

簡易な生物濃縮・曝露モデルによる環境修復対策の評価
Evaluation of Environmental Remediation Alternatives with the example of
dredging sediment contaminated with chlordane

東海明宏^{**}, 山田貴久^{***}
Akihiro TOKAI^{**}, Takahisa YAMADA^{***}

1. 背景と目的

化学物質は環境に排出された後、その物理化学性
状に支配されて各環境メディアに滞留する。化学物
質の環境への放出量が削減されると、環境中濃度
は低下するが、分解性が低くかつ吸着性が高い物質
の場合、底泥中に残留した成分が2次的な汚染源と
して継続する可能性がある。この問題に対し、Hg, PCB
を対象にしてすでに底泥の除去の判定基準が策定¹⁾
され、実際に浚渫等が行われてはいるものの判定に
あたって用いられる各種の環境パラメータの不確定
性は必ずしも十分考慮されているわけではない。そ
の点に関し、モンテカルロシミュレーションを用い
て底泥に蓄積したPCBの評価を行った方法²⁾はパラ
メータの不確定性と代替案の費用の変動を明らかに
しており、環境修復技術の評価手法として適用性が
期待できるため、本研究では対象化学物質に有機塩
素化合物クロルデンをとりあげて同様の枠組みで検
討した結果を報告する。

2. 解析方法²⁾

解析にあたり、まずクロルデンの環境運命・曝露・
代替案費用推定モデルを概説する。

(1) 生物濃縮モデル

化学物質の挙動は、水中および底泥の間で濃度が
平衡状態にあると仮定したモデルを用いる。そこに
生息する魚の体内中クロルデン濃度は、呼吸・餌か

らの経路でクロルデンを摂取し、排泄・成長により
体内中濃度が希釈されるという機構で決まる。した
がって、クロルデンの魚への蓄積は次の物質収支式
で表すことができる。

$$\frac{dv_i}{dt} = K_u c_w + \sum_{j=1}^n \alpha C_{ij} w_j - (K + G) v_i \quad (1)$$

v_i : i 年の魚体中クロルデン濃度 (ng/g(wet))
 K_u : 鰓からの摂取速度係数 (L/g(wet) day)
 c_w : 水中クロルデン濃度 (ng/L)
 α : 化学物質吸収効率
 C_{ij} : 魚 i による餌 j の消費割合 (g(wet)/g(wet) day)
 w_j : 餌 j の体中クロルデン濃度 (ng/g(wet))
 K : 排泄による速度係数 (1/day)
 G : 成長速度係数 (g(wet)/g(wet) day)

また、水中および底泥の間で濃度が平衡状態にあ
ると仮定して、水中クロルデン濃度は底泥中クロル
デン濃度から求めた。

$$c_s = K_{oc} M_s c_w \quad (2)$$

c_s : 底泥中クロルデン濃度 (ng/g(dry))
 K_{oc} : 有機性炭素への吸着平衡定数 (L/g(C))
 M_s : 底泥中の強熱減量 g(C)/g(dry)

(2) 底泥除去モデル

ここでは、底泥の浚渫をとりあげた。いま、底泥
中クロルデン濃度が、水中クロルデン濃度および餌
の体中クロルデン濃度と比例の関係があり、また、
魚が生まれたときの体中クロルデン濃度はゼロであ
ると仮定すると、底泥中クロルデン濃度の減少に比
例して魚体中クロルデン濃度が減少する。この仮定
から、浚渫前と浚渫後の底泥中クロルデン濃度の比
は、浚渫前と浚渫後の魚体中クロルデン濃度の比に

*キーワード：環境計画

**正会員 工博 横浜国立大学助教授 環境科学研究
センター

***学生員 岐阜大学大学院博士前期課程

(岐阜市柳戸 1-1、TEL058-293-2465、FAX058-230-1248)

等しくなる。よって、目標とする底泥中クロルデン濃度は次のようになる。

$$SC_t = \frac{BB_t \cdot SC_a}{BB_a} \quad (3)$$

SC_t : 目標底泥中クロルデン濃度 (ng/g(C))

BB_t : 目標魚体中クロルデン濃度 (ng/g(wet))

