

称号及び氏名 博士（工学） 黒田 桂菜

学位授与の日付 平成 25 年 3 月 31 日

論文名 「エクセルギーを用いた物質循環システムの評価法に関する研究」

論文審査委員 主査 大塚 耕司

副査 山崎 哲生

副査 馬場 信弘

副査 矢持 進

副査 中谷 直樹

論文要旨

地球システムの構成要素の一つである、生物圏には様々な生物が住んでおり、私たち人間もその一つである。各種生物は、生態系を構成し、生物と環境が相互に作用することで、炭素や窒素などの元素を移動させる循環系、すなわち物質循環において生命維持活動を行っている。このように人間は物質循環の中でしか活動することができない。人間は、物質循環を通して、地球システムから様々な物質やエネルギーを取り入れ、それを利用した後、再び地球システムに物質や熱を排出している。本来、人間活動は、地球システムの循環系に組みこまれるものであるが、産業革命以降、物質やエネルギーを大量に人間社会に流入させた結果、生物圏の調和が大きく乱され、地球システムの物質循環が滞り、昨今の地球環境問題が引き起こされている。

1970年代の大量生産・大量消費・大量廃棄に起因する環境問題を受け、人間活動、とりわけ経済活動と環境負荷の関係を定量的に評価する試みが行われるようになった。1990年代には、温室効果ガスに関する問題が大きく注目されるようになったのを受け、持続可能性を評価する指標の開発が行われてきた。こうした取組みは、物質循環システムの一部を評価の対象として、いかに環境負荷を減らすかという視点に立っているものが多い。例えば、二酸化炭素排出量は、人間活動の地球システムへの影響を知る指標として、評価指標の開発や、削減の方法について議論されてきた。しかしながら、二酸化炭素排出量の削減に特化し過ぎた取組みは、新たな環境問題を引き起こす可能性や他の重要な環境負荷物質を見過ごす要因となる可能性があり、物質循環システム全体に与える影響も考慮に入れて評価することも必要である。

さて、江戸時代のような自然と人間が調和した循環システムが、かつて存在したと言われ

ている一方で、はるか古代の四大文明においては自然の循環を破壊し文明を発達させていた。このような歴史を踏まえ、今日我々が直面している地球環境問題の本質が、化石燃料の利用の是非を問うことにあるのではなく、またその利用の方法にあるわけでもなく、物質循環の観点から、我々と将来世代のあり方を問わなければならないのである。したがって、本研究は、人間圏を中心とした物質循環システムを対象に、地球システムと調和し、持続可能といえる、物質循環システムの健全性について議論するための評価方法を示し、新たな物質循環システムの構築に向けた、ひとつの見方を提案する目的で行われたものである。

本論文は、以下の**6**つの章から構成される。

第**1**章では、物質循環システムと人間活動の関係を概説し、人間は、物質循環過程から活動源を取り出していることを述べ、その過程とは、物質やエネルギーの凝縮と拡散であることを指摘する。また、従来の人間活動を対象とした評価方法について整理し、その目的や特徴を示すとともに、問題点を指摘し、物質循環を考慮に入れた評価の重要性を示す。次に、熱力学の分野において、拡散能力を表す指標であるエクセルギーを物質循環システムの評価指標に用いることを提案し、本研究の背景、研究の動機、目的について述べる。

第**2**章では、まず、エクセルギー概念について概説し、物質循環システムの評価に必要な表現方法を整理する。また、これまでのエクセルギーを用いた評価方法が、様々な分野で活用されてきたことを述べ、それぞれの評価の目的や用途について整理し、従来の方法が扱ってきた対象と、本研究の対象との違いを明確にする。さらに、本研究と同じ人間圏を対象とした評価方法に関しても、本研究の目的との相違点や、問題点を指摘する。

第**3**章では、大阪湾奥部にある堺浜を対象とした、海陸一体型物質循環システムを対象に、エクセルギー概念を用いた評価を試みた結果について述べ、エクセルギーの視点を通して、物質循環システムの状態について定量的な議論ができることを明らかにする。また、新たに物質循環システムを構築するためには、物質循環における凝縮と拡散の過程を詳しく調べる必要があることを指摘し、従来の有機物を中心に扱うエクセルギーの評価方法では考慮に入れていなかった、無機物の機能や、有機物の生成・分解、さらに物質循環システムの健全性を考える上で重要な時間の概念など、物質循環システムの評価を行う上で、重要な課題を明らかにする。

