

不確実な需要下における計画目標期の設定

A STUDY ON PLANNING HORIZON UNDER UNCERTAIN DEMAND

長尾 義三*・笠島 勝治**

By Yoshimi NAGAO and Katsuji KASASHIMA

1. 緒 言

土木施設整備に対する需要は絶えず時間的・空間的に変化しているため、計画の策定は動学的な立場からの考察が必要である。ここで特に時間軸に注目して「何か年先までの需要を対象にして計画を策定するか」という需要予測の期間を計画目標期とよぶことにする。これは後述するプロジェクト・ライフや耐用年数とは異なった概念である。これまでの研究においては計画目標期は需要予測値に基づく計画目標値とともに与件とされ、その枠組の中で最適な投資時系列について議論されてきた¹⁾。

ところで需要は時間とともに変動するものであり、計画目標期の設定の仕方により計画の内容、すなわちその種類、規模ならびに配置、さらに投資時系列に差異が生ずる。一般に長期を見通せば計画需要は大きくなるので質的な技術革新を含む大規模な施設を設定し、効率のよい計画を立てることができる。しかし需要予測の不確実性により予測値と実現値の乖離が大きくなることとなり、施設の不足や供給過剰が生じ余分な費用が発生する可能性が大きくなる。一方短期の計画目標期では、乖離は小さくなるが将来に向けて効率のよい施設を作ることとは期待できない。このように計画目標期の設定は需要予測の不確実性や建設方式、投資行動などと密接な関係をもつものである。そしてこのほかに計画目標期設定に影響を与える要因として規模の経済、社会的割引率などが考えられる。

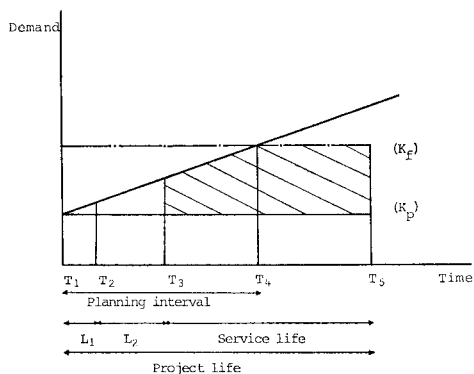
本研究はこれらの要因の構造を明らかにし評価モデルを作成して、計画目標期と最適建設方式および最適投資時系列を同時に決定する方法論を提案し、もって動学的計画論展開の基礎とすることを主たる目的としている。

2. 従来の研究

(1) 土木施設計画における時間の概念

土木施設計画を規定する時間の概念としてプロジェクトライフがある²⁾。Fig. 1 においてプロジェクトライフは想定しているプロジェクトの実施時点 T_1 より便益(あるいは効用)が計画策定の時点において予見し得る条件のもとで持続すると考えられる最終時点 T_3 までの期間($T_1 \sim T_3$)をいう。その中には調査研究期間($T_1 \sim T_2$)、建設期間($T_2 \sim T_3$)、供用期間($T_3 \sim T_5$)が含まれる。施設の便益が発生しているのは供用期間であり、これは耐用年数ともいわれる。計画目標期 T_4 は T_3 と T_5 の間にあると考えることができる。

本研究においては調査研究期間は考慮しない($T_1 =$



- T_1 : Present time
- T_2 : Ground-breaking
- T_3 : Completion (including partial operation)
- T_4 : Planning horizon
- T_5 : End of plan
- L_1 : Research and investigation
- L_2 : Construction
- K_f : Forecasted scale of facility
- K_p : Present scale of facility

Fig. 1 Concept of time in planning.

* 正会員 工博 京都大学教授 工学部交通土木工学教室

** 正会員 工修 (株)三菱総合研究所社会システム部

T_2). そして施設の建設は各年次の当初に行われ同時に便益が発生するものとする。この場合プロジェクトライフは供用期間すなわち耐用年数とすることができる。

(2) 従来の研究

計画目標期そのものを論じた研究は少ないが文献 3), 4) を掲げる。3) は最適な計画期間 (the optimum planning interval) 設定を計画期間の長さ と 計画におけるエラーの二面からとらえている。すなわち計画の対象となる期間が長くなるほど 1 年当たりの計画立案費用は小さくなる。しかし計画の予測値と実現値の乖離により生ずる費用が増大するとして両者のトレードオフにより計画期間が決定されるとしている。そして予測値と実現値の乖離は正規分布に従う確率変数と考えている。しかし計画立案の費用は予測値がはずれることにより発生する費用に比べてきわめて小さい場合が多いので両者を比較の対象とすることには難があることなどの問題がある。

4) は需要予測の不確実性を ベイズの定理 を用いて予測密度関数で表わし、計画に影響を与える要因を挙げ計画目標期と最適投資時系列を同時に決定する方法を提案している。しかし得られる情報を次々と取り込んでいくベイズの方法を、将来の実現値を情報として得ることのできない一般にみられる計画立案に用いる 実際性は薄い。

本研究は従来の研究におけるこれらの問題点をふまえて、費用便益分析に基づいた合理的な計画目標期の決定方法を提示する。

3. 解析における諸前提

対象プロジェクトは道路や港湾などの土木施設計画であるが、計画目標期を設定し費用便益分析によって最適計画を求めようとする一般の計画にも適用できる。次に解析に必要な諸前提を示し本研究の言及範囲を明らかにしておく。

