

動的最適化モデルによる道路整備と環境保全への効率的投資配分の検討*

*Efficient Investment Distribution in the Road Projects and environmental Protection with Dynamic Optimum Economic Model**

武藤慎一**・高木朗義***・酒井祐輝****

By Shinichi MUTO**, Akiyoshi TAKAGI*** and Yuki SAKAI****

1. はじめに

これまでのわが国の経済発展に、道路を中心とした交通社会資本の果たしてきた役割は大きい。しかし、ここに来て経済成長が鈍化して整備の効果が逡減化し、また、自動車交通に起因する環境問題も深刻化してきた。今後は、環境にも十分な配慮を行い、道路整備計画を立案することが必要である。

本研究は、動学的視点から、道路と環境負荷との相互関係を考慮に入れた上で、MPEC(均衡制約付き最適化問題)の枠組みの下、道路整備と環境保全への最も効率的な投資配分について検討を行った。具体的には、人々の将来に至る厚生を最大化するような道路の整備水準と環境保全策水準およびそのために実施すべき政策について明らかとする。

2. 動的最適化モデルの概要

(1) モデルの仮定と全体構造

本研究で構築する動的最適化モデルは以下の仮定に基づく。

- 1) 本モデルは、代表的家計、合成財企業、自動車燃料生産企業および政府からなる(図-1)。
- 2) 家計は交通サービスを消費する。ただし、ここでは交通とは自動車交通だけに限定し、その利用には自動車燃料と道路交通消費時間が必要であるとする。道路交通所要時間は、道路社会資本ストックの水準に依存して決定されるものとする。
- 3) 家計による交通サービス消費に伴い、環境負荷が排出されるとし、その環境負荷排出は、家計に直接的な環境被害をもたらすものとする。ここで、環境負荷排出量は、交通サービス消費と燃費の積で表される自動車燃料消費に、環境原単位を乗じることで求める。このうち燃費は、ストックとして扱われる環

境技術に依存して決定されるものとする。なお、環境技術とは、具体的には燃費改善技術を指すと考えればよい。

- 4) 政府は、道路整備と環境保全という二つの役割を果たすものとする。その際、いずれの施策においても、自動車燃料税により財源調達を行うものとする。現在、自動車燃料税は、道路特定財源として主に道路整備に使用されている。これに対し、本研究では、その税収を、道路整備のみならず、自動車交通が排出する環境負荷への対策にも使用することを前提とする。その場合の環境保全と道路整備への効率的な投資配分について、経済成長モデルを利用することにより検討する。なお、環境保全投資の具体的な扱いについては、環境技術を向上させるものとし、それが燃費の改善に繋がり、結果として環境負荷排出量を減少させるものとした。

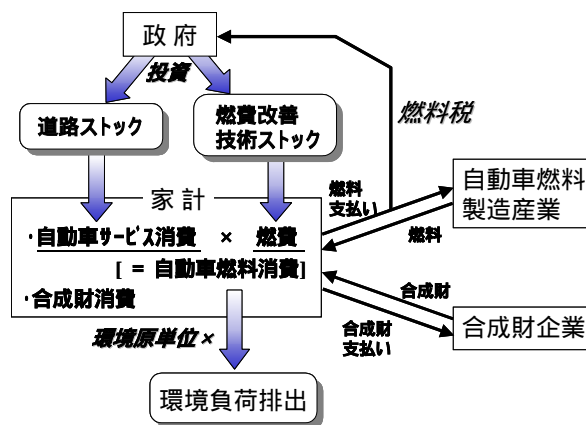


図-1 動的最適化モデルの構造(t 期に着目)

(2) 家計の行動

家計は、合成財消費、余暇消費、交通サービス消費からなる通時的効用を最大化するよう行動する。その基本的な行動モデルは、従来の最適経済成長モデルと同様である。ただし、自動車交通サービス消費に関しては、自動車燃料と所要時間に相当する時間資源が投入されるものと考え、それらの費用を負担するものとして定式化を行う。

