

4.4 リスク便益分析（横浜国立大学研究グループ）

1) 実施の内容

本プロジェクトのリスク管理分野の研究の目的は、リスクの定量的評価だけでなく、リスクを減らすための費用の評価に基づいた、化学物質リスク管理における意思決定支援の枠組みを提供することである。リスク削減費用は、リスクを減らそうとすれば失われる便益であり、リスクと引き替えに得ていた便益に他ならないので、この枠組みはリスク便益分析と呼ばれてきた。リスク便益分析は費用効果分析(CEA: cost-effectiveness analysis)の一形態である。その目的は、リスク削減費用と削減リスク量との比を求めることである。

われわれは、ヒトの健康に関するリスクを損失余命(LLE: loss of life expectancy)で表す方法を開発し、それを用いてきた(蒲生他. 1996; Gamo et al. 1995)。このリスク指標を用いると、リスク削減費用と削減リスク量との比は、単位生存年延長費用(CPLYS: cost per life-year saved)と呼んでよいものになる。われわれは、クロルデン、水銀、ベンゼン、ダイオキシンの規制に関して、CPLYSを推定した(Oka et al. 1997; Nakanishi et al. 1998; Kajihara et al. 1999; Kishimoto et al. 2001a)。また、環境化学物質規制のCPLYSを他の分野のそれと比較した(Kishimoto et al. 2001b)。

生態リスクについては、化学物質および面的開発のリスクを生物集団の絶滅確率によって表現する手法の開発と並行して、リスク便益分析を行った。特定の政策のリスク便益分析を行うためには、その政策に関わるすべてのリスク変化を含むリスク指標が必要である。そのためには、単一の生物種への影響を表現するだけでは不十分であり、関係するすべての生物集団の絶滅確率に与える影響を推定すると同時に、異なった種や集団への影響を集計する必要がある。その集計の際にどのような重みを用いるかという新たな問題が生じる。面的開発については、対象とする土地全域のすべての植物への影響を表現する「期待多様性損失(ELB: expected loss of biodiversity)」指標を開発し、これを福井県の中池見湿地開発のリスク評価に適用した上で、リスク便益分析を行った(Oka et al. 2001)。化学物質については、DDTのセグロカモメと猛禽類の集団への絶滅リスク評価の結果に基づき、集団間集計についてはある割り切りを行って、暫定的なリスク便益分析を行った。

2) 得られた研究成果の状況及び今後期待される効果

2) - (1) 人の健康に関するリスク便益分析

2) - (1) - (1) ダイオキシン排出削減政策のCPLYS

1997年に、ごみ焼却施設等からのダイオキシン排出に関して、新たな規制が導入され、1998年12月以降、既設炉で80ng/m³、新設炉で0.1ng/m³という排ガ

ス濃度基準が適用された。この基準値は、2002年12月から表4-4-1のように強化される。これらの規制を満たすために、1998年までに全国114の施設で「緊急対策」がとられ、また、現在「恒久対策」が行われている。

表4-4-1. ごみ焼却施設からの排ガス中ダイオキシン濃度基準

炉の種類	区分	基準値 (ng/m ³)
全連続炉	新設炉	0.1
	既設炉(旧ガイドライン適用炉)	0.5
	既設炉(旧ガイドライン非適用炉)	1
准続炉・	既設炉(連続運転)	1
バッチ炉	既設炉(間欠運転)	5

対策の内容は、主に、燃焼の改善・燃焼ガスの冷却・排ガス処理のための設備の改良とその後の維持管理の改善とである。

緊急対策の費用は、訪問調査と電話調査とで設備改良工事費用の情報を得、維持管理費の増分については、一部の施設での実績値に基づいて全施設の費用を推定した。また、廃炉になる場合は、炉の寿命短縮によって施設更新が早まることによる余分の費用を勘定に入れた。全施設での設備改造の費用は101億2000万円、廃炉費用は46億4000万円であった。効果の持続年数を33年、割引率を3%とした費用の年価値は7億1000万円となった。維持管理費の増分をこれに加えると、年費用は14億6000万円となる。この対策によって削減されるダイオキシン排出量は年間900g(Co-PCBを含む)であり、よって、ダイオキシン1gあたりの削減費用は163万円である。

