外部性を考慮したSCGEモデルによるリニア中央新幹線の便益評価

平林　和樹[1]・武藤　慎一[2]

[1] 学生員　大学院医工農学総合教育部工学専攻土木環境工学コース
（〒400-8510 山梨県甲府市武田 4-3-11）
E-mail:g17tc012@yamanashi.ac.jp

[2] 正会員　山梨大学准教授　大学院総合研究部工学域（400-8510 山梨県甲府市武田-3-11）
E-mail:smutoh@yamanashi.ac.jp

リニア中央新幹線は，2027 年の開業に向けて東京－名古屋間で建設が進められている．筆者らは，これまで交通内生型 SCGE モデルを用いることにより，リニア中央新幹線の開業による経済効果を便益により評価してきた．しかし，そこでは固定費用の存在による問題が考慮できていない，また外部性の評価もなされていないという課題があった．

そこで本研究では，全国 9 地域を対象に，固定費用を考慮した SCGE モデルを用いて料金設定の違いによる影響評価を行った．さらに，環境外部性として地球温暖化問題を取り上げ，リニア中央新幹線の開通と，その料金設定の違いが二酸化炭素排出量に与える影響も明らかにした．

Key Words : *SCGE model, fixed costs, externality, benefit evaluation*

1. はじめに

現在，品川－大阪間を結ぶリニア中央新幹線が計画されており，そのうち品川－名古屋間は，2014年10月に建設工事が認可され[1]，2027年の開業に向けて建設が進められている．リニア中央新幹線の開業により品川－名古屋間は，現行の東海道新幹線で約90分かかるところが約40分に短縮される．その結果，業務トリップや観光トリップの円滑化を介して，多大な経済効果が発現すると期待されている．こうした経済効果は，費用便益分析による便益計測や[2), 3]，空間的応用一般均衡（SCGE：Spatial Computable General Equilibrium）モデルを適用した便益計測[4),5),6]により評価されてきた．

特に筆者らは，交通内生型SCGEモデルを用いることにより，リニア中央新幹線の開通が鉄道旅客運輸企業（具体的にはJR東海）の生産性を向上させる効果まで含めた経済効果を便益により計測できることを示した[7), 8]．しかしそこでは，建設費用等の固定費用を料金により回収する点が考慮できていなかった．そのため，固定費用を考慮したSCGEモデルを構築して，従来の限界費用料金によるケースと，固定費用を料金で回収する平均費用料金によるケースにおいて，どの程度，発現する便益に違いが生じるのかを明らかにした[9]．ただし，平林ら[9]は関東，山梨，東海の3地域を対象にした簡易な数値シミュレーションによる分析にとどまっており，それらを全国に展開した現実的な分析に拡張することが課題となっていた．

以上のとおり，筆者らはリニア中央新幹線の開通による便益評価に関して，SCGE分析の精緻化を図り，より現実的な便益計測に取り組んできた．しかし，固定費用を考慮した分析を全国に展開するとともに，外部性の考慮あるいは外部性に与える影響についての評価が課題となっていた．外部性とは，環境汚染物質の排出に伴う環境被害や[10]，集積の経済と呼ばれる，企業や家計が集中して立地することにより企業の生産性や家計の消費効率性が向上することで生じる外部経済のことである[11]．リニア中央新幹線のような大規模輸送機関の整備は，環境外部性にも多大な影響を与え，また大きな集積の経済を生み出す可能性があることが重要と指摘されている．

そこで本研究では，全国9地域を対象として，リニア中央新幹線の建設費用，維持更新費用等の固定費用を考慮したSCGEモデルを用いて，料金設定の違いによる影響評価を行うとともに，まず環境外部性の評価が行えるような枠組みの構築を行う．具体的には，環境外部性として地球温暖化問題を取り上げ，リニア中央新幹線の開

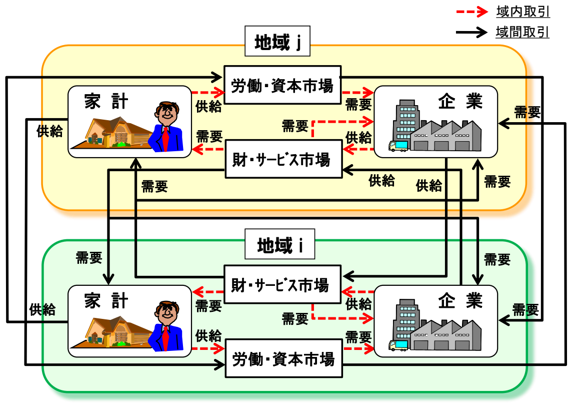

図-2　SCGEモデルの全体構成

通に伴う二酸化炭素（CO_2）排出量が計測できるフレームを構築する．その上で，リニア中央新幹線の開通と，その料金設定の違いがCO_2排出に与える影響を明らかにする．さらに比較対象として，東京－名古屋間の新東名高速道路整備によるCO_2排出量の計測も行い，一単位の便益を生むのにどれだけのCO_2が排出されるのかを両者のケースで算定し，どちらが環境面で優位であるのかを明らかにする．

2.　固定費用・環境外部性を考慮したSCGEモデル

(1)　モデルの前提条件

本研究のSCGEモデルは，J 地域に分割された社会経済を対象とし，地域 j には代表家計とm財を生産するm企業が存在する（図-2）．これに加えて，交通機関別運輸サービスを供給する運輸企業が存在しているものとし，その中の鉄道旅客運輸企業がリニア中央新幹線の建設および運営主体になるものと考える．なお，家計，企業，運輸企業以外にも，政府，公的投資部門，民間投資部門が存在しているとする．
家計は，生産要素（労働，資本）を提供することで所得を得て，財，サービスを消費する．企業は，生産要素，中間財を投入して財，サービスを生産し，家計や他企業に供給する．運輸企業は，通常の企業と同様に，生産要素，中間財を投入して運輸サービスを生産するものとする．なお，森杉らによって構築された交通内生型SCGEモデルと同様に，運輸サービスをOD別に供給しているものとする点に特長がある．これに加え，本モデルは，特にリニア中央新幹線の建設に関して，鉄道旅客運輸企業が鉄道施設建設のために投じる固定費用を考慮する．

次項では，まず運輸サービス需要者の行動モデルを説明し，その後，固定費用を考慮した鉄道運輸サービス供給者の行動モデルを説明する．

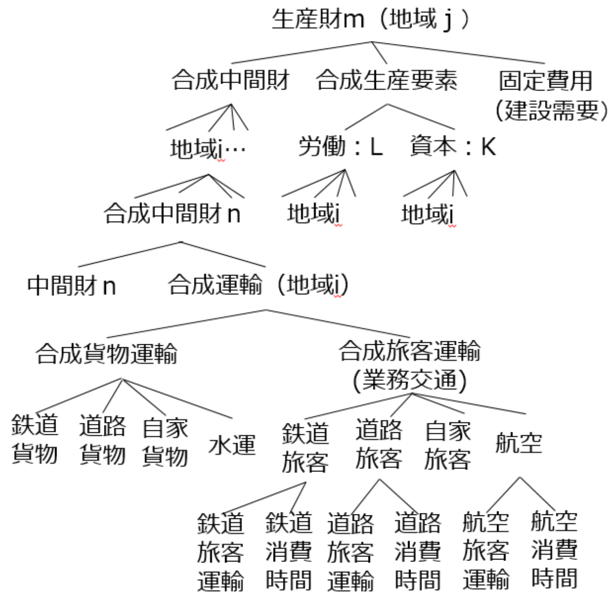

図-3　企業の生産行動のツリー構造

(2)　運輸サービス需要者の行動モデル

a) 企業の生産行動モデル

運輸サービス需要者のうち，まず企業の行動モデルを説明する．企業の生産行動ツリーを図-3に示す．企業は，まず合成中間財と合成生産要素の投入量を決定し，合成中間財に対し購入地域の選択を行う．その後，それぞれの地域別合成中間財投入に対し，n 財別合成中間財の投入量を決定する．さらに，n 財別合成中間財の投入に対し，n 財別中間財と合成運輸サービスの投入量を決定する．これは，中間財の投入には運輸サービスが必要であるとしたものである．また，企業は合成中間財に対しては，合成貨物と合成旅客の各運輸サービス投入量を決定し，合成貨物，合成旅客ともに交通機関選択を行い，交通機関別の運輸サービス投入量を決定するという行動をとる．なお，旅客運輸については，交通消費時間が費やされるものとした．

