原著論文

制御理論を応用した持続可能な開発のための 教育の方法論とその有効性の確認

藤平 和俊*・大須賀 公一**・吉岡 崇仁*** ****・林 直樹***

環境学研究所* 神戸大学** 総合地球環境学研究所*** 京都大学(現在)****

An Educational Methodology for Sustainable Development Applying Control Theory and Confirming its Validity

Kazutoshi FUJIHIRA *, Koichi OSUKA **

Takahito YOSHIOKA *** ****, Naoki HAYASHI ***

Institute of Environmentology *, Kobe University **

Research Institute for Humanity and Nature *** , Kyoto University (present) ****

(受理日2008年6月12日)

Education is critical for promoting sustainable development; however, a reliable methodology for such education has not yet been established. Here we provide one by applying control theory because we consider that human beings have to control their activities in order to deal suitably with environmental and social problems and accomplish sustainable development. First, we identify the elements that are required for applying control theory to this purpose, and show the control system in which these elements are combined with a controller, or a measure for control. Next, based on the recognition that education for sustainable development corresponds to increasing human beings' skills and their motivation to synthesize this control system, we show the method for setting an educational objective and the four fundamental elements required in education. Moreover, we present a case study, which shows how to deal with global warming and the depletion of fossil fuels, in practice. The results of this case study show that practical education has increased learners' skills and their motivation to improve their energy use, which confirms, the validity of this methodology.

Key words: control, education, global warming, human activities, sustainable development

1 はじめに

今日、人類は有限の地球上でさまざまな環境・社会問題¹⁾に直面している。地球温暖化、生態系破壊、水不足地域の増加、石油や金属の需給逼迫、南北の経済格差、紛争はその代表例である。21世紀の課題は、これらの問題を解決あるいは未然に防止して「持続可能な開発(sustainable development; SD)」を実現することである。1992

年の地球サミットは、「SDを推進するために教育が極めて重要である」(United Nations 1992)ことを明示した。2002年のヨハネスブルクサミットは、「SDを推進するために教育の活用を支援する」(United Nations 2002)ことを目的に、2005年からの「持続可能な開発のための教育の10年(DESDE)」を提案した。同サミット後の第57回国連総会は、DESDEを正式に採択するとともに、その主導機関としてUNESCOを選定した

問い合わせ先 〒206-0025 東京都多摩市永山2-3-1-306 藤平和俊
E-mail: kkg@mve.biglobe.ne.jp

(United Nations 2003)。その後、UNESCOは、DESD国際実施計画を策定して取組みを推進している。しかし、「DESDは遠大で複雑な企てであり」(UNESCO 2005a)、今のところ「持続可能な開発のための教育の普遍的なモデルはない」(UNESCO 2005b, NPO法人 持続可能な開発のための教育の10年推進会議 2006)。

このような現状を前にして、本稿は、制御理論を応用して、「持続可能な開発のための教育(ESD)」を進めるための方法論を示すとともに、この方法論に基づいたエネルギー教育の実践例について報告する。実践結果は顕著な教育効果を示しており、提示した方法論の有効性を裏付けた。

2 持続可能な開発と制御理論

(1) 制御理論を応用する理由

環境・社会問題は、人間による活動(activities)すなわち「人間が行うことあるいは行ったこと²⁾」によって引き起こされるとみなせる。冒頭で例示した問題群であれば、次のように理解できる。人間による土地開発・生産・輸送・消費・廃棄活動が、地球温暖化、生態系破壊、天然資源の需給逼迫を引き起こす。発展途上国の労働力を低賃金で利用する先進国企業の生産活動が、南北の経済格差を拡大させる。紛争の実体は、複数の人間集団による武力行使という活動である。

環境・社会問題が人間活動に起因するということは、問題に適切に対処してSDを実現するためには、人間活動をそれを可能にするような状態へと変えていかなければならない。ここで人間活動に注目すると、「注目する対象を目標とする状態

にする」という構図が見える。これが“制御”の本質であり、この構図のある課題であれば制御理論を適用できる。また、制御理論は十分に確立された理論体系をもち、工学をはじめ経済学・農学・医学など幅広い分野に应用されている。したがって、SDの実現という課題に制御理論を応用することは、理にかなった信頼性の高いアプローチであると言える。

(2) SDのための制御系

制御理論を応用して課題に取り組むには、制御する対象である「制御対象」、制御したい変数である「制御量」、および制御を行う目標である「制御目標」を特定しなければならない。課題がSDの実現の場合、制御対象、制御量、制御目標、および制御目標を導く上で必要となる「制御目的」は次のように特定できる。図1は、これらの要素を取り入れて描いた制御系の簡略図である。なお、図1中の「外乱」とは、制御対象に作用して制御系に悪影響を及ぼす因子のことである。環境・社会問題に起因する外乱の例としては、環境汚染による公害、乱開発による水害・土砂災害、地球温暖化による諸被害が挙げられる。

