交通費用を内生化したSCGEモデルによる交通政策評価

武藤　慎一[1]・河野　達仁[2]・福田　敦[3]・東山　洋平[4]

[1]正会員　山梨大学准教授　大学院総合研究部工学域（〒400-8511 山梨県甲府市武田4-3-11）
E-mail: smutoh@yamanashi.ac.jp

[2]正会員　東北大学教授　大学院情報科学研究科（〒980-8579 宮城県仙台市青葉区青葉6-3-9）

[3]正会員　日本大学教授　理工学部交通システム工学科（〒274-8501 千葉県船橋市習志野台7-24-1）

[4]学生員　日本大学　大学院理工学研究科社会交通工学専攻（〒274-8501 千葉県船橋市習志野台7-24-1）

交通政策評価に用られてきた空間的応用一般均衡（SCGE）モデルは，交通サービス生産が組み込まれていないか，組み込まれていても交通政策がその生産技術に及ぼす影響が考慮されていなかった．そのため交通政策が交通生産費用を変化させ，それが交通サービス価格変化を通じてもたらす波及的影響の評価ができていなかった．また，自家輸送が考慮されていないという問題もあった．本研究では，自家輸送を含む全運輸部門の交通サービス生産をモデルに組み込んだSCGEモデルを開発した．それにより，交通政策の交通生産技術改善等による交通費用変化を内生的に評価できるようになり，精緻な便益計測が行えるようになった．さらに，便益帰着分析により計測される便益の理論的妥当性を検証した．

Key Words : *SCGE model, transportation network, transportation service producing, benefti incidence analysis*

1. はじめに

交通整備を含む交通政策の経済的影響や効果を明らかにするために，これまで空間的応用一般均衡（SCGE：Spatial Computable General Equilibrium）モデルを用いた研究が精力的に進められてきた（Bröcker[1]，宮城，本部[2]，小池ら[3), 4)]など）．SCGEモデルの適用により，交通政策が地域経済にもたらす影響や効果が明らかになり，最終的にはそれらを便益によって統一的に評価できる．特に，地域別および経済主体（家計，企業，行政(国，地方公共団体)）別の帰着便益が計測できる点に特長がある[5), 6)]．しかし，従来のSCGEモデルには，1)交通サービス生産が組み込まれていない，2)自家輸送が分離されていない，という問題があった．

1)は，従来のSCGEモデルでは交通サービスを生産する運輸部門が存在していない，あるいは存在しても交通政策が交通サービス生産技術に及ぼす影響が考慮されていなかったため，交通政策の影響評価が不正確であったという問題である．例えば，iceberg型輸送モデルを採用したものやaccessibility指標により交通政策の影響をみているものは，運輸部門自体が存在していない前者のタイプである．また，運輸部門を独立させた後者のタイプでも，交通政策の運輸部門の生産行動に与える影響までは評価できていなかった．

このことは，交通政策の実施による交通生産費用の変化が内生的には評価できていないことを意味し，そのため交通サービス価格変化を通じて波及的にもたらされる経済的影響も正しく評価できていなかったといえる．それゆえ，計測される便益の理論的妥当性にも疑念があるといわざるを得なかったのである．さらに，高速道路会社といった運輸サービスを生産する際に必要なサービスの供給者が明確化されていないという問題もあった．

2)の自家輸送とは，企業，家計が自身で保有する自動車で行う輸送であり，家計のマイカーによる輸送も含まれる．自家輸送は，現在の交通では非常に重要な位置を占めているにも関わらず，従来のSCGEモデルはそれらが分離されていなかったため，交通政策の自家輸送にもたらす効果や影響が十分には評価できていなかった．

そこで本研究では，自家輸送を含むすべての運輸部門の交通サービス生産を組み込んだSCGEモデルを開発する．特に本モデルでは，交通というものがある地域だけに発生する性質のものではなく，地域間すなわちODに対して生じるものである点に注目し，交通サービス生産がOD別になされるとした点に大きな特徴がある．これ

により交通政策もOD別に設定でき，それらが交通生産技術を改善させることを通じて生じる交通費用変化を内生的に評価できる．さらに，それは交通サービス価格変化を通じて交通需要に影響を与え，他の財価格にも波及的影響をもたらす．最終的には，それらが家計の効用水準を上昇させ，その効用上昇分を便益換算することにより正確な便益評価が可能になるのである．

本研究では，構築したSCGEモデルにより計測される便益の理論的妥当性も検証する．便益帰着分析により，本SCGEモデルで計測される便益がどのような項目に分解されるのかを明らかにし[7]，それを費用便益分析マニュアル[8]等で示されている発生ベースの便益と整合的であるかを検証する．整合していれば，本SCGEモデルが理論的に妥当であり，信頼性があると判断できると考えたものである．

2. 既存SCGEモデルの問題

2.では，既存SCGEモデルを整理して，1.で説明した既存モデルの問題点を詳細に説明する．

まず，1)交通生産が組み込まれていないとしたiceberg型SCGEモデルには，BröckerのCGEurope[1]，Tavasszy, Thissen and OosterhavenのRAEM[9]，宮城，本部[3]，小池らのRAEM-Light[4, 5]，Haddad and Hewings[10]など，多くのモデルが存在する．上田[11]には，iceberg型モデルとは「財消費には交通費用相当分の負担が必要であり，それは財の追加的消費として表現され，その分も産業により生産される（iceberg型交通費用の仮定）」として輸送を扱うモデルと示されている．モデル化が単純なため多くのSCGEモデルで採用されてきたものと考えられる．ただし，注意すべきは交通費用に相当する追加的消費とは，あくまで当該財のことであり輸送サービスではないという点である．すなわち，iceberg型モデルで輸送費用と言っているものは，輸送費用ではなく当該財の生産費用ということになる．そのため，iceberg型モデルでは交通政策の輸送費用に与える影響は評価できていないし，そもそも輸送に係わる単位費用である輸送価格が存在していないのである．一般均衡モデルとは，すべての財および生産要素の価格が内生化されたモデルのことであるため，輸送価格が存在しないiceberg型SCGEモデルは一般均衡体系になっていないことになる．これまでのSCGEモデル研究では，一般均衡モデルの特長である交通政策等が市場メカニズムを通じてもたらされる波及的影響が評価できると強調されていたが，その主張の根拠である一般均衡体系という基礎が崩れている可能性が高い．宮城[12]もiceberg型SCGEモデルに疑問を呈しているが，その根拠と同様と思われる．

次に，accessibility指標を用いたSCGEモデルには，Kim, Kim and Hewings[12]がある．そこでは，各企業の生産関数の生産効率性パラメータがaccessibilityの関数となっており，交通整備政策によるaccessibility変化が企業の生産性を直接向上させることを想定したものになっている．しかし，accessibility変化がどのようなメカニズムによって企業の生産性を向上させるのかは説明されていない．これは，交通サービス生産を明確に組み込まなかったため，直接企業の生産性を向上させるとして表現せざるを得なかったものと考えられる．結局このタイプのSCGEモデルもiceberg型SCGEモデルと同様，輸送（交通）費用が内生化されておらず，交通価格も考慮できていないといえる．交通整備政策を正確に評価するためには，輸送のメカニズムすなわち輸送という交通サービス生産のメカニズムを厳密にモデル化することが必要不可欠といえる．

以上に対し，Ando and Meng[14]，孟，安藤[15]，宮城[12]，伴[18]は運輸部門を独立させたSCGEモデルを提案している．これらでは，交通サービス生産が明示的に考慮されている．しかし，Ando and Meng[14]，孟，安藤[15]は運輸価格が明示的には計算されない構造となっており，iceberg型モデルにおける輸送価格が外生的との問題は結局解消されていない．一方，宮城[12]，伴[16]は運輸部門を独立的に扱い，運輸価格も内生化されている．このうち伴は，財政負担格差，便益格差の是正策等がマクロ経済に及ぼす影響の評価を主目的としたSCGEモデルを開発したものであるが，運輸部門のイノベーションに関する評価も行っており，これが交通整備評価の意味と解釈できる．

宮城，伴は，輸送価格を意味する運輸価格が内生化されているが，しかし，まだ交通整備の表現に問題があると考えられる．宮城は地域間交易モデルのシェア・パラメータ（宮城では $\left\{\varphi_i^{rs}\right\}$ [12]）を，地域間所要時間が変数の重力モデルにより定式化し，それを介した交通整備による時間短縮効果が評価されている．これは，交通需要者の交易に係わる地域選択において，交通整備対象地域の効率性が向上したものとして，交通整備効果を表現しているといえる．一方，伴は「北海道地域内および北海道と関東間の運輸サービスの投入量が20%削減できる技術革新が生じた」として，運輸の技術革新すなわち交通整備を評価している．これは，交通整備によって運輸サービス需要が効率化されることを想定したものと考えられる．以上より，宮城[12]，伴[16]とも，交通整備の影響を交通サービス需要者側の効率性向上として扱っていることがわかる．ここでは，その妥当性を検討したい．

ここでの対象は物流とし，輸送は財購入者とは別の運輸企業によって行われているとする．森杉[17]は，これを私的物流あるいは業務物流のケースと呼び，財の購入者すなわち輸送サービス需要者が，財の輸送に係わる時間

を消費しない点が特長であるとしている．そのため，輸送サービス需要者側に発生する効果は，資源としての時間価値によるものではなく商品としての時間価値によるものであると整理している．これを踏まえると，交通サービス需要者側の効果を評価している宮城[12]および伴[16]は，商品としての時間価値による効果を計測していることになる．しかし，それは資源としての時間価値による便益は計測できていないことを意味する．現実は，交通整備によって生じる時間短縮が貨物輸送者の移動時間および貨物自動車の移動に係わる拘束時間を節約させており，資源としての時間価値による便益も生じているはずである．これが，宮城，伴では計測されていないのである．それは，交通整備が交通サービスの生産側にもたらす効果を適切に捉えられていないためと考えられ，したがって，宮城，伴は，交通サービス生産は明示化されているものの，交通整備の表現としては不十分といえるのである．

2)自家輸送が考慮されていない問題は，太田，加藤，小島[18]が「交通整備の評価を行うにあたり，自家輸送の考慮は必須である」と述べているように，現実の交通整備評価において重要な問題である．しかし，従来のSCGEモデルでこれらを明示的に取り扱っているものはほとんどない．その最大の理由は，SCGEモデルを計算する際のデータセットとなる地域間産業連関（IO：Inputo-Output）表において，自家輸送が考慮されていないためと考えられる．現在，公的機関によって公表されている地域間IO表は，経済産業省の9地域間IO表のみであるが[19]，そこでは自家輸送部門は考慮されていない．他の地域間IO表でも，公式なものとしては今のところ自家輸送部門を考慮したものは見当たらない．データがなければ計算ができないため，既存SCGEモデルでは自家輸送が考慮していなかったものと考えられる．

例えばiceberg型のSCGEモデルは，産業連関表における生産者価格表と購入者価格表の差から輸送マージンを推計している[20]．通常の購入者価格表は自家貨物輸送が考慮されていないため，そこから推計される輸送マージン率にも自家輸送は含まれていないといえる．また，自家旅客輸送に関しては，これまで旅客交通を扱ったSCGEモデル自体がそれほど多くはない．Bröcker[21]は旅客を取り入れる試みを行っているが，SCGEモデルとは独立的な部分均衡型モデルを別途作成し，旅客の便益を算出してそれをSCGEモデルの便益に加えるという理論的整合性を無視した計算となっており，自家輸送の考慮以前の問題である．わが国でも旅客輸送を考慮したSCGEモデルが提案されているが，新幹線やリニア中央新幹線等の営業輸送が対象であり[22), 23]，そこでは地域間IO表の鉄道運輸データを用いれば良かったため，自家旅客輸送まで考慮する必要がなかったものといえる．

