

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 7 日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2010～2012

課題番号：22651015

研究課題名（和文）

技術リスクガバナンスのプロトタイプモデル構築

研究課題名（英文）

Development of the Prototype Model for Improving Technological Risk Governance

研究代表者

東海 明宏（TOKAI AKIHIRO）

大阪大学・工学研究科・教授

研究者番号：90207522

研究成果の概要（和文）：

温室効果ガス排出削減の対価として化学物質リスクの増減がどれほど起きるかに関し、事業者はリスクトレードオフの発生を評価することが求められる。そこで本研究では、リスク評価とライフサイクル評価を組み合わせることで、トレードオフの態様を把握する手法を開発した。この手法を都市静脈系設備の更新をとりあげ、下水汚泥・厨芥からのバイオガス・リン回収施策、都市建造物の更新に係る太陽高発電パネル普及施策の評価を通じて、その適用性を検証した。

研究成果の概要（英文）：

All sectors have to assess the occurrence of risk trade-off by the result of their measures. That is to say, they assess whether chemical risks would be increased or not in compensation for reducing greenhouse gas emissions. To meet the background, we developed the assessment model of risk trade-off by combining risk assessment methodologies with life cycle assessment. Our model was applied to two case studies: (i) Recovering biogas and phosphorus from sewage sludge and food waste in updating of urban sludge disposal system; and (ii) Prevailing solar power photovoltaic generation panel in reconstruction of urban buildings.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	1,300,000	0	1,300,000
2011 年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2012 年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,100,000	540,000	3,640,000

研究分野：環境リスクの評価と管理

科研費の分科・細目：環境影響評価・環境政策

 キーワード：環境リスク、ライフサイクル評価、低炭素技術、化学物質管理、
 リスクトレードオフ、都市静脈系設備、都市建造物、太陽光発電

1. 研究開始当初の背景

我が国が将来時間軸上に抱える困難な環境目標として、1つは2020年までに達成すべき化学物質リスクの最小化であり、もう一つには2050年までに達成すべき温室効果ガス（GHG）排出量の1990年比半減が挙げられる。これら2つの目標達成に向け、温室効果ガス排出削減の影で化学物質リスクの増減はどれほど起きるかに関する知見を収集することが求められ、各事業者がリスクトレードオフの発生を把握し、継続的に点検することが必要となる。

そこで、CO₂に代表される温室効果ガスと化学物質の統合管理に向け、PRTR（Pollutant Release and Transfer Register／化学物質排出移動量届出）制度の枠組みに温室効果ガスを加える制度設計が一案として挙げられる。また、リスクトレードオフが発生する場合、リスクの増減構造（GHGの排出抑制分、化学物質リスクの増加分）の体系的整理手法の構築が必要視される。

2. 研究の目的

本研究では、温室効果ガスとPRTR対象物質の同時管理下において、トレードオフの発生の有無を判定する手法の開発を行うことを目的とした。具体的には、リスク評価とライフサイクル評価を組み合わせることで、(a)物質ならびにエネルギーのフロー・ストック解析、(b)化学物質のリスク評価、(c)化学物質リスクのDALY換算によるトレードオフ判定、を行うための解析手法の体系化を試みた。

本研究では、事例として、都市静脈系施設更新と、都市構造物の更新を対象とした。

都市静脈系設備（下水処理施設、ごみ焼却施設）の更新については、GHG排出削減とリン回収が課題となっていることを踏まえ、下水汚泥・厨芥の混合消化事業と、脱水汚泥処理プロセスの技術更新、リンの循環形成に向けたリン回収技術の導入、に係る技術システム選択の比較評価を行った。PRTR対象物質としては、カドミウム、水銀、ニッケル、クロム、鉛を対象とした。

都市構造物の更新については、街区単位における床面積の集積度に応じ、「太陽光発電を核とした全電化システム」か「燃料電池を核とした電気・排熱融通システム」を選択するモデルを開発し、大阪市に適用した。その上で、太陽光発電の大規模普及が進むことを想定し、太陽光発電の製造・廃棄に係るPRTR対象物質（カドミウム、スズ、セレン、鉛、亜鉛、モリブデンを対象）の排出量を推計するためのフロー・ストックモデルを開発した。