(a) 制御対象

制御対象は、対処すべき環境あるいは社会問題の原因となる人間活動である。人間活動の単位は、個人や家庭や企業を主体とした活動、地域内あるいは国内の活動など、さまざまに想定できる。

(b) 制御量

制御対象となる人間活動の中でも、対処すべき問題との関係で制御したい変数が制御量とな

図1 SDのための制御系

る。想定される制御量の中でも重要な要素として、「水」「食料」「製品」「エネルギー」「情報」「金銭」「土地利用」「人口」の8つを抽出した（藤平 2004）。これらのうち「製品」とは、衣類、機器、自動車、建築物、土木構造物など大小さまざまな原材料加工品のことである。

(c) 制御目的

制御目的は「人間活動全体の安定」とし、これは先述のSDと同義である。環境と開発に関する世界委員会は、SDを、「将来の世代がその欲求を満たす能力を損なうことなく現在の世代の欲求を満たす開発」(World Commission on Environment and Development 1987)と定義した。SDについて、「おそらく最も広く用いられている定義は、“社会的発展および経済的机会”と“環境の要求”との関係に焦点を合わせている」(UNESCO 1997)。このような定義の代表が、「人間を支える生態系が有する能力の範囲で営みながら、人間の生活の質を向上させること」(IUCN/UNEP/WWF 1991)である。

制御目的を、SDと表現せずに、「人間活動全体の安定」とした理由は2つある。1つは、制御を考えると、通常その目的としてシステムの安定が最重要視されることによる。加えて、システムの安定を中心に据えて描いたモデル図（図2）が、SDの本質を的確に表現できることによる。すな

わち、「人間活動全体の安定」とは、有限の地球環境・天然資源という絶対的制約下で、全人類の長期的な幸福という究極目的を達成するために、「基盤安定と内部安定を両立させること」である。「基盤安定」とは、人間の生存環境の安定および必要物資の安定供給であり、そのための条件は「地球環境保全と天然資源の持続的利用」となる。一方、「内部安定」とは、経済的・社会的安定のことであり、その条件は、健康・安全・相互扶助・自己実現のような「人間の幸福の基礎条件を満たすこと」となる。

(d) 制御目標

制御対象と制御量が決めれば、注目する制御量に対応する目標値を制御目的から導く。たとえば、制御量がエネルギーならば、制御対象のエネルギー利用に関する目標値を、制御目的である「人間活動全体の安定」から導くわけである。その上で、制御目標は、注目する制御量の現状を捉えた観測値を目標値に一致させることとなる。

ちなみに、図1に示す制御系の課題は、制御目標を達成できるような制御器、すなわち制御の手段を計画・実行することとなる。

3 ESDの方法論

(1) ESDの役割

さまざまな環境・社会問題のある現状を変革してSDを実現しようとするとき、変革の主体となるのは人間活動を行う“人間”である。よって、変革のためには人間の行いを変化させる必要があるが、この変化を引き出すのがESDの役割とみなせる。要するに本稿では、ESDを、教育の持つ社会変革機能に注目した意図的教育の中に位置づける。

上記の認識をSDのための制御系（図1）にあてはめると次のようになる。図1において主要な制御器として想定されるのは、技術の活用、行動様式や生活様式の変更、制度やきまりの活用である。これら多様な制御器を計画・実行するのは“人間”である。そのため、人間にはこれらの制御器を計画・実行するための高い能力と意欲が求められるが、この能力と意欲を高める役割を担う

図2 人間活動全体の安定モデル(藤平 2006)

のが教育とみなせる。よって、制御器を計画・実行することを「制御系を設計する」と表現するならば、ESDの役割は、制御理論を応用する立場から次のように定義できる。すなわち、「人間活動全体の安定を制御目的とした制御系において、人間活動を行う人間が制御系を設計する能力と意欲を高められるようにすること」である。

なお、上記の定義は、UNESCOが捉えるESDの役割と重なる。UNESCOは、ESDの「中心的な役割」として、SDの実現に向けて人々の「価値観」と「能力」を育むことの重要性を指摘している（UNESCO 2005a）。ここで「価値観を育む」ことは、ESDの特徴である「価値観による牽引」（UNESCO 2005a）によって、行動変化を牽引することと結び付けられている。一方、SDのための制御系を設計する「意欲を高める」ことは、SDの実現に向けて行動変化を牽引することにつながる。したがって、「価値観を育む」と「意欲を高める」ことは「行動変化を牽引する」という点で一致している。以上から、「価値観と能力を育む」ことの趣旨は、制御系を設計する「意欲と能力を高める」ことと同様とみなせる。

