

Title	産業連関分析による技術革新のスピルオーバー効果
Author(s)	田村, 誠; 藤垣, 裕子
Citation	年次学術大会講演要旨集, 16: 440-443
Issue Date	2001-10-19
Type	Conference Paper
Text version	publisher
URL	http://hdl.handle.net/10119/6672
Rights	本著作物は研究・技術計画学会の許可のもとに掲載するものです。This material is posted here with permission of the Japan Society for Science Policy and Research Management.
Description	一般論文

○田村 誠, 藤垣裕子 (東大総合)

1. はじめに

技術変化と経済成長、そして環境保全には複雑な相互関係が存在する(Carraro(2000))。技術変化によって、直接的には単位当たりの汚染物質の排出量が減少し、その削減コストが低下する。間接的には、技術革新とその結果としての新たな製品への投資が経済成長と天然資源利用に影響を及ぼす。例えば、革新的な新製品により生活水準が向上すれば、消費者は環境質への選好を喚起される。技術革新は持続的な経済成長にとって不可欠であり、また環境保全に対してもその果たす役割は大きい。

現在、アメリカの離脱表明に代表されるように、京都議定書の発効が危ぶまれる状況にあるが、中長期的には地球規模の温暖化防止対策が実施されるのは必至であろう。数値削減目標といった環境規制がなされた場合、その達成に向けて国内における技術革新や、国際協調制度を利用した技術移転などが推進されることが予想される。つまり、環境規制による正の効果も考えられる。しかし、温暖化対策評価のための多くの数理モデルにおいて、技術変化は過去のエネルギー効率の改善をそのまま踏襲するという形式で表現されていて、新たな政策による技術革新の効果は必ずしも明示的に想定されていない。こうした試みは、最近になって取り組まれるようになったばかりであり、開発途上段階にある。

Rennings(2000)らが指摘しているように、環境のための革新は、二重の外部性(double externality)の問題に直面している。第一の外部性は、革新プロセスが他の企業や組織へスピルオーバー効果を誘発することである。第二の外部性は、新たな製品やプロセスそれ自体は環境外部性を小さくすることである。この二つの外部性の問題によって次善の投資が行われ、環境革新に特有の性質が誘発されるのである。したがって、技術進歩が環境の持続可能性にいかに関与するか、あるいは革新が起きたときに産業部門構造に何が起こるか、といったことをより定量的に探る必要がある。

こうした問題意識から、本稿は中国と日本を対象事例として産業連関分析を応用した技術変化のスピルオーバー効果の潜在量を測定する。

2. 革新のスピルオーバー

2.1. 概要

産業連関分析は、産業構造の違いや波及効果、産業部門の相互依存性などが反映されることが利点として挙げられる。多部門経済において、ある部門で起こった革新の効果は伝播し、他部門の生産にまで影響を及ぼす。本稿では革新を、プロセス革新とプロダクト革新に大別して考察する。革新効果は、投入係数の変化に反映されると仮定する。プロセス革新は同量の異なる投入でより多く生産する(決められた量をより少ない投入で生産する場合である。これに対して、プロダクト革新はそれぞれの部門が革新的製品により、少ない投入で同量の生産を行なうことと定義する。プロダクト革新は、既存の財の改良や新製品の開発を必要とする。ある企業のプロダクト革新が他の企業にプロセス革新を生むこともあり得るが、プロセス革新は投入係数行列の列の変化、プロダクト革新は行の変化に相当すると仮定する。そして、革新のスピルオーバー効果は革新が起きた部門以外の部門全体における生産量の変化の割合として定義する。

推定方法は、1991年における欧州連合(EU)のスピルオーバー効果について考察した Dietzenbacher(2000)に基づいている。本稿では、これを環境規制等による技術革新とその誘発効果という文脈で、各係数と比較しながら中国と日本を対象事例に検証する。

2.2. プロセス革新

一般的なレオンチェフモデルは(1)式で与えられる。

$$\mathbf{x} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{f} \quad (1)$$

$\mathbf{x}$ は生産量ベクトル、 $\mathbf{f}$ は最終需要ベクトルを表す。一般に、 n 個からなる各部門は一つの財を生産すると仮定される。 $\mathbf{A}$ は $n \times n$ の投入係数行列、その各要素を a_{ij} とし投入係数と呼ぶ。(1)式を変形すると、 $\mathbf{x}$ を求める(2)式となる。

$$\mathbf{x} = (\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \mathbf{f} = \mathbf{L}\mathbf{f} \quad (2)$$