(1) 対象プロジェクトの性質

計画に影響を及ぼす要因として、プロジェクト自身もつ次のような性質を挙げることができる。

a) プロジェクトは施設計画を対象として施設の規模について最小の分割単位が存在して

る。したがってプロジェクトを数多くの単位として一括して建設することもでき、また一部単位の建設投資を遅らせることもできる。しかし分割を多くすることにより手戻り費用が増加する (手戻り費用の存在)⁹⁾。

b) 施設をまとめて一体利用することにより最小分割単位の能力の単純合計よりも大きな質のよい能力を発生することができる (施設利用における規模の経済)。

c) プロジェクトは純便益の現在価値あるいは毎年等価値値で評価することができる (費用便益分析による評価)。

d) 需要が施設の能力を上回れば供給不足による費用が生ずる (たとえば代替費用, 混雑費用)。

e) 需要が施設の能力を下回れば供給過剰による費用が生ずる (たとえば資本遊休費用)。

f) 需要は時間とともに変動し一般に増加する (需要の成長) その予測にあたっては不確実性が存在する⁷⁾ (需要予測の不確実性)。

g) 資本は増殖する。したがって異なる時期の価値の比較においては増殖率で割引かねばならない (社会的割引率)。

h) 施設には物理的, 経済的, 社会的耐用年数があり便益を提供する期間は有限である (耐用年数)。

(2) 便益と費用

評価の基準となる便益は消費者余剰としてとらえることができる。Fig. 2 において便益は斜線部分で表わされその値 B は

$$B = \int_0^{D^*} f_D(D) dD - f^* \cdot D^* \dots\dots\dots (1)$$

である。ここに D^* , f^* は需要曲線 $f_D(D)$ と供給曲線 $f_S(D)$ の交点, すなわち均衡状態における需要と費用を表わす。

Fig. 2 では 需要曲線は右下がりになっているが、本

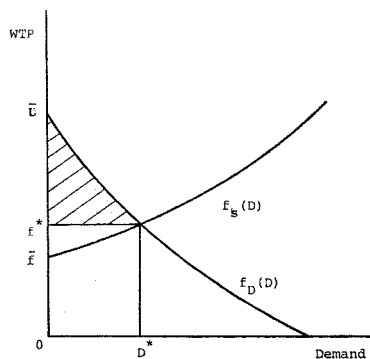


Fig. 2 Benefit under elastic demand.

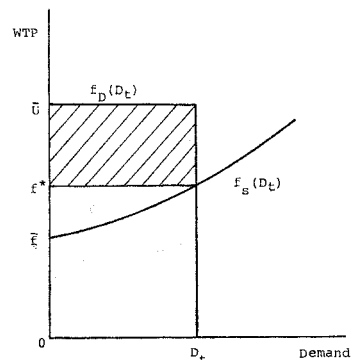


Fig. 3 Benefit under inelastic demand.

研究では Fig. 3 のように需要は費用に対して非弾力的であると仮定する。費用の大小にかかわらず絶対に必要なものに対する需要であるならばこのような仮定は許される。主食、エネルギーなどがこの例であるが公共財としての土木施設への需要もこの種の性質をもっている。すなわち、個々の施設を取り上げると、たとえば代替性のない、外国貿易港湾、上水道、下水道などまた、鉄道、道路、港湾など、互いに代替性をもつ交通機関においても、各機関の間で大幅な費用の変化がない限りは、慣習もしくは現在の荷主と輸送業者の契約関係に変化は生ぜず、需要も非弾力的であると考えられることが多い。したがって式 (1) は t 期の需要を D_t 、施設の規模を K とすれば

$$B(K, D_t) = \int_0^{D_t} \bar{U} dD - f^* D_t \dots\dots\dots (2)$$

と表現できる。ここに \bar{U} は公共的な支払い許容価格 WTP である。

一方施設を利用することによる単位利用者が負担する費用は利用量が増加するにつれて、混雑あるいは待ちが生じ増加する。この利用に伴う費用の増加の度合(限界費用)は施設規模が大きいほど小さい性質をもつ。また利用にあたっては利用量や施設規模に関係しない固定費用が存在する。このような条件を満足する式 (3) を平均利用費用曲線として仮定する。

$$f_s(K, D_t) = \bar{f} + f_K(D_t) \dots\dots\dots (3)$$

ただし \bar{f} は固定費用である (Fig. 2, Fig. 3)。

したがって総便益は式 (2), (3) より

$$B(K, D_t) = \int_0^{D_t} \bar{U} dD - f^* D_t \\ = D_t \cdot [\bar{U} - \{\bar{f} + f_K(D_t)\}] \dots\dots (4)$$

次に施設提供者の費用は建設に要する費用、維持管理費でありこれを I_t と表わす。そのほか公害などの外部不経済は式 (3) の平均利用費用に含めることができる。以上より純便益 $NB(K, D_t)$ は

$$NB(K, D_t) = B(K, D_t) - I_t \\ = D_t [\bar{U} - \{\bar{f} + f_K(D_t)\}] - I_t \\ \dots\dots\dots (5)$$

(3) 需要予測とその不確実性

計画目標値は需要構造の分析に立脚した予測作業の結果から設定される。予測モデルには時間変動に注目した時系列モデル、変数間の因果関係もしくは相関の強さから求めた回帰モデル、さらにこれらを組み合わせ複雑な現象の再現を図った計量経済モデルのような構造モデルがある⁹⁾。

a) 不確実性の存在

上述の方法で求めた予測値が実現値と一致することはほとんどない⁷⁾。その原因としては

- i) モデルや説明変数の値が正しくても、現象がランダム性をもつことにより生ずる統計誤差
- ii) モデルが正しくても入力する説明変数の値が不正確なことによるパラメーター誤差
- iii) 現象を正しく認識し得ないモデルによるモデル誤差などがある⁷⁾。このうち i) は統計的不確実性、ii), iii) は本質的(偏りのある)不確実性といえることができる。

