建設技術進歩の経済成長への貢献　−理論的分析−＊

Contributions of Technological Progress in Construction Sector to Economic Growth*

上田孝行**・横松宗太***

By Takayuki UEDA **・Muneta YOKOMATSU***

１．はじめに

経済成長モデルは新古典派の経済理論をベースとして60年代にかけて精力的に研究が進められ，また，80年代には内生的経済成長理論(Endogenous Growth Theory)として再び隆盛を見た．そこで取り上げられる成長の源泉は，生産技術が資本について収穫が逓減しないという構造であること，技術の多様性か増加することで同様に集計的に非逓増となること，あるいは資本の蓄積が何らかの外部性を持つために非逓増となることである．また，資本の概念も人的資本や知識などの非物的な資本にまで拡張して捉えられる場合もあり，教育や研究開発の重要性が強調されている．

資本の概念が非物的なものまで含むように拡張されているとは言え，実際には物的な資本が生産の場面で依然として重要であることには変わりはない．また，蓄積された資本を生産に効率的に使用するという場面だけでなく，投資により資本を形成していく場面でも技術が大きな役割を果たしていることも言うまでもない．さらに，新規投資による資本の蓄積だけでなく，減耗/滅失を如何に適切に管理していくかという場面でもそのための技術が重要性を発揮する．このように考えると，投資によって物的な資本を形成するための技術と減耗を適切に管理する技術の進歩が経済成長に貢献するということは明らかであろう．　建設技術はこのような技術の代表的なものの一つであり，その進歩は経済成長に大きく影響を及ぼす可能性がある．

しかしながら，経済成長理論の主流において上に述べたような見方が十分に関心を集めていたとは思われない．本稿の目的は，建設技術進歩が経済成長に貢献するという主張を簡潔な理論モデルによって示すことにある．
具体的には，ある一定の条件を満たすように不断の努力によって建設技術進歩を持続させることが通常の内生的経済成長理論で導出されるような持続的な経済成長を可能にするために必要であるという見方を示す．　言い換えれば，これまでの主流派の経済成長理論の結論は，この見方が暗黙のうちに仮定されていた上で成り立ってきたと言う事ができる．

*キーワーズ：建設技術進歩、経済成長、AKモデル

**正員、工博、東京大学大学院社会基盤学専攻

***正員、工博、京都大学防災研究所

２．本稿での経済成長モデル

（1）基本的な仮定

本稿で用いる経済成長モデルは次のような主な仮定に基づいている．

①１つの閉じた経済である．

②生産される財は１種類であり，消費財cとしても資本財Iとしても利用できる．生産要素は１種類の蓄積可能な資本Kのみであり，これは労働力が一定で変化しないことを暗黙に仮定している．

③経済には代表的な一つの家計があり，それは各時点$t \in [0,\infty)$の財消費$c(t)$から得られる効用$u(c(t))$の無限期間にわたる割引現在価値Uを最大にするように，各時点における財消費量$\{c(t)\}_{t=0}^{\infty}$を選択する．同時に，資本の所有者として長期的な資本形成への投資$\{I(t)\}_{t=0}^{\infty}$を制御する．

（2）モデルの定式化

前節の基本的な仮定に基づいて経済成長モデルを次のように定式化する．

$$U = \max_{\{c(t),I(t)\}_{t=0}^{\infty}} \int_0^{\infty} u(c(t))e^{-\rho t}dt \tag{1.a}$$

$$\text{s.t.} \quad f(K(t)) = c(t) + I(t) \tag{1.b}$$

$$\frac{dK(t)}{dt} = g(I(t), K(t)) \tag{1.c}$$

$$K(0) : given \tag{1.d}$$

ここで，ρは主観的割引率であり，また，$f(\cdot)$は生産関数，$I(t)$は投資である．$g(\cdot)$は資本蓄積のプロセスを支配する関数であり，(1.c)がいわゆる資本の蓄積方程式である．