3. 研究の方法

(1) 都市静脈系設備更新の評価

① 比較対象ケースの設定

下水処理施設をエネルギー自給施設・リン回収拠点として更新していくにあたり、下水処理施設に消化槽を設置し、消化槽で下水汚泥・厨芥の混合処理を行うことが検討事項となる。そこで、下水処理施設に適用する汚泥変換技術とリン回収技術とを組み合わせた循環技術システムを取り上げることとした。

以下に記す2点を更新の選択肢に係る比較の論点とした。

- 下水処理施設による下水汚泥・厨芥の混合処理を実施するケース（混合処理システムケース）と、混合処理を実施しないケース（個別処理システムケース）間での比較。
- 汚泥変換技術とリン回収技術からなる技術ケース間での比較。

評価対象とするシステムケース、技術ケースを表1に示す。

システムケースについて、汚泥・厨芥の個別処理ケースをケースXとし、厨芥はごみ焼却施設で焼却され、下水処理施設における消化槽の設置は行われなかったとした。ケースYでは、下水処理施設に消化槽が設置され、汚泥・厨芥の混合処理が行われたとした。

技術ケースについて、対象とする汚泥変換技術は、現在普及している焼却（通常焼却、高温焼却）、コンポスト化、セメント原料化と、燃料変換技術である低温炭化、乾燥造粒、熱分解ガス化とした。リン回収技術は、HAP法、MAP法、灰アルカリ抽出法、部分還元溶融法を対象とした。ここで、HAPはカルシウム

表1 比較対象とする更新ケース

システムケース	技術ケース	
	略称	汚泥変換技術 / リン回収技術
Case X 【個別処理】 (厨芥:焼却)	X-0	通常焼却 / -
	X-1	コンポスト / HAP法 ^a
	X-2	セメント原料 / HAP法 ^a
	X-3	低温炭化 / HAP法 ^a
	X-4	乾燥造粒 / HAP法 ^a
	X-5	熱分解ガス化 / HAP法 ^a 灰アルカリ抽出法 ^b
	X-6	高温焼却 / HAP法 ^a 部分還元溶融法 ^c
Case Y 【混合処理】 (厨芥・ 下水汚泥の 混合消化)	Y-1	コンポスト / MAP法 ^d
	Y-2	セメント / MAP法 ^d
	Y-3	低温炭化 / MAP法 ^d
	Y-4	乾燥造粒 / MAP法 ^d
	Y-5	熱分解ガス化 / MAP法 ^d 灰アルカリ抽出法 ^b
	Y-6	高温焼却 / MAP法 ^d 部分還元溶融法 ^c

^a 返流水からの回収, ^b 飛灰からの回収,

^c 焼却灰からの回収, ^d 脱水ろ液からの回収。

ムヒドロキシアパタイト、MAP はリン酸マグネシウムアンモニウムを指す。

ケース X で污泥変換技術を通常焼却とし、リン回収技術は導入しないケース X-0 を基準ケースとし、基準ケースとの比較で技術更新効果を論じる。

② 評価指標の設定

評価指標は、温室効果ガス排出量、リン回収量、化学物質暴露由来ヒト健康リスク値の3指標とした。ヒト健康リスク値については、DALY (Disability Adjusted Life Years、障害調整生存年) に換算して評価した。

③ バウンダリーと機能単位

ケース X が下水処理施設とごみ焼却施設の物質フローを対象とするのに対し、ケース Y では下水処理場のみを対象とする。ただし、生活排水・厨芥の回収・処理・変換・輸送・灰処理までのライフサイクルを統一しており、平等な条件下で比較評価が可能である。

機能単位については、本研究では処理計画人口 10 万人の生活排水 (下水污泥)、厨芥の処理サービスを機能単位とした。なお、排水処理における活性污泥処理方式は嫌気・好気法 (AO 法) を採用した。

④ 物質・エネルギー・GHG 収支の解析手法

エネルギー収支については、各プロセスの (投入量、消費量、代替量など) に技術パラメータ (エネルギー消費原単位、変換率など) を乗じて推計した。リン収支についても、各プロセスでのリン収支を踏まえてシステム全体でのリン収支を推計した。GHG 収支については、電力・燃料・薬品の消費に係る CO₂ 排出係数やプロセスからの CH₄・N₂O 排出係数を活動量に乗じて推計した。