第**4**章では、前章で整理した課題に対する解決策を示す。物質循環において重要な役割をもつ無機物が有するポテンシャルについて、エクセルギーを用いて表現することを試みる。特に、これまでほとんど議論されていなかった、溶存態無機物のエクセルギーを算出する方法について検討する。次に、物質循環過程にエクセルギー概念を活用する試みとして、光合成による有機物の生成と、その分解の過程をエクセルギーで表し、エクセルギーレベルの高低差によって、物質やエネルギーの凝縮や拡散、さらには物質循環を生み出す駆動力や取り出せる仕事を表現できることを示す。さらに、時間の概念を取り入れ、より詳細に物質循環過程を把握する方法を提案する。

第**5**章では、有機物の分解方法である燃焼・堆肥化・メタン発酵を例に、各分解方法における物質循環の過程を、第**4**章で提案した算出方法を用いてエクセルギーで表現し、分解の特徴を詳しく考察する上で、エクセルギーが有効であることを示す。また、海藻のアオノリを有効利用する方法として、これらの分解方法を取り入れた、単純化した海陸一体型物質循環システムを想定し、窒素の物質循環モデルによる窒素循環の時間変化を基にして、時間の概念を考慮したエクセルギー評価を行う。これらの結果より、物質循環を促す無機物のポテンシャルの時間変化や、システムから取り出せる仕事の時間効率などを示し、物質循環システムの構築やその評価の際に、エクセルギーによる評価が有用であることを示す。

第**6**章では、本論文の全体的な総括を行い、得られた結論を要約する。

審査結果の要旨

本論文は、人間が地球システムにおける物質循環の中で活動源を得ており、自然と人間が調和した物質循環システムを構築するためには、物質やエネルギーのみならず、物質循環の観点から人間活動を評価する必要があることを述べ、物質循環システムの健全性について議論するために必要な評価方法に関して、エクセルギー概念を用いた新しい評価の方法を示したものであり、以下の成果が得られている。

(1) 人間活動が、水や有機物などの物質循環過程の上に成り立っていることを述べ、その過程の本質が物質やエネルギーの凝縮と拡散にあることを指摘するとともに、従来の人間活動を対象とした評価方法の目的や特徴の分析結果から、物質循環を考慮に入れた評価が非常に重要であり、その能力を評価する指標として、エネルギーのうち有効な仕事として取り出すことのできる量として定義されるエクセルギーが最も適していることを示した。

(2) 様々な分野で行われてきたエクセルギーによる評価の目的や用途について整理し、従来の方法が扱ってきた対象と本研究の対象との違いを論じるとともに、大阪湾奥部にある堺浜を対象とした、海陸一体型物質循環システムをモデルに、エクセルギーを用いた評価を試みた結果から、従来のエクセルギー概念による評価の限界と問題点を明らかにし、無機物の機能や有機物の生成・分解過程、さらに物質循環システムの健全性を考える上で重要な時間の概念が、物質循環システムの評価を行う上で必要であることを示した。

(3) 物質循環において重要な役割をもつ溶存態無機物が有するポテンシャルについて、エクセルギーを用いて表現し、光合成による有機物の生成と、その分解過程をエクセルギーレベルの高低差によって表す方法を提案するとともに、その方法により、物質やエネルギーの凝縮や拡散、さらには物質循環を生み出す駆動力や取り出せる仕事を表現できることを示した。また有機物の生成と分解が繰り返されるサイクルに着目し、このサイクルの速さを考慮した物質循環効率の計算方法を示した。

(4) 単純化した海陸一体型物質循環システムとして、海藻のアオノリを、燃焼、堆肥化、メタン発酵という3つの方法で有効利用するモデルを想定し、上述の有機物生成・分解過程と時間の概念を考慮した新しいエクセルギー概念を用いた計算を行った結果から、物質循環を促す無機物のポテンシャルの時間変化や、システムから取り出せる仕事の時間効率などが、エクセルギー概念によって評価できることを示した。

以上の研究成果は、持続可能社会を実現するために不可欠であり、今後多くの都市部で検討されるであろうバイオマス利用システムの計画・設計に際し、非常に有用なツールとなることを示したものである。また、申請者が自立して研究活動を行うに必要な能力と学識を有することを証したものである。学位論文審査委員会は、本論文の審査ならびに最終試験の結果から、博士（工学）の学位を授与することを適当と認める。

以上