$\mathbf{L} = (\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}$ をレオンチェフ逆行列と呼び、各要素を l_{ij} と表す。 l_{ij} は財 j に対する最終需要 1 単位を満たすために直接、間接に必要な財 i の生産量を示している。つまり、 $l_{ij} = \Delta x_i / \Delta f_j$ に等しい。

産業部門 k におけるプロセス革新を(3)式で表されると定義す

る。プロセス革新は、プロセス k において同じ投入量でより多くの生産を行なうことを意味している。

$$\bar{a}_{ik} = (1 - \alpha)a_{ik} \quad \text{for } i=1, \dots, n \quad (3)$$

ここで、 $0 < \alpha < 1$ である。また、 $\bar{a}_{ij} = a_{ij}$ (for $i=1, \dots, n$ かつ $j \neq k$) とし、部門 k 以外は元の投入係数と同じである。すなわち、プロセス革新は投入係数行列の列の変化に対応し、 $\bar{\mathbf{A}} = \mathbf{A} - \alpha(\mathbf{Ae}_k)\mathbf{e}_k'$ ($\mathbf{e}_k'$ は転置ベクトル) とおける。このとき、(1)、(2)式と同様に $\bar{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\bar{\mathbf{x}} + \mathbf{f}$ 、 $\bar{\mathbf{x}} = \bar{\mathbf{L}}\mathbf{f}$ となる。

プロセス革新の効果は以下のように測られる。革新によって財 k の単位当たりの追加的最終需要は、より少ない生産量で済む。つまり、 $\Delta\bar{x}_i/\Delta f_j - \Delta x_i/\Delta f_j = \bar{l}_{ik} - l_{ik}$ は $\bar{\mathbf{L}} < \mathbf{L}$ (すべての ij について $\bar{l}_{ij} < l_{ij}$) なので負となる。レオンチェフ逆行列は $\mathbf{L} = \mathbf{I} + \mathbf{A} + \mathbf{A}^2 + \mathbf{A}^3 + \dots$ とも表すことができ、 k 次の単位ベクトル $\mathbf{e}_k$ と $\Delta\mathbf{x}/\Delta f_j$ を用いて、

$$\Delta\mathbf{x}/\Delta f_j = \mathbf{Le}_k = \mathbf{e}_k + \mathbf{Ae}_k + \sum_{i=2}^{\infty} \mathbf{A}^i \mathbf{e}_k$$

となる。同様に、

$$\Delta\bar{\mathbf{x}}/\Delta f_j = \bar{\mathbf{L}}\mathbf{e}_k = \mathbf{e}_k + \bar{\mathbf{A}}\mathbf{e}_k + \sum_{i=2}^{\infty} \bar{\mathbf{A}}^i \mathbf{e}_k = \mathbf{e}_k + (1 - \alpha)\mathbf{Ae}_k + \sum_{i=2}^{\infty} \bar{\mathbf{A}}^i \mathbf{e}_k$$

ゆえに、2 式の差をとると(4)式になる。

$$\Delta\bar{\mathbf{x}}/\Delta f_j - \Delta\mathbf{x}/\Delta f_j = -\alpha\mathbf{Ae}_k + \sum_{i=2}^{\infty} (\bar{\mathbf{A}}^i - \mathbf{A}^i)\mathbf{e}_k \quad (4)$$

革新プロセス k は各投入が少なくても済むので、財 k の単位当たり最終需要、全ての産出は減少する。これが $-\mathbf{Ae}_k$ で表される直接効果である。これらの投入の各生産は財 k という投入を必要とする。その次に、財 k の生産プロセスは革新され、少ない投入で済むという波及がある。この間接効果は $\sum_{i=2}^{\infty} (\bar{\mathbf{A}}^i - \mathbf{A}^i)\mathbf{e}_k$ と表現される。

同様に、財 j ($j \neq k$) における単位当たりの追加的最終需要は、以下のようになる(直接効果はないので $\bar{\mathbf{A}}\mathbf{e}_j = \mathbf{Ae}_j$ となる)。

$$\Delta\bar{\mathbf{x}}/\Delta f_j = \mathbf{e}_j + \bar{\mathbf{A}}\mathbf{e}_j + \sum_{i=2}^{\infty} \bar{\mathbf{A}}^i \mathbf{e}_j = \mathbf{e}_j + \mathbf{Ae}_j + \sum_{i=2}^{\infty} \bar{\mathbf{A}}^i \mathbf{e}_j$$

