

東京湾流域圏におけるリン循環の推定と社会的変化による応答予測

上田嘉通¹・佐々木淳²

東京湾再生プロジェクトに代表されるように, 近年内湾環境の再生への関心が高まっている。そこで検討されるのは人工干潟の整備などの局所的な環境再生であり, それらの施策だけでは全湾的な環境再生には至らないのが現状である。近年の都市部への人口回帰などの人口動態の変化, 食糧自給率, 食生活の変化といった社会的要因が内湾環境に少なからず影響を与えることが推察されるが, これらについての定量的な検討はほとんどなされていない。そこで本研究では, 富栄養化の観点から最も重要であるリンに着目し, 各種統計資料の調査検討を通して東京湾流域圏のリン循環の現状を把握し, さらに社会情勢の変化がリン循環に与える影響を定量的に推定した。

1. はじめに

東京湾再生プロジェクトに代表されるように, 近年内湾環境の再生への関心が高まっている。そこで検討されるのは, 汚水処理や河川浄化等の施設の整備, および人工干潟といった局所的な環境再生であり, それらの施策だけでは全湾的な環境再生には至らないのが現状である。

最近の生態学では域内循環の概念が提唱され (高橋, 2001), 地域内で物質循環が行われることが健全な物質循環であるとされている。東京湾流域圏 (東京湾へ流入する河川の流域) をマクロな目で見ると, 食糧資源をはじめとする物資の輸入によって世界中から大量のリンが集積し, 最終的に東京湾へ流入する。域内循環の概念に従えば, 東京湾に流入したリンは元の国々の生産地へ戻されなければ健全な物質循環とはいえない。

一方, 近年の都市部への人口回帰などの人口動態の変化, 土地利用の変化, および食糧自給率, 食生活の変化といった社会的要因も内湾環境に少なからず影響を与えることが推察されるが, これらを定量的に検討した例はほとんどない。これらの社会的要因の僅かな変化が物質循環に大きな影響を与え得る可能性がある以上, その影響の度合いを検討し, 物質循環の改善の観点から大局的な社会のあり方への提言を行っていくことも重要である。

そこで本研究では, 富栄養化の観点から最も重要な物質の一つであるリンに着目し, 東京湾流域圏内のリン循環の現状を明らかにすると共に, 社会的要因の変化がリン循環に及ぼす影響の考察を目的とする。

2. リン循環の推定

日本は食品や飼料, および肥料の多くを海外に依存している。リンもそれらに含まれることで国内, および東

京湾流域圏へ持ち込まれている。そこで, 上記 3 項目に着目して, 海外や国内の生産地から持ち込まれ, 東京湾流域圏で消費された後, 東京湾へ流入するまでのフローを整理した。

リンは食品, 飼料, および肥料に含まれ, 国内外の生産地から東京湾流域圏へ持ち込まれる。食品として消費されたリンは, 主に厨芥として清掃工場へ搬入されるか, し尿等として下水処理場へ流入する。飼料として持ち込まれるリンは家畜に消費された後, 下水処理場へ流入する。清掃工場, 下水処理場で処理されたリンは共に, 焼却灰に含まれ埋め立てられるか, 排水水に含まれ東京湾へ流入する。肥料として持ち込まれるリンは, 一部が東京湾へ流入し, 大部分は土壌に固定される。東京湾へ流入後のリンは, 一部は堆積, その他は太平洋へ流出する。

以下では, 各種統計資料の調査検討を通じて, 各コンパートメントのフローについて定量的に検討し, 東京湾流域圏における現在のリン循環の全体像を明らかにする。

(1) 消費されるリン

a) 東京湾流域圏で消費される食品に含まれるリン

東京湾流域圏で消費される食品中のリンの挙動は, 人間に摂取されるものと, そのまま厨芥として処分されるものに分けられる。人間に摂取されるリンの量は, 国民 1 人 1 日当たりのリン摂取量 1.062 mg (健康・栄養情報研究会編, 2001) と東京湾流域圏の人口 21,334,296 人 (2003 年 12 月時点) をかけた値として求めた。一方, 厨芥として処分されるリンは, 各家庭から排出される厨芥の量の資料が無い場合, 後述する清掃工場から排出される焼却灰に含まれるリンの値として算出した。両者の和を東京湾流域圏で消費される食品中のリンの量とした。

b) 東京湾流域圏で消費される飼料に含まれるリン

東京湾流域圏で消費される飼料中のリンは, まず, 東京湾流域圏の家畜頭数に家畜 1 頭当たりの年間飼料摂取量 (農林水産省畜産局食肉鶏卵課編, 2003) をかけることで求めた。家畜 1 頭当たりの飼料摂取量は, 各家畜が出荷までに摂取する飼料の量と各家畜の出荷までの日数

