

E-0802 アジア太平洋地域を中心とする持続可能な発展のためのバイオ燃料利用戦略に関する研究

(1) オントロジーを用いた問題の構造化と政策立案支援ツールの開発

大阪大学

産業科学研究所 知識システム研究分野

溝口理一郎

<研究協力者>

大阪大学 産業科学研究所 知識システム研究分野

准教授 古崎晃司

国際連合大学サステナビリティと平和研究所

学術研究官 齊藤修

平成20～22年度累計予算額：7,443千円（うち、平成22年度予算額：2,641千円）

予算額は、間接経費を含む。

[要旨] バイオ燃料利用に関わる問題領域は、エネルギー供給、食糧生産、産業構造、など多岐に渡っており、それぞれの領域におけるステークホルダーも多数存在する。このような複数領域にまたがる多様な問題を適切に構造化することは、バイオ燃料利用戦略に関わる政策立案を行う上でも重要な課題である。そのような背景のもと、本研究はバイオ燃料に関わる本質的な概念構造を明示化する機能を持ったオントロジーを構築し、バイオ燃料利用に関する問題の構造化および政策立案支援ツールをサブテーマ（2）と連携しつつ開発することを目的とする。

平成20年度はオントロジー構築のための基礎資料の収集・解析と、オントロジーを用いた問題の構造化の実現方法を検討した。その結果、バイオ燃料オントロジーを用いた問題領域俯瞰のためのオントロジー探索ツールを試作し、いくつかの問題領域の俯瞰を試みた。平成21年度は、収集・解析した基礎資料からの問題構造を整理し、その結果を元にバイオ燃料オントロジーを拡充した。その結果、概念数が649から1892、スロット数が1075から2119に拡充された。さらに、サブテーマ（2）と連携して本ツールの評価実験を実施した。その結果、本ツールを用いて専門家にとって十分に意味があるマップやパス（概念連鎖）が生成できることが確認できた。また、それらのパスの約75%がオントロジー構築時に想定していた以外の情報を含んでおり、本ツールが思いがけない内容を提示し利用者の発想を刺激する可能性を持つことが示唆された。平成22年度は、サブテーマ（2）の協力のもと、本ツールを政策立案に必要となるステークホルダー間の合意形成支援ツールとして発展させ、被験者がステークホルダーの役割を演じて（ロールプレイ）議論を行う実験を通して、合意形成支援の可能性を示すことができた。これらの結果を通して、研究目的であるオントロジーを用いたバイオ燃料利用に関する問題の構造化と政策立案支援ツールの開発を達成できたと言える。

[キーワード] オントロジー、問題の構造化、可視化、領域俯瞰、政策立案支援

1. はじめに

国内外でバイオ燃料の生産と利用について、現在様々な研究と実践が活発に行われている。こ

れらが扱う問題領域は、食糧生産、エネルギー供給、水循環の維持等の複数の生態系サービス間の相互関連、異なる空間スケール間の相互関連等、多岐に渡っており、個別の領域で完結するものではない。すなわち、異なる領域の研究者が従来の学問体系を横断して検討を進める学際的研究の実践が必要とされる。そのような複数領域（ドメイン）にまたがる学際的研究においては、関連する各研究領域の専門家が、各領域間の知識や考え方の隔たりを乗り越えて適切に連携することが不可欠である。その実現に大きく貢献するものとして、複数領域に渡って行われている多様な取り組み内容を記述するための概念と概念間の関係性を明示し、それらを束ねる理論構造（知の構造）を体系化する共通の知識基盤としてのオントロジー構築が注目されている。

2. 研究目的

サステナビリティ学の基盤システムたる環境・社会・人間の各システムへの影響とシステム間のトレードオフ等の相互関連に着目し、バイオ燃料利用に関わる本質的な概念構造を明示化する機能を持ったオントロジーを構築する。さらに構築したオントロジーに基づき、バイオ燃料利用に関する問題を構造化すると共に、今後解決すべき課題の包括的な洗い出しや優先順位づけの検討などに役立つ政策立案支援ツールをサブテーマ（2）と連携しつつ開発することを目的とする。

3. 研究方法

（1）バイオ燃料オントロジー構築のための情報収集

オントロジー構築のための基礎資料を収集することを目的として、バイオ燃料の原料生産、収集運搬、液体燃料への加工、製品輸送までの一連のライフサイクルを通じたエネルギーとGHGの収支について、既存研究で報告されている研究成果(約30報)の文献レビューを行った。バイオ燃料に関するライフサイクルアセスメント（以下、LCA）については既に数多くの研究成果が報告されており、同じ原料からバイオ燃料を生産する場合でもその前提条件や原単位、評価範囲の設定の違いによって結果が異なる。これまで報告されているバイオ燃料のLCA研究の多くは、バイオ燃料の原料作物を農場で生産する際の資材、農業機械への燃料、農薬、化学肥料等の投入は考慮しているが、燃料作物の栽培のために森林が伐採された場合の炭素蓄積量の減少や泥炭地の破壊による大気中への炭素排出など、土地利用転換の影響までは考慮されていない。土地利用転換まで考慮した研究成果としては、2008年2月にScience誌に2つの論文が掲載され^{1),2)}、国際的に大きな反響を呼んだ。

バイオ燃料に関する研究を行っている国内外の研究者と意見交換を行い（例えば、小泉達治、林岳、川島博之、久保山裕史、泊みゆき、匂坂正幸、井上雅文、キース・ウィーブ（Keith Wiebe）、トリー・クスワルドノ（Torry Kuswardono）など）、LCAだけでなく、バイオ燃料の持続可能性に関する多様な課題、論点を把握した。さらに、2009年3月10-12日にコペンハーゲンで開催されたClimate Congress: Global Risks、 Challenges & Decisionsに参加し、バイオ燃料の持続可能性評価と知の構造化に関する研究発表を行ったほか、バイオ燃料に関するセッションに参加して、情報収集を行った。また、本研究プロジェクトのサブテーマ間でも定期的に情報交換を行い、バイオ燃料オントロジー構築のための情報収集を行った。