従来のモデルの信頼性に関する研究は i) に対してであり、本質的な不確実性に対処したモデルの開発はなされていない。i) の誤差を小さくするためには標本数を増加させたり、また説明変数を多くとってモデル構造を精緻にしたりする方法がある。しかしこれはあくまで過去と現在のデータに基づくものであり、ii), iii) の誤差を小さくすることに役立つとは限らない。このことからどのような現象分析を行い、予測モデルを作成すればよいかの研究が ii), iii) の本質的不確実性に対して行われなければならないが本研究ではこの問題には言及しない。

b) 需要予測モデル

需要はプロジェクトとは独立に毎年定率で増加するものとして式 (6) で仮定する。

$$\bar{D}_t = D_0 \cdot g(r, t) \dots\dots\dots (6)$$

ここに \bar{D}_t は t 期における需要量、 D_0 は初期需要で計画を行うときに得られている実績値、 r は需要の成長率である。このようなモデルは次の理由で採用される。

- i) 3. (2) より需要が非弾力であること。
- ii) プロジェクトの外生条件となる人口、経済量などの予測が成長率法で与えられることが多いこと。
- iii) 需要予測においてはその動向を直接説明する要因を挙げることは困難であること。

次に将来の需要の実現値は式 (6) で表わされるモデルの周辺に分布する確率密度関数 $P(D_t)$ をもつ。この密度関数は正規分布 $N[\bar{D}_t, \sigma_t]$ に従うとする。これを否定する根拠は特にみつからない。

$$P(D_t) = \frac{1}{\sigma_t \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{D_t - \bar{D}_t}{\sigma_t}\right)^2\right] \\ \dots\dots\dots (7)$$

$$\sigma_t = \rho_t \cdot \bar{D}_t \dots\dots\dots (8)$$

ここに ρ_t は変動係数である。

式 (6) は予測モデルを指数型としているが、これは対象プロジェクトの需要動向から予測式を選定すればよいのであって、回帰モデル、構造モデルの使用を妨げるものではない。本研究ではモデルの不確実性の、計画に与える影響を検証することが目的であることに注意しておきたい。

式 (8) で表わされる不確実性は統計誤差、パラメー

ター誤差，モデル誤差をすべて含んでいると考える。そして変動係数 ρ_t は不確実性を定量的に示す一つの指標である。この ρ_t を過去の統計値から確定的に求めることは困難であり，また求めても将来値に対してはあまり意味のないことでもある⁹⁾。むしろそれを指針にしてパラメトリックに変動させ感度分析的使用により，計画情報を得るようにする方が有用であると考えられる。

(4) 規模の経済

規模の経済とは生産に投入された生産要素の総量(規模)の拡大から生ずる生産費上の節約ないしは収益上の利益のことをいう⁹⁾。規模の経済は施設の建設時においても利用時においても観察される。

a) 建設における規模の経済

道路・港湾などの土木施設はある程度の規模が必要であり，無限に小規模なものを建設することはできない(最小単位以下の施設の不可分性)。そしてこの不可分性により固定費用が発生するので大規模な施設をまとめて建設するほど単位規模当たりの建設費用が低下することになる。いま総工事費を TC ，固定費用もしくは，手戻り費用 set up cost (たとえば 調査費，準備費，環境アセスメント費用，土地収用交渉費，事業実施組織費用，安全費，役務費，および共通仮設費等) を C_T としてその比をとると，

$$\alpha = C_T / TC \dots \dots \dots (9)$$

ここに α を手戻り率と定義する。そしてこの値を建設における規模の経済性を示す指標とする。

b) 利用における規模の経済

港湾において2バースを一体的に利用すれば，同じ需要に対して1バースずつ別々に利用する場合に比べて混雑が緩和され，待ち時間が減少する。Fig. 4 は港湾における単位需要当たりの，建設費用と利用費用の和(以下総費用という)を示したものである。図中の記号の意味は次のとおりである。

- F_1 : 船舶の1日費用(円/日)
- H_1 : 港湾の1日費用(円/日)
- ϵ_D : 船舶1隻当たりの積卸し貨物量(トン/隻)
- μ_2 : バース1日当たりの荷役能力(トン/日)
- K : バース数

総費用のうち利用(混雑)による費用は待ち行列理論を用いてその値を求めている。待ち行列理論は利用における規模の経済を示すのに最適である。

需要が増加するに従って多くのバースが必要となり建設費用は増加する。しかしそれ以上に混雑による費用が減少してくる。ただし施設の不可分性により，短期費用曲線の包絡線としての長期費用曲線は単調には減少しない。

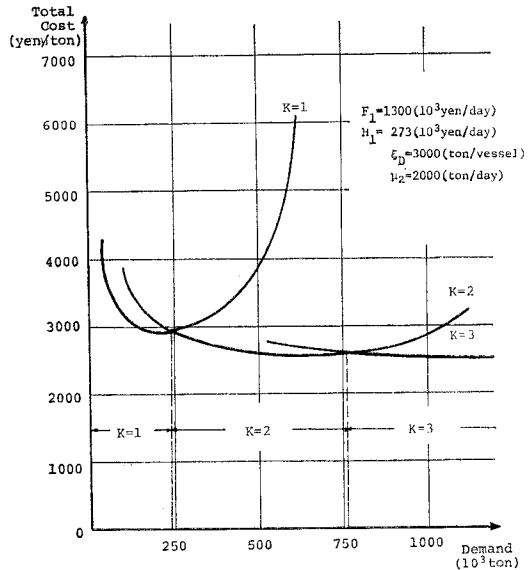


Fig. 4 Total cost per unit cargo expended in port.

