

# 本四架橋ルートと旅客需要予測モデル

内堀 光正

## 1. はじめに

初めて本州と四国を結ぶ「夢のかけ橋」の構想が世上に出たのは、明治22年、讃岐鉄道の開通式での演説であるといわれる。以来90余年、幾多の曲折を経たが、今、かけ橋の実現にむかって工事は着々と進行している。まさに世紀のプロジェクトとなったわけである。

しかし、この計画が具体化し始めたのは、昭和30年代の後半になってからで、それまで別々に進行していた鉄道と道路の計画を集約し併用橋構想が動き始めてからである。しかも、このプロジェクトは、政治的圧力はもちろん、技術的にも未知なるものへの挑戦といった性格をもっており、建設の可能性、ルートの選定をはじめ、ルート上の設備（たとえば高速道路か一般道路か、新幹線か在来型鉄道かなど載荷方式）の問題、通行料の可否、さらには収支計画と着工時期の問題、建設組織と財源問題等々、当初から問題が累積していた。

このうち、ルートは、昭和40年にはいり、ようやく技術的に建設可能かどうかによって、候補5ルートの中からA(神戸～鳴門)、D(児島～坂出)、E(尾道～今治)の3ルートが決定された。政治的に、それ以上は絞りきれなかったようである。そうして、昭和45年、本州四国架橋公団発足後は、

ついでルート上の設備レベルの決定、通行料金の見当づけなど、第2、第3の段階の検討が必要となり、公団側はもちろんであるが、鉄道側としても独自の立場でいろいろな検討を行なった。

ここで紹介するのは、その当時の鉄道側の検討結果の一部である。予測そのものは、高度成長時代のものであり、いまでは、数量的には、すでに意味を失っているとは思いますが、きわめて現実的かつ実務的なORアプローチの一例として参考にしていただければ幸いである。

## 2. この予測の性格

この第2、第3段階の問題を、もう一度、鉄道側からOR的に再構成してみると、新幹線、在来特急・急行、在来ローカルの3種の列車をAとDのどのルートにも通すのか、あるいは、どれかルートを特定するのか、するとすればどのルートが適当なのか、その規模はどのくらいのものでなくてはならないか、また新幹線と在来線とでは提供するサービス内容や対応する需要の質が異なるが、これが最良であることを何で判断すればよいのかというような問題となる。ちょっと考えただけでも、この判断は、そう簡単なものではないことがわかる。需要量の大小だけではなく、新幹線と在来線の果すべき機能、投資規模、設備利用効率、橋上輸送力やスピード等も関連し、さらには投資規模の大小、回収すべきコストの大小、すなわち、通行料金の高低も関連してくるだろう。そ

表 1 四国对本州の主要な交通ルートと輸送機関

交通ルート	鉄 道			バ ス		乗 用 車		船フ エリ ー 航 空 機
	新幹線	在来特急	在来ローカル	高速道	一般道	高速道	一般道	
A (神戸 鳴門)	◎	◎	◎	○	○	○	○	○
宇 高								○
D (児島 坂出)	◎	◎	◎	○		○		○
丸 亀								○
新居浜								○
今 治								○
E (松山)					○		○	○
八幡浜								○
宿 毛								○
徳 島								○
高 知								○

注: 架橋後を想定している

表 2 鉄道ルートの組合せ

ケース	Aルート		Dルート	
	新幹線	在来線	新幹線	在来線
ケース 1		◎	◎	
ケース 2	◎		◎	
ケース 3	◎	◎	◎	
ケース 4		◎		◎
ケース 5	◎			◎
ケース 6	◎	◎		◎
ケース 7		◎	◎	◎
ケース 8	◎		◎	◎
ケース 9	◎	◎	◎	◎