恒久対策は、現在進行中であるため、以下の方法で費用を推定した。

1. 現在の排ガス中ダイオキシン濃度が、2002年以降に適用される基準値を満たしていれば対策は行わず、そうでなければ何らかの対策を行うと仮定する。
2. 2002年の基準値を満たしていない施設で、2002年に築後16年以上になり、かつ、集塵機を取り替えるなどの大規模な改造を最近していない施設は、2002年に廃止されると仮定する。そうした施設の寿命以前の廃止による費用は、

$$5000 \times Q [(1+r)^{1998-2002} - (1+r)^{1998-(Y+21)}] \text{ [万円]}$$

であるとみなす。ここで、Qは施設の規模(t/日)、rは時間割引率(3%と仮定)、Yは施設の使用開始年である。つまりこれは、更新が早まることによる建設費現在価値の増加分である。2000年に築後21年以上になる施設の費用は0である。

3. 現在の排ガス中ダイオキシン濃度が、2002 年以降に適用される基準値の 10 倍を超えている場合は、燃焼の改善のために炉本体を改造し、冷却機を改善し、集塵機をバグフィルターに取り替え(減温塔の設置含む)、粉末活性炭の投入を行うとする。その工事費は 1 億 7000 万円/[t/時]であり、維持管理費の増加分は、准連続炉とバッチ炉では今回の改造から次の更新までが 3300 円/t、次の更新以降は 860 円、連続炉では 860 円/t であるとする。
4. 現在の排ガス中ダイオキシン濃度が、2002 年以降に適用される基準値を超えるが、その 10 倍を超えない場合は、集塵機をバグフィルターに取り替え(減温塔の設置含む)、粉末活性炭の投入を行うとする。ただし、すでにバグフィルターを設置しているところは、粉末活性炭の投入だけを行うとする。バグフィルター+活性炭の工事費は 1 億 3000 万円/[t/時]、活性炭投入装置の工事費は 270 万円/[t/時]とする。維持管理費の増分は、バグフィルターを設置したところが 860 円/t、活性炭投入のみのところが 540 円であるとする。
5. 廃炉以外の工事は 2000 年に行われると仮定した。工事費は、持続期間を 33 年、割引率を 3%として、年費用に換算する。設備は、設備改造から 7 年後と使用開始から 21 年後とのうち遅い方の時点で廃止されると仮定する。廃止後は新規施設に更新され、それ以後は新設炉の基準が適用される。この更新に際しての建設費の増分はないと仮定する。工事費および廃炉費用の年価値と維持管理費とを足しあわせて、年総費用を得る。
6. こうした対策によって、排ガス中ダイオキシン濃度は基準値の 50%になると仮定して、現状の濃度との差から、排出削減量を求める。

この作業を全国 1655 施設について行った。その結果、2002 年までに、3580 億円の投資が必要で、その年換算費用は 172 億円となった。維持管理費の増加分 240 億円/年とあわせて、年間総費用は 412 億円。これによって、2210g のダイオキシンの排出を削減することになり、1g 当たりの削減単価は、1860 万円となる。

厚生省によると、平均的日本人のダイオキシンへの曝露量は、2.6pg-TEQ/kg/day であり、その曝露経路による内訳は、魚介類 56%、畜産物 22%、野菜 4%、その他の食品 8%、大気 8%、土壌 2%である。このうち、ごみ焼却施設からのダイオキシン排出削減から時をおかずに減少するのは、大気、葉菜、畜産物からの曝露である。魚介類へのダイオキシンの蓄積は、過去の排出の結果であり、容易には減らない。