以上の企業の生産行動モデルは，すべて生産技術制約下での費用最小化行動によって定式化する．本SCGEモデルでは，生産技術を表すのにBarro型CES関数を用いる．そして，以下には図-3の最上位の合成中間財，合成生産要素に関する投入量決定の費用最小化問題を示す．

$$C_m^j = \min_{z_m^j,\, cf_m^j} \left[q_{Zm}^j z_m^j + \left(1+\tau_m^j\right) pf_m^j cf_m^j \right] \tag{1a}$$

$$\text{s.t. } y_m^j = \gamma_m^j \left[\alpha_{Zm}^j \left\{ \beta_{Zm}^j z_m^j \right\}^{\frac{\sigma_m^j - 1}{\sigma_m^j}} + \left(1-\alpha_{Zm}^j\right) \left\{ \left(1-\beta_{Zm}^j\right) cf_m^j \right\}^{\frac{\sigma_m^j - 1}{\sigma_m^j}} \right]^{\frac{\sigma_m^j}{\sigma_m^j - 1}} \tag{1b}$$

ただし， y_m^j, p_m^j ：地域 j での財mの生産量と価格， z_m^j, q_{Zm}^j ：合成中間財投入量とその価格， cf_m^j, pf_m^j ：合成生産要素投入量とその価格， τ_m^j ：純間接税率（間接税率－補助率）， $\alpha_{Zm}^j, \beta_{Zm}^j$ ：分配パラメータ， γ_m^j ： 効率パラメータ， σ_m^j ：代替弾力性パラメータ．

ラグランジュ未定乗数法により式(1)を解くと，以下の需要関数が求められる．

$$z_m^j = \frac{1}{\gamma_m^j \left(\beta_{Zm}^j\right)^{1-\sigma_m^j}} \left(\frac{\alpha_{Zm}^j}{q_{Zm}^j}\right)^{\sigma_m^j} \Psi_m^{j\,\frac{\sigma_m^j}{1-\sigma_m^j}} y_m^j \tag{2a}$$

$$cf_m^j = \frac{1}{\gamma_m^j \left(1-\beta_{Zm}^j\right)^{1-\sigma_m^j}} \left(\frac{1-\alpha_{Zm}^j}{\left(1+\tau_m^j\right) pf_m^j}\right)^{\sigma_m^j} \Psi_m^{j\,\frac{\sigma_m^j}{1-\sigma_m^j}} y_m^j \tag{2b}$$

ただし,

$$\Psi_m^j = \left(\alpha_{Zm}^j\right)^{\sigma_m^j} \left(\frac{q_{Zm}^j}{\beta_{Zm}^j}\right)^{1-\sigma_m^j} + \left(1-\alpha_{Zm}^j\right)^{\sigma_m^j} \left(\frac{\left\{1+\tau_m^j\right\} pf_m^j}{1-\beta_{Zm}^j}\right)^{1-\sigma_m^j}.$$

式(2)の需要関数を式(1a)に代入することにより，費用関数は以下のように求められる．

$$C_m^j = \frac{1}{\gamma_m^j} \Psi_m^{j\,\frac{1}{1-\sigma_m^j}} y_m^j \tag{3}$$

式(3)は，生産量 y_m^j に対して線形の関数であることから，本企業モデルの生産財の均衡価格は利潤ゼロにおいてのみ存在することになる．企業の利潤は，収入から費用を差し引くことにより求められることから以下となる．

$$\pi_m^j = p_m^j y_m^j - C_m^j \tag{4}$$

そして，ゼロ利潤条件（ $\pi_m^j = 0$ ）よりm 財価格が以下のように求められる．

$$p_m^j = \frac{1}{\gamma_m^j} \Psi_m^{j\,\frac{1}{1-\sigma_m^j}} \tag{5}$$

以上により，企業行動モデルの最上位の定式化が行えた．続いて，**図-3**のツリーにしたがって合成中間財の地域投入の定式化を示す．その最適化問題は以下のようになる．

$$q_{Zm}^j z_m^j = \min_{z_m^{ij}} \sum_i q_m^{ij} z_m^{ij} \tag{6a}$$

$$\text{s.t. } z_m^j = \gamma_{Zm}^j \left[\sum_i \alpha_m^{ij} \left\{\beta_m^{ij} z_m^{ij}\right\}^{\frac{\sigma_{Zm}^j}{\sigma_{Zm}^j - 1}}\right]^{\frac{\sigma_{Zm}^j}{\sigma_{Zm}^j - 1}} \tag{6b}$$

ただし， z_m^{ij}, q_m^{ij} ：地域jにおける地域iからの合成中間財投入量とその価格， $\alpha_m^{ij}, \beta_m^{ij}$ ：分配パラメータ（ $\sum \alpha_m^{ij} = 1, \sum \beta_m^{ij} = 1$ ）， γ_{Zm}^j ：効率パラメータ， $\sigma_{Zm}^{j\ i}$ ：代替弾力性パラメータ．

ラグランジュ未定乗数法により式(6)を解くと，以下の需要関数が求められる．

$$z_m^{ij} = \frac{1}{\gamma_{Zm}^j \left(\beta_m^{ij}\right)^{1-\sigma_{Zm}^j}} \left(\frac{\alpha_m^{ij}}{q_m^{ij}}\right)^{\sigma_{Zm}^j} \psi_{Zm}^{j\,\frac{\sigma_{Zm}^j}{1-\sigma_{Zm}^j}} \cdot z_m^j \tag{7}$$

ただし， $\psi_{Zm}^j = \sum_i \left(\alpha_m^{ij}\right)^{\sigma_{Zm}^j} \left(\dfrac{q_m^{ij}}{\beta_m^{ij}}\right)^{1-\sigma_{Zm}^j}$ ．

式(7)の需要関数を式(6a)に代入することにより，合成中間財価格が求められる．

$$q_{Zm}^j = \frac{1}{\gamma_{Zm}^j} \psi_{Zm}^{j\,\frac{1}{1-\sigma_{Zm}^j}} \tag{8}$$

次に，n財別中間財の投入の定式化を示す．その最適化問題は以下のようになる．

$$q_m^{ij} z_m^{ij} = \min_{z_{nm}^{ij}} \sum_n q_{nm}^{ij} z_{nm}^{ij} \tag{9a}$$

$$\text{s.t. } z_m^{ij} = \gamma_m^{ij} \left[\sum_n \alpha_{nm}^{ij} \left\{\beta_{nm}^{ij} z_{nm}^{ij}\right\}^{\frac{\sigma_m^{ij}-1}{\sigma_m^{ij}}}\right]^{\frac{\sigma_m^{ij}}{\sigma_m^{ij}-1}} \tag{9b}$$

ただし， z_{nm}^{ij}, q_{nm}^{ij} ：地域 j で地域 i から投入される合成中間財nの投入量とその価格， $\alpha_{nm}^{ij}, \beta_{nm}^{ij}$ ：分配パラメータ（ $\sum \alpha_{nm}^{ij} = 1, \sum \beta_{nm}^{ij} = 1$ ）， γ_m^{ij} ：効率パラメータ， σ_m^{ij} ：代替弾力性パラメータ．

ラグランジュ未定乗数法により式(9)を解くと，以下の需要関数が求められる．

$$z_{nm}^{ij} = \frac{1}{\gamma_m^{ij} \left(\beta_{nm}^{ij}\right)^{1-\sigma_m^{ij}}} \left(\frac{\alpha_{nm}^{ij}}{q_{nm}^{ij}}\right)^{\sigma_m^{ij}} \psi_m^{ij\,\frac{\sigma_m^{ij}}{1-\sigma_m^{ij}}} \cdot z_m^{ij} \tag{10}$$

ただし， $\psi_m^{ij} = \sum_n \left(\alpha_{nm}^{ij}\right)^{\sigma_m^{ij}} \left(\dfrac{q_{nm}^{ij}}{\beta_{nm}^{ij}}\right)^{1-\sigma_m^{ij}}$ ．

式(10)を式(9a) に代入することにより，地域iから投入される合成中間財価格が求められる．

$$q_m^{ij} = \frac{1}{\gamma_m^{ij}} \psi_m^{ij\,\frac{1}{1-\sigma_m^{ij}}} \tag{11}$$