SC_a : 現在の底泥中クロルデン濃度 (ng/g(C))

BB_a : 現在の魚体中クロルデン濃度 (ng/g(wet))

また、目標とする魚体中クロルデン濃度 BB_t は、慢性影響に依拠した人への健康リスクを目標値として次の式から求めた。

$$BB_t = \frac{ADI}{T} \quad (4)$$

ADI : クロルデンの1人1日あたり許容摂取量 (ng/kg day)

T : 1人1日あたりの魚の摂取量 (g/kg day)

底泥除去面積を求めるにあたり、底泥中クロルデン濃度の面的分布が(5)式で示される一次反応に従うものと仮定する。この式(5)は、濃度の面的分布がある地点に高濃度域があり、そこから周辺に向かって、低濃度になっていく様子を示している。

$$\frac{dSC}{dA} = -k \cdot SC \quad (5)$$

SC : 底泥中クロルデン濃度 (ng/g(C))

A : 底泥除去面積 (m^2)

k : 底泥中化学物質の分布係数 ($1/m^2$)

したがって、魚体中クロルデン濃度の目標値と現状の底泥中クロルデン濃度が与えられた時、目標濃度になる底泥除去面積は式(6)で与えられる。

$$A = -\frac{1}{k} \ln \left(\frac{SC_t}{SC_a} \right) \quad (6)$$

(3)費用関数

代替案の費用としては、底泥除去の費用と追加調査費用の2つを取り上げた。浚渫する深さを1mと

仮定し、底泥除去面積を A_d (m^2)、目標の底泥中クロルデン濃度になる最適な除去面積を A_c (m^2) とする。もし、 $A_d \geq A_c$ であれば、目標値に対して十分な除去が行われたので、単位面積当たりの浚渫費用を $unitcost$ (円/ m^2) とすると、この時の全費用は単に $unitcost \cdot A_d$ (円) となる。一方、もし $A_d < A_c$ であれば、浚渫は不十分であり目標の底泥中クロルデン濃度には達しない。したがって追加費用がかかる。そこで目標値に達する A_c まで、追加の浚渫が必要で最終的に、全底泥除去面積は A_c となり、 $unitcost \cdot A_c$ (円) の費用がかかる。さらに、その際には追加の調査費用や、浚渫工事による漁場の閉鎖などによる補償などの費用がかかることになる。ここでは、それらの追加費用をすべて合わせて $addcost$ (円) とする。以上のことをまとめると費用関数は次のようになる。

$$\begin{aligned} L(A_d|A_c) &= unitcost \cdot A_d & (A_d \geq A_c) \\ &= unitcost \cdot A_c + addcost & (A_d < A_c) \end{aligned} \quad (7)$$

$L(A_d|A_c)$: 目標値が A_c の時 A_d を実施した際にかかる費用 (円)

$unitcost$: 単位面積あたりの除去費用 (円/ m^2)

$addcost$: 不十分な除去による追加費用 (円)

(4)期待費用

魚体中クロルデン濃度は確率分布で与えられるためその分布から決定される必要な底泥除去面積もまたある確率分布として与えられる。そこで、代替案の費用の期待値は式(8)で計算した。

$$E[L(A_d)] = \int_{A_c} L(A_d|A_c) f_{A_c}(A_c) dA_c \quad (8)$$

$E[L(A_d)]$: A_d に関する期待費用 (円)

$f_{A_c}(A_c)$: A_c の確率密度関数

また、パラメータの値に対して仮に完全な情報が得られ、不確実性がすべて取り除かれる場合を考える。このとき、底泥除去面積は常に $A_d = A_c$ であり、除去費用は常に $unitcost \cdot A_c$ (円) となる。ゆえに、パラメータに対する完全情報による期待費用は次のようになる。

$$E[L(\text{perfect information})] = \int_{A_c} (\text{unitcost} \cdot A_c) f_{A_c}(A_c) dA_c \quad (9)$$

$E[L(\text{perfect information})]$: 完全情報による期待費用 (円)

各パラメータに不確実性を考慮した場合のクロルデンを含む魚を食することで生じる健康リスクを回避するために必要な底泥の除去対策の期待費用と、完全情報を仮定し、各パラメータに不確実性が除かれた場合の底泥除去対策の期待費用の差、EVPI (the expected value of perfect information) を計算した²⁾。