c) 規模の経済と需要予測の不確実性

Fig. 4 において，施設の規模の経済により単位需要当たりの総費用は，需要が増大するに従って多少の変動はあるものの全体としてい減傾向にあることを示した。ここで年次の経過に伴い需要が単調に増加するモデル式(6)を使用すれば，長期を見通すほど総費用は小さくなる。

一方，不確実性の存在により将来になるほどに予測値と実現値の乖離は大きくなる⁹⁾。Fig. 5 は不確実性が存在した場合，総費用の期待値が増加することを示している。斜線部分が費用の増加分であり，これをリスクとして Fig. 6 に示す。2つのグラフより

- i) リスクは需要が増加するほど，すなわち見通す期間が長くなるほど大きくなる傾向がある (Fig. 5, Fig. 6)。
- ii) 不確実性の存在により，ある需要における最適なバース数は増加する傾向にある (Fig. 5)。

ことがわかる。

このように不確実性の存在により余分な費用が発生し，規模の経済による費用が減少とあわせて両者のトレードオフ関係により計画が決定される，として定量的な分析を行う必要が生じてくる。

以上，総費用曲線を用いて規模の経済と不確実性の発生に伴う不経済を中心に述べてきたが，長期費用曲線が減少し続けるという保証はない。しかし現実的な施設規模の範囲，港湾の雑貨定期船ふ頭計画を例にとれば1~5バースの範囲では不連続ながらも費用が減少の傾向をみることが出来る。

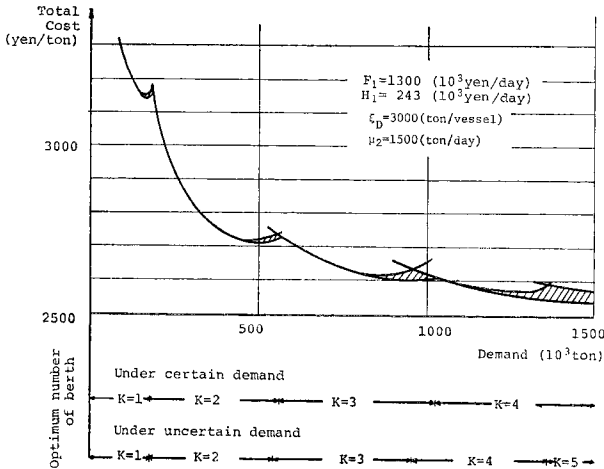


Fig. 5 Increase of total cost under uncertain demand.

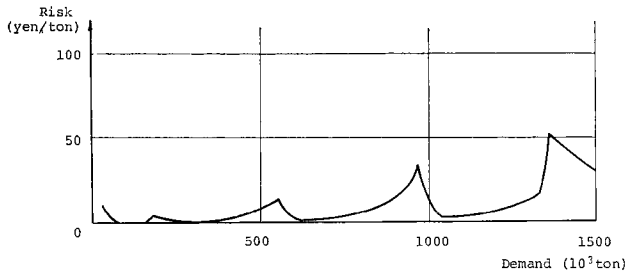


Fig. 6 Risk under uncertain demand.

(5) 耐用年数¹⁰⁾

耐用年数には物理的、経済的、および社会的耐用年数が考えられる。このうち経済的および社会的耐用年数は相対的なものであるためにその大きさはあいまいである²⁾。一方、土木施設には標準となる物理的耐用年数があり、その間は大きな破壊が生じない限り適切な維持管理によって十分使用可能である。以上の理由で耐用年数は物理的耐用年数を用い、本研究ではその値は一定 (l) とする。

4. 計画目標期決定モデル

(1) 前提条件

計画目標期と最適投資時系列を決定するモデルを提案するに際し、3. で述べた前提のほかに必要な前提をおく。

a) 評価基準は単位需要当たりの毎年等価純便益最大とする (式 (11))。

純便益は式 (5) で表わされ、これを各年次ごとの需要 D_t で割ることにより、各年次の単位需要当たりの純

便益が求められる。そして式 (7) の確率密度関数との期待値演算により各年次の期待値を求め、上記の基準により計算を行う。

費用便益分析における評価基準としてよく用いられる方法に、現在価値あるいは毎年等価で表わされる純便益を最大にするものがある。このような方法は、ある決まった計画目標期のもとで最適投資時系列を求めるのに有用である。

しかし、このような評価基準のもとでは、計画目標期を長くするほど純便益が大きくなり解が求まらないことが考えられる。したがって計画目標期そのものを求めようとする基準としては適当でない。そこで本研究においては上記の評価基準を採用する。

b) 計画が対象とする需要は以前の施設で処理できない増加分であり、計画目標期以後、耐用年数に至るまでの期間は計画目標期における需要量に対してサービスを供与する。Fig. 1 において斜線部で示されている。このことは計画が繰り返して連続的に行われることを前提としている。したがって需要予測モデル式 (6) は次式で表わせる。

$$\bar{D}_t = D_0 \cdot \{(1+r)^t - 1\} \dots \dots \dots (10)$$

($1 \leq t \leq l$ l : 耐用年数)

c) t 年次における需要 D_t は、 t 年次以前に提供される施設と t 年次に建設される施設を一体的に利用することができる。

d) 耐用年数 l の間には見かけの建設費用 I が毎年等価にかかるものとする。

実際の建設は計画目標期までになされるものであるが、施設は耐用年数の間利用されるからこの仮定は妥当である。見かけの毎年等価費用は、実際の建設費用 I_t の現在価格の総計を毎年等価にしたものである (式 (12))。