こうした状況に対し，武藤[24]は経済産業省の9地域間IO表をベースに，自家輸送を考慮した地域間IO表を作成した．わが国では全国IO表において自家輸送が考慮されており，それを9地域に分配することで9地域間の自家輸送データを推計したものである．ただし，全国IO表でも自家輸送部門の付加価値や，家計の自家旅客輸送消費は考慮されていなかった．そこで武藤[24]は，太田，加藤，小島[18]が提案している推計方法を参考に，9地域間IO表においても自家輸送部門の付加価値や家計の自家輸送消費の推計を行った．この9地域間IO表を用いることにより，データの問題は解決される．ただし，SCGEモデルに自家輸送部門の行動をどのように組み入れるのかはまだ課題として残っており，本研究はこの点を整理したものである．

以上を踏まえ本研究では，自家輸送を含むすべての運輸部門の交通サービス生産を組み込んだSCGEモデルを開発する．これにより，輸送という交通サービスの生産構造が厳密に考慮されることになり，交通政策が交通サービス生産側にもたらす効果を明示的に表現することが可能となる．ここで，交通整備政策を例に，具体的な交通サービス生産をもたらす効果の表現方法を検討する．

従来のSCGE分析では，例えば交通整備政策の評価を行う際，政策変数としてゾーン間所要時間が用いられていた．すなわち，OD別に交通整備の影響が評価できるように政策設定がなされていたものといえる．当然，本研究でもOD別の影響評価が行えるようなSCGEモデルとしたい．しかし，その場合に運輸企業が，果たしてどのようなレベルの輸送に対して運輸サービスを供給していると想定しているのかが，実は曖昧であるとの問題に直面する．そこで，ここで考慮する運輸企業は，立地する地域 j において，貨物であれば地域 i から移入される財の輸送に対して，旅客であれば地域 i へ移動する交通に対して，それぞれ運輸サービスを供給するというOD別の運輸サービス生産を考慮するものとした．この点も，本SCGEモデルの大きな特長である．次章以降では，本研究で構築した具体的なSCGEモデルの構造を示す．

3. 交通生産を明示化したSCGEモデル

(1) モデルの前提条件

本研究のSCGEモデルは，交通サービス生産を明示化したものであるが，大きな枠組みは標準的な(S)CGEモデル（例えば，細江[25]ら，上田[11]など）と同じである．すなわち，**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，政府，公的投資部門，民間投資部門が存在する．これに加えて，運輸企業も存在しているものとし，運輸企業は，貨物と旅

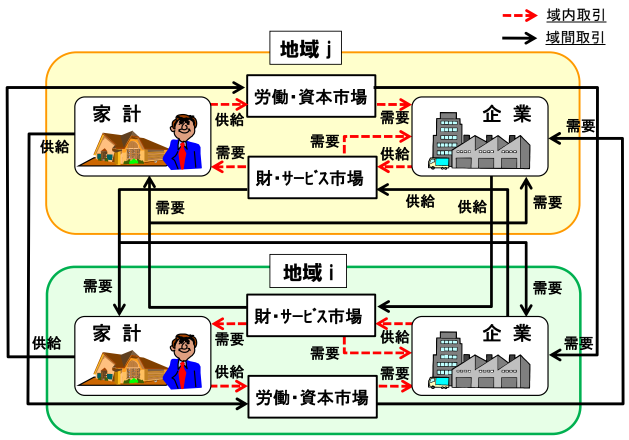

図-1 SCGEモデルの全体構成

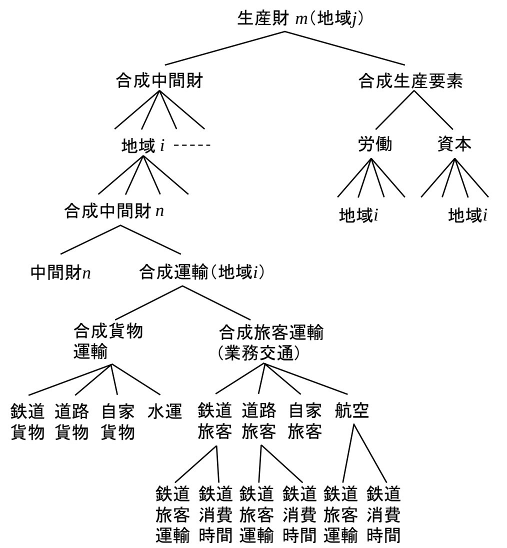

図-2 企業の生産行動モデルのツリー構造

客の別，それぞれ交通機関（ここでは鉄道，道路，自家，航空，水運を考慮）別に考慮されるとする．

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，生産要素や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．政府は当該地域から徴収する地方税と中央政府から交付される地方交付税を得て，その一部を公的投資部門に支出し，残りは政府消費に充てて公共サービスを供給する．公的投資部門は政府から公共投資費用を受け取り，それを公共投資需要に充てて公共投資を実行する．民間投資部門は，家計貯蓄と域外貯蓄を受け取り，それを民間投資需要に充てて民間投資を行う．なお，SCGEモデルでは**図-1**のように，家計と企業，そして他の主体も他地域から財，サービスが購入できるとされる点に特長がある．

こうした標準的(S)CGEモデルの枠組みに加えて，運輸部門の活動を現実に即してモデル化する．具体的には，まず各主体の財の購入には運輸サービス投入が必要であるとする．SCGEモデルでは，どの地域から財を購入するのかという選択も考慮されることから，運輸サービスも地域間の投入量，すなわちOD別投入量が求められる．そして，この運輸サービスは，貨物と旅客に分けられ，それぞれ交通機関選択まで考慮されるものとする．一方，運輸サービスの供給は各地域に存在する運輸企業によってなされるとするが，運輸サービス投入がOD別に求められることから，運輸サービス供給もOD別になされるものとする．これが本SCGEモデルの最大の特長である．

次項では，運輸サービス需要者の行動モデルを説明し，その後，運輸サービス供給者の行動モデルを説明する．

(2) 運輸サービス需要者の行動モデル

a) 企業の行動モデル

運輸サービス需要者のうち，まず企業の行動モデルを示す．それらは，基本的には標準的な(S)CGEモデル[11),25)]と同様である．

企業の生産行動モデルのツリー構造を**図-2**に示す．企業は，まず総合成中間財と合成生産要素の各投入量を決定し，総合成中間財に対し購入地域の選択を行った後，それぞれの地域別総合成中間財投入に対し，*n* 財別の合成中間財投入量を決定する．

本モデルではこの*n* 財別の合成中間財投入には，合成運輸サービスを投入する必要があるとする．これは貨物運輸と旅客運輸からなり，貨物運輸は中間財や完成品を輸送するために必要な交通を意味し，旅客運輸は打合せや出張等のための業務トリップを意味する．企業は，*n* 財別の合成中間財投入に対して，*n* 財の投入量と合成運輸サービス投入量を決定する．さらに，合成運輸に対し，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．

本SCGEモデルの特長として，交通機関に自家輸送を含めていることがある．自家輸送とは，自身で保有する交通手段を用いて，財あるいは人の輸送を行うものである．全国の産業連関表には自家輸送部門が存在し，生産額などが示されているが，地域間産業連関表にはそうした部門はなく，そのためこれまでのSCGE分析では自家輸送が考慮された例がほとんどない．しかし，自家輸送が現在の交通において占める役割は大きく，本研究ではそれらを明示的に考慮することとした．なお，ここで対象とする自家輸送は，社用車や家計のマイカーなど自動車とする．そして，全国産業連関表で想定されているように，仮説部門として貨物，旅客それぞれに対し自家（自動車）輸送部門を設け，まず当該部門が自家輸送サービスを生産し，それを企業および家計が消費するものとした．この自家輸送サービス消費をツリー上に表現したものが**図-2**ということになる．なお，自家輸送サービ

スの生産側については次節以降にて改めて説明する．

最後に，旅客運輸の鉄道，道路（バス，タクシー，ハイヤーなど），航空については，各旅客運輸の消費時間も考慮するものとした．これらの旅客輸送は，利用者自らが運転ものではないため，移動に伴い運輸サービスとともに時間資源も投入されると想定したものである．自家輸送はここでは運転者のみの乗車を想定し，また運転者の消費時間は自家輸送サービスを生産する際の労働投入として考慮するものとしたことにより，利用としての消費時間は考慮しないものとした．

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される．本SCGEモデルでは，生産技術を表すのにBarro and Sara-i-Martin[26]で示されたCES関数（Barro型CES関数）を用いることにした．Barro型CES関数は，代替弾力性をゼロとした際，正確にLeontief型関数が導出される点に最大の特長がある．詳細は，武藤，桐越[27]を参照されたい．以上の定式化をここですべて示すことは煩雑になるため，付録Ａにまとめて示すことにし，以下には図-2の最上位の総合成中間財，合成生産要素の投入量決定モデルのみを示す．その費用最小化問題は以下のようになる．

$$p^j_m y^j_m = \min_{z^j_m,\, cf^j_m} \left[q^j_{Zm} z^j_m + \left(1+\tau^j_m\right) pf^j_m cf^j_m \right] \tag{1a}$$

$$\text{s.t.}\ y^j_m = \gamma^j_m \left[\begin{array}{l} \alpha^j_{Zm}\left\{\beta^j_{Zm} z^j_m\right\}^{\frac{\sigma^j_m-1}{\sigma^j_m}} \\ +\left(1-\alpha^j_{Zm}\right)\left\{\left(1-\beta^j_{Zm}\right) cf^j_m\right\}^{\frac{\sigma^j_m-1}{\sigma^j_m}} \end{array} \right]^{\frac{\sigma^j_m}{\sigma^j_m-1}} \tag{1b}$$

ただし，y^j_m, p^j_m ：地域 j での財mの生産量と価格，z^j_m, q^j_{Zm} ：総合成中間財投入量とその価格，cf^j_m, pf^j_m ：合成生産要素投入量とその価格，τ^j_m ：純間接税率（間接税率－補助率），$\alpha^j_{Zm}, \beta^j_{Zm}$ ：分配パラメータ，γ^j_m ：効率パラメータ，σ^j_m ：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．

$$z^j_m = \frac{1}{\gamma^j_m \left(\beta^j_{Zm}\right)^{1-\sigma^j_m}} \left(\frac{\alpha^j_{Zm}}{q^j_{Zm}}\right)^{\sigma^j_m} {\Psi^j_m}^{\frac{\sigma^j_m}{1-\sigma^j_m}} y^j_m \tag{2a}$$

$$cf^j_m = \frac{1}{\gamma^j_m \left(1-\beta^j_{Zm}\right)^{1-\sigma^j_m}} \left(\frac{1-\alpha^j_{Zm}}{\left(1+\tau^j_m\right) pf^j_m}\right)^{\sigma^j_m} {\Psi^j_m}^{\frac{\sigma^j_m}{1-\sigma^j_m}} y^j_m \tag{2b}$$

ただし，

$$\Psi^j_m = \left(\alpha^j_{Zm}\right)^{\sigma^j_m} \left(\frac{q^j_{Zm}}{\beta^j_{Zm}}\right)^{1-\sigma^j_m} + \left(1-\alpha^j_{Zm}\right)^{\sigma^j_m} \left(\frac{\left\{1+\tau^j_m\right\} pf^j_m}{1-\beta^j_{Zm}}\right)^{1-\sigma^j_m}.$$

式(2)を式(1)の目的関数に代入すると，m 財価格が求められる．

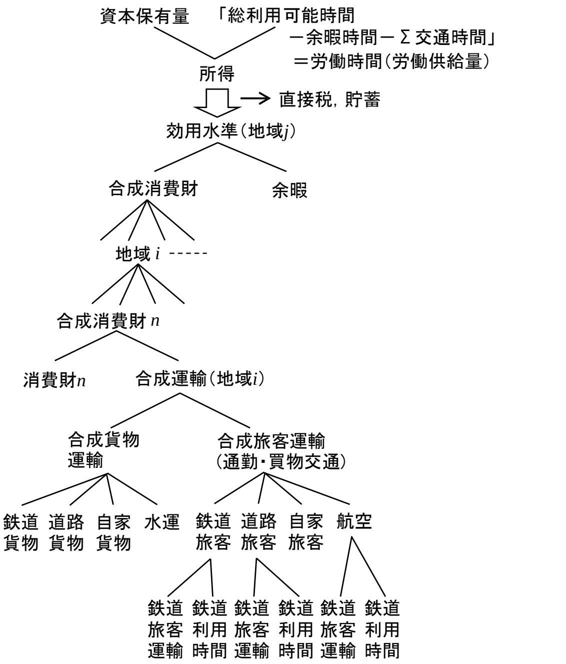

図-3　家計の財消費モデルのツリー構造

$$p^j_m = \frac{1}{\gamma^j_m} {\Psi^j_m}^{\frac{1}{1-\sigma^j_m}} \tag{3}$$

これ以降の定式化は付録Ａにまとめて示した．そこでは，各段階の費用最小化問題，需要関数，価格式を示している．運輸サービス投入についてもそこには示されているが，その定式化の枠組みは他の段階と全く同じであることがわかる．

付録Ａの定式化も踏まえると，式(3)は地域 i の n 財価格，地域 i の交通機関別の貨物運輸価格および旅客運輸の一般化価格の合成価格であることがわかる．これより，本SCGEモデルは，各価格変化，特に運輸価格変化が，当該財価格変化に反映される構造となっていることがわかる．

b) 家計の行動モデル

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モデルに係わるツリー構造は図-3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ものとする．家計の可処分所得は以下のようになる．

$$\Omega^j_H = \left(w^j T^j_H + r^j K^j_H\right)\left(1-\tau^j_H\right) - S^j_H \tag{4}$$

ただし，Ω^j_H ：地域 j の家計の可処分所得，T^j_H, w^j ：家計の総利用可能時間と賃金率，K^j_H, r^j ：家計の資本保

有量と利子率，τ_H^j：直接税率，S_H^j：家計の貯蓄額.