であるから、

$$\Delta\bar{\mathbf{x}}/\Delta f_j - \Delta\mathbf{x}/\Delta f_j = \sum_{i=2}^{\infty} (\bar{\mathbf{A}}^i - \mathbf{A}^i)\mathbf{e}_j \quad (5)$$

$j \neq k$ なので(5)式は、直接効果はなく全ての効果が間接的である。

$\Delta\bar{x}_i/\Delta f_j - \Delta x_i/\Delta f_j$ ($i=1, \dots, n$) は財 k の追加的最終需要におけるプロセス革新の効果を表す。プロセス k での革新は伝播し、その他の最終需要にも影響する。 $\Delta\bar{x}_i/\Delta f_j - \Delta x_i/\Delta f_j$ は、財 j ($j \neq k$) の追加的最終需要における影響を示している。

伝播の量を測定する際に、部門 i における生産の変化は革新の起きた部門 k の変化に関係すると仮定する。

$$\frac{\Delta\bar{x}_i/\Delta f_j - \Delta x_i/\Delta f_j}{\Delta\bar{x}_k/\Delta f_j - \Delta x_k/\Delta f_j} = \frac{\bar{l}_{ij} - l_{ij}}{\bar{l}_{kj} - l_{kj}} \quad (6)$$

途中式は省略するが、(6)式は $l_{kk}/(l_{kk}-1)$ に等しくなる。革新効果のスピルオーバーは、革新が起きた部門 k 以外の部門 i 全体における生産量の変化の割合として定義する。つまり、プロセス革新のスピルオーバー効果を示す s_k は(7)式となる。(7)式は、特定部門の最終需要 f_j や α に依存しない形式で表される。

$$s_k = 100[\sum_{i \neq k} (\bar{x}_i - x_i)] / \sum_i (\bar{x}_i - x_i) = 100(c_k - l_{kk}) / (c_k - 1) \quad (7)$$

ここで l_{kk} はレオンチェフ逆行列 $\mathbf{L} = (\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}$ の対角要素、 c_k は $\mathbf{L}$ の k 列における列和を表す。

2.3. プロダクト革新

プロダクト革新はそれぞれの部門が革新的製品により、少ない投入で同量の生産を行なうことと解釈する。部門 k におけるプロダクト革新は(8)式で表されるとする。

$$\bar{a}_{kj} = (1 - \alpha)a_{kj} \quad \text{for } j=1, \dots, n \quad (8)$$

ここでも、 $0 < \alpha < 1$ である。プロダクト革新は投入係数行列の行の変化に相当し、 $\bar{\mathbf{A}} = \mathbf{A} - \alpha\mathbf{e}_k(\mathbf{e}_k' \mathbf{A})$ と表せる。任意の財 j への最終需要が増加したとする。これは部門 k での生産に影響する。直接的には、プロセス j は投入としてプロダクト k をあまり使わなくて済むようになる。間接的には、プロセス j は投入として全てのプロダクトを使いながら、これらのプロダクトの各々は部門 k からの投入がより少なくて済む。

$$\begin{aligned} \Delta\bar{x}_i/\Delta f_j - \Delta x_i/\Delta f_j &= \bar{l}_{ij} - l_{ij} = \mathbf{e}_i'(\bar{\mathbf{L}} - \mathbf{L})\mathbf{e}_j \\ &= -\alpha a_{ij} + \sum_{i=2}^{\infty} \mathbf{e}_i'(\bar{\mathbf{A}}^i - \mathbf{A}^i)\mathbf{e}_j \end{aligned} \quad (9)$$

(9)式の第1項は直接効果、第2項は間接効果を示している。プロダクト j の追加的な最終需要は部門 i ($i \neq k$) にも影響する。しかしこの場合、生産の減少は間接効果のみにより、(10)式で表される。

$$\Delta\bar{x}_i/\Delta f_j - \Delta x_i/\Delta f_j = \bar{l}_{ij} - l_{ij} = \sum_{i=2}^{\infty} \mathbf{e}_i'(\bar{\mathbf{A}}^i - \mathbf{A}^i)\mathbf{e}_j \quad (10)$$