1 学生会員 早稲田大学大学院 理工学研究科建設工学専攻

2 正会員 博(工) 横浜国立大学助教授 大学院工学研究院システムの創生部門

表-1 東京湾流域圏で消費される飼料に含まれるリン

	牛	豚	鶏
出荷までに必要な1頭当たりの飼料摂取量(kg)	6,220	376	4.95
出荷までの日数(日)	900	210	53
1頭当たり1年間に必要な飼料(kg)	2,488	644	34
家畜頭数(頭)	29,501	96,250	2,369,510
消費されるリン(t)	811.3	830.6	1,078.10
合計(t)	2,720		

から1年間に必要な飼料の量を求めた。その値にリン含有率(農業技術研究機構編, 2001)をかけて家畜1頭を1年間飼育するのに必要なリンの量を算出した。その値に東京湾流域圏の家畜頭数をかけることで、東京湾流域圏で家畜に使用されるリンの量とした(表-1)。

c) 東京湾流域圏で消費される肥料に含まれるリン

東京湾流域圏で消費される肥料中のリンは、まず日本が肥料、およびその原料として輸入するリン量を調査し(農林水産省生産局生産資材課監修, 2003)、日本の農耕地面積で割ることで単位面積当たりに施用される肥料重量を算出した。これに東京湾流域圏の農地面積をかけ、消費される肥料の重量を求めた。肥料中のリンは、肥料の重量にリン酸(P_2O_5)含有量の平均値46%とリン酸をリンに修正するための係数0.4366(62(2P)/142(P_2O_5))の積として算出した(表-2)。肥料の原料として持ち込まれる無機リンは工業用としても使用されるため、工業用に使用されるリンも肥料のカテゴリーに含むものとし、アウトプットのみ森(2004)の算出結果を使用した。

表-2 東京湾流域圏で消費される肥料に含まれるリン

単位面積当たりの施肥量($t \cdot ha^{-1} \cdot year$)	0.09196
東京湾流域圏の農耕地面積(ha)	95,866
東京湾流域圏での施肥量(t/year)	9,222
東京湾流域圏で施用される肥料に含まれるリン(t/year)	1,852

(2) 消費後のリン

食品として消費後のリンは、主に厨芥として清掃工場へ搬入されるか、し尿等として下水処理場へ流入する。飼料として持ち込まれるリンは家畜に消費された後、下水処理場へ流入する。肥料として持ち込まれるリンは一部が東京湾へ流入し、大部分は土壌固定し地中へ留まる。

a) 清掃工場へ搬入されるリン

清掃工場へ搬入されるリンは、清掃工場へ搬入される厨芥の量(東京二十三区清掃一部事務組合, 2004)と厨芥中のリン含有量の積として算出した。また排出される焼却灰、放流水に含まれるリンは焼却灰量、および放流水量のデータと元素成分データをもとに算出した。それぞれの値を、東京都区部の人口で割り、東京湾流域圏の

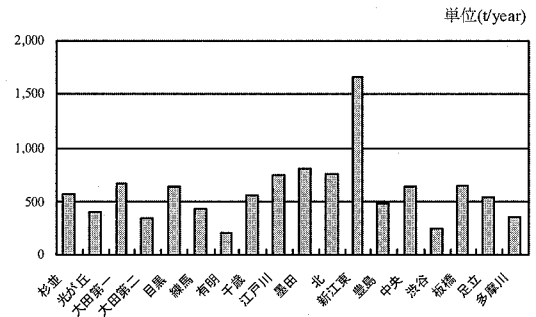


図-1 清掃工場から排出される焼却灰に含まれるリン

人口をかけることで、東京湾流域圏において清掃工場に搬入されるリンの値とした(図-1)。

b) 下水処理場へ流入するリン

下水処理場へ流入するリンは、水再生センターへの汚水の流入量と全リン濃度をかけて算出した。放流水中のリンは、放流水のうち汚水が占める量と放流水中の全リン濃度をかけることで算出した。汚泥処理施設で処理されるリンの量は、施設から排出される焼却灰量と焼却灰中のリン酸含有量の積として算出した(図-2)。