次に，中間財nと合成運輸の投入の定式化を示す．その最適化問題は以下のようになる．

$$q_{nm}^{ij} z_{nm}^{ij} = \min_{x_{nm}^{ij}, z_T^{ij}} \left[p_n^i x_{nm}^{ij} + q_{Tm}^{ij} z_{Tm}^{ij}\right] \tag{12a}$$

$$\text{s.t. } z_{nm}^{ij}=\gamma_{nm}^{ij}\left[\begin{array}{l}\left(1-\alpha_{Tm}^{ij}\right)\left\{\left(1-\beta_{Tm}^{ij}\right)x_{nm}^{ij}\right\}^{\frac{\sigma_{nm}^{ij}-1}{\sigma_{nm}^{ij}}}\\+\alpha_{Tm}^{ij}\left\{\beta_{Tm}^{ij}z_{Tm}^{ij}\right\}^{\frac{\sigma_{nm}^{ij}-1}{\sigma_{nm}^{ij}}}\end{array}\right]^{\frac{\sigma_{nm}^{ij}}{\sigma_{nm}^{ij}-1}} \tag{12b}$$

ただし，x_{nm}^{ij}, p_n^i：中間財nの投入量と地域iのn財価格，z_{Tm}^{ij}, q_{Tm}^{ij}：合成運輸投入量とその価格，$\alpha_{Tm}^{ij}, \beta_{Tm}^{ij}$：分配パラメータ，$\gamma_{nm}^{ij}$：効率パラメータ，$\sigma_{nm}^{ij}$：代替弾力性パラメータ．

ラグランジュ未定乗数法により式(12)を解くと，以下の需要関数が求められる．

$$x_{nm}^{ij}=\frac{1}{\gamma_{nm}^{ij}\left(1-\beta_{Tm}^{ij}\right)^{1-\sigma_{nm}^{ij}}}\left(\frac{1-\alpha_{Tm}^{ij}}{p_n^i}\right)^{\sigma_{nm}^{ij}}\psi_{nm}^{ij\;\frac{\sigma_{nm}^{ij}}{1-\sigma_{nm}^{ij}}}\cdot z_{nm}^{ij} \tag{13a}$$

$$z_{Tm}^{ij}=\frac{1}{\gamma_{nm}^{ij}\left(1-\beta_{Tm}^{ij}\right)^{1-\sigma_{nm}^{ij}}}\left(\frac{1-\alpha_{Tm}^{ij}}{p_n^i}\right)^{\sigma_{nm}^{ij}}\psi_{nm}^{ij\;\frac{\sigma_{nm}^{ij}}{1-\sigma_{nm}^{ij}}}\cdot z_{nm}^{ij} \tag{13b}$$

ただし，

$$\psi_{nm}^{ij}=\left(1-\alpha_{Tm}^{ij}\right)^{\sigma_{nm}^{ij}}\left(\frac{p_n^i}{1-\beta_{Tm}^{ij}}\right)^{1-\sigma_{nm}^{ij}}+\left(\alpha_{Tm}^{ij}\right)^{\sigma_{nm}^{ij}}\left(\frac{q_{Tm}^{ij}}{\beta_{Tm}^{ij}}\right)^{1-\sigma_{nm}^{ij}}.$$

式(13)を式(14a) に代入することにより，合成中間財n価格が求められる．

$$q_{nm}^{ij}=\frac{1}{\gamma_{nm}^{ij}}\psi_{nm}^{ij\;\frac{1}{1-\sigma_{nm}^{ij}}} \tag{14}$$

最後に労働と資本投入の定式化を示す．その最適化問題は以下のようになる．

$$pf_m^j cf_m^j=\min_{l_m^j,k_m^j}\left[w_m^j l_m^j+r_m^j k_m^j\right] \tag{15a}$$

$$\text{s.t. } cf_m^j=\gamma_{CFm}^j\left[\begin{array}{l}\alpha_{Lm}^j\left\{\beta_{Lm}^j l_m^j\right\}^{\frac{\sigma_{CTm}^j-1}{\sigma_{CTm}^j}}\\+\left(1-\alpha_{Lm}^j\right)\left\{\left(1-\beta_{Lm}^j\right)k_m^j\right\}^{\frac{\sigma_{CTm}^j-1}{\sigma_{CTm}^j}}\end{array}\right]^{\frac{\sigma_{CTm}^j}{\sigma_{CTm}^j-1}} \tag{15b}$$

ただし，l_m^j, w_m^j：地域jのm企業の労働投入量とその賃金率，k_m^j, r_m^j：地域jのm企業の資本投入量とその利子率，$\alpha_{Lm}^j, \beta_{Lm}^j$：分配パラメータ，$\gamma_{CTm}^j$：効率パラメータ，$\sigma_{CTm}^j$：代替弾力性パラメータ．

ラグランジュ未定乗数法により式(15)を解くと，以下の需要関数が求められる．

$$l_m^j=\frac{1}{\gamma_{CTm}^j\left(\beta_{Lm}^j\right)^{1-\sigma_{CTm}^j}}\left(\frac{\alpha_{Lm}^j}{w_m^j}\right)^{\sigma_{CTm}^j}\psi_{CTm}^{j\;\frac{\sigma_{CTm}^j}{1-\sigma_{CTm}^j}}\cdot cf_m^j \tag{16a}$$

$$k_m^j=\frac{1}{\gamma_{CTm}^j\left(1-\beta_{Lm}^j\right)^{1-\sigma_{CTm}^j}}\left(\frac{1-\alpha_{Lm}^j}{w_m^j}\right)^{\sigma_{CTm}^j}\psi_{CTm}^{j\;\frac{\sigma_{CTm}^j}{1-\sigma_{CTm}^j}}\cdot cf_m^j \tag{16b}$$

ただし，

$$\psi_{CFm}^{ij}=\left(\alpha_{Lm}^j\right)^{\sigma_{CFm}^j}\left(\frac{w_m^j}{\beta_{Lm}^j}\right)^{1-\sigma_{CFm}^j}+\left(1-\alpha_{Lm}^j\right)^{\sigma_{CFm}^j}\left(\frac{r_m^j}{1-\beta_{Lm}^j}\right)^{1-\sigma_{CFm}^j}.$$

式(16)を式(15a) に代入することにより，合成生産要素価格が求められる．

$$pf_m^j=\frac{1}{\gamma_{CFm}^j}\psi_{CFm}^{j\;\frac{1}{1-\sigma_{CFm}^j}} \tag{17}$$

b) 家計の消費行動モデル

続いて，運輸サービス需要者の家計の消費行動モデルを示す．地域 j に居住する代表家計の消費行動ツリーは図-4のとおりである．

まず，家計は総利用可能時間に賃金率を乗じて求められる時間所得と，企業に資本を提供して得られる資本所得からなる総所得を得る．この総所得に対し，直接税と貯蓄を差し引いた可処分所得を，家計は各消費に充てる．家計の可処分所得は以下のようになる．

$$\Omega_H^j=\left(w^j T_H^j+r^j K_H^j\right)\left(1-\tau_H^j\right)-S_H^j \tag{18}$$

ただし，Ω_H^j：地域 j の家計の可処分所得，T_H^j, w^j：家計の総利用可能時間と賃金率，K_H^j, r^j：家計の資本保有量と利子率，τ_H^j：直接税率，S_H^j：家計貯蓄（基準年値で固定とする）．

この可処分所得を用いて，家計はまず合成財と余暇の消費量を決定する．次に，合成財消費に対し購入地域の選択を行った後，それぞれの地域別合成財消費に対し，n 財別の合成財消費量を決定する．企業と同様，財の購入には運輸サービスの投入が必要であるとすることから，n 財別合成財消費に対しては，n 財別消費量と合成運輸サービス消費量を決定する．そして，合成運輸サービスに対し，合成貨物と合成旅客の各運輸サービス消費量を決定し，それぞれに対し交通機関選択がなされるとする．

以上の家計の財消費行動モデルは，効用水準一定制約下での支出最小化問題により定式化する．図-3の最上位の合成財と余暇の消費量決定モデルに係わる支出最小化問題は以下のようになる．