(2) 計画目標期決定モデル

(1) の前提条件により、計画年次 n において、単位需要当たりの毎年等価純便益を最大にする投資パターン、 (I_1, I_2, \dots, I_n) および最大値 R_n を求める式は次のように表わせる¹¹⁾。

$$R_n = \max_{I_1, I_2, \dots, I_n} \left[\left\{ \sum_{t=1}^n P(D_t) \frac{B(K^t, D_t) - I}{D_t} \cdot \left(\frac{1}{1+p} \right)^t dD_t + \sum_{t=n+1}^{\infty} P(D_n) \cdot \frac{B(K^n, D_n) - I}{D_n} \left(\frac{1}{1+p} \right)^t dD_n \right\} \cdot \text{crf} \right] \dots \dots \dots (11)$$

$$I = \left\{ \sum_{t=1}^n I_t \left(\frac{1}{1+p} \right)^t \right\} \cdot \text{crf} \dots \dots \dots (12)$$

ここに、 crf : 資本回収係数 $\left(= \frac{p(1+p)^t}{(1+p)^t - 1} \right)$

$B(K^t, D_t)$: t 年次における施設規模 K^t , 需要 D_t の便益

I_t : t 年次における建設費用

$P(D_t)$: t 年次における D_t の確率密度関数
式 (7)

p : 社会的割引率

l : 耐用年数

n : 年次

計画目標期は次式を満たす n^* である。

$$R_{n^*} = \max_n [R_n] \dots\dots\dots(13)$$

5. 港湾計画への適用

これまで述べてきた方法論を港湾の外貨定期船雑貨ふ頭計画に適用する。

(1) 港湾における費用¹¹⁾

港湾における単位需要当たりの費用は Table 1 に示されている。そして港湾諸掛り費用 C_1 , 本船荷役費用 C_2 , 貨物金利 C_3 , 在港時船舶費用 C_4 , 港湾施設費用 C_5 から貨物 1 トン当たりの総費用 C_n^* を定義する。

$$C_n^* = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5 \dots\dots\dots(14)$$

その例を Fig. 4 に示す。総費用のうちで港湾施設費用は 5. (2) で建設費用に置き換えるので、 C_n^* から C_5 を除いた利用者の費用が式 (3) に相当する平均利用費用である。すなわち、

$$\begin{aligned} f_S(K, D_t) &= \bar{f} + f_K(D_t) \\ &= C_1 + C_2 + C_3 + C_4 \\ &\dots\dots\dots(15) \end{aligned}$$

このうち C_1, C_2, C_3 は需要量に関係しない固定費用であり \bar{f} に含まれる。また C_4 に関しては Table 1 より

$$C_4 = f_K(D_t) = \frac{F_1 \left(\frac{1}{\mu_F} + t_{wF} \right)}{\xi_D} \dots\dots\dots(16)$$

式 (16) において t_{wF} は船舶の待ち時間であり、ここに待ち行列理論を適用する。

最も簡単でしかも最も一般的なモデルである M/M/S/∞ 型の待ち行列理論を用いる。このモデルの前提は船舶の到着時間間隔とサービス時間が指数分布に従うことである。待

ち時間 t_{wF} は次式で求められる。

$$t_{wF} = \frac{\mu \cdot \rho^K \cdot P_0}{(K-1)! \cdot (K\mu - \lambda)^2} \dots\dots\dots(17)$$

$$P_0 = \left[\sum_{n=0}^{K-1} \frac{\rho^n}{n!} + \frac{\rho^K}{(K-1)! \cdot (K-\rho)} \right]^{-1} \dots\dots\dots(18)$$

ここに、 λ : 到着率 (= $D_t / (\xi_D \cdot 365)$)

μ : サービス率 (= μ_2 / ξ_D)

ρ : 利用率 (= $\lambda / (K \cdot \mu)$)

K : バース数

港湾における船舶の到着、サービス時間がアーラン分布に従うこともあるが、その場合は式 (17), (18) をそれに相当するものを用いればよく、本研究の一般性を失うものではない。

(2) 評価関数

式 (11) より t 年次において不確実性を考えない場合、単位需要当たりの純便益 $NB_u(K^t, D_t)$ は

$$\begin{aligned} NB_u(K^t, D_t) &= \frac{B(K^t, D_t) - I}{D_t} \\ &= \frac{D_t [\bar{U} - \{\bar{f} + f_K(D_t)\}] - I}{D_t} \\ &= \bar{U} - \{\bar{f} + f_K(D_t)\} - \frac{I}{D_t} \\ &\dots\dots\dots(19) \end{aligned}$$

である。式 (15), (16) より

$$NB_u(K^t, D_t) = \bar{U} - \bar{C} - \frac{F_1 \left(\frac{1}{\mu_1} + t_{wF} \right)}{\xi_D} - \frac{I}{D_t} \dots\dots\dots(20)$$

$$\bar{C} = C_1 + C_2 + C_3 \dots\dots\dots(21)$$

Table 1 Items of cost per unit cargo expended in port.

