

# 建設部門の人材育成に着目した超長期インフラ政策\*

## Century-Long Infrastructure Policy with Human Resource Development 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

インフラが今後も国民生活の質(Quality of Life)と国民経済の生産性(Productivity)を支えていくことは言を要しない。インフラの効率的な整備と維持・更新を将来にわたって継続していくためには、建設部門の技術進歩を持続させることが不可欠であり、特に人材に体化される知識や技能を維持・向上させるための施策が重要である。上田・越智・横松(2008)、Ueda, Ochi and Yokomatsu(2008)はこの考え方に従って、人材育成に着目したHRDモデル(Human Resource Development Model)を構築して分析を進めてきた。ただし、それらはインフラの維持・更新に関する知識・技能の蓄積に焦点を当てた議論である。

そこで、本稿ではインフラへの新規投資あるいは新規整備によりインフラストックを増大させるための新設技術に焦点を当てた分析を紹介する。本稿では、まずモデル構築にあたっての理論的基礎と一般形の定式化を説明する。次に、資本蓄積が順調な成熟途上経済と蓄積が十分に進んだ成熟経済のそれぞれの場合に特定化したモデルの定式化ならびに分析を行う。その上で、それらの分析から得られる政策的意味を検討する。

### 2. 基本モデル

実際の人材育成施策には様々なタイプがあるが、本研究ではOff the Job Training(研修や学校教育等)を通して知識・技能を継承する施策を念頭におく。すなわち、直接生産に寄与しない資源投入(学校整備ならびに学校教育、教育者の育成、標準示法書、企業研修、学協会等による技術普及、etc)を分析の対象とする。

以下で構築する経済モデルは次のような基本的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 $c$ 、資本形成への投資 $I$ ならびに人材育成への投資 $J$ 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

\*キーワード：人材育成、インフラ動学、経済成長

\*\*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)

あり、それがインフラ(社会基盤)のストックを代表している。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。 $K$ の形成にあたっては、資本形成への投資 $I$ 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。

④経済には代表的な1つの家計があり、それは各時点 $t \in [0, \infty)$ の一人当たり財消費 $c(t)$ 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、資本所有者ならびに人材として、長期的な資本形成への投資 $\{I(t)\}_{t=0}^{\infty}$ ならびに長期的な人材育成への投資 $\{J(t)\}_{t=0}^{\infty}$ を制御する。

以上の基本的な仮定に基づいてHRDモデルを次のように定式化する。

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

$$\text{s.t. } Y(K(t)) = c(t)P + I(t) + J(t) \quad (2)$$

$$\frac{dK(t)}{dt} = F(I(t), H(t), K(t)) \quad (3)$$

$$\frac{dH(t)}{dt} = G(J(t), H(t), P) \quad (4)$$

$$K(0), H(0) : \text{given} \quad (5)$$

ただし、 $\rho$ ：主観的割引率、 $Y(\cdot)$ ：生産関数、 $P$ ：人口規模、 $F(\cdot)$ ：資本蓄積のプロセスを支配する関数、 $G(\cdot)$ ：人的資本蓄積のプロセスを支配する関数である。なお、(3)が資本蓄積方程式であり、(4)が人的資本蓄積方程式である。HRDモデルにおける人的資本蓄積方程式のアイデアは、多くの場合はLucas(1988)を参考にしている。ここではそれとは少し異なり、人的資本の蓄積関数 $G(\cdot)$ に人材育成のための投資 $J(t)$ を明示的に考慮している。

最適制御理論の最大値定理に基づいて、上記の最大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。

$$H(t) = u(c(t)) \exp(-\rho t) + \lambda_1(t) F(I(t), H(t), K(t)) + \lambda_2(t) G(J(t), H(t), P) + \mu(t) (Y(K(t)) - c(t)P - I(t) - J(t)) \quad (6)$$

$$\frac{\partial H(t)}{\partial c(t)} = \frac{\partial u(c(t))}{\partial c(t)} \exp(-\rho t) - \mu(t)P = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial H(t)}{\partial I(t)} = \lambda_1(t) \frac{\partial F(I(t), H(t), K(t))}{\partial I(t)} - \mu(t) = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial H(t)}{\partial J(t)} = \lambda_2(t) \frac{\partial G(J(t), H(t), P)}{\partial J(t)} - \mu(t) = 0 \quad (9)$$

$$\frac{\partial H(t)}{\partial K(t)} = \lambda_1(t) \frac{\partial F(I(t), H(t), K(t))}{\partial K(t)} + \mu(t) \frac{\partial Y(K(t))}{\partial K(t)} = -\frac{d\lambda_1(t)}{dt} \quad (10)$$

$$\frac{\partial H(t)}{\partial H(t)} = \lambda_1(t) \frac{\partial F(I(t), H(t), K(t))}{\partial H(t)} + \lambda_2(t) \frac{\partial G(J(t), H(t), P)}{\partial H(t)} = -\frac{d\lambda_2(t)}{dt} \quad (11)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \lambda_1(t) K(t) = 0 \quad (12)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \lambda_2(t) H(t) = 0 \quad (13)$$

条件式(7)(8)(9)よりラグランジュ乗数  $\mu(t)$  に関して次の表現が得られる。

$$\mu(t) = \left(\frac{1}{P}\right) \frac{\partial u(c(t))}{\partial c(t)} \exp(-\rho t) \quad (14)$$

$$\mu(t) = \lambda_1(t) \frac{\partial F(I(t), H(t), K(t))}{\partial I(t)} \quad (15)$$

$$\mu(t) = \lambda_2(t) \frac{\partial G(J(t), H(t), P)}{\partial J(t)} \quad (16)$$

(14)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。(15)の右辺は随伴変数  $\lambda_1(t)$  が資本蓄積一単位の価値を効用のタームで示したものであるため、限界的な資本形成への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。(16)の右辺は随伴変数  $\lambda_2(t)$  が人的資本蓄積一単位の価値を効用タームで示したものであるため、限界的な人材育成への投資の価値を同じく効用タームで表していると解釈できる。これらが  $\lambda_1(t)$ ,  $\lambda_2(t)$  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. 成熟途上経済での新設技術に着目した分析

通常の新設技術に求められる成果は、投入した資源が効率良くインフラストックに変換されること、すなわち、同じ投入でも多くのストックになることである。資本蓄積が順調に進んでいる未だ成熟に向けた途上にある経済ではこのような効果が発揮されやすいと考えられる。本稿ではそれを以下のように特定化したモデルに組み込む。

$$U = \max_{\{c(t), I(t), J(t)\}_{t=0}^{\infty}} \int_0^{\infty} \frac{c(t)^{1-\sigma}}{1-\sigma} \exp(-\rho t) dt \quad (17)$$

$$\text{s.t. } AK(t) = c(t)P + I(t) + J(t) \quad (18)$$

$$\frac{dK(t)}{dt} = I(t)(\alpha H(t))^\gamma \quad (19)$$

$$\frac{dH(t)}{dt} = BJ(t)^\ell \{(1-\alpha)H(t)\}^k P - \varepsilon_H H(t) \quad (20)$$

$$K(0), H(0) : \text{given} \quad (21)$$

ただし、 $B$  : 教育環境,  $\varepsilon_H$  : 人的資本の減耗率,  $\alpha$  : 人的資本の労働への配分率,  $1-\alpha$  : 人的資本の人的資本形成への配分率,  $\gamma$  : 人的資本の生産性パラメータ,  $\ell$  : 人材育成投資の教育効果パラメータ(人的

資本投資の弾力性),  $k$  : 既存人的資本の教育効果パラメータ(人的資本蓄積の既存人的資本活用弾力性)

$H = H^*$  と一定値になった定常経路での解として以下が得られる。

$$c(t) = \frac{(1-\sigma)A(\alpha H^*)^\gamma - \rho}{-\rho AP(\alpha H^*)^\gamma} \left[ AK(0) - \left\{ \frac{\varepsilon_H}{B(1-\alpha)^k H^{*k-1} P} \right\}^{\frac{1}{\gamma}} \right] \exp\left\{ \frac{A(\alpha H^*)^\gamma - \rho}{\sigma} t \right\} \quad (22)$$

$$I(t) = \frac{A(\alpha H^*)^\gamma - \rho}{\rho AP(\alpha H^*)^\gamma} \left[ AK(0) - \left\{ \frac{\varepsilon_H}{B(1-\alpha)^k H^{*k-1} P} \right\}^{\frac{1}{\gamma}} \right] \exp\left\{ \frac{A(\alpha H^*)^\gamma - \rho}{\sigma} t \right\} \quad (23)$$

$$K(t) = K(0) \exp\left\{ \frac{A(\alpha H^*)^\gamma - \rho}{\sigma} t \right\} \quad (24)$$

ただし、 $\rho < A(\alpha H^*)^\gamma < \frac{\rho}{1-\sigma}$  と仮定する。以上から、消費  $c(t)$  ならびに資本形成への投資  $I(t)$  に関して、人材スキルを表す人的資本  $H^*$  のレベルが高い、すなわち人材育成投資が大きい社会においては、当初の  $c(t)$ ,  $I(t)$  が小さくなるものの、その伸び率は大きいことがわかる。

以上の定常解のもとで社会厚生(代表的家計の効用)  $U$  は次のように表される。

$$U = \frac{\sigma}{1-\sigma} \{\rho AP(\alpha H^*)^\gamma\}^{\sigma-1} \{\rho - (1-\sigma)A(\alpha H^*)^\gamma\}^{-\sigma} \times \left[ AK(0) - \left\{ \frac{\varepsilon_H}{B(1-\alpha)^k H^{*k-1} P} \right\}^{\frac{1}{\gamma}} \right]^{1-\sigma} \quad (25)$$

社会的厚生は非常に複雑な形式であり、また、多数のパラメータに依存している。そのため、外生パラメータの変化としての政策による社会的厚生について吟味しても、一般性を持つ広範な経済の下で成立する強い結論を得るのはきわめて難しい。そこで、本稿では興味深いいくつかの可能性について、それぞれを一つの理論的な仮説として取上げていく。

#### 人的資本 $H^*$ に関して

定常状態において保っていくべき人的資本レベル  $H^*$  についてその社会的厚生への影響を検討する。意味のある解を議論するため、まずは次式を仮定する。

$$\frac{1}{\alpha} \left[ \frac{\rho}{A} \right]^{\frac{1}{\gamma}} < H^* < \frac{1}{\alpha} \left[ \frac{\rho}{A(1-\sigma)} \right]^{\frac{1}{\gamma}} \quad (26)$$

興味深い一つの理論的な仮説として、次の A,B) のような条件が成立する可能性がある場合が想定できる。

$$A) \hat{H}^*_c(k, \ell, \gamma, \alpha) > H^* \Rightarrow \partial U / \partial H^* < 0 \quad (27.a)$$

$$B) \hat{H}^*_c(k, \ell, \gamma, \alpha) < H^* \Rightarrow \partial U / \partial H^* > 0 \quad (27.b)$$

すなわち、 $H^*$  に関する臨界水準  $\hat{H}^*_c(k, \ell, \gamma, \alpha)$  が存在してそれを越えた水準でしか  $H^*$  の増大が政策として効果を発揮しないような可能性が考えられる。 $k, \ell$  が小さい経済では、既存の人的資本による教育効果に大きくは期待できず、また、人的資本投資の教育効果も期待できない。そのため、人的資本の水準を上げて高く保とうとすれば、消費を犠牲にして人的資本投資を上げざるを得ない。そして、人的資本を高く保つようにしたにも関わらず、資本蓄積  $dK(t)/dt = I(t)(\alpha H(t))^\gamma$  を規定する  $\gamma$  が小さいと資本  $K(t)$  を効率的に形成して将来の生産

$AK(t)$  の増大, その結果としての消費  $c(t)$  の増大が期待できない場合がある. 極端な場合として,  $\gamma \simeq 0$  と見して人的資本が資本蓄積にほとんど影響を及ぼさないとすれば, このような可能性があることは直感的に理解できる. 新たな人的資本の蓄積に既存人的資本の蓄積が貢献できないような経済として, 例えば建設部門の技術水準が未だに高くない途上国経済などが相当すると考えられる.

#### 労働配分 $\alpha$ に関して

意味のある解を議論するため, まずは次式を仮定する.

$$\frac{1}{H^*} \left\{ \frac{\rho}{A} \right\}^{\frac{1}{\gamma}} < \alpha < \frac{1}{H^*} \left\{ \frac{\rho}{A(1-\sigma)} \right\}^{\frac{1}{\gamma}} \quad (28)$$

先の場合と同じように, 人的資本の労働への配分率について, 以下の C.D) のような条件を成立させる臨界水準  $\alpha_c(k, l, \gamma, H^*)$  が存在する可能性がある.

$$C) \alpha_c(k, l, \gamma, H^*) > \alpha \Rightarrow \partial U / \partial \alpha < 0 \quad (29.a)$$

$$D) \alpha_c(k, l, \gamma, H^*) < \alpha \Rightarrow \partial U / \partial \alpha > 0 \quad (29.b)$$

例えば,  $H^*$  が十分に高くなっている経済では,  $\alpha$  を上げることは人的資本蓄積にもはやあまり多く資源を投入しなくても良いという状況にある. その場合には既に蓄積された  $H^*$  の内, インフラの新設である資本蓄積により多くを配分することで資本蓄積を加速する方が社会的厚生が高くなる. 例えば, 高度成長の前段階あるいは初期の段階において建設部門の人材スキルが高くなるような教育成果の蓄積があれば, それを実際のインフラ整備事業へ大きく投入することで高度経済成長が実現できる可能性があることを示唆していると考えられる.

#### 教育環境 $B$ に関して

これについては, 意味は自明である

$$\partial U / \partial B > 0 \quad (30)$$

#### 人口規模 $P$ に関して

以下の知見が得られている.

$$E) P < \frac{\varepsilon_H}{B(1-\alpha)^k H^{k-1}} \left\{ \frac{\ell(1-\sigma)AK(0)}{1-\ell(\sigma-1)} \right\}^{-\ell} \Rightarrow \partial U / \partial P < 0 \quad (31.a)$$

$$F) P > \frac{\varepsilon_H}{B(1-\alpha)^k H^{k-1}} \left\{ \frac{\ell(1-\sigma)AK(0)}{1-\ell(\sigma-1)} \right\}^{-\ell} \Rightarrow \partial U / \partial P > 0 \quad (31.b)$$

意味するところについては, ある程度の人口規模以上であれば人口規模が大きくなることで人的資本蓄積における外部性が発揮される. しかし, それ以下であると人口増加による一人当たり消費の低下が社会的厚生を減じる方に作用すると考えられる.

## 4. 成熟済経済での新設技術に着目した分析

資本蓄積がある程度まで進んだ成熟済経済における新設技術について分析する. 建設工事は他の条件を同じとすれば, 工事が比較的行きやすい条件の場所から行われ, 徐々に同じ技術で工事するにはより困難な場所で行われるようになる. このようにさらなる資本蓄積が困難になった状態での新設技術の人材スキルについて分析する.

人的資本蓄積方程式を次のように特定化してこの状況を表現する.

$$\frac{dH(t)}{dt} = B \left( \frac{J(t)}{K(t)} \right)^\ell \{ (1-\alpha)H(t) \}^k P - \varepsilon_H H(t) \quad (32)$$

資本  $K(t)$  が蓄積されるほど人的資本への投資  $J(t)$  の効率が低下する, あるいは人的資本  $H(t)$  を同じだけ増加させるためにはより多くの投資  $J(t)$  が必要になる.

経済成長モデルは(17)から(21)の定式化において, (20)を(32)と入れ替えたものになる. 先と同様に  $H = H^*$  と一定値になった定常経路での解として以下が得られる.

$$c(t) = \frac{\{1-\alpha(A-X)\}(\alpha H^*)^\gamma - \rho}{-P\sigma(\alpha H^*)^\gamma} K(0) \exp\left\{ \frac{(A-X)(\alpha H^*)^\gamma - \rho}{\sigma} t \right\} \quad (33.a)$$

$$I(t) = \frac{\{A-X\}(\alpha H^*)^\gamma - \rho}{\sigma(\alpha H^*)^\gamma} K(0) \exp\left\{ \frac{(A-X)(\alpha H^*)^\gamma - \rho}{\sigma} t \right\} \quad (33.b)$$

$$K(t) = K(0) \exp\left\{ \frac{(A-X)(\alpha H^*)^\gamma - \rho}{\sigma} t \right\} \quad (33.c)$$

ただし

$$\left\{ 1 - \sigma \left[ A - \left\{ \frac{\varepsilon_H}{B(1-\alpha)^k H^{k-1} P} \right\}^{\frac{1}{\ell}} \right] \right\} (\alpha H^*)^\gamma - \rho < 0 \quad (34.a)$$

$$A - \left\{ \frac{\varepsilon_H}{B(1-\alpha)^k H^{k-1} P} \right\}^{\frac{1}{\ell}} > 0 \quad (34.b)$$

$$X = \left\{ \frac{\varepsilon_H H^{s+1-k}}{B(1-\alpha)^k P} \right\}^{\frac{1}{\ell}} \quad (34.c)$$

以上から社会厚生  $U$  も次のように得られる.

$$U = \frac{\sigma^\sigma K(0)^{1-\sigma}}{(1-\sigma)P^{1-\sigma}(\alpha H^*)^{\gamma(1-\sigma)}} \left[ \rho - \left\{ 1 - \sigma \left[ A - \left\{ \frac{\varepsilon_H H^{s+1-k}}{B(1-\alpha)^k P} \right\}^{\frac{1}{\ell}} \right] \right\} (\alpha H^*)^\gamma \right]^{-\sigma} \quad (35)$$

前節と同様の理由により, ここでも興味深いいくつかの可能性について, それぞれを一つの理論的な仮説として取上げていく.