(2) オントロジーを用いた問題の構造化

1) オントロジーに基づく問題領域（ドメイン）俯瞰

オントロジーを用いて複数領域にまたがるバイオ燃料利用に関わる問題を構造化し、政策立案支援ツールを開発するには、「オントロジーとして体系化された一般性の高い知識」と「領域の専門家が関心のある視点から見た専門領域に特化した知識」の間の概念的な隔たりを埋め、オントロジーの内容を効果的に俯瞰

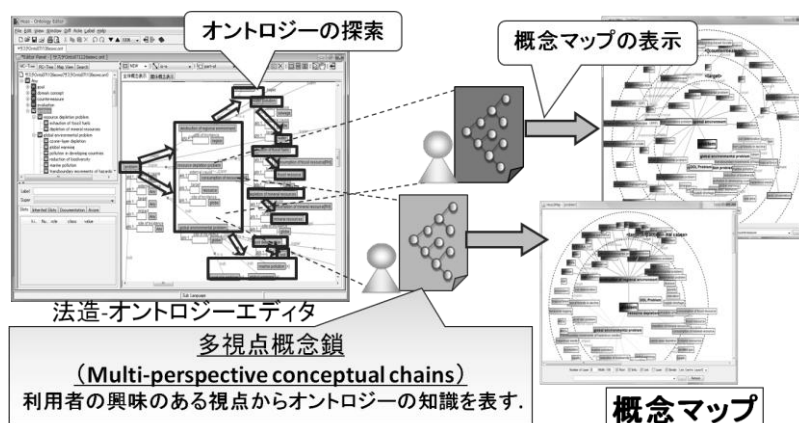


図1 オントロジー探索ツールの概要

できる仕組みが必要とされる。本研究課題では、バイオ燃料利用の持続可能性を捉える枠組みや方法論を確立するため、我々が従来研究で開発した利用者の視点に応じてオントロジーを探索・可視化する「オントロジー探索ツール」³⁾をさらに発展させ、複数分野にまたがる問題領域（ドメイン）を俯瞰し、問題の構造化を実現する手法を検討した。

図1にオントロジー探索ツールの概要を示す。本システムでは、オントロジーで定義された概念間の関係を利用者の関心がある視点に応じて探索し、その結果を利用者に理解しやすいように可視化した概念マップとして表示する。様々な視点から生成した概念マップを通して、オントロジーが対象とする問題領域を眺めることでドメインを総合的に理解することを、「オントロジーに基づくドメイン俯瞰」と呼ぶ。例えば「地球システム」の視点でバイオマス燃料の利用を見ると、化石燃料の代替燃料であるバイオマス燃料の利用によりCO₂排出量が減少し地球環境問題が改善されると考えられる。しかし「社会システム(経済学)」の視点から見ると、バイオマス燃料の利用によりバイオマス燃料の原料である食物の需要が増加し価格が高騰するため、発展途上国への食物供給量が減少し発展途上国の飢餓という別の問題が生じる可能性があることが理解できる。本研究ではこのようなオントロジーに基づくドメイン俯瞰により、バイオ燃料利用に関わる問題を構造化する。

2) オントロジー探索の視点の定義

オントロジーは概念と概念間の関係から構成される。よって本研究では、オントロジーを探索する（眺める）際の視点を

- ①何を着目する概念とするのか
(Focal pointと呼ぶ)

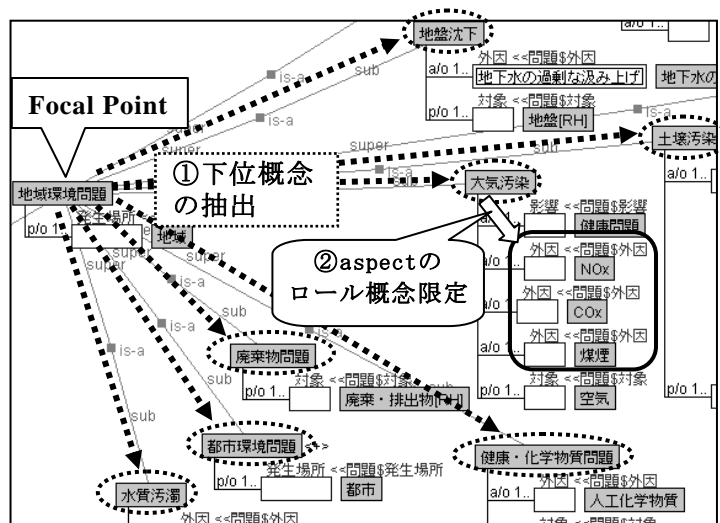


図2 オントロジーの探索例

②どの関係に注目してオントロジーを見るのか(Aspectと呼ぶ)

の組み合わせで捉えた。さらに、着目した概念 (Focal point) と注目する関係 (Aspect) にある概念を次に着目する概念としてAspectの適用を繰り返すことで、最初に着目した概念(Focal point)からどのような関係 (Aspect) を辿ってオントロジーを眺めてきたのかという経路 (パス) を形成する。それを**多視点概念鎖 (Multiple-perspective conceptual chain)** と呼ぶ。多視点概念鎖は、利用者が特定の視点に基づいてオントロジーを探索した結果を表している。そして、その多視点概念鎖を利用者に理解しやすいように可視化したものを概念マップと呼ぶ。ここで、さらに詳細な視点を扱う際には、Aspectとなる関係の種類 (ロール概念と呼ばれる) によって、注目する関係をより限定することができる。これを**“なる関係の種のロール概念限定”**と呼ぶ。これと同様に、すべてのAspectにおいて、次に取り出される概念の種類 (クラス) によって注目する関係をより限定ことができ、これを**“おいて、次にの取り出しクラス限定”**と呼ぶ。例えば、図2のオントロジーにおいて適用する視点を「Focal point＝地域環境問題, Aspect＝下位概念の抽出」とすると「大気汚染, 水質汚濁…」といった概念が (図2①)、さらに「大気汚染」に対して「Aspect＝参照先概念の抽出, ロール概念限定＝外因」を適用するとロール概念 (関係の種類) が「外因」である「煤煙, CO_x, NO_x」のみが取り出される (図2②)。このように、適用するFocal pointとAspectを複数組み合わせることで、利用者の関心に応じた様々な視点からオントロジーを探索する (眺める) ことができる。