⑤ リスク評価手法

肥料の長期的な連用に伴う土壌中の重金属濃度増加量を推計し、次に、葉菜類を対象とした作物中の濃度増加量、作物経由での経口摂取増加量を算定する。葉菜類を選定した理由は、作物への重金属吸収率が高く、健康リスク上より安全側の視点に立つためである。評価対象となるリサイクル肥料は、污泥コンポストと、再生リン肥料 (HAP、MAP、リン酸カルシウム、熔成リン酸質肥料) である。リスクの比較のため、リン鉱石から生産される化学肥料 (リン酸肥料) も対象とした。対象物質は、カドミウム、水銀、ニッケル、クロム、鉛を対象とした。ここで、污泥コンポストでの含有成分調査において、水銀は大半が人の食生活に由来し無機の状態、クロムは排水処理の過程で還元され3価の状態を検出されていることを踏まえ、水銀は二塩化水銀、クロムは3価クロムの値でリスク評価を

行うこととした。

化学物質の暴露に由来するヒト健康リスクは、DALY に等価換算する。推計手法として、各物質の暴露量より、まずエンドポイントとした疾病の年間発生確率 $Probability_{i,l}$ [-] を推計する。そして、年間発生確率に各疾病の重篤度 $UnitDALY_l$ [year-DALY/件-疾病] を乗じ、個人 DALY 値 $DALY_i^{individual}$ [year-DALY/年/人] を式 (1) より推計する。

$$DALY_i^{individual} = Probability_{i,l} \times UnitDALY_l \quad (1)$$

i : 物質、 l : 疾病

$Probability_{i,l}$ について、本研究でエンドポイントとした非発がん影響、経口暴露の場合は式 (2) より推計する。

$$Probability_{i,l} = DR_coefficient_{i,l} \times Intake_i \quad (2)$$

ここで、 $DR_coefficient_{i,l}$ は用量反応係数 [per (μ g/kg-BW/日)]、 $Intake_i$ は年平均経口摂取量 [μ g/kg-BW/日] を指す。

がんの実質安全量として生涯発がんリスクの増加分 10^{-5} に、がんの平均 DALY 値 6.7 [year-DALY/件]、寿命 70 [年] で換算し、年間の実質安全基準の目安として $10^{-5} \times 6.7 / 70 \approx 10^{-6}$ [year-DALY/年/人] を、DALY 値の参照基準とした (この値は、WHO が飲料水ガイドラインで遺伝毒性発がん物質に係る許容値としている 10^{-6} [year-DALY/年/人] に同じ)。

(2) 都市構造物更新の評価

① モデルの概要

現状ストックからの経年的な建物更新、都市構造転換のための制度設計が検討可能な集約型都市設計モデルと、将来の都市全体の建物において個別/街区単位の施策が導入された場合の民生用エネルギー消費量・CO₂ 排出量を算定できる省エネルギーシステム導入評価モデルから構成される、統合マネジメントモデルを開発した。

集約型都市設計モデルにより都市全体の用途別建物床面積を 250×250m メッシュ (本研究では同スケールを街区単位と定義) で表現し、集積方策の差異を分析することを目的とした。モデルの適用地域は大阪市とし、2005~2050 年を対象とした。

② 都市構造のケース設定

都市の床面積集約度合いにより 3 つのケース (多極高度集約、多極普通集約、傾向延長) を設定する。

多極高度集約ケースは、商住混在比率を高めるための新たな用途地域が設定され、容積

率も大幅に緩和された都市計画制度の下、建物を複数の拠点（主に駅周辺）へ集約させるケースとした。多極普通集約ケースも同様に建物床面積を集積させるが、現状の用途地域と容積率の範囲で集約化を実施することを想定した。傾向延長ケースは、現状の拡散傾向にある都市構造が継続する場合で、集約化を実行しないケースとした。

③ 省エネルギーシステム導入評価モデル

本研究では、太陽光発電パネルの導入、個別省エネ対策（個別機器の効率向上(照明・OA 機器)、建物の断熱性能向上)の実施に加え、個別電化ヒートポンプシステムまたはマイクログリッドシステムのいずれかが導入された場合のCO₂排出量を評価した。個別HPシステムは高効率HPを建物個別に導入した全電化方式、MGシステムは街区内(メッシュ単位)で電熱融通を行う燃料電池CGSを導入するシステムである(図2)。2つのシステムのうちいずれかが都市全体に導入されたケース(略称:HP、MG)と、各街区において優位となるシステムが選択的に導入されたケース(略称:選択)のCO₂排出量を算定した。