（3）モデルの支配方程式

最適制御理論の最大値原理に基づいて上記の最適化問題の支配方程式を導出する．Hamiltonian$H(t)$とそれを用いた必要条件は次の通りである．

$$H(t)=u(c(t))e^{-\rho t}+\lambda(t)g(I(t),K(t)) + \mu(t)(f(K(t))-c(t)-I(t)) \tag{2.a}$$

$$\frac{\partial H(t)}{\partial c(t)}=\frac{\partial u(c(t))}{\partial c(t)}e^{-\rho t}-\mu(t)=0 \tag{2.b}$$

$$\frac{\partial H(t)}{\partial I(t)}=\lambda(t)\frac{\partial g(I(t),K(t))}{\partial I(t)}-\mu(t)=0 \tag{2.c}$$

$$\frac{\partial H(t)}{\partial K(t)}=\lambda(t)\frac{\partial g(I(t),K(t))}{\partial K(t)}+\mu(t)\frac{\partial f(K(t))}{\partial K(t)}=-\frac{\partial \lambda(t)}{\partial t} \tag{2.d}$$

$$\lim_{t\to\infty}\lambda(t)K(t)=0 \tag{2.e}$$

ここで，$\lambda(t)$ は随伴変数であり，$\mu(t)$ はラグランジュ乗数である．また，(2.e)は横断性条件である．

(2.b)と(2.c)からラグランジュ乗数 $\lambda(t)$ に関する２つの表現が得られる．

$$\mu(t)=\frac{\partial u(c(t))}{\partial c(t)}e^{-\rho t} \tag{3.a}$$

$$\mu(t)=\lambda(t)\frac{\partial g(I(t),K(t))}{\partial I(t)} \tag{3.b}$$

(3.a)の右辺は時点 t における限界効用の現在価値を表している．(3.b)の右辺は，随伴変数 $\lambda(t)$ が資本蓄積一単位の価値を効用のタームで表したものであるため， 限界的な投資の価値を同様に効用のタームで表していると解釈できる．これらが $\lambda(t)$ を介して等しいということは，限界的な投資一単位の価値が投資のために犠牲にされる財消費一単位の限界効用(一種の機会費用)に等しくなるまで投資を行うべきであるという意味になり，各時点 t において効用タームでの費用便益基準に基づいて投資が行われるべきであるという条件を表している．

３．建設技術を反映した資本蓄積方程式とその特性

前章での資本蓄積の方程式は一般化されたものであるが，以降では建設技術との関係からそれをある程度特定化して議論を進める．

蓄積方程式について重要なのは，第一は，マクロ経済学ではいわゆる投資関数に関する議論で展開されてきたような投資の調整費用である．新規の投資が資本となって生産に使用されるには新たな設備としての加工や据付，既存設備との連結などに資源を要する．これらが投資を資本の増加分に変換するための調整費用である．既存の資本蓄積量に対して大きな資本の増加分を実現しようとするほど大きな調整費用を要するため，結果としてその調整費用分だけ大きな投資額を要するとする考え方がある．この考え方は，宇沢(1990)などで解説されているPenrose Curveに見ることができ，例えば，次のような関係式で表される．

$$\frac{I}{K}=\varphi\left(\frac{\frac{dK}{dt}}{K}\right) \qquad \varphi'>0,\quad \varphi''>0 \tag{4.a}$$

$$I=\Phi(\tfrac{dK}{dt}) \qquad \Phi'>0,\quad \Phi''>0 \tag{4.b}$$

Penrose Curveは企業の内部構造にその論拠があり，企業が投資により生産能力を拡大しようとすれば，企業の中に既に蓄積された経営上の知識や技能が必要になり，それらは企業の中では貴重性の高い資源であるため，結果として投資に対して資本の蓄積として表される生産能力の拡大は逓減的になるとしている．

この点は建設技術については非常に重要な示唆を含んでいる．一国の経済で歴史的に考えれば，建設工事は他の条件を同じとすれば，工事が比較的行い易い条件の場所から行われ，後の時代ほど同じ技術で工事するにはより困難な条件な場所で行われていく．ダム等の工事が奥地のより難工事に場所へと移っていき，また，地下鉄なども建設場所が大深度地下へと順々に移っていくなどはその例であろう．また，資本蓄積が都市域の経済活動や人口の集積と連動しているとすれば，それらの発展が建設工事を進める際の調整費用を増大させていることも明らかであろう．建設技術の進歩が見込めないと資本蓄積が進むにつれて潜在的には調整費用としての工事費は増大すると考えられる．

蓄積方程式に関する第二の重要な点は，資本の減耗である．数学的な性質だけから見れば，前述のPenrose Curve自体にも減耗が反映されていると見ることができるが，建設技術の役割を強調する本稿の立場からは別途議論しておくべきであると思われる．資本の減耗の多寡は，建設される資本設備の耐久性と建設後の維持管理・更新の効率性に依存している．

