

# リスク論 2014.7.7

- ・ヒトが生活するための環境開発や産業活動は、利便性を高める一方、(しばしば想定外の)有害作用が起こるリスクもあるので、定量的な risk-benefit 評価が必要。その方法としてのリスク論が今日のテーマ
- ・文献
  - ・栗山浩一『環境の価値と評価手法』, 北海道大学図書刊行会, 1998年12月
  - ・吉田文和・北畠能房編『岩波講座 環境経済・政策学第8巻 環境の評価とマネジメント』, 岩波書店, 2003年4月
  - ・中西準子・益永茂樹・松田裕之編『演習: 環境リスクを計算する』, 岩波書店, 2003年12月
  - ・中澤 港「開発と環境保全の相互関連性 - マルチエージェント・モデルによる分析 -」In: 大塚・篠原・松井編『生活世界からみる新たな人間 - 環境系』, 東京大学出版会, 2004年5月
  - ・Baker D, Nieuwenhuijsen MJ: "Environmental Epidemiology: Study Methods and Application." Oxford Univ. Press, 2008.
  - ・中西準子『原発事故と放射線のリスク学』日本評論社, 2014.

# リスクの種類

- ・リスクとは、本来はたんに事象が発生する確率を指す
- ・事象として、疾病発生によって健康が損なわれるなど、何らかの価値が損なわれることを扱う場合が多い
  - 環境リスク=環境の価値が損なわれる
  - 生態リスク=生態系の価値が損なわれる
  - 健康リスク=健康が損なわれる
- ・中西準子・益永茂樹・松田裕之(2003)『演習 環境リスクを計算する』(岩波書店):「環境リスクを生態リスクと健康リスクに二分して考える」

## 環境の価値

- ・利用価値
  - ・直接的利用価値:消費可能な生産物として得られる価値。木材生産, 食糧生産など。
  - ・間接的利用価値:消費できないが間接的に利用することで得られる価値。レクリエーション機能, 水源涵養機能, 国土保全機能など。Nature Service (例えば干潟のアサリの水質浄化機能)としての価値も含む
  - ・オプション価値:現在利用されていないが将来的には利用される可能性があるため、それまで自然環境を残しておくことで得られる価値。
- ・非利用価値
  - ・遺産価値:遺すものがあるという価値
  - ・存在価値:存在するという情報によって得られる価値

## リスク評価と管理の枠組み

- ・リスク管理は、リスク評価, リスクコミュニケーションとは別の管轄であるべき
  - (例)食品のリスクについては、リスク管理は農林水産省が担うけれども、リスク評価とリスクコミュニケーションは食品安全委員会が担う(機能しているかどうかは別にして、とりあえず管轄は異なっている)
- ・しかし、健康リスクや環境リスクについては、リスク管理もリスク評価もリスクコミュニケーションも、管轄省庁が同一。健康はすべて厚生労働省, 環境はすべて環境省。(放射線はすべて経産省だったが2012年4月から原子力安全庁が環境省外局に)
- ・昔はゼロリスクを目標にしていたが、ほとんどの場合に不可能とわかりパラダイムシフト⇒リスク管理が必要

## 環境リスク管理

- ・環境保全は、人類の存在そのものや生活の利便性, 福祉といったものと相反する面があるので、環境保全策を実施するには、環境保全の効果と他の面への多様な負の効果をうまく調整しなければならない。この調整が環境リスク管理の役割
- ・環境リスク管理(環境リスクマネジメント)は、
  - ・環境リスク削減を目的(環境の価値の損失を防ぐ)
  - ・その削減策がより大きな別のリスクを生まない
  - ・限られた資源の下で削減の優先順位をつける
  - ・他の原因による健康リスクや生態リスク削減策との整合性を考える
- ・つまり、総体としてベネフィットがコストを上回らねばならない
  - ・ただし、そのためには正負の効果やトレードオフ関係の正確な把握が必須