(3) バイオ燃料オントロジーの構築

オントロジー探索ツールを用いたバイオ燃料に関わる問題の構造化を行うために、先行研究で開発したサステナビリティオントロジーを拡充し、バイオ燃料オントロジーを構築した。その構築にあたり、収集した資料からオントロジー構築の対象とする問題構造を、バイオ燃料生産・利用が様々な分野にどのような影響を与えるかの事例をまとめた44の典型シナリオとして整理した。各シナリオは、“バイオ燃料によって代替できるのは世界のエネルギー供給のわずかなシェアに過ぎず、それだけでは我々の化石燃料への依存を解消することはできない”、“燃料に小規模の労働集約型バイオエネルギー生産は、雇用創出の点では有効だが、生産効率や経済的な競争力という点では課題 (トレードオフ関係)” のような短い文章で表現し、表1に示した9つのカテゴリに分類した。

これらのシナリオの内容をもとにオントロジーを拡充する作業は、拡充したオントロジーを用いて概念マップを生成することを意識して、

- ① シナリオに現れている主要な概念をオントロジーに追加する。
- ② 各シナリオの内容に現れている概念間の関係を、シナリオの文章上は直接に

表1 バイオ燃料生産・利用が影響する問題構造のシナリオ数

問題のカテゴリ	シナリオ数
1) 貧困層へのエネルギーサービス供給	3
2) 農工業の発展と雇用創出	6
3) 健康とジェンダー	4
4) 農業の構造	4
5) 食糧安全保障	6
6) 政府予算	4
7) 貿易、外国為替均衡、エネルギー安全保障	5
8) 生物多様性、自然資源管理	8
9) 気候変動	4

現れていない行間の関係性（隠れた因果連鎖）も含めて明確化する。

- ③ 手順②で明確化した関係性をオントロジーに実装する。
- ④ という手順で進めた。例えば、“エネルギー作物生産需要が、食糧生産用の土地（農地）への圧力を高め、結果として食糧価格の高騰を招く”というシナリオの場合、手順①においてオントロジーに追加した概念は「バイオマス資源需要」、「食糧用農地」、「食糧価格の高騰」であり、手順②で明確化した関係性は、「バイオマス資源需要増加→燃料用農地の増加→面積一定問題→食糧用農地の減少→食糧供給の減少→食糧価格の高騰」であった。

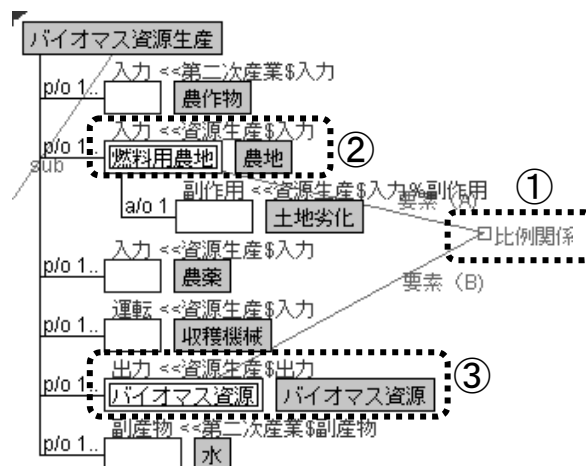


図3 スロット間の関係による表現の例

- ⑤ さらに、明確化した関係性を手順③でオントロジーに実装するにあたり、平成21年度までのバイオ燃料オントロジーにおける枠組みでは適切な表現が難しかった内容については、オントロジーへの実装方法を検討し、1)スロット間関係による表現、2)スロット（全体-部分関係/属性関係）による表現、3)全体概念化した関係による表現、といった新たな枠組みを導入することで対応した。図3に、スロット間関係による表現の例を示す。この例では、「バイオマス資源生産」の入力（②）と出力（③）の間に「比例関係」（①）すなわち“入力が増えると出力も増える（入力が減ると出力が減る）関係”があることを表している。これは、出力（バイオマス資源）の増加のためには入力（燃料用農地）の増加が必要であるという意味を含んでいる。
- ⑥ 上述のような考察を通して、表1にあげた44のシナリオのうち、関係性が複雑なものや内容が近いものなどを再整理した29のシナリオを対象にオントロジーの拡充作業を行った結果、バイオ燃料オントロジーの規模は、元としたサステナビリティオントロジーの概念数649およびスロット数1075から、概念数1892およびスロット数2119となった。このオントロジーが、元とした問題構造を正しく表すことができているかについては、マップツールで、元としたシナリオの内容を再現した概念マップが生成できるかを通して確認した。

（4）オントロジー探索ツールの機能拡張と評価

従来研究で開発したオントロジー探索ツールをドメイン俯瞰に利用するために、利用者が試行錯誤しながらオントロジー探索をするための「インタラクティブな探索」機能、詳細な探索条件を設定せずに簡単な操作で探索が行える機能、特定の概念間にどのような関係があるかを調べるための「概念間のパス探索」機能、視点（Aspectのロール概念限定・取り出しクラス限定）の変化に応じて概念マップを切り替える「Change View」機能などの機能拡張を行った。

さらに、サブテーマ（2）と連携して本ツールの評価実験を行うと共に、政策立案支援に向けた改良方針を検討した。評価実験では、専門分野が異なる4人の専門家が、マップツールを用いて

バイオ燃料オントロジーから課題設定に沿った概念マップを生成し、生成された概念マップの内容を評価した。被験者となった専門家の専門分野は、以下に示す通りである。

- ・ 専門家 1：農業経済学
- ・ 専門家 2：社会科学
(ステークホルダー分析)
- ・ 専門家 3：リスク分析
- ・ 専門家 4：都市環境計画

なお専門家3と4は、本ツールの使用経験が全くなかったため、評価実験前にツールの使用法の説明と操作練習の時間を設けると共に、実験中に操作方法が分からない時にツール操作を助ける補助者を配置した。

図4 評価入力用画面

生成されたマップの評価は、各概念マップに現れる概念連鎖（概念間の関係性を一連のつながりとして辿った経路を可視化したもの）から、明らかに不適切と思われるパスを削除した上で、各被験者が興味を持って選択したパスを対象として行った。評価方法は、被験者が図4に示す入力画面で各評価項目について記入する方法、および、各マップを前述のオントロジー拡充時の元にしたシナリオを再現したマップと比較する方法により行った。被験者が記入する評価項目は、1:総合評価、2:わかりやすさ、3:現実の再現性・妥当性・適切性、4:俯瞰性・網羅性・包括性、5:発想・発見支援（刺激）についての4段階評価と、自由記述によるコメントとした。