大気経由のダイオキシン曝露量を、大都市地域 0.21pg-TEQ/kg/日、中小都市地域 0.17pg-TEQ/kg/日、その他の地域 0.02pg-TEQ/kg/日とし、大都市・中小都市・その他(郡部)の人口をそれぞれ、2500 万人、7300 万人、2200 万人とする。また、ダイオキシンの単位リスクとして米国 EPA の 1994 年の値 $1 \times 10^{-4}[\text{pg/kg/day}]^{-1}$ を

使うと、大都市・中小都市・その他の地域の生涯発がんリスクは、それぞれ 520 件、1260 件、50 件の発がんとなる(合計 1830 件)。生涯の曝露で 1 件のがん死亡を起こすような量に 1 年だけ曝露するときの損失余命は 0.16 年である(岡, 1999)。これを、これらのがんの件数に乗じて足し合わせると、現在の大气からのダイオキシンに 1 年間曝露することによる日本全体の損失余命は 290 人・年になる。対策前の都市ごみ焼却施設からのダイオキシンの総排出量を 5000g/年とすると、緊急対策による削減 900g は、その 18%を減らしたことになる。都市ごみ焼却施設の大气からのダイオキシン摂取量への寄与率を 67.4%とすると、緊急対策によって削減されたリスクは、年々 35 人・年の損失余命ということになる。恒久対策による削減 2200g は、都市ごみ焼却施設からの総排出量の 44%に当たり、それによって削減されるリスクは、年々 86 人・年の損失余命である。

大气吸入以外の曝露の減少は、発生源からヒトへの曝露までの輸送経路モデル(Yoshida et al. 2000)によって予測した。モデルの概要は図 4 - 4 - 1 のとおりである。結果は、図 4 - 4 - 2 に示すとおりである。この曝露量に、ユニット・リスク 1×10^{-4} [pg/kg/day]¹ と、人口 1.2×10^8 と、0.16 とを乗じれば、その曝露による損失余命が算出される。

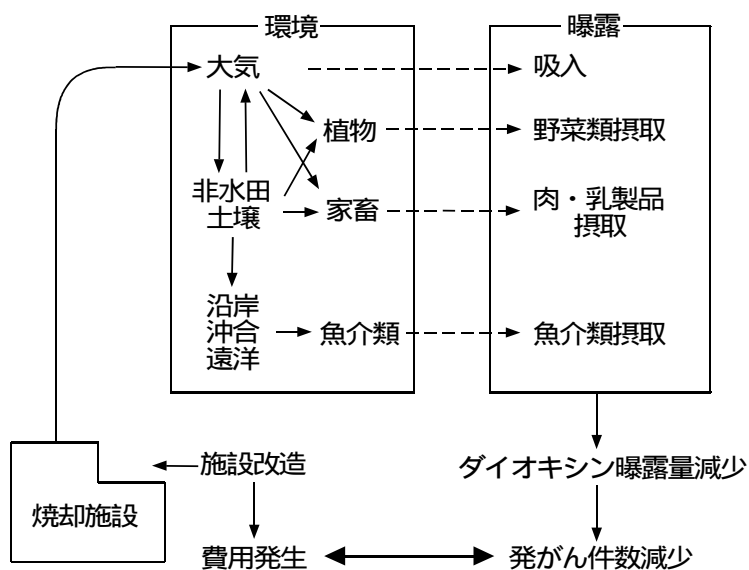


図 4 - 4 - 1 . ダイオキシン曝露量推移推定モデル

大气と食品とをあわせた、1997 年から 2030 年までの獲得余命の、割引率 3% の下での現在価値は、緊急対策および恒久対策についてそれぞれ、3941 人・年および 6041 人・年となった。これを 1 年あたりにすると、それぞれ、184 人・年、282 人・年となる。