伝播の大きさは、再び(6)式で測定される。(9)、(10)式や、幾つかの式変形を行って(11)式になる。(11)式も α と f_j に依存しない。

$$\frac{\Delta\bar{x}_i/\Delta f_j - \Delta x_i/\Delta f_j}{\Delta\bar{x}_k/\Delta f_j - \Delta x_k/\Delta f_j} = \frac{l_{ik}}{l_{kk}} \quad (11)$$

2.2 節と同様、革新のスピルオーバーは革新の起こった部門 k 以外の部門 i における生産量の変化の割合として定義される。プロダクト革新のスピルオーバー効果 s_k は(12)式で表される。

$$\tilde{s}_k = 100(c_k - l_{kk})/c_k \quad (12)$$

プロセス革新とプロダクト革新のスピルオーバーである s_k と $\tilde{s}_k$ との主な違いは直接効果にある。プロセス革新は直接効果が全くないか、すべての部門に影響するかのいずれかである。プ

ロダクト革新は革新の起きた部門 k に直接影響を与える。その後
に続く間接効果は、生産部門における部門 k の依存性を示してい
る。このため、 s_k より s'_k の方が一般に大きな値となる。

以上が、革新のスピルオーバー効果に関する各指標の概要で
ある。なお、データは中国国家统计局による中国投入産出表 1997
年表と経済産業省による平成9年産業連関表年表(延長表)等を利用
した。産業分類は「国際産業連関表」の大分類に準じている
が、中国と日本を部門比較するため、20 部門に分類した。

3. 計算結果

3.1. スピルオーバー効果

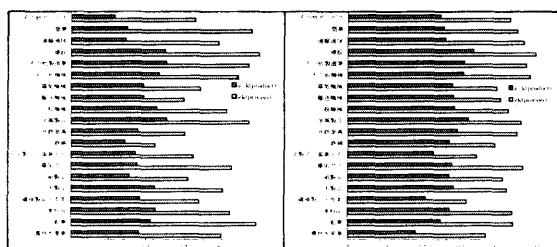


図 1 日本(左)及び中国(右)のスピルオーバー効果

図 1 は、日本と中国の各産業部門における革新のスピルオー
バー効果を表している。全般的にスピルオーバーはプロセス革
新、プロダクト革新とも中国は日本よりも大きな値を示す部門
が多い。特に、 s'_k は日本と中国の値に差異が見られる。産業部
門毎の効果に注目すると中国、日本とも建設、金属製品などが
比較的大きな値を示す一方、鉄鋼や非鉄金属では両国の値の差
が大きい。 s_k および s'_k がともに大きな値を示す部門は、中国で
は建設、金属製品、その他機械、非鉄金属など、日本は金属製
品、その他製造業、建設が挙げられる。中国の鉱業や日本の商
業、電気ガスなどの部門は、 s_k が比較的大きいものの、 s'_k はそ
れほど大きくない。これらの傾向は、産業部門の相互依存性の
大きさや、産業構造の違いなどを反映していると考えられる。

スピルオーバー効果は産業部門の相互依存性の大きさに左右
される。自部門に依存している産業は、レオンチェフ逆行列の
対角要素 l_{kk} が大きくなるためスピルオーバーが小さく、他部門
に依存する産業のスピルオーバーは大きな値を示すと考えられ
る。また、プロセス革新のスピルオーバー s_k の方がプロダクト革
新のスピルオーバー s'_k よりも大きな値となる。これは、プロダ
クト革新とプロセス革新によって、直接効果の影響の受け方が
異なることに起因する。

3.2. 他指標との比較

従来の産業連関分析における各係数と本稿の s_k および s'_k と比
較しておこう。各係数の測定結果を表 1、表 2 に示す。影響力
係数を BL (Backward Linkages)、感応度係数を FL (Forward
Linkages)と表す。中国は化学製品・窯業土石、鉱業、農林水産
業、繊維製品・皮革など感応度係数(FL)が大きい部門が多いこ
とは、日本との違いの一つに挙げられる。