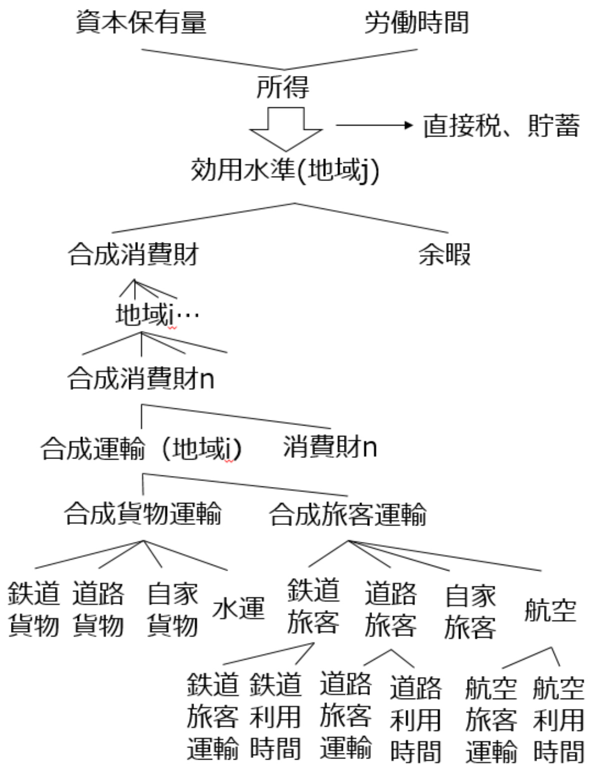

図-4　家計の財消費行動のツリー構造

$$e_H^j = \min_{z_H^j, l_H^j} \left[q_{ZH}^j z_H^j + w^j l_H^j \right] \tag{19a}$$

$$\text{s.t.} U_H^j = \gamma_H^j \left[\begin{array}{l} \alpha_{ZH}^j \left\{ \beta_{ZH}^j z_H^j \right\}^{\frac{\sigma_H^j - 1}{\sigma_H^j}} \\ + \left(1 - \alpha_{ZH}^j\right) \left\{ \left(1 - \beta_{ZH}^j\right) l_H^j \right\}^{\frac{\sigma_H^j - 1}{\sigma_H^j}} \end{array} \right]^{\frac{\sigma_H^j}{\sigma_H^j - 1}} \tag{19b}$$

ただし，e_H^j ：地域 j の家計の支出水準，z_H^j, q_{ZH}^j ：合成財消費量とその価格，l_H^j, w^j ：余暇消費量と賃金率（余暇価格を意味する），U_H^j ：直接効用関数，$\alpha_{ZH}^j, \beta_{ZH}^j$ ：分配パラメータ，γ_H^j ：効率パラメータ，σ_H^j ：代替弾力性パラメータ．

ラグランジュ未定乗数法により式(19)を解くと，以下の需要関数が得られる．

$$z_H^j = \frac{1}{\gamma_H^j \left(\beta_{ZH}^j\right)^{1-\sigma_H^j}} \left(\frac{\alpha_{ZH}^j}{q_{ZH}^j} \right)^{\sigma_H^j} \Psi_H^{j\,\frac{\sigma_H^j}{1-\sigma_H^j}} \cdot U_H^j \tag{20a}$$

$$l_H^j = \frac{1}{\gamma_H^j \left(1 - \beta_{ZH}^j\right)^{1-\sigma_H^j}} \left(\frac{1 - \alpha_{ZH}^j}{w^j} \right)^{\sigma_H^j} \Psi_H^{j\,\frac{\sigma_H^j}{1-\sigma_H^j}} \cdot U_H^j \tag{20b}$$

ただし，

$$\Psi_H^j = \left(\alpha_{ZH}^j\right)^{\sigma_H^j} \left(\frac{q_{ZH}^j}{\beta_{ZH}^j} \right)^{1-\sigma_H^j} + \left(1 - \alpha_{ZH}^j\right)^{\sigma_H^j} \left(\frac{w^j}{1 - \beta_{ZH}^j} \right)^{1-\sigma_H^j}.$$

式(20)を式(19a)に代入すると，支出水準が求められる．

$$e_H^j = \frac{1}{\gamma_H^j} \Psi_H^{j\,\frac{1}{1-\sigma_H^j}} \cdot U_H^j \tag{21}$$

支出水準とはそもそも価格が与えられた下である効用（ここでは U_H^j ）を実現するために必要な所得を意味する．今，家計所得は式(18)の可処分所得により与えられるため，価格が与えられるとすれば，式(21)の支出水準の式より効用水準 V_H^j は以下のようになる．

$$V_H^j = \frac{\Omega_H^j}{p_V^j} \tag{22}$$

ただし，V_H^j ：間接効用関数（効用水準），また簡単化のため $p_V^j \equiv \frac{1}{\gamma_H^j} \Psi_H^{j\,\frac{1}{1-\sigma_H^j}}$ とおく．

式(22)の効用水準 V_H^j を式(20)の U_H^j に代入すると，合成財消費量と余暇消費量が求められ，さらに式(21)から支出水準も得られる．すなわち，支出水準は以下のようになる．

$$e_H^j = p_V^j V_H^j \tag{23}$$

以上にて，**図-4**の最上位の各消費量が求められた．これ以降の定式化も，**図-4**のツリーにしたがって行われるが，それらは式(19)，(20)と同様であるため，ここでは割愛したい．

(3)　鉄道運輸サービス供給者の行動モデル

鉄道運輸サービス供給者である鉄道旅客運輸企業の生産行動モデルを示す．それは，(2) に示した運輸サービス需要者の企業の行動モデルと基本的には同じである．しかし，前述のリニア中央新幹線のみならず，鉄道整備には固定費用と呼ばれる多額の建設費用が必要となり，これらは需要の増減に対して簡単に調整することができないため，固定費用をどのように回収するのかが料金設定に関する大きな問題となっていた．そこで固定費用を考慮したCGEモデルを開発した細江ら[12)]を参考に，まず鉄道旅客運輸企業において固定費用を考慮した費用最小化問題を考えてみる．それが以下である．

$$C_T^{j,k} = \min_{z_T^{j,k}, cf_T^{j,k}} \left[\begin{array}{l} q_{ZT}^{j,k} z_T^{j,k} + \left(1 + \tau_{Fm}^j\right) pf_T^{j,k} cf_T^{j,k} \\ \qquad + p_{Con}^{j,k} \bar{x}_{Con,T}^{j,k} \end{array} \right] \tag{24a}$$

$$\text{s.t.}\, y_T^{j,k} =$$

$$\gamma_T^{j,k} \left[\bar{x}_{Con,T}^{j,k} \right] \left[\begin{array}{l} \alpha_{ZT}^{j,k} \left\{ \beta_{ZT}^{j,k} z_T^{j,k} \right\}^{\frac{\sigma_T^{j,k} - 1}{\sigma_T^{j,kj}}} \\ + \left(1 - \alpha_{ZT}^{j,k}\right) \left\{ \left(1 - \beta_{ZT}^{j,k}\right) cf_T^{j,k} \right\}^{\frac{\sigma_T^{j,k} - 1}{\sigma_T^{j,k}}} \end{array} \right]^{\frac{\sigma_T^{j,k}}{\sigma_T^{j,k} - 1}}$$

(24b)

ただし，添字 j,k ：地域 j から地域 k への輸送サービス，添字 T ：鉄道旅客運輸， p_{Con}^{j} ：建設部門（Con）の価格，$\bar{x}_{Con,T}^{j,k}$ ：建設投資需要，$[\bar{x}_{con,T}]$ ：$\gamma_T^{j,k}$ が[ ]内の $\bar{x}_{con,T}$ によって決定されることを意味する．

式(24a)の建設投資需要 $\bar{x}_{Con,T}^{j,k}$ は線路建設のための建設投資需要を意味する．そして，この投資需要は旅客運輸サービス需要の変化と無関係に固定的に必要なものと想定した．その結果，式(24a)の右辺第3項が固定費用を表すことになる．