(2) 制御系の設計手順とESDの方法

本稿ではESDの役割を制御系を設計する能力と意欲を高めることと捉えたので、制御系の設計手順を拠り所としてESDの方法を考える。図3

は、その標準的な手順であり、図中および下記の番号は順序を示している。なお、図3は「詳細モデリング」「設計用モデリング」「制御器の実現」の各過程で誤差が生じることを示しており、制御系の設計に際してはこれらの誤差に留意する必要がある。

①制御対象と制御目標の特定

制御対象は、混沌とした現実世界の中に存在しており、それゆえに複雑である。図では、そのことを強調するために凹凸のある外形線で表現してある。

②詳細モデル

制御系の設計は、制御対象と制御目標の理解から始まる。このうち制御対象を理解するモデリングでは、通常、まず詳細モデルをつくる。

③設計用モデル

詳細モデルの本質をつかみつつ簡略化して設計用モデルをつくる。これによって制御器の計画書に相当する制御則の設計を容易にする。

④制御則

設計用モデルに対して制御目標を反映させながら制御則を設計する。その後、得られた制御則と詳細モデルで制御系を構成し、種々の特性を評価する。

⑤制御器

評価によって所望の結果が得られれば、設計さ

図3 制御系の設計手順(大須賀・足立 1999)

れた制御則を現実の世界で実現する。最後に、実現された制御器と制御対象を組み合わせる実装を行う。

上記の手順に従えば、ESDでは、まず、教育の計画者が制御対象と制御目標を特定することが必要になる。これは、表1の上段に示すように、教育目標を設定する段階に相当する。その上で、本稿ではESDの役割を制御系を設計する能力と意欲を高めることと捉えたので、教育実践に際しては表1の下段に示す4要素が重要となる。すなわち、教育の計画・実施者がプログラム作成時に考慮すべき基本要素は、「制御対象と制御目標の理解」「目標達成の意欲醸成」「制御則の設計能力向上」「制御器の実現・実装能力向上」となる。

(3) 教育目標の設定

教育目標の設定は教育の計画者が「制御対象と制御目標を特定」することに相当し、教育プログラムを計画する最初の段階で行う。制御対象と制御目標を特定することは、制御対象である「学習者がかかわる人間活動」の中で何を制御量とするか、制御量の目標値をどのようにするか、を想定することである。これらの要素を特定するためには、対処すべき環境・社会問題や制御目的も視野に入れた制御系を想定する必要がある。

(4) 教育基本要素

(a) 制御対象と制御目標の理解

制御対象の理解は、「学習者がかかわる人間活

動」をモデリングすることによってなされる。モデリングは制御対象の中でも制御目標に関係する要素について行うので、制御量についての理解が不可欠となる。一方、制御目標は制御量を目標値に一致させることであるから、目標値の理解も必要になる。したがって、「制御対象と制御目標の理解」では、学習者による「制御量」と「目標値」の理解が課題となる。

(b) 目標達成の意欲醸成

学習者が「制御量」と「目標値」を理解しただけでは、制御量を目標値に近づけ一致させるという目標を達成しようとする意欲は生じにくい。目標達成の意欲を醸成するには、学習者が、①制御量と問題との関係、②問題、③外乱、④制御による学習者の直接的利益、を認識することが有効である。①は、学習者が問題に関与していることを認識できるようにすることであり、言い換えれば、学習者の責任感を喚起することである。②は、対処すべき環境・社会問題について理解することである。③は、問題が制御対象に及ぼす悪影響について認識することである。なお、上記の3要素をすべて認識すると、「制御量→問題→外乱」という繋がりは明確になり、外乱を回避するために制御量を目標値に近づけるという動機付けを強めることが期待できる。一方、④は、制御量を目標値に近づけることが学習者の利益に直結するような関係を認識することである。なお、ここでいう「利益」の中には、経済的利得だけでなく、健康増進をはじめ学習者の生活の質を向上させる諸要素が含まれる。

(c) 制御則の設計能力向上

この能力を高めるには、学習者が、制御則の設計から評価に至る過程を実際に行えばよい。制御則の設計では、各学習者が目標を達成できるような制御則を考えるとともに、グループで議論や意見交換をして相互刺激的に案を出すのも効果的である。また、より優れた制御則を求めて、学習者が情報収集や調査をすることや、指導者が必要に応じて学習者に情報提供することも行われる。こうして制御則案が出されたあとは、その有効性や実現性を評価して案を絞り込む。ただし、1つだ

表1 ESDの進め方の要点

段 階	要 素	内 容
教育目標の設定	制御対象と制御目標の特定	教育の計画者が、制御系を想定（対処すべき問題・制御対象・制御量・目標値を特定）
教育基本要素	(a) 制御対象と制御目標の理解	学習者が、制御量と目標値を理解
	(b) 目標達成の意欲醸成	学習者が、①制御量と問題との関係、②問題、③外乱、④制御による学習者の直接的利益、を認識
	(c) 制御則の設計能力向上	制御則の設計・評価過程を試行
	(d) 制御器の実現・実装能力向上	制御器の実現・実装過程を試行