のうえ通行料金の高低は需要量にも逆に強い影響をおよぼす。

つまり、需要がなければ判断できないが、それとて需要だけでは判断できない要素があまりにも多い。

したがって、この場合、まず、四国对本州間に表1のような主要11ルートおよび9輸送機関のマトリックスを決め、このマトリックス上のA、Dルートにおいて表2のような新幹線、在来線の9通りの組合せを想定、この組合せごとに輸送量が、どう変化するかを予測し需要面から最良と思われる組合せを選び出す資料とする。ただし、このときには、通行料金ゼロ、運賃や料金は予測作業時点と変わらないものとし、次に候補として選び出したルート・機関の組合せのもとにおいて通行料金についてのシミュレーションを行ない輸送量の変化をとらえ、需要のバランス等からみて通行料金はどのようなものでなければならないかを

考察するという方法をとった。

また、これに関連して、モデル構築の際、次のような前提をおくこととした。

- ※前提 1. 経済効果を主眼とするものではないので、経済成長は外生条件(新全総)とする。
- ※前提 2. 予測期間は架橋の工期を考慮して15~20年先を予定する。
- ※前提 3. 設備計画のための予測であるから需要の飽和条件(供給容量の制約、人口規模や旅行性向の頭打ち等)は一応除外して考える。
- ※前提 4. 前述のように需要面を主体としてルートの組合せケース別の予測と通行料金のシミュレーションの2ステップで予測を行ない、ルートの組合せを検討する。その際の運賃料金は将来も実質的には予測作業時点と変わらないものとする。
- ※前提 5. 予測の対象は、当然のことながら、四国对本州間海峡部分のルート別輸送機関別輸送

量である。四国には特殊な条件があり、地形的に中央を山脈が走り南北に分断されており域内を経済的社会的に掌握するような都市集積がない。そのため、四国内4県の地域連関は弱く、むしろ、阪神、瀬戸内、北九州の3経済圏との交流が強い。いわゆる離島の性格をもつ。したがって、旅客需要予測にも、このことを考慮したモデルが必要となる。また、当時、旅客流動も民間船舶、国鉄は横這い、フェリー、航空機が急増しつつあったが、架橋が離島の性格を解消するものとの期待があるだけに、この多様な海峡ルートおよび輸送機関へのシェア配分をどうするかは大問題であった。

※前提 6. 架橋が旅客需要面に与えるインパクトを何らかの形で定義し計量化する。

この前提6が本四架橋予測の特色でもあり、前述のシェア配分問題とならぶ、もう1つの問題点でもあった。

※前提 7. 予測に当て必要とされる与件、すなわち、所要損失時間等の算出の際には、当時計画されていた全国高速道路ネットワークや全国新幹線ネットワークについての情報は、すべて計画どおりに完成するものとして、とり入れる。

もっとも、この前提は、その後、経済成長の急変などにより大幅に変わってきている。

### 3. 旅客需要予測モデルの組立て

さっそく、モデルを紹介してみよう。それは図1のような過程およびモデルである。

このモデルは、考え方としては基礎的な作業の部分と表2のモードケース別シミュレーション作業の部分に分れ、11個のモデル式から成立している。基礎的な作業では、まず基礎輸送量として全輸送機関計の相互発着人員(OD量)の単純なトレンド予測を(11)式によって行なう。ODは四国4県対本州13ブロックの4×13のペアで、このODペアごとにモデル式を推定し予測する。ODペア

ごとに算出するのは各ブロックのサイズの不揃いによる統計計算上の問題点を避けるためと、もう1つは、次のようなグラヴィティモデルを考えていただくとうかがうが、時系列データを用い  $mn$  間

$$V_{0, mn} = k Y_m^{\alpha m} Y_n^{\alpha n} / d_{mn}^{\beta}$$

(ただし  $d_{mn}$  :  $m, n$  間の経済距離)

の経済距離は将来においても一定であると仮定すれば  $d_{mn}$  は省略できるからである。そうして、この経済距離に当る部分がどう変わるかその影響を別のパートで予測することとし、架橋による複雑な交通条件の変化を需要に反映させようと試みたのが、次のモードケース別シミュレーション作業部門であり、時間短縮による需要の誘発、価格上昇による需要の目減り、ルート別輸送機関別輸送量の配分を行なう。