## 健康リスク対策の難しさ

- ・健康は社会の文脈に依存している(cf. WHO's definition)ので、健康リスクの評価は相対的にしかできない
  - ・公衆衛生や栄養の水準が低ければ、少しコストをかけてそれらを向上するという健康リスク対策をするだけで、それらの改善と同期して平均寿命や健康寿命は延びる(集団レベルで健康リスク削減ができる)。
  - ・既に公衆衛生や栄養の水準が高くなって、低栄養や感染症による死亡がほとんど見られなくなったあとは、健康リスク対策に金をかけても効果が出にくい
- ・南北間で資源を移転すると世界レベルの健康リスク削減は効果的に行われることになる(なぜ ODA を行うことが合理的かという説明原理の1つ)
- ・先進国では健康リスク削減と同時に生態リスク増加が起こった。

## 環境汚染物質への曝露評価の原則

- ・発生源
  - ・空気(大気汚染):複数の汚染物質が低濃度で混ざった状態で曝露する。
  - ・水:飲用量は人によって違うが、通常少数のソースから。
  - ・土壌とホコリ:空気, 作物, 家畜, 地表水などを通じて間接的に影響することもある。
  - ・食物:水俣病では魚介類からのメチル水銀, イタイイタイ病ではコメからのカドミウム曝露
- ・曝露経路
  - ・呼吸器系から経気, 胃腸を通しての消化吸収, 皮膚からの吸収
- ・曝露パラメータ
  - ・持続時間, 濃度, 頻度

## 環境リスクアセスメント

- ・環境リスクアセスメントをするのは、環境管理を目的にしているのだから、コストの評価も重要
- ・環境影響評価法では、一定規模以上の公共事業を実施する前に、環境影響評価をすることが義務付けられている。1000ページくらいの評価書ができ、それが公開されて Public Involvement (PI)を行うのが普通。
  - ・そうはいっても、1000ページの専門用語と数字が散りばめられた文書を読める一般人はそうそういないので、多くの場合、PIは一般の人の意見も聴きました、という行政のアリバイ作りになっているのが現状
- ・小規模の開発では義務付けられてはいないが、環境問題や生態系のような複雑系では間接影響の非決定性のために多面的なアセスメントの意義は大きい(非決定性ゆえに、幅が重要)。

# リスクアセスメントの方法

- 直接的評価(点推定量であることが多いが、リスクコミュニケーションを考えると幅が重要)
  - リスクそのもの(なんらかのエンドポイントの生起確率そのもの):例えば発がんリスクなら、観察対象者のうち、観察期間内にがんを発症した割合となる。対策の評価は、リスクをどれだけ下げるとどれだけコストがかかるかという視点で行われる
  - ハザード比=曝露量/許容曝露量
  - 損失余命または DALYs
- 間接的評価(ヒトによる価値観の反映を含む)
  - CVM (Contingent Valuation Method)
  - コンジョイント分析……アンケートで良さそうなプロファイル(シナリオ)を選んでもらう方法
  - CRA (Comparative Risk Assessment)

# ハザード比

- がんの場合は、死亡をエンドポイントとしてリスクが評価されるが、一般に発がん確率=がんによる死亡の確率とみなされる。致命的な事故による障害も死亡をエンドポイントとしてリスクが評価されるので比較可能。致命的でない疾患はエンドポイントが異なるので比較できない。
- がん以外の疾患に伴うリスクはハザード比で評価するのが普通
  - ハザード比は曝露量を許容量(無影響曝露量を安全率 [=不確実性係数] で割った値)で割った値。
  - ハザード比が1未満ならリスクはゼロ(複合効果は無視)。ハザード比が1を超えるとリスクはある(大きさは不明)