けに絞る必要はない。

(d) 制御器の実現・実装能力向上

制御器の実現・実装能力を高めるには、制御器の設計と同様、学習者がこれらの過程を実践するのがよい。最も一般的なのは、学習者が設計した制御則を現実の世界で試行することである。これによって設計した制御則の効果を実際に確認できる。また、制御器の実現・実装過程では、制御器の設計過程では予想していなかった障害や困難に直面することもある。学習者は、それらの克服策や代替案を検討することによっても、この過程を遂行する能力を高められる。

4 教育の実践例

(1) 概要

2005年の10月から11月にかけて、前章で示した方法論に基づいて、エネルギー教育を実践した。場所は神奈川県逗子市の小学校5校および中学校3校で、各校で1回ずつの訪問授業を行った。参加者の合計は、小学生が4～6年生の412人、中学生が1～3年生の224人、合わせて636人であった。授業は、小中学校とも「総合的な学習の時間」の連続した2時限の中で行った。講師は、研究グループの協力者が担当した。

(2) 教育目標の設定

「制御対象と制御目標の特定」に相当する「教育目標の設定」では、図4に示す制御系を想定した。すなわち、地球温暖化および化石燃料の枯渇に対処するために、学習者がかかわる人間活動の中でも「エネルギー」を制御量とし、その目標値を「安定的なエネルギー利用」とした。なお、安

定的なエネルギー利用とは、制御目的の中でも「基盤安定」を可能にするようなエネルギー利用を意味する。これは、究極のところ、太陽エネルギーのような再生可能エネルギーだけで学習者が利用するエネルギーを賄うこととみなせる。

(3) 授業プログラム

プログラムは表2に示す構成とした。

「導入」では各自にシートの記入を依頼した。まず、「現在の技術で掘ることのできる世界中の石油を、今のまま使い続けたら、あと何年くらい使えるだろう？」というクイズを出した。次に、日頃のエネルギー利用に対する心構えを尋ねた。

「本題1」ではビデオを上映した。ビデオは財団法人 省エネルギーセンターが小中学生向けに制作した「省エネ教室 資料映像」であり、上映したのはその中でも本編の約10分間の部分である。その内容は、「私たちの暮らしを支えるエネルギーの使用量が増え続けていること」と「エネルギー使用が引き起こしている問題」である。前者は、民生・輸送・産業の各部門におけるエネルギーの利用状況を、家庭のさまざまな電気・ガス機器、自動車や航空機などの輸送機械、工場の生産過程や発電所の映像を用いて紹介した。後者に

表2 実践例の授業プログラム

区 分	内 容
導 入 (5分)	シート記入(1) クイズ: 石油の可採年数 エネルギー利用の心構え
本題1 (15分)	ビデオ上映 増え続けるエネルギー使用 エネルギー使用が起こす問題 補足説明 化石燃料への依存度 クイズの答
本題2 (30分)	家庭でのエネルギーの有効利用 イラストA&Bの比較<思考・議論・発表> 比較点灯実験
本題3 (30分)	太陽エネルギーの利用 ソーラークッカーの紹介 太陽光発電実験 太陽光発電利用機器・施設・エネルギー自給住宅の紹介
振り返り (10分)	質疑応答 シート記入(2) エネルギー利用の心構え 授業の感想 家庭での取組みを要請

図4 教育実践例で想定した制御系

ついては、使用しているエネルギーの大半は化石燃料に依存しており、化石燃料の大量使用は資源の枯渇化と地球温暖化を引き起こしていることを紹介した。とくに地球温暖化については、大気中の二酸化炭素蓄積量が増えるにつれて、気温上昇や海面上昇、異常気象、食料不足、感染症が深刻化することを、印象的な映像や図を用いて説明した。

ビデオ上映に続いて、講師から補足説明をした。まず、今日の日本のエネルギー供給のうち、石油・石炭・天然ガスの化石燃料が全体の80%を超えることを、グラフを用いて示した。また、「導入」で出したクイズの答えは約40年であることを伝えた。

「本題2」では、家庭に的を絞ってエネルギーを有効利用する方法を学習した。まず、数人ずつ

で構成されるグループに、図5に示すような2枚のイラストを配布した。学習者は、イラストAとBを比べて異なる点を探しながら、2つの家庭のエネルギー使用量が異なる理由を、自分たちの家庭とも比べながら、考え話し合った。約10分後、各グループの代表は、たとえば「Aの窓は1重だが、Bの窓は2重」のように、話し合いの結果を順に1つずつ発表した。また、使われている照明がAでは電球なのに対してBでは蛍光灯であることが指摘されたときには、両者を手回し発電で点灯させる実験をした（図6）。これによって学習者は、蛍光灯が電球と比べてはるかにエネルギー利用効率が良いことを実感できる。さらに実験では、発光ダイオード（LED）灯との比較も行い、LED灯が蛍光灯よりもさらに効率が良いことを示した。加えて、講師からは、2枚のイラストの