この役目を負担するのが、効用選択密度モデルであるが、これは、あとで説明したい。そうして、この第2の作業部分は、さらに、前提4によるルートの組合せの検討の部分と利用料の検討部分に分れる。

また個々のモデルは最終的には(1)式、(2)式に集約される一連の関数チェーンを形成している。個々のモデルは、各別に理論的裏づけ、実績との検証、各種の施策やシミュレーションの際の操作可能性等を考慮し、そして、また、実務的に要求されることの、モデルのわかりやすさ、説明のしやすさも一方では考慮したつもりである。

### 4. 効用選択密度モデル

あまり一般的ではない名前をつけたが、それはあるODペアに、いくつかの輸送機関とルートがあるとき、それらへの交通量は、それぞれの機関、ルートのもつ効用の大きさにしたがって発生し配分されるとのプリミティブな仮説を立て、この考え方をモデル化したからである。

たとえば、もし、輸送機関  $i$  が A, B, C, D の4つ、ルート  $j$  が a, b, c, d, e の5つあったとし、効用を  $U$ 、輸送量を  $V$ 、シェアを  $S$  とすれば

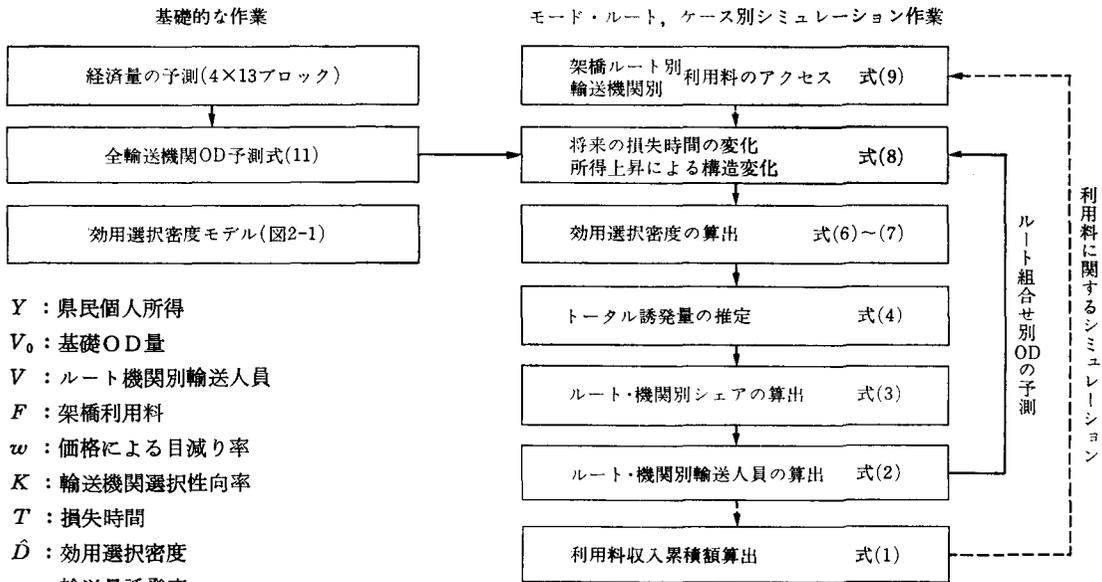


図 1 旅客需要予測モデルの構成

- $Y$  : 県民個人所得
- $V_0$  : 基礎OD量
- $V$  : ルート機関別輸送人員
- $F$  : 架橋利用料
- $w$  : 価格による目減り率
- $K$  : 輸送機関選択性向率
- $T$  : 損失時間
- $\hat{D}$  : 効用選択密度
- $\eta$  : 輸送量誘発率
- $S$  : シェア
- $W$  : 全機関計での目減り率
- $z$  : 利用料金収入累積額