④ 太陽光発電パネルに係るライフサイクルでのPRTR届出物質の排出推計手法

対象とする太陽光発電パネルは、シリコン太陽電池パネル、CISパネルの2種とした。物質については、シリコン太陽電池パネルはスズ、鉛を、CISパネルはカドミウム、セレン、亜鉛、モリブデンを対象とした。

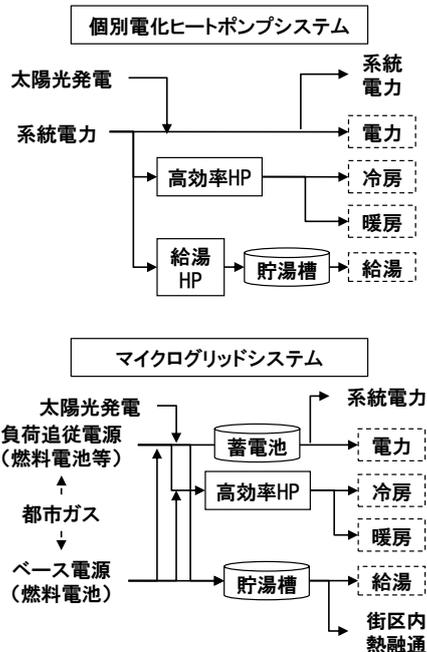


図2 街区単位で選択される省エネルギーシステム

排出源となるライフステージに関しては、製造工場、リサイクル工場、下水処理施設、ごみ処理施設、埋立処分場を勘定対象とし、各排出源からの環境(大気・水域)排出量を推計する手法を構築した。具体的には、各ライフステージの取扱量(生産量、焼却量、埋立量など)に、排出係数を乗じることでライフステージ別・環境媒体別の排出量を推計するモデルとした。

4. 研究成果

(1) 都市静脈系設備更新に係る評価結果

① GHG 排出量・リン回収量の推計結果

温室効果ガス排出量ならびにリン回収量の推計結果を図3に示す。システムケース間の比較では、ケースY(下水処理施設による厨芥受入)の方がケースXに比べ1,361~2,393 [t-CO₂eq/年]のGHG削減効果があり、リン回収の側面でも厨芥由来のリン回収の増分が得られた。

GHG 排出量とリン回収量の2指標で、システムケースY内の技術ケースを評価すると、脱水汚泥をコンポスト化するY-2、熱分解ガス化するY-5が優位なケースであることが明らかとなった。

② 個人DALY値の推計結果

化学物質暴露に由来する個人DALY値の推計結果を図4に示す。食品からの経口摂取に由来するリスクは、非汚染土壌由来(自然由来)での暴露の寄与が大きく、葉菜のみでも参照基準10⁻⁶ [year-DALY/年/人]を超過している。非汚染土壌由来に、肥料分の寄与を足

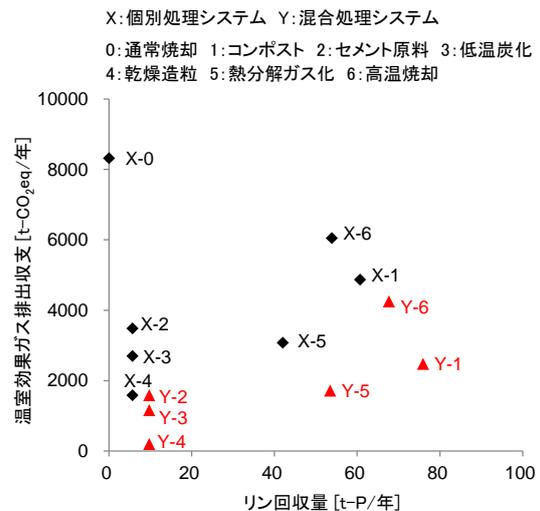


図3 温室効果ガス排出量とリン回収量の推計値(人口10万人規模)