図5 授業で用いた2枚のイラスト

図6 電球・蛍光灯・LED灯の比較点灯実験

図7 太陽光発電実験

相違点に関連して、エネルギー使用量が異なる理由を必要に応じて補足説明した。

「本題3」では、太陽エネルギーの利用に関して実験や情報提供をした。まず、太陽熱を集めて調理する装置であるソーラークッカーの実物を見せるとともに、調理状況の写真をスクリーンに映し出した。次に、小型の太陽電池パネルとLED灯をつなぎ、パネルを太陽に向けるとLED灯が点灯する様子を示した。続いて、グループに分かれた学習者は、教育キットの太陽電池パネルとミニ・オルゴールをつなぎ、光エネルギーを利用して音楽を聴けることを体験した（図7）。また、太陽光発電の活用事例について、電卓・腕時計・充電装置のような身近な機器への応用例を実物で紹介するとともに、独立電源や建築物への導入事例の写真を映し出して説明した。なかでも住宅への導入例については、徹底的な省エネルギーと太陽光発電によって、太陽エネルギーだけで必要なエネルギーを賄う「エネルギー自給住宅」が市販されていることを、図5のイラストBと関連付けながら紹介した。

「振り返り」では、まず、授業全体を振り返って質疑応答をした。次に、再びシートを配布し、終了時のエネルギー利用に対する心構えを尋ねるとともに、授業の感想を記入してもらった。最後に、授業の中で気付いたエネルギー利用の改善策を各家庭で実践するとともに、家族にも伝えることを促した。

(4) 教育基本要素とプログラムとの関係

授業プログラムは、図4に示した制御系に基づき、表1下段に示した教育基本要素を効果的に組み込むことを念頭に置いて作成した。教育基本要素の内容とプログラム構成要素との対照関係を表3に示す。

(a) 制御対象と制御目標の理解

この要素の骨子は「制御量」と「目標値」の理解である。このうち「制御量」については、まず、ビデオの“増え続けるエネルギー利用”の部分が、学習者の「エネルギー利用」を包括的に描いて理解を促す。また、イラスト比較で用いた2枚のイラストは、制御量と目標値を対比させつつ簡略化

して描くことで両者の理解を促進する。実は、ビデオが描く「エネルギー利用」は学習者共通の詳細モデルに相当する。しかし、民生・輸送・産業部門のエネルギー利用を含んだモデルから直接的に制御則を設計しようとすると、得られる制御則も複雑になってしまう。そこで、図3に示したように、詳細モデルを簡略化する設計用モデリングを行った。具体的には、学習者がかかわる広範囲のエネルギー利用の中でも、学習者にとって最も身近でかつ重要な活動の場である「家庭」のエネルギー利用に限定した。そこで、改善すべき家庭のエネルギー利用について描いたイラストAを、学習者共通の設計用モデルとした。一方、イラストBの家庭は、省エネルギーと太陽エネルギーの活用による「安定的なエネルギー利用」の実現を想定しており、これは設計用モデルに対応した目標値になっている。加えて、「エネルギー自給住宅」の紹介は、イラストBと結びつくことで、目標値のイメージを強化する役割を担う。

(b) 目標達成の意欲醸成

この要素に最も貢献するのは、ビデオの“エネルギー使用が引き起こす問題”である。ビデオのこの部分は、「制御量と問題との関係」「問題」および「外乱」を網羅する。エネルギー源の大半が化石燃料だとする描写は、「制御量と問題との関係」を認識させ学習者の責任感を喚起する。地球

表3 教育基本要素と授業プログラムとの関係

教育基本要素の内容		プログラムの構成要素	
(a)	「制御量」を理解	ビデオ“増え続けるエネルギー使用”	イラストA
	「目標値」を理解		イラストB＝エネルギー自給住宅
(b)	「制御量と問題との関係」を認識	ビデオ“エネルギー使用が引き起こす問題”	説明：化石燃料への依存度 クイズ：石油の可採年数
	「問題」および「外乱」を認識		
(c)	制御則の設計・評価過程を試行	イラストA&Bの比較<思考・議論・発表> 比較点灯実験 太陽光発電実験 太陽エネルギー利用技術関連情報	
(d)	制御器の実現・実装過程を試行	家庭での取組みを要請	