(5) ステークホルダー間の合意形成支援ツールの開発と評価

1) オントロジー探索ツールを用いたステークホルダー間の合意形成支援システムの開発

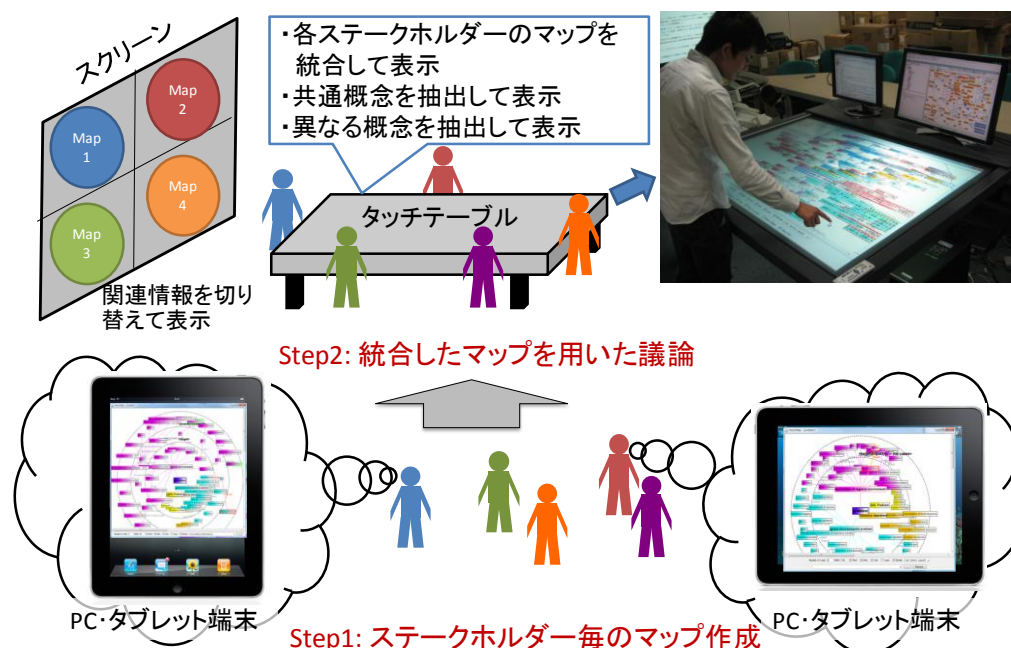


図5 ステークホルダー間の合意形成支援システムの概要

オントロジーに基づくドメイン俯瞰を発展させて政策立案支援に用いるために、サブテーマ（2）より提供された「ブラジルにおけるバイオ燃料生産・利用に関わるステークホルダー分析の結果」に基づき、平成21年度までに構築したバイオ燃料オントロジーの更なる拡充を行った。続いて、拡充したオントロジーを用いたステークホルダー間の合意形成の促進および政策立案支援を実現するためのシステムの全体設計を行った。図5にオントロジーに基づくステークホルダー間の合意形成支援システムの全体像を示す。本システムは、

Step.1 各ステークホルダーが各自の関心に応じて個別のマップを作成する。

Step.2 複数のステークホルダーが集まり、各自が作成したマップを比較しながら議論することでお互いの合意形成を計る。

の2段階で合意形成支援を行う。さらに、その結果を通して明らかになった問題への対策についても、オントロジー探索ツールを用いてマップを生成することで、政策立案を支援する。本システムを実現するにあたり、平成21年度までに開発したオントロジー探索ツールに改良を加え、合意形成支援のための機能拡張を行った。具体的には、

- ・ユーザが簡単かつ直感的な操作でマップを生成するためのタッチ操作のサポート
- ・キーワードや数種類のコマンドの選択だけでマップを生成することができる簡易操作モードの導入
- ・ステークホルダーの関心事項をマップで適切に表現するためのハイライト機能の強化
- ・各ステークホルダーが作成した複数のマップを統合し、それらの共通点／相違点を必要に応じて切り替えて表示するマップ統合/比較機能

などを実装した。特にマップ統合/比較機能は、ステークホルダー間の関心の重なりや相違を可視化することができ、合意形成の促進が期待される。また、Step.2における議論をより活発するために、統合したマップを表示・操作するインターフェースとして、テーブル型のタッチディスプレイを採用した。ユーザはテーブル上に表示されるマップを囲んで議論しながら、必要に応じてタッチ操作でマップを切り替えることができる。

2) ステークホルダー間の合意形成支援の評価実験

本システムの有効性を確かめるために、被験者が各ステークホルダーの役割を演じて（ロールプレイをして）議論することを通して、合意形成支援の可能性について検討する評価実験を実施した。本評価実験はバイオ燃料生産や政策に関わるステークホルダー間の利害関係などの問題を対象とし、サブテーマ（2）から提供されたステークホルダー分析の結果に基づいてバイオ燃料オントロジーを拡充したオントロジーを用いた。被験者は、環境工学分野の学部3回生2名と大学院生2名からなる学生4名（グループA）、およびサステナビリティ学分野の専門家4名（グループB）の2グループ計8名、各被験者がロールプレイをするステークホルダーとしては、

- a. 関連産業[雇用者]（農家、プラント業、投資家など）
- b. 関連産業の労働者（労働組合など）
- c. 政府関係（大統領府、関連省庁など）
- d. 環境保護団体[一般市民]（環境NGOなど）

を各グループ1名ずつ割り当てた。

そして、学生からなるグループAは、オントロジー探索ツールを使わない議論（実験1）とツールを用いて作成したマップを用いた議論（実験2）、専門家からなるグループBは比較実験として

マップを用いない2回の議論を行った。なお、グループAによるツールを用いたグループ議論では、ステークホルダー毎に生成したマップを統合/比較機能を用いて統合し、各被験者が作成したマップを必要に応じて切り替えて表示させながら議論を行った。その際、タッチテーブルに統合したマップを表示し、各被験者に自分が作成したマップと他の被験者マップを比較しながら、各ステークホルダーの立場で意見を述べさせた。その後、これらの議論の違いを通してツールの有用性や合意形成支援の可能性について意見交換を行った。