式(24)を解いて得られる需要関数は以下となる．

$$z_T^{j,k} = \frac{1}{\gamma_T^{j,k}\left(\beta_{ZT}^{j,k}\right)^{1-\sigma_T^{j,k}}}\left(\frac{\alpha_{ZT}^{j,k}}{q_{ZT}^{j,k}}\right)^{\sigma_T^{j,k}} \Psi_T^{j,k\,\frac{\sigma_T^{j,k}}{1-\sigma_T^{j,k}}} y_T^{j,k} \tag{25a}$$

$$cf_T^{j,k} = \frac{1}{\gamma_T^{j,k}\left(1-\beta_{ZT}^{j,k}\right)^{1-\sigma_T^{j,k}}}\left(\frac{1-\alpha_{ZT}^{j,k}}{\left(1+\tau_T^{j,k}\right)pf_T^{j,k}}\right)^{\sigma_T^{j,k}} \Psi_T^{j,k\,\frac{\sigma_T^{j,k}}{1-\sigma_T^{j,k}}} y_T^{j,k} \tag{25b}$$

ただし，

$$\Psi_T^{j,k} = \left(\alpha_{ZT}^{j,k}\right)^{\sigma_T^{j,k}}\left(\frac{q_{ZT}^{j,k}}{\beta_{ZT}^{j,k}}\right)^{1-\sigma_T^{j,k}} + \left(1-\alpha_{ZT}^{j,k}\right)^{\sigma_T^{j,k}}\left(\frac{\left(1+\tau_T^{j}\right)pf_T^{j,k}}{1-\beta_{ZT}^{j,k}}\right)^{1-\sigma_T^{j,k}}.$$

式(25)を式(24a)に代入すると生産費用関数が以下のとおり求められる．

$$C_T^{j,k} = \frac{1}{\gamma_T^{j,k}} \Psi_T^{j,k\,\frac{1}{1-\sigma_T^{j,k}}} \cdot y_T^{j,k} + p_{Con}^{j}\bar{x}_{Con,T}^{j,k} \tag{26}$$

まず，限界生産費用により鉄道旅客運輸価格を決定することを考える．このときの鉄道旅客運輸価格 $p_{[MC]T}{}^{j,k}$ は，以下のように導出される．

$$p_{[MC]T}{}^{j,k}\left(=\frac{\partial C_T^{j,k}}{\partial y_T^{j,k}}\right) = \frac{1}{\gamma_T^{j,k}} \Psi_T^{j,k\,\frac{1}{1-\sigma_T^{j,k}}} \tag{27}$$

これを以下の利潤関数に代入する．

$$\begin{aligned}\pi_T^{j,k} &= p_T^{j,k} y_T^{j,k} - C_T^{j,k} \\ &= -p_{Con}^{j}\bar{x}_{Con,T}^{j,k}\end{aligned} \tag{28}$$

以上より，限界費用料金にて鉄道旅客運輸価格を決定する場合，鉄道旅客運輸企業の利潤は負となることがわかる．

そこで，平均生産費用により鉄道旅客運輸価格を決定することを考える．これは，式(40)の利潤がゼロになるときの価格として，平均費用原理による鉄道旅客運輸価格 $p_{[AC]T}{}^{j,k}$ は，以下のように導出される．

$$p_{[AC]T}{}^{j,k}\left(=\frac{C_T^{j,k}}{y_T^{j,k}}\right) = \frac{1}{\gamma_T^{j,k}} \Psi_T^{j,k\,\frac{1}{1-\sigma_T^{j,k}}} + \frac{p_{Con}^{j}\,\bar{x}_{ConT}^{j,k}}{y_T^{j,k}} \tag{29}$$

式(29)の下では利潤はゼロになる．

以上より，鉄道旅客運輸企業に対し，線路建設における固定費用の考慮を行い，さらに限界生産費用原理と平均生産費用原理に基づく料金（モデル上は鉄道旅客運輸価格）の決定について明らかにした．なお，固定費用 $p_{Con}^{j}\bar{x}_{Con,T}^{j,k}$ の支払先は，建設部門（Con）となる．また，リニア中央新幹線整備が鉄道運輸企業の生産行動に与える影響を評価できるように，鉄道運輸企業については生産要素投入行動を森杉を参考に変更する．

鉄道運輸企業は，労働と，新幹線やリニアといった資本を投入し，交通路を移動して主に人を輸送するという運輸サービスを生産している．このとき，交通整備等により時間短縮効果が生じると，その労働および資本の投入効率が向上することになる．なぜなら，時間短縮が生じれば同じ距離を移動するのに，より早く目的地に到達できることになり，それは同じ運輸サービスを生産するために投入される労働と，拘束時間で捉えた資本投入が少なくて済むことを意味するからである．

以上の現実的な運輸企業の行動が反映できるようにモデルを変更する．まず，鉄道運輸企業の生産要素投入行動モデルにおいて，生産技術制約となる合成生産要素関数が交通所要時間と労働，資本に関してゼロ次同次性を有すると仮定する．その意味は，例えば交通整備政策が実施され，OD 間の交通所要時間が半分に削減されたとすると，その OD 間を移動して輸送サービスを生産する運輸企業の労働と資本の投入量も半分で済むということである．なぜなら，既に述べた通り，交通所要時間が半分に削減されれば，同じ運輸サービスを生産するためには半分の時間で済むため，労働と資本の投入量も半分で済むからである．ゼロ次同次性を有する合成生産要素関数は以下のように表される．なお，ここでは鉄道旅客運輸 T_m を例にモデル化を示す．

$$cf_{Tm}^{j,k}\left(t_{Tm}^{j,k}, l_{Tm}^{j,k}, k_{Tm}^{j,k}\right) = cf_{Tm}^{j,k}\left(\lambda t_{Tm}^{j,k}, \lambda l_{Tm}^{j,k}, \lambda k_{Tm}^{j,k}\right) \tag{30}$$

ただし， $t_{Tm}^{j,k}$ ：鉄道運輸企業の地域j-k間の交通所要時間，$l_{Tm}^{j,k}, k_{Tm}^{j,k}$ ：労働投入量，資本投入量．

式(30)の λ を以下のようにおく．

$$\lambda = \frac{t_{Tm}^{j,k^A}}{t_{Tm}^{j,k}} \tag{31}$$

ただし，添字 A ：交通整備なしを表す．

式(31)を式(30)に代入すると，合成生産要素関数は以下のようになる．

$$cf_{Tm}^{j,k} = cf_{Tm}^{j,k}\left(eff_{Tm}^{j,k}\cdot l_{Tm}^{j,k}, eff_{Tm}^{j,k}\lambda\cdot k_{Tm}^{j,k}\right) \tag{32}$$

ただし，$eff_{Tm}^{j,k}$ ：$\left[\equiv \dfrac{t_{Tm}^{j,k^A}}{t_{Tm}^{j,k}}\right]$であり，運輸企業の生産要素投入の効率性を表す指標と解釈できる．

式(32)にしたがえば，鉄道運輸企業の労働，資本の投入量決定モデルは以下のようになる．

$$pf_{Tm}^{j,k} cf_{Tm}^{j,k} = \min_{l_{Tm}^{j,k}, k_{Tm}^{j,k}} \left[w_{Tm}^{j,k} l_{Tm}^{j,k} + r_{Tm}^{j,k} k_{Tm}^{j,k} \right] \tag{33a}$$

s.t. $cf_T^{j,k} =$

$$\gamma_{CFTm}^{j,k} \left[\begin{array}{l} \alpha_{LTm}^{j,k} \left\{ \beta_{LTm}^{j} eff_{Tm}^{j,k} \cdot l_{Tm}^{j,k} \right\}^{\frac{\sigma_{CFTm}^{j}-1}{\sigma_{CFTm}^{j}}} \\ +\left(1-\alpha_{LTm}^{j}\right)\left\{\left(1-\beta_{LTm}^{j}\right) eff_{Tm}^{j,k} \cdot k_{Tm}^{j,k}\right\}^{\frac{\sigma_{CFTm}^{j}-1}{\sigma_{CFTm}^{j}}} \end{array} \right]^{\frac{\sigma_{CFTm}^{j}}{\sigma_{CFTm}^{j}-1}} \tag{33b}$$