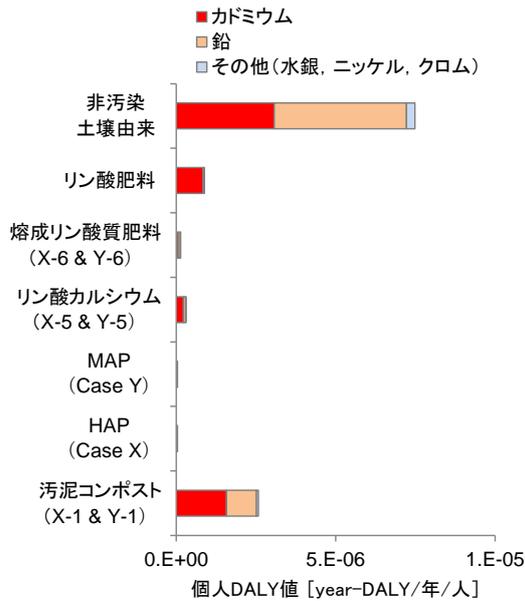


図4 個人DALY値の推計値（葉菜摂取）

した値が個人に対する年間のDALY値となる。肥料間の比較では、リン回収技術により回収したリン肥料（HAP、MAP、リン酸カルシウム、熔成リン酸質肥料）は、リン酸肥料（リン鉱石由来化学肥料）より低く推計され、リン回収技術により回収した肥料ではリスクの増加を招かないことが示唆された。一方で、汚泥コンポストでは個人DALY値がリン酸肥料と比べ増加するため、GHG排出削減と化学物質リスクとの間にトレードオフが生じると判定された。

よって、GHG排出量とリン回収量、化学物質暴露由来個人DALY値で比較すると、Y-5が優位なケースであると判定された。

(2) 都市構造物更新に係る評価結果

① 将来床面積ストックの推計結果

集約型都市設計モデルより推定される2050年の床面積ストックのグロス容積率を図5に示す。現状の都市構造が維持する傾向延長ケースでは、中密度な地域が広範囲に広がっている。他方、多極高度集約ケースでは駅周辺を中心に高容積が達成された。また、多極普通集約ケースは、中低密な地域が広がる一方で集約化する拠点も適宜分散的に存在する床の集積結果が得られた。

② 省エネルギーシステム導入によるCO₂削減効果

省エネルギーシステム導入評価モデルより推計される2050年のCO₂排出量を図6に示す。現状（2005年）と比較すると、人口減少により無対策でも22%のCO₂排出が減少する。OA機器・照明、断熱性能を向上させることで36.5%のCO₂削減が可能となる。さらに、本研

究で対象とした次世代の省エネルギーシステムを構築することで、各都市構造ケースともに54.8~57.6%削減されると推計された。

本研究では、床面積集約度合いにより3つのケース（多極高度集約、多極普通集約、傾向延長）で比較した場合、省エネルギーシステム間（HP、MG、選択）で比較した場合、どちらにおいてもCO₂排出削減量にほとんど差が見られなかった。これは、個別電化ヒートポンプシステム（HP）とマイクログリッドシステム（MG）に差が生じないことに起因する。

