

グリーンイノベーションと制御理論

木村 英紀*・武内 里香*

* 独立行政法人 科学技術振興機構 研究開発戦略センター
東京都千代田区五番町 7 番地 K's 五番町ビル
* Center for Research and Development Strategy, Japan Science and Technology Agency, K's Gobancho Bldg, 7, Gobancho Chiyoda-ku, Tokyo, Japan
* E-mail: h2kimura@jst.go.jp

キーワード：グリーンイノベーション (green innovation), 分散化 (decentralization), 再生可能エネルギー (renewable energy).
JL 0001/12/5101-0008 ©2012 SICSE

1. はじめに

1.1 グリーンイノベーションの戦略的位置付け

オバマ政権のグリーン・ニューディール政策を皮切りに、環境関連技術を核とする施策は各国で重要な位置を占めるようになっていく。わが国でも、平成 22 年 6 月に閣議決定された新成長戦略¹⁾において、2020 年までに『50 兆円超の環境関連新規市場』、『140 万人の環境分野の新規雇用』、『日本の民間ベースの技術を活かした世界の温室効果ガス削減量を 13 億トン以上とすること（日本全体の総排出量に相当）』という目標が掲げられた。

この新成長戦略では、現代社会に山積する新たな課題に正面から向き合い、その処方箋を提示することにより、新たな需要と雇用の創造を目指す「課題解決型」の国家戦略が大きく打ち出されている。そのなかで「グリーン・イノベーション」は、将来の成長分野の筆頭に位置付けられている。

日本の環境・エネルギー分野では、2 度にわたる石油ショックや公害問題を契機に、サンシャイン計画やムーンライト計画、ニューサンシャイン計画等に代表される大型の研究開発プロジェクトが実施されてきた。その成果もふまえて、グリーンイノベーションを日本の強みを発揮できる成長分野と位置付けている。しかし、新成長戦略のなかではわが国の環境技術を世界最高としながらも、「国際競争戦略なき環境政策によって、わが国が本来持つ環境分野での強みを、必ずしも活かすことができなくなっている」と、昨今の競争力の陰りを認めている。

一方、平成 23 年 8 月に策定された第 4 期科学技術基本計画²⁾においては、新成長戦略に連携して、分野別の科学技術振興から課題達成のための科学技術への転換が基本方針として提示され、「グリーン」と「ライフ」の二大イノベーションが大きな柱として掲げられた。重点推進 4 分野の振興を軸として展開されてきたこれまでの科学技術政策は、産業政策や経済政策などの重要政策との連携が希薄であったという反省に基づき、社会を意識的に変革する「社会のための科学技術」を掲げ、科学技術政策とイノベーション政策の一体的な展開を新機軸としている。科学技術基本計画中では、グリーンイノベーションの推進によって目指すべき成長の姿として、「わが国が強みをもつ環境・エネ

ルギー技術の一層の革新を促すとともに、エネルギー供給源の多様化と分散化、エネルギー利用の革新に向けた社会システムや制度の改革、長期的に安定的なエネルギー需給構造の構築と世界最先端の低炭素社会の実現を目指す」と述べ、i) 安定的なエネルギー供給と低炭素化の実現、ii) エネルギー利用の効率化およびスマート化、iii) 社会インフラのグリーン化、の 3 つの重要課題を設定している。新成長戦略と同様に、これらの技術やシステムの国内外への普及・展開を図ることも強調されている。

1.2 制御の役割

上記 3 つの課題を実現する上で制御が重要な役割を演じることは明らかである。たとえば i) の安定的なエネルギー供給と低炭素化の実現では、現在の送配電システムでもさまざまなレベルで本質的な役割をすでに演じてきたが、低炭素化社会を実現する上で必須となる再生可能エネルギーの系統導入が進むにつれて、その本質的な不安定性を克服するための制御はこれまでの発想を超えた革新的なものが要求される。ii) のエネルギー利用の効率化およびスマート化、あるいは iii) の社会インフラのグリーン化のために必要とされる省エネでは、これまでのユーザーサイドの機器レベルから、送配電を統合したシステムレベル、都市レベル拡大することが望まれ、そこでは制御が新技術の核心となるはずである。

成長の柱としてと同時に科学技術の重要課題としてグリーンイノベーションが掲げられたことは、制御理論・制御技術にとってきわめて意義深い。俗な言葉でいえば「いよいよ出番の到来」ということである。制御工学の有用性とともに、その深さと広さをグリーンイノベーションを通して国レベルで示すべき時が来たのである。