4. 結果・考察

(1) オントロジーを用いた問題の構造化

本研究で収集した国内外のバイオ燃料の生産と利用に関する情報をもとに、バイオ燃料オントロジーを試作し、オントロジー探索ツールを利用した問題領域の俯瞰を試みた。図6、7にその結果として生成された概念マップの例を示す。

図6は、農業とE10やE3といったバイオ燃料との関係性を捉えたマップである。このマップからは、農業が資源生産という観点からバイオマス利用と関係し、そのアウトプットとなるバイオ燃料（バイオエタノール）としてE10やE3が関係していることが見て取れる。一方、同じオントロジーをバイオ燃料生産を中心（Focal Point）とした視点で見たマップを図7に示す。このマップは、バイオ燃料生産に関係して発生しうる基本的な問題を「概念間のパス探索」機能を用いて探索した結果を示したもので、関連するすべての問題がハイライト（太い点線で囲まれたノードで表される）されると

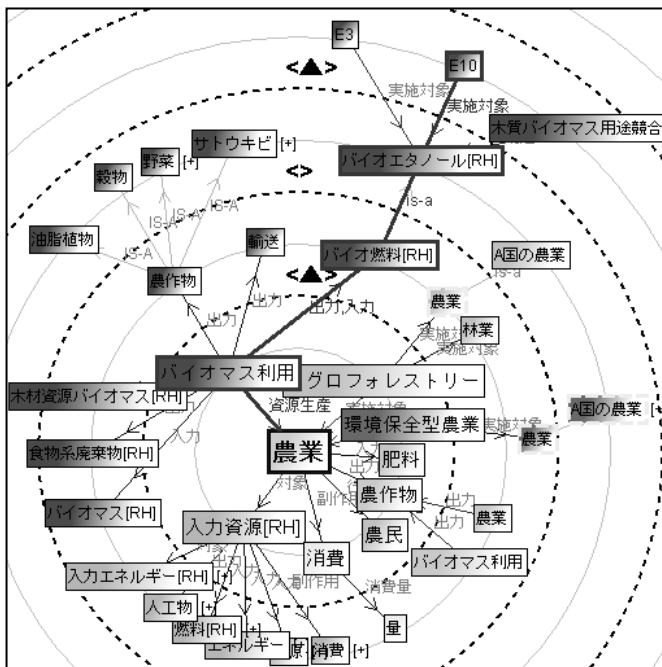


図6 農業とバイオ燃料の関係性を示した概念マップ

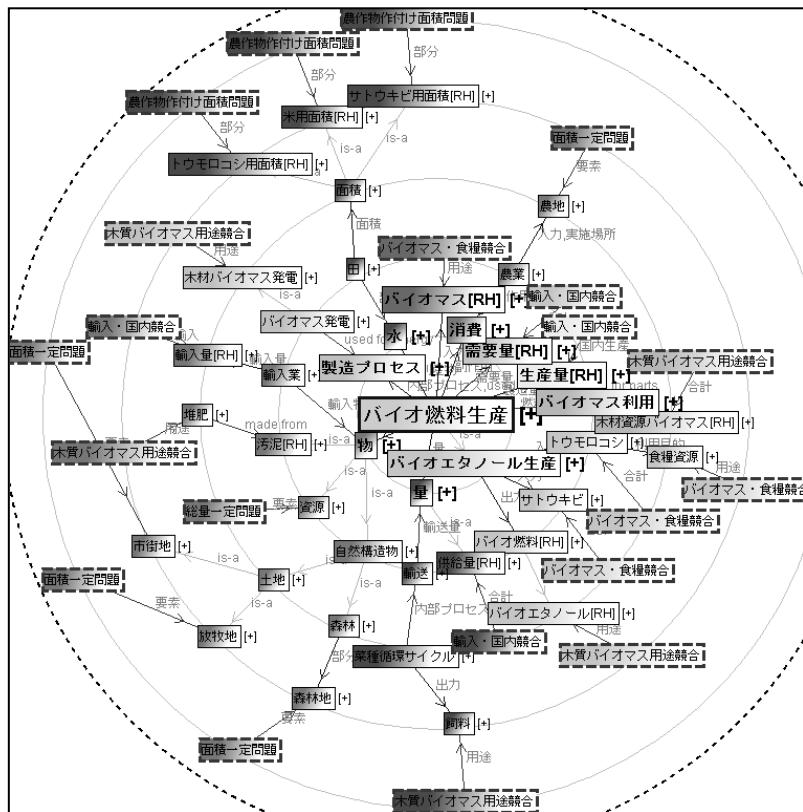


図7 バイオ燃料生産を中心として問題を俯瞰した概念マップ

共に、それぞれの問題に至るパスが明示されている。同様の探索は、対象とする問題の種類を限定して行うことも可能で、バイオ燃料に関わる問題領域がオントロジーを用いて俯瞰できることが確認できた。

これらの結果より、政策立案支援ツールの開発の基盤となる知識の構造化が実現できたと考えられる。政策立案者は、本オントロジーとツールで表示されるバイオ燃料の問題体系や政策（対策）体系の図と現行の政策体系を比較することで、どこに政策ギャップがあるかを検討することができる。また、バイオ燃料政策は、地球規模の気候変動政策だけで

なく、地域の循環型社会促進政策、生物多様性保全政策との関係で位置づけるべきであるが、現状のバイオ燃料政策では気候変動政策としての面が強調されすぎるなど、バランスのとれた政策が実現しているとは必ずしも言えない。本ツールは、このような複数の政策領域間の関係性を具体的かつ俯瞰的に表示することができることから、政策統合（融合）の支援にも役立つと考えられる。

なお従来研究で開発したシステムは、我々がサステナビリティ学の知識の構造化のための参照モデルとして提案した5階層モデルにおいて、第2層の発散的探索（Divergent Exploration）に相当する（図8）。この発散的探索の結果として収集される構造化された知識（概念マップ）をコンテキストに応じて収束させることで、政策立案支援に必要な知識を利用者が発見することに貢献すると考えられる。本研究課題で考察した俯瞰や視点に関する議論は、この収束的思考を助ける基本ツールの1つと位置づけることができる。