③ 太陽光発電パネルに係るPRTR届出物質の環境排出量推計結果

2008年公表の政府目標を踏まえた太陽光

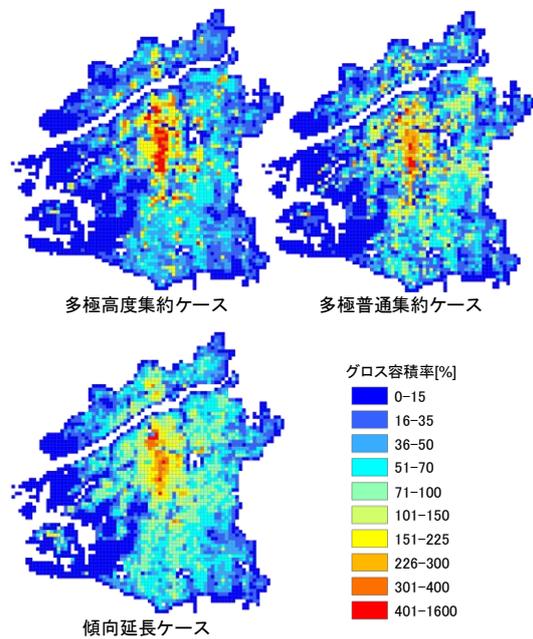


図5 2050年・大阪市における床面積ストックのグロス容積率の推計結果

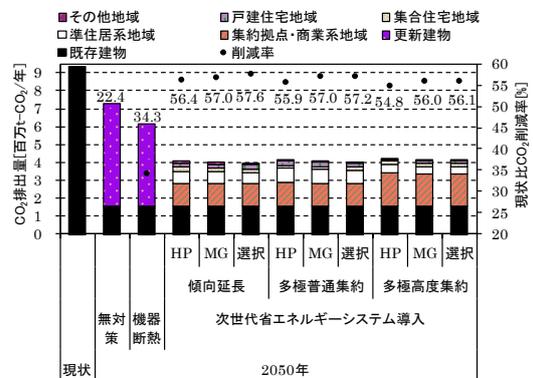


図6 2050年・大阪市における民生部門のCO₂排出量推計結果

発電パネルの普及に伴う 2040 年・全国での環境排出量推計結果を図 7 に示す。

最も高い亜鉛の水域排出量[t/年]でも 10^{-1} オーダーであり、2002 年・全製品からの亜鉛の水域排出量推計値 6,707[t/年]（中西・内藤・加茂：亜鉛 詳細リスク評価書、丸善、2008）と比較して、極めて小さい結果となった。よって、太陽光発電パネルに由来する PRTR 届出物質の環境排出の寄与は太陽光発電パネルの普及に際しトレードオフが懸念

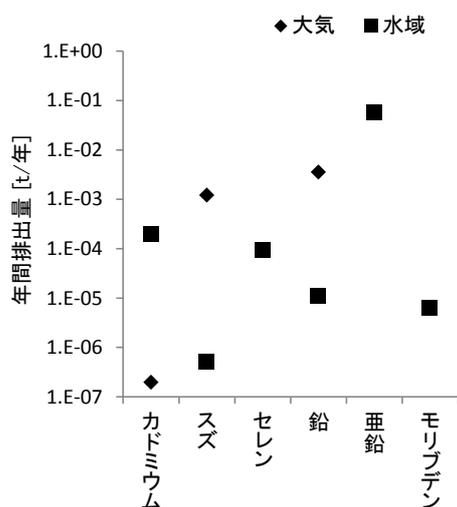


図7 2040年・全国における太陽光発電パネルに由来する環境排出量の推計結果
されることがないと判定した。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 3 件)

- ① 中久保豊彦、東海明宏、大野浩一、下水処理場とごみ焼却場の連携を軸とした静脈系社会資本更新計画の立案と評価、土木学会論文集 G(環境)、査読有、Vol. 68、No. 2、(2012)、152-171
- ② Nakakubo, T., Tokai, A., Ohno, K., Comparative assessment of technological systems for recycling sludge and food waste aimed at greenhouse gas emissions reduction and phosphorus recovery, *Journal of Cleaner Production*, peer reviewed, Vol. 32, (2012), 157-172
- ③ 前田秀人、中久保豊彦、東海明宏、低炭素都市の実現に向けた都市計画と省エネルギー計画の統合マネジメントモデルの開発、土木学会論文集 G(環境)、査読有、Vol. 68、No. 1、(2012)、21-38

[学会発表] (計 5 件)

- ① 中久保豊彦、東海明宏、大野浩一、下水

処理施設による下水汚泥・厨芥の混合消化事業のライフサイクル評価、第 23 回廃棄物資源循環学会研究発表会、2012. 10. 22-24、仙台国際センター

- ② 松田陽平、中久保豊彦、東海明宏、人口減少・省エネ改修を与件とした農村域における地域内エネルギー自給ポテンシャルの評価、環境システム研究論文発表会講演集、Vol. 40、(2012)、271-277、第 41 回環境システム研究論文発表会、2012. 10. 20-21、和歌山大学
- ③ Susanto, I., Hara, K., Uwasu, M., Nakakubo, T., Tokai, A., Application of SD Model for Energy Policy Analysis at Local Governmental Level -a Review and Case Study、環境システム研究論文発表会講演集、Vol. 40、(2012)、339-348、第 41 回環境システム研究論文発表会、2012. 10. 20-21、和歌山大学
- ④ 中久保豊彦、東海明宏、汚泥・厨芥を対象としたバイオマス利用に係るリスクトレードオフ構造の分析、第 6 回バイオマス科学会議、日本エネルギー学会、2011. 1. 12-13、大阪大学
- ⑤ 中久保豊彦、東海明宏、下水汚泥・厨芥の利用用途配分に係るリスクトレードオフ構造の分析、日本リスク研究学会年次大会講演論文集、Vol. 23、(2010)、7-12、第 23 回日本リスク研究学会年次大会、2010. 11. 27-28、明治大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

東海 明宏 (TOKAI AKIHIRO)
大阪大学・工学研究科・教授
研究者番号：90207522

(2) 研究分担者

山本 祐吾 (YAMAMOTO YUGO)
和歌山大学・システム工学部・講師
研究者番号：30379127
(平成 22 年度まで分担者として参画)