この可処分所得より，家計はまず総合成財と余暇の各消費量を決定する．次に，総合成財消費に対し購入地域の選択を行った後，それぞれの地域別総合成財消費に対し，*n* 財別の合成財消費量を決定する．企業と同様，この*n* 財別合成財消費には合成運輸サービスを投入する必要があるとし，それらは貨物運輸と旅客運輸からなる．このうち貨物交通は企業のものと同様，財の輸送に必要な交通を意味し，旅客交通は買物や観光交通を意味する．

家計の運輸サービス消費は，企業と同様，*n* 財別の合成財消費に対し，*n* 財消費と合成運輸サービス消費を決定し，さらに合成運輸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，合成貨物，合成旅客ともに交通機関選択を行うものとする．

以上の家計の財消費行動モデルは，効用水準を一定とするとの制約下での支出最小化問題により定式化する．図-3の最上位の総合成財と余暇の各消費量定モデルに係わる支出最小化問題は以下のようになる．

$$p_U^j U_H^j = \min_{z_H^j, l_H^j} \left[q_{ZH}^j z_H^j + w^j l_H^j \right] \tag{5a}$$

$$\text{s.t.} U_H^j = \gamma_H^j \left[\begin{array}{l} \alpha_{ZH}^j \left\{ \beta_{ZH}^j z_H^j \right\}^{\frac{\sigma_H^j - 1}{\sigma_H^j}} \\ + \left(1-\alpha_{ZH}^j\right) \left\{ \left(1-\beta_{ZH}^j\right) l_H^j \right\}^{\frac{\sigma_H^j - 1}{\sigma_H^j}} \end{array} \right]^{\frac{\sigma_H^j}{\sigma_H^j - 1}} \tag{5b}$$

ただし，U_H^j, p_U^j：地域 j の家計の効用水準とその価格（「効用水準価格」と呼ぶ），z_H^j, q_{ZH}^j：総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），$\alpha_{ZH}^j, \beta_{ZH}^j$：分配パラメータ，$\gamma_H^j$：効率パラメータ，$\sigma_H^j$：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(1)を解くと，以下の需要関数が求められる．

$$z_H^j = \frac{1}{\gamma_H^j \left(\beta_{ZH}^j\right)^{1-\sigma_H^j}} \left(\frac{\alpha_{ZH}^j}{q_{ZH}^j} \right)^{\sigma_H^j} \Psi_H^{j\,\frac{\sigma_H^j}{1-\sigma_H^j}} U_H^j \tag{6a}$$

$$l_H^j = \frac{1}{\gamma_H^j \left(1-\beta_{ZH}^j\right)^{1-\sigma_H^j}} \left(\frac{1-\alpha_{ZH}^j}{w^j} \right)^{\sigma_H^j} \Psi_H^{j\,\frac{\sigma_H^j}{1-\sigma_H^j}} U_H^j \tag{6b}$$

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(6)を式(5)の目的関数に代入すると，効用水準価格が求められる．

$$p_U^j = \frac{1}{\gamma_H^j} \Psi_H^{j\,\frac{1}{1-\sigma_H^j}} \tag{7}$$

式(6)を実際に計算するためには，効用水準U_H^jの値を求めておく必要がある．これは，式(5a)に示した支出最小化問題の左辺が支出水準を表すことと，均衡状態にある場合は支出水準と家計の可処分所得とが一致することから導出される．すなわち，

$$e_H^j = p_U^j U_H^j = \Omega_H^j \tag{8}$$

となる．ただし，e_H^j：地域jの家計の支出水準.

式(8)より効用水準が以下のとおり求められる．

$$U_H^j = \frac{\Omega_H^j}{p_U^j} \tag{9}$$

なお，家計の可処分所得は式(4)にて導出済みである．

続いて，総合成財消費に対する購入地域選択モデル等の定式化を行う．ところがこれらは，企業の生産行動モデルの合成中間財に関する投入モデル，すなわち**付録Ａ**の(2)〜(7)に対し，添字*m*を家計の添字*H*に置き換えたものとなる．そのためここではそれらの定式化を改めて示すことは割愛したい．

(3) 運輸サービス供給者（運輸企業）の行動モデル

運輸サービス供給者である運輸企業の運輸サービス生産行動モデルの枠組みは，(3) **a)**で説明した企業の生産行動モデルと全く同じである．ただし，OD別の運輸サービスを生産するとしている点と，交通政策が運輸企業の生産行動に与える影響が評価できるようにモデル化している点に差異がある．

a) OD別運輸サービス生産

まず，OD別の運輸サービスを生産するという点に関しては，企業モデルの式(1)が以下のように変更される．なお，以下では貨物運輸*Fm*を例に示すが，添字を旅客運輸*Pm*に変更すれば旅客運輸企業の行動モデルとなる点には注意されたい．

$$p_{Fm}^{j,k} y_{Fm}^{j,k} = \min_{z_{Fm}^{j,k}, cf_{Fm}^{j,k}} \left[q_{ZFm}^{j,k} z_{Fm}^{j,k} + \left(1+\tau_{Fm}^j\right) pf_{Fm}^{j,k} cf_{Fm}^{j,k} \right] \tag{10a}$$

$$\text{s.t. } y_{Fm}^{j,k} = \gamma_{Fm}^{j,k} \left[\begin{array}{l} \alpha_{ZFm}^{j,k} \left\{ \beta_{ZFm}^j z_{Fm}^j \right\}^{\frac{\sigma_{Fm}^j - 1}{\sigma_{Fm}^j}} \\ + \left(1-\alpha_{ZFm}^j\right) \left\{ \left(1-\beta_{ZFm}^j\right) cf_{Fm}^j \right\}^{\frac{\sigma_{Fm}^j - 1}{\sigma_{Fm}^j}} \end{array} \right]^{\frac{\sigma_{Fm}^j}{\sigma_{Fm}^j - 1}} \tag{10b}$$

ただし，添字j,k：地域 j から地域 k への貨物輸送サービスを表す，添字Fm：交通機関別の貨物運輸を表す．

式(10)を解いて得られる需要関数は，式(2)の添字を変えただけのものとなる．運輸サービス価格も同様であるが，価格は重要であるので価格のみ以下に示しておく．

$$p_{Fm}^{j,k} = \frac{1}{\gamma_{Fm}^{j,k}} \Psi_{Fm}^{j,k\ \frac{1}{1-\sigma_{Fm}^{j,k}}} \tag{11}$$

ただし，

$$\Psi_{Fm}^{j,k} = \left(\alpha_{ZFm}^{j,k}\right)^{\sigma_{Fm}^{j,k}} \left(\frac{q_{ZFm}^{j,k}}{\beta_{ZFm}^{j,k}}\right)^{1-\sigma_{Fm}^{j,k}} + \left(1-\alpha_{ZFm}^{j,k}\right)^{\sigma_{Fm}^{j,k}} \left(\frac{pf_{Fm}^{j,k}}{1-\beta_{ZFm}^{j,k}}\right)^{1-\sigma_{Fm}^{j,k}}.$$

以上より，本SCGEモデルでは，運輸価格はOD別に導出されることになることがわかる．

b) 運輸企業の生産要素投入行動モデル

次に，交通政策のうち交通整備政策が運輸企業の生産行動に与える影響を評価できるように，運輸企業については生産要素投入行動を変更する．

運輸企業とは，労働と，自動車などの輸送機械が主である資本を投入し，交通路を移動してものや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，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，既に述べたとおり，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，ここでも貨物運輸*Fm*を例にモデル化を示す．

$$cf_{Fm}^{j,k}\left(t_{Fm}^{j,k}, l_{Fm}^{j,k}, k_{Fm}^{j,k}\right) = cf_{Fm}^{j,k}\left(\lambda t_{Fm}^{j,k}, \lambda l_{Fm}^{j,k}, \lambda k_{Fm}^{j,k}\right) \tag{12}$$

ただし， $t_{Fm}^{j,k}$ ：交通機関*Fm*の地域*j-k*間の交通所要時間，

$l_{Fm}^{j,k}, k_{Fm}^{j,k}$ ：労働投入量，資本投入量．

式(12)の λ を以下のようにおく．

$$\lambda = \frac{t_{Fm}^{j,k\ A}}{t_{Fm}^{j,k}} \tag{13}$$

ただし，添字A : 交通整備なしを表す．

式(13)を式(12)に代入すると，合成生産要素関数は以下のようになる．

$$cf_{Fm}^{j,k} = cf_{Fm}^{j,k}\left(eff_{Fm}^{j,k} \cdot l_{Fm}^{j,k}, eff_{Fm}^{j,k} \cdot k_{Fm}^{j,k}\right) \tag{14}$$

ただし， $eff_{Fm}^{j,k}$ ： $\left[\equiv \frac{t_{Fm}^{j,k\ A}}{t_{Fm}^{j,k}}\right]$ 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(14)にしたがえば，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．

$$pf_{Fm}^{j,k} cf_{Fm}^{j,k} = \min_{l_{Fm}^{j,k}, k_{Fm}^{j,k}} \left[w_{Fm}^{j,k} l_{Fm}^{j,k} + r_{Fm}^{j,k} k_{Fm}^{j,k}\right] \tag{15a}$$

$$\text{s.t. } cf_{Fm}^{j,k} = \gamma_{CFFm}^{j,k} \left[\alpha_{LFm}^{j,k} \left\{\beta_{LFm}^{j} eff_{Fm}^{j,k} \cdot l_{Fm}^{j,k}\right\}^{\frac{\sigma_{CFFm}^{j}-1}{\sigma_{CFFm}^{j}}} + \left(1-\alpha_{LFm}^{j}\right)\left\{\left(1-\beta_{LFm}^{j}\right) eff_{Fm}^{j,k} \cdot k_{Fm}^{j,k}\right\}^{\frac{\sigma_{CFFm}^{j}-1}{\sigma_{CFFm}^{j}}} \right]^{\frac{\sigma_{CFFm}^{j}}{\sigma_{CFFm}^{j}-1}} \tag{15b}$$