資本が労働力等の他の生産要素に比べて非常に少ないときには，資本が相対的に高頻度に使用されて磨耗や疲労が著しいであろう．また，資本が労働に比べて非常に多くなると，今度は設備の手入れや補修に十分には手が回らないという状況が起き易く，結果として減耗が進み易いかも知れない．従って，減耗については本来的には他の生産要素との関係からその特性を蓄積方程式に反映させるべきである．しかし，本稿では他の生産要素との関係については陽表的には扱わず，減耗量を資本の関数として表すに止める．

資本蓄積の方程式を次のように特定化する．

$$\frac{dK(t)}{dt}=g(I(t),K(t))=\phi(K(t))I(t)-h(K(t)) \tag{5.a}$$

$$\phi'<0,\quad h'>0 \tag{5.b}$$

この方程式の特性は図１のように表すことができる．このように特定化したもとで，モデルの支配方程式を求めると次式を得る．

$$\lambda(t)\phi(K(t))-\mu(t)=0 \tag{6.a}$$

$$\lambda(t)\{\phi'(K(t))I(t)-h'(K(t))\}+\mu(t)\frac{\partial f(K(t))}{\partial K(t)}=-\frac{\partial\lambda(t)}{\partial t} \tag{6.b}$$

これらから，随伴変数$\lambda(t)$の変化率についての次式を得る．

$$\frac{\frac{\partial\lambda(t)}{\partial t}}{\lambda(t)}=-\{\phi(K(t))\frac{\partial f(K(t))}{\partial K(t)}+\phi'(K(t))I(t)-h'(K(t))\} \tag{7.a}$$

また，(3.a)から次式が成り立つ．

$$\frac{\partial u(c(t))}{\partial c(t)}e^{-\rho t}=\lambda(t)\phi(K(t)) \tag{7.b}$$

この両辺について対数微分を行って次式を得る．

$$\frac{\frac{\partial^2 u(c(t))}{\partial c(t)^2}}{\frac{\partial u(c(t))}{\partial c(t)}}\frac{dc(t)}{dt}-\rho=\frac{\frac{d\lambda(t)}{dt}}{\lambda(t)}+\frac{\phi'(K(t))}{\phi(K(t))}\frac{dK(t)}{dt} \tag{7.c}$$

これに(5.a)の定義式と(7.a)を代入して整理して次の関係式を得る．

$$\frac{\frac{\partial^2 u(c(t))}{\partial c(t)^2}}{\frac{\partial u(c(t))}{\partial c(t)}}\frac{dc(t)}{dt}=-\{\phi(K(t))\frac{\partial f(K(t))}{\partial K(t)}-h'(K(t))+\frac{\phi'(K(t))h(K(t))}{\phi(K(t))}-\rho\} \tag{8}$$

これは，資本$K(t)$と財消費$c(t)$の変化が従う方程式であり，本稿のモデルの最も中心的な役割を果たす方程式である．

資本$K(t)$はこの経済における生産能力を表し，財消費$c(t)$は各時点での効用を規定する変数であり，前者の変化がいわゆる経済成長を表し，後者はこの経済の社会的厚生を表すことになる．この両者の関係において，資本の蓄積方程式に導入した項$\phi(K(t))$，$h(K(t))$が組み込まれており，これらを通して建設技術が経済成長と社会的厚生に影響を与えることになる．

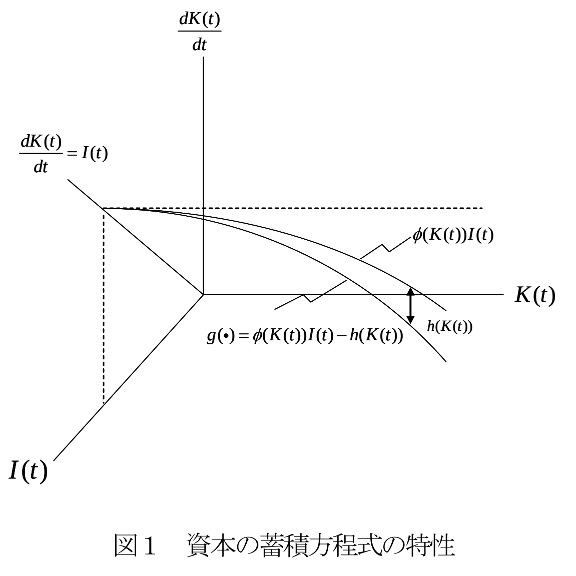

図１　資本の蓄積方程式の特性

４．既往の内生的経済成長論における帰結の再検討

既往の内生的経済成長理論にはいくつかのタイプがあり，それぞれ毎に持続的な経済成長が実現するための条件を提示している．ここでは，その条件として生産関数の非逓減性を指摘したAKモデルを既往の経済成長理論の枠組み(例えば，山口(1997)の解説を参照)として取り上げる．AKモデルでは，効用関数と生産関数として次のような形式を採用する．