グリーンイノベーションは海外ではエネルギーマネジメントの問題として議論されることが多いが、そこで制御が核心となる役割を演じることはすでに多くのレポートが述べている。たとえば文献 3)、およびそこで引用されている文献を参照されたい。

本稿ではグリーンイノベーションにおいて制御が解くべき課題を述べる。個々の具体的なテーマは本特集号の他の解説にゆずり、ここでは主としてシステム構築の視点から述べる。

2. イノベーションとシステム構築戦略研究

わが国ではこれまでも科学技術の社会的価値の実現、すなわちイノベーションを達成するための国家プロジェクトが数多く実施され、巨額の研究開発投資が行われてきた。前章で触れたサンシャイン計画もその1つである。しかし、そのようなプロジェクトの多くは、個々の局所的な成果はある程度上がっても、当初の目的であるイノベーションを達成し社会にその成果を還元するまでには至っていないものが多い。その原因を明らかにすることは今後の科学技術政策立案における大きな課題であるが、われわれはそのカギが「システム」にあると考えている。

現代はシステムの時代である。われわれはさまざまな技術システム、社会システムに取り巻かれ、システムの要素として存在し活動している。社会で発生する科学技術に関連した重要課題の解決は、技術が社会に重層的に織り込まれた適切な技術・社会システムを構築することによって達成されることが多い。我々が利用する交通機関や電気、水道、ガスなどのライフライン、電話やインターネットなどの通信もシステムであるし、私たちが働いている企業や工場、病院、金融や株式市場や税制もシステムである。したがって科学技術は常にシステムとして社会実装される。別の言い方をすれば、イノベーションはシステム構築によって実現されるのであり、技術と社会を結びつける媒介となるのがシステムである。

システム構築が課題解決のための実質的な目標であるようなプロジェクトは、数多く実施されてきた。複雑化した社会に大規模なシステムを構築しそれを有効に運用するのは簡単ではない。社会を構成するステークホルダやプレーヤの価値観、嗜好、行動パターンなどはきわめて多様であり、社会システムを構成する要因も数多くその複雑さにまず圧倒される。しかも解くべき課題が社会と人間の全体性を包含するために、科学技術の可能性と社会経済の限界が幾重にも絡まりあい、それを解きほぐし科学技術の問題として俯瞰的に定式化するのはきわめて困難である。わが国の研究開発で欠けているのが、システム構築の複合的な視点を重視する評価軸と、システム構築を担う複合的な思考のもとで長期的な戦略を推進するリーダーシップである。システム構築の視点からの問題設定と評価軸が弱いために当初の目的が十分達成されず、関連分野の部分的な成果や要素技術の局所的なレベル向上で終わったものが多い。

いかに優秀なリーダーであっても、初期計画から実装段階まで俯瞰的戦略的な視点にもとづいて異なる多くの関連分野の知を統合し、それを実際に活かすための合理的な意思決定を行っていくことはきわめて難しい。しかし、現代の科学技術がシステム構築を通してしか社会に実装できない以上、これを避けて通ることはできない。リーダーシッ

プをとれる人材の育成のみに委ねるだけでなく、システム構築を推進する普遍的な知のフレームワークが必要である。

JST 研究開発戦略センターでは、この目的のために、俯瞰的視点にもとづく知の統合と合理的な意思決定を保証する「システム構築戦略研究」(図1)とよばれる新しい研究カテゴリーを提案している⁴⁾。システム構築戦略研究は、実際のプロジェクトを開始する前にそのプロジェクトを実現するためのシステムを予めモデル構築などを通じて仮想世界で設計構築し、その実現可能性や社会にもたらすさまざまな影響などを事前に予測解析し、プロジェクトを実行する手順を確立するための研究である。「モデルにもとづく制御」を実行してきた制御の世界では、モデル構築とシミュレーション、制御系設計のステップに対応している(図2)。

システム構築戦略研究の具体的な内容は構築すべきシステムによって多岐にわたるが、共通する項目を抽出すると、①課題克服のために必要なサブシステムあるいは要素への分解と構造化、②システムならびにサブシステムの特性の定量的評価と検証、③関連要素技術の将来予測と応用可能性の評価、④シナリオ(システム再構成案)による効果の定量的な予測・評価、⑤社会との適合アセスメント、などがあげられる。

イノベーションの実現のためには、要素技術のブレークスルーと同時に、それをシステムに組み上げることを通して社会の期待に整合させるためのシステム構築戦略研究が不可欠である。