cost categories	C_n	cost calculation model	notation in formulas	
port charge	C_1	$C_1 = \frac{H_1}{\xi_D}$	H_1	Port charge per vessel
			ξ_D	Average cargo of loading and discharging per vessel
cost of stevedoring	C_2	$C_2 = \frac{A_1}{\lambda_2} + \frac{A_2}{\mu_2}$	A_1	Daily cost of warf crane
			λ_2	Average cargo per day
			A_2	Cargo expence per gang
cost of interest of cargo	C_3	$C_3 = \frac{R \cdot r}{365} \cdot T$	μ_2	Berth capacity
			R	Average price of cargo per F.T.
			r	Rate of interest
cost of ship time in port	C_4	$C_4 = \frac{F_1 \left(\frac{1}{\mu_F} + t_{wF} \right)}{\xi_D}$	T	Duration of cargo transportation
			F_1	Daily cost of ship
			$\frac{1}{\mu_F}$	Average time at berth
cost of port facility	C_5	$C_5 = \frac{C_{B1} \cdot K \cdot 365}{D}$	t_{wF}	Average time of ship waiting for berth
			C_{B1}	Daily cost of berth
			K	Number of berth
			D	Total amount of cargo per year

式 (20) において \bar{U} , \bar{C} は需要量に関係なく一定であるので単位需要当たりの純便益最大は、単位需要当たりの総費用最小と同義である。そして費用に関しては需要量と関係のある部分だけの最小化を図ればよいことになる。

いま 1 パース当たり 1 日当たりの施設費用を C_{B1} , 船舶 1 日当たりの費用を F_1 としてコストインデックス r を次式で定義する¹⁾。

$$r = \frac{F_1}{F_1 + C_{B1}} \dots \dots \dots (22)$$

$$C_{B1} = \frac{C \cdot \text{crf}}{365} \dots \dots \dots (23)$$

ここに C は 1 パース当たりの建設費用である。式 (22), (23) より

$$C = \frac{365}{\text{crf}} \cdot F_1 \cdot \frac{1-r}{r} \dots \dots \dots (24)$$

一方式 (12) より

$$I = \left\{ \sum_{t=1}^n I_t \left(\frac{1}{1+r} \right)^t \right\} \cdot \text{crf} = C \cdot q(\alpha, p, n) \cdot \text{crf} \dots \dots \dots (25)$$

式 (24) を代入して

$$I = 365 \cdot F_1 \cdot \frac{1-r}{r} \cdot q(\alpha, p, n) \dots \dots \dots (26)$$

ここに $q(\alpha, p, n)$ は 追いかけ型、一括建設型、段階建設型という投資方法を表わす関数である¹⁾。式 (26) を式 (20) における右辺の需要に影響される項に代入して次のように C_b を定義する。

$$C_b = \frac{F_1 \left(\frac{1}{\mu F} + t_w F \right)}{\xi_0} + \frac{365 \cdot F_1}{D_t} \cdot \frac{1-r}{r} \cdot q(\alpha, p, n) \dots \dots \dots (27)$$

式 (27) は次のように無次元化される。

$$w(K^t, D_t) = \frac{\frac{1}{\mu F} + t_w F}{\xi_0} + \frac{365}{D_t} \cdot \frac{1-r}{r} \cdot q(\alpha, p, n) \dots \dots \dots (28)$$

そして実際の数値計算においては、式 (11), (13) に立ち戻り、式 (11) のうち単位需要当たりの純便益 $\left(= \frac{B(K^t, D_t) - I}{D_t} \right)$ を式 (28) で置き換えて、計算を行っている。コストインデックス r を使用して費用の無次元化を図ることにより、どのような貨幣の単位においても利用できる汎用性をもつ。

(3) 数値計算の結果と考察

Fig. 7~Fig. 11 に各種パラメーターによる感度分析を行った結果を示す。以下の図における記号は次のように定義されている。

- α : 手戻り率
- p : 社会的割引率
- D_0 : 初期需要 (10³ トン)
- r : 需要の成長率
- ρ : 需要予測の不確実性を表わす変動係数
- r : コストインデックス
- N : 計画目標期
- K : 建設するパースの総計

図の上段には各年次に投資するパースの数を示す投資方法、中段には計画目標期、下段にはパースの総計が示されている。そして注目するパラメーターの値によりそれぞれ実線、一点鎖線、破線で結ばれている。ただしパースの総計が等しい場合は実線で代表させている。また投資方法については $r=0.98$ 以外は線を略している。すなわちある r に対して左側は実線、右側は一点鎖線の場合に対応している。

図の読み方は、たとえば Fig. 7 において $r=0.82$ の場合、 $\alpha=0.0$ のとき計画目標期は 7 年であり、その投資方法は段階建設型であり、1 年目に 2 パース、3 年目に 1 パース、6 年目に 1 パース建設することである。そしてパースの総計は 4 となる。また $\alpha=0.2$ においては、計画目標期は 7 年、投資方法は同じく段階建設型であり 1 年目に 3 パース、6 年目に 1 パース、計 4 パース必要である。

以下、この結果から得られた結論を列挙する。

a) コストインデックス r

まず、この事例研究のすべての結果からいえることはパースの総計が同一の場合、 r が小さくなると計画目標期は長くなる。これは r が小さくなると相対的にパースの費用が大きくなり、多くの需要に分担させようとするからである。また r が小さくなるほど 2 年目以後の追加建設時期を後に延ばそうとする傾向がある。このことは建設費用の節約を図ろうとするものである。