# 損失余命と DALYs

- 人は誰でもいつかは死ぬので、死をエンドポイントとすると、低いリスクの削減効果を見るためには長い観察期間が必要となって、観察からの脱落が増える。
- 死亡そのものでなく、死によって失われた寿命の長さを評価するのが損失余命 (YLL; Years of Life Lost) という考え方
- 障害調整生存年 (DALYs; Disability Adjusted Life Years) は、YLL と障害をもって生存する年数 (YLD; Years of Life lived with Disability) の和
- Graham ら(ハーヴァード大学リスク解析センター)の YLL
  - 実態でなく死が発生する状況に応じて損失余命を割り付け
- 蒲生らの YLL
  - 生命表で、その死因による死亡がなかったら平均余命がどれだけ延びるかを計算し、その死因による損失余命と考える (<http://www.aist-riss.jp/software/risksat/> から RiskCaT-LLE がダウンロードできたが、out of date)
- Murray らの DALYs は、R のパッケージ DALY で計算できる
  - <http://users.ugent.be/~bdvleess/DALYcalculator/> を参照
  - [http://users.ugent.be/~bdvleess/DALYcalculator/publications/EUPHA\\_20131116\\_BoD\\_DALY.pdf](http://users.ugent.be/~bdvleess/DALYcalculator/publications/EUPHA_20131116_BoD_DALY.pdf)
  - 例 1 は [http://www.medicaldata.jp/trc/272/s4/s4\\_3.html](http://www.medicaldata.jp/trc/272/s4/s4_3.html) も参照

# CVM

- CVM とは、Contingent Valuation Method (仮想評価法)の略:環境(健康を含む)の価値を仮想的な金銭に換算して考える。即ち、リスク削減のためにいくらなら払ってもいいか(支払い意思額: WTP)、いくら貰えばリスクが増えてもいいか(受入れ補償額: WTA)をアンケートで調べる方法論
- 健康リスクなら QOL をみるような場合に使われるが、保健医療政策の実施前評価にもっと使われてもおかしくない。環境リスク評価には良く使われる
- 欧米では裁判でも使われる(例:バルディーズ号の事故における CVM 評価)。
- 実施ガイドライン: NOAA Blue-Ribbon Panel (1993)
- 限界:仮想の妥当性、とくに日常的に現金経済に接していない人が対象の場合の WTP と WTA の不一致、質問のバイアス等

# バルディーズ号の事故

- 1989年3月、アラスカ沖でエクソン社のタンカー「バルディーズ号」が座礁し、4200万リットルの原油が海洋流出
  - 推定 40 万羽のウミガラス、3000 匹のラッコが死亡
  - 海洋生態系に大きな影響
- エクソン社は原油除去のため 30 億ドルをかけたが、沿岸に流れ着いた原油を取り除いたり、岩に付着した原油を熱湯で除去するといった原始的な対応策しかとれず、生態系の完全な修復は不可能
  - 既に破壊された生態系をどう見るか?
  - エクソン社は失われた生態系に対し賠償責任あり?
- 全米一般市民を対象にした CVM のアンケートで生態系の価値が一世帯当たり 30 ドルと推定され、全米世帯数をかけて 28 億ドルと評価された。この結果を元に連邦・州政府とエクソン社が交渉し、10 億ドルの補償がなされた
  - 「バルディーズ原則」:環境に対する企業の社会的責任が確立
- <参考 URL> <http://www.evostc.state.ak.us/>

# CVM のバイアス

- ゆがんだ回答を行う誘因によるもの
  - 戦略バイアス、追従バイアス(調査機関、質問者)
- 評価の手がかりとなる情報によるもの
  - 開始点バイアス、範囲バイアス、関係バイアス、重要性バイアス、位置バイアス
- シナリオ伝達ミスによるもの
  - 理論的伝達ミス、評価対象の伝達ミス(シンボリック・バイアス、部分全体バイアス、地理的部分全体バイアス、便益部分全体バイアス、政策部分全体バイアス、測定バイアス、供給可能性バイアス)、状況伝達ミス(支払手段バイアス、所有権設定バイアス、供給方法バイアス、予算制約バイアス、評価質問方法バイアス、説明内容バイアス、質問順序バイアス)
- サンプル設計とサンプル実施バイアス
  - 母集団選択バイアス、サンプル抽出枠バイアス、サンプル非回答バイアス、サンプル選択バイアス
- 推量バイアス
  - 時間選択バイアス、集計順序バイアス(地理的、複数財)