（2）バイオ燃料オントロジーの構築

マップツールを用いて、拡充したバイオ燃料オントロジーから、元としたシナリオで表された問題構造に即した概念マップが生成（再現）できるかを確認した結果は、以下の通りであった。

- ・サーチパス機能による探索（全ての概念間の関係の組み合わせを機械的に探索する）で再現されたシナリオ：21（72%）
- ・ツール利用の初心者向けの簡易探索（簡易版の探索条件のみを用いて探索した後、指定した概念を含むパスのみを残すChange View機能を利用する）で再現されたシナリオ：24（82%）
- ・簡易検索か詳細探索（探索条件を詳細に選択して行う探索）で再現されたシナリオ：27（93%）

なお、再現できなかった2シナリオについて検討したところ、オントロジーの定義が不十分であったことがシナリオに即した概念マップが再現できなかった理由であることが分かった。これらの結果から、問題構造のシナリオに基づいてバイオ燃料オントロジーを適切に拡充し、マップツ

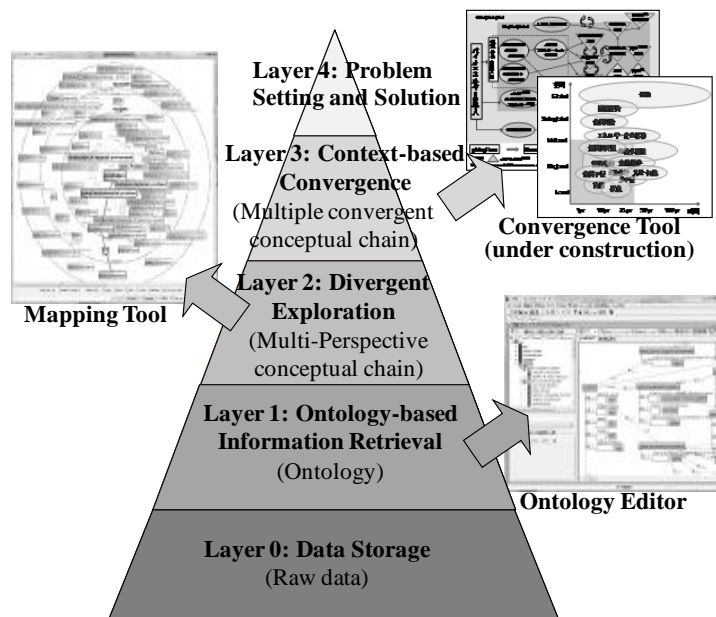


図8 サステナビリティ学知識の構造化のための参照モデル

ルを用いて再現可能な概念マップとして、バイオ燃料の問題を構造化できたと言える。

(3) オントロロジー探索ツールの評価

評価実験の結果、4人の専門家が合計13のマップを生成し、そこから61個の興味を持ったパスを選択した。被験者による主観評価における各パスの総合評価(4段階)の結果は、◎(興味深い):30、○(一般的だが重要):22、△(どちらとも言えない):8、×(明らかにおかしい):1となった。このうち上位2段階(◎と○)を足すと52で評価したパス全体の85%である、本ツールを用いることで、専門家にとって十分に意味があるマップやパスが生成できることが確認できたと言える。なお×が極端に少ないのは、不要なパスは評価前に削除しているからであるが、その割合はマップ生成直後にあるパスの70~80%程度であり、これらは簡単な操作で削除できることからさほど問題ではないと思われる。

次に、オントロロジー拡充時に基にしたシナリオを再現したマップを予め「想定していたマップ」として、実験で被験者が生成したマップと比較した結果を述べる。まず、想定していたマップに含まれるパスのうち、専門家が生成したマップ(不要なパスの削除後)に含まれていたパスは、約50%であった。これは、典型シナリオとして予め想定していた問題構造のうち、異なる分野の専門家が興味を持ったパスと一致した割合を示している。今回の実験では、想定していたマップの再現を目的とするような課題設定はしていなかったが、バイオ燃料という広い領域での興味の重なりが、異なる専門家間での興味の重なりとして現れたものと思われる。一方、専門家が生成・選択したパスに対して、想定していたマップには含まれなかったパスの割合、すなわち、典型シナリオの範囲からは想定外であったパスの割合は約75%であった。このことは、本ツールが思いがけない内容を提示し、利用者の発想を刺激する可能性を十分に持つことを示唆している。これは、シナリオの内容をそのまま計算機に格納するのではなく、オントロロジーにおける一般化した概念として体系化することによって、意識的に計算機に格納した以上の意味がある概念マップが生成できたことを示唆するものであるとも言える。

また、被験者となった専門家の生成したマップに対するコメントからは、「バイオマス資源生産は、当然、人間の労働を伴うものである。しかし、どうしても物質フローと環境負荷制御(GHG排出抑制、水質汚濁防止、土壌劣化抑止)に目が行きがちで、担い手である人間の存在を忘れる」や「海洋汚染へのパスなどは普通であれば気がつかなかった」のように、本ツールが問題の俯瞰や発想支援の刺激に貢献しうることを示す評価が得られた。

実験後に行った意見交換においても、「1つのオントロロジーから様々な領域の関係性がマップで表されていることがよい」という意見が得られ、オントロロジー探索により断片的になりがちな知識間の関係が明示され、複数の領域を横断した分野全体の統合的理解の支援に貢献しうる事が確認できた。

(4) ステークホルダー間の合意形成支援ツールの開発と評価

サブテーマ(2)より提供された「ブラジルにおけるバイオ燃料生産・利用に関わるステークホルダー分析の結果」として各ステークホルダーの関心事項を短い文章としてまとめた14のステートメントに基づき、バイオ燃料オントロロジーの更なる拡充を行った。その結果、各ステークホルダーの関心事項を短い文章としてまとめた14のステートメントのうち、バイオ燃料オントロジ

表2 各ステークホルダー（被験者）が生成した概念マップの重なり

	マップ中の ノード数	複数マップ間で重なったノード数			
		a: 関連産業 [雇用者]	b: 政府	c: 労働者	d: 環境保護団体 [一般市民]
a: 関連産業[雇用者]	110		16	21	10
b: 政府	88	16		12	5
c: 労働者	187	21	12		49
d: 環境保護団体 [一般市民]	115	10	5	49	