$$u(c(t))=\frac{c(t)^{1-\sigma}}{1-\sigma}\quad(0<\sigma<1) \tag{9.a}$$

$$f(K(t))=AK(t) \tag{9.b}$$

(9.a)は各時点間の消費の限界代替率が一定であるという特徴を反映した効用関数であり，解析的な取り扱い易さから内生的経済成長理論の分野では最も多用されている．

(9.b)は生産関数が定数Aと資本$K(t)$だけで表されており，資本の限界生産力がこの定数Aと一致して一定値となり逓減しない．これが持続的な経済成長を実現するための条件を表している．

$$\frac{\partial f(K(t))}{\partial K(t)}=A \tag{10}$$

以上の設定のもとで，基本方程式(8)を書き改めると，次式が得られる．

$$\frac{\frac{dc(t)}{dt}}{c(t)}=\left(\frac{1}{\sigma}\right)\{\phi(K(t))A-h'(K(t))+\frac{\phi'(K(t))h(K(t))}{\phi(K(t))}-\rho\} \tag{11}$$

これは財消費の変化率を表しており，持続的な経済成長は，この変化率が非負であり，一人当たり財消費が将来にわたって低下することがないということであると解釈できる．そのためには，生産能力も拡大していく必要があり，資本の変化分$dK(t)/dt$も非負で，$K(t)$が持続的に増大していかなければならない．(11)の{　}内の第１項から第３項を取り出して$M(t)$とし，それを図示すると図２のようになる．

$$M(t)=\phi(K(t))A-h'(K(t))+\frac{\phi'(K(t))h(K(t))}{\phi(K(t))} \tag{12}$$

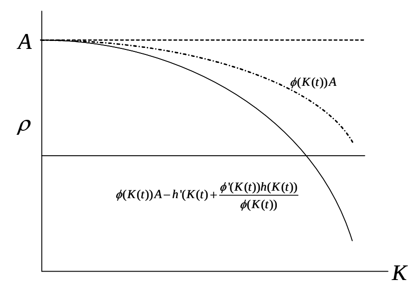

図２　$M(t)$の特徴

$\phi > 0,\quad h > 0,\quad \phi' < 0,\quad h' > 0$ であることを考慮すれば，資本 $K(t)$ が増大するにつれて，$M(t)$ は ρ に近づき，その結果として(11)の右辺はゼロに収束する．その水準を越えると財消費の変化率は負となるが，資本の変化分 $dK(t)/dt$ が負になるようにすることでその収束点へと回復させることができる．

持続的な経済成長を実現するためには，$M(t)$ を非負の値として持続させることが必要であり，そのためには，$\phi(K(t))$ と $h'(K(t))$ が増大しないように不断の建設技術進歩を続けることが必要になる．

既往の内生的経済成長モデルでは，財消費 $c(t)$ が一定率で増大する状況が描かれている．そこでは，投資はそのまま減じることなく資本の増加分として実現する．すなわち，$\phi(K(t)) = 1$ が仮定されている．また，資本の減耗についても $h(K(t)) = \varepsilon K(t)$ として，減耗率 ε は一定と仮定されている．$A - \varepsilon - \rho \geq 0$ の場合は，財消費の変化率は次のように非負の一定値となり，持続的な経済成長が実現する．

$$\frac{\frac{dc(t)}{dt}}{c(t)} = \left(\tfrac{1}{\sigma}\right)(A - \varepsilon - \rho) \tag{13}$$

このように見ると，既往の内生的経済成長論における持続的な経済成長が実現するという帰結は，投資が資本に変換される過程と資本の減耗の過程についてきわめて強い仮定をおいていると言える．そして，その２つの仮定は建設技術進歩についての強い仮定であると言える．持続的な経済成長を実現するためには，蓄積された資本を効率的に使用して限界生産力が低下しないような不断の生産技術の進歩が必要であるというのが内生的経済成長理論のメッセージである．しかし，それだけでは持続的な経済成長の実現は難しく，投資が資本に変換される効率を一定率以下に低下させず，かつ，資本の減耗率がある一定率以上に増大しないようにする建設技術進歩が必要である．