# NOAA (米商務省国家海洋大気管理局) ガイドライン

- 訴訟に耐えうる信頼性を CVM が確保するために必要な条件のリスト (NOAA, 1993)
- 一般項目として、これだけは必須
  - 統計学的に十分なサンプルサイズ
  - 十分に高い回収率
  - 個人面接(電話を含む)
  - 質問者による影響のチェック
  - サンプル定義、サンプルサイズ、回収率なども含めてすべての情報の厳密な報告
  - 質問項目は事前にパイロットスタディをしてチェック済みであること
- その他、調査項目として既に優れた CVM では満たされてきたもの、目標項目としてこれまでは満たされていないが満たすべき項目も記載している

# CVM の質問項目の例

- 例えば、再稼働前に、関西電力の電力供給区域住民対象に以下の質問をすることは可能であった
  - 「あなたは、いくら金銭的な保障が貰えれば、大飯原発の再稼働を容認しますか？」 WTA
  - 「あなたは、大飯原発再稼働を阻止するために、いくらなら払いますか？」 WTP
- 2013年3月東京都の風疹流行に対する緊急提言【CRS 防止のための情報提供と普及啓発、妊娠を予定している女性や定期接種対象外だった男性への接種勧奨、そのための財政措置等】について
  - 「あなたは、緊急提言実現のために、いくらなら払いますか？」 WTP
  - 「あなたは、いくら貰えれば、緊急提言が実施されなくても許せますか？」 WTA



# CRA (Comparative Risk Assessment)

- 米国環境保護庁 (EPA) が環境問題の優先順位付けのために開発した手法
- ある地域に関する環境問題の包括的なリストを作成し、問題の影響の大きさをリスクの側面から比較評価して(この際、健康リスクだけでなく、生態系リスクや生活の質へのリスクなども加味)ランクをつける
- 評価するのに専門家だけでなく、市民代表など幅広い人が参加して住民の立場からの意見も取り入れる点が特徴。
- (例) 国立環境研究所が中心になって、環境庁、地方自治体、大学、コンサルタント、環境研究所から、関係者 24 名がパネルとなって、年 2 回泊り込みで、環境問題のリストづくりとランクづけをした。結果は 15 の問題領域 [ 地球規模の大気変動、有害化学物質汚染、電磁波・放射線など ] ことこの 4 つの側面 [ 健康、生産、生物、精神 ] への影響の大きさの、参加者の平均値として得られた (高月 紘「自分の暮らしがわかるエコロジー・テスト」講談社ブルーバックス参照)

# CRA の応用: エコポイントチェック

- 参加したパネルメンバーが思いつく問題領域のリスト作り (思いつくままあげていき、後で似たものをまとめて絞る)
- 絞り込まれた 15 の問題領域から、日常生活に関連が深いものとして温暖化、廃棄物、水質汚染、大気汚染、有害物質の 5 分野を取り上げる
- 各分野について、パネルがつけた 4 つの側面 [ 健康、生産、生物、精神 ] での得点を加算、得点比率を分野ごとの重みとする (環境研 CRA では、温暖化問題 24.3%、廃棄物問題 18.6%、水環境問題 10.9%、大気環境問題 15.9%、有害化学物質問題が 30.3% となった)。総得点が 100 点満点になるように、重みの合計を 10 にする (同じく 2.4, 1.9, 1.1, 1.6, 3.0 となった)
- 各分野について 10 点満点になるよう、25 の日常行動 (各分野について予め 5 つずつ決めておいたもの) に評点を割り振る。基準は、現状の環境負荷全体をひとつの環境容量とみて、この容量に対してどれだけ負荷を削減できるかという視点で
- 25 の日常行動それぞれのエコポイントが、5 分野での評点に重みを掛けて合計したものと得られる
- 回答者が 25 の日常行動それぞれについて、「いつも取り組んでいる」から「まったく取り組んでいない」まで 5 段階で自己評価できるように、「いつも」にその行動のエコポイントの満点、「まったく」を 0 点として、その間を 4 等分して評点とする。