温暖化や化石燃料の枯渇化に関する描写は、「問題」の要点を理解させる。さらに、地球温暖化については、このまま進めば気温上昇に伴って海面上昇や異常気象などが深刻化し、現在10代前半の学習者に対して将来重大な「外乱」が及ぶことを認識させる。これらの情報は、図4中の「制御量→問題→外乱」という繋がりを明確にし、外乱を回避するために制御量を目標値に近づけるという動機付けを強めることが期待できる。ビデオに加えて、「説明」と「クイズ」も同様のしくみで学習者の行動変化を動機付ける。化石燃料への依存度の高さを図解する説明は、あらためて「制御量と問題との関係」を認識させる。また、石油の可採年数に関するクイズは、石油の枯渇という「問題」が社会的混乱という「外乱」となって学習者に及びうることを認識させる。

なお、このプログラムには、対象者の特性を考慮した上で、「制御による学習者の直接的利益」を認識させる要素を含めていない。小中学生に対して省エネルギーが金銭の節約につながることを伝えても、十分にアピールしないと予測された。それよりも、若くて余命の長い小中学生に対しては、次第に深刻化する「問題」や「外乱」に重点を置く方が効果的と推察された。これに対して、対象が成人の場合には、省エネルギーを「問題」や「外乱」の緩和に結びつけるだけでなく、金銭的節約のような「直接的利益」に結び付けることがしばしば行われ効果を上げている。このように、「目標達成の意欲醸成」に際してどの要素に重点を置くかは、対象者の特性によって変化しうる。

(c) 制御則の設計能力向上

この要素に最も寄与すると考えられるのは、2枚のイラスト比較である。イラストのAとBには20余の相違点があり、これらの相違点はいずれも家庭のエネルギー利用を改善するうえで効果的な制御則に結び付いている。よって、各学習者は、まずグループ内のメンバーと話し合いながらイラストの相違点を見つけその意味を考える過程で、それらの制御則を主体的に発見できる。また、各グループの発表や講師からの補足情報に接する過程でも、相互刺激的に制御則とその意義について

学ぶことができる。一方、電球・蛍光灯・LED灯の比較点灯実験、太陽光発電実験や太陽エネルギーの活用事例の紹介は、省エネ技術や太陽エネルギー利用技術を身近なものにし、技術の活用に関する制御則の設計・評価能力を高めることを狙いとしている。なかでも学習者の実験への参加は、制御則の有効性を実感できるという点でその効果が大きいと考えられる。

(d) 制御器の実現・実装能力向上

家庭でのエネルギー利用を改善する実践能力を高めるには家庭で実行することが効果的だが、これを90分の授業に含めることは難しい。そこで、この要素については、家庭で各自が実践するとともに家族とも協力して取り組むことを、授業の最後に要請した。

(5) 教育効果

授業の「導入」と「振り返り」で行ったシート記入の結果から、教育効果を調べた。

エネルギー利用に対する心構えについては、表4に示す10項目について質問した。10項目を分類すれば、項目1から6までは行動様式の変更、7から10までは技術の活用に関する制御則である。視点を変えれば、1から7までは省エネルギー、8と9は太陽エネルギーの利用、10は太陽エネルギー利用と省エネルギーによるエネルギーの自給を想定している。これに対して学習者は、「はい(○)」「いいえ(×)」「どちらとも言えない(△)」のいずれかで回答した。集計は、○を10点、△を5点、×を0点とし、授業前後の平均点をそれぞれ算出した。表4は項目別の平均点の変化である。小・中学校とも全項目で点数が上昇しており、小中学校全体の10項目の平均点は6.6から8.3に上昇した。項目別ではとくに7、8および9の上昇幅が大きかった。

表4の結果からデータの量的扱いで効果のあることが示唆されたので、念のため、データを質的データとして扱い、統計的手法で確認を行った。すなわち、授業前後の各項目について、(1) △と×を統合、(2) クロス集計、(3) マクネマーの法に従って処理、(4) χ^2 (カイジじょう) 検定の手順で進めた。その結果、小中学校とも10項目