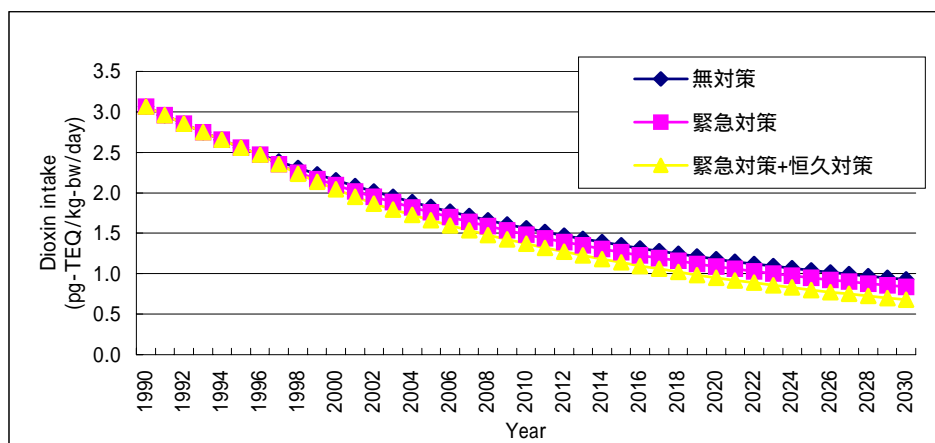


図 4 - 4 - 2 . 食品からのダイオキシン摂取量推移予測

緊急対策の年費用は 14.6 億円、恒久対策の年費用は 412 億円であったから、CPLYS は、緊急対策で 790 万円、恒久対策で 1 億 5000 万円となる。

2) - (1) - (2) その他の化学物質規制の CPLYS

その他の化学物質のリスク便益分析の結果を、上のダイオキシンの結果と併せて表 4 - 4 - 2 に示す。

表 4 - 4 - 2 . 化学物質規制の CPLYS

政策	CPLYS(万円)	出典
クロルデンの禁止	4500	Oka et al. 1997
苛性ソーダ製造における水銀法廃止	57000	Nakanishi et al. 1998
ガソリン中のベンゼンの規制	23000	Kajihara et al. 1999
ダイオキシン規制(緊急対策)	790	Kishimoto et al. 2001
ダイオキシン規制(恒久対策)	15000	Kishimoto et al. 2001

2) - (1) - (3) 諸分野の CPLYS

日本での環境規制以外の公共政策の諸分野の CPLYS(および CPQALYS: cost per quality adjusted life-year saved)を集め、それを環境規制のそれと比較した結果は表 4 - 4 - 3 に示すとおりである (Kishimoto et al. 2001)。

この結果は、これらの分野の CPLYS の間に、米国やスウェーデン (Tengs et al. 1995; Ramsberg and Sjoberg L. 1997) と同様のばらつきが認められたことを示している。

表4 - 4 - 3 . 公共政策諸分野のCPLYS(およびCPQALYS)

分野		観察数	平均値(円)	中央値(円)
化学物質規制	事後的評価	16	658,000	103,000
	事前的評価	4	1,670,000	1,030,000
	全	20	860,000	140,000
安全規制	事後的評価	2	160,000	16,000
	事前的評価	1	30,000	30,000
	全	3	20,700	27,000
保健医療(予防)	事後的評価	23	5,400	4,100
	事前的評価	17	13,300	2,100
	全	40	8,800	3,300
保健医療(治療)	事後的評価	26	1,600	600
	事前的評価	5	5,000	6,200
	全	31	2,100	970
全	事後的評価	67	160,000	4,400
	事前的評価	27	257,000	4,100
	全	94	188,000	4,100

2) - (2) 生態リスク便益分析

2) - (2) - (1) 期待多様性損失(ELB)指標を用いた中池見湿地開発リスク評価とリスク便益分析

「期待多様性損失(ELB)」指標は、絶滅確率に基づいたリスク評価を、面的開発の具体的な政策に実際に具体化するための指標という意義をもつが、それはまた、特定の土地の生物多様性の観点からの評価を、まわりの世界から独立した多様性概念やその土地に特有の価値によって行うのではなく、世界の生物多様性へのその土地の寄与度に基づいて行うものにするという意義ももつ。われわれは、この指標を、福井県の中池見湿地開発の評価に適用したが、それは、以下のような考え方に基づく。