## その他のアセスメント法

- エネルギー消費量や資源消費量や二酸化炭素負荷量などに還元して 1 つの軸で比較評価する方法 (CVM も金銭という 1 つの軸にするので思想的には近い。仮想でなくても、実際に除去や予防に必要なコストを計算して金銭という軸で評価する方法もある。タイムスパンが問題)
- 科学的あるいは政治的に定められた環境上の目標に対する距離を用いる方法 (環境影響スコアを特定の場所と期間における実測値で割ることによって正規化でき、さまざまな問題の間での相対的な比較が可能になる)
- コンジョイント分析を行う際に用いるシナリオを、マルチエージェントモデルで予測する方法 (MAM-CA)

## MAM-CA (multi-agent-modeling based conjoint analysis)

- 政策的介入が狙っているアウトカムは 1 つあるいは少数だが、常に副次的な (複数かつ多面的な) アウトカムをもたらす
- 通常、コンジョイント分析 (conjoint analysis) では、複数のシナリオを提示して住民などにどれがいいか選んでもらう (あるいは評定してもらう) が、シナリオで提示されるアウトカムが限定的である点が問題 (副次的アウトカムを出さなかったり数値予測が点推定だけだったり)
- 介入候補別にマルチエージェントモデルを作成し、そのシミュレーション結果 (偶然起こりうる変動幅も含め、かつ複数のアウトカムを見ることが出来る) をシナリオとして提示することでこの問題に対応する試み

## 沖縄・西表島における農地開発 (1)

- 西表島で、沖縄県による土地改良事業が採択され、いったん工事に着手されながら、外部の自然保護団体 (西表自然史研究会、日本哺乳類学会、日本自然保護協会) が希少野生生物の生息環境を守るために工区変更を求めたことをきっかけに開発が問題化した事例
- 住民は、土地改良された国有地を農地として払い下げてもらうことを望んでいた。農地になった場合の収入は農産物の価格にも依存する。
- 現実の経過としては、東工区では農家、自然保護団体、町、県の 4 者協議を経て、工区を変更して農地開発がなされた。一方、西工区ではイリオモテヤマネコの生息地を守るために、完全に工事が中止された。
- 意思決定の前に MAM-CA がなされれば違う展開もあったかも?

## 沖縄・西表島における農地開発 (2)

- この問題を MAM 化すると、下左図のようになる。土地改良事業をしない場合、そのままでは明らかに現金収入が低下するので、代替案としてエコツーリズムを実施する場合を考えてみる
- シミュレーション結果 (下右図) が示すように、シナリオによって期待値もばらつきも異なるので、住民にこの結果を示し、説明して理解してもらった上で議論して選択するのが CA

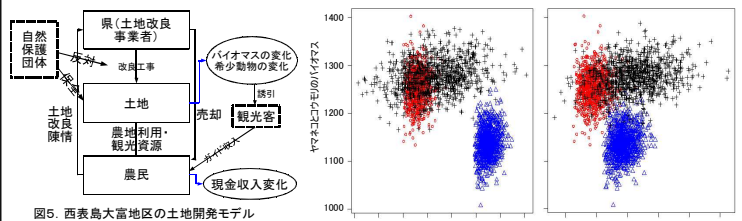


図5. 西表島大富地区の土地開発モデル

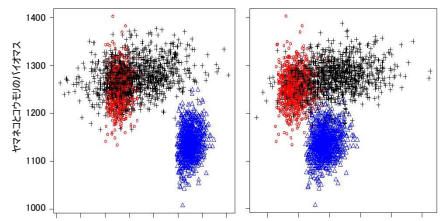


図6. 村の収益とバイオマスとの関係 (○: 実測通り、△: 全面土地改良、+ : エコツーリズム導入)