一方、 r が小さくなると建設費用のウエイトは大きくなるのでパース数を減らすようになり、それとともに計画目標期は不連続に短くなる。

b) 手戻り率 α

手戻り率が大きくなると、施設の固定費用が大きくなるため建設費用に対するウエイトが増加する。そのため計画目標期を短くとり、パース数を減らして一括建設した方が有利となることが示されている (Fig. 7)。

c) 社会的割引率 p

社会的割引率が大きい場合はパースを減らし、計画目標期を短くとるようになる (Fig. 8)。

d) 需要の成長率 r

r を大きくした場合、必要なパース数は増加するにもかかわらず計画目標期は短くなる。また追加建設の時期

は早くなっている (Fig. 9).

e) 需要予測の不確実性 ρ

ρ の値が大きくなるほど、すなわち不確実性が大きくなるほど計画目標期は短くなる。これはパースの総数が同じであっても異なっても同じことである。また ρ の値が大きくなると追加建設時期が早くなる。これは予測がはずれた場合の混雑を恐れている結果である (Fig. 10, Fig. 11).

以上のように計画目標期はある評価基準のもとで、各種のパラメーターの値により複雑に変化する。規模の経済を求めため追いかけて投資に終始することは好ましくないが、予測の不確実性と施設の建設費の増加はあまり長期の計画目標期設定を有利としない。本事例研究では5~7年の計画目標期のもとで、段階型建設方式をとることの有利性を示している。

6. 結 語

純便益の最大、費用の最小というように計画目的を同様に設けても、施設の種類、規模および配置を決める計画行動は、計画目標期の設定によって異なる。これは需要の予測が時間とともに変動するために、計画目標期の設定に伴って、規模の経済や需要予測の不確実性が異なるからである。本研究では以上のほかに、計画行動に変化を与える要因として初期需要、需要の成長率、手戻り費用、社会的割引率なども考慮して、費用便益分析に基づく最適行動、すなわち計画目標期、建設方式、最適投資時系列を同時に決定する理論と手法を提案した。

土木施設計画の実際分野では、先験的に計画目標年次を決め、その時点での需要推計から計画目標を設け、過去の実績などから原単位を求めてそれを用いて規模を決定する。あるいはこれを制約条件として静的に純便益最大、費用最小となる規模や配置を求めている。これらの手法では、技術革新などによる規模の経済や資本の遊休が十分に考慮されているとはいえない。

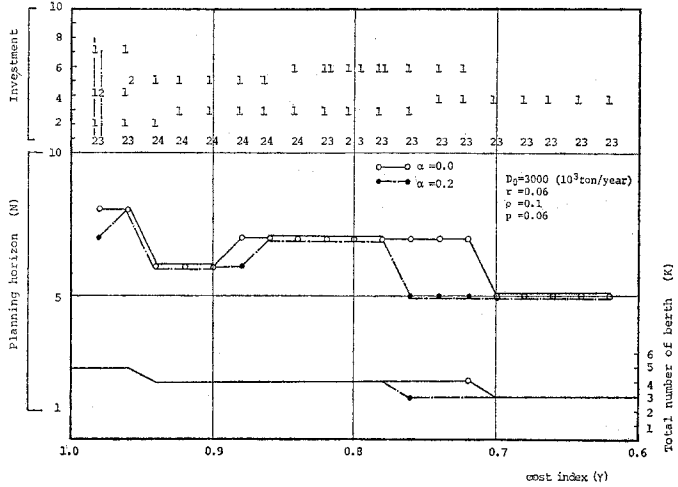


Fig. 7 Rate of set up cost and planning horizon.

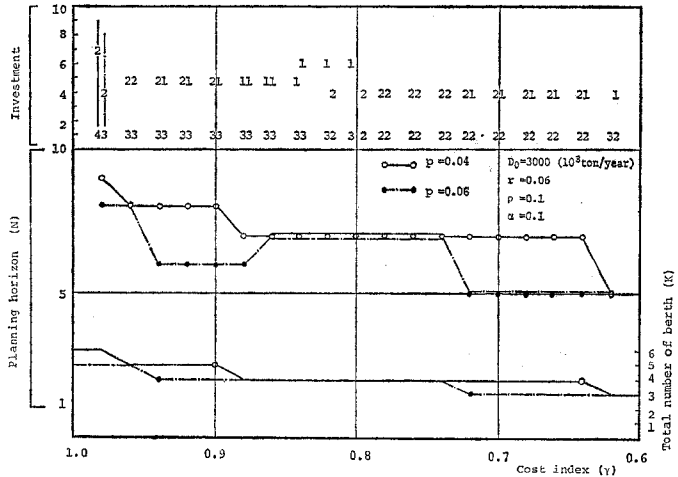


Fig. 8 Social discount rate and planning horizon.

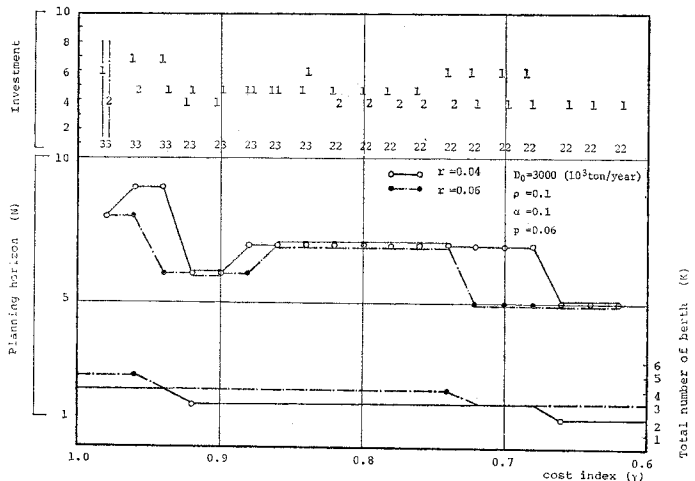


Fig. 9 Growth rate of demand and planning horizon.