*キーワード：道路整備，環境保全，動的最適化モデル

**正会員 博(工) 大阪工業大学工学部都市デザイン工学科
(大阪市旭区大宮 5-16-1, TEL:06-6954-4203, FAX:06-6957-2131,
E-Mail: muto@civil.oit.ac.jp)

***正会員 博(工) 岐阜大学工学部土木工学科

****正会員 修(工) 株式会社 長大

$$V_H = \max_{x_H^M, x_H^T, s_H} \int_0^\infty U_H(x_H^M, x_H^T, s_H^t, E^t) \exp(-\rho t) dt \quad (1a)$$

$$\text{s.t. } \dot{K}^t = w^t L_S^t + r^t K^t - p_F^t x_H^M - \{1 + \tau_F^t\} p_F^t \eta_F(G^t) x_H^T - \delta_K K^t \quad (1b)$$

$$L_S^t + s_H^t + g(R^t) x_H^T = \Omega \quad (1c)$$

ただし、 V_H ：家計の生涯効用(割引現在価値)、 t ：時点を表す添字、 U_H ：家計の瞬時的効用、 x_H^M ：合成財消費量、 x_H^T ：自動車交通サービス消費量、 s_H^t ：余暇消費時間、 E^t ：CO₂排出量(具体的な式は後に示す)、 ρ ：主観的割引率、 K^t ：民間資本ストック量、 L_S^t ：労働供給時間、 $\dot{K}^t$ ：民間資本ストック量の時間変化を表す、 w^t ：賃金率、 r^t ：利子率、 p_F^t ：自動車燃料価格、 τ_F^t ：自動車燃料税率、 $\eta_F(G^t)$ ：自動車交通サービスの自動車燃料換算係数(燃費)、 G^t ：環境技術ストック水準、 $g(R^t)$ ：道路交通所要時間、 δ_K ：民間資本ストックの減耗率、 R^t ：道路社会資本ストック量、 Ω ：総利用可能時間。

式(1b)と(1c)は、労働供給時間 L_S^t を消去することによって一つの制約式に統合することが可能である。

$$\text{s.t. } \dot{K}^t = w^t \Omega + r^t K^t - x_H^M - \left\{ (1 + \tau_F^t) p_F^t \eta_F^t + w^t g^t \right\} x_H^T - w^t s_H^t - \delta_K K^t \quad (2)$$

式(2)の右辺は、家計貯蓄を表している。この家計貯蓄がそのまま投資に回され、民間資本ストック K^t が蓄積される構造となっている。なお、投資にあたり投資財を購入するものとし、投資財は、合成財企業から購入されるものとする。

$$p_M^t I^t = \Psi_H^t \quad (3)$$

ただし、 Ψ_H^t ：家計貯蓄($\Psi_H^t = \dot{K}^t$)、 I^t ：投資財需要。

式(1)では、自動車燃料消費量を自動車交通サービス消費量に燃費 η_F を乗じて導出し、その燃料消費に対し燃料税が賦課されるものとした。この燃料税収をもとに、政府は道路整備および環境保全を行うものとする。そして、その公的投資の結果から決定される道路社会資本ストック水準が交通所要時間を、環境保全技術ストック水準が燃費を決定する構造となっている。

(3) 企業の行動

合成財企業は、一時点の利潤最大化行動として、単純化して定式化する。

$$\Pi_M^t = \max_{l_M, k_M} p_M^t y_M^t - w^t l_M^t - r^t k_M^t \quad (4a)$$

$$\text{s.t. } y_M^t = f(l_M^t, k_M^t) \quad (4b)$$

ただし、 M ：合成財企業を表す添字、 Π_M^t ：利潤、 y_M^t ：生産量、 l_M^t ：労働投入量、 k_M^t ：資本投入量、 p_M^t ：生産財価格、 w^t ：賃金率、 r^t ：利子率。

自動車燃料製造企業も合成財企業と同様に定式化される。

(4) 政府の行動

政府は、家計の自動車燃料消費に課税する。これまでの道路特定財源制度の下では、基本的に燃料税収は道路整備のみに使用されてきた。これをここでは、道路に起因する環境負荷への対策にも投資するものとする。その道路整備と環境保全への配分比率を ε^t とする。

$$\text{道路投資額} : \varepsilon^t T_F^t \quad (5a)$$

$$\text{環境保全投資額} : (1 - \varepsilon^t) T_F^t \quad (5b)$$

ただし、 T_F^t ：自動車燃料税収($= \tau_F^t p_F^t \eta_F^t x_H^T$)。

なお、道路整備および環境保全への投資においても、投資財を購入するものとし、その投資財は合成財企業から購入するものとする。

$$p_M^t I_R^t = \varepsilon^t T_F^t, \quad p_M^t I_G^t = (1 - \varepsilon^t) T_F^t \quad (6)$$

ただし、 I_R^t ：道路整備における投資財需要、 I_G^t ：環境保全における投資財需要。

政府投資のうち、道路資本投資は、道路資本ストック R^t の蓄積を生む。このとき道路資本ストックの蓄積方程式を以下のように表す。

$$\dot{R}^t = \varepsilon^t T_F^t - \delta_R R^t \quad (7a)$$

ただし、 δ_R ：道路資本ストックの減耗率。

道路資本ストックの蓄積が、従来の道路整備評価における時間短縮効果となる道路所要時間の短縮をもたらす。

$$g^t = g^t(R^t) \quad \text{ただし, } \frac{\partial g^t}{\partial R^t} < 0 \quad (7b)$$

一方、環境投資は環境技術の習熟を促す。環境技術をここではストック変数として扱い、環境投資による技術の蓄積を以下のように表す。

$$\dot{G}^t = (1 - \varepsilon^t) T_F^t - \delta_G G^t \quad (8a)$$

ただし、 δ_G ：環境技術の減耗率。

環境技術の習熟においても技術の減耗を考えた。これは、例えば技術の伝承が十分に行われなかった場合等に相当する。そして、ここでは環境技術の習熟が燃費を改善させるものとする。

$$\eta^t = \eta^t(G^t) \quad \text{ただし, } \frac{\partial \eta^t}{\partial G^t} < 0 \quad (8b)$$

式(8b)の燃費と自動車交通サービス消費および環境原単位より、環境負荷排出量が求められる。

$$E^t = \bar{e} \cdot \eta^t(G^t) x_H^T \quad (9)$$

ただし、 E^t ：環境負荷排出量、 $\bar{e}$ ：環境排出原単位。

(5) 市場均衡条件

合成財，自動車燃料，労働，資本の各市場からなる本モデルの市場均衡条件式は以下の通りである．

$$y_M^t = x_H^{Mt} + I^t + I_R^t + I_G^t \quad (10a)$$

$$y_F^t = \eta_F x_H^{Tt} \quad (10a)$$

$$L_S^t = l_M^t + l_F^t \quad (10a)$$

$$K^t = k_M^t + k_F^t \quad (10a)$$

3．社会的最適化問題とその条件

以上の定式化の下，社会全体として解くべき問題は，式(1a)で表される家計の通時的効用を，各ストックの蓄積方程式，企業行動の最適化条件，政府投資のバランス式，市場均衡条件の制約条件下で最大化する問題となる．このとき，操作変数は，各財の消費量に加え，自動車燃料税率，道路投資と環境投資への配分比率の5変数となる．

$$V_H = \max_{x_H^M, x_H^T, s_H, \tau_F, \epsilon} \int_0^\infty U_H(x_H^{Mt}, x_H^{Tt}, s_H^t, E^t) \exp(-\rho t) dt \quad (11a)$$

$$\text{s.t. } \dot{K}^t = w^t \Omega + r^t K^t - x_H^{Mt} - \left\{ (1 + \tau_F^t) p_F^t \cdot \eta_F^t + w^t g^t \right\} x_H^{Tt} - w^t s_H^t - \delta_K K^t \quad (11b)$$

$$\dot{R}^t = \epsilon^t \cdot \tau_F^t p_F^t \eta_F^t x_H^{Tt} - \delta_R R^t \quad (11c)$$

$$\dot{G}^t = (1 - \epsilon^t) \cdot \tau_F^t p_F^t \eta_F^t x_H^{Tt} - \delta_G G^t \quad (11c)$$