- 1) 中池見が失われることは、そこに棲む生物種の生育(生息)地が1つ失われることを意味する。それは、その種が絶滅する確率を幾分か上昇させるだろう。
- 2) 種の絶滅は地球全体の種の多様性を減少させる。その減少分は、系統分類学的多様性への種の寄与分によって測られる。多様性への種の寄与分は、系統樹上のその種に固有の枝の長さによって測られる。
- 3) よって、中池見が失われることによるさまざまな生物種の絶滅確率の増加分に、それぞれの種の多様性への寄与分をかけて足しあわせたものが、中池見

という土地の、地球の生物多様性への寄与分であり、これが、期待多様性損失 (ELB)である。

中池見が失われることによる、生物種の絶滅確率の増加分は、維管束植物については、日本の植物レッドリストを作成する際に用いられた絶滅シミュレーション(環境庁編, 2000)を用いて、日本での絶滅に関して求めることができる。その絶滅シミュレーションでは、各々の植物種の、現在の個体群の規模の分布と、過去10年間の縮小率の分布とから、絶滅までの平均時間が計算される。中池見にその植物が生育している場合、中池見の個体群を除いた場合の絶滅までの平均時間が計算できる。両方の平均時間の差が、中池見消失がもたらす打撃である。絶滅までの時間の逆数は1年あたりの絶滅確率である。中池見の個体群がある場合とない場合との絶滅確率の差が、絶滅確率の増加分になる。中池見に生育し、絶滅時間が計算できる種についての絶滅確率の増加分は、表4-4-4に示すとおりである。

表4-4-4 . 中池見開発のELB(植物)

No	種	中池見消失による1年あたりの絶滅確率の増分 ΔP_i	生物多様性への種の寄与度 Y_i (年)	ELB $\Delta P_i Y_i$ (year)
1	Isoetes japonica	8.9×10^{-6}	29328994	261
2	Marsilea	6.4×10^{-5}	19514737	1254
3	Salvinia natans	5.7×10^{-6}	28278915	161
4	Azolla japonica	4.1×10^{-5}	30881499	1267
5	Persicaria foliosa	4.3×10^{-5}	7101914	303
6	Trapa incisa	1.4×10^{-4}	12341354	1755
7	Eusteralis	3.6×10^{-4}	3406671	1214
8	Prenanthes	5.1×10^{-5}	2124976	108
9	Sagittaria	4.4×10^{-6}	11085960	49
10	Najas japonica	1.5×10^{-4}	11618822	1782
11	Monochoria	6.7×10^{-5}	12010897	802
12	Iris laevigata	6.3×10^{-6}	6297533	40
13	Sparganium	1.9×10^{-6}	12588373	24
14	Sparganium	1.1×10^{-5}	12588373	139
15	Habenaria	1.5×10^{-6}	2226034	3
				9163

種の絶滅確率を集計する際の重みを、ここでは、地球の生物多様性への種の寄与分によって与えることは、種の絶滅確率によってリスクを表現しようとする考え方と最も整合的である。ここでは、生物多様性への種の寄与分を、系統樹の上での、当該種と近縁種との間の枝の長さをもって測る。ただし、系統樹の枝の長さの情報が得られないので、系統樹の「根」から当該種までの枝分かれの数の逆数をもってその代用とし、さらに、当該種を含む上位のグループの内部での系統関係がわかっていない場合には、そのグループ内の種の数から計算される枝分かれの数の逆数をもってそれに代えた。