## 中西 (2014) による放射線曝露リスク評価 (1)

- 化学物質の曝露では経口摂取、吸入摂取、皮膚吸収により異なる標的臓器を評価するが、放射線は経口と吸入が内部被曝、皮膚に付着した放射性物質が体表周囲に引き起こすと、離れたところに存在する放射性物質から  $\gamma$  線が飛んでくるのが外部被曝。2 つの区別は重要。
- 外部被曝量 = 実効線量 = (空間線量)  $\times$  (空間線量から人の実効線量への年齢別換算係数)  $\times$  (遮蔽などの補正係数) = (空間線量率)  $\times$  (滞在時間)  $\times 1$  (日本では、UNSCEAR では大人で  $0.7 \sim 0.8$ )  $\times 0.6$
- 福島県葛尾村役場 (2013.9.15 夕刻) の空間線量率は  $0.257 \mu\text{Sv/h}$  だったので、ここに 1 年間住むと外部被曝量は、 $0.257 \cdot 24 \cdot 365 \cdot 0.6 = 1351 \mu\text{Sv}$  ( $\approx 1.4 \text{mSv}$ ) となる
- Chernobyl の補正係数は農村 0.36、都会 0.18 (国連科学委員会)
- 内部被曝は実効線量係数 (放射性核種によって異なる、Bq から Sv への換算係数) を使って、内部被曝量 = 実効線量 = (ベクレル単位の摂取量)  $\times$  (実効線量係数) = (ベクレル単位の日摂取量)  $\times$  (摂取日数)  $\times$  (実効線量係数)
- 放射性 Cs 濃度が基準値ギリギリの  $100 \text{Bq/kg}$  のコメを  $170 \text{g/d}$  (ご飯として約  $375 \text{g/d}$ )、毎日食べると、Cs134 と Cs137 が半々として (それらの実効線量係数は  $1.9 \times 10^{-8}$  と  $1.3 \times 10^{-8} \text{ Sv/Bq}$  なので平均  $1.6 \times 10^{-8}$ )、 $100 \cdot 0.17 \cdot 365 \cdot 1.6 \cdot 10^{-8} = 0.1 \text{mSv/年}$

## 中西 (2014) による放射線曝露リスク評価 (2)

- 外部被曝を評価するための「空間線量率」は、実は「空気吸収線量」「周辺線量等量」の 2 種類の指標について混用されている
- 空気吸収線量: モニタリングポストで測定。空気中の放射線がもつエネルギー。本来は Gy で  $1 \text{mGy} = 1 \text{mSv}$  として表示。UNSCEAR が空間線量としているのはこれ。
- 周辺線量等量: リアルタイム計測や文科省の航空機モニタリング (地表面から 1m の高さ) や 20 万円程度の携帯サーベイメータで測定。人の被曝線量を最大限の安全率をみて計算した値で、mSv で表示。ICRP によると Cs による放射線が四方と上方から照射される場合、空気吸収線量の 1.2 倍
- 伊達市の市民がガラスバッジをつけて 1 年間の外部被曝を実測した結果に比べ、前述の計算式での外部被曝は 2~3 倍 <http://www.city.date.fukushima.jp/uploaded/attachment/10030.pdf>
- 放射線の人体影響は原爆被爆コホートの 60 年以上の追跡による寿命調査 (LSS) が元なので信頼性が高い。
- 白血病は発症数が比較的少なく線量反応関係が下に凸
- 固形がんの過剰死亡リスクは、 $200 \text{mSv}$  以上の実効線量で線形増加。1 Sv では被曝なしに比べ 1.5 倍の固形がん死亡。125 mSv 未満では線形関係が有意でないが、ICRP (2007) は LNT (閾値なし線形) を仮定。他に仮定できる合理的なモデルがないため。