#### 人的資本 $H^*$ に関して

意味のある解に着目するため, 次式を仮定する.

$$\frac{\rho^\gamma}{\alpha} < H^* < \left\{ \frac{A^\ell B(1-\alpha)^k P}{\varepsilon_H} \right\}^{\frac{1}{1-k}} \quad (36)$$

前節と同様に以下のような臨界水準  $\hat{H}_{cc}^*(k, l, \gamma, \alpha)$  が存在する可能性があると考えられる.

$$G) \hat{H}_{cc}^*(k, l, \gamma, \alpha) > H^* \Rightarrow \partial U / \partial H^* > 0 \quad (37.a)$$

$$H) \hat{H}_{cc}^*(k, l, \gamma, \alpha) < H^* \Rightarrow \partial U / \partial H^* < 0 \quad (37.b)$$

理由については前節と同様の経済状況が考えられるが,  $k, l$  が小さい経済では  $K(t)$  が十分に大きいと  $H^*$  を高く保つためには犠牲にすべき消費  $c(t)$  はより大きくなる可能性がある.

#### 労働配分 $\alpha$ に関して

意味のある解を議論するため, まずは次式を仮定す

る。

$$\frac{\rho^{\frac{1}{\gamma}}}{H^*} < \alpha < 1 - \left( \frac{\varepsilon_H H^{1-k}}{A^{\ell} B P} \right)^{\frac{1}{k}} \quad (38)$$

以下の知見が得られている。

$$I) \alpha_{cc}(k, \ell, \gamma, H^*) > \alpha \Rightarrow \partial U / \partial \alpha < 0 \quad (39.a)$$

$$J) \alpha_{cc}(k, \ell, \gamma, H^*) < \alpha \Rightarrow \partial U / \partial \alpha > 0 \quad (39.b)$$

教育環境  $B$  に関して

$$\partial U / \partial B > 0 \quad (40)$$

人口規模  $P$  に関して

人口規模について次のような条件が成り立つ。

$$O) \quad P < \left\{ \frac{\sigma \{ \ell(1-\sigma) + \sigma \}}{(1-\sigma)} \right\}^{\ell} \left\{ \frac{\varepsilon_H H^{1-k}}{B(1-\alpha)^{\ell}} \right\} \left\{ \frac{\rho - (1-\alpha)(\alpha H^{\gamma})}{(\alpha H^{\gamma})} \right\}^{-\ell} \Rightarrow \partial U / \partial P > 0 \quad (41.a)$$

$$P) \quad P > \left\{ \frac{\sigma \{ \ell(1-\sigma) + \sigma \}}{(1-\sigma)} \right\}^{\ell} \left\{ \frac{\varepsilon_H H^{1-k}}{B(1-\alpha)^{\ell}} \right\} \left\{ \frac{\rho - (1-\alpha)(\alpha H^{\gamma})}{(\alpha H^{\gamma})} \right\}^{-\ell} \Rightarrow \partial U / \partial P < 0 \quad (41.b)$$

人口規模については前節と異なるが、成熟経済では人口規模が大きくなることで人的資本蓄積において発揮される外部効果があっても、資本蓄積が進むにつれて人的資本投資の効果自体が弱くなる。その結果として資本蓄積が一人当たりの消費を増加させる効果が人口増加が一人当たり消費を減じる負の影響よりも小さいと考えられる。その場合には人口規模が大きいことは一人当たり消費に依存した社会的厚生を低下させる可能性がある。

## 5. おわりに

本研究は建設部門の人材育成に着目して、それがイン

フラの新設技術に関する技術進歩を意味すると見なし、経済成長を通じて社会的厚生を高めるという効果を発揮できる可能性を示した。ただし、本稿の知見は未だ理論的な仮説に過ぎない。実際の様々な経済に照らして現実性を吟味する必要があることは言うまでもないが、適切なパラメータを用いて試算した数値例に基づいてここで示した可能性を吟味することも有効であると考えている。

また、インフラの建設技術を経済成長モデルに取り込む表現方法は他にいくつも考えられる。特に、解析解に限定せずに数値解を積極的に利用することを考えれば、様々な方法があり得る。今後はそれらに取り組んでいきたい。

## 参考文献

- 1) 上田孝行, 越智成基, 横松宗太(2008), 建設技術進歩に着目した超長期インフラ政策, 第 37 回土木計画学研究発表会講演集(CD-R), 土木学会
- 2) Ueda, T., Ochi, S. and Yokomatsu, M.(2008), Knowledge and Skill for Infrastructure Technology in Global Competition, Proceedings of 11<sup>th</sup> Uddevalla Symposium (USB), Kyoto, University West, Sweden
- 3) Lucas R. E. Jr.(1988), "On the Mechanics of Economic Development", Journal of Monetary Economics, 22, pp.3-42