影響力係数(BL)と感応度係数(FL)との相互関係についても、考
察しておこう。 BL と FL がともに 1 を越える部門は主要部門(Key
sector)と呼ばれる。中国では化学製品・窯業土石、電気機械、
一般機械、繊維製品・皮革、鉄鋼、日本では鉄鋼、化学製品・
窯業土石が Key sector となり、鉄鋼部門が共通していた。 $BL > 1$
かつ $FL < 1$ となる部門(Backward linkages oriented sector)は
金属製品、非鉄金属、輸送機械、木製品が日中で共通していた。
また、 $BL < 1$ かつ $FL > 1$ となるのは(Forward linkages oriented
sector)は、商業部門が共通した。

次に、 s_k と BL との関係に注目する。 BL と s_k はレオンチェフ
逆行列の列和が含まれているという共通点がある。しかし、 s_k
には l_{kk} も組み込まれているなど、両係数による興味深い差が見
られる。ここでは便宜的に、 s_k が 80% を越えるかどうかでスピ
ルオーバーの大小を区別する。 $BL < 1$ かつ $s_k < 80\%$ で両係数とも小
さな値となった部門は、中国では農林水産業のみ、日本は農林
水産業、紙製品、運輸通信、その他サービスであった。逆に $BL > 1$
かつ $s_k > 80\%$ となるのは、中国において木製品、紙製品、非鉄金
属、金属製品、一般機械、輸送機械、その他製造業、建設であ
った。日本では食料品、木製品、金属製品、一般機械、その他
機械、その他製造業である。これらの部門は影響力が大きい上
に他部門へのスピルオーバーも大きい。一方、鉄鋼や化学製品・
窯業土石などは両国とも、 BL が 1 より大きいものの、スピルオ
ーバー効果はそれほど大きくない。一般機械、その他機械等と
異なり、材料生産などが中心で自部門への影響力が強いことが
示唆される。この他、スピルオーバー s_k は 80% を越えるが、 BL
は 1 より小さい部門として、鉱業と商業が両国で共通していた。

最後に、最終需要部門合計の生産誘発係数について述べてお
く。産業部門全体の誘発係数は中国が 2.23、日本は 1.90 であ
った。中国において生産誘発係数が最も大きい部門はその他サー
ビス、続いて農林水産業、化学製品・窯業土石、建設、繊維製
品・皮革、食料品という順になった。日本でもその他サービス
が最も大きく、商業、建設、化学製品・窯業土石、運輸通信、
電気機械、輸送機械が続く。ただし、その他サービスは様々な
第 3 次産業を集約しているの、測定結果の解釈には注意が必要
である。

表 1 日本における各係数

	s_k	s_k^*	BL	FL	生産誘発 係数
農林水産業	79.4%	36.0%	0.87	0.85	0.028
鉱業	97.5%	42.5%	0.85	0.83	0.003
食料品	84.2%	45.0%	1.03	0.70	0.074
繊維製品・皮革	67.7%	36.8%	1.05	0.73	0.019
木製品	80.2%	44.5%	1.08	0.71	0.016
紙製品	62.0%	31.2%	0.96	0.98	0.042
電気ガス	85.0%	35.3%	0.82	0.90	0.053
化学製品・窯業土石	64.9%	34.4%	1.02	1.84	0.118
鉄鋼	44.8%	28.8%	1.34	1.50	0.041
非鉄金属	60.2%	35.5%	1.17	0.98	0.013
金属製品	93.7%	50.9%	1.05	0.73	0.030
一般機械	82.3%	45.7%	1.08	0.64	0.059
輸送機械	59.9%	38.8%	1.36	0.89	0.084
電気機械	68.4%	38.8%	1.10	0.88	0.106
その他機械	88.2%	46.8%	1.02	0.55	0.008
その他製造業	93.5%	50.8%	1.05	0.57	0.013
建設	99.1%	50.1%	0.97	0.61	0.161
運輸通信	78.4%	29.3%	0.76	1.18	0.113
商業	95.0%	29.8%	0.70	1.24	0.187
その他サービス	65.7%	23.3%	0.74	2.67	0.633
平均	77.5%	38.7%			
合計					1.90

表 2 中国における各係数

	s_k	s_k^*	BL	FL	生産誘発 係数
農林水産業	73.2%	36.1%	0.71	1.21	0.276
鉱業	87.7%	49.2%	0.82	1.38	0.076
食料品	87.3%	54.0%	0.94	0.66	0.154
繊維製品・皮革	63.1%	41.6%	1.06	1.20	0.172
木製品	84.1%	56.0%	1.08	0.57	0.025
紙製品	82.1%	53.6%	1.04	0.79	0.049
電気ガス	92.9%	55.2%	0.89	0.88	0.050
化学製品・窯業土石	68.3%	45.5%	1.08	2.31	0.205
鉄鋼	77.8%	53.6%	1.16	1.59	0.087
非鉄金属	89.7%	58.1%	1.02	0.82	0.098
金属製品	91.9%	63.8%	1.18	0.80	0.056
一般機械	85.2%	56.6%	1.07	1.12	0.101
輸送機械	81.1%	56.2%	1.17	0.82	0.059
電気機械	79.3%	55.6%	1.21	1.08	0.117
その他機械	96.5%	61.2%	0.99	0.46	0.008
その他製造業	94.6%	61.6%	1.03	0.55	0.026
建設	99.6%	66.6%	1.09	0.44	0.194
運輸通信	93.5%	51.8%	0.81	0.93	0.078
商業	89.9%	50.9%	0.83	1.11	0.123
その他サービス	86.1%	49.2%	0.84	1.30	0.278
平均	85.2%	53.8%			
合計					2.23

各係数を分析することにより、幾つか特徴的な観察が見られた。例えば、生産誘発効果は大きいがスピルオーバー効果は小さい部門(中国の農林水産業、日本の商業、その他サービスなど)や、その逆の性質を持つ部門(中国の電気ガス、その他機械、その他製造業、日本の鉱業、その他製造業など)など各部門において異なる傾向が見られる。この結果は仮に同規模の技術移転を

行ったとしても、部門毎に波及効果の多様性があることを示している。

4. 考察

本稿では産業連関分析に基づき、中国と日本における技術革新のスピルオーバーの潜在量を測定した。今回の結果から、地球温暖化対策として日本からの中国への技術移転を行なうことは、限界削減費用の安さだけでなく、他部門への波及効果が大きいという観点からも、その潜在的有効性が確認されたことになるだろう。また各指標と比較することにより、各国の産業部門の特性を認識した上での適切な方策を検討する一手段になったといえよう。

地球温暖化問題は、その解決に向け長い道程が予想される。加えて、外部性の問題など長期的かつ不確実な特性を多分に含んでいるため、地球温暖化問題に向けた技術革新への産業界の短期的なインセンティブは、政府の明確かつ適切な規制政策がない限り、それほど大きくならないという指摘もある(Carraro(2000)など)。しかしながら、温暖化問題は長い将来にわたって人類が取り組まざるを得ない問題であり、少なくとも長期的には環境革新が経済成長を促進し、持続可能な発展に貢献すると考えられている。計測方法自体にも検討の余地を残しているが、技術革新と環境保全、そして経済成長との複雑な相互作用については今後も注意深く議論を続ける必要がある。

本稿がこうした意思決定や議論への一助になりうることを祈念する。

参考文献

- Carraro, C., "Environmental technological innovation and diffusion," In *Frontiers of Environmental Economics* (Folmer, H., Gabel, H. L., Gerking, S., Rose, A., Eds.), Edward Elgar, chapter 14, pp. 342-370, 2000.
- Dietzenbacher, E., "Spillovers of Innovation Effects," *Journal of Policy Modeling*, Vol. 22, No. 1, pp. 27-42, 2000.
- Goulder, L. H. and Mathai, K., "Optimal CO₂ abatement in the Presence of Induced Technological Change," *Journal of Environmental Economics and Management*, Vol. 39, No. 1, pp. 1-38, 2000.
- Gritsevskiy, A. and Nakicenovic, N., "Modeling uncertainty of induced technological change," *Energy Policy*, Vol. 28, No. 13, pp. 907-921, 2000.
- Grubler, A. and Messner, S., "Technological Change and the Timing of Mitigation Measures," *Energy Economics*, Vol. 20, pp. 495-512, 1998.
- Rennings, K., "Redefining innovation - eco-innovation research and the contribution from ecological economics," *Ecological Economics*, Vol. 32, pp. 319-332, 2000.

i 誘発技術進歩を温暖化問題に適用した数理モデルの先行研究には、知識の拡散によって技術進歩を生産化した CGE (Computable General Equilibrium) モデルを構築した Goulder and Mathai (2000)、学習曲線を利用した Grubler and Messner (1998)、MESSAGE を改良した Gritsevskiy and Nakicenovic (2000) などがある。