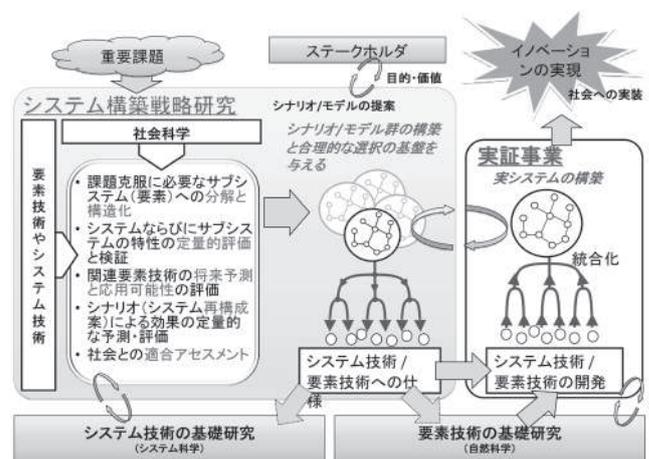


図1 システム構築戦略研究⁴⁾

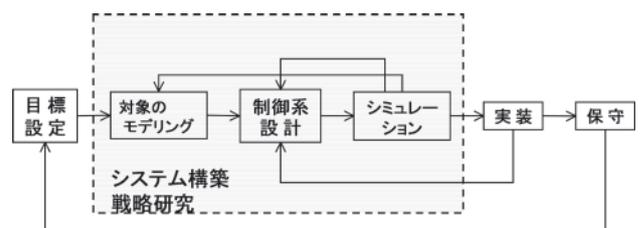


図2 制御系の構成手順とシステム構築戦略研究

ところで、新成長戦略および第4期科学技術基本計画で掲げられた戦略を、具体的に実行し達成するための枠組みとして「科学技術イノベーション戦略協議会（以下、戦略協議会）」が構想されている。第4期科学技術基本計画中においては、総合科学技術会議（もしくは、これを改組した「科学技術イノベーション戦略本部（仮称）」、以下同じ。）の調整の下で、「科学技術イノベーション戦略協議会（仮称）」（以下「戦略協議会」という。）を重要課題ごとに創設することが明記されている。戦略協議会をシステム構築のための司令塔とし、戦略協議会が科学技術重要政策アクションプラン作成、実行に重要な役割を果たすことを通じて、システム構築戦略研究のプラットフォームとなることが期待される。

イノベーションを実現する研究開発体制を組む場合に必要となるのが、府省横断的な政策の企画立案と推進機能の大幅な強化である。その具体的な制度設計は現段階では確定していないが、これまでに公表されている記述からは、「戦略協議会が、課題解決までのビジョンを明確にし、その実現に向けた戦略策定を幅広い観点から検討する。その検討結果は、総合科学技術会議が策定する科学技術重要施策アクションプランに反映され、それを基に各省庁が予算要求を行う。戦略協議会におかれた「戦略マネージャー（仮称）」が、各省庁の取組を全体調整し、その戦略の推進に係る一貫したマネジメントを行う」という構造が想定される。制御の専門家がこの役割を積極的に担うことが期待される。

3. 平成24年度アクションプランにおけるシステム科学技術、制御工学の役割

平成24年度科学技術重要施策アクションプラン⁵⁾に記載されたグリーンイノベーションの課題のうちで、システム構築と制御が実質的な課題解決のカギを握るような課題を具体的に考察してみたい。

平成24年度アクションプランでは、グリーンイノベーションに関して、「天然ガスや石炭火力等の基幹エネルギーの低炭素化に引き続き取り組むとともに、クリーンエネルギー供給を確保するためには、再生可能エネルギーの大幅な供給拡大を推進する必要がある」とし、4政策課題と5重点的取組が示されている（図3）。以下この図をもとに政策課題と制御工学との関連を考えてみよう。

3.1 分散エネルギーシステムの拡充

システムというキーワードが含まれていることから明らかなように、政策課題のうち、特にシステム構築が実質的な課題解決のカギを握っているのが「分散エネルギーシステムの拡充」である。

この政策課題では、家庭やオフィスや地域の中で電気や熱などを「創り」「蓄え」「融通し合う」分散エネルギーシステムを、従来の大規模集中エネルギーシステムと地域特

平成24年度アクションプラン - グリーンイノベーション -

目指すべき社会の姿	政策課題	重点的取組
自然と共生し持続可能な環境・エネルギー先進国	クリーンエネルギー供給の安定確保	技術革新による再生可能エネルギーの飛躍的拡大
	分散エネルギーシステムの拡充	革新的なエネルギー創出・蓄積技術の研究開発
		エネルギーマネジメントのスマート化
	エネルギー利用の革新	技術革新による消費エネルギーの飛躍的削減
社会インフラのグリーン化	地域特性に応じた自然共生型のまちづくり	