(ただし、サフィックス  $i$  : 輸送機関  $j$  : 交通ルート  $\partial$  : 地域ブロック遠地点  $q$  : 地域ブロック近地点  
 $s$  : 輸送機関平均速度  $\rho$  : 地域特性係数  $\delta$  : 価格弾性値  $p$  : 運賃・料金(運行費)  
 $m, n$  : ODを示すサフィックス,  $Y_{mn}$ を除き省略している.  $F$  : 橋上利用料

$$Z_{ij} = \sum_{t=t_2}^{t_1} \sum_i \sum_j V_{ij} \cdot F_{ij} \quad \dots(1)$$

$${}_t V_{ij} = {}_t S_{ij} \cdot \eta_t \cdot {}_t V_0 \cdot W_t \quad \dots(2)$$

$${}_t S_{ij} = \frac{\rho_{ij} \cdot {}_t D_{ij}}{\sum_i \sum_j \rho_{ij} \cdot {}_t D_{ij}} \quad \dots(3)$$

$$\eta_t = \prod_i \left\{ k \left( \frac{\sum_i \sum_j \rho_{ij} \cdot {}_t D_{ij}}{\sum_i \sum_j \rho_{ij} \cdot {}_{t-1} D_{ij}} \right)^a \right\} \quad (\text{ただし } t=1; \eta_1=1) \quad \dots(4)$$

$$W_t = \left( \frac{\sum_i \sum_j {}_t D_{ij}}{\sum_i \sum_j {}_t \hat{D}_{ij}} \right) \quad \dots(5)$$

$${}_t D_{ij} = {}_t \hat{D}_{ij} \cdot \omega_{ij} \quad \dots(6)$$

$${}_t \hat{D}_{ij} = [{}_t K_i (1 - e^{-f T_{ij}^t})]^r \frac{T_{ij}^t}{q T_{ij}^t} \quad \dots(7)$$

$${}_t K_i = \alpha_i ({}_t Y_m)^{\beta_i} \quad \dots(8)$$

$$\omega_{ij} = 1 - \delta_i \{ (P_{ij} + F_{ij}) / P_{ij} \} \quad \dots(9)$$

$$P_{ij} = f(\bar{L}_{ijt}) \quad \text{ただし } \bar{L}_{ijt} = ({}_r T_{ijt} + q T_{ijt}) \cdot s_i / 2 \quad \dots(10)$$

$${}_t V_{0, mn} = k_{mn} ({}_t Y_m \cdot {}_t Y_n)^{\alpha_{mn}} \quad \dots(11)$$

$$\begin{aligned} V &\propto \left( \sum_i \sum_j U_{ij} \right) \\ S_{A, a} &= U_{A, a} / \sum_i \sum_j U_{ij} \\ V_{A, a} &= V \cdot S_{A, a} \propto U_{A, a} \end{aligned} \quad (12)$$

と、非常にわかりよくなる。そうして、いま、もう一つルート  $h$  に  $A$  機関がふたとすれば、 $V_{A, h} \propto U_{A, h}$  となるが、いままでの  $A$  機関  $a$  ルートは、

$$S'_{A,a} = U_{A,a} / (\sum_i \sum_j U_{ij} + U_{A,h})$$

$$V_{A,a} = (V + V_{A,h}) S'_{A,a}$$

となり、A 機関 a ルートの輸送量  $V_{A,a}$  はシェア  $S'_{A,a}$  の低下ほどには減少しない形となる。

このような現象は実体的にも考えうる現象である。また、特に意識しなくても競争型モデルにもなっていると考えられるが、競争力が高まりつつあるか、弱まりつつあるか、などダイナミックな時系列な変化については、このままでは対応できない。

問題は可測不可能といわれる効用  $U$  を具体的にどう表現するかである。もし、この効用を  $U = \exp(\sum_i a_i x_i)$  のように、いくつかの説明変数  $x_{ij}$  で表現できるとすると、(12)式のモデルは多機関選択型ロジットモデルと同型になり、パラメータの推定も可能となるが、しかし、この場合、クロスセクションデータが中心となるため値が不安定になりやすく、また平均値であるため輸送機関特性の表現が不十分で、他に時系列的な検討も必要となる。