3. 事例適用

底泥中クロルデンの低減対策を四日市港、大阪湾、洞海湾の3地点について、目標とする魚体中クロルデン濃度 BB_i を、1/500 および 1/1000 (安全率に相当する係数を乗じて) とした2通りの場合で、シミュレーションを行う。計算にあたっての前提条件は次の通りである、

- ・対象とする魚は、生まれてから1年の魚とする。
- ・対象とする魚は、1種類の餌を食べている。
- ・不確実と考えられる環境パラメータは正規分布、三角形分布にて与えた。

その他、計算に用いたパラメータの値および分布形を表1に示す。パラメータの設定は、参考文献2)を参考にして決定した。処理費用 unitcost は実際に行われた浚渫事例から単位面積当たりの費用の平均値を求めて設定した³⁾。追加費用 addcost については、データの入手ができなかったため、参考文献2)の unitcost と addcost の比から求めた。ここで設定された値は、漁場が閉鎖されることで生じる費用、追加の調査費用等がはいっておりかなり高目の値となっている。

4. 計算方法

環境庁による昭和58年の化学物質モニタリングデータ⁴⁾からクロルデンの底泥中濃度の観測値を用いる。この値をもとに生物濃縮モデルから現在の魚体中クロルデン濃度 $BB_a(=v)$ および水中クロルデン

濃度を求める。また、クロルデンの1人1日許容摂取量 ADI から、底泥除去後の目標となる魚体中クロルデン濃度 BB_i を決める。そして、その目標値に対応する底泥除去面積 A_c を決め、代替案となる底泥除去面積 A_d と比較し、費用を計算する。

以上の計算を、表1に設定したパラメータを用いて、反復回数10,000回でモンテカルロ・シミュレーションを行った。なお、反復回数100, 1,000回で同様に計算し、解の安定性等から10,000回で行った結果で議論することとした。

表1 パラメータの設定値

変数	単位	分布形	値		
K_w	L/g(wet) day	三角形分布	0.1	0.2	0.3
α		三角形分布	0.2	0.4	0.9
C_{11}	g(wet)/g(wet)day	一様分布	0.05~0.15		
w_1	ng/g(wet)		1.0		
K	1/day	三角形分布	0.01	0.02	0.03
G	g(wet)/g(wet) day	三角形分布	0.0062	0.0063	0.0064
ADI	ng/kg day		1,000		
IT	g/kg day		1.5		
unitcost	円/m ²		8,222		
addcost	円		411,100,000		
SC_a 四日市港	ng/g(C)	正規分布	$N(0.3667, 0.03667)$		
SC_a 大阪湾	ng/g(C)	正規分布	$N(5.642, 0.5642)$		
SC_a 洞海湾	ng/g(C)	正規分布	$N(0.7667, 0.07667)$		

5. 結果

ここでは、目標値を1/500に設定したときの四日市港を例に結果を示す。モンテカルロ・シミュレーションにより魚体中クロルデン濃度の分布が図1のように示される。魚体中クロルデン濃度は、1.5ng/gを最頻値に0~6.5ng/gの間で分布している。図2は図1で表される魚体中クロルデン濃度に対して、底泥除去後の目標の濃度に達する最適な底泥除去面積 A_c の分布を示している。

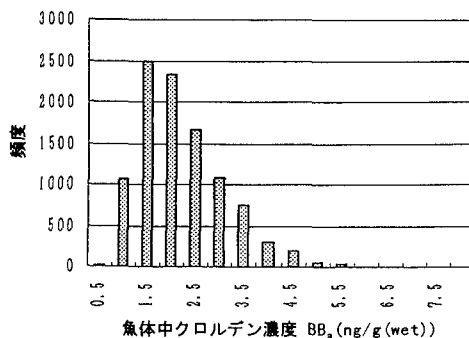


図1 魚体中クロルデン濃度の分布

図3に底泥除去面積と期待費用の関係を示した。底泥除去面積が 20,000m² のとき期待費用は最小値 2.440 億円となり、この四日市港の場合、20,000m² が最善の底泥除去面積といえる。ここでの費用は、仮設定値であるため絶対値としての意味は持たない。一方、完全情報により不確実性がすべて取り除かれる場合には、期待費用は 0.6620 億円となる。これにより、EVPI を計算すると、1.779 億円であった。