表4 授業前後のエネルギー利用に対する心構えの変化

項 目	小学校平均		中学校平均		全体平均	
	前	後	前	後	前	後
1 使っていない部屋の照明は消す	9.3 (2.0)	9.8 (1.0)	9.0 (2.4)	9.6 (1.6)	9.2 (2.2)	9.7 (1.2)
2 テレビはつけっぱなしにしない	8.7 (2.9)	9.3 (2.1)	7.7 (3.7)	9.1 (2.4)	8.3 (3.2)	9.2 (2.2)
3 冷蔵庫に食べ物をためこみすぎない	6.8 (3.6)	8.3 (2.9)	5.9 (3.7)	8.1 (3.0)	6.5 (3.6)	8.2 (3.0)
4 家の人と近くに出かけるとき、車ではなく、自転車か歩きで行く	7.5 (3.7)	8.6 (2.9)	6.6 (4.3)	8.5 (3.2)	7.2 (3.9)	8.5 (3.0)
5 長く使っていない電気製品はコンセントをぬいておく	6.8 (4.0)	8.4 (3.1)	6.0 (4.4)	8.1 (3.4)	6.6 (4.1)	8.3 (3.2)
6 エアコンの使用はできる限り少なくする	7.7 (3.5)	8.9 (2.7)	7.1 (4.0)	8.7 (2.9)	7.5 (3.7)	8.8 (2.8)
7 照明は電球よりも蛍光灯にする	5.3 (3.8)	7.8 (3.4)	5.2 (4.1)	8.2 (3.2)	5.3 (3.9)	7.9 (3.3)
8 電卓や腕時計は太陽電池式にする	5.1 (4.1)	7.3 (3.6)	4.3 (4.2)	7.5 (3.5)	4.8 (4.1)	7.4 (3.6)
9 電池や携帯電話の充電は太陽エネルギーを利用する	3.4 (3.9)	6.1 (4.1)	1.9 (3.5)	5.8 (4.2)	2.9 (3.8)	6.0 (4.2)
10 太陽光発電住宅に住んでみたい	8.5 (3.1)	9.1 (2.4)	7.2 (3.8)	8.5 (3.0)	8.0 (3.4)	8.9 (2.6)
平 均	6.9 (1.5)	8.3 (1.6)	6.1 (1.8)	8.2 (1.8)	6.6 (1.7)	8.3 (1.7)

(注) 平均点は10点満点。括弧内は標準偏差。有効回答者数は633 (小学校410、中学校223)。

のすべてについて、授業前後で、「○に変化した児童・生徒」と「△・×に変化した児童・生徒」の人数に差があることがわかった (すべてについて、 $df = 1$, $p < 0.01$)。変化した人数と χ^2 値を表5に示す。

授業の感想については、「授業を受けて感じたこと・気づいたこと・考えたこと」について自由に記入してもらった。記載内容は多様であるが、その中で最も多かったのは、自らのエネルギー利用を改善したいという意思の表明である。このような趣旨の記述をした学習者は320人であり、何らかの記述をした参加者626人中の過半数を占めた。さらに、その内訳を分類すると、「これからはエネルギーのむだ使いをしないようにしたい」など省エネルギーを表明したのが179、「ソーラーパネルの電気製品を使いたい」など太陽エネルギー利用に意欲を示したのが47、「太陽光発電住宅に住んでみたい」という趣旨の記述が32あった。また、上記の学習者とは別に、行動変化の必

表5 項目別の「○に変化」と「△・×に変化」した人数および χ^2 値

項 目	小学校 (N=410)			中学校 (N=223)		
	$\Delta \times \rightarrow \bigcirc$	$\bigcirc \rightarrow \Delta \times$	χ^2	$\Delta \times \rightarrow \bigcirc$	$\bigcirc \rightarrow \Delta \times$	χ^2
1	32	3	24.0	23	2	17.6
2	49	11	24.1	40	1	37.1
3	110	21	60.5	78	7	59.3
4	64	10	39.4	47	1	44.1
5	101	22	50.7	67	14	34.7
6	84	18	42.7	52	6	36.5
7	162	20	110.8	92	6	75.5
8	117	18	72.6	85	8	63.8
9	135	20	85.3	75	4	63.8
10	46	12	19.9	47	8	27.7

要性を認識したという趣旨の記述も36あった。

以上の結果から、計画・実施した授業の教育効果について検討する。集計表とマクネマーの法で処理した後の χ^2 検定からは、小中学校とも、全10項目について、学習者が実践に向けて意識を高めたとみなせる。また、項目別の平均点の変化

では、技術の活用に関する項目7、8および9の上昇幅が極めて大きく、授業はこれらの制御則の有効性を強く認識させ実践意欲を顕著に高めたといえる。これに対して、省エネルギーのための行動様式の変更に関する項目1～6の点数上昇幅は相対的に小さかったものの、このことは、これらの制御則の実践に向けた意欲醸成が小さいということの意味しない。感想の中で、省エネルギーの意思を表明した記述が179と極めて多かったことから推察すると、省エネルギー型の行動様式はすでにある程度浸透しており、点数の上昇余地がもともと限られていたためと考えられる。よって、今回の授業は、省エネルギーと太陽エネルギー利用の両面において、学習者のエネルギー利用を改善する意欲と能力を顕著に高めたと解釈できる。

5 考察

本研究で得られた主な成果や含意は次のようである。第2章では、SDのための制御系を提示するとともに、制御系の構成に必要な諸要素を特定した。これらの成果は、SDの実現という人類の究極課題に対して、制御関連の学問分野の研究を促進し、この分野からの貢献を飛躍的に高める可能性をもつ。第3章では、教育目標の設定方法と4つの教育基本要素を示した。これが、ESDを進める際のモデルがないという現状において、その役割を担うことが期待される方法論に相当する。第4章では、この方法論に基づいたエネルギー教育の実践例を報告した。実践結果は、参加者のエネルギー利用を改善しようとする能力と意欲を顕著に高めたことを示しており、方法論の有効性を裏付けた。よって、今日急務の課題である地球温暖化や石油の需給逼迫の緩和に向けて、提示したプログラムが広く教育現場で活用されることが期待される。