図3 平成24年度科学技術重要施策アクションプラン—グリーンイノベーション⁵⁾

性等に応じて組み合わせることで、国全体のクリーンエネルギー供給の安定確保に貢献することを目指し、「革新的なエネルギー創出・蓄積技術の研究開発」および、「エネルギーマネジメントのスマート化」の重点的取組を設定している。

3.2 エネルギーマネジメントのスマート化

ここでは、「再生可能エネルギーは、気象条件等によりエネルギー供給量が大きく変動することから、この飛躍的な普及・拡大を図るには、エネルギーマネジメントシステムをスマート化し、エネルギー供給とエネルギー需要をダイナミックかつ高信頼に制御することが必要」と述べられており、制御の研究コミュニティの重要な役割が示唆されている。スマートグリッドやそれに関連する技術の重要性は、新成長戦略や第4期科学技術基本計画でも強調されている通りであるが、問題はその推進方策にある。「革新的なエネルギー創出・蓄積技術の研究開発」では、基盤的研究とその融合、さらには実用化研究まで網羅した研究開発を横断的に実施することが記されているのに対し、エネルギーマネジメントに関しては、「実証プロジェクト等を加速・拡充し重点的に推進する」、「高信頼な制御のための情報通信技術等の要素技術開発が必要な場合には、実証プロジェクトの推進と合わせて実施する」というように、実証プロジェクトに重きをおいている。この傾向は、平成23年度アクション・プラン施策パッケージの概算要求のとりまとめについて⁶⁾においてまとめられている。現在行われている各省庁の施策の整理図（図4）においても明白である。情報通信デバイスやパワーエレクトロニクス等の要素技術に関しては、基礎から応用研究、開発まで施策がまたがっているのに対し、スマートグリッドの最適化に関しては、経済産業省の実証研究が主要な研究パラダイムとなっており、基礎～応用研究が空白となっている。システムの分野でも基礎研究が重要であることの認識を科学技術政策の場でさらに浸透させることが必要である。

3.3 スマートグリッド

パワーグリッドは発電送配電のためのシステムであり、すでに1世紀を超える進化の歴史をもつ技術システムである。

ミックに干渉し合い、時には需要側が供給側に入れ替わることも生じるなかで、細かく需給バランスをとりながら最適化を図らねばならない。エネルギーという物理的なシステムのダイナミクスだけではなく、多様な価値観にもとづく生活行動によって生じる社会経済システムのダイナミクス、具体的には、電力価格のリアルタイムプライシング等に関するメカニズムの研究も必要である。さらに、環境に依存した再生可能エネルギーの不安定性を克服するために、精度の高い地域気象予測を取り入れた予測制御や、人間の生活習慣を組み込んだ需要予測など、予測技術の深化も重要な鍵となる。

4. グリーンイノベーションはシステム科学技術と制御に何をもたらすか？

1章で第4期科学技術基本計画が定式化したグリーンイノベーションの3つの重要課題は、技術による社会変革の目標を提示したものと考えることができる。社会変革は最終的には政治が担うものと思われがちであるが、実際は技術が生み出した社会変革の方が例も多いし、その結果は生活の隅々に及ぶだけに影響の度合いはかえって深刻である。たとえば前世紀初めのフォードによる自動車の大量生産はモータリゼーションの波を全米に引き起こし、アメリカ社会を大きく変革した。1980年代の情報化社会の到来も、計算機技術の発達を引き起こしたものである。グリーンイノベーションもそれが実現すれば同程度の社会変革をもたらすはずである。これまで技術の進歩がもたらした結果としての社会変革と異なり、グリーンイノベーションはあらかじめ明確に目標と筋道が定められ、政策として意図された変革である。課題解決型の科学技術によって初めてこのような変革を企図することが可能となったと言えるし、一方ではこのような企図された社会変革を成し遂げなければ社会が持続できなくなるほど地球環境が切迫した状態におかれているとも言えよう。