土木計画の現在の状況では、国の経済社会計画や国土の開発計画など上位計画の想定年次に、計画目標期は依拠せざるを得ないが、国民経済の損失を大局的に考慮すれば、この種の研究は今後とも必要であると考え、本研究は資料の入手し得る限界から、多くの実証結果を得てはいるが一般的な結論には到達していないが次のような事項を知り得た。

(1) 計画を評価する基準を設定することにより、計画目標期を最適に求めることができ、同時に建設方式、各年次での投資方法を計画することができる。

(2) 規模の経済が期待できる場合、計画目標期は長くとるべきであり、経済・社会不安すなわち需要予測の不確実性が高まれば短くとるようにモデルは示唆を与える。

(3) 本事例研究では、5~7年の計画目標期の設定は妥当と分析されているが、これは対象プロジェクトによって変わることはいうまでもない。

このように、実際の計画行動を決定する際には他の要因すなわち、需要の成長率、手戻り費用、社会的割引率、および期待される規模の経済、需要予測の不確実性を正しく判断して、感度分析を行いながら、妥当な計画目標期を個別に設定する必要はあるが、その分析の有用であることを本研究は示している。

本研究は、文部省科学研究費の交付を受けて行われたものである。

参考文献

- 1) 長尾義三・森杉寿芳・吉田哲生：非弾性需要のもとにおける段階建設について，土木学会論文報告集，第250号，pp. 73~83，1976年6月。
- 2) 長尾義三：土木計画序論，共立出版社，pp. 108~114，1972年。
- 3) Slavik, M.M. and P.R. Stopher：The Optimum Planning Interval, Transportation Planning and Technology, Vol. 5, pp. 227~255, 1979.
- 4) 長尾義三・浅岡 颯・竹内廣行：港湾計画における計画目標期の考察，土木学会年次学術講演概要集，pp. 319~320，1978年。

- 5) 1) に同じ。
- 6) 土木学会編：交通需要予測ハンドブック，技報堂出版社，pp. 141~224，1981年。
- 7) 長尾義三：土木事業における不確実問題，土木学会誌，Vol. 65, pp. 2~6，1980年。
- 8) 7) に同じ。
- 9) 御巫清泰・森杉寿芳：社会資本と公共投資，新体系土木工学，技報堂，p. 154，1981年。
- 10) 2) に同じ。
- 11) Nagao, Y. and M. Kanai：A Study on the Method of Port Improvement by Physical Distribution Cost Analysis, Proceedings in PIANC, PARIS, 1969.

(1982.6.9・受付)

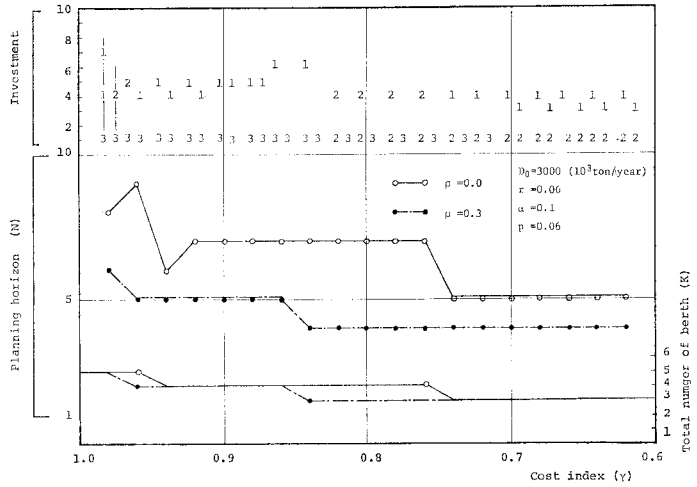


Fig. 10 Uncertainty of demand forecast and planning horizon.

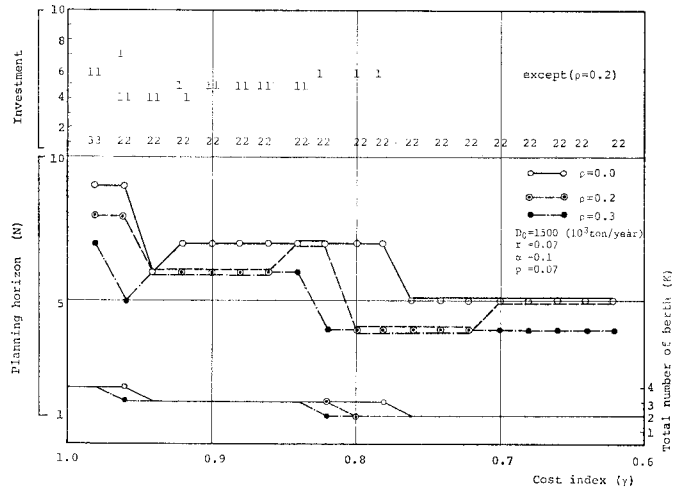


Fig. 11 Uncertainty of demand forecast and planning horizon (at $D_0=1500.0 \cdot 10^3t/year$).