ところで、制御理論を応用して教育を進める利点は次のようである。表1に示した「ESDの進め方の要点」は、何をどのように変えるのかという目標を明確にした上で、目標達成にとって重要な要素を網羅している。したがって、表1に沿ってプログラムを作成することは、そうでない場合

に比べ、重要な教育要素を集中的に取り込むことでより高い学習効果を生み出しうる。実際、第4章のエネルギー教育のプログラムも、必要な教育要素を最大限に取り込むことで顕著な学習効果を生み出したと考えられる。

今後の課題は、実践例を増やすことで、提示した方法論の信頼性をさらに高めていくことである。そのためには、まず、教育課題に応じて適切な制御系を示すことが求められる。第4章に示した実践例は比較的単純で、制御量としたエネルギーの利用状況自体を観測して目標値に一致させようとした。ところが、課題によっては、観測対象が制御量と異なる場合も少なくない。たとえば、地球温暖化や日本の低い食料自給率に対処するために、食料の地産地消を推進するといった課題では、制御量が食料であるのに対して、観測対象は食料の輸送用エネルギーとなる(図8)。また、観測値や目標値などを示す矢印線は図中ではいずれも1本の線で描かれているが、実際には必要に応じて複数の要素を含めることもできる。このように、SDのための制御系は、複雑な課題にも対応できる柔軟性を有している。したがって、今後は、さまざまな課題に応じた制御系を実際に示すとともに、提示した制御系に基づいた教育プログラムを作成することを計画している。

また、既存の学習理論の成果を取り入れることも課題となる。本研究では学習理論の成果を参照することなく実践例のプログラムを作成したが、ESDのプログラムづくりのあるべき姿は、学習理論とESDの方法論とが協力することだと考えられる。よって、今後は、学習理論の成果も参照

図8 観測対象が制御量と異なる場合の制御系の例

しつつ、教育課題に応じてより効果的なプログラムを提示できるよう検討を進めることも予定している。

注

- 1) 「環境・社会問題」とは「環境問題および社会問題」を意味する。環境問題も社会問題もその原因は人間にあるが、本稿では両者を次のように捉える。環境問題は、環境汚染・環境破壊・天然資源の減少のような自然環境の変化に関する問題である。社会問題は、人間の生活に悪影響を及ぼす問題である。よって、人間の生活に悪影響を及ぼす環境問題は、社会問題にもなる。
- 2) この定義は、Oxford 英英辞典第2版(2003年)のactivityについての説明、“a thing that a person or group does or has done”による。

引用文献

- 藤平和俊, 2004, システム制御理論を応用した環境教育の体系化, 環境教育, 13(2): 63-70.
- 藤平和俊, 2006, 制御理論の応用から捉える5-2プロジェクトの意義, 5-2 IDEAプロジェクト中間報告書(吉岡崇仁編), 131-138, 総合地球環境学研究所, 京都.
- IUCN/UNEP/WWF, 1991, *Caring for the Earth*, 228pp, IUCN/UNEP/WWF, Gland, Switzerland.
- NPO法人 持続可能な開発のための教育の10年推進会議, 2006, わかる! ESDテキストブックシリーズ1 基本編 未来をつくる『人』を育てよう, 64pp, NPO法人 持続可能な開発のための教育の10年推進会議, 東京.
- 大須賀公一・足立修一, 1999, システム制御へのアプローチ, 177pp, コロナ社, 東京.
- UNESCO, 1997, *Educating for a Sustainable Future: A Transdisciplinary Vision for Concerted Action*, 42pp, UNESCO, Paris.
- UNESCO, 2005a, *UN Decade of Education for Sustainable Development 2005-2014, Draft International Implementation Scheme*, January 2005, 52pp, UNESCO, Paris.
- UNESCO, 2005b, *UN Decade of Education for Sustainable Development (2005-2014): International Implementation Scheme*, October 2005, 32pp, UNESCO, Paris.
- United Nations, 1992, *AGENDA21: Programme of Action for Sustainable Development*, 294pp, United Nations, New York.
- United Nations, 2002, *Report of the World Summit on Sustainable Development*, 167pp, United Nations, New York.
- United Nations, 2003, UN General Assembly Resolution A/RES/57/254 of 21 February 2003.
- World Commission on Environment and Development, 1987, *Our Common Future*, 400pp, Oxford University Press, New York.

謝 辞

実践例の授業に際して、逗子市環境部・逗子市立小中学校・ずしし環境会議・日本環境工学設計事務所の関係者の皆さん、および小寺昭彦さんにお世話になりました。ここに記して謝意を表します。また、本研究の一部は、総合地球環境学研究所・環境意識プロジェクトの支援を受けています。