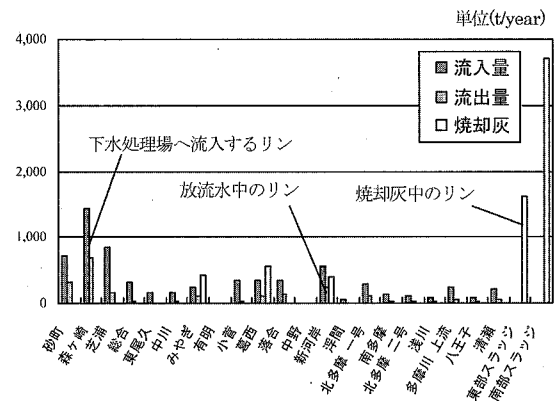


図-2 下水処理場でのリンの挙動

c) 工場で使用されるリン

工場で使用されるリンは、肥料として持ち込まれるリンに含んでいる。農耕地、森林、および工場からの負荷量は森(2004)が原単位法を用いて算出した値を用いた。

d) 東京湾へ流入後のリン

東京湾へ流入後のリンの挙動は松本ら(1982)のモデルに倣い近似的に算出した。松本ら(1982)によると、リンの湾内水における滞留時間 τ は以下の式で与えられる。

$$\tau = CV / (S + Cv) \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 C は湾内水のリンの平均濃度(mg/L)、 V は湾内水の全体積(m^3)、 S は湾内でリンが堆積物に埋積される速度(t/年)、 v は湾口からの湾内水流出速度

($\text{m}^3/\text{年}$)である。また湾内水の滞留時間 τ_w は V/v で与えられ、 $\tau < \tau_w$ であればリンは湾内に蓄積 (堆積) される傾向が大きく、 $\tau \approx \tau_w$ であれば湾外に大部分は流出すると考えてよい。東京湾の海水量 V は $17 \times 10^9 \text{ m}^3$ 、湾から外洋への海水の流出速度 v は $130 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{年}$ 、湾水の平均滞留時間 τ_w は 47 日 (0.13 年) とした (松本ら, 1983)。湾内水の全リンの平均濃度 C は 0.065 mg/L (環境庁水質保全局編, 1990) を用いた。 S は堆積物の堆積速度と堆積物中の物質濃度との積で算出されるが、湾内の堆積速度は $1.2 \times 10^6 \text{ t}/\text{年}$ と推定されている (松本ら, 1982)。堆積物中のリン濃度は、東京湾環境情報センターが提供している値 868 ppm (堆積物表層中 (0–5 cm) のリン含有量の平均値) を用いた。その結果、リンの東京湾内での平均滞留時間 τ は 0.12 年 (43 日) であり、湾内水の平均滞留時間 47 日に近い値を示した。したがって、リンは湾外に流出しやすい物質であり、堆積率 (流入量に対する堆積量の割合) は 11 % と得られた。

以上のような過程の後、各コンパートメントの収支誤差の修正を経て、現在の東京湾流域圏でのリン循環の全体像を推計した (図-3)。

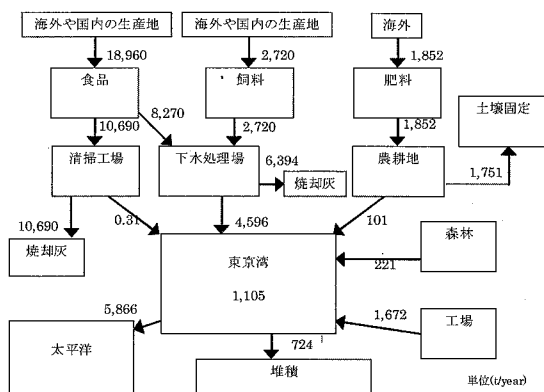


図-3 東京湾流域圏のリン循環

東京湾流域圏に持ち込まれるリンは約 23,500 t/年であり、そのうちの約 73 % が清掃工場と下水処理場を経由して焼却灰中へ移行し、約 28 % が東京湾へ流入することが明らかとなった。東京湾へ流入したリンの約 11 % が底質へ堆積することから、東京湾流域圏に持ち込まれる総リンの約 3.1 % が湾内底質へ埋没することがわかる。東京湾へのリン流入量は 6,590 t で、1 日当たりリン流入量は 18.1 t であり、貝塚ら (1993) の値 23.3 t と比較すると妥当であると考えられる。