５．一つの定常解のもとでの貢献の吟味

(13)で表されるような既往の内生的経済成長理論が想定する状況で，資本の減耗率 ε が変化する状況を考えてみる．(1.a)～(1.d)の経済成長モデルは次のように書き換えられる．

$$U = \max_{\{c(t), I(t)\}_{t=0}^{\infty}} \int_0^{\infty} \frac{c(t)^{1-\sigma}}{1-\sigma} e^{-\rho t} dt \tag{14.a}$$

$$\text{s.t.}\quad AK(t) = c(t) + I(t) \tag{14.b}$$

$$\frac{dK(t)}{dt} = I(t) - \varepsilon K(t) \tag{14.c}$$

$$K(0) : given \tag{14.d}$$

この問題について次の解が得られる．

$$c(t) = \left(\tfrac{(A-\varepsilon)(1-\sigma)-\rho}{-\sigma}\right) K(0) \exp\{\left(\tfrac{A-\varepsilon-\rho}{\sigma}\right) t\} \tag{15.a}$$

$$I(t) = \left(\tfrac{A-(1-\sigma)\varepsilon-\rho}{\sigma}\right) K(0) \exp\{\left(\tfrac{A-\varepsilon-\rho}{\sigma}\right) t\} \tag{15.b}$$

$$K(t) = K(0) \exp\{\left(\tfrac{A-\varepsilon-\rho}{\sigma}\right) t\} \tag{15.c}$$

ただし，$(A - \varepsilon)(1 - \sigma) - \rho < 0$ を仮定．これらから，ε の変化による影響は次のようになる．

$$\tfrac{\partial c(t)}{\partial \varepsilon} = \{\tfrac{(1-\sigma)}{\sigma} + \left(\tfrac{(A-\varepsilon)(1-\sigma)-\rho}{-\sigma}\right)\left(\tfrac{-t}{\sigma}\right)\} K(0) \exp\{\left(\tfrac{A-\varepsilon-\rho}{\sigma}\right) t\} \tag{16.a}$$

$$\tfrac{\partial c(t)}{\partial \varepsilon} \begin{cases} \geq 0 & \text{if}\quad t \leq (1-\sigma)\left(\tfrac{-\sigma}{(A-\varepsilon)(1-\sigma)-\rho}\right) \\ < 0 & \text{otherwise} \end{cases} \tag{16.b}$$

$$\tfrac{\partial I(t)}{\partial \varepsilon} = \{\left(\tfrac{-(1-\sigma)}{\sigma}\right) + \left(\tfrac{A-(1-\sigma)\varepsilon-\rho}{\sigma}\right)\left(\tfrac{-t}{\sigma}\right)\} K(0) \exp\{\left(\tfrac{A-\varepsilon-\rho}{\sigma}\right) t\} < 0 \tag{16.c}$$

$$\tfrac{\partial K(t)}{\partial \varepsilon} = \left(\tfrac{-t}{\sigma}\right) K(0) \exp\{\left(\tfrac{A-\varepsilon-\rho}{\sigma}\right) t\} < 0 \tag{16.d}$$

$$U = \frac{1}{1-\sigma} K(0)^{1-\sigma} \left(\tfrac{(A-\varepsilon)(1-\sigma)-\rho}{-\sigma}\right)^{-\sigma} \tag{16.e}$$

$$\frac{\frac{\partial U}{\partial \varepsilon}}{U} = \frac{(1-\sigma)\sigma}{(A-\varepsilon)(1-\sigma)-\rho} < 0,\quad \tfrac{\partial U}{\partial \varepsilon} < 0 \tag{16.f}$$

建設技術進歩がさらに進展して減耗率が低下した場合（$d\varepsilon < 0$）を考えると上の符号を全て逆に見ることになり，減耗率の低下は一時的には財消費の低下を招く可能性があるものの，投資を増大させ，資本の蓄積を増加させ，そして，効用水準を上昇させる．構造物の長寿命化は減耗率の低下を目指したものである解釈でき，そのような技術が進展することは経済成長と社会的厚生の増大に貢献すると言える．

６．おわりに

今後は，持続的な経済成長のための条件 $\phi(K(t)) = 1$ と $h(K(t)) = \varepsilon K(t)$ がマクロレベルで成り立つような建設技術進歩の中身について，より詳細な検討を行いたい．そこから，インフラ等を含む資本ストックの維持・更新についてのある種のマネジメントルールを読み取りたいと考えている．

参考文献

1) 宇沢弘文(1990)，経済解析−基礎編−，岩波書店
2) 山口利夫(1997)，経済学の新動向，三菱経済研究所