式(33)を解くと，以下の需要関数が得られる．

$$l_{Tm}^{j,k} = \frac{1}{\gamma_{CFTm}^{j,k} \left(\beta_{LTm}^{j,k} eff_{LTm}^{j,k}\right)^{1-\sigma_{CTm}^{j,k}}} \left(\frac{\alpha_{LTm}^{j,k}}{w_{Tm}^{j,k}}\right)^{\sigma_{CFTm}^{j,k}} \psi_{CFTm}^{j,k\ \frac{\sigma_{CFTm}^{j}}{1-\sigma_{CFTm}^{j}}} \cdot cf_{Tm}^{j,k} \tag{34a}$$

$$k_{Tm}^{j,k} = \frac{1}{\gamma_{CFTm}^{j,k} \left(\left\{1-\beta_{LTm}^{j,k}\right\} eff_{LTm}^{j,k}\right)^{1-\sigma_{CTm}^{j,k}}} \left(\frac{1-\alpha_{LTm}^{j,k}}{r_{Tm}^{j,k}}\right)^{\sigma_{CFTm}^{j,k}} \psi_{CFTm}^{j,k\ \frac{\sigma_{CFTm}^{j,k}}{1-\sigma_{CFTm}^{j,k}}} \cdot cf_{Tm}^{j,k} \tag{34b}$$

ただし，
$$\psi_{CFTm}^{j,k} = \left(\alpha_{LTm}^{j,k}\right)^{\sigma_{CTm}^{j,k}} \left(\frac{w_{Tm}^{j,k}}{\beta_{LTm}^{j,k} eff_{LTm}^{j,k}}\right)^{1-\sigma_{CFTm}^{j,k}} + \left(1-\alpha_{LTm}^{j,k}\right)^{\sigma_{CFTm}^{j,k}} \left(\frac{r_{Tm}^{j,k}}{\left\{1-\beta_{LTm}^{j,k}\right\} eff_{LTm}^{j,k}}\right)^{1-\sigma_{CFTm}^{j,k}}$$

式(34)を式(33a)に代入すると合成生産要素関数が求められる．

$$pf_T^{j,k} = \frac{1}{\gamma_{CFT}^{j,k}} \psi_{CFT}^{j,k\ \frac{1}{1-\sigma_{CFT}^{j,k}}} \tag{35}$$

残りは企業の行動モデルと一緒であるため割愛する．

(4) 市場均衡条件

本SCGEモデルの市場均衡条件式は以下のようになる．

n財市場：
$$Q_n^i = \sum_j \left[\begin{array}{l} \sum_m x_{nm}^{ij} + \sum_k \sum_{Fm} x_{nFm}^{ij,k} \\ + x_{nH}^{ij} + x_{nGC}^{ij} + x_{nGI}^{ij} + x_{nI}^{ij} \end{array} \right] \tag{36a}$$

運輸Tn市場：
$$Q_n^i = \sum_j \left[\begin{array}{l} \sum_m x_{nm}^{ij} + \sum_k \sum_{Fm} x_{nFm}^{ij,k} \\ + x_{nH}^{ij} + x_{nGC}^{ij} + x_{nGI}^{ij} + x_{nI}^{ij} \end{array} \right] \tag{36b}$$

労働市場：
$$T_H^j - \left(l_H^j + \sum_{Pm} \sum_k t_{Pm}^{kj} x_{PmH}^{kj} \right) = \sum_m \sum_j l_m^{ij} + \sum_{Fm} \sum_i l_{Fm}^{ij} + \sum_{Pm} \sum_i l_{Pm}^{ij} \tag{36c}$$

資本市場：
$$K_H^j = \sum_m \sum_j k_m^{ij} + \sum_{Fm} \sum_j k_{Fm}^{ij} + \sum_{Pm} \sum_j k_{Pm}^{ij} \tag{36d}$$

(5) 等価的偏差による便益定義

交通整備における便益の定義を行う．便益を等価的偏差（EV：Equivalent Variation）の概念に基づき定義すると，それは以下のように求められる．

$$EV^j = p_V^{jA}\left(V_H^{jA} - V_H^{jB}\right) \tag{37a}$$

ただし，添字A, B：それぞれ整備なし，ありを表す．

これに，式(22)の効用水準を代入するとEVが家計の実質所得の差となっていることがわかる．

$$EV^j = \frac{p_U^{j\ A}}{p_U^{j\ B}} \Omega_H^{j\ B} - \Omega_H^{j\ A} \tag{37b}$$

ここで，「実質」とは物価上昇率で除したものとの意味である．式(37b)では，整備なしの所得においては物価上昇率が1であるためそのままの所得を用いており，整備ありの所得は物価上昇率$\left(\dfrac{p_U^{j\ B}}{p_U^{j\ A}}\right)$で除したものとなっている．

3 リニア中央新幹線の便益計測

2.の不完全競争を考慮したSCGEモデルを用いて，リニア中央新幹線（品川駅―名古屋駅間，約286km）整備による経済効果を便益の概念に基づき計測した．なお，今回用いたモデルは，日本全国を北海道・東北，関東，山梨，静岡，長野，岐阜，中部，近畿，西日本の9地域間に分けたものである．

(1) 交通所要時間変化の算定

交通所要時間は，各地域の代表都市を選び，その都市間で簡単な鉄道ネットワークを作成し，最短経路探索によりリニア中央新幹線の整備有無に対するゾーン間所要時間の計測を行った．それを交通量にて重み付けした平均所要時間変化率を図-5示す．図の横軸が発地（O），縦軸に表されている地域が着地（D）である．これよりどの地域間においても大きく所要時間が短縮されているが，中でも山梨―中部間などで大きく所要時間が短縮されていることがわかる．

(2)　運輸価格の変化率

運輸価格の変化率を図-6に示す．これより，まずは，平均費用料金よりも限界費用料金のほうが運輸価格がより低下するため，変化率が高いことが読み取れる．また，2.(3)鉄道運輸サービス供給者の所で述べた通り，本研究で用いたSCGEモデルには労働，資本の効率化が鉄道運輸企業においては反映されるようモデルを構築しているため，その点において，この結果に反映されていると考えられる．

(3)　交通量変化率

交通量の変化率を図-7に示す．ここでも，平均費用料金よりも限界費用料金のほうが価格が安いため，限界費用料金のほうが変化率がどの地域間を見ても高いことが読み取れる．また，交通所要時間変化率が大きいとことでは，交通量の変化率も大きいことがわかる．

(4)　地域別産業別生産量変化率

各地域別の産業別生産量変化率を図-8に示す．これより鉄道旅客運輸の生産量変化率が大きく伸びているほか，リニア中央新幹線整備の固定費用を投入する建設部門，そして商業が主に大きく変化することがわかる．

(5)　料金換算と輸送量

表-1　関東→中部の料金換算と輸送量

関東→中部	SCGEモデルの運輸価格	料金換算(円)	輸送量(千人/年)
平均費用料金	1.244	12,866	14,043
現状	1.002	10,360	10,064
限界費用料金	0.535	5,528	18,352

実際には9地域×9地域間のODがある中で，ここでは代表的な関東→中部の料金換算と輸送量を表-1に示す．なお，料金換算は，現状の料金にSCGEモデルの運輸価格の比率を掛けることで，輸送量は旅客純流動調査[13)]のデータを使用し，現在の輸送量を求め，平均費用料金，限界費用料金の輸送量はSCGEモデルで算出した額ベースの運輸企業の需要量の比率からそれぞれ算出した．

(6)　各地域の便益計測結果

最後に式(48a)に基づく家計の地域帰着便益を図-9に示す．まず，平均費用料金をした場合の単年度便益は2,339億円，純便益は現在価値換算で5.26兆円（計算期間50年，社会的割引率4%）となった．次に限界費用料金をした場合の単年度便益は4,686億円，総便益は現在価値換算で10.54兆円（計算期間50年，社会的割引率4%），また純便益は10.54兆円からJR東海が公表している固定費5.1兆円[14)] を差し引いた5.44兆円という結果が得られた．以上より限界費用料金時のほうが平均費用料金時に比べ純便益が約0.18兆円高い結果となった．