したがって、効用選択密度モデルでは実態調査結果から輸送機関別に損失時間を変数とする累積密度関数を図 2-1 の上段のように作成し、これと下段の図の長期的なシェアの変化傾向を表わす  $K$  関数とを、たとえば、

$$D_R = \int^T D_{Rd}(T_R) = K_2 [1 - e^{-f_R(T_R)}]$$

のように合成し、これで効用  $U$  を表現している。

つまり、時系列的な変化とクロスセクション的な機関別特性の変化を、このモデルでは同時にとらえようとするもので、モデル形としてはロジットモデルの変形といえるが、考え方としては輸送機関特性を重視しており、そのフローはシステムダイナミックスのミニ版といったところであろう。ちなみに、このモデル(通称Uモデル)のフローをSD的に表現すれば図 2-2 のようにわかりやすくなる。(ただし、これにはキャパシティチェックがはいっている)

そうして、この方法では、各パーツのモデルの

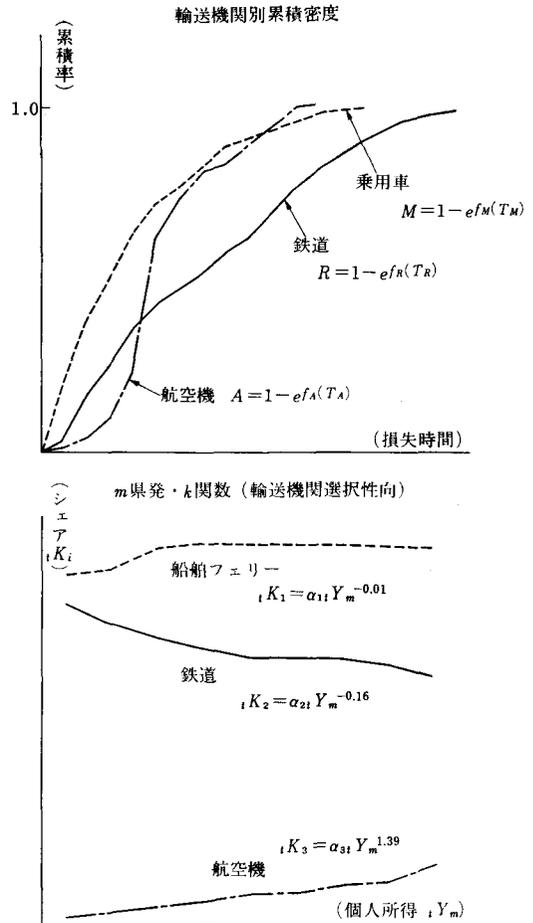


図 2-1 D関数の構成

統計的検討はもちろん、実績とのトレースも容易となり、また、ODブロックのゾーニングの不揃いによるパラメーター推定上の問題点などは相当程度解消できたものと考えている。しかし、一方、関数チェーンであるため推定誤差の検討が困難となり、また、予測値もモデル構成自体の良し悪しにかなり影響されるところがあるように思われる。

## 5. 予測による問題の検討

まず、各輸送機関の運賃料金を固定したときのルート組合せ別予測結果は、どのようになったかを示してみよう。図 3 は、表 2 のうちのケース 8 (A ルートに新幹線、D ルートに新幹線と在来線)