3. 社会的変化によるリン循環の応答予測

東京湾流域圏に持ち込まれるリンは食品、飼料、肥料

に大別されるため、この 3 つに影響を与える社会的変化がリンの挙動に大きく影響すると推察される。人口動態の変化、および農耕牧畜地面積の変化は、リンの需要に直接影響を与えると考えられるため、それぞれの変化がリン循環へ及ぼす影響をシミュレーションした。

また、高橋 (2001) がリン循環の改善方策として提案している「食糧自給率の向上」や「食生活の肉類中心から魚介類中心への移行」がリン循環に与える影響も定量的に評価考察し、リン循環の改善に寄与すると考えられる社会的方策を検討した。

(1) 人口動態の変化の影響

図-3 より、東京湾流域圏では、約 8 割が食品を通して持ち込まれるリンであり、人口動態の変化によって大きく変化すると推察される。東京湾流域圏へ食品を通して持ち込まれるリンの量を東京湾流域圏の人口で割ると、人口 1 人当たりが東京湾流域圏へ持ち込むリンは約 0.89 kg である。この値を用いることで、東京湾流域圏の人口が現在より増加、および減少した場合に持ち込まれるリンの量の変化を試算することが可能となる。

(2) 農耕牧畜地の変化の影響

リンの含有量を品目別に見ると、食品、および飼料と比較し、肥料の値が極めて高い。施肥量が農耕地面積の変化に対応することから、東京湾流域圏の農耕地面積の変化によって東京湾流域圏へ持ち込まれるリン量の変化を推定した。人口動態の変化同様、東京湾流域圏で肥料として施用されるリン量を、東京湾流域圏の農耕地面積で割り、単位面積当たりに必要となるリン量を算出した。単位面積当たりの農耕地に施用される肥料中のリンは 30.6 kg/ha である。

(3) 食糧自給率・食生活の変化の影響

現在の日本の食糧自給率は約 40 % であり、先進国の中では最低水準であるが、これは都市化に伴う農耕地面積の減少、および耕地利用率の低下による影響だけでなく、食生活の変化による影響も主たる要因と考えられる。農林水産省総合食料局編 (2004) によると、日本人の食事は、総供給熱はほぼ横ばいで推移してきたが、米、畜産物、油脂類の構成比は大きく変化している。米の消費量は半減し、畜産物の消費量は約 5 倍になっている (図-4)。このような食糧自給率、および食生活の変化がリン循環に少なからぬ影響を与えているものと推察される。

そこで、過去 50 年の食糧自給率の推移とタンパク源に占める魚介類と肉類の推移のデータ (図-5、図-6) をもとに、食糧自給率とタンパク源品目の割合を過去のものに移行した場合に日本に輸入されるリンの量の変化を試算する (図-7)。牛肉、豚肉、鶏肉の輸入量にそれぞれのタンパク質含有量をかけ、日本国内において輸入された肉類を通して摂取されているタンパク質量を算出し

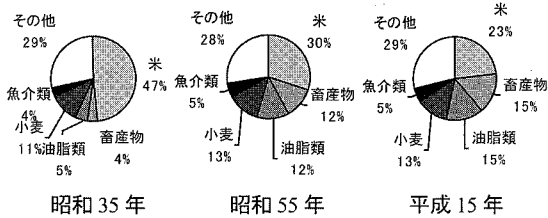


図-4 食生活の品目別構成比の変化

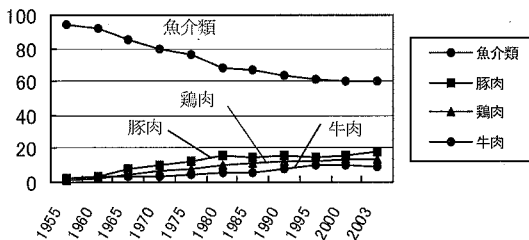


図-5 タンパク源に占める魚介類、および肉類の割合の推移(%)

