

SCGEモデルによる河川の水質改善政策評価に 基づいた最適汚濁負荷削減量の算定

OPTIMAL REDUCTION OF POLLUTANT LOAD BASED ON EVALUATION
OF WATER QUALITY IMPROVEMENT POLICY BY SCGE MODEL

高木朗義¹・武藤慎一²・上村高大³

Akiyoshi TAKAGI, Shinichi MUTO and Takahiro KAMIMURA

¹正会員 博(工) 岐阜大学講師 工学部土木工学科 (〒501-1193 岐阜市柳戸1-1)

²正会員 博(工) 岐阜大学助手 工学部土木工学科 (〒501-1193 岐阜市柳戸1-1)

³学生員 岐阜大学大学院工学研究科 博士前期課程 (〒501-1193 岐阜市柳戸1-1)

The water quality improvement policies bring about some conflicts of interests among economic agents and regions. In this paper, we build the Spatial Computable General Equilibrium (SCGE) model that can describe the behavior of economic agents, and analyze the incidence benefits induced by the water quality improvement policies. We formulate the mathematical programming that the objective function is the maximization of social net benefit and the constraint is the SCGE model. We distribute the reduction pollutant load to each economic agents in each regions for water quality improvement by solving the mathematical programming with genetic algorithm (GA).

Key Words: Economic Evaluation, GA (Genetic Algorithm), Pollutant Load, SCGE (Spatial Computable General Equilibrium) Model, Water Quality Improvement

1. はじめに

河川は、治水、利水としての役割だけでなく、うるおいのある水辺空間や多様な生物の生息・生育環境として重要な場である。このような背景の下、1997年河川法が改正され、河川管理の目的として、「治水」、「利水」に加え、「河川環境(水質、景観、生態系等)の整備と保全」が位置づけられた。この中でも特に水質は河川環境の根源的な要素の1つであり、その保全あるいは改善は非常に重要である。

河川の水質改善に関わる政策は、汚濁物質の除去をいかに行うかという問題とともに、その流入をいかに防ぐかという問題も併せて考えていく必要がある。例えば、企業や農家、家計の排出する汚濁負荷による河川の水質への影響は、漁業の生産活動や家計のレクリエーション行動に影響を及ぼす。一方、工場に対する排水規制の強化は汚濁負荷削減に要する自己費用負担の増大をまねき、生産活動に影響を及ぼし、それを通じて関連産業や消費者である家計にまでその影響が波及する。このため水質改善政策を評価するためには、政策による様々な経済活動への影響を総合的に捉える必要がある。また、上流の主体が発生させた汚濁が下流の主体に影響を及ぼすため、水質改善の効果や費用負担を捉えるためには、地域間、

あるいは家計や企業、農家といった主体間の相互関係を配慮した評価が必要となってくる。

このような複雑な社会経済システムを簡潔に表現するための理論として有効なものが一般均衡理論¹⁾である。一般均衡理論は、社会に存在する経済主体の行動を数理モデルを用いて表現する。そして、水質改善政策などによる影響を、数理モデルを解くことにより把握することができ、あらゆる生産物および労働や資本などの生産要素に対して需要と供給がバランスし、市場均衡が成立することを前提としたモデルである。一般均衡理論では、あらゆる財および生産要素の市場均衡が考慮され、それらの連関を分析することができる。さらに、市場均衡が成立している際の市場価格を用いて、水質改善政策の実施によって生じる金銭的效果を表現することができる²⁾。

これまでにも水質改善の政策評価に経済モデルを適用した研究は数多くある³⁾。我々も先行研究⁴⁾として、地域間応用一般均衡(Spatial Computable General Equilibrium:略してSCGE)モデルを用い、閉鎖性水域における水質改善政策の経済評価を行ってきた。本研究では、SCGEモデルを河川の水質改善政策評価に対応できるように拡張し、地域別、主体別の便益と費用を計量し、地域間、主体間の利害関係について評価を行った。さらに、水質改善政策における目標水質を達成するという条件の下で、社会

c) 河川水質の影響を受ける企業の行動モデル

生産活動において河川水質の影響を直接受ける。この行動モデルは、労働と資本からなる生産要素を投入して利潤を最大化するとして定式化する。

$$\pi_F^i = \max_{L_F^i, K_F^i} [p_F^i Y_F^i - w^i L_F^i - r K_F^i] \quad (6.a)$$

