

## 3.2 制御区分

### 3.2.1 学習制御／適応制御

#### (1) 研究開発領域名

学習制御／適応制御

#### (2) 研究開発領域の簡潔な説明

時々刻々と変動する環境下における未知の動特性をもつシステムを制御するために、観測情報を基に制御器自身も変動・適応させるような制御方式とその設計法に関する研究開発。および、観測された現実の情報と目標との誤差を学習することで制御入力を適切に構成する手法に関する研究開発。なお、制御のみならず、未知の動特性を、上記のような制御方式によってモデル化または推定を行う研究開発も、本研究開発領域に含む。

#### (3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

##### (3-1) 適応制御

時々刻々と変動する環境下における未知の動特性をもつシステムを制御するために、観測可能な情報を基に制御器自身も変動・適応させるような制御方式を適応制御という。1950年代に、目標とする応答に追従させるべく適応的に対象のモデルを同定し制御器を順応させるモデル規範型適応制御 (Model Reference Adaptive Control System; MRACS) および、制御器のパラメータをリアルタイムに調整するセルフチューニングレギュレータ (Self Tuning Regulator; STR) が発案されたことが契機である。その後、MRACS と STR は、1960年～70年代にかけて、現代制御理論や非線形・時変システムの安定論の成果を取り入れる形で、理想環境下における基礎理論としては習熟した領域として確立した<sup>1, 2)</sup>。さらに、不確かさに対するロバスト性が1980年代に活発に研究され、適応制御に用いる信号の性質などの観点から、モデル化誤差と安定性の関連などの理論的成果もいくつか得られている<sup>3-5)</sup>。その一方で、不確かさを陽に考慮した制御器で対応するロバスト制御と、リアルタイムで対応する適応制御の関係については、現時点でも理論的解析や有機的な融合はされていない。

1990年代に入ると、理論的に大きな壁であった相対次数の問題を緩和する目的で提案された高階調整法やバックステッピング法<sup>5)</sup>など、理論的に注目すべき発展的研究がなされた<sup>1, 2, 6)</sup>。さらに1990年代後半には、適応制御の一部の研究者は、状況に応じて制御器の構成を切り替えるハイブリッド制御の研究領域に移行し、いくつかの興味深い成果を残している<sup>7)</sup>。2000年代に入ると、目標とする評価関数が未知の場合に、その勾配をリアルタイムに求めることで制御を行う極値制御<sup>8)</sup>も提案された。これは現在でも活発に研究されている適応制御のトピックのひとつである<sup>9-11)</sup>。特に最近では、太陽光や風力など時々刻々と変動する自然エネルギーを利用した電力最大化問題への極値制御の適用がいくつか研究されており、その有効性も示されている<sup>12, 13)</sup>。

適応制御の研究対象も、より現実的な問題設定に近い非線形、時変、分布定数などに拡張されてきている<sup>14)</sup>。特に非線形系においては、等価的に線形系としてはめ込むことで安定領域への軌道の吸収を図る I&I 法など非線形制御理論で2000年代に新たに確立

した手法を取り入れた非線形適応制御の方式が提案されている<sup>14)</sup>。そのほか、マルチエージェント系の適応制御、分数次微分システムの適応制御、クォータニオン等を用いた画像ベースの適応制御など、これまでにない新しい領域でも研究されている。そして、このような理論の発展と並行する形で、計算機の高速化と高精度化に伴い、自動車、化学プロセス、ロボティクスなど、国内外を問わず産業界への適応制御の応用も積極的に行われている。最近では医用工学やシステムバイオロジーなどでも、適応制御の応用例が見られるようになってきた<sup>9, 15)</sup>。

そして、データに基づいてモデリングと制御をリアルタイムに行う適応制御の究極形として、モデル化と制御をデータという土壌で一括して行い、データから直接的に制御器パラメータを求める方法 IFT が 1990 年代に提案され欧州を中心に研究されている。これらに続く方法として、VRFT、FRIT なども提案され欧州および国内で実応用も視野に入れて活発に研究されている<sup>16-20)</sup>。最近では、これらの時変システムへの適用や<sup>21)</sup>、リアルタイム化に向けた発展研究<sup>20)</sup>も進められている。

### (3-2) 学習制御

未知の動特性をもつ対象に対し、そのとり得る入出力間のデータのみを反復的に用いることで、目標とするような挙動をもたらす制御入力を生成する手法である。1980 年代中期に日本の研究者により提唱された **Betterment Process** がその研究の始まりであり<sup>22)</sup>、国内では、ロボット制御の分野を中心に精力的に研究され現在に至っている。国外でも、**Iterative Learning Control (ILC)** として学習制御が提唱され<sup>23)</sup>、医療や福祉機器への応用も含め盛んに研究が行われている。また、英国の一派とポーランドの多次元システムの研究者が共同で学習制御を 2 次元システムとしてとらえ（時間軸と学習回数軸を独立変数）、現在も精力的に研究を進めている<sup>9)</sup>。

一方、学習とは人間に備わっている能力であるから、人間の学習メカニズムの解明も、学習制御の発展に寄与するはずであるし、逆に新たな制御スキームが、人間の学習理解につながることも考えられる。そこで、まず、人間の学習メカニズムのひとつのモデルとして国内で **Feedback Error Learning (FEL)** という学習スキームが提案された<sup>24)</sup>。これは二自由度制御系のフィードフォワード部（先んじて、行動を見越すところに相当）が、行動を通して適切に学習するモデルである。逆に、制御の観点から、このスキームを理論的に深く考察した興味深い研究がされている<sup>25)</sup>。

さらに、人間が生まれながらに自然にもっている手先の技量の学習メカニズムを解明する研究も国内で行われ、数理的に整った体系としてまとめあげられつつある<sup>26)</sup>。また、近年「移動知」という新たな領域も提案され<sup>27, 28)</sup>、そこでは、人間や生物が環境に適応し、適切な行動を学習していく過程が、さまざまな分野の研究者によりアプローチされており、異分野融合研究の非常に良いモデルであるともいえる。

このように、一口に学習制御といっても多岐にわたる研究がある。そして、制御のひとつの手法というだけでなく、人間の行動理解、神経科学、医学、運動生理学、2 次元システムなど多岐にわたる領域との融合により発展している分野でもあり、今後もそのような形態で広く展開していくものと予測できる。

### (3-3) 適応モデリング・学習モデリング

適応的または学習的な機構によりモデル化する研究も行われている。適応制御、とく

に間接法では対象を適応的に同定することでそれに適した制御則を逐次更新しているので、適応的なモデリングや同定は前提の技術として行われている<sup>29)</sup>。直接法とよばれる適応制御のクラスでも、制御則自身を目的に応じて同定しており、陰に対象のモデル化をしているともいえる。実際に先述の FEL の 2 自由度系におけるフィードフォワード部の学習は対象の逆モデルを同定することに対応し<sup>22, 23)</sup>、ある意味で適応モデリング・学習モデリングの成功例といえる。また内部モデル制御のような制御対象のモデルを内包した制御器のパラメータをオフライン学習によりチューニングすることで制御とモデリングを同時に行う研究も行われており<sup>30, 31)</sup>、制御とモデル化の不可分性<sup>32)</sup>に関わる問題の一つの糸口として、今後の発展を待ちたい。一方の学習制御では間接的に対象の動特性を習得することで、最適な制御入力を生成するともいえる。そのことを活用した同定やモデリングの研究も行われ<sup>33)</sup>、同定手法のひとつの有用なアプローチとして確立しつつある。

モデルを、数式の関係のみならず現象背後に潜む相関関係の解明まで拡大すると、近年、興味深いいくつかの研究が活発に研究されている。とくに、ビッグデータとも関連の深い大量のデータの機械学習や統計的学習によるモデル化、疎な情報を活用したスパースモデリング<sup>34)</sup>、および、データ同化<sup>35)</sup>と呼ばれる気象などの大規模データの学習によるパラメータ同定は「(データの)学習モデリング」の代表例であろう<sup>36)</sup>。また、適切な制御則を選択・学習するという意味で、制御の上位に位置する判断機構の学習まで拡大すると、人間が適切な制御のもとで最適な行動を行うための脳のメカニズムの解明が精力的に研究されている<sup>37)</sup>。どちらも、これまで述べてきた制御とは趣の異なる複合領域に存在するが、どれもが横断的な学問であるが故に、今後の動向と融合可能性について注目に値すると考えられる。

#### (4) 科学技術的・政策的課題

- ・より広い意味での「学習」の領域との融合が望まれる。学習制御という領域は、他の分野との融合で発展した経緯もあるが、今後は、さらに、機械学習やデータマイニングなどの領域の成果を積極的に取り入れる、また、研究者同士の活発な交流を深めることも重要な課題である。例えば、計算機パワーも援用しつつ大量のデータを相手にしたような学習制御の新しい展開が望まれる。(3-2)で示したスパースモデリング、データ同化、人間の判断機構の解明など、さらなる他の領域との融合が発展的方向のためのひとつの課題である。
- ・大規模複雑な問題に対応するような適応・学習制御の体系だった理論が構築途上であると考えられる。エネルギー、環境、経済など昨今の国内外における制御に対する需要に応え得る適応制御や学習制御の発展も重要である。

#### (5) 注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

- ・IFAC（国際自動制御連盟）は、3年に1度、適応制御や学習制御に関連する研究を中心としたワークショップ Adaptation and Learning on Control and Signal Processing（ALCOSP）を開催し、すでに10回を数えている<sup>9)</sup>。毎回世界各国からのこの分野の研究者による最新成果が発表されている。第12回は2016年度にオラン

ダで開催される予定である。なお、2004年には日本で開催されている。

- ・ 欧州、特にスペイン、イタリア、スイス、北欧などで、PID 制御の適応的なオートチューニングに関する研究開発の一環として、制御系設計 CAD 上のツールボックスや専門のベンチマーク問題が開発され、知識の共有に向けた動きが見られる<sup>37)</sup>。
- ・ 英国のサザンプトン大学の一派とポーランドの多次元システムの研究者グループが共同で、学習制御を 2 次元システムとしてとらえた（時間軸と学習回数軸を独立変数）研究を提唱し、現在も精力的に研究を進めている。多国間共同研究の成功したひとつのモデルケースともいえる<sup>10-12)</sup>。
- ・ 文部科学省科学研究費（科研費）特定領域研究「移動知」が平成 17 年度～22 年度まで遂行され、非常に有意義かつ学術的価値の高い研究成果が得られている<sup>27, 28)</sup>。本報告の冒頭で述べたような適応制御や学習制御よりも、もっと広い意味でのコミュニティ（ロボット、制御、情報、医学、計算機など）による研究体制であり、環境に適応する行動や学習メカニズムの解明という共通の目的に向けた異分野融合が実現したといえる。
- ・ 科研費新学術領域研究「予測と意思決定の脳内計算機構の解明による人間理解と応用」が平成 23 年度より遂行されている<sup>37)</sup>。これは神経科学、医学、心理学、計算機科学などの多岐にわたる分野の研究者が結集して、人間の判断や行動認知に関わるメカニズムを解明しようとするプロジェクトであり、人間の行動を適切に制御する役割が通常の制御とするならば、その上位に存在する学習モデリングの話題である。
- ・ 科研費新学術領域研究「スパースモデリングの深化と高次元データ駆動科学の創成」が平成 25 年度より遂行されている<sup>38)</sup>。これは物理現象や気象現象などの大規模なデータを扱う際に、スパースモデリングや機械学習などの統計的手法をベースとして、現象の背後に潜む関連性を抽出、すなわちモデリングする試みであり、広い意味での学習モデリングの話題である。
- ・ ニューラルネット（NN）の高次元学習化が可能になってきている。これはクリフォード代数とよばれる複素数を高次元化した量が導入・開発されたことが契機であり、NN が制御の分野に登場した 20 年ほど前に比べて極めて高次元の学習も可能になっている<sup>39)</sup>。今後、この新しい NN がより広い意味での学習制御のツールとして浸透していくのではないかと考えられる。
- ・ 近年、データに基づく制御器パラメータチューニング法が、イタリア、スペイン、スイスなどの欧州、および日本を中心に活発に研究され、その応用例も増えつつある。欧州では特に VRFT が、日本では FRIT といった手法が中心であるが、日本の研究者が IFAC のシンポジウム（ALCOSP '10、PID '12、ALCOSP '13）で FRIT の OS を組み成果を発表するなど精力的に活動し、同時に研究者層を増やしつつある。なお、統計数理研究所の公開講座のテーマ<sup>16)</sup>や学会誌特集記事のテーマ<sup>20)</sup>などとしても挙げられている。また、日本学術振興会プロセスシステム工学第 143 委員会においては、E-FRIT という手法が開発され、主に化学プロセスを中心に、顕著な成果をあげている<sup>17)</sup>。

（6）キーワード

適応、学習、適応制御、学習制御、適応システム、適応推定、適応同定、データ駆動型制御、知能、最適化

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>従来の適応制御の研究に加え、非線形系、分布定数系、マルチエージェント系、分数次微分システムなどへの展開といった新しい動きも見られる<sup>6, 15)</sup>。</li> <li>データ駆動型制御器チューニング法が研究者層を増やしてきている<sup>16, 20)</sup>。</li> <li>移動知<sup>27, 28)</sup>など広い意味での学習モデリングに関する研究<sup>36, 37)</sup>も見られる。</li> </ul>
	応用研究・開発	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>メカトロニクス、化学プラントを対象として連綿と研究され成果をあげている<sup>9, 15)</sup>。</li> </ul>
	産業化	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>化学プロセスへのセルフチューニング制御の適用が活発<sup>1)</sup>。</li> <li>日本学術振興会プロセスシステム工学第143委員会により、制御器パラメータチューニング法 E-FRITが、プロセス産業界で浸透してきている<sup>17)</sup>。</li> </ul>
米国	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>極値探索制御が提案され、その応用も含め研究が活発にされている<sup>8-11)</sup>。</li> <li>分布定数系、むだ時間系など、従来よりも適用範囲を広げた適応制御の理論の発展的研究が盛んに行われている<sup>14)</sup>。</li> </ul>
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>論文や国際会議などでいくつかの発表が見られる<sup>9-11)</sup>。</li> </ul>
	産業化	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>論文や国際会議などでいくつかの発表が見られる<sup>9-11)</sup>。</li> </ul>
欧州	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>英国、ポーランドなどで学習制御を2次元システムの制御としてとらえた研究が理論の観点から精力的にされている<sup>9-11)</sup>。</li> <li>データ駆動型制御器チューニング手法の理論・応用双方で研究が活発<sup>9-11, 38)</sup>。</li> </ul>
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>北欧、イタリア、スイス、スペインなどで、データ駆動型制御器チューニングの応用開発が活発に研究されている<sup>16-20)</sup>。</li> </ul>
	産業化	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>PIDのオートチューニングのパッケージ化と産業応用が活発に行われている<sup>38)</sup>。</li> <li>工業以外でも、福祉、医用機器への適応・学習制御の適用も行われている<sup>9-11)</sup>。</li> </ul>
中国	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>非線形系への適応制御など、理論の発展的研究が活発に研究されている<sup>9-11)</sup>。</li> <li>米国や欧州などに留学または勤務している中国人研究者も活発に研究している<sup>9-11)</sup>。</li> </ul>
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>ロボットなどを対象としたメカトロニクス系で活発に研究されている<sup>9-11)</sup>。</li> <li>論文や国際会議などでいくつかの成果が見られる<sup>9-11)</sup>。</li> </ul>
	産業化	△	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>産業界では特筆すべき成果は現状では見られない。</li> </ul>
韓国	基礎研究	△	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>理論面で特筆すべき成果は現状で見られない。</li> </ul>
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>応用研究で特筆すべき成果は現状で見られない。</li> </ul>
	産業化	△	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>産業界で特筆すべき成果は現状では見られない。</li> </ul>

研究開発領域  
制御区分

## (註1) フェーズ

基礎研究フェーズ : 大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ : 研究・技術開発 (プロトタイプの開発含む) のレベル

産業化フェーズ : 量産技術・製品展開力のレベル

## (註2) 現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎ : 他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○ : ある程度の活動・成果が見えている、

△ : 他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、× : 特筆すべき活動・成果が見えていない

## (註3) トレンド

↑ : 上昇傾向、→ : 現状維持、↓ : 下降傾向

## (8) 引用資料

- 1) 適応制御におけるニュートレンド. 計測と制御. 1996, vol. 35, no. 6.
- 2) 宮里義彦. 適応制御の回顧と展望. 計測と制御. 2013, vol. 52, no. 4, p. 361-367.
- 3) 金井喜美雄. ロバスト適応制御. オーム社, 1990.
- 4) Narendra, N. S.; Annaswamy, A. M. Stable Adaptive Systems. Prentice-Hall, 1989.
- 5) Kritic, M.; Kanellakopoulos, I.; Kokotovic, P. V. Nonlinear and Adaptive Control Design, John Wiley and Sons, 1995.
- 6) 適応学習制御理論の新潮流. 統計数理研究所公開講座資料, 2006.
- 7) Morse, A. S. Control Using Logic-Based Switching. Springer, 1997.
- 8) Ariyur K. B.; Kritic M. Real-Time Optimization by Extremum-Seeking Control. Wiley-Inter Science, 2003.
- 9) Preprints of 8th, 9th, 10th, 11th IFAC Workshop on Adaptation and Learning on Control and Signal Processing. 2004, 2007, 2010, 2013.
- 10) Preprints of 17th, 18th IFAC World Congress. 2008, 2011.
- 11) Proceedings of 43rd, 44th, 47th, 50th, 51st IEEE Conference on Decision and Control. 2004, 2005, 2008, 2011, 2012.
- 12) Ghaffari, A.; Kritic, M.; Seshagiri S. Power Optimization and Control in Wind Energy Conversion Systems Using Extremum Seeking. IEEE Transactions on Control System Technology. 2014, vol. 22, no. 5, p. 1684-1695.
- 13) Li, X.; Li, Y.; Seem, J. E. Maximum Power Point Tracking for Photovoltaic System Using Adaptive Extremum Seeking Control. IEEE Transactions on Control System Technology. 2013, vol.21. no. 6. p. 2315-2322.
- 14) Kritic, M. Delay Compensation for Nonlinear, Adaptive, and PDE Systems. BirkHauser, 2009.
- 15) 計測自動制御学会制御部門第1回マルチシンポジウム. 2014.
- 16) モデルフリー制御器設計の新展開 FRIT 法の基礎理論と応用. 統計数理研究所公開講座資料, 2011.
- 17) 加納. 直接的 PID 調整法 E-FRIT サイト. <http://e-frit.chase-dream.com/>
- 18) Stefanovic, M.; Safonov, M. G. Safe Adaptive Control - Data-Driven Stability Analysis and Robustness Synthesis. Springer, 2011.
- 19) Bazanella, A. S.; Campestrini, L.; Eckhard, D. Data-Driven Controller Design - The H<sub>2</sub> Approach. Springer, 2012.
- 20) データ駆動型制御 - 新機軸と新地平. 計測と制御. 2013, vol. 52, no. 11.

- 21) Proceedings of 52nd IEEE Conference on Decision and Control. 2013.
- 22) 川村, 有本. 動的システムの学習的制御法 (Betterment Process) の提案. 計測自動制御学会論文集. 1986, vol. 22, no. 1, p. 56-62.
- 23) Moore, K. L. Iterative Learning Control for Deterministic Systems. Springer-Verlag, 1993.
- 24) Kawato, M. Feedback error learning Neural network for supervised motor learning. Advanced Neural Computers. R Eckmiller, R. ed. Elsevier Science Publishers, 1990, p. 365-372.
- 25) Miyamura, A.; Kimura, H. Stability of feedback error learning scheme. Systems and Control Letters. 2002, vol. 45, p. 303-316.
- 26) Arimoto, S. Optimal linear quadratic regulator for control of nonlinear mechanical systems with redundant degrees-of-freedom. SICE JCMSI. 2011, vol. 4, no. 4, p. 289-294.
- 27) 浅間, 矢野, 石黒, 大須賀編. 移動知 1 適応行動生成のメカニズム. オーム社, 2010.
- 28) <http://www.race.u-tokyo.ac.jp/~ota/mobiligence/index.html>
- 29) Goodwin, G. C.; Sin, K. S. Adaptive filtering. Prediction and Control. Prentice-Hall, 1984.
- 30) 金子, 藤井. 制御器の学習・調整によるプラントの閉ループ同定. システム/制御/情報. 2006, vol. 50, no. 3, p. 100-105.
- 31) Kaneko, Osamu; Miyachi, Makoto; Fujii, Takao. Simultaneous Updating of Model and Controller Based on Fictitious Reference Iterative Tuning. SICE Journal of Control Measurement and System Integration. 2011, vol.4, no. 1, p.63-70.
- 32) 池田雅夫. モデリングと制御器設計の不可分性. システム/制御/情報. 1993, vol. 37, no. 1, p. 7-14.
- 33) Campi, M. C.; Sugie, T.; Sakai, F. An iterative identification method for linear continuous time systems. IEEE Transactions on Automatic Control. 2008, vol. 54, no. 7, p. 1661-1669.
- 34) 田中利幸. 圧縮センシングの数理. 電子情報通信学会 基礎・境界ソサイエティ Fundamental Review. 2010, vol. 4, no. 1, p. 39-47.
- 35) 樋口知之編著. データ同化入門—次世代のシミュレーション技術. 朝倉書店, 2011.
- 36) 科学研究費新学術領域研究「スパースモデリングの深化と高次元データ駆動科学の創成」. [http://sparse-modeling.jp/public\\_research/member.html](http://sparse-modeling.jp/public_research/member.html)
- 37) 科学研究費新学術領域研究「予測と意思決定の脳内計算機構の解明による人間理解と応用」. <http://decisions.naist.jp/index.html>
- 38) IFAC Symposium on Advances in PID Control. 2012.
- 39) コンピュータショナルインテリジェンスの新展開—クリフォード代数など高次元表現中心として—. 計測と制御. 2012, vol. 51, no. 4.

### 3.2.2 ロバスト制御

#### (1) 研究開発領域名

ロバスト制御

#### (2) 研究開発領域の簡潔な説明

システムの不確かさに対して性能が変化しないロバストな（頑強な）制御系の解析と設計の方法論の究明。

#### (3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

ロバスト制御とは、システムがもつ不確かさへの対処を目的とした制御系の解析と設計のための方法論のひとつである。その特徴は、不確かな（バラツキをもつ）制御対象を「モデルの集合」でとらえ、実際の制御対象がどの集合要素であったとしても適切に振る舞う「一様な性能」を実現するコントローラ的设计を考える点にある。1980年ごろから、その問題設定の数理的な理解が進み、国内外で急速に研究が進展した。

制御理論の歴史は、バラツキのある負荷変動の下で蒸気機関の回転数を安定化したいという要求からスタートしたものであり、不確かさへの対処の歴史である。したがって、ロバスト制御の成立以前の制御理論（1940年ごろから研究が開始されたシステムの伝達関数表現に基づく古典制御理論や、1960年ごろから研究が開始されたシステムの状態方程式表現に基づく現代制御理論）でも、不確かさに合理的に対処したいという問題意識は存在した。実際、古典制御理論では、ゲイン余裕、位相余裕など、パラメータの変動に対する頑強さを定量化するための指標が確立されている。ただし、考えられている変動パラメータはスカラであり、取り扱っているのは非常に単純化した状況のみである。一方、現代制御理論では、システムを駆動する信号として、確率信号としてのノイズを導入し、不確かな振る舞いの統計的な解析を可能とした。それは、統計的最適制御理論として完成し、いくつかの実用化事例につながった。しかし、制御対象の正確なモデルと（白色雑音など、統計的解析の容易な）統計的性質の素直なノイズの組み合わせは、現実の制御系設計の状況を広くカバーできるものではなく、実用化事例はそれ以上広がらなかった。実際、平均や分散など、ごく少数のパラメータで不確かな振る舞いを記述しようとするのは、記述力の限界がある。

ロバスト制御理論の始まりとみなせるのは、G. Zames による  $H^\infty$  制御であろう<sup>1)</sup>。これは、システムを駆動するノイズに対して、白色雑音などのような統計的性質を仮定するのではなく、パワーが有界なクラスを考え、最悪な振る舞いとなるものを抑制する制御系設計を考えるものである。つまり、ノイズの集合を考える点に特徴がある。この定式化はゲインが有界な不確かな要素をもつモデル集合を考えることと実は等価であり、そのことが明らかになってロバスト制御の理論が発展した。回路理論で知られていた補間問題を援用して、木村がロバスト安定化問題の完全な解を与えたのは、これら研究の黎明期のことである<sup>2)</sup>。その後、Doyle らによる  $H^\infty$  制御のリッカチ方程式による解法が明らかになった<sup>3)</sup>。これにより、ゲインが有界な不確かな要素（多入出力系）がひとつの場合については、完全に解かれた。引き続き、不確かな要素がシステム内に構造をもって複数含まれている複雑な、しかし実用的にも非常に重要な場合なども含め、研究

が進められた<sup>4, 5)</sup>。これらの研究は主に欧米の研究者が牽引したが、山本が提案したサンプル値制御系のリフティング表現<sup>6)</sup>がデジタルシステムに対するロバスト制御の研究の基礎を築くなど、日本発の研究も存在感を示した。

このような研究の中で、システムの集合の記述には（方程式より）不等式を用いる方が自然であることから、1990年ごろより、線形行列不等式（Linear Matrix Inequality; LMI）に基づくシステムの解析と設計が注目を集めた<sup>7, 8)</sup>。これは半正定値計画問題となって、凸最適化の研究へもインパクトを与えた<sup>9)</sup>。この流れは、岩崎と原によるLMIを用いたシステムの周波数特性の精緻な解析法<sup>10)</sup>や、多項式最適化のサブクラスであるSum of Squares of polynomials（SoS）を援用した不確かなシステムのロバスト性解析の研究<sup>11)</sup>、LMIやSoSを用いた研究をサポートするための計算ツールの開発<sup>12)</sup>へとつながっている。ただし、規模の大きな問題については、計算量がボトルネックとなることが明らかになるにつれ、ロバスト制御の研究は、課題解決の中で新たなブレークスルーを目指している。

なお、これらの研究を進めるにあたって、International Federation of Automatic Control (IFAC) では Technical Committee 2.5 on Robust Control (TC 2.5)<sup>13)</sup>、IEEE の Control Systems Society (CSS) では Technical Committee on Computer-Aided Control System Design（後に Computational Aspects of Control System Design、いずれも TC-CACSD）<sup>14)</sup>や Systems with Uncertainty (TC-SU)<sup>15)</sup>などの国際的なグループをつくり、研究交換がなされてきた。例えば、TC 2.5では1994年より3年ごとにロバスト制御に関するシンポジウムを開催しており、TC-CACSDも1980年代よりワークショップやシンポジウムをほぼ隔年で継続的に実施している。これらに対してTC-SUは2009年活動開始と比較的新しく、TC 2.5やTC-CACSDとも連携しながら、国際会議でのオーガナイズドセッションの企画などを中心に活動している。一方、日本では、計測自動制御学会を中心に、1980年代の終わりから現在に至るまで、ロバスト制御に関する研究会やセミナーが、テーマの切り口を最新の内容に更新しつつ、継続的に実施されている<sup>16)</sup>。

いずれにせよ、実際のシステムの振る舞いを数理的モデルによって記述しようとするとき、精緻なモデルを得ることは（知識の限界、時間的制限、経済的制約より）現実的ではない。非線形性や無限次元性などに起因するかもしれない不確かさを、平均や分散などの統計的指標ではなく、集合としてとらえることは、理論と実際のギャップを埋める重要なアプローチのひとつであり、いまやモデル集合を出発点とすることは、制御理論における問題設定の常識となった<sup>17)</sup>。また、このようなロバスト性の捉え方は、制御理論の枠を超え、経済学<sup>18)</sup>、複雑ネットワーク<sup>19)</sup>、生物学<sup>20)</sup>、最適化<sup>21)</sup>など、他分野へも広がりつつある。

#### （４）科学技術的・政策的課題

- ・多様な不確かさを記述可能なモデル集合の表現を用いると、問題の規模が大きくなるにつれて、モデル集合の解析やそれを用いた制御系設計のための計算複雑さが急速に増大する。計算複雑さを抑えるためには、凸集合などの解析の容易なモデル集合を用いればよいが、そうすると現実の状況とモデル集合により記述できる状況とのギャップ

ブが大きくなり、設計できる制御系の性能が頭打ちになる。このような、モデル集合の表現力と、制御系の解析と設計に必要となる計算量とには、トレードオフがある。この点が、ロバスト制御理論のさらなる発展のためのボトルネックとなっている。

- ・ロバスト制御の出発点は、対象システムをモデル集合としてとらえることであるから、実際のシステムをモデル集合として記述するための方法論の確立がポイントとなる。しかし、集合としてモデリングすることは、選択できるモデル構造の自由度が大きく、また決定すべきパラメータ数も多いことから、数多くの実験や試行錯誤を要求し、非常に時間がかかる。この点も、ロバスト制御系設計を実践する上でのボトルネックとなっている。
- ・科研費の分野などを見ればわかるように、わが国では、制御に関する研究予算が、電気、機械など伝統的研究分野に細分化して紐づけされている。そのため、ロバスト制御などのように、特定の対象に紐づけされない分野横断的な研究を力強く支援する枠組みがないため、せっかく生まれた萌芽的な理論的研究成果に対して、(ポストドクも含め)研究者を結集して十分な規模を確保し理論研究を強力に進めるといったような枠組みがない。そのため、研究成果が散発的なものになっており、非常にもったいない。

#### (5) 注目動向 (新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など)

- ・ロバスト制御系の解析と設計を確定的に行い検証するという枠組みで考える限り、計算複雑さの限界は回避することができない。そこで、ランダムイズドアルゴリズムにより計算複雑さを劇的に低減させつつ、ロバスト制御系の解析と設計を確率的な理論保証の下で行い検証するという枠組みが提案され、ここ 10 年で急速に研究が進展した<sup>22, 23)</sup>。
- ・制御対象の実際の応答データを実験により取得し、それより (制御対象のモデルを求めるのではなく) 制御系が望ましい振る舞いをするようなコントローラを直接設計する「データ駆動型制御」の研究が、最近集中的に行われている<sup>24, 25)</sup>。ロバスト制御的な観点は現時点のデータ駆動型制御にはまだとりいれられていないが、もしそれが可能となれば、ロバスト制御におけるモデリングというボトルネックを解消するための新たな方法論となり得る可能性がある。
- ・米国の NSF では、2008 年より、**Cyber Physical System** というテーマにより、制御理論研究を支援している<sup>26)</sup>。これは、実世界にある物理的制御対象をコンピュータ制御するという現代の制御工学のそもそもの枠組みを、ネットワーク上での実時間制御や組み込みシステムという視点から切り取ったテーマであり、分野横断的な制御理論研究の支援の枠組みとして、注目すべきものである。
- ・欧州では、2010 年より 4 年間、**Highly-Complex and Networked Control Systems (HYCON2)** という国際プロジェクトのもとで、共同研究の実施とともに、多国間で共同して人材育成を行うという先進的な取り組みを行っている<sup>27)</sup>。

（6）キーワード

ロバスト制御、 $H^\infty$ 制御、モデル化、ロバスト性、モデル集合、不確かなシステム、不確かさ

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ロバスト制御の黎明期に世界的な結果あり<sup>2)</sup>。</li> <li>・その後も継続して研究成果を蓄積<sup>4, 6, 8, 10)</sup>。</li> <li>・ランダムイズドアルゴリズム利用への取り組み<sup>23)</sup>、データ駆動型制御<sup>25)</sup>など、萌芽的研究成果などあり。</li> <li>・JST CREST EMS領域では理論研究への支援あり。</li> </ul>
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>・小規模な産学連携や実験室レベルでの実証実験あり。</li> </ul>
	産業化	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>・鉄鋼プロセスなど、製造プラントでの実施例あり。</li> <li>・<math>H^\infty</math>制御など標準的なロバスト制御手法は自動車のエンジン制御で実用化。</li> </ul>
米国	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ロバスト制御の黎明期には研究を牽引<sup>1, 3)</sup>。</li> <li>・その後も計測して研究成果を蓄積<sup>5)</sup>。</li> <li>・線形行列不等式や凸最適化ではブレークスルーとなる結果も<sup>7, 9)</sup>。</li> <li>・NSFの後押しで、テーマを広げつつ研究が継続的に支援されている<sup>26)</sup>。</li> </ul>
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>・実験室レベルでの実証実験は多数あり。</li> </ul>
	産業化	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>・半導体製造プロセスの制御など、製造プラントでの実施例あり。</li> </ul>
欧州	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>・確率的ロバスト性はイタリアで顕著な研究成果あり<sup>22)</sup>。</li> <li>・行列不等式などの取り扱いについても、理論的な成果<sup>11)</sup>や世界的に知られる計算ツール<sup>12, 28)</sup>など、顕著な研究成果あり。</li> <li>・データ駆動型制御の萌芽的成果<sup>24)</sup>。</li> <li>・国際的な枠組みにより、理論研究を継続的に支援<sup>27)</sup>。</li> </ul>
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>・産学連携による萌芽的な研究はあり。</li> </ul>
	産業化	△	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>・世界的に知られるような産業化の動きはなし。</li> </ul>
中国	基礎研究	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>・論文数は増加。</li> <li>・Chinese Academy of Sciences の Academy of Mathematics and Systems Scienceを中心に、活発に理論研究を実施。</li> </ul>
	応用研究・開発	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>・Chinese Academy of Sciences の Institute of Automation を中心に、積極的な研究開発を実施。</li> </ul>
	産業化	△	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>・産業化の動きなし。</li> </ul>
韓国	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>・論文数はそれなり。</li> </ul>
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>・日本企業との研究交流により技術情報を収集中。</li> </ul>
	産業化	△	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>・産業化の動きなし。</li> </ul>

（註1）フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

（註2）現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○：ある程度の活動・成果が見えている、

△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註3）トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

研究開発領域  
制御区分

## (8) 引用資料

- 1) Zames, G. Feedback and Optimal Sensitivity: Model Reference Transformations, Multiplicative Seminorms and Approximate Inverses. IEEE Trans. Automat. Contr. 1981, vol. AC-26, p.301-320.
- 2) Kimura, H. Robust Stabilizability for a Class of Transfer Functions. IEEE Trans. Automat. Contr. 1984, vol. AC-29, no. 9, p. 788-793.
- 3) Doyle, J.C.; Glover, K.; Khargonekar, P. P.; Francis, B. A. State Space Solutions to Standard H<sub>2</sub> and H<sub>∞</sub> Control Problems. IEEE Trans. Automat. Contr. 1989, vol. 34, p. 831-847.
- 4) 木村英紀, 藤井隆雄, 森武宏. ロバスト制御. コロナ社, 1994.
- 5) Zhou, K.; Doyle, J.C.; Glover, K. Robust and Optimal Control. Prentice Hall, 1996.
- 6) Yamamoto, Y. A Function Space Approach to Sampled Data Control Systems and Tracking Problems. IEEE Trans. Automat. Contr. 1994, vol. 39, no. 4, p. 703-713.
- 7) Boyd, S.; El Ghaoui, L.; Feron, E.; Balakrishnan, V. Linear Matrix Inequalities in Systems and Control Theory. SIAM, 1994.
- 8) 岩崎徹也. LMI と制御. 昭晃堂, 1997.
- 9) Boyd, S.; Vandenberghe, L. Convex Optimization. Cambridge University Press, 2004.
- 10) Iwasaki, T.; Hara, S. Generalized KYP Lemma : Unified Frequency Domain Inequalities With Design Applications. IEEE Trans. Automat. Contr. 2005, vol. 50, no. 1, p. 41- 59.
- 11) Chesi, G.; Garulli, A.; Tesi, A.; Vicino, A. Homogeneous Polynomial Forms for Robustness Analysis of Uncertain Systems. Springer, 2009.
- 12) Löfberg, J. YALMIP : A Toolbox for Modeling and Optimization in MATLAB. Proc. IEEE International Symposium on CACSD. 2004.
- 13) International Federation of Automatic Control "Technical Committee on Robust Control". <http://tc.ifac-control.org/2/5>
- 14) IEEE Control Systems Society "Technical Committee on Computational Aspects of Control System Design".  
<http://staff.polito.it/fabrizio.dabbene/TC-CACSD/index.html>
- 15) IEEE Control Systems Society "Technical Committee on Systems with Uncertainty".  
<http://www.eee.hku.hk/~chesi/TC-SU>
- 16) 計測自動制御学会 50 年史. 計測と制御. 2011, vol. 50, no. 8/9.
- 17) Petersen, I. R.; Tempo, R. Robust Control of Uncertain Systems: Classical Results and Recent Developments. Automatica. 2014, vol. 50, p. 1315-1335.
- 18) Hansen, L. P.; Sargent, T. J. Robustness. Princeton University Press, 2008.
- 19) Cohen R.; Havlin, S. Complex networks: structure, robustness and function. Cambridge University Press, 2010.
- 20) Kitano, H. Biological robustness. Nature Reviews Genetics. 2004, vol. 5, p. 826-837.
- 21) Ben-Tal, A.; El Ghaoui, L.; Nemirovski, A. Robust optimization. Princeton University Press, 2009.

- 22) Tempo, R.; Calafiore, G.; Dabbene, F. Randomized Algorithms for Analysis and Control of Uncertain Systems with Applications. 2nd Ed., Springer, 2013.
- 23) 藤崎泰正, 大石泰章. ランダム化アルゴリズムによる制御システムの解析と設計. システム/制御/情報. 2009, vol. 53, no. 5, p. 189-196.
- 24) Campi, M. C.; Lecchini, A.; Savaresi, S. M. Virtual Reference Feedback Tuning: a Direct Method for the Design of Feedback Controllers. Automatica, 2002, vol. 38, p. 1337-1346.
- 25) 金子修. データを直接用いた制御器パラメータチューニング. 計測と制御. 2008, vol. 47, p. 903-908.
- 26) US National Science Foundation. “Cyber Physical Systems”.  
[http://www.nsf.gov/funding/pgm\\_summ.jsp?pims\\_id=503286](http://www.nsf.gov/funding/pgm_summ.jsp?pims_id=503286)
- 27) CNRS. “Highly-Complex and Networked Control Systems (FP7 NoE HYCON2)”.  
<http://www.hycon2.eu/?page=0>
- 28) LAAS-CNRS. “Randomized and Robust Multi-Objective Control toolbox”.  
<http://projects.laas.fr/OLOCEP/romuloc/>

### 3.2.3 最適制御／予測制御

#### (1) 研究開発領域名

最適制御／予測制御

#### (2) 研究開発領域の簡潔な説明

さまざまなシステムを最も効率良く操作するための数理的手法およびその他分野応用に関する研究。

#### (3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

##### (3-1) 最適制御

機械などのシステムに制御入力（操作量）を加えたときの応答は、システムの数学モデルを用いて予測できる。一般的にあって、制御したい出力（制御量）の目標値を少ないエネルギーで素早く達成するのがよい制御である。出力の誤差や目標値へ収束するまでの時間、消費エネルギーなどによって評価関数と呼ばれる性能指標を定義し、それを最小にする制御入力をモデルに基づいて求めるのが最適制御問題である。定義する評価関数に応じて、最短時間問題、最小エネルギー問題などさまざまな最適制御問題が設定できる。さらに、制御入力や出力が許容範囲を逸脱しないよう拘束条件を課すこともできる。

最適制御は、システムの状態の関数として求められる場合と、時刻の関数として求められる場合とがある。前者の場合は、時々刻々観測される状態に応じて制御入力が決まるのでフィードバック制御となり、後者の場合は、システムの実際の状態によらず各時刻の制御入力があらかじめ決まっているのでフィードフォワード制御となる。現実のシステムではモデルに誤差があったり外乱が加わったりするので、それらの影響を抑制するためにフィードバック制御が用いられることが多い。しかし、最適制御をフィードバック制御として求める問題は、ハミルトン・ヤコビ・ベルマン方程式と呼ばれる非線形偏微分方程式を解くことに帰着し、特別な場合以外は解けないため、最適制御をフィードバック制御の形で求めるのは困難である。たとえ数値計算でハミルトン・ヤコビ・ベルマン方程式を解くとしても、すべての状態に対して最適制御を数値的に求めると計算量とデータ量が膨大になり、計算機の性能が飛躍的に進歩した今日においても現実的ではない。一方、フィードフォワード制御として最適制御を求める問題は、オイラー・ラグランジュ方程式と呼ばれる非線形常微分方程式の2点境界値問題に帰着する。2点境界値問題では初期条件と終端条件がそれぞれ一部ずつ与えられていて、常微分方程式の一般解が未知な場合は解くのが難しい。2点境界値問題を数値計算によって解くには、常微分方程式を繰り返し解き直して解を修正していくが必要があり、やはり計算に時間がかかる。また、求められるのはあくまでフィードフォワード制御なので、初期条件の変化、モデルの誤差や外乱に対処できない。最適制御の応用範囲は極めて広いものの、最適制御をいかに効率よく求めるかは困難な技術的課題である。

最適制御問題の数学的基礎である変分法の起源は17世紀にまで遡り、幾何学や解析力学で重要な役割を果たしてきた。変分法を拡張した最適制御の理論的整備は米国とソ連を中心に1950年代後半以降活発に研究された<sup>1)</sup>。代表的な理論として、ベルマンに

よる動的計画法、ポントリヤギンによる最大原理がある<sup>2)</sup>。動的計画法によってハミルトン・ヤコビ・ベルマン方程式が導かれ、最大原理によってオイラー・ラグランジュ方程式を一般化した2点境界値問題が導かれる。また、線形システムに対して2次形式の評価関数を最小化する最適制御 (Linear Quadratic 制御 ; LQ 制御<sup>3)</sup>) は解析的に求めることができ、フィードバック制御として実現しやすい形だったため、その後の制御工学の発展に大きな影響を与えた。現在、LQ 制御は、多くの工学系学部における制御工学の講義で教えられるほど普及している。一方、LQ 制御以外の一般的な最適制御問題は解析的に解くことができないため、数値解法も1980年代頃まで活発に研究され、さまざまな手法が提案された。非線形計画問題の数値解法である勾配法やニュートン法を関数空間に拡張して、フィードフォワード制御の修正を反復する反復法が基本的な手法である<sup>2, 4)</sup>。また、フィードバック制御が級数で表されると仮定して、その係数を逐次求めて近似精度を上げていく方法も複数提案され、現在でもある程度数の論文が発表されている<sup>5)</sup>。最適制御の存在や性質など数学的理論の研究は欧米が中心である<sup>6)</sup>。数値解法については、米国と日本の研究者が航空宇宙分野への応用を含めて継続的に取り組んできた<sup>7)</sup>。近年、最適制御をフィードバック制御の形で求める方法として、力学系理論に基づく方法<sup>5)</sup>、量子力学的手法<sup>8)</sup>、代数的手法<sup>9-11)</sup>など、新しいアプローチが提案されつつある。その他、最適制御問題の拡張として、制御を妨害し評価関数を大きくしようとする外乱もしくはプレーヤーを想定し、制御にとって最悪な外乱が加わったときの評価関数を最小化する微分ゲーム問題<sup>2)</sup>も研究されてきた。微分ゲーム問題の応用としては航空機同士の追跡回避問題<sup>12)</sup>などがある。さらに、多数のエージェントとユーティリティ (行政) とからなる社会システムのデザインを最適制御や微分ゲームの枠組みで扱う試みも始まっている<sup>13)</sup>。

### (3-2) 予測制御

一般に、拘束条件や非線形性があるシステムに対する最適制御をフィードバック制御として求めるのは難しい。一方、計算量が問題にならないければ、反復法で数値的にフィードフォワード制御を計算することが原理的には可能である。しかし、実際のシステムにおける外乱やモデル化誤差の影響を抑制して高精度の制御を行うには、フィードバック制御が望ましい。そこで、各時刻で有限時間未来までの評価関数を最小化する最適制御問題を解き、フィードフォワード制御として求めた最適制御における最初の値のみを実際の制御入力として用いることで、結果的にフィードバック制御を実現するのが予測制御である。各時刻で求める最適制御は、時刻の関数として計算するが、出発点である現在時刻のシステムの状態にも依存する。したがって、時々刻々フィードフォワード制御を求めなおすことで、結果的にフィードバック制御が実現される。

予測制御は、システムのモデルを用いて未来の応答を予測・最適化するので、モデル予測制御 (Model Predictive Control ; MPC) とも呼ばれる。また、評価関数の時間範囲 (評価区間 ; horizon) が未来に向かって後退していくので、receding horizon 制御 (Receding Horizon Control ; RHC) と呼ばれることもある。予測制御では、予見制御のように未来の情報を使って最適化する場合もあり、また、未来の目標値が未知でも何らかの仮定をおいて最適化する場合もある。システムの数学モデルや評価関数の与え方によって、PFC (Predictive Functional Control) 、DMC (Dynamic Matrix Control) 、

GPC (Generalized Predictive Control) など予測制御にはさまざまな問題設定があり、それらは 1970 年代前後にフランスや米国で提案された<sup>14)</sup>。当初は線形システムを主な対象とした研究が発展してプロセス産業を中心に応用が進み、欧米企業によるソフトウェアパッケージも市販されている<sup>14)</sup>。1990 年代頃から拘束条件、切り替えや非線形性を持つシステムに対する有効な制御手法として広く注目され始め、計算機の進歩による最適化計算の適用範囲拡大もあいまって、現在ではさまざまな問題設定に対して理論研究と応用の両方とも活発である。

予測制御の理論面では、有限時間の最適化からいかにフィードバック制御の安定性を保証するか、という問題が欧米を中心に 1990 年代から 2000 年代頃にかけて活発に研究された<sup>15)</sup>。また、フィードバック制御を実現するには最適制御問題を各時刻で高速に解く必要があるため、予測制御に適した数値解法の研究も 2000 年代以降盛んである。数値解法としては、最適制御をオフラインで計算してフィードバック制御を数値的なマップとして保存しておく方法<sup>16)</sup>と、実時間で最適化計算を行う方法<sup>17, 18)</sup>とが研究されている。さらに、最適化計算やコード生成のツールも世界各国の大学によって開発・公開されている<sup>19-25)</sup>。また、スマートグリッドなどへの応用を想定した問題設定として、分散した制御器間の情報伝達に制約が課された分散予測制御の研究も盛んになりつつある<sup>26)</sup>。さらに、移動する評価区間を制御ではなく最適推定に用いる moving horizon 推定 (Moving Horizon Estimation ; MHE) の研究も、予測制御ほど活発ではないが行われている<sup>27)</sup>。

応用はあらゆる分野に広がっており、例えば空調・環境の制御<sup>28)</sup>、スマートグリッド<sup>26, 29)</sup>や自動車の運動制御とエネルギー管理<sup>30)</sup>なども研究されている。日本では化学プロセスを中心に産業界での応用事例が多く<sup>31)</sup>、さらに、先端的な予測制御の適用可能性を検討する産学の研究も活発になりつつある<sup>32)</sup>。

#### (4) 科学技術的・政策的課題

- ・非線形システムの最適制御問題におけるフィードバック制御およびフィードフォワード制御の計算方法については、長年の研究にもかかわらずいまだに決定的な手法が知られていない。
- ・非線形システムに対する予測制御の安定性を判別する実際的な方法はいまだに確立されていない。
- ・大規模かつ複雑なシステムの予測制御を実現するために、予測制御における最適制御問題の数値解法にはさらなる高速化が必要である。必要な計算時間の正確な見積りも重要な課題である。
- ・最適制御における評価関数の体系的な設計方法および調整方法が確立されておらず、実際の応用において多大な試行錯誤が必要となってしまう。
- ・最適制御に関連する分野の数学者と制御理論研究者の交流が日本では欧米ほど活発でない。
- ・予測制御は応用可能性が急速に高まっており、幅広い分野の問題解決に貢献し得るが、制御工学分野外で十分に認識されているとはいえない。その結果、応用や数値解法に関して他分野との協力が不十分であり、研究者の交流促進が重要と考えられる。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

- ・最適制御をフィードバック制御の形で求める方法として、力学系理論に基づく方法<sup>5)</sup>、量子力学的手法<sup>8)</sup>、代数的手法<sup>9-11)</sup>など、新しいアプローチが提案されつつある。
- ・ETHのBuilding Control Groupにおいて、モデル予測制御をベースにした空調・環境のプロジェクトが行われている<sup>28)</sup>。スマートグリッドにおいてもモデル予測制御が有力な手法として活発に応用されている<sup>26, 29)</sup>。
- ・最適制御・予測制御におけるモデリング・数値計算・自動コード生成のためのソフトウェアが世界各国の大学によって開発・公開されている。例えば、モデリングでは、HYSDEL<sup>33)</sup>、最適化計算ではMPT<sup>19)</sup>、qpOASES<sup>20)</sup>、自動コード生成では、AutoGenU<sup>21, 22)</sup>、ACADO<sup>23)</sup>、CVXGEN<sup>24)</sup>、FiOrdOs<sup>25)</sup>がある。

（６）キーワード

最適制御、予測制御、モデル予測制御、最適化、変分法、動的計画法、実時間計算

（７）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>・航空宇宙分野を中心に数値解法の研究が継続されてきた<sup>7)</sup>。</li> <li>・線形システムに対する予見制御の理論は早くから独自に研究されていた<sup>12, 13)</sup>。また、非線形システムに対する予測制御の数値解法も他国に比べて早い時期に提案された<sup>17)</sup>。</li> <li>・最適制御の理論でも近年独自の取り組みが見られる<sup>5, 8-11)</sup>。</li> <li>・分散型の予測制御に関する研究が近年盛んになりつつある<sup>26)</sup>。</li> </ul>
	応用研究・開発	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>・予測制御の自動コード生成ソフトウェアAutoGenU<sup>21, 22)</sup>が独自に開発されている。</li> <li>・先端的な予測制御の適用可能性を検討する産学の研究が活発になりつつある<sup>32)</sup>。</li> </ul>
	産業化	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>・予測制御は化学プロセスを中心に産業界での応用事例が多い<sup>31)</sup>。</li> <li>・ただし、産業用ソフトウェアは独自開発が廃れ、欧米の市販ソフトウェア導入が主流となっている。</li> </ul>
米国	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>・最適制御の理論と数値解法いずれも草創期から世界をリードしてきた<sup>1)</sup>。予測制御に関する研究も盛んである。</li> </ul>
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>・航空宇宙分野など最適制御の応用は盛んである。</li> <li>・自動コード生成ソフトウェアCVXGEN<sup>24)</sup>が大学で開発・公開されている。</li> <li>・分散型の予測制御に関する研究が他国に先んじて活発になった。</li> </ul>
	産業化	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>・産業用予測制御ソフトウェア開発され化学プロセス分野で普及している<sup>14)</sup>。</li> </ul>
欧州	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>・最適制御の理論研究はフランスが強い。予測制御に関してはイギリス、スイス、ドイツ、イタリア、スペインに活発な研究者がいる。</li> <li>・1998年以来数年おきに非線形モデル予測制御に関する会議NMPCが開催されている。</li> </ul>
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>・EU内の産学共同研究プロジェクト、風力発電や空調などエネルギーシステムに対する予測制御の応用が近年盛んになっている<sup>28, 29)</sup>。</li> <li>・大学による最適制御・予測制御用ソフトウェアの開発と公開が活発である。モデリングでは、HYSDEL<sup>33)</sup>、最適化計算ではMPT<sup>19)</sup>、qpOASES<sup>20)</sup>、自動コード生成では、ACADO<sup>23)</sup>、FiOrdOs<sup>25)</sup>がある。</li> </ul>
	産業化	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>・幅広いシステムを対象とする産業用予測制御ソフトウェアが開発されている<sup>14)</sup>。</li> </ul>

研究開発領域  
制御区分

中国	基礎研究	○	↗	・最適制御および予測制御に関する学術論文が増加傾向にある。
	応用研究・開発	△	↗	・応用研究への取り組みは活発であり、予測制御を中心に今後は応用事例が増えていくと予想される。
	産業化	△	→	・特に顕著な活動・成果は見えていない。
韓国	基礎研究	◎	→	・線形システムの予測制御に関する研究では伝統がある <sup>34)</sup> 。
	応用研究・開発	○	→	・特に顕著な活動は見えていないが、予測制御の応用研究が行われている。
	産業化	△	→	・特に顕著な活動は見えていない。

(註1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

(註2) 現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○：ある程度の活動・成果が見えている、

△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

## (8) 引用資料

- 1) Bryson Jr., E. Optimal Control – 1950 to 1985. IEEE Control Systems Magazine. 1996, vol. 16, no. 3, p. 26-33.
- 2) Bryson Jr., E.; Ho., Y.-C. Applied Optimal Control. Hemisphere. 1975.
- 3) Anderson, D. O.; Moore, J. B. Optimal Control – Linear Quadratic Methods. Prentice-Hall. 1989.
- 4) 大塚敏之. 非線形最適制御入門 (システム制御工学シリーズ 18). コロナ社, 2011, 232p.
- 5) 坂本登. 安定多様体の近似によるハミルトン・ヤコビ方程式の近似解法. シミュレーション. 2008, vol. 27, no. 4, p. 221-225.
- 6) Bardi, M.; Capuzzo Dolcetta, I. Optimal Control and Viscosity Solutions of Hamilton-Jacobi-Bellman Equations. Birkhäuser, 1997, 570p.
- 7) 加藤寛一郎. 工学的最適制御. 東京大学出版会, 1988, 256p.
- 8) 伊丹哲郎. 最適制御の量子力学. 計測と制御. 2003, vol. 42, no. 10, p. 796-803.
- 9) Ohtsuka, T. Solutions to the Hamilton-Jacobi Equation with Algebraