建設技術進歩に着目した超長期インフラ政策*

Century-Long Infrastructure Policy with Technological Progress in Construction Sector *

上田孝行**・越智成基***・横松宗太****

By Takayuki UEDA**, Seiki OCHI*** and Muneta YOKOMATSU****

1．はじめに

財政制約が一層厳しくなるにつれてインフラの新規投資は削減され，また，既に形成されたインフラストックは劣化が進み，維持・更新の必要性がきわめて大きくなっている．超長期の時間視野において,このような状況での効率的なインフラ政策を実現するには，建設技術の進歩が不可欠である．

本研究は内生的成長理論のマクロ経済動学モデルに建設技術進歩を人的資本形成として取り入れ，それを用いて超長期の時間視野での最適なインフラ政策について分析する．

2．安定成長期以降の建設技術進歩の実証分析

経済成長モデルによる分析を行う前に，建設技術進歩の状況を確認しておく．我が国の主な産業について，生産技術の進歩を計測して比較する．他産業との比較において，建設技術がどの程度進歩してきたかを把握する．

本研究では，以下のようなソロー残差の計算式を用いて技術進歩を計測する．まず，以下のような一次同次の生産関数を仮定する．

$$Y = AK^{1-\alpha}L^{\alpha} \tag{1}$$

ただし，Y :生産額，A ：Hicks 型技術パラメータ，K ：資本投入，L ：労働投入，α ：労働分配率である．(1)から各変数の変化率に関して次式が成り立つ．

$$\frac{\dot{Y}}{Y} = (1-\alpha)\frac{\dot{K}}{K} + \alpha\frac{\dot{L}}{L} + \frac{\dot{A}}{A} \tag{2}$$

A の変化率がソロー残差であり，各年についてそれを技術の進歩率とする．

本研究では，表1に示すデータを用いて計測した．なお，労働分配率に関しては成長率計測前後２年の平均分配率を用いている．また，成長率が負となる場合は除いている．

各産業（全産業，農林水産業，鉱業，製造業，建設業，電気・ガス・水道業，卸売・小売業，金融・保険業，不動産業，運輸・通信業，サービス業）毎に計測したところ，図１に示す結果となった．近年のIT化の影響で技術進歩の著しい金融・保険業や運輸・通信業には劣るものの，建設業は製造業に劣らず技術が進歩していることが明らかになった．しかし，1990年代のバブル後には，建設技術進歩は年平均0.68%程度と鈍化している．

建設技術進歩が今後はさらに重要性を持つという認識に立つと，ここ十数年にわたって進歩が鈍化している状況がさらに将来にも続いていくことは効率的でない．従って，マクロ経済政策のレベルにおいて，建設技術の進歩を促進する必要がある．

表１　データの詳細

	対応データ	データ出典
Y	経済活動別 国内総生産	『国民経済計算』内閣府 経済活動別の国内総生産・要素所得
L	労働力人口 ×労働時間	『労働力調査』総務省 『国民経済計算』内閣府 経済活動別の就業者数・雇用者数，労働時間数
K	産業別民間企業 資本ストック	『国民経済計算』内閣府 民間企業資本ストック
α	雇用者所得 ／国内要素所得	『国民経済計算』内閣府 経済活動別の国内総生産・要素所得

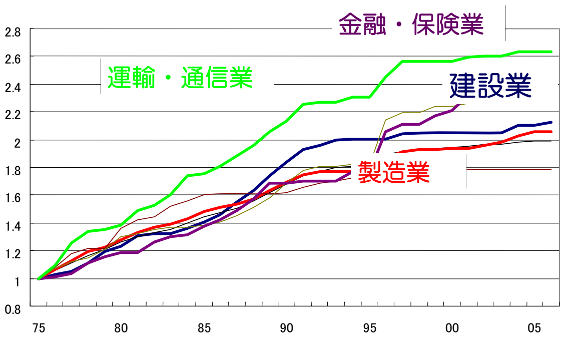

図１　1975年を1とした技術水準の推移

3．技術進歩を考慮した経済成長モデル

経済成長が技術進歩によって実現することに着目した理論は多数あり，それぞれに特徴がある．新古典派経済学における初期の経済成長理論は技術進歩を外生として

*キーワーズ：建設技術進歩，人的資本，維持・更新
**正員，工博，東京大学大学院工学系研究科
社会基盤学専攻（〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1）

いた．しかし，現在は技術進歩自体が経済主体の合理的行動として実現することを明示したいわゆる内生的成長理論が主流となっている．

着目している技術進歩のタイプとその建設産業における対応する技術進歩に応じて既往の経済モデルを挙げると，表２に示すものが代表的である．

表２　技術進歩に着目した代表的な経済成長モデル

Model	Technological Progress in Model	In the Context of Construction Sector
Hicks (1932)	Labor Saving	Construction Machine
Solow(1960)	Vintage $G(t)=\int_{-\infty}^{t} I(\tau)d\tau$	Vintage of structure
Lancaster (1966), Leland (1977)	Function/Quality of Consumption good $c^j(q^j)=\{c_1^j(q^j),c_2^j(q^j),\cdots,c_S^j(q^j)\}$	New Product like Maglev train
Judd(1985)	Duration of patent	Patent in Construction method
Romer (1986)	Knowledge spill over $F(K)=f(k,Sk)$	Construction Manual
Lucas (1988)	Human capital $\dot{H}=G(K,eL)X-\delta_h H$	Knowledge and Skill in Construcntion Engineeerign
Sergenstorm=Anant=Dipoulos (1990)	New goods complementary to old goods $u(x_1,x_2,\cdots)=\prod_{j=1}^{n}(\sum_{i=0}^{\infty}\alpha^i x_{j+ni})$	Recycle of materials or synergy with other sectors
Rebelo (1991)	Externality of production $Y=K^{\alpha}[AL]^{1-\alpha}$ $A=BK^{\phi}$	Engineering guideline or Data base
Romer (1990), Barro and Sala-i-Martin (1995), Jones(1995,1998)	Variety of intermediate inputs $Y=H_Y{}^{\alpha}\int_0^A x(i)^{1-\alpha}di$ $\dot{A}=\delta AH_A$	Variety of Construction Materials
Grossman-Helpman (1991)	Variety of Consumption goods $U=\int_t^{\infty}e^{-\rho(\tau-t)}\log D(\tau)d\tau$ $D=[\int_0^n x(j)^{\alpha}dj]^{\frac{1}{\alpha}}$	Variety of Structures

４．建設技術進歩に着目した経済成長モデル

本研究ではLucas(1988)の経済成長理論を参考に，人に体化した知識や技能である人的資本の蓄積として建設技術を表現する．本研究の経済モデルは次のような仮定に基づいている．

①1 つの閉鎖経済を想定する．

②生産される財は１種類であり，消費財c，資本形成投資I ならびに人的資本投資J に利用できる．

③生産要素は 1 種類の蓄積可能な広義の資本K のみであり，これは財生産に対する労働力が一定で変化しないことを暗黙に仮定している．インフラは生産にのみ寄与するものとして，このK で表されるとする．

④広義の資本K の形成にあたっては，資本投資I のみでなく，人材育成によって形成された人的資本H の影響を受ける．具体的には，人的資本の蓄積が維持・更新技術を進歩させ，資本K の減耗を基準する率ε_K から$\exp(-\alpha H)$ だけ低下させるとする．ただし，H の内,割合α が維持・更新に用いられ，残り$1-\alpha$ が人的資本形成すなわち知識・技能の習得・研鑽に充てるとする．

⑤経済には代表的な 1 つの家計があり，それは各時点$t\in[0,\infty)$の財消費$c(t)$から得られる効用の無限期間にわたる割引現在価値U を最大化するように，各時点における$\{c(t)\}_{t=0}^{\infty}$ を選択する．同時に，長期的な資本形成投資$\{I(t)\}_{t=0}^{\infty}$ ならびに人的資本蓄積投資$\{J(t)\}_{t=0}^{\infty}$ を制御する．

以上の基本的な仮定に基づいてモデルを次のように定式化する．

$$U=\max_{\{c(t),I(t),J(t)\}_{t=0}^{\infty}}\int_0^{\infty}\frac{c(t)^{1-\sigma}}{1-\sigma}\exp(-\rho t)\,dt\,, \quad (3)$$

$$\text{s.t.}\qquad AK(t)=c(t)P+I(t)+J(t)\,, \quad (4)$$

$$\frac{dK(t)}{dt}=I(t)-\varepsilon_K K(t)\exp(-\alpha H(t))\,, \quad (5)$$

$$\frac{dH(t)}{dt}=BJ(t)^k\exp\{(1-\alpha)H(t)\}P-\varepsilon_H H(t)\,, \quad (6)$$

$$\text{and}\quad K(0),H(0):given\,. \quad (7)$$

ただし，A ：財生産技術のパラメータ，P ：人口規模, B ：技術教育(人材育成)の環境，ε_H ：人的資本の減耗率，k ：人的資本蓄積投資の効率性パラメータである．

(3)から(7)で示された最大化問題の最適化条件は Hamiltonian を$\hbar(t)$で表すものとして以下のようになる．

$$\begin{aligned}\hbar(t)=&\frac{c(t)^{1-\sigma}}{1-\sigma}\exp(-\rho t)\\&+\lambda_1(t)[I(t)-\varepsilon_K K(t)\exp(-\alpha H(t))]\\&+\lambda_2(t)\left[BJ(t)^k\exp\{(1-\alpha)H(t)\}P-\varepsilon_H H(t)\right]\\&+\mu(t)(AK(t)-c(t)P-I(t)-J(t))\end{aligned}\quad , \quad (8)$$

$$\frac{\partial\hbar(t)}{\partial c(t)}=c(t)^{-\sigma}\exp(-\rho t)-\mu(t)P=0\,, \quad (9)$$

$$\frac{\partial\hbar(t)}{\partial I(t)}=\lambda_1(t)-\mu(t)=0\,, \quad (10)$$

$$\frac{\partial\hbar(t)}{\partial J(t)}=\lambda_2(t)kBPJ(t)^{k-1}\exp\{(1-\alpha)H(t)\}-\mu(t)=0\,, \quad (11)$$

$$\frac{\partial\hbar(t)}{\partial K(t)}=-\lambda_1(t)\varepsilon_K\exp(-\alpha H(t))+\mu(t)A=-\dot{\lambda}_1(t)\,, \quad (12)$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial\hbar(t)}{\partial H(t)}=&\lambda_1(t)\alpha\varepsilon_K K(t)\exp(-\alpha H(t))\\&+\lambda_2(t)\left[(1-\alpha)BJ(t)^k\exp\{(1-\alpha)H(t)\}P-\varepsilon_H\right]\\=&-\dot{\lambda}_2(t)\end{aligned}\,, \quad (13)$$

$$\lim_{t\to\infty}\lambda_1(t)K(t)=0\,, \quad (14)$$

$$\lim_{t\to\infty}\lambda_2(t)H(t)=0\,. \quad (15)$$

以上の最適化条件から，人的資本が一定で $H = H^*$ となった定常状態に着目して，次の解を得る．

$$c(t) = \frac{\rho-(1-\sigma)(A-\varepsilon_K\exp(-\alpha H^*))}{\sigma P}\left\{K(0)-\frac{J}{A-\varepsilon_K\exp(-\alpha H^*)}\right\}, \quad (16)$$
$$\times\exp\left\{\frac{A-\varepsilon_K\exp(-\alpha H^*)-\rho}{\sigma}t\right\}$$

$$I(t) = \left[\frac{A-\varepsilon_K\exp(-\alpha H^*)-\rho+\varepsilon_K\sigma\exp(-\alpha H^*)}{\sigma}K(0)-\frac{A-\varepsilon_K\exp(-\alpha H^*)-\rho}{\{A-\varepsilon_K\exp(-\alpha H^*)\}\sigma}J\right], \quad (17)$$
$$\times\exp\left\{\frac{A-\varepsilon_K\exp(-\alpha H^*)-\rho}{\sigma}t\right\}$$

$$K(t) = K(0)\exp\left\{\frac{A-\varepsilon_K\exp(-\alpha H^*)-\rho}{\sigma}t\right\}, \quad (18)$$

$$J(t) = \left\{\frac{\varepsilon_H H^*}{BP\exp\{(1-\alpha)H^*\}}\right\}^{\frac{1}{k}} \quad (19)$$

ただし，　$\rho < A-\varepsilon_K\exp(-\alpha H^*) < \frac{\rho}{1-\sigma}$ を仮定．

５．政策効果の分析

本研究のモデルでは，代表的家計の効用の現在価値である(3)がそのまま社会的厚生を表す指標である．最適解の経路上で(3)を積分すると次式を得る．

$$U = \frac{\sigma^\sigma}{(1-\sigma)P^{1-\sigma}}\left\{K(0)-\frac{J}{X}\right\}^{1-\sigma}\{\rho-(1-\sigma)X\}^{-\sigma}, \quad (20)$$

政策実施を表す外生変数の変化が U を増加させる場合に政策効果があるとする．

まず，定常状態での人的資本 H^* の水準を上げた場合の効果を分析する．ただし，H^* について以下の条件が成立していると仮定する．

$$\frac{1}{\alpha}\{\ln\varepsilon_K-\ln(A-\rho)\} < H^* < \frac{1}{\alpha}\left\{\ln\varepsilon_K-\ln\left(A-\frac{\rho}{1-\sigma}\right)\right\} \quad (21)$$

(20)から次式を得る．

$$\frac{\partial U}{\partial H^*} = \frac{\sigma^\sigma}{P^{1-\sigma}}\left\{K(0)-\frac{J}{X}\right\}^{-\sigma}\{\rho-(1-\sigma)X\}^{-\sigma-1}\left[\{\rho-(1-\sigma)X\}\frac{-\frac{\partial J}{\partial H^*}X+J\frac{\partial X}{\partial H^*}}{X^2}+\sigma\left\{K(0)-\frac{J}{X}\right\}\frac{\partial X}{\partial H^*}\right] \quad (22)$$

$$\frac{\partial J}{\partial H^*} = \frac{\alpha}{k}\left\{\frac{\varepsilon_H H^*}{BP\exp\{(1-\alpha)H^*\}}\right\}^{\frac{1}{k}} = \frac{\alpha}{k}J \quad (23)$$

$$\frac{\partial X}{\partial H^*} = \alpha\varepsilon_K\exp(-\alpha H^*) = \alpha(A-X) \quad . \quad (24)$$

以上を整理して，

$$\frac{\partial U}{\partial H^*} = \frac{\sigma^\sigma}{P^{1-\sigma}}\left\{K(0)-\frac{J}{X}\right\}^{-\sigma}\{\rho-(1-\sigma)X\}^{-\sigma-1} \quad . (25)$$
$$\times\left[\{\rho-(1-\sigma)X\}\frac{\{k(A-X)-X\}\alpha J}{kX^2}+\sigma\left\{K(0)-\frac{J}{X}\right\}\alpha(A-X)\right]$$

政策効果を示す $\partial U/\partial H^*$ は以下の変数に依存している

$$k \in \left[\ln\varepsilon_K-\ln(A-\rho), \ln\varepsilon_K-\ln\left(A-\tfrac{\rho}{1-\sigma}\right)\right]$$

$$X = A-\varepsilon_K\exp(-\alpha H^*).$$

これらの変数に基づいて以下の２つのケースが得られる．

A)　$k \geq \frac{X}{A-X}$ ならば，$\partial U/\partial H^*$ は正．．

B)　$k < \frac{X}{A-X}$ ならば，$\partial U/\partial H^*$ は H^* が増加するにつれて正から負へと転じ，$\partial U/\partial H^* = 0$ となる H^* が子存在する．

従って，図２のようなグラフを描くことができ，ケースBにおいては，人的資本 H^* に最適水準が存在することがわかる．これは次のように説明することができる．人的投資を行うことは維持・更新の技術を向上させ，資本 K の減耗を防止することで経済成長を促進する．しかし．一方では，人的投資の増大は消費や資本投資を減じるという意味で機会費用を発生させている．過度に人的資本水準を引き上げると後者の影響が大きく効用を低下させることになる．

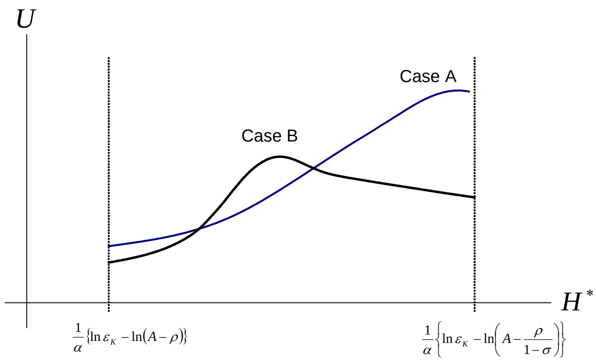

図２　社会的厚生 U と人的資本 H^* の関係

なお，このような社会的厚生の変化は，消費について早い時期では減少，遅い時期には増大という変化を伴っている．

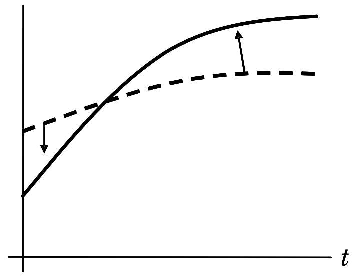

図３　消費の経路への影響

次に技術教育の環境 B の政策効果について示す．U を B で明示的表すと次のようになる．

$$U = \frac{\sigma^\sigma}{(1-\sigma)P^{1-\sigma}}\left\{K(0)-\frac{1}{X}\left\{\frac{\varepsilon_H H^*}{BP\exp\{(1-\alpha)H^*\}}\right\}^{\frac{1}{k}}\right\}^{1-\sigma}\{\rho-(1-\sigma)X\}^{-\sigma} \quad (26)$$

U が B の増加関数であることは明らかであり，$\partial U / \partial H^{*} > 0$ である．従って，建設技術進歩のために技術教育の環境を改善することは社会的厚生を高める．

５．おわりに

本研究は建設技術進歩に着目して，それがインフラの維持・更新に関する技術であると想定した上で，技術進歩の促進策が経済成長を通じて社会的厚生を高めるという政策効果を発揮できることを示した.

建設技術が他のプロセスで経済成長に貢献するモデルについても筆者らは別途作成して分析を進めている．それらについても今後は機会を見て報告したい.

参考文献

1)Solow.R.(1956), "A contribution to the Theory of Economic Growth", Quarterly Journal of Economics, 70, pp.65-94

2)Solow.R.(1957), "Technical Change and the Aggregate Production Function", Review of Economics and Statistics, 39, pp.312-320

3)Solow, R. M.(1960), "Investment and Technical Progress", in K. J. Arrow, S. Karlin and P. Suppes eds., Mathematical Methods in the Social Sciences, Stanford Univ. Press, pp.89-104

4)Lancaster, K.J.(1966), "A New Approach to Consumer Theory", Journal of Political Economy

5)Leland,H.E.(1977),"Quality Choice and Competition", American Economic Review

6)Judd,G.(1985), "On the Performance of Patents", Econometrica，vol.53，pp567-585

7)Romer P. M.(1986), "Increasing Returns and Long-Run Growth", Journal of Political Economy, 94, pp.1002-1037

8)Lucas R. E. Jr.(1988), "On the Mechanics of Economic Development", Journal of Monetary Economics, 22, pp.3-42

9)Aschauer, David Alan(1989), "Is Public Capital Expenditure Productive?", Journal of Monetary Economics 23 pp.177-200

10)Romer P. M.(1990), "Endogeous Technological Change", Journal of Political Economy, 98, pp.71-102

11)Rebelo S.(1991), "Long-Run Policy Analysis and Long-Run Growth", Journal of Political Economy, 99, pp.500-521

12)Grossman G. E. and E. Helpman(1991), "Innovation and Growth in the Global Economy", MIT Press

13)Barro R. J. and X. Sala-i-Martin(1995), "Economic Growth", MIT Press

14)Jones(1995), "R&D-Based Models of Economic Growth", Journal of Political Economy, Vol.103, pp.759-784

15)Jones(1998), "Population and Ideas: A Theory of Endogenous Growth", in P. Aghion. R. Frydman. J. Stiglits. And M. Woodford. (eds.) Knowledge, Information, and Expectations in Modern Macroeconomics, Princeton University Press

16)Dinopoulos and Thompson(1988), "Schumpeterian Growth without Scale Effects", Journal of Economic Growth, Vol.3, pp313-315