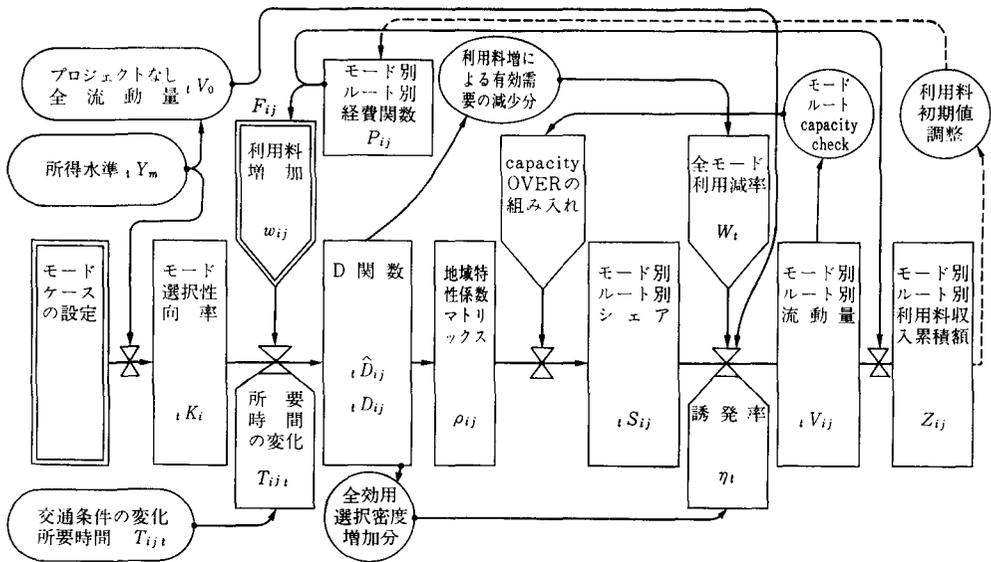


図 2-2 Uモデルのシミュレーションフロー

についての四国4県の輸送量はどうかを見てみたもので、基礎輸送量(実線)と予測輸送量(点線)との差が時間短縮と新ルートによる誘発効果を表わす。図では見にくいだが、この誘発はDルートで約10%、A・E両ルートも合わせて20数%程度となっている。そして図4は、このケース8の輸送量の輸送機関別ルート別の変化を見たものである。輸

送機関別ルート別にみた輸送量は、かなりダイナミックな変化が予測されているが、その動きを見ると、船舶対自動車、鉄道対航空機といった関連が強いことがわかってる。

鉄道ルートの場合別でみた架橋後全輸送機関輸送量は、つまり架橋の効果は、ケース4、1、2、3の順で、あとはケース番号が高くなるほど

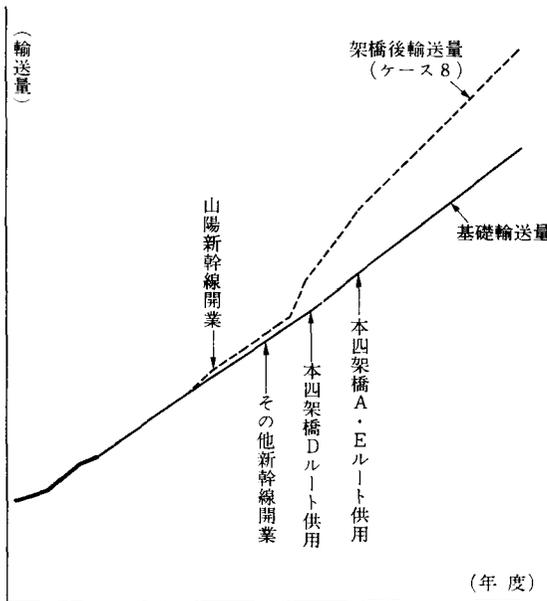


図 3 四国对本州全輸送機関輸送量予測

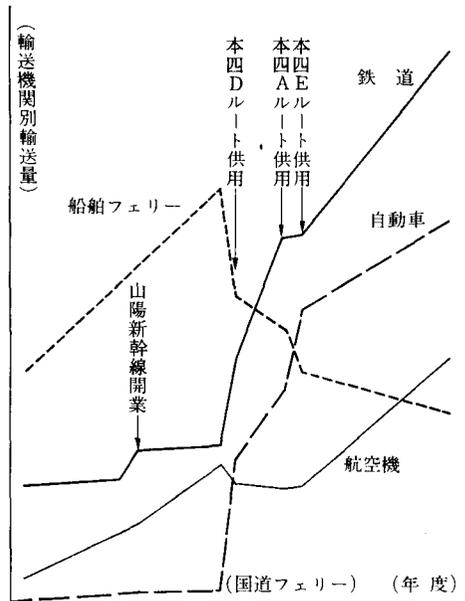


図 4 架橋による輸送機関別輸送量の変化予測 (D、A・Eルート段階的供用; ケース8)