最大値原理を適用して，当該問題を解く．なお，問題を解くに当たり，効用関数，生産関数を線形対数型にて，所要時間，燃費関数をロジスティック型にて特定化した．このとき Current Value Hamiltonian は，以下のように定義される．

$$\begin{aligned} H^t = & \alpha_M \ln x_H^{Mt} + \alpha_T \ln x_H^{Tt} + \alpha_S \ln s_H^t + \alpha_E \ln E^t \\ & + \mu_K^t \left[w^t \Omega + r^t K^t - p_M^t x_H^{Mt} - \left\{ (1 + \tau_F^t) p_F^t \cdot \eta_F^t + w^t g^t \right\} x_H^{Tt} \right. \\ & \left. - w^t s_H^t - \delta_K K^t \right] + \mu_R^t \left[\epsilon^t \tau_F^t p_F^t \eta_F^t x_H^{Tt} - \delta_R R^t \right] \end{aligned} \quad (12)$$

ただし， $\mu_K^t, \mu_R^t, \mu_G^t$ ：随伴変数．

Hamiltonian 最大化の一階条件については，紙面の都合上省略するが，最適化条件から得られる知見は以下のようにまとめられる．

民間資本，道路社会資本，環境技術資本の投資価値が等しくなるように投資を配分する．

政府は，家計の交通消費を減少させないように，投資を行うことが効率の観点から言うと最適となる．

このうち，は政府が各資本の投資配分を決める際に，各資本の効率性が等しくなるように投資配分を決定すれば良いことを表す．ここで，式(12)において，資本の

効率性は随伴変数によって表される．一方，はのように各資本の投資配分を決定すれば，最も効率的に資本の蓄積を達成できる上に，結果として家計の交通消費が低下しないことを表す．ここで税を賦課した場合，一般的には課税対象財の消費を減少させると考えられる．しかし，本モデルでは徴収された税収を交通環境の改善のために使用するため，交通消費が減少しなかったものと考えられる．すなわち，自動車燃料税徴収による損失が交通環境改善に伴う交通一般化価格の低減効果を相殺したものと考えられる．

4．数値計算結果

続いて，数値シミュレーションにより，定常状態に着目した民間資本ストックを含む各資本の最適水準を導出する．

(1) パラメータの設定

ここでは，応用一般均衡モデルにて一般的に適用されるキャリブレーション手法によりパラメータを設定した．基準年は，1995 年である．設定したパラメータを表-1 に示す．

表-1 設定したパラメータ

●合成財企業		■家計	
労働	0.7237	合成財	0.4260
資本	0.2763	交通	0.0679
効率パラメータ	1.8029	余暇	0.4230
●燃料企業		○ストック減耗率	
労働	0.7237	民間資本	0.0473
資本	0.2763	道路資本	0.0213
効率パラメータ	1.8029	環境技術	0.01
所要時間関数		燃費関数	
最大平均速度	0.0250	最大改善燃費	0.0333
$\gamma_0 R$	-2.4251	$\gamma_0 G$	-0.3039
$\gamma_1 R$	0.000003	$\gamma_1 G$	0.0001
社会的割引率		CO2排出原単位	
		2.31 [kgCO2/l]	