式(15)を解くと，以下の需要関数が得られる．

$$l_{Fm}^{j,k} = \frac{1}{\gamma_{CFFm}^{j,k}\left(\beta_{LFm}^{j,k} eff_{LFm}^{j,k}\right)^{1-\sigma_{CFm}^{j,k}}} \left(\frac{\alpha_{LFm}^{j,k}}{w_{Fm}^{j,k}}\right)^{\sigma_{CFFm}^{j,k}} \Psi_{CFFm}^{j,k\ \frac{\sigma_{CFFm}^{j,k}}{1-\sigma_{CFFm}^{j}}} \cdot cf_{Fm}^{j,k} \tag{16a}$$

$$k_{Fm}^{j,k} = \frac{1}{\gamma_{CFFm}^{j,k}\left(\left\{1-\beta_{LFm}^{j,k}\right\} eff_{LFm}^{j,k}\right)^{1-\sigma_{CFm}^{j,k}}} \left(\frac{1-\alpha_{LFm}^{j,k}}{r_{Fm}^{j,k}}\right)^{\sigma_{CFFm}^{j,k}} \Psi_{CFFm}^{j,k\ \frac{\sigma_{CFFm}^{j,k}}{1-\sigma_{CFFm}^{j}}} \cdot cf_{Fm}^{j,k} \tag{16b}$$

ただし，

$$\Psi_{CFFm}^{j,k} = \left(\alpha_{LFm}^{j,k}\right)^{\sigma_{CFm}^{j,k}} \left(\frac{w_{Fm}^{j,k}}{\beta_{LFm}^{j,k} eff_{LFm}^{j,k}}\right)^{1-\sigma_{CFFm}^{j,k}} + \left(1-\alpha_{LFm}^{j,k}\right)^{\sigma_{CFFm}^{j,k}} \left(\frac{r_{Fm}^{j,k}}{\left\{1-\beta_{LFm}^{j,k}\right\} eff_{LFm}^{j,k}}\right)^{1-\sigma_{CFFm}^{j,k}}.$$

式(16)を式(15)に代入すると合成生産要素価格が求められる．

$$pf_{Fm}^{j,k} = \frac{1}{\gamma_{CFFm}^{j,k}} \Psi_{CFFm}^{j,k\ \frac{1}{1-\sigma_{CFFm}^{j,k}}} \tag{17}$$

この合成生産要素価格が，OD間交通所要時間に依存して決定される生産要素投入効率性の関数となっており，本SCGEモデルは，交通整備等の影響の一部はこの合成生産要素価格の変化から波及していく構造となっていることがわかる．

(4) その他の主体の行動モデル

政府，公共投資部門，民間投資部門の行動モデルを示す．ただし，これらは既存のSCGEモデルと同様であり，ここでは説明を割愛したい．

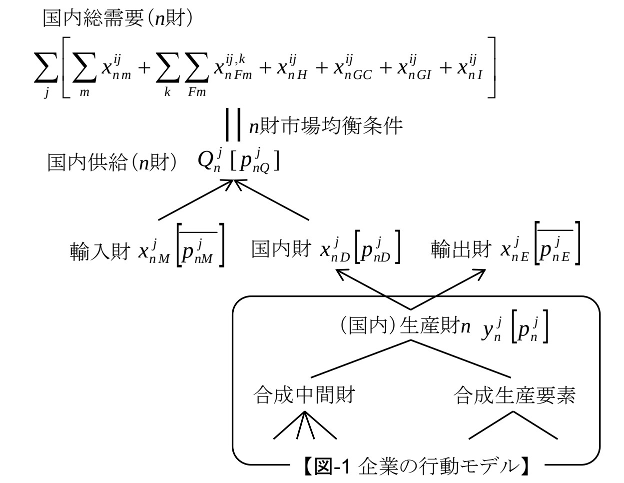

図-4　輸出入モデル

輸出入部門は，図-4のようにモデル化した．

(5)　市場均衡条件

市場均衡条件式は以下のとおりである．

$$n\text{財市場：}\ Q^i_n = \sum_j \left[\begin{array}{l} \sum_m x^{ij}_{nm} + \sum_k \sum_{Fm} x^{ij,k}_{nFm} \\ \quad + x^{ij}_{nH} + x^{ij}_{nGC} + x^{ij}_{nGI} + x^{ij}_{nI} \end{array} \right] \tag{18a}$$

$$\text{労働市場：}\ \begin{array}{l} T^j_H - \left(l^j_H + \sum_{Pm} \sum_k t^{kj}_{Pm} x^{kj}_{PmH} \right) \\ \quad = \sum_m \sum_j l^{ij}_m + \sum_{Fm} \sum_i l^{ij}_{Fm} + \sum_{Pm} \sum_i l^{ij}_{Pm} \end{array} \tag{18b}$$

$$\text{資本市場：}\ K^j_H = \sum_m \sum_j k^{ij}_m + \sum_{Fm} \sum_j k^{ij}_{Fm} + \sum_{Pm} \sum_j k^{ij}_{Pm} \tag{18c}$$

3.　便益帰着分析

(1)　等価的偏差による便益定義

交通整備政策を例に，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表される．

$$EV^j = p^{j\ A}_U \left(U^{j\ B}_H - U^{j\ B}_H \right) \tag{19a}$$

ただし，添字A, B：それぞれ整備なし，ありを表す．

これに，式(9)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．

$$EV^j = \frac{p^{j\ A}_U}{p^{j\ B}_U} \Omega^{j\ B}_H - \Omega^{j\ A}_H \tag{19b}$$

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(19b)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$\left(\dfrac{p^{j\ B}_U}{p^{j\ A}_U} \right)$で除したものとなっていることがわかる．

(2)　便益帰着分析

a) 家計の便益帰着分析

式(19a)のEVを項目分解し，便益の帰着分析を行う[28]．

まず，式(19a)のEVは以下のように表される．

$$EV^j = \int_{U^{j\ A}_H}^{U^{j\ B}_H} p^{j\ A}_U dU^j_H \tag{20}$$

式(20)の効用水準の全微分形dU^j_Hを求めるにあたり，式(9)より効用水準が効用水準価格p^j_Uと可処分所得Ω^j_Hの関数であることに注意すると，効用水準の全微分形は以下のようになる．

$$dU^j_H = \frac{\partial U^j_H}{\partial p^j_U} dp^j_U + \frac{\partial U^j_H}{\partial \Omega^j_H} d\Omega^j_H \tag{21}$$

続いて，式(21)の右辺第一項の効用水準価格の全微分形を求める．これは，図-3の家計の行動モデルツリーを用いると，家計が消費する各財およびサービスの価格変化に分解できることがわかる．

まず，図-3に基づく家計の消費行動の定式化より，図-3の各段階の価格は，その下位レベルの価格の関数となっていることがわかる．すなわち，以下が成立する．

効用水準価格：

$$\text{効用水準価格：}\ p^j_U = p^j_U \left(q^j_{ZH}, w^j \right) \tag{22a}$$

$$\text{総合成財価格：}\ q^j_{ZH} = q^j_{ZH} \left(\cdots, q^{ij}_H, \cdots \right) \tag{22b}$$

$$\text{地域別総合成財価格：}\ q^{ij}_H = q^{ij}_H \left(\cdots, q^{ij}_{nH}, \cdots \right) \tag{22c}$$

$$\text{地域別}n\text{財合成価格：}\ q^{ij}_{nH} = q^{ij}_{nH} \left(p^i_n, q^{ij}_{TH} \right) \tag{22d}$$

$$\text{合成運輸価格：}\ q^{ij}_{TH} = q^{ij}_{TH} \left(q^{ij}_{T_F H}, q^{ij}_{T_P H} \right) \tag{22e}$$

$$\text{合成貨物運輸価格：}\ q^{ij}_{T_F H} = q^{ij}_{T_F H} \left(\cdots, p^i_{T_{Fm}}, \cdots \right) \tag{22f}$$

$$\text{合成旅客運輸価格：}\ q^{ij}_{T_P H} = q^{ij}_{T_P H} \left(\cdots, \left\{ p^i_{T_{Pm}} + w^j t^{ij}_{T_{Pm}} \right\}, \cdots \right) \tag{22g}$$

これより，各段階の価格の全微分形はそれぞれ以下のようになる．

$$\text{効用水準価格：}\ dp^j_U = \frac{\partial p^j_U}{\partial q^j_{ZH}} dq^j_{ZH} + \frac{\partial p^j_U}{\partial w^j} dw^j \tag{23a}$$

$$\text{総合成財価格：}\ dq^j_{ZH} = \sum_i \frac{\partial q^j_{ZH}}{\partial q^{ij}_H} dq^{ij}_H \tag{23b}$$

地域別総合成財価格： $dq_H^{ij} = \sum_n \frac{\partial q_H^{ij}}{\partial q_{nH}^{ij}} dq_{nH}^{ij}$ (23c)

地域別n財合成価格： $dq_{nH}^{ij} = \frac{\partial q_{nH}^{ij}}{\partial p_n^i} dp_n^i + \frac{\partial q_{nH}^{ij}}{\partial q_{TH}^{ij}} dq_{TH}^{ij}$ (23d)

合成運輸価格： $dq_{TH}^{ij} = \frac{\partial q_{TH}^{ij}}{\partial q_{T_F H}^{ij}} dq_{T_F H}^{ij} + \frac{\partial q_{TH}^{ij}}{\partial q_{T_P H}^{ij}} dq_{T_P H}^{ij}$ (23e)

合成貨物運輸価格： $dq_{T_F H}^{ij} = \sum_{Fm} \frac{\partial q_{T_F H}^{ij}}{\partial p_{T_{Fm}}^i} dp_{T_{Fm}}^i$ (23f)

合成旅客運輸価格：

$$dq_{T_P H}^{ij} = \sum_{Pm} \frac{\partial q_{T_P H}^{ij}}{\partial \left\{ p_{T_{Pm}}^i + w^j t_{T_{Pm}}^{ij} \right\}} d\left\{ p_{T_{Pm}}^i + w^j t_{T_{Pm}}^{ij} \right\} \quad (23g)$$

さらに，式(23g)の一般化価格の全微分形は以下のようになる．

$$d\left\{ p_{T_{Pm}}^i + w^j t_{T_{Pm}}^{ij} \right\} = dp_{T_{Pm}}^i + t_{T_{Pm}}^{ij} dw^j + w^j dt_{T_{Pm}}^{ij} \quad (24)$$

以上の結果より，式(24)を式(23g)へ，式(23g)を式(23f)へという形で順次代入していくと，最終的に効用水準価格の全微分形は以下のようになる．

$$dp_U^j = \sum_i \left[\begin{array}{l} \sum_n \frac{\partial p_U^j}{\partial p_n^i} dp_n^i + \sum_{Fm} \frac{\partial p_U^j}{\partial p_{T_{Fm}}^i} dp_{T_{Fm}}^i \\ + \sum_{Pm} \frac{\partial p_U^j}{\partial \left\{ p_{T_{Pm}}^i + w^j t_{T_{Pm}}^{ij} \right\}} \left\{ dp_{T_{Pm}}^i + t_{T_{Pm}}^{ij} dw^j + w^j dt_{T_{Pm}}^{ij} \right\} \end{array} \right] + \frac{\partial p_U^j}{\partial w^j} dw^j \quad (25)$$

これを式(21)に代入するわけであるが，その前に式(21)を変形しておく．

$$dU_H^j = \frac{\partial U_H^j}{\partial \Omega_H^j} \left[\frac{\frac{\partial U_H^j}{\partial p_U^j}}{\frac{\partial U_H^j}{\partial \Omega_H^j}} dp_U^j + d\Omega_H^j \right] \quad (26)$$

さらに，ロアの恒等式[29]より，各需要関数に対して以下が成立する．

$$-x_{nH}^{ij} = \frac{\frac{\partial U_H^j}{\partial p_n^i}}{\frac{\partial U_H^j}{\partial \Omega_H^j}}, \quad -x_{T_{Fm}H}^{ij} = \frac{\frac{\partial U_H^j}{\partial p_{T_{Fm}}^i}}{\frac{\partial U_H^j}{\partial \Omega_H^j}},$$

$$-x_{T_{Pm}H}^{ij} = \frac{\frac{\partial U_H^j}{\partial \left\{ p_{T_{Pm}}^i + w^j t_{T_{Pm}}^{ij} \right\}}}{\frac{\partial U_H^j}{\partial \Omega_H^j}} \quad (27)$$