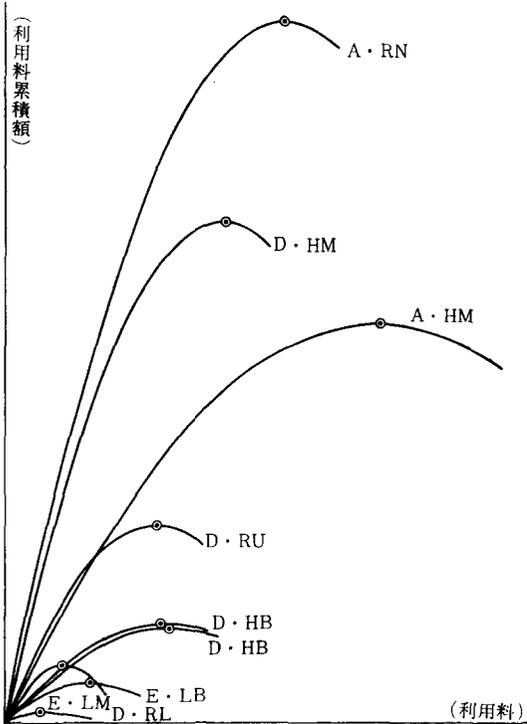


図5 利用料収入の累積額シミュレーション  
(ルート組合せ ケース5)

注：◎印はマックスポイントを示す。

凡例 A · RN  
↓  
ルート 輸送機関

輸送機関 RN：新幹線  
RU：在来特急・急行  
RL：在来線（ローカル）  
HB：高速道バス  
LB：一般道バス  
HM：高速道乗用車  
LM：一般道乗用車

大きくなる。しかし、ケース5からケース9までの差は、たとえば図6のケース8とケース5(S1)の差のように、それほど大きなものではなく、そのなかで、運行形態がシンプルで、投資規模に対する設備利用効率が高くなる、在来ローカルの必要性が最も高い、貨物輸送の比重が高い等の検討を経て当面はケース5の組合せが候補として選ばれた。基礎輸送量と架橋後輸送量との差を、いま、時間短縮効果等による需要面での利用者余剰と定義すると、ケース5の選定は利用者余剰最大

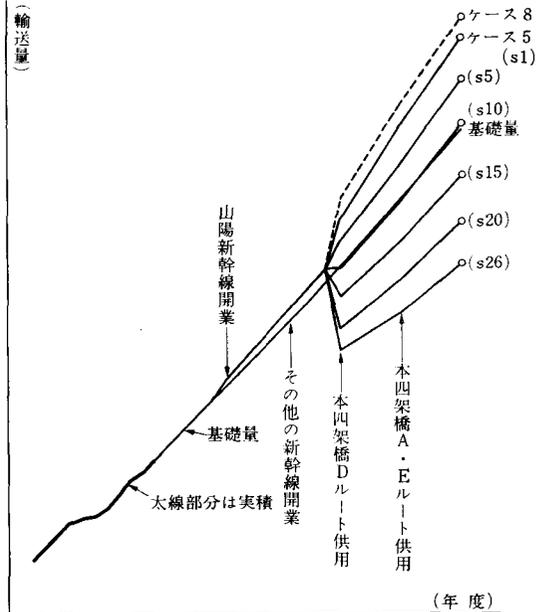


図6 利用料に関するシミュレーション  
(四国对本州全輸送機関輸送量)

シミュレーション結果(ルート組合せ ケース5)