ここで強調したいのは、科学技術がもたらす社会変革は、同時にそれを担う科学技術の変革を伴うということである。フォードがもたらしたモータリゼーションは、自動車とその生産方式の変革だけでなく、市場調査や品質管理などのさまざまな手法を生み出し、生産工学の質的な転換をもたらした。情報化社会の到来はダウンサイジングとネットワークを通じて計算機科学に新しい次元をもたらした。グリーンイノベーションは制御とシステムの世界に大きな変革をもたらすはずである。

制御工学の歴史を振り返ると、制御の対象となるシステムの規模が大きくなり複雑さが増大するにつれて設計法の進化拡張が図られてきた。1入力1出力システムから多入力多出力システムへの進化はその典型的な例であり、その進化は「状態空間法」という新しいパラダイムを生み出した。さらに、制御系の設計理論が現実適用されるにつれ

てそれまで視野の外にあった実世界の不確かさに対処することが必要となり、ロバスト制御という新しい分野が一躍制御理論の中心を占めるようになった。しかし、現代社会におけるシステムの増大する規模と複雑さとそれがもたらす不確かさは制御の視点から考えると従来とは質的に異なる新しいアプローチを必要としているように思われる。規模と複雑さと不確かさだけでなく、現代のシステムは「社会」を組み込むことによるさまざまな新しい様相を示している。

システム工学や経営学の分野では、上記のようなシステムの新しい様相を表現するため、「システムのシステム」(System of Systems)とよばれる概念が提起されている⁹⁾。システムのシステムは、言葉の表わす通り、システムを要素としてもつシステムであり、つぎのような特性をもつ。

- 各要素システムは、切り離されても独自の機能を発揮する。
- 各要素システムはそれ自身の独自の目的を達成するために独立に運用することが可能である。
- 各要素システムは異種の(ヘテロロニアスな)技術を体現している。
- 要素システムの結合によって予期しない挙動が発生する可能性がある。
- きわめて大規模である。

上記の特徴は社会に組み込まれた技術システムがもつ共通の性質を表現しており、イノベーションはまさにシステムのシステムを実現することと言える。たとえばすでに述べたスマートグリッドは上で述べた特徴をほぼ忠実に兼ね備えたシステムのシステムの象徴的な例である。「システムの制御」から「システムのシステムの制御」へ飛躍することが、グリーンイノベーションを駆動する制御の研究コミュニティに課せられた課題である。今制御の世界で活発に展開されているネットワーク型の制御や分散制御の理論構築は、このための有力な手段となることが予想される。

2章で述べた「システム構築戦略研究」は、システムのシステムを制御するための枠組みとして位置づけられる。

5. むすび

新成長戦略では、わが国は課題を解決するモデル国となり、その知見を諸外国に輸出してその先進性を売り込むことを目指すことが明快に謳われている。エネルギーシステムに関連する個別の要素技術は非常に多いが、これら全体を最適化し、統合・パッケージ化したシステムとして売り込んでいかなくては、海外に受け入れられる国際競争力をもつことはありえない。たとえば水ビジネスにおいて、日本が非常に優れた膜処理技術や水道漏水対策技術などの個別要素技術を持ちながら、トータルシステムに強い国際水メジャーによる寡占を許している状況を見れば明らかである。

多数のステークホルダが介在する裾野の広いシステムの

システムを個々の企業が構築することは難しい。種々の企業が有機的に連携しあい、技術経営戦略を考えていくことが求められるが、その際の土台として重要な役割を果たすと考えられるのが、アカデミアが主体となって構築する理論に裏打ちされた中立的なシステム技術のプラットフォームである。

スマートグリッドが実現していくまでの間には、デバイスの性能向上や社会制度の変更、ユーザーの価値観の変化など、時間とともに環境条件が変わる。また、対象とする地域によって、導入規模や環境条件はさまざまである。それぞれのケースにおいて、個別対応でシステム構築をしていては追いつかない。環境・エネルギー分野において、同じ敗退を喫さないために、電力品質、コスト、エネルギー効率、CO₂削減量などの異なる視点での評価の有効性を担保し、さまざまな規模や地域性に基づく制約に対応可能な普遍的なシステムのモデル化手法等を創出し、エネルギーマネジメントシステムの理論的基盤を構築しておくことは喫緊の課題である。