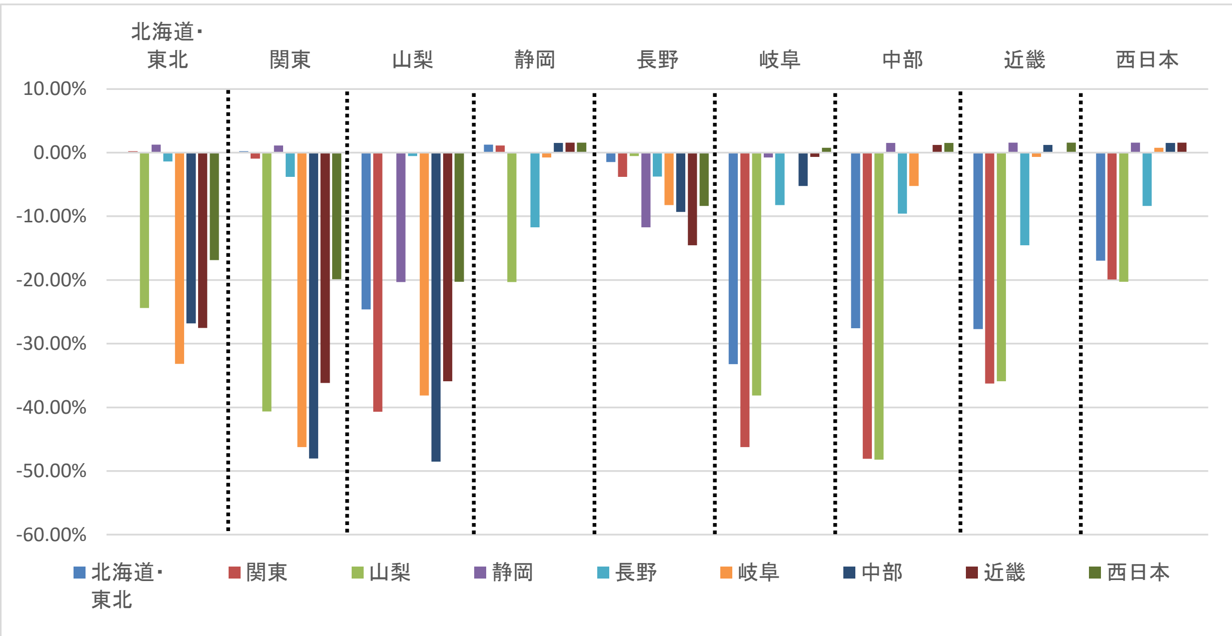

図-5　鉄道旅客運輸の所要時間変化率

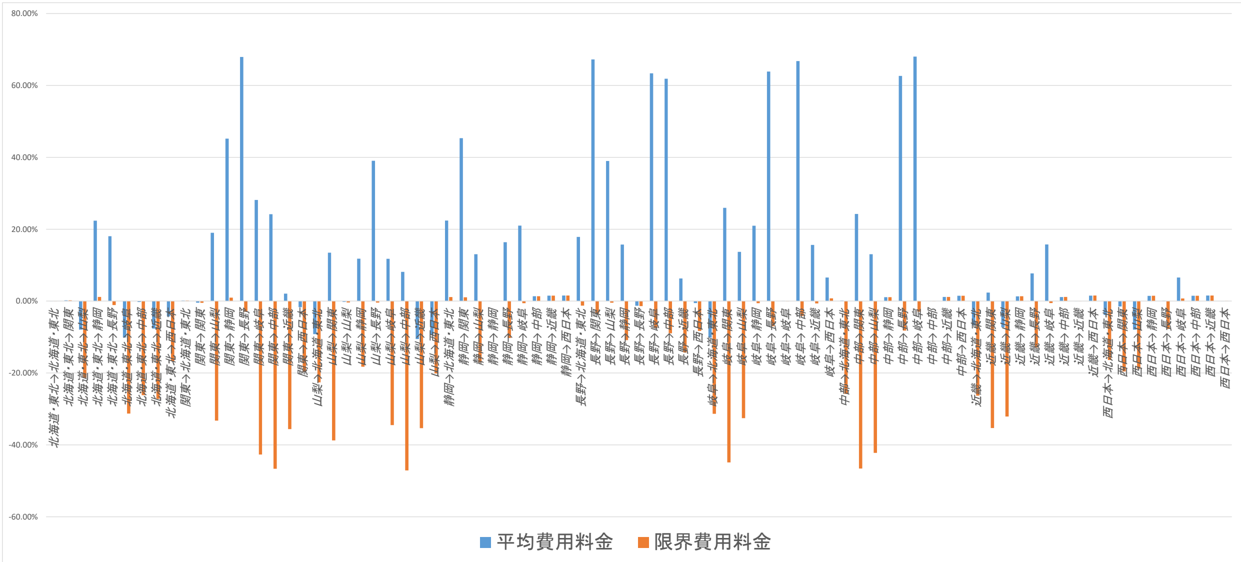

図-6 鉄道旅客運輸価格の変化率

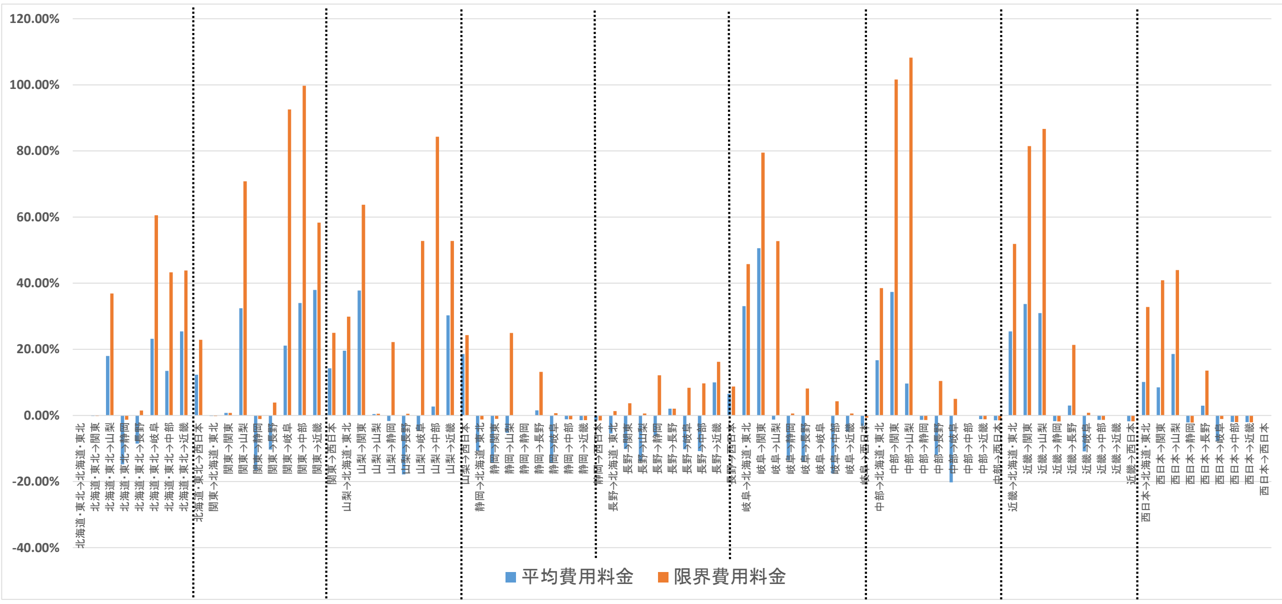

図-7 交通量の変化率

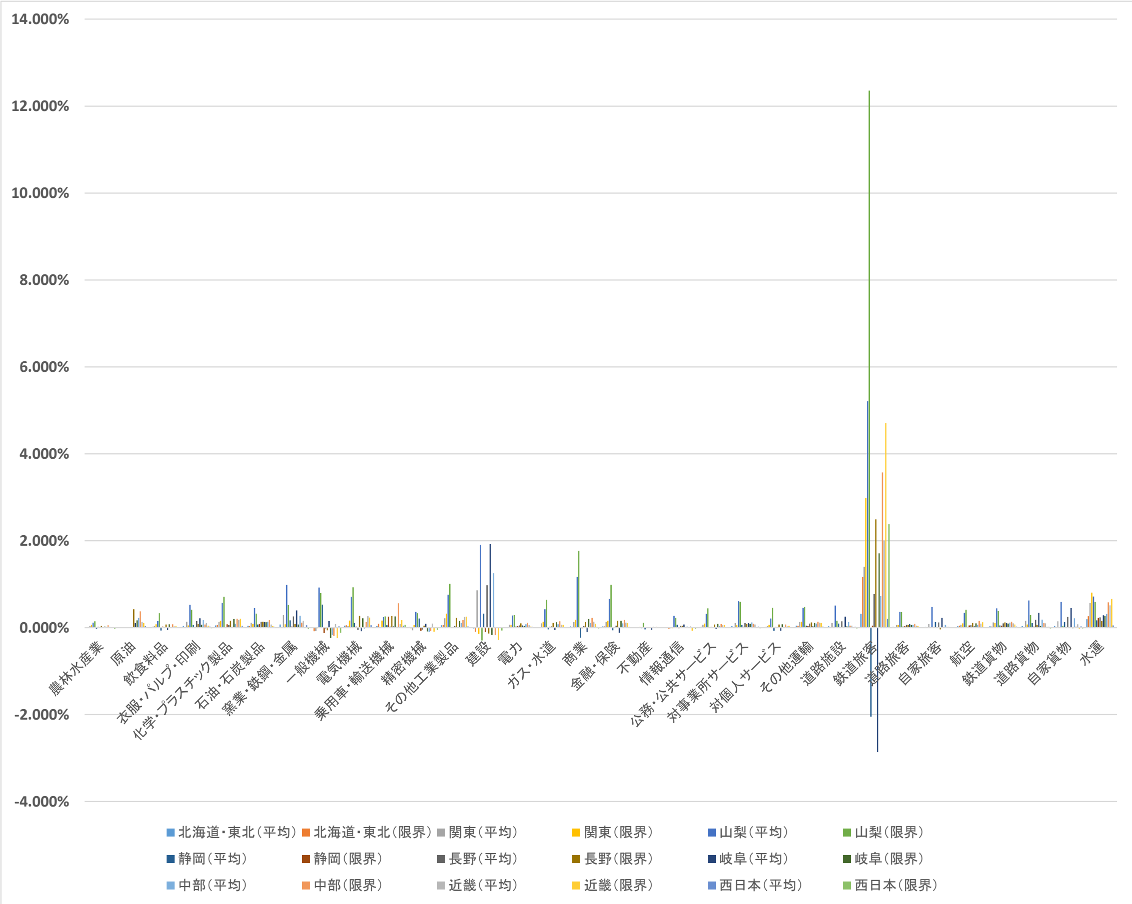

図-8　地域別産業別生産量変化率

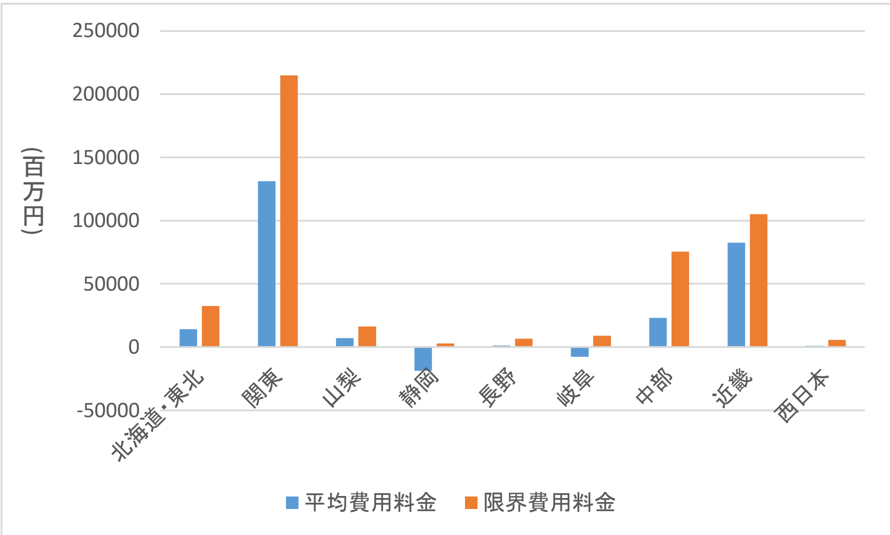

図-9　地域別の便益計測結果

5. おわりに

リニア中央新幹線の経済効果の計測は，費用便益分析の枠組みや空間的応用一般均衡（SCGE）モデルを用いてなされてきた．しかし，リニア中央新幹線の整備には多額の建設費用が必要となる．この固定費用は需要の増減によって簡単に調整することができないため固定費用と呼ばれている．リニア中央新幹線の整備においてはJR東海が建設費用をすべて負担して整備することから．その固定費用分も料金により回収される．ところがこれまでのリニア中央新幹線整備の経済効果計測では，いずれの計測においてもそうした固定費用を料金により回収するスキームがとられていなかった．そこで本研究では，筆者らがこれまで開発してきたSCGEモデルに固定費用を考慮し，リニア中央新幹線の経済効果計測を行った．

その結果，平均費用課金した場合には50年換算で純便益が5.26兆円，そして，限界費用課金をした場合の純便益は約5.44兆円と計測された．このことから限界費用料金と平均費用料金によるスキームがリニア中央新幹線整備の経済効果にもたらす影響は0.18兆円となることがわかった．今後は，発表当日までに環境外部性として地球温暖化問題を取り上げ，リニア中央新幹線の開通に伴う二酸化炭素（CO_2）排出量が計測できるフレームを構築する．その上で，リニア中央新幹線の開通と，その料金設定の違いがCO_2排出に与える影響を明らかにする．さらに比較対象として，東京－名古屋間の新東名高速道路整備によるCO_2排出量の計測も行い，一単位の便益を生むのにどれだけのCO_2が排出されるのかを両者のケースで算定し，どちらが環境面で優位であるのかを明らかにする予定である．

謝辞：本研究を進めるにあたり，多くの方々からご指導，ご協力をいただいた．特に，日本交通政策研究会では，日本総合研究所松岡斉所長，日本大学福田敦教授，東北大学河野達仁教授より大変貴重なコメントをいただいた．日本交通政策研究会の関係者各位とともに感謝の意を表する次第である．