- (S1)：利用料なし
- (S5)：収支計画近似
- (S10)：利用者余剰なし
- (S26)：累積収入額最大点

となるとは限らない。つまり、需要面からは、必ずしも最良の選定であるとはいえないことになる。しかし、将来はケース8の組合せも考慮される。

そうして、今後は、利用料はどうあるべきかの検討であるが、これは、まず、輸送機関間の料金負担力のバランスはどうなのか、ついで、このバランスのうえで、利用者余剰との関係でどの程度の利用料が最適なのかという2つのステップにかけて考察を行なった。

このケース5についての結果が図5、図6である。一般に、利用料を引き上げると利用料×輸送量である収入が増え、その累積額も急激に大きくなるものの、一方、利用料の増加率以上に輸送量が減少するため、累積額は、ある点を超えると今

度は急激に減少する。図5は、利用料を定額でアクセスした場合の輸送機関別ルート別の累積額の変化とそのマックスポイントを示したものである。このマックスポイントは、収入面でみた各ルートにおける各輸送機関需要の負担力の限界ないしは、負担力の大きさとバランスを表わしているものと考えられる。図からみると負担力の最も大きいのはAルート(高速道)の乗用車需要である。

そうして、このバランスに比例して定率で利用料をアクセスし、この場合の全輸送量の変化を示したものが図6である。図6で利用料ゼロが(S1)、利用者余剰は最大となる。利用料が次第に高くなり(S10)になると利用者余剰はほとんどゼロとなる。さらに(S26)になると、累積収入は最大だが利用者余剰は最低となる。しかし、そこまでゆかなくとも(S5)の段階で収支計画には乗るようである。だが、この(S5)だと、船舶、航空機は利用料には関係がないため、輸送機関別ルート別のシェアバランスが利用料なしの(S1)に比べ、かなり変動する。これは、輸送機関間で不公平が生じることを意味するが、この点を考慮すれば(S3)に近い利用料のほうがシェアバランスがよく、輸送機関別の利用料の負担の不公平さがなくなるものと考えられる。ただし、この通行料金については国鉄経営上の問題ともからみ、当時は最終的な結論を得るにいたっていない。

## 6. おわりに

以上が、当時、鉄道側で旅客需要の面からみた検討結果の紹介の概要である。予測結果についても、最初に述べたように、現在は状況が急変しており、架橋工事の進捗と状況の変化に応じて今後とも、公団側において、いろいろな検討が重ねられて変わってきているものと思う。またこの予測モデルについても、その後、四国対本州というような特定地域間だけでなく、完全なODペアでも適用できるよう工夫し、アルゼンチンの首都・ブエノスアイレス都市圏輸送量の予測にも使用する

など、機会を見ては改善を図ってきており、今後も努力してゆくつもりである。しかしながら、モデルを作るにはデータが必要であり、いいデータをいかにして得るかが最近の最大の問題点となっている。

## 参考文献

- [1] 大都市圏における交通機関選択分析調査報告書  
53年3月 運輸経済研究センター
- [2] 交通機関選択要因としての運賃に関する調査報告書  
54年3月 運輸経済研究センター
- [3] 統計学会予稿集(44年9月)鉄道輸送における施策の効果の予測 金沢弘雄・内堀光正
- [4] OR学会予稿集(47年9月)交通需要の配分方法について 内堀光正
- [5] 運輸と経済('76.4)グラヴィティモデルの現実への適用 内堀光正
- [6] 高速道路と自動車('71.12)交通量予測のための効用モデル T.F.ゴロフ, M.J.ベックマン
- [7] トランスポート('76.9)新幹線の需要予測 内堀光正

## 次号予告

トップの視点

物流におけるORの応用

——なぜORは活用されないのか——

阿保栄司

### 特集 物流

物流システム設計の論理的アプローチ

高橋輝男

立体自動倉庫の計画・設計手法

矢野禎一, 他

超高層ビル建設における物流システム

寺林 肇

立体倉庫の現状と最適設計

唐澤 豊

音声入力装置による物流の合理化

鈴木 準

デポの最適配置

荒木 勉

### 講演

議員定数の最適配分法

茨木俊秀

### 連載講座

パーソナル・コンピュータのベーシック 小林竜一