46, No.1, pp.84-92,（1995）

［7］ 小泉明・稲員とよの・荒井康裕・河野裕和，「ファジイ線形計画法による有害廃棄物の広域的輸送計画」，環境システム研究論文集　Vol.31, pp.447-453,（2003）

[8] Bellman, R.E. & Zadeh, L.A., "Decision Making in a Fuzzy Environment", *Management Science*, Vol.17, pp.141-164, (1970)
[9] Zimmermann, H.J., "Description and Optimization of Fuzzy Systems", *International Journal of General Systems*, Vol.2, pp.209-215, (1976)
[10] Zimmermann, H.J., "Fuzzy Programming and Linear Programming with Several Objective Functions", *Fuzzy Sets and Systems*, Vol.1, pp.45-55, (1978)
[11] 坂和正敏, 『経営数理システムの基礎』, 森北出版, pp.102-119, (1991)
[12] 日本ロジスティクスシステム協会編, 『ロジスティクス源流マニュアルVer.2』, 日本ロジスティクスシステム協会, (2006)