$$s.t. \quad Y_F^i = f_F^i [L_F^i, K_F^i, S^i] \quad (6.b)$$

ここで、 L_F^i : 労働投入量、 K_F^i : 資本投入量、 Y_F^i : 生産量、 f_F^i : 生産関数、 p_F^i : 企業の利潤。

d) 排水処理産業の行動モデル

労働と資本からなる生産要素を投入し、生産技術下で利潤を最大化するように、政府と産業に水質改善に必要な財・サービスを生産するとして定式化する。

$$\pi_d^i = \max_{L_d^i, K_d^i} [p_d^i Y_d^i - w^i L_d^i - r K_d^i] \quad (7.a)$$

$$s.t. \quad Y_d^i = f_d^i [L_d^i, K_d^i] \quad (7.b)$$

ここで、 d : 排水処理産業を表す添字、 L_d^i : 労働投入量、 K_d^i : 資本投入量、 Y_d^i : 生産量、 f_d^i : 生産関数、 p_d^i : 利潤。

e) 政府の行動モデル⁶⁾

家計からの排水に対して排水処理(汚濁負荷削減)を行う。この行動を利潤最大化として定式化するが、排水処理費用は排水量および汚濁負荷削減量に依存する。

$$p_G^i = \max_{d_h^i} p_h^{wi} x_h^{wi} - C_W^i \quad (8.a)$$

$$s.t. \quad C_W^i = d_h^i \cdot (q_h^i - Q_h^i) x_h^{wi} \quad (8.b)$$

ここで、 p_h^{wi} : 排水処理単価、 C_W^i : 排水処理費用、 d_h^i : 家計の汚濁負荷削減単位費用(排水処理技術力)、 Q_h^i : 家計からの排出汚濁負荷量(排出基準)、 p_G^i : 利潤

排水処理は、家計から徴収した税金を元に行い、それには排水処理財投入されるものとする。その結果、以下のバランス式が成り立つ。

$$p_h^{wi} x_h^{wi} = p_d^{id} x_G^{id} \quad (9)$$

ただし、 x_G^{id} : 政府の排水処理財投入量。

(3) 均衡条件

地域ごとに労働市場、資本市場、財市場、排水処理財市場という4つの市場が存在し、そこでは需要と供給の均衡がとれているとする。

$$\bullet \text{ 労働市場 : } \sum_j L_j^i + L_d^i = L_h^i \quad (10.a)$$

$$\bullet \text{ 資本市場 : } \sum_j K_j^i + K_d^i = K_h^i \quad (10.b)$$

$$\bullet \text{ 財市場 : } x_j^i = Y_j^i \quad (10.c)$$

$$\bullet \text{ 排水処理財市場 : } \sum_j x_j^{id} + x_G^{id} = Y_d^i \quad (10.d)$$

3. 最適配分問題

(1) SNB とは

本研究では、水質改善政策を実施した場合の便益を等価的偏差(Equivalent Variation: 略して EV)の概念を用いて計測する。等価的偏差 EV とは、水質改善政策が実施された場合の効用水準 v^{iB} を維持するという条件の下で $v^{iA} \rightarrow v^{iB}$ の変化をあきらめるために家計が必要と考える最小補償額をもって評価する。

$$v^i(p_j^{iA}, w^{iA}, c_R^{iA}, p_h^{iA}, S^{iA}, I_h^{iA} + EV^i) = v^{iB} \quad (11)$$

ただし、 v^{iA} : 水質改善政策なしの効用水準、 v^{iB} : 水質改善政策有りの効用水準、 I_h^i : 総所得

SNB は、全地域の EV^i の総和をとり、以下のように表される。

$$SNB = \sum_i N^i \cdot EV^i \quad (12)$$

ここで、 N^i : 地域 i の世帯数

(2) 数理最適化問題

本研究では、水質改善政策における目標水質を達成するという条件の下で、社会的純便益が最大となるように地域、主体毎の汚濁負荷削減量配分を求める数理最適化問題を考える。このとき、最適汚濁負荷削減量配分問題は次式のように表される。

$$\max_{Q_j^i} SNB \quad (13)$$

4. 条件設定

(1) 評価対象とする政策

本研究では、長良川における水質改善政策を対象として分析を行う。長良川では1992年に21世紀における長良川流域のあるべき姿として「長良川ビジョン」を策定し、その一つの柱として「日本一の清流づくり」を掲げている⁷⁾。この中では目標水質が、本川 BOD1mg/l、都市河川 BOD5mg/l とされている。現状では下流域の本支川において、この目標水質を上まわっている(図-2 参照)。

本研究では、この目標水質を達成するための汚濁負荷削減を水質改善政策として取り上げ、分析を行う。ただし、面源対策については、費用や効果など不明な点が多いことから取り扱わないこととする。

(2) 対象地域と区分

長良川流域を以下に示す6つの地域に区分する。

- ・郡上地域 : 高鷲村、白鳥町、明宝村、大和町、八幡町、美並村
- ・美濃地域 : 美濃市、板取村、洞戸村、美山町、武芸川町
- ・関地域 : 関市、上之保村、武儀町、美濃加茂市、富加町

- ・岐阜地域：岐阜市，伊自良村，高富町
- ・羽島地域：羽島市，各務原市，岐南町，笠松町，柳津町
- ・本巣地域：本巣町，糸貫町，真正町，北方町，巣南町，穂積町

(3) 汚濁負荷削減量

長良川ビジョンの目標水質（本川 BOD1mg/l，都市河川 BOD5mg/l）を上まわっている基準点は，本川では長良橋，穂積大橋，南濃大橋，東海大橋の4地点，都市河川では境川，糸貫川，桑原川の3地点である。まず，これらの基準点において目標水質が達成可能な排出汚濁負荷量を求め，現況排出汚濁負荷量から差し引くことにより，汚濁負荷削減量を求める⁸⁾。本研究では各基準点の汚濁負荷削減量を前提条件として，どの地域のどの主体（発生源）にどれだけ割り振ることが経済効率的であるかを探求し，地域，主体毎の汚濁負荷削減量の配分を決定する。

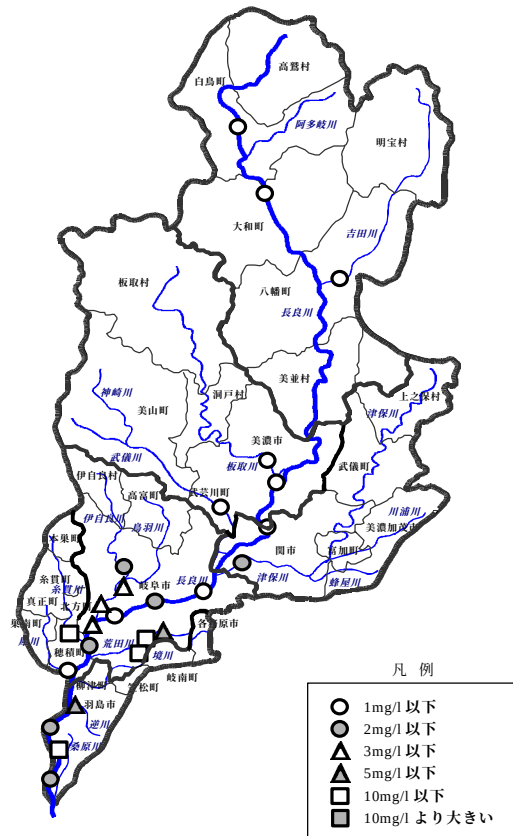


図-2 地域区分と現況水質

(4) 遺伝的アルゴリズム⁹⁾

目標水質を達成するという条件の下で，社会的純便益が最大となるような地域，主体毎の汚濁負荷削減量の配分を求めるためには，複雑な数理最適化問題を解く必要がある。本研究では比較的求める解の個数は少ないものの，制約条件が SCGE モデルとなっているため，解析的に解くのは非常に困難である。そこで，本研究では連続的である削減率をいくつかの区間に区切ることによって

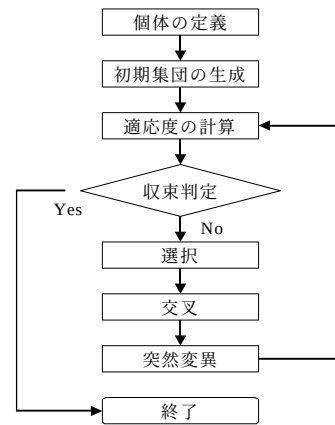


図-3 遺伝的アルゴリズム(GA)の計算フロー

パターン	遺伝子型(コード)	削減率
1	0 0 0 0	-5%
2	0 0 0 1	-10%
3	0 0 1 0	-15%
4	0 0 1 1	-20%
5	0 1 0 0	-25%
6	0 1 0 1	-30%
7	0 1 1 0	-35%
8	0 1 1 1	-40%
9	1 0 0 0	-45%
10	1 0 0 1	-50%
11	1 0 1 0	-55%
12	1 0 1 1	-60%
13	1 1 0 0	-65%
14	1 1 0 1	-70%
15	1 1 1 0	-75%
16	1 1 1 1	-80%

図-4 コード化の方法

組合せ問題に置き換え，GA を用いて近似的に各主体の汚濁負荷削減率を計算する方法を用い，GA の計算フローを図-3 に示す。

本研究では，各地域の家計，工業，商業，農業，の汚濁負荷削減率を1つの個体とする。ただし，総量を配分する問題であるため，未知数は1つ少なくてよいことから本巣地域の家計の汚濁負荷削減率を含めないこととする。また，それぞれの主体の削減率を4桁の2進数を用いて表現し，本巣地域の家計を除く6地域4主体を95桁の数字で表現する。すなわち，1つの個体の長さは95ビットになる。コード化の方法は図-4に示すとおりである。コード化して生成した個体を SCGE モデル内で計算し，SNB を算出し，それを適応度として用いる。

(5) 社会経済指標

岐阜県が発行している各種統計書^{7)~11)}から抽出した。

5. 政策分析

(1) 汚濁負荷削減量の最適配分

GA を用いて，目標水質を達成するという条件の下で，SNB が最大となるような地域，主体毎の汚濁負荷削減量配分を決定した。各地域，各主体における汚濁負荷削減量の最適配分量を表-1 に示す。

地域、主体別の削減率を見た場合、羽島地域と本巣地域が高い削減率になっていることがわかる。このことは、岐阜地域のように下水道普及率が高い地域、すなわち、既にある程度の汚濁負荷削減対策が実施されている地域で汚濁負荷削減を行うことは、本巣地域や羽島地域のように下水道普及率が低い地域で汚濁負荷削減対策を行うことよりも、費用面で割高であるため、このような配分結果となっていると考えられる。

表-1 汚濁負荷削減量

主体\地域	郡上	美濃	関	岐阜	羽島	本巣
家計	現況値	1,767	1,492	1,201	4,502	4,900
	政策値	1,679	1,119	961	3,151	1,470
	削減量	88	373	240	1,351	3,430
	削減率	5%	25%	20%	30%	70%
工業	現況値	119	1,164	217	699	2,317
	政策値	107	815	195	664	596
	削減量	12	349	22	35	695
	削減率	10%	30%	10%	5%	30%
商業	現況値	495	360	255	975	1,008
	政策値	396	180	128	731	605
	削減量	99	180	128	244	403
	削減率	20%	50%	50%	25%	40%
農業	現況値	332	74	441	283	174
	政策値	266	44	176	85	61
	削減量	66	30	265	198	113
	削減率	20%	40%	60%	70%	65%

b) 水質改善政策による効果

表-2 は、各地域において、各主体がどのような費用や便益をどれくらい負担、享受するかを整理した表で、便益帰着構成表と呼ばれている。

便益帰着構成表の各列には関係主体が列挙されている。したがって、列方向に見ることにより、主体毎に、どのような受益があり、どのような負担を行っているかを把握することができ、公平性の問題を検討する際の有益な情報となる。各行には便益の項目が列挙されている。行方向の便益の小計に着目すると、ゼロになっている項目が見られる。これらの項目の便益は主体間においてキャンセルアウト(相殺)されていることを示している。したがって、水質改善事業の費用は、汚濁負荷削減費用、便益は漁業の直接的な生産増大と水辺でのレクリエーションが快適になることに伴うレクリエーション便益である。

便益帰着構成表に基づいて考察を行う。

① 汚濁負荷削減のための費用

汚濁負荷削減により排水処理費用が増大し、産業は損失が発生している。この損失は、企業が排水処理(汚濁負荷削減)にかかる費用である。家計の場合も同様に、汚濁負荷削減により、損失が発生している。水質改善政策に要する費用は約 95 億円である。

② 財変化・賃金率変化

各産業の財価格変化および賃金率変化は、すべてキャンセルアウトされている。すなわち、これらは水質改善政策の社会的純便益に影響を及ぼさない。

③ 直接的生産増大

漁業は、河川水質が向上することにより財の生産性が高まる。その直接的な生産増大分として、約 3 億円の便益を受ける。

④ レクリエーション便益

長良川の水質が向上したことにより、レクリエーション活動が快適になり、家計は約 387 億円の便益を享受する。

以上から、水質改善政策による総便益は約 390 億円、総費用は約 95 億円であるため、社会的純便益は約 296 億円となった。

表-2 便益帰着構成表(流域全体)

	家計	工業	農業	漁業	商業	排水処理産業	政府	合計
汚濁負荷削減費用	-6540	-1599	-8		-1450		133	-9464
財価格化	-19636	11807	84	0	7570	208	-133	0
賃金率化	16712	-10208	-76	0	-6220	-208		0
直接的生産増大				323				323
レクリエーション便益	38723							38723
合計	29259	0	0	323	0	0	0	29582

(単位:100万円/年)

c) 地域別の効果

表-3～8 に地域別の便益帰着構成表を示す。どの地域においても便益の大部分をレクリエーション便益が占めている。各地域に共通して、排水処理費用の増大に伴い、工業、農業、商業の生産する財の価格が上昇し、所得の増大分を考慮しても家計の負担が増加することがわかる。さらに、家計の汚濁負荷削減費用の増大分もあるため、実質的な負担はかなり大きいと予測される。

地域別に見てみると、家計に着目した場合、便益については、岐阜地域におけるレクリエーション便益が最も大きく、羽島地域、関地域が続いている。家計数の最も多い岐阜地域の値が他の地域より大きくなっているが、1家計あたりに直すと、郡上地域が最も小さく、岐阜地域が最も大きくなっているものの、大きな差はないと言える(表-9 参照)。一方、費用については、羽島地域が最も大きく、岐阜地域、本巣地域が続いている。汚濁負荷削減量は、羽島地域が最も大きく、次いで本巣地域、岐阜地域であるが、汚濁負荷削減費用は羽島地区が最も大きく、本巣地域よりも岐阜地域の方が大きくなった。この原因としては、岐阜地域、羽島地域の家計数が多いことが挙げられる。1家計あたりの汚濁負荷削減費用に換算してみると、本巣地域が最も大きくなっており、岐阜地域の約 2.5 倍になっている(表-9 参照)。これは、本巣地域が最も汚濁負荷削減率が高いため、単位排水処理費用が増大しているからである。

地域別の SNB を見た場合、岐阜地域が最も大きく約 160 億円となっており、美濃地域が最も小さく約 13 億円となっているが、これは岐阜地域の家計数が最も多いためである(表-9 参照)。1家計あたりの SNB を見た場合、関地域が 7.2 万円で最も大きくなっており、汚濁負荷削減

表-3 便益帰着構成表(郡上)

	家計	工業	農業	漁業	商業	排水処理 産業	政府	合計
汚濁負荷削減費用	-40	-39	0		-24		5	-98
財源増大	-697	513	8	0	173	8	-5	0
貸金率変化	639	-474	-8	0	-149	-8		0
直接的生産増大				14				14
レクリエーション便益	1,634							1,634
合計	1,536	0	0	14	0	0	0	1,550

(単位:100万円/年)

表-4 便益帰着構成表(美濃)

	家計	工業	農業	漁業	商業	排水処理 産業	政府	合計
汚濁負荷削減費用	-174	-128	0		-36		5	-333
財源増大	-782	651	3	0	125	8	-5	0
貸金率変化	623	-523	-3	0	-89	-8		0
直接的生産増大				13				13
レクリエーション便益	1,521							1,521
合計	1,188	0	0	13	0	0	0	1,201

(単位:100万円/年)

表-5 便益帰着構成表(関)

	家計	工業	農業	漁業	商業	排水処理 産業	政府	合計
汚濁負荷削減費用	-479	-126	-1		-198		18	-786
財源増大	-2,637	1,877	13	0	736	29	-18	0
貸金率変化	2,330	-1,751	-12	0	-538	-29		0
直接的生産増大				43				43
レクリエーション便益	5,193							5,193
合計	4,407	0	0	43	0	0	0	4,450

(単位:100万円/年)

表-6 便益帰着構成表(岐阜)

	家計	工業	農業	漁業	商業	排水処理 産業	政府	合計
汚濁負荷削減費用	-2,402	-139	-3		-708		64	-3,188
財源増大	-8,936	4,218	28	0	4,655	99	-64	0
貸金率変化	8,150	-4,079	-25	0	-3,947	-99		0
直接的生産増大				155				155
レクリエーション便益	18,577							18,577
合計	15,389	0	0	155	0	0	0	15,544

(単位:100万円/年)

表-7 便益帰着構成表(羽島)

	家計	工業	農業	漁業	商業	排水処理 産業	政府	合計
汚濁負荷削減費用	-2,521	-587	-2		-372		31	-3,451
財源増大	-4,691	3,075	16	0	1,583	48	-31	0
貸金率変化	3,761	-2,488	-14	0	-1,211	-48		0
直接的生産増大				74				74
レクリエーション便益	8,906							8,906
合計	5,455	0	0	74	0	0	0	5,529

(単位:100万円/年)

表-8 便益帰着構成表(本巣)

	家計	工業	農業	漁業	商業	排水処理 産業	政府	合計
汚濁負荷削減費用	-924	-580	-2		-112		10	-1,608
財源増大	-1,893	1,473	16	0	398	16	-10	0
貸金率変化	1,209	-893	-14	0	-286	-16		0
直接的生産増大				24				24
レクリエーション便益	2,892							2,892
合計	1,284	0	0	24	0	0	0	1,308

(単位:100万円/年)

表-9 1家計当たりの便益と費用

	郡上	美濃	関	岐阜	羽島	本巣	流域全体
家計数	23	21	66	233	118	37	499
レクリエーション便益	70	73	78	80	75	79	78
汚濁負荷削減費用	2	8	7	10	21	25	13

(単位:家計数:千世帯, レクリエーション便益・汚濁負荷削減費用:千円)

表-10 地域別 SNB

	郡上	美濃	関	岐阜	羽島	本巣	流域全体
全体	1,597	1,273	4,762	16,166	5,971	1,439	31,207
1家計	69	61	72	69	50	39	63

(単位:全体:100万円/年, 1家計:千円/年)

率の高い本巣地域では3.9万円, 羽島地域では5.0万円と他の地域と比べ負担する費用が大きい, 享受する純便益が小さくなっている(表-10 参照)。

6. おわりに

本研究では, 河川における水質改善政策を経済的に評価するために, SCGE モデルを構築した。そして, 地域間, 主体間における汚濁負荷削減量の最適な配分量を求めた。さらに地域間, 主体間での便益の帰着構造を分析することによって費用負担問題も含めた評価を行った。

今後の課題としては, 財政的制約などから水質改善政策の実施期間が長い, 時間概念を考慮した最適な政策(スケジュール)を検討していく必要がある。

【参考文献】

- 1) 奥野正寛・鈴木興太郎:ミクロ経済学I, II, 岩波書店, 1985
- 2) 武藤慎一:環境政策評価への計量厚生分析の適用, 岐阜大学学位論文, 1998
- 3) 例えば, 米田朗・氷飽孝四郎:霞ヶ浦における水質汚染改善のための経済政策, 日本地域学会年次学術講演会, 1998
- 4) 高木朗義・武藤慎一・上田孝行・稲垣貴政:閉鎖性水域における水質改善政策の便益帰着分析と汚濁負荷削減量配分, 土木学会論文集(投稿中)。
- 5) Johansson-O.: Cost-Benefit Analysis of Environmental Change, Cambridge University Press, pp.32-33, 1993
- 6) 近藤浩治・上田孝行・山田貴久:水資源政策の空間的分析の試み, 土木学会第52回年次学術講演会, pp.120-121, 1997.
- 7) 岐阜県:長良川ビジョンアクションプログラム〜日本一の清流づくり〜, 1999.
- 8) (財)日本下水道協会:流域別下水道整備総合計画調査 指針と解説, 1996.
- 9) 北野宏明:遺伝的アルゴリズム, 産業図書, 1993.
- 10) 岐阜県統計調査課:平成7年 岐阜県産業連関表, 岐阜県統計調査課ホームページ.
- 11) 岐阜県知事公室統計調査課編:平成11年 岐阜県統計書, 岐阜県・岐阜県統計協会, 2000.
- 12) 東海農政局岐阜統計情報事務所編:平成10~11年 岐阜農林水産統計年報, 岐阜農林統計協会, 1999.
- 13) 岐阜県の市民村民所得:平成5年 岐阜県企画部統計調査課, 1996.

(2001年.4.16 受付)