式(26)の効用水準の全微分形に式(25)の効用水準価格の全微分形を代入し，それに式(27)のロアの恒等式を適用すると，効用水準の全微分形は以下のように整理できる．

$$dU_H^j = \frac{1}{p_U^j} \left(\begin{array}{l} \sum_i \left[\begin{array}{l} -\sum_n x_{nH}^{ij} dp_n^i - \sum_{Fm} x_{T_{Fm}H}^{ij} dp_{T_{Fm}}^i \\ -\sum_{Pm} x_{T_{Pm}}^{ij} \left\{ dp_{T_{Pm}}^i + t_{T_{Pm}}^{ij} dw^j + w^j dt_{T_{Pm}}^{ij} \right\} \end{array} \right] \\ -l_H^j dw^j + d\Omega_H^j \end{array} \right) \quad (28)$$

なお，式(28)では，所得に対する効用水準の偏微分を式(9)から求めて（式(29)）代入している．

$$\frac{\partial U_H^j}{\partial \Omega_H^j} = \frac{1}{p_U^j} \quad (29)$$

b) 企業利潤の帰着分析

企業利潤の全微分形を導出する．企業利潤は「収入－支出」で表されることから，企業nの利潤は以下となる．

$$\pi_n^j = p_n^j y_n^j - \left[q_{Zn}^j z_n^j + \left(1 + \tau_n^j\right) pf_n^j cf_n^j \right] \quad (30)$$

今間接税率は固定であるとすると，式(30)より企業利潤は財価格，総合成中間財価格，合成生産要素価格の関数となっていることがわかる．すなわち，以下が成立する．

$$d\pi_n^j = \frac{\partial \pi_n^j}{\partial p_n^j} dp_n^j + \frac{\partial \pi_n^j}{\partial q_{Zn}^j} dq_{Zn}^j + \frac{\partial \pi_n^j}{\partial pf_n^j} dpf_n^j \quad (31)$$

dq_{Zn}^j は総合成中間財価格の全微分形である．企業の総合成中間財に関する投入行動モデルのツリー構造は，家計のそれと全く同様であることから，式(23)と同じように企業行動モデルの各段階の価格の全微分形を求めることができる．

総合成中間財価格： $dq_{Zn}^j = \sum_i \frac{\partial q_{Zn}^j}{\partial q_n^{ij}} dq_n^{ij}$ (32a)

地域別総合成中間財価格： $dq_n^{ij} = \sum_m \frac{\partial q_n^{ij}}{\partial q_{m\,n}^{ij}} dq_{m\,n}^{ij}$ (32b)

地域別m財合成価格： $dq_{m\,n}^{ij} = \frac{\partial q_{m\,n}^{ij}}{\partial p_m^i} dp_m^i + \frac{\partial q_{m\,n}^{ij}}{\partial q_{Tn}^{ij}} dq_{Tn}^{ij}$ (32c)

合成運輸価格： $dq_{Tn}^{ij} = \frac{\partial q_{Tn}^{ij}}{\partial q_{T_F n}^{ij}} dq_{T_F n}^{ij} + \frac{\partial q_{Tn}^{ij}}{\partial q_{T_P n}^{ij}} dq_{T_P n}^{ij}$ (32d)

合成貨物運輸価格： $dq_{T_F n}^{ij} = \sum_{Fm} \frac{\partial q_{T_F n}^{ij}}{\partial p_{T_{Fm}}^i} dp_{T_{Fm}}^i$ (32e)

合成旅客運輸価格：

$$dq_{T_P n}^{ij} = \sum_{Pm} \frac{\partial q_{T_P n}^{ij}}{\partial \left\{ p_{T_{Pm}}^i + w^j t_{T_{Pm}}^{ij} \right\}} d\left\{ p_{T_{Pm}}^i + w^j t_{T_{Pm}}^{ij} \right\} \quad (32f)$$

旅客運輸の一般化価格：

$$d\left\{ p_{T_{Pm}}^i + w^j t_{T_{Pm}}^{ij} \right\} = dp_{T_{Pm}}^i + t_{T_{Pm}}^{ij} dw^j + w^j dt_{T_{Pm}}^{ij} \quad (32g)$$

以上の結果より，価格の全微分形を式(32g)から順次上位へ代入していくと最終的に総合成中間財価格の全微分形は以下のようになる．

$$dq_{Zn}^{j}=\sum_{i}\left[\begin{array}{l}\sum_{m}\frac{\partial q_{Zn}^{j}}{\partial p_{m}^{i}}dp_{m}^{i}+\sum_{Fm}\frac{\partial q_{Zn}^{j}}{\partial p_{T_{Fm}}^{i}}dp_{T_{Fm}}^{i}\\+\sum_{Pm}\frac{\partial q_{Zn}^{j}}{\partial\left\{p_{T_{Pm}}^{i}+w^{j}t_{T_{Pm}}^{ij}\right\}}\left\{dp_{T_{Pm}}^{i}+t_{T_{Pm}}^{ij}dw^{j}+w^{j}dt_{T_{Pm}}^{ij}\right\}\end{array}\right]\tag{33}$$

また，式(31)の $dpf_n^{\ j}$ は合成生産要素価格の全微分形である．これは，図-2の中の生産要素投入構造を踏まえると，各段階の価格の全微分形が以下のようになることがわかる．

$$\text{合成生産要素価格：}\ dpf_n^{\ j}=\frac{\partial pf_n^{\ j}}{\partial w_n^{j}}dw_n^{j}+\frac{\partial pf_n^{\ j}}{\partial r_n^{j}}dr_n^{\ j}\tag{34a}$$

$$\text{合成賃金率：}\ dw_n^{j}=\sum_{i}\frac{\partial w_n^{j}}{\partial w^{i}}dw^{i}\tag{34b}$$

$$\text{合成利子率：}\ dr_n^{\ j}=\sum_{i}\frac{\partial r_n^{\ j}}{\partial r^{i}}dr^{i}\tag{34c}$$

また，ホテリングの補題より，生産関数および各需要関数に対して以下が成立している．

$$y_n^{\ j}=\frac{\partial\pi_n^{\ j}}{\partial p_n^{i}},\quad -x_{mn}^{ij}=\frac{\partial\pi_n^{\ j}}{\partial p_m^{i}},\quad -x_{T_{Fm}n}^{ij}=\frac{\partial\pi_n^{\ j}}{\partial p_{T_{Fm}}^{i}},$$

$$-x_{T_{Pm}n}^{ij}=\frac{\partial\pi_n^{\ j}}{\partial\left\{p_{T_{Pm}}^{i}+w^{j}t_{T_{Pm}}^{ij}\right\}},\quad -l_n^{ij}=\frac{\partial w_n^{j}}{\partial w^{i}},\quad -k_n^{ij}=\frac{\partial r_n^{\ j}}{\partial r^{i}}\tag{35}$$

式(31)の企業利潤の全微分形に，式(33)の総合成中間財価格の全微分形を代入し，それに式(34)のホテリングの補題を適用すると，企業利潤の全微分形は以下のように整理できる．

$$d\pi_n^{\ j}=y_n^{\ j}dp_n^{\ j}-\sum_{i}\left[\begin{array}{l}\sum_{m}x_{mn}^{ij}dp_{m}^{i}+\sum_{Fm}x_{T_{Fm}n}^{ij}dp_{T_{Fm}}^{i}\\+\sum_{Pm}x_{T_{Pm}n}^{ij}\left\{dp_{T_{Pm}}^{i}+t_{T_{Pm}}^{ij}dw^{j}+w^{j}dt_{T_{Pm}}^{ij}\right\}\\+l_n^{ij}dw^{i}+k_n^{ij}dr^{i}\end{array}\right]\tag{36}$$

c) 運輸企業利潤の帰着分析

運輸企業利潤の全微分形も，基本的には企業のそれと同じである．ただし，生産要素投入行動において，交通所要時間に係わる投入効率性が考慮されており，その点だけ加味した誘導が必要となる．

具体的には，合成生産要素投入行動から導出されるホテリングの補題が，企業のものと運輸企業のものに差異が存在することになる．

式(15a)より，合成生産要素価格は以下のようになる．

$$pf_{Fn}^{\ j,k}=w_{Fn}^{j,k}\cdot ul_{Fn}^{j,k}+r_{Fn}^{j,k}\cdot uk_{Fn}^{j,k}\tag{37}$$

ただし， $ul_{Fn}^{j,k}$ ：単位労働投入量 $\left(=\frac{l_{Fn}^{j,k}}{cf_{Fn}^{j,k}}\right)$， $uk_{Fn}^{j,k}$ ：単位資本投入量 $\left(=\frac{k_{Fn}^{j,k}}{cf_{Fn}^{j,k}}\right)$．

式(37)の両辺を全微分する．

$$dpf_{Fn}^{\ j,k}=ul_{Fn}^{j,k}dw_{Fn}^{j,k}+uk_{Fn}^{j,k}dr_{Fn}^{j,k}+w_{Fn}^{j,k}dul_{Fn}^{j,k}+r_{Fn}^{j,k}duk_{Fn}^{j,k}\tag{38}$$

一般的なホテリングの補題[29]は，式(38)の右辺第三項と第四項の和がゼロになることから導かれる．しかし，本SCGEモデルの運輸企業ではそうならないために，3.(2)b)の企業利潤の全微分形とは違う形で利潤の全微分形が導出されることになる．

そこで，式(14)あるいは(15)の合成生産要素関数を全微分することから始める．なお，式(15)では合成生産要素投入量を与件として費用最小化問題を解いていることから，ここでは合成生産要素の全微分はゼロとなることに注意する．

$$dcf_{Fn}^{\ j,k}=\frac{\partial cf_{Fn}^{j,k}}{\partial\left(eff_{Fn}^{\ j,k}l_{Fn}^{j,k}\right)}\left[\begin{array}{l}\frac{\partial\left(eff_{Fn}^{\ j,k}l_{Fn}^{j,k}\right)}{\partial l_{Fn}^{j,k}}\frac{\partial l_{Fn}^{j,k}}{\partial ul_{Fn}^{j,k}}dul_{Fn}^{j,k}\\+\frac{\partial\left(eff_{Fn}^{\ j,k}l_{Fn}^{j,k}\right)}{\partial\left(eff_{Fn}^{\ j,k}\right)}d\left(eff_{Fn}^{\ j,k}\right)\end{array}\right]+\frac{\partial cf_{Fn}^{j,k}}{\partial\left(eff_{Fn}^{\ j,k}k_{Fn}^{j,k}\right)}\left[\begin{array}{l}\frac{\partial\left(eff_{Fn}^{\ j,k}k_{Fn}^{j,k}\right)}{\partial k_{Fn}^{j,k}}\frac{\partial k_{Fn}^{j,k}}{\partial uk_{Fn}^{j,k}}duk_{Fn}^{j,k}\\+\frac{\partial\left(eff_{Fn}^{\ j,k}k_{Fn}^{j,k}\right)}{\partial\left(eff_{Fn}^{\ j,k}\right)}d\left(eff_{Fn}^{\ j,k}\right)\end{array}\right]=0\tag{39a}$$

$$\frac{\partial cf_{Fn}^{j,k}}{\partial\left(eff_{Fn}^{\ j,k}l_{Fn}^{j,k}\right)}\left[eff_{Fn}^{\ j,k}\frac{\partial l_{Fn}^{j,k}}{\partial ul_{Fn}^{j,k}}dul_{Fn}^{j,k}+l_{Fn}^{j,k}d\left(eff_{Fn}^{\ j,k}\right)\right]+\frac{\partial cf_{Fn}^{j,k}}{\partial\left(eff_{Fn}^{\ j,k}k_{Fn}^{j,k}\right)}\left[eff_{Fn}^{\ j,k}\frac{\partial k_{Fn}^{j,k}}{\partial uk_{Fn}^{j,k}}duk_{Fn}^{j,k}+k_{Fn}^{j,k}d\left(eff_{Fn}^{\ j,k}\right)\right]=0\tag{39b}$$