参考文献

1) 長野県建設部リニア整備推進局：リニア中央新幹線の概要について長野県，2017 (http://www.pref.nagano.lg.jp/linear-shin/kurashi/kotsu/linear/gaiyou.html).
2) 交通政策審議会陸上交通分科会鉄道部会中央新幹線小委員会：費用対効果分析等の調査結果について，第 9 回　交通政策審議会陸上交通分科会鉄道部会中央新幹線小委員会資料，2010.
3) 山口勝弘，山崎清：中央リニア新幹線導入が経済と環境に及ぼす影響，交通学研究，Vol.53，pp.45-54，2009.
4) 山梨県総合政策部リニア環境未来都市推進室：リニア影響基礎調査業務　報告書，山梨県，2009.
5) 宮下光宏，小池淳司，上田孝行：アジア高速鉄道整備の経済・環境影響の国際比較―旅客を考慮したSCGE モデルによる計量分析-，土木計画学研究・論文集，No.4，pp316-332，2012.
6) 樋野誠一，蛯子哲，河上翔太，國府田樹，山本恭子，西村巧：リニア中央新幹線の整備効果，IBS Annual Report，研究活動報告，pp.55-60，2015.
7) 森杉壽芳：交通ネットワーク分析を統合した SCGE モデルによるリニア中央新幹線整備の便益評価-便益と実質 GDP 変化との関係の整理を中心に―，日交研シリーズ A-672，日本交通政策研究会，2017.
8) 武藤慎一：SCGE モデルを用いた便益に基づくリニア中央新幹線の経済効果計測，自動車交通研究，pp.38-39，2016.
9) 平林和樹，武藤慎一：固定費用を考慮した SCGE モデルによるリニア中央新幹線整備の経済評価，土木計画学研究・講演集，Vol.56，CD-ROM_P-51，2017.
10) 山口顕秀：公共政策への経済学的アプローチ，中央学院大学法学論叢，Vol.30，No.1，pp.157-177，2016.
11) 城所幸弘：集積の経済を考慮した都市，交通分析－政策分析への応用－，日交研シリーズ A-583，日本交通政策研究会，2013.
12) 細江宣裕，我澤賢之，橋本日出男：テキストブック応用一般均衡モデリング　プログラムからシミュレーションまで，東京大学出版会，pp175-209，2004.
13) 国土交通省：都道府県間流動表（出発地から目的地）[交通機関別流動表]，2010.
14) JR 東海：中央新幹線　東京都・大阪市間のデータについて，2009. http://jr-central.co.jp/news/release/nws000397.html

(2018.4 27. 受付)