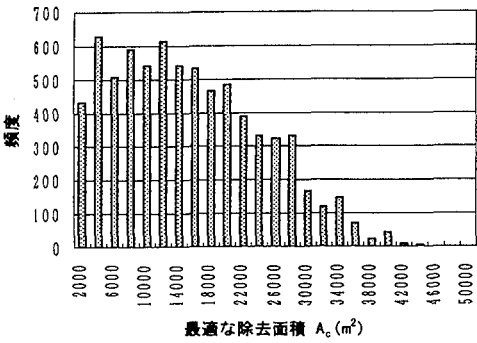


図2 最適な底泥除去面積の分布

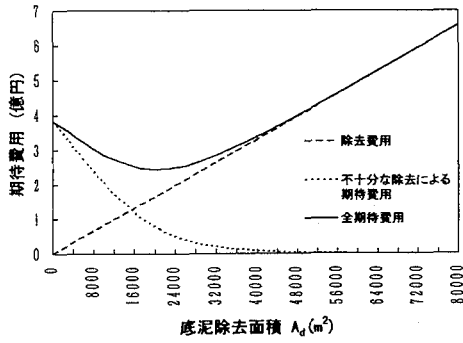


図3 底泥除去面積と期待費用

代替案の実施規模が小さい場合、期待費用の大部分は、不十分な除去によるものである。この不十分な除去は、目標の底泥除去面積の不確実性から生じている。そのため、この不確実性を減少することができれば、期待費用を減少することができる。EVPI は、完全情報により不確実性がすべて除かれたときの期待費用の減少量に値している。実際は、不確実性をすべて除くことはできないが、EVPI は不確実性を減らす限界の期待値の指標として用いることができる。言い換えるならば、不確実性を減らすために使

うことのできる最大の費用を意味している。ここでは、1.779 億円がそれに値している。その他の地点に適用した結果を表2に示す。

表2 各地点での期待費用と EVPI

	目標値 の設定	除去面積 m ²	期待費用 億円	期待費用(不確実性 を除いたとき) 億円	EVPI 億円
四日市港		20000	2.440	0.6620	1.779
大阪港	1/500	24000	2.690	0.9832	1.708
洞海湾		20000	2.460	0.6885	1.771
四日市港		38000	4.146	2.177	1.970
大阪港	1/1000	40000	4.435	2.498	1.937
洞海湾		38000	4.168	2.203	1.965

6. 結論

環境パラメータに不確実性が入る場合の代替案評価を底泥に蓄積したクロルデンを例にして行った。生物濃縮、暴露、代替案評価モデルを先行研究に従い概説し、それを日本の沿岸域3地点に対して適用した。結論は次の通りである。

- (1)用いたモデルは簡易であり、少ないパラメータで評価できる点が長所といえるが、逆に実際適用にあたっては詳細検討の前段階での予備的な検討のための手段と位置づけられる。
- (2)四日市港、大阪港、洞海湾の3地点それぞれについてパラメータの不確実性を考慮して底泥除去面積に対する期待費用を計算し、健康リスクに依拠した底泥除去面積を決定することができた。
- (3)パラメータに対し完全情報を仮定し、不確実性がすべて除かれたときの期待費用を計算することで、パラメータの不確実性を減らすことで得られる効果をEVPIによって示した。

【参考文献】

- 1)環境庁環境法令研究会：環境六法、平成7年度版、pp.2407-2713
- 2) Maxine E. Dakins, John E. Toll and Mitchell J. Small : Risk-based environmental remediation : Decision framework and role of uncertainty : Environmental Toxicology and Chemistry, Vol.13, No.12, pp.1907-1915、1994.
- 3)弘田英人：平成6年度海域浄化対策事業の予算について、ヘドロ、No.60, pp.14-19, 1994.
- 4)環境庁環境保健部保健調査室：化学物質と環境 昭和58年版。