一般に、ある種 A を含む上位グループ内に n 種あるとき、種 A にとっての、上位グループの根からの枝分かれの数が k である場合の数は、次の式を満たす $f_k(n)$ である。

$$\begin{cases} f_1(n) = f(n-1) \\ f_k(n) = \sum_{i=1}^{n-k} {}_{n-1}C_i f(i) f_{k-1}(n-i), \quad k = 2, 3, \dots, n-1 \end{cases}$$

ここで ${}_nC_i$ は n 個から i を選ぶ組合せの数、 $f(n)$ は n 種からなる上位グループのすべての系統樹の数、すなわち

$$f(n) = \sum_{i=1}^{n-1} f_i(n).$$

である。上位グループの根から全系統樹の根までの枝分かれの数が m であるならば、種 A にとっての、全系統樹の根からの枝分かれの数の逆数の期待値は

$$E_n[1/(m+k)] = [1/f(n)] \sum_{k=1}^{n-1} f_k(n)/(m+k)$$

となる。上位グループ内種数 n が大きいときには計算量が膨大になるので、 $n > 100$ のときには、 $E_n[1/(m+k)]$ の近似として $(m+1/E_n[1/k])^{-1}$ を用いた(ただし、 $E_n[1/k] = E_{n-1}[1/k](2n-4)/(2n-3)$ である)。

この枝分かれの数の逆数の期待値に 4 億を乗じたものが、表 4 - 4 - 4 の Y_i である。4 億は、維管束植物の最初の分化が生じてから経過したと考えられている年数である。これを絶滅確率上昇分に乘じて足し合わせたものが ELB である。中池見については ELB は 9200 年となった。

中池見には天然ガス基地が計画されている。この開発の便益が推定されれば、リスク便益分析ができることになる。ガス基地建設の便益の計測には 2 とおりの考え方が可能である。1 つは、もしこの基地がなかったとしたら、2020 年以降増大するガス需要を満たせないことに基づいて、それによって失われる消費者余剰と生産者利益とをもって、基地建設の便益と見なすというものである。しかし、それが無条件で採用できるのは、中池見以外に代替地がない場合である。もしも代替地の可能性があれば、そのような土地に比べて、中池見の基地によって増大する需要を満たす方が費用がどれだけ小さいかをもって、基地建

設の便益と見なすべきである---ただし、その方が消費者余剰と生産者利益との損失よりも小さければ---。これが2つ目の考え方である。

過去のガス販売量と供給価格の実績から、価格変化と需要変化との関係を推定した結果を使って、2020年から2070年までの、需要増を満たせないことによる消費者損失を求めると、81兆円、生産者利益の減少分は1.2兆円となった。3%の割引率の下でのこれらの年価値は7800億円という巨額になる。

他方、代替地の費用増分を求めるために、次の3つの案を想定した。(1)消費地からの距離が敦賀と同程度の日本海側の他の土地に造る案、(2)福井港およびそれに隣接する工業用地を利用する案、(3)大和川河口の大阪ガス堺製造所跡地を活用する案、である。これらは、敦賀に立地する場合と比べて、それぞれ、(1)新たな港湾建設が必要である、(2)消費地からの距離が遠い、(3)港湾条件が悪くパイプライン建設が困難であるという欠点があり、これらが費用の増加をもたらす。福井港などの港湾建設費の実績や、大阪ガスから提供された情報などに基づいて、それぞれの、敦賀基地と比べた場合の費用増分を計算すると、2010年の着工時の現在価値で、それぞれ、(1)270~470億円、(2)910~1000億円、(3)360~440億円となった。割引率3%、償却期間50年で年価値に直したものは、10億円から39億円の範囲に入る。

敦賀ガス基地の便益の推定値として代替地の費用増分を採用すると、ELB指標を使った単位リスク削減費用は、1年-ELBあたり11万円ないし42万円となる。

ELBを他の開発計画のある土地と比較するのも意味がある。愛知万博予定地500haのELBは230年であり、25haの中池見のELBがいかに高いかがわかる⁸。

2) - (2) - (2) DDTのリスク便益分析

中丸ら(2001)によるDDTのリスク評価に基づき、これにELBを適用して、単位リスク削減費用を試算した。卵中DDTs濃度を32.0ppmから1.39ppmに減らす規制による絶滅確率の減少は表4-4-5に示すとおりである。