式(39b)に対し，まず式(15)の費用最小化問題の一階条件より以下が求められる．

$$\frac{\partial cf_{Fn}^{j,k}}{\partial\left(eff_{Fn}^{\ j,k}l_{Fn}^{j,k}\right)}=\frac{w_{Fn}^{j,k}}{eff_{Fn}^{\ j,k}\lambda_{Fn}^{j,k}},\quad \frac{\partial cf_{Fn}^{j,k}}{\partial\left(eff_{Fn}^{\ j,k}k_{Fn}^{j,k}\right)}=\frac{r_{Fn}^{j,k}}{eff_{Fn}^{\ j,k}\lambda_{Fn}^{j,k}}\tag{40}$$

ただし， $\lambda_{Fn}^{j,k}$ ：ラグランジュ乗数．

また， $l_{Fn}^{j,k}=ul_{Fn}^{j,k}cf_{Fn}^{j,k}$， $k_{Fn}^{j,k}=uk_{Fn}^{j,k}cf_{Fn}^{j,k}$ であることから，以下が成立する．

$$\frac{\partial l_{Fn}^{j,k}}{\partial ul_{Fn}^{j,k}}=cf_{Fn}^{j,k},\quad \frac{\partial k_{Fn}^{j,k}}{\partial uk_{Fn}^{j,k}}=cf_{Fn}^{j,k}\tag{41}$$

さらに， $eff_{Fn}^{\ j,k}=\frac{t_{Fn}^{j,k\ A}}{t_{Fn}^{j,k}}$ より以下が得られる．

$$d\left(eff_{Fn}^{j,k}\right) = \frac{eff_{Fn}^{j,k}}{t_{Fn}^{j,k}} dt_{Fn}^{j,k} \tag{42}$$

以上の式(40)～(42)を，式(39b)に代入すると以下が得られる．

$$\begin{aligned} &\frac{w_{Fn}^{j,k}}{eff_{Fn}^{j,k}\lambda_{Fn}^{j,k}}\left[eff_{Fn}^{j,k} cf_{Fn}^{j,k} dul_{Fn}^{j,k} + \frac{eff_{Fn}^{j,k} l_{Fn}^{j,k}}{t_{Fn}^{j,k}} dt_{Fn}^{j,k}\right] \\ &+ \frac{r_{Fn}^{j,k}}{eff_{Fn}^{j,k}\lambda_{Fn}^{j,k}}\left[eff_{Fn}^{j,k} cf_{Fn}^{j,k} duk_{Fn}^{j,k} + \frac{eff_{Fn}^{j,k} k_{Fn}^{j,k}}{t_{Fn}^{j,k}} dt_{Fn}^{j,k}\right] = 0 \end{aligned} \tag{43a}$$

$$\begin{aligned} &\left[w_{Fn}^{j,k} cf_{Fn}^{j,k} dul_{Fn}^{j,k} + w_{Fn}^{j,k} \frac{l_{Fn}^{j,k}}{t_{Fn}^{j,k}} dt_{Fn}^{j,k}\right] \\ &+ \left[r_{Fn}^{j,k} cf_{Fn}^{j,k} duk_{Fn}^{j,k} + r_{Fn}^{j,k} \frac{k_{Fn}^{j,k}}{t_{Fn}^{j,k}} dt_{Fn}^{j,k}\right] = 0 \end{aligned} \tag{43b}$$

$$\begin{aligned} &w_{Fn}^{j,k} dul_{Fn}^{j,k} + r_{Fn}^{j,k} duk_{Fn}^{j,k} \\ &= w_{Fn}^{j,k} \frac{ul_{Fn}^{j,k}}{t_{Fn}^{j,k}} dt_{Fn}^{j,k} + r_{Fn}^{j,k} \frac{uk_{Fn}^{j,k}}{t_{Fn}^{j,k}} dt_{Fn}^{j,k} \end{aligned} \tag{43c}$$

式(43c)を式(38)に代入し，両辺に $cf_{Fn}^{j,k}$ を乗じると以下が得られる．

$$\begin{aligned} &cf_{Fn}^{j,k} dpf_{Fn}^{j,k} \\ &= l_{Fn}^{j,k} dw_{Fn}^{j,k} + k_{Fn}^{j,k} dr_{Fn}^{j,k} + w_{Fn}^{j,k} \frac{l_{Fn}^{j,k}}{t_{Fn}^{j,k}} dt_{Fn}^{j,k} + r_{Fn}^{j,k} \frac{k_{Fn}^{j,k}}{t_{Fn}^{j,k}} dt_{Fn}^{j,k} \end{aligned} \tag{44}$$

以上より，運輸企業利潤の全微分形は式(44)の右辺第三項と第四項が追加される形となり，具体的には以下となる．

$$\begin{aligned} d\pi_{Fn}^{j,k} &= y_{Fn}^{j,k} dp_{Fn}^{j,k} \\ &- \sum_i \left[\begin{array}{l} \sum_m x_{mFn}^{ij,k} dp_m^i + \sum_{Fm} x_{T_{Fm}Fn}^{ij,k} dp_{T_{Fm}}^i \\ + \sum_{Pm} x_{T_{Pm}Fn}^{ij,k} \left\{dp_{T_{Pm}}^i + t_{T_{Pm}}^{ij} dw^j + w^j dt_{T_{Pm}}^{ij}\right\} \\ + l_{Fn}^{ij,k} dw^i + k_{Fn}^{ij,k} dr^i \end{array}\right] \\ &+ w_{Fn}^{j,k} \frac{l_{Fn}^{j,k}}{t_{Fn}^{j,k}} dt_{Fn}^{j,k} + r_{Fn}^{j,k} \frac{k_{Fn}^{j,k}}{t_{Fn}^{j,k}} dt_{Fn}^{j,k} \end{aligned} \tag{45}$$

(3) 等価的偏差EVの最終帰着形

式(28)の dU_H^j を式(20)の EV^j に代入すると，EVを項目分解した結果が得られる．SCGEモデルは，企業利潤が常にゼロとなることからその変化分もゼロとなる．そこで，式(36)の $d\pi_n^j(=0)$，式(45)の $d\pi_{Fn}^{j,k}(=0)$ を式(20)に挿入する．さらに，政府消費，公的投資需要，民間投資需要，移輸出入等も加味すると，市場均衡条件から価格変化に関する項は相殺（キャンセルアウト）する．その結果，最終的な社会的総便益は以下のようになる．

$$\sum_j EV^j = \sum_j \oint_{A\to B} \frac{p_U^j}{p_U^j}^{A} \left[\begin{array}{l} \sum_i \left(\begin{array}{l} -\sum_n w_n^j x_{T_{Pm}n}^{ij} dt_{T_{Pm}}^{ij} \\ -w^j x_{T_{Pm}H}^{ij} dt_{T_{Pm}}^{ij} \end{array}\right) \\ + \sum_i \left(w_{T_{Pm}}^{j,i} \frac{l_{T_{Pm}}^{j,i}}{t_{T_{Pm}}^{ij}} + r_{T_{Pm}}^{j,i} \frac{k_{T_{Pm}}^{j,i}}{t_{T_{Pm}}^{ij}}\right) dt_{T_{Pm}}^{ij} \end{array}\right] \tag{46}$$

式(46)は，最終的に等価的偏差EVで求められる便益が，利用者便益と供給者便益によって計測できるということを表している．

6. おわりに

本研究では，交通サービス生産を明示化したSCGEモデルを構築した上で，それに基づく便益定義を行い，さらに，定義した便益を項目分解して便益帰着分析を行い，便益の最終帰着形が利用者便益と供給者便益の和で表されることを示した．

謝辞：本論文は，2015年5月18日にご逝去された元日本大学特任教授森杉壽芳先生のご指導による部分が非常に大きい．ここに記して改めて故森杉壽芳先生に深く謝意を表する次第である．また，日本交通政策研究会での議論も大変参考になった．日本総合研究所松岡斉所長をはじめ，関係各位に感謝の意を表する．

付録Ａ　企業行動モデルの定式化

以下が企業の行動モデルの定式化である．

(1) 合成中間財，合成生産要素の投入

式(1)～(3)に示したとおりである．

(2) 合成中間財の地域投入

・最適化問題

$$q_{Zm}^j z_m^j = \min_{z_m^{ij}} \sum_i q_m^{ij} z_m^{ij} \tag{A1a}$$

$$\text{s.t. } z_m^j = \gamma_{Zm}^j \left[\sum_i \alpha_m^{ij} \left\{\beta_m^{ij} z_m^{ij}\right\}^{\frac{\sigma_{Zm}^j - 1}{\sigma_{Zm}^j}}\right]^{\frac{\sigma_{Zm}^j}{\sigma_{Zm}^j - 1}} \tag{A1b}$$

・需要関数

$$z_m^{ij} = \frac{1}{\gamma_{Zm}^j \left(\beta_m^{ij}\right)^{1-\sigma_{Zm}^j}} \left(\frac{\alpha_m^{ij}}{q_m^{ij}}\right)^{\sigma_{Zm}^j} \Psi_{Zm}^{j\;\frac{\sigma_{Zm}^j}{1-\sigma_{Zm}^j}} \cdot z_m^j \tag{A2}$$

ただし， $\Psi_{Zm}^{j}=\sum_{i}\left(\alpha_{m}^{ij}\right)^{\sigma_{Zm}^{j}}\left(\dfrac{q_{m}^{ij}}{\beta_{m}^{ij}}\right)^{1-\sigma_{Zm}^{j}}$.

・価格式

$$q_{Zm}^{j}=\frac{1}{\gamma_{Zm}^{j}}\Psi_{Zm}^{j\ \frac{1}{1-\sigma_{Zm}^{j}}} \tag{A3}$$

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（$\sum_{i}\alpha_{m}^{ij}=1,\sum_{i}\beta_{m}^{ij}=1$），$\gamma_{Zm}^{j}$ ：効率パラメータ，σ_{Zm}^{j} ：代替弾力性パラメータ.

(3) 合成中間財nの投入

・最適化問題

$$q_{m}^{ij}z_{m}^{ij}=\min_{z_{nm}^{ij}}\sum_{n}q_{nm}^{ij}z_{nm}^{ij} \tag{A4a}$$

$$\text{s.t. } z_{m}^{ij}=\gamma_{m}^{ij}\left[\sum_{n}\alpha_{nm}^{ij}\left\{\beta_{nm}^{ij}z_{nm}^{ij}\right\}^{\frac{\sigma_{m}^{ij}-1}{\sigma_{m}^{ij}}}\right]^{\frac{\sigma_{m}^{ij}}{\sigma_{m}^{ij}-1}} \tag{A4b}$$

・需要関数

$$z_{nm}^{ij}=\frac{1}{\gamma_{m}^{ij}\left(\beta_{nm}^{ij}\right)^{1-\sigma_{m}^{ij}}}\left(\frac{\alpha_{nm}^{ij}}{q_{nm}^{ij}}\right)^{\sigma_{m}^{ij}}\Psi_{m}^{ij\ \frac{\sigma_{m}^{ij}}{1-\sigma_{m}^{ij}}}\cdot z_{m}^{ij} \tag{A5}$$

ただし， $\Psi_{m}^{ij}=\sum_{n}\left(\alpha_{nm}^{ij}\right)^{\sigma_{m}^{ij}}\left(\dfrac{q_{nm}^{ij}}{\beta_{nm}^{ij}}\right)^{1-\sigma_{m}^{ij}}$.

・価格式

$$q_{m}^{ij}=\frac{1}{\gamma_{m}^{ij}}\Psi_{m}^{ij\ \frac{1}{1-\sigma_{m}^{ij}}} \tag{A6}$$

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（$\sum_{n}\alpha_{nm}^{ij}=1,\sum_{n}\beta_{nm}^{ij}=1$）， $\gamma_{m}^{ij},\sigma_{m}^{ij}$ ：効率パラメータおよび代替弾力性パラメータ.