(2) 定常状態における最適化条件

定常状態とは，すべての変数の時間変化がゼロとなる状態である．前章の Hamiltonian 最大化の条件に対し，時間変化を表す変数をゼロとした条件を再導出した．

$$x_H^{Mt} = \frac{\alpha_M}{\mu_K^t p_M^t} \quad (13a)$$

$$x_H^{Tt} = \frac{\alpha_T - \alpha_E \beta}{\mu_K^t \{ p_F^t \eta_F^t + w^t g^t \}} \quad (13b)$$

$$s_H^t = \frac{\alpha_S}{\mu_K^t w^t} \quad (13c)$$

$$w^t \Omega + r^t K^t = p_M^t x_H^{Mt} + \left\{ p_F^t \cdot \eta_F^t + w^t g^t \right\} x_H^{Tt} + w^t s_H^t + \delta_K K^t + \tau_F^t p_F^t \eta_F^t x_H^{Tt} \quad (13d)$$

$$\delta_R R^t = \epsilon^t \tau_F^t p_F^t \eta_F^t x_H^{Tt} \quad (13e)$$

$$\delta_G G^t = (1 - \epsilon^t) \tau_F^t p_F^t \eta_F^t x_H^{Tt} \quad (13f)$$

$$\{\rho + \delta_K - r^t\} \mu_K^t = 0 \quad (13g)$$

$$\left\{ w^t \frac{\partial g}{\partial R^t} x_H^t + (\rho + \delta_R) \right\} \mu_K^t = 0 \quad (13h)$$

$$\frac{\partial U_H^t}{\partial \eta_F^t} \frac{\partial \eta_F^t}{\partial G^t} - \left\{ p_F^t \frac{\partial \eta_F^t}{\partial G^t} x_H^t + (\rho + \delta_G) \right\} \mu_K^t = 0 \quad (13i)$$

ただし、 t 期は定常状態の期を表す。

以上の最適化条件の未知数は、 $x_H^M, x_H^T, s_H^t, \tau_F^t, e^t, K^t, R^t, G^t, p_M^t, p_F^t, w^t, r^t, \mu_K^t$ の 13 個である。これに対し、ここで示した方程式は 9 本である。しかし、これ以外に市場均衡条件式が 4 本存在するため、条件式も 13 本となり未知数が一意に解ける。

(3) 数値計算結果

前節にて示した最適化条件に基づき、数値計算によって定常状態における最適解の導出を行った。その結果が以下である。

図-2、3 には、道路所要時間関数の実績値(点データ)と推計値(実線)、燃費関数の実績値(点データ)と推計値

表-2 定常状態における数値計算結果

●生産要素価格				●資本ストック			
賃金率	基準年	定常状態	変化率	民間資本[10億円]	基準年	定常状態	変化率
利率	2.751	3.307	1.2022	道路社会資本[km]	583,139	829,088	1.4218
	0.2212	0.1634	0.7388	環境技術資本[10億円]	115,939	136,023	1.1732
					4,828	12,898	2.6714
●生産財価格				●ストック効果			
合成財[円/1単位]	基準年	定常状態	変化率	道路交通所要時間[h/km]	基準年	定常状態	変化率
自動車燃料[円/L]	204	214	1.0493	自動車燃費[L/km]	0.0329	0.0276	0.8382
	79	83	1.0493		0.0636	0.0416	0.6540
●家計消費				●資本ストック減耗額			
合成財[10億]	基準年	定常状態	変化率	民間資本[10億]	定常状態		
自動車交通[10億人キロ]	1,915	2,070	1.0804	道路社会資本[10億円]	205		
余暇[10億時間]	651	671	1.0308	環境技術資本[10億円]	2,467		
貯蓄[10億]	141	160	1.1337		48		
	374	205	0.5495				
●CO2排出量				●政策			
CO2排出量[百万トン]	基準年	定常状態	変化率	燃料税増徴率	定常状態		
	95.62	98.57	1.0308	投資配分比率	0.9577		
●環境に対する意識を表すパラメータ				道路投資	3,005		
α	定常状態			環境技術投資	2,878		
β	0.004				127		
	1.5			●効用水準			
				効用水準	基準年	定常状態	変化率
					5.7247	5.8128	1.0154