表4-4-5 . DDTのリスク評価

集団の個体数	$\Delta(1/T)$	
	タカ科	カモメ科
100	6.4×10^{-6}	4.2×10^{-4}
300	2.3×10^{-11}	1.5×10^{-7}
1000	2.2×10^{-20}	1.6×10^{-14}

人口1000万人の地域(アフリカ)で、マラリア防除に使われていたDDTを禁止する規制が導入されるとする。個体数100のタカ科の集団、個体数300のカモメ科の

集団が影響を受けているとする。上の植物の場合と同様の考え方で、タカ科の任意の種の任意の集団の多様性重みを827742年、カモメ科のそれを1636064年とする。マラリア防除費用はUS\$0.26/人/年上昇する。これらの仮定に基づけば、ELBの減少は5.6年、費用はUS\$260万となり、単位リスク削減費用比は、47万ドル/年-ELB (5200万円/年-ELB)となる。

参考文献

- 蒲生昌志., 岡敏弘., 中西準子., 1996. 発がん物質への曝露がもたらす発がんリスクの損失余命による表現---生命表を用いた換算---. 環境科学会誌, 9,1-8.
- Gamo M., Oka T., Nakanishi J., 1995. A method evaluating population risks from chemical exposure: A case study concerning prohibition of chlordane use in Japan. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 21, 151-157.
- Oka T., Gamo M., Nakanishi J., 1997. Risk/benefit analysis of the prohibition of chlordane in Japan: An estimate based on risk assessment integrating the cancer risk and the noncancer risk. *Japanese Journal of Risk Analysis*, 8, 174-186.
- Nakanishi J., Oka T., Gamo M., 1998. Risk/benefit analysis of prohibition of the mercury electrode process in caustic soda production. *Environmental Engineering and Policy*, 1, 3-9.
- Kajihara H., Ishizuka S., Fushimi A., Masuda A., 1999. Exposure assessment of benzene from vehicles in Japan. *Proceedings of the 2nd International Workshop on Risk Evaluation and Management of Chemicals*, 62-70.
- Kishimoto A., Oka T., Yoshida K., Nakanishi J., 2001. Cost-effectiveness of reducing dioxin emissions from municipal solid waste incinerators in Japan. *Environmental Science and Technology*, (forthcoming).
- Kishimoto A., Oka T., Nakanishi J., 2001. The cost-effectiveness of life-saving interventions in Japan: do chemical regulations cost too much money?. *Chemosphere*, (投稿中).
- Oka T., Matsuda H., Kadono Y., 2001. Ecological risk-benefit analysis of a wetland development based on risk assessment using ' expected loss of biodiversity '. *Risk Analysis*, (投稿中).
- 岡敏弘 1999. 環境政策論, 岩波書店。
- Yoshida K., Ikeda S., Nakanishi J., 2000. Estimation of dioxin-levels in Japanese by mathematical models: time course from the past to the future. *Proceedings of the Third International Workshop on Risk Evaluation and Management of*

Chemicals, Yokohama, Japan, 94-102.

Tengs T. O., Adams M. E., Pliskin S. P., Safran D. G., Siegel J. E., Weinstein M. C., Graham J. D., 1995. Five-Hundred Life-Saving Interventions and Their Cost-Effectiveness., *Risk Analysis*, 15, 369-390.

Ramsberg J. A. L., Sjoberg L., 1997. The Cost-Effectiveness of Lifesaving Interventions in Sweden. *Risk Analysis*, 17, 467-478.

環境庁編 2000. 改定・日本の絶滅のおそれのある野生生物-レッドデータブック
-8 植物 I.