ーからオントロジー探索ツールを用いてマップを生成できるステートメントの数が7から13と倍増した。これにより、ステークホルダー分析の結果を、本サブテーマで開発したオントロジーとツールを用いて政策立案支援に活用するための、問題の構造化の基盤知識が整備できたと言える。

続いて、ステークホルダーの関心事項について拡充したバイオ燃料オントロジーと、オントロジー探索ツールの機能拡張をして開発した合意形成支援ツールを用いた、システムの評価実験の結果について述べる。

表2に、本実験でグループAの各被験

者が作成した概念マップに含まれるノード（概念）の数と、他のステークホルダーのマップとの重なっている概念の数を示す。それぞれのマップは、各ステークホルダーが関心を持った内容を表しているので、他のマップの概念との重なり数は、ステークホルダー間の関心の重なりを表すと考えられる。これらの重なり数を比較すると労働者と環境保護団体のマップの重なりが顕著に多いことが読み取れる（図9）。このことは、ステークホルダー分析の結果において、労働者と環境保護団体が同じ「市民」というカテゴリーとなっていることと一致している。このように、ステークホルダー間の関係性を定量的に議論できる点は、本ツールの有用な点であると言える。また作成したマップからは、1回目の議論では想定していなかったステークホルダー間の関係性を読み取ることができた例も、数例見られた。

実験に参加した被験者からも、

- ・自分の興味があるポイントと他者のポイントが視覚的になり、重なっている部分と孤立している部分から意見の協調・競合関係がわかりやすくなった
- ・問題に対する理解を深める際にはなかなか気づかない点を見ることもできるので良い
- ・対話において自分の意見を正しく整理させ、相手に押し付けることなく対話ができる
- ・このツールは客観的に「重なり」「離れ」を把握するのに使える。

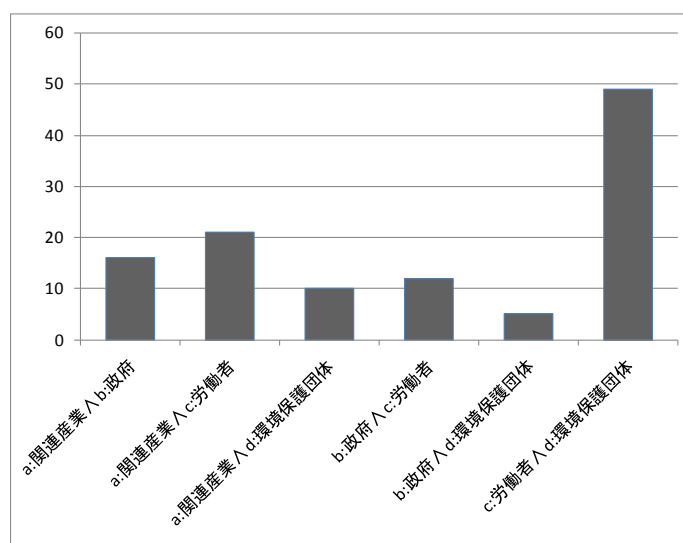


図9 各ステークホルダー（被験者）が生成した概念マップの重なった概念数の比較

という評価が得られ、本ツールを用いた合意形成支援の可能性が示せたといえる。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

本研究では、オントロジー工学技術をバイオ燃料問題に適用した世界初の試みである。他のサブテーマから提供された内容を含めて収集した情報を元に、従来研究で開発したサステナビリティ学オントロジーを拡張する方法でバイオ燃料オントロジーを構築した。さらに、オントロジーを様々な視点からみることによりドメイン（問題領域）を理解する「オントロジー探索ツール」を開発した。その際に、バイオ燃料に関わる問題構造をそのままの形ではなく、それぞれの概念や関係性を一般化したオントロジーとして計算機に格納することによって、既知の問題構造のみならず、計算機に格納する際に想定していなかった問題構造を提示することができる可能性を、専門家の協力を得て行った評価実験で示すことができた。これは、発想支援に関する研究において、新たなツールの有用性をある程度の客観性を持って示すことができたという点で、大きな意義を持つ。また、バイオ燃料のような複数領域の専門家や、様々なステークホルダーが関係する問題領域において、問題を多様な視点から構造化できる本ツールの有効性を、その当事者となる専門家が実際にツールを使用することを通して確認することができた意義は、単なる机上ではなく実用上の有用性を示すことができたという点で意義深い。更にサブテーマ（2）のステークホルダー分析との連携により、本ツールが、それぞれのステークホルダーの立場から見た問題の構造化の違いを浮き立たせ、それを客観化することを通じて、ステークホルダー間の合意形成支援に貢献できることが示唆された。世界的にみても類似ツールはなく、複数の領域にまたがる学際的な問題の解決や政策統合が必要な場面では特に有用と思われる。

(2) 地球環境政策への貢献

本研究課題で開発したツールを用いることで、バイオ燃料に関係する諸問題（課題）（図4、図5）の関係性を俯瞰的に理解することが可能である。政策立案者は、本ツールで表示されるバイオ燃料の問題体系や政策（対策）体系の図と現行の政策体系を比較することで、どこに政策ギャップがあるかを検討することができる。また、現状のバイオ燃料政策では気候変動政策としての面が強調されすぎるなど、バランスのとれた政策が実現しているとは必ずしも言えない。本ツールは、このような複数の政策領域間の関係性を具体的かつ俯瞰的に表示することができることから、政策統合（融合）の支援にも役立つと考えられる。更に、バイオ燃料政策に関わるステークホルダーが本ツールを用いて各自の立場に沿った概念マップを生成し、それらのマップ統合/比較することによって、ステークホルダー間の関係性を定量的に議論できるようになり、合意形成支援やその合意事項に応じた政策立案の支援に貢献することが期待される。