ここまで述べてきたように、グリーンイノベーションを実現するためには、要素技術のブレークスルーと並んでそれをシステムに組み上げることを通して社会の期待に整合させるためのシステム科学技術が不可欠である。わが国の科学技術ではこれまで軽視されがちであったシステム科学技術の振興を図り、イノベーション戦略の重要な一環として位置づけることが必要である。幸い第4期科学技術基本計画ではシステム科学技術の重要性が陽に記述されており、第4期の計画期間を通じてシステム科学技術をわが国の科学技術のあらゆる側面で活性化させ根付かせることは、わが国が将来にわたって科学技術のリーダーシップを確保し続けるためにどうしてもやらねばならないことである。計測自動制御学会制御部門では、すでにエネルギー・環境システム制御技術調査研究会が2010年1月より発足し活発な研究活動を行っていることは心強い。この動きを強め、さらに大きな研究活動の輪が広がることを期待したい。

本稿ではグリーンイノベーションにおける制御の課題を主としてシステムサイドから述べてきたが、要素技術でも制御は重要な役割を演じていることも最後に付け加えておきたい。たとえば風力タービンの周波数制御や蓄電池の制御では高度な制御理論が使われている¹⁰⁾。ロバスト制御の大家であるMilanese教授が発明した風型の風力発電機は、制御が根幹となる新しい再生可能エネルギーの形態として注目を集めている¹¹⁾。また、グリーンイノベーションの柱の1つである省エネでは、制御はこれまで多くの実績を上げてきた。最近20年間の家電製品の目覚ましい省エネ化はそのほんの一例である。今後もその傾向は変わらないであろう。

本稿執筆に当たってさまざまな情報をいただき、さらに筆者らが勤務するJST研究開発戦略センターにおける本稿

に関連する活動にご協力いただいている早稲田大学内田健康先生、東京工業大学藤田政之先生をはじめとする方々に、感謝の意を表する。(2011年10月25日受付)

参考文献

- 1) 首相官邸:新成長戦略, <http://www.kantei.go.jp/jp/sinseichou-senryaku/> (2002)
- 2) 内閣府:第4期科学技術基本計画, <http://www8.cao.go.jp/cstp/kihonkeikaku/kihon4.html> (2012)
- 3) E. Camacho, et al.: Control for renewable energy and smart grids, The Impact of Control Technology (T. Samad and A.M. Annaswamy, eds.), IEEE Control Systems Society (2011)
- 4) JST 研究開発戦略センター:システム構築による重要課題の解決にむけて ~システム科学技術の推進方策に関する戦略提言~, <http://crds.jst.go.jp/output/pdf/10sp04.pdf> (2011)
- 5) 内閣府:平成24年度科学技術重要施策アクションプラン, <http://www8.cao.go.jp/cstp/siryu/haihu98/siryu3-2.pdf> (2012)
- 6) 内閣府:アクション・プラン施策パッケージの概算要求のとりまとめについて, <http://www8.cao.go.jp/cstp/budget/saisyu/honbun1.pdf> (2010)
- 7) JST 研究開発戦略センター:科学技術未来戦略ワークショップ報告書「再生可能エネルギーと分散制御システム」, <http://crds.jst.go.jp/output/pdf/11wr04.pdf> (2011)
- 8) Z. Ruihua, et al.: New challenge to power system planning and operation of smart grid development in China, Proc. IEEE Conf. Power System Tech., 1/7 (2010)
- 9) N.W. Maier: Architecting Principles for Systems of Systems, Systems Engineering, 1-4, 267/284 (1998)
- 10) 齊田, 渡辺:充放電による劣化を考慮したリチウムイオンバッテリーモデル, 第40回制御理論シンポジウム資料, 1/8 (2011)
- 11) M. Milanese, et al.: Kitenery technology for offshore wind plants, Airborne Wind Energy Conference 2011 (2011)

[著者紹介]

木村英紀君 (名誉会員, フェロー)



1970年東京大学大学院博士課程修了, 工学博士。大阪大学基礎工学部, 工学部で制御理論とその応用に関する教育と研究に従事, 95年東京大学工学系大学院教授, 2000年より理化学研究所生物制御システムチームリーダー, 07年より理化学研究所BSI-トヨタ連携センター長, 生物制御, 脳型ロボットの研究に従事, 09年よりJST研究開発戦略センター上席フェローを兼務。本会論文賞を5回受賞, IFACよりPaper Prize Awardを2回受賞, Giorgio Quazza Medal, IEEE CSSよりGerge Axelby Award, 本会フェロー, IEEE, IFACフェロー。

武内里香君 (正会員)



2001年東京大学理学部卒業, 06年東京大学大学院理学研究科博士課程修了, 理学博士。産業技術総合研究所テクニカルスタッフ等を経て, 08年より科学技術振興機構研究開発戦略センターフェロー。現在はおもにシステム科学分野の研究開発戦略策定に従事。