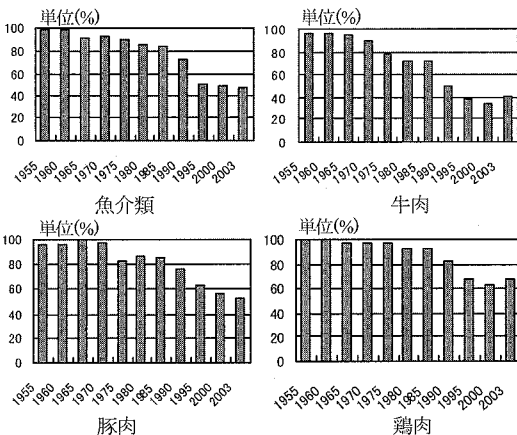


図-6 タンパク源品目の自給率の推移

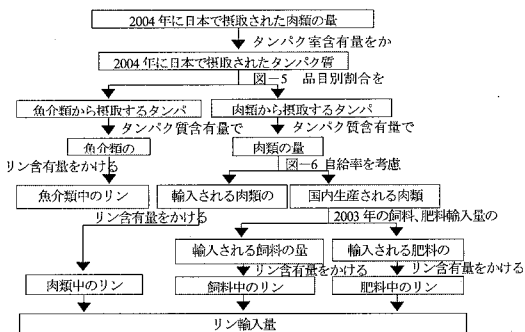


図-7 リン輸入量算出プロセス

た。その値を図-5のタンパク源の割合で振り分け、図-6の自給率をもとに国内生産分、輸入分に分けた。さらに、第78次農林水産省統計表などの統計資料から、国内生産分を2003年の国内肉類生産量と輸入飼料重量、および輸入肥料重量の割合で、国内で肉類を生産するために輸入する飼料、および肥料の量を算出した。これらとそれぞれのリン含有量を乗じたリン輸入量の和を、食生活を移行した場合のリン輸入量とした(図-8)。

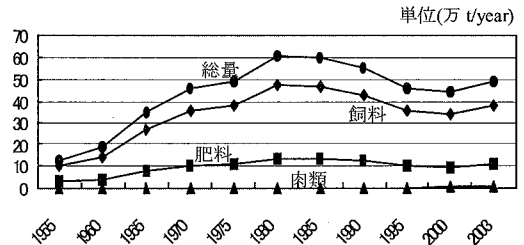


図-8 タンパク源の移行によるリン輸入量の変化

これは、過去に実際に輸入されたリン量を試算したものではなく、現在のタンパク質摂取量を維持したまま、タンパク源の内訳(肉類および魚介類の割合)を過去の食生活のものに移行した場合に輸入されると推察されるリン量である。1955年の食生活に移行することで、最もリン輸入量が減少する結果となった。これは、タンパク源に占める魚介類の割合が95%となり、畜産物の国内生産量、および輸入量が共に減少するため(図-5)、飼料と肥料の輸入量が減少することによって考えられる。1980年代の食生活では、現在の食生活よりリン輸入量が多くなっているが、これは、1980年代の食生活は現在より畜産物の自給率が高く(図-6)、飼料と肥料の輸入量が増加していることによって推察される。「国内生産される肉類の量」から「輸入される飼料の量」、「輸入される肥料の量」を算出する際に、2004年の割合をそのまま適用したため、試算結果に誤差を含むと考えられるが、食生活の移行がリン輸入量、ひいてはリン循環に及ぼす影響の傾向を推定することが可能となった。

ここで、図-8から最もリン輸入量が減少すると推察される1955年の食生活に移行した場合の東京湾流域圏のリン循環を試算する。東京湾流域圏におけるタンパク源の推移や食糧自給率の資料が見あたらないため、日本全体における値を用いた。図-8の日本全体における変

表-3 2003年と1955年の食生活移行結果の比較

	肉類(t)	飼料(t)	肥料(t)	魚介類(t)
2003年	4,194	378,362	105,961	20,975
1955年	4.63	99,917	27,982	33,152
1955年/2003年	0.0011	0.26	0.26	1.58

化と同様に東京湾流域圏の肉類、飼料、肥料も変化するものとして算出した。表-3は、日本全体において食生活を2003年から1955年に移行した場合のリン消費量の比較結果である。肉類、飼料、肥料は輸入量、および国内生産量が減少しているが、魚介類は肉類の減少分を補うために増加している。

表-3をもとに、1955年の食生活に移行した場合の東京湾流域圏のリン循環の試算を行う。東京湾流域圏で消費される食品に含まれるリンは、肉類の減少はあるが、魚介類が増加しており、全体量としてやや増加した。一方、飼料と肥料については、輸入量の減少に伴い約25%に減少した。さらに各コンパートメントの収支を、図-3の割合をもとに算出し、1955年の食生活に移行したと仮定した場合の東京湾流域圏のリン循環を算出した(図-9)。