(4) 中間財n，合成運輸の投入

・最適化問題

$$q_{nm}^{ij}z_{nm}^{ij}=\min_{x_{nm}^{ij},z_{T}^{ij}}\left[p_{n}^{i}x_{nm}^{ij}+q_{Tm}^{ij}z_{Tm}^{ij}\right] \tag{A7a}$$

$$\text{s.t. } z_{nm}^{ij}=\gamma_{nm}^{ij}\left[\begin{array}{l}\left(1-\alpha_{Tm}^{ij}\right)\left\{\left(1-\beta_{Tm}^{ij}\right)x_{nm}^{ij}\right\}^{\frac{\sigma_{nm}^{ij}-1}{\sigma_{nm}^{ij}}}\\+\alpha_{Tm}^{ij}\left\{\beta_{Tm}^{ij}z_{Tm}^{ij}\right\}^{\frac{\sigma_{nm}^{ij}-1}{\sigma_{nm}^{ij}}}\end{array}\right]^{\frac{\sigma_{nm}^{ij}}{\sigma_{nm}^{ij}-1}} \tag{A7a}$$

・需要関数

$$x_{nm}^{ij}=\frac{1}{\gamma_{nm}^{ij}\left(1-\beta_{Tm}^{ij}\right)^{1-\sigma_{nm}^{ij}}}\left(\frac{1-\alpha_{Tm}^{ij}}{p_{n}^{i}}\right)^{\sigma_{nm}^{ij}}\Psi_{nm}^{ij\ \frac{\sigma_{nm}^{ij}}{1-\sigma_{nm}^{ij}}}z_{nm}^{ij} \tag{A8a}$$

$$z_{Tm}^{ij}=\frac{1}{\gamma_{nm}^{ij}\left(\beta_{Tm}^{ij}\right)^{1-\sigma_{nm}^{ij}}}\left(\frac{\alpha_{Tm}^{ij}}{q_{Tm}^{ij}}\right)^{\sigma_{nm}^{ij}}\Psi_{nm}^{ij\ \frac{\sigma_{nm}^{ij}}{1-\sigma_{nm}^{ij}}}z_{nm}^{ij} \tag{A8b}$$

ただし，

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

・価格式

$$q_{nm}^{ij}=\frac{1}{\gamma_{nm}^{ij}}\Psi_{nm}^{ij\ \frac{1}{1-\sigma_{nm}^{ij}}} \tag{A9}$$

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， γ_{nm}^{ij} ：効率パラメータ， σ_{nm}^{ij} ：代替弾力性パラメータ.

(5) 合成貨物，合成旅客の投入

・最適化問題

$$q_{Tm}^{ij}z_{Tm}^{ij}=\min_{z_{T_Fm}^{ij},z_{T_pm}^{ij}}\left[q_{T_Fm}^{ij}z_{T_Fm}^{ij}+q_{T_pm}^{ij}z_{T_pm}^{ij}\right] \tag{A10a}$$

$$\text{s.t. } z_{Tm}^{ij}=\gamma_{Tm}^{ij}\left[\begin{array}{l}\alpha_{T_Fm}^{ij}\left\{\beta_{T_Fm}^{ij}z_{T_Fm}^{ij}\right\}^{\frac{\sigma_{Tm}^{ij}-1}{\sigma_{Tm}^{ij}}}\\+\left(1-\alpha_{T_Fm}^{ij}\right)\left\{\left(1-\beta_{T_Fm}^{ij}\right)z_{T_pm}^{ij}\right\}^{\frac{\sigma_{Tm}^{ij}-1}{\sigma_{Tm}^{ij}}}\end{array}\right]^{\frac{\sigma_{Tm}^{ij}}{\sigma_{Tm}^{ij}-1}} \tag{A10b}$$

・需要関数

$$z_{T_Fm}^{ij}=\frac{1}{\gamma_{Tm}^{ij}\left(\beta_{T_Fm}^{ij}\right)^{1-\sigma_{Tm}^{ij}}}\left(\frac{\alpha_{T_Fm}^{ij}}{q_{T_Fm}^{ij}}\right)^{\sigma_{Tm}^{ij}}\Psi_{Tm}^{ij\ \frac{\sigma_{Tm}^{ij}}{1-\sigma_{Tm}^{ij}}}z_{Tm}^{ij} \tag{A11a}$$

$$z_{T_pm}^{ij}=\frac{1}{\gamma_{Tm}^{ij}\left(1-\beta_{T_Fm}^{ij}\right)^{1-\sigma_{Tm}^{ij}}}\left(\frac{1-\alpha_{T_Fm}^{ij}}{q_{T_pm}^{ij}}\right)^{\sigma_{Tm}^{ij}}\Psi_{Tm}^{ij\ \frac{\sigma_{Tm}^{ij}}{1-\sigma_{Tm}^{ij}}}z_{Tm}^{ij} \tag{A11b}$$

ただし，

$$\Psi_{Tm}^{ij}=\left(\alpha_{T_Fm}^{ij}\right)^{\sigma_{Tm}^{ij}}\left(\frac{q_{T_Fm}^{ij}}{\beta_{T_Fm}^{ij}}\right)^{1-\sigma_{Tm}^{ij}}+\left(1-\alpha_{T_Fm}^{ij}\right)^{\sigma_{Tm}^{ij}}\left(\frac{q_{T_pm}^{ij}}{1-\beta_{T_Fm}^{ij}}\right)^{1-\sigma_{Tm}^{ij}}.$$

・価格式

$$q_{Tm}^{ij}=\frac{1}{\gamma_{Tm}^{ij}}\Psi_{Tm}^{ij\ \frac{1}{1-\sigma_{Tm}^{ij}}} \tag{A12}$$

ただし， $z_{T_Fm}^{ij},q_{T_Fm}^{ij}$ ：合成貨物運輸投入量とその価格， $z_{T_pm}^{ij},q_{T_pm}^{ij}$ ：合成旅客運輸投入量とその価格， $\alpha_{T_Fm}^{ij},\beta_{T_Fm}^{ij}$ ：分配パラメータ， γ_{Tm}^{ij} ：効率パラメータ，

σ^{ij}_{Tm} 代替弾力性パラメータ.

(6) 交通機関選択（貨物運輸）

・最適化問題

$$q^{ij}_{T_F m} z^{ij}_{T_F m} = \min_{z^{ij}_{T_{Fn} m}} \left[\sum_{Fn} p^{i}_{T_{Fn}} z^{ij}_{T_{Fn} m} \right] \tag{A13a}$$

$$\text{s.t. } z^{ij}_{T_F m} = \gamma^{ij}_{T_F m} \left[\sum_{Fn} \alpha^{ij}_{T_{Fn} m} \left\{ \beta^{ij}_{T_{Fn} m} z^{ij}_{T_{Fn} m} \right\}^{\frac{\sigma^{ij}_{T_F m}-1}{\sigma^{ij}_{T_F m}}} \right]^{\frac{\sigma^{ij}_{T_F m}}{\sigma^{ij}_{T_F m}-1}} \tag{A13b}$$

・需要関数

$$z^{ij}_{T_{Fn} m} = \frac{1}{\gamma^{ij}_{T_F m} \left(\beta^{ij}_{T_{Fn} m} \right)^{1-\sigma^{ij}_{T_F m}}} \left(\frac{\alpha^{ij}_{T_{Fn} m}}{p^{i}_{T_{Fn}}} \right)^{\sigma^{ij}_{T_F m}} \Psi^{ij\ \frac{\sigma^{ij}_{T_F m}}{1-\sigma^{ij}_{T_F m}}}_{T_F m} z^{ij}_{T_F m} \tag{A14}$$

ただし，$\Psi^{ij}_{T_F m} = \sum_{Fn} \left(\alpha^{ij}_{T_{Fn} m} \right)^{\sigma^{ij}_{T_F m}} \left(\frac{p^{i}_{T_{Fn}}}{\beta^{ij}_{T_{Fn} m}} \right)^{1-\sigma^{ij}_{T_F m}}$.

・価格式

$$q^{ij}_{T_F m} = \frac{1}{\gamma^{ij}_{T_F m}} \Psi^{ij\ \frac{1}{1-\sigma^{ij}_{T_F m}}}_{T_F m} \tag{A15}$$

ただし，Fn ：貨物運輸の交通機関を表す添字，$z^{ij}_{T_{Fn} m}, p^{i}_{T_{Fn}}$ ：交通機関別貨物運輸 Fn による合成貨物運輸投入量と地域 i の貨物運 Fn その価格，$\alpha^{ij}_{T_{Fn} m}, \beta^{ij}_{T_{Fn} m}$ ：分配パラメータ（$\sum_{Fn} \alpha^{ij}_{T_{Fn} m} = 1, \sum_{Fn} \beta^{ij}_{T_{Fn} m} = 1$），$\gamma^{ij}_{T_F m}$ ：効率パラメータ，$\sigma^{ij}_{T_F m}$ ：代替弾力性パラメータ.

(7) 交通機関選択（旅客運輸）

・最適化問題

$$q^{ij}_{Tpm} z^{ij}_{Tpm} = \min_{z^{ij}_{T_{Pn} m}} \left[\sum_{Pn} \left(p^{i}_{T_{Pn}} + w^{i} t^{ij}_{Pn} \right) z^{ij}_{T_{Pn} m} \right] \tag{A16a}$$

$$\text{s.t. } z^{ij}_{Tpm} = \gamma^{ij}_{Tpm} \left[\sum_{Pn} \alpha^{ij}_{T_{Pn} m} \left\{ \beta^{ij}_{T_{Pn} m} z^{ij}_{T_{Pn} m} \right\}^{\frac{\sigma^{ij}_{Tpm}-1}{\sigma^{ij}_{Tpm}}} \right]^{\frac{\sigma^{ij}_{Tpm}}{\sigma^{ij}_{Tpm}-1}} \tag{A16b}$$

・需要関数

$$z^{ij}_{T_{Pn} m} = \frac{1}{\gamma^{ij}_{Tpm} \left(\beta^{ij}_{T_{Pn} m} \right)^{1-\sigma^{ij}_{Tpm}}} \left(\frac{\alpha^{ij}_{T_{Pn} m}}{p^{i}_{T_{Pn}} + w^{i} t^{ij}_{Pn}} \right)^{\sigma^{ij}_{Tpm}} \cdot \Psi^{ij\ \frac{\sigma^{ij}_{Tpm}}{1-\sigma^{ij}_{Tpm}}}_{Tpm} z^{ij}_{Tpm} \tag{A17}$$

ただし，$\Psi^{ij}_{Tpm} = \sum_{Pn} \left(\alpha^{ij}_{T_{Pn} m} \right)^{\sigma^{ij}_{Tpm}} \left(\frac{p^{i}_{T_{Pn}} + w^{i} t^{ij}_{Pn}}{\beta^{ij}_{T_{Pn} m}} \right)^{1-\sigma^{ij}_{Tpm}}$.

・価格式

$$q^{ij}_{Tpm} = \frac{1}{\gamma^{ij}_{Tpm}} \Psi^{ij\ \frac{1}{1-\sigma^{ij}_{Tpm}}}_{Tpm} \tag{A18}$$

ただし，Pn ：旅客運輸の交通機関を表す添字，$z^{ij}_{T_{Pn} m}, p^{i}_{T_{Pn}}$ ：交通機関別旅客運輸 Pn による合成旅客運輸投入量とその価格，$\alpha^{ij}_{T_{Pn} m}, \beta^{ij}_{T_{Pn} m}$ ：分配パラメータ（$\sum_{Pn} \alpha^{ij}_{T_{Pn} m} = 1, \sum_{Pn} \beta^{ij}_{T_{Pn} m} = 1$），$\gamma^{ij}_{Tpm}$ ：効率パラメータ，σ^{ij}_{Tpm} ：代替弾力性パラメータ.