これらの地球環境政策への貢献の可能性は平成21年度および22年度に実施した本ツールの評価実験の結果からも示すことができた。それらの評価実験は、本プロジェクトの参加者や関連する研究者・学生による限定した範囲のものであり、一般の地球環境政策の当事者を対象としたものではない。しかし、それらの実験と同様の方法で、問題の当事者が本ツールを利用するワークショップ等を行うことが可能であることは、実験の結果を通して十分に示すことができたと思われる。今後、そのようなワークショップの開催、本研究で開発したバイオ燃料オントロジーやそれ

を用いて生成した概念マップの公開を通じ、研究成果の広報・普及に努める。

なお、本研究で開発したオントロジー探索ツールは、Webサイト上で公開している。また、本研究課題で構築したバイオ燃料オントロジーや、本ツールを用いて生成した概念マップをWeb上で公開し、Webブラウザで閲覧できる仕組みは既に整備している。今後、本研究で開発したバイオ燃料オントロジーやそれを用いて生成した概念マップの公開を通じ、研究成果の広報・普及に努める。

6. 引用文献

- 1) Fargione, J., Hill, J., Tilman, D. Polasky, S., Hawthorne, P. (2008), "Land Clearing and the Biofuel Carbon Debt, " *SCIENCE*, 319: 1235-1238.
- 2) Searchinger, T., Heimlich, R., Houghton, R.A., Dong, F., Elobeid, A., Fabiosa, J., Tokgoz, S., Hayes, D., Yu, Tun-Hsiang (2008), "Use of U.S. Croplands for Biofuels Increases Greenhouse Gases Through Emissions from Land-Use Change, " *SCIENCE*, 319: 1238-1240.
- 3) 廣田健, 古崎晃司, 溝口理一郎 (2008) 「オントロジー俯瞰のための概念マップ生成ツールの開発」人工知能学会第22回全国大会(JSAI2008), 2E3-2

7. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

8. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

- 1) T. Kumazawa, O. Saito, K. Kozaki, T. Matsui and R. Mizoguchi: *Sustainability Science*, Vol.4, No.1, 2009, DOI:10.1007/s11625-008-0063-z, "Toward Knowledge Structuring of Sustainability Science Based on Ontology Engineering"
- 2) 齊藤修: 日本リスク研究学会誌, 20(2), 97-106, 2010, リスクトレードオフ分析の概念枠組みと分析方法 1: リスクトレードオフ分析の概念枠組み
- 3) 齊藤修: 日本リスク研究学会誌, 20(2), 107-114, 2010, リスクトレードオフ分析の概念枠組みと分析方法 2: リスクトレードオフ分析の方法論
- 4) T. T. Dang, O. Saito, Y. Yamamoto and A. Tokai: *Journal of Sustainable Energy and Environment*, 1, 137-148, 2010, "Scenarios For Sustainable Biomass Use in The Mekong Delta, Vietnam"
- 5) K. Kozaki, T. Hirota and R. Mizoguchi: *ESWC 2011, Part I, LNCS 6643*, 305-320, 2011(in Press), "Understanding an Ontology through Divergent Exploration"

<査読付論文に準ずる成果発表: 著書(査読付)> (社会科学系の課題のみ記載可)

- 1) R. Mizoguchi, K. Kozaki, O. Saito, T. Kumazawa and T. Matsui: *IR3S Series Vol.1, Sustainability Science I*, United Nations University Press, 2010, Section 2-3: "Structuring of knowledge based on ontology engineering"
- 2) O. Saito, K. Kozaki, T. Hirota, R. Mizoguchi: *IR3S Series Vol.1, Sustainability Science I*,

United Nations University Press, 2010, Section 2-4: “Application of ontology engineering to biofuel problems”,

<その他誌上発表（査読なし）>

特に記載すべき事項はない。

（２）口頭発表（学会）

- 1) 廣田健・古崎晃司・溝口理一郎：人工知能学会第22回全国大会(JSAI2008), 北海道, 2008, オントロジー俯瞰のための概念マップ生成ツールの開発
- 2) T. Kumazawa, T. Matsui, K. Hara, M. Uwasu, Y. Yamaguchi, Y. Yamamoto, K. Kozaki, O. Saito and R. Mizoguchi: Proc. of the 8th International Conference on Eco Balance, Tokyo, Japan, 2008, Knowledge Structuring Process of Sustainability Science based on Ontology Engineering
- 3) O. Saito, K. Kozaki, T. Hirota and R. Mizoguchi. et.al.: Proc. of Climate Change: Global Risks, Challenges and Decisions, Copenhagen, Denmark, 2009, Knowledge Structuring and an Exploration System for Global Sustainability and its Application to the Biofuel Issue
- 4) T. Kumazawa, O. Saito, K. Kozaki, T. Matsui and R. Mizoguchi: Proc. of the 1st Intl Workshop on Intelligent Systems for Environmental (Knowledge) Engineering and EcoInformatics (i-SEEK09), Fukuoka, Japan, 2009, Knowledge Structuring Tool for Sustainability Science Based on Ontology Engineering
- 5) 若津宇宙・齊藤修・山本祐吾・盛岡通：環境科学会2008年会(2009.9), 京都, 2008, 燃料用バイオエタノールの導入による影響の相互関連評価とエコロジカル・フットプリント指標の適用
- 6) K. Kozaki, T. Hirota, H. Kou, M. Ohta and R. Mizoguchi: Poster & Demo Notes of the 8th International Semantic Web Conference (ISWC 2009), Washington DC, USA, 2009, 2Viewpoint Management for Multi-Perspective issues of Ontologies
- 7) 廣田健・古崎晃司・齊藤修・溝口理一郎：人工知能学会第23回全国大会(JSAI 2009), 香川, 2009, ドメイン知識俯瞰のためのオントロジー探索ツールの開発
- 8) M. Ohtai, K. Kozaki and R. Mizoguchi: Proc. of 7th Atlantic Web Intelligence Conference (AWIC2011), Switzerland, 2011, A Quality Assurance Framework for Ontology Construction and Refinement

（３）出願特許

特に記載すべき事項はない。

（４）シンポジウム，セミナーの開催（主催のもの）

特に記載すべき事項はない。

（５）マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

（６）その他

本研究で開発した「オントロジー探索ツール」は、下記のWebサイトにおいて公開しているフリーソフトウェア「オントロジー構築利用環境『法造』」の拡張機能として公開している。

<http://www.hozo.jp> 「法造」によるオントロジー研究サイト