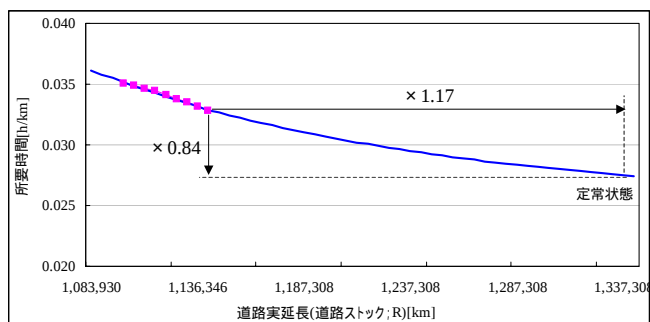


図-2 最適道路資本ストック水準と道路所要時間

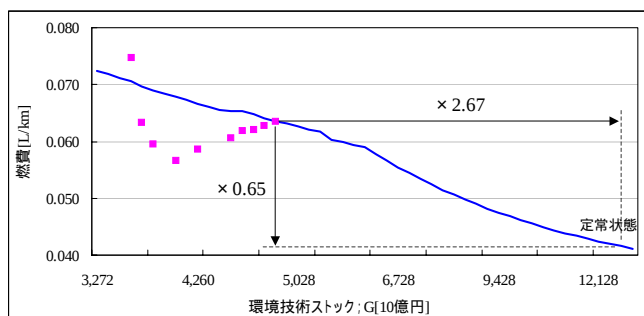


図-3 最適環境技術ストック水準と燃費

(実線)を示した。なお、同図には、定常状態における最適ストック水準についても示した。道路資本ストックは 136,023[千 km]、環境技術ストックは 12,898[10 億円]である。これは、基準年(1995 年)と比較すると、道路資本が 1.17 倍、環境技術が 2.67 倍のストック増となる。これによって、道路所要時間は 0.84 倍、燃費は 0.65 倍に減少するという効果が得られる。

(4) 結果の現実的解釈

前節の数値結果の意味としては、今後の道路整備目標を、1995 年比で 1.17 増に設定すれば良いことを示すものと解釈できる。その一方で、環境技術ストックは 2.67 倍に増加するよう投資をコントロールする必要がある。この環境技術ストックへの投資とは、具体的には低燃費車や低公害車開発、低燃費達成の燃料開発等への研究開発投資を指す。

5. おわりに

本研究では、環境への配慮が必要とされている今後の道路整備において、効率的な整備水準を明らかにするために動的最適化モデルに基づく分析を行った。その数値結果は、前節で示した通りである。ここでは、今後残された課題について簡単に整理する。

一つは、図-2、3 で示した計算におけるデータ整備の問題である。図-2、3 では、データ数が少ない上に、実績値と推計値との乖離も認められる。この点は早急に見直しを行う必要がある。次に、効用関数の形状について検討が必要と言える。特に、環境に関わる要素の導入方法について再検討が必要である。本結果が、各資本の投資価値の均等化が結論となっていることを考えると、家計の効用関数に環境排出による影響がどのように組み込まれているのかが、結果を左右する。パラメータの決定方法も含め検討を行う必要がある。

以上のように、未だ検討課題が残されてはいるが、長期的視点に立って、道路と環境の問題を同時に扱い、その解決策を明らかにできた点が本研究の成果であると考えている。

本研究は、文部科学省科学研究費補助金・若手研究 B[課題番号：14750446]による研究成果の一部である。

参考文献

- 佐藤尚・上田孝行・森杉雅史(1998)：経済成長論から見た交通社会基盤整備政策に関する研究，土木計画学研究・論文集，No.15，pp.111-120。
- 宇沢弘文(1987)：公共経済学を求めて，岩波書店。
- Mohtadi, H. (1996): Environment, growth and optimal policy design, Journal of Public Economics, Vol.63, pp.119-140.
- 井堀利宏(1999)：自動車交通による環境問題の経済分析，日本交通政策研究会，日交研シリーズ A-255。
- 岩井克人(1994)：経済成長論，岩井克人・伊藤元重編，現代の経済理論，第 3 章，pp.265-324，東京出版会。