(8) 合成労働，合成資本の投入

・最適化問題

$$pf^{j}_{m} cf^{j}_{m} = \min_{l^{j}_{m}, k^{j}_{m}} \left[w^{j}_{m} l^{j}_{m} + r^{j}_{m} k^{j}_{m} \right] \tag{A19a}$$

$$\text{s.t. } cf^{j}_{m} = \gamma^{j}_{CFm} \left[\begin{array}{l} \alpha^{j}_{Lm} \left\{ \beta^{j}_{Lm} l^{j}_{m} \right\}^{\frac{\sigma^{j}_{CFm}-1}{\sigma^{j}_{CFm}}} \\ + \left(1-\alpha^{j}_{Lm} \right) \left\{ \left(1-\beta^{j}_{Lm} \right) k^{j}_{m} \right\}^{\frac{\sigma^{j}_{CFm}-1}{\sigma^{j}_{CFm}}} \end{array} \right]^{\frac{\sigma^{j}_{CFm}}{\sigma^{j}_{CFm}-1}} \tag{A19b}$$

・需要関数

$$l^{j}_{m} = \frac{1}{\gamma^{j}_{CFm} \left(\beta^{j}_{Lm} \right)^{1-\sigma^{j}_{CFm}}} \left(\frac{\alpha^{j}_{Lm}}{w^{j}_{m}} \right)^{\sigma^{j}_{CFm}} \Psi^{j\ \frac{\sigma^{j}_{CFm}}{1-\sigma^{j}_{CFm}}}_{CFm} \cdot cf^{j}_{m} \tag{A20a}$$

$$k^{j}_{m} = \frac{1}{\gamma^{j}_{CFm} \left(1-\beta^{j}_{Lm} \right)^{1-\sigma^{j}_{CFm}}} \left(\frac{1-\alpha^{j}_{Lm}}{w^{j}_{m}} \right)^{\sigma^{j}_{CFm}} \Psi^{j\ \frac{\sigma^{j}_{CFm}}{1-\sigma^{j}_{CFm}}}_{CFm} \cdot cf^{j}_{m} \tag{A20b}$$

ただし，

$$\Psi^{j}_{CFm} = \left(\alpha^{j}_{Lm} \right)^{\sigma^{j}_{CFm}} \left(\frac{w^{j}_{m}}{\beta^{j}_{Lm}} \right)^{1-\sigma^{j}_{CFm}} + \left(1-\alpha^{j}_{Lm} \right)^{\sigma^{j}_{CFm}} \left(\frac{r^{j}_{m}}{1-\beta^{j}_{Lm}} \right)^{1-\sigma^{j}_{CFm}} .$$

・価格式

$$pf^{j}_{m} = \frac{1}{\gamma^{j}_{CFm}} \Psi^{j\ \frac{1}{1-\sigma^{j}_{CFm}}}_{CFm} \tag{A21}$$

ただし，l^{j}_{m}, w^{j}_{m} ：地域 j の m 企業の合成労働投入量とその合成賃金率，k^{j}_{m}, r^{j}_{m} ：地域 j の m 企業の合成資本投入量とその合成利子率，$\alpha^{j}_{Lm}, \beta^{j}_{Lm}$ ：分配パラメータ，γ^{j}_{CFm} ：効率パラメータ，σ^{j}_{CFm} ：代替弾力性パラメータ.

(9) 労働の地域投入

・最適化問題

$$w^{j}_{m} l^{j}_{m} = \min_{l^{ij}_{m}} \left[\sum_{i} w^{i} l^{ij}_{m} \right] \tag{A22a}$$

$$\text{s.t. } l^{ij}_{m} = \gamma^{j}_{Lm} \left[\sum_{i} \alpha^{ij}_{Lm} \left\{ \beta^{ij}_{Lm} l^{ij}_{m} \right\}^{\frac{\sigma^{j}_{Lm}-1}{\sigma^{j}_{Lm}}} \right]^{\frac{\sigma^{j}_{Lm}}{\sigma^{j}_{Lm}-1}} \tag{A22b}$$

・需要関数

$$l_m^{ij} = \frac{1}{\gamma_{Lm}^j \left(\beta_{Lm}^{ij}\right)^{1-\sigma_{Lm}^j}} \left(\frac{\alpha_{Lm}^{ij}}{w^i}\right)^{\sigma_{Lm}^j} \Psi_{Lm}^{j\ \frac{\sigma_{Lm}^j}{1-\sigma_{Lm}^j}} \cdot l_m^j \qquad \text{(A23)}$$

ただし，$\Psi_{Lm}^j = \sum_i \left(\alpha_{Lm}^{ij}\right)^{\sigma_{Lm}^j} \left(\frac{w^i}{\beta_{Lm}^{ij}}\right)^{1-\sigma_{Lm}^j}$.

・価格式

$$w_m^j = \frac{1}{\gamma_{Lm}^j} \Psi_{Lm}^{j\ \frac{1}{1-\sigma_{Lm}^j}} \qquad \text{(A21)}$$

ただし，l_m^{ij}, w^i ：地域jのm企業の地域iからの労働投入量と地域iの賃金率，$\alpha_{Lm}^{ij}, \beta_{Lm}^{ij}$ ：分配パラメータ（$\sum_i \alpha_{Lm}^{ij} = 1, \sum_i \beta_{Lm}^{ij} = 1$），$\gamma_{Lm}^j$ ：効率パラメータ，σ_{Lm}^j ：代替弾力性パラメータ．

(11) 資本の地域投入

・最適化問題

$$r_m^j k_m^j = \min_{k_m^{ij}} \left[\sum_i r^i k_m^{ij} \right] \qquad \text{(A25a)}$$

$$\text{s.t. } k_m^{ij} = \gamma_{Km}^j \left[\sum_i \alpha_{Km}^{ij} \left\{ \beta_{Km}^{ij} k_m^{ij} \right\}^{\frac{\sigma_{Km}^j - 1}{\sigma_{Km}^j}} \right]^{\frac{\sigma_{Km}^j}{\sigma_{Km}^j - 1}} \qquad \text{(A25b)}$$

・需要関数

$$k_m^{ij} = \frac{1}{\gamma_{Km}^j \left(\beta_{Km}^{ij}\right)^{1-\sigma_{Km}^j}} \left(\frac{\alpha_{Km}^{ij}}{r^i}\right)^{\sigma_{Km}^j} \Psi_{Km}^{j\ \frac{\sigma_{Km}^j}{1-\sigma_{Km}^j}} \cdot k_m^j \qquad \text{(A26)}$$

ただし，$\Psi_{Km}^j = \sum_i \left(\alpha_{Km}^{ij}\right)^{\sigma_{Km}^j} \left(\frac{r^i}{\beta_{Km}^{ij}}\right)^{1-\sigma_{Km}^j}$.

・価格式

$$r_m^j = \frac{1}{\gamma_{Km}^j} \Psi_{Km}^{j\ \frac{1}{1-\sigma_{Km}^j}} \qquad \text{(A27)}$$

ただし，k_m^{ij}, r^i ：地域jのm企業の地域iからの資本投入量と地域iの利子率，$\alpha_{Km}^{ij}, \beta_{Km}^{ij}$ ：分配パラメータ（$\sum_i \alpha_{Km}^{ij} = 1, \sum_i \beta_{Km}^{ij} = 1$），$\gamma_{Km}^j$ ：効率パラメータ，σ_{Km}^j ：代替弾力性パラメータ．

参考文献

1) Bröcker J. : Operational Spatial Computable General Equilibrium Modeling, *The Annals of Regional Science*, Vol.32, pp.367-387, 1998.
2) 宮城俊彦，本部賢一：応用一般均衡分析を基礎にした地域間交易量モデルに関する研究，土木学会論文集，No.530／IV-30，pp.31-40，1996.
3) 小池淳司，佐藤啓輔，川本信秀：空間的応用一般均衡モデル「RAEM-Light」を用いた道路ネットワーク評価－地域間公平性の視点からの実務的アプローチ－，土木計画学研究・論文集，No.26，pp.161-168，2009.
4) 小池淳司，川本信秀，佐藤啓輔：港湾取扱貨物量を明示化した道路ネットワーク評価モデルの構築－応用一般均衡モデル「RAEM-Light」をもちいたアプローチ－，土木計画学研究・論文集，No.26，pp.189-196，2009.
5) 森杉壽芳：SCGE モデルによる道路整備効果計測と効果の便益帰着表による整理，日交研シリーズ A-578，日本交通政策研究会，2013.
6) 青木優，武藤慎一，桐越信，森杉壽芳：大規模幹線道路の SCGE モデルによる整備効果の計測と便益帰着構成表による整理―東海環状自動車道を例として―，高速道路と自動車，Vo.55，No.3，pp.27-34，2012.
7) 森杉壽芳編：社会資本整備の便益評価 ― 一般均衡理論によるアプローチ―，勁草書房，1997.
8) 国土交通省：費用便益分析マニュアル，国土交通省道路局，都市・地方整備局，2008.
9) Tavasszy, L.A., M.J.P.M. Thissen and J. Oosterhaven : Challenges in the application of spatial general equilibrium models for transport appraisal, *Research in Transportation Economics*, Vol.31, pp.12-18, 2011.
10) Haddad, E.A. and G.J.D. Hewings : Market imperfections in a spatial economy : some experimental results, *The Quarterly Review of Economics and Finance*, Vol.45, pp.476-496, 2005.
11) 上田孝行編著：Excel で学ぶ地域・都市経済分析，コロナ社，2009.
12) 宮城俊彦：独立した輸送部門をもつ SCGE モデルによる高速道路の経済効果評価，土木学会論文集 D3（土木計画学），Vol.68，No.4，pp.291-304，2012.
13) Kim, E., H.S. Kim and G.J.D. Hewings : An Application of the Integrated Transport Network-Multi-regional CGE Model, *Journal of Transport Economics and Policy*, Vol.45, No.2, pp.223-245, 2011.
14) Ando, A. and B. Meng : Transport Sector and Regional Price Differentials : A SCGE Model for Chinese Provinces, *IDE Discussion Paper*, No.81, 2006.
15) 孟渤，安藤朝夫：価格差を考慮した中国経済の SCGE モデル：地域間産業連関表による検証と実証分析，土木学会論文 D，Vol.62，No.1，pp.145-156，2006.
16) 伴金美：日本経済の多地域動学的応用一般均衡モデルの開発：Forward Looking の視点に基づく地域経済分析，RIETI Discussion Paper Series, No.07-J-043，2007.
17) 森杉壽芳：人流と物流，私用と業務の交通サービスに関する時間価値の観察可能性に関する研究，日交研シリーズ A-409，日本交通政策研究会，2006.
18) 太田和博，加藤一誠，小島克巳：交通の産業連関分析，日本評論社，2006.
19) 経済産業省：平成 17 年地域間産業連関表，経済産業省経済産業政策局調査統計部，2010.
20) 宮城俊彦，本部賢一，井上恵介：多地域応用一般均衡モデルに用いる交易係数について，土木計画学研究・論文集，Vol.15，pp.93-100，1998.
21) Bröcker, J., A. Korzhenevych and C. Schürmann: Assessing spatial equity and efficiency impacts of transport infrastructure projects, Transportation Research, Part B, Vol.44, pp.795–811, 2010.

22) 土谷和之，林山泰久，上田孝行：空間的応用一般均衡モデルによる台湾高速鉄道の整備効果分析，土木計画学研究発表会・講演集，No.40，CD-ROM，No.320，2009.
23) 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－，土木学会論文集 D3（土木計画学），Vol.68，No.4，pp.316-332，2012.
24) 武藤慎一：自家輸送を明示化した地域間産業連関表の作成，交通学研究，Vol.57，pp.89-96，2014.
25) 細江宣裕，我澤賢之，橋本日出男：『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，2004.
26) Barro, R.J. and X. Sala-i-Martin : Economic Growth, the MIT Press, 2003（大住圭介訳：内生的経済成長論 I，九州大学出版会）.
27) 武藤慎一，桐越信：Barro 型 CES 関数に基づく空間的応用一般均衡（SCGE）モデルの一般性向上-交通モデルを中心に-，交通学研究／2010 年研究年報，pp.255-264，2011.
28) 中村英夫編・道路投資評価研究会著：『道路投資の社会経済評価』，東洋経済新報社，1997.
29) 西村和雄：ミクロ経済学，東洋経済新報社，1990.

(2016. 7. 31 受付)