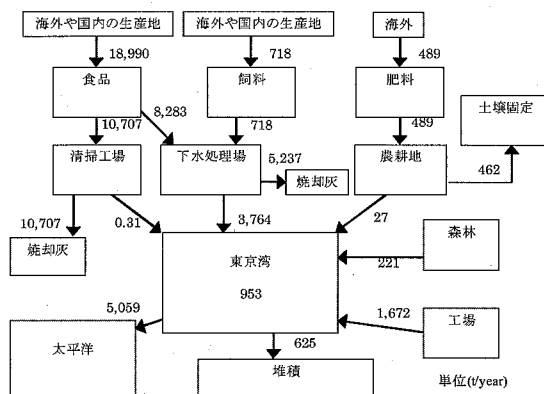


図-9 1955年の食生活に移行した場合の東京湾流域圏のリン循環

表-4 リンの東京湾への流入量、湾内堆積量の比較

	東京湾への流入量(t)	湾内への堆積量(t)
1955年	6,590	724
2003年	5,684	625

4. 考 察

社会的要因の変化がリン循環に及ぼす影響は、人口増加や農耕地面積の増加だけでなく、食糧自給率の向上によっても東京湾の富栄養化を促進させる可能性があることがわかった。これは、食糧自給率を向上させるために国内の飼料、および肥料の需要が増大することによって陸域負荷量が増加することによると推察される。一方、タンパク源の摂取状況を1955年の食生活へと移行し、肉類中心から魚介類中心の食生活とすることにより、人間が直接摂取、排出するリンの量は肉類中心の食生活と魚介類中心の食生活で大きな変化は見られないが、畜産物生産量の減少に伴う飼料、および肥料の需要減少が見

られる。その影響を受けて、東京湾へ流入、および湾内へ堆積する総リンの量が約1割減少するという結果となった。このことは、物質循環を食糧自給率のみで評価することはできず、飼料、および肥料も含めた総合的な自給率で評価しなければならないことを示していると推察できる。

5. ま と め

本研究では、富栄養化の観点から最も重要な物質であるリンに着目し、各種統計資料の調査検討を通して東京湾流域圏内のリン循環の現状を明らかにすると共に、社会的要因の変化がリン循環に及ぼす影響を考察した。

海外の生産地、および国内の生産地から、食品、飼料、および肥料を通して、東京湾流域圏へ持ち込まれるリンは約23,500t/年であり、そのうちの約28%が東京湾へ流入することが明らかとなった。東京湾へ流入したリンの約11%が底質に埋没することから、東京湾流域圏に流入する総リンの約3.1%が東京湾に堆積することがわかる。また、人口増加だけでなく、食糧自給率の向上や農耕地の増大は東京湾の富栄養化を促進することが明らかとなった。一方、日本人の摂取するタンパク源を1955年の魚介類中心の食生活に移行した場合、東京湾底質に堆積するリン量は約1割程度減少する等、様々な施策がリン循環に与える影響を定量的に推定することが可能となった。

参 考 文 献

- 貝塚爽平編(1993): 東京湾の地形・地質と水, 築地書館, pp. 199-200.
- 環境庁水質保全局編(1990): かけがえのない東京湾を次世代に引き継ぐために, 大蔵省印刷局, 24p, 31p.
- 健康・栄養情報研究会編(2001): 国民栄養の現状, 第一出版, pp. 28-29.
- 高橋正征(2001): 「新しい」生態学, ビオシティ, 301pp.
- 東京二十三区清掃一部事務組合(2004): 開示文書.
- 東京湾環境情報センター: 東京湾環境データベース
[http://www.tbeic.go.jp/index2.html]
- 農業技術研究機構編(2001): 日本標準飼料成分表, 中央畜産会, pp. 128-149.
- 農林水産省生産局生産資材課 監修(2003): ポケット肥料要覧 2002/2003, 農林統計協会, pp. 23-28, p. 101, pp. 123-164.
- 農林水産省総合食料局編(2004): 食料需給表, 農林統計協会
[http://www.kanbou.maff.go.jp/www/fbs/fbs-top.htm]
- 農林水産省畜産局食肉鶏卵課編(2003): 平成15年度版 食肉便覧, 中央畜産会, pp. 142-149.
- 農林水産省統計情報部編(2004): 第78次農林水産省統計表, 農林統計協会, 829p.
- 松本英二・加藤甲子・松永勝彦(1982): 東京湾における水銀の地球化学, 地球化学, 17, pp. 48-52.
- 森俊夫(2004): GISを用いた東京湾における陸域負荷の推定, 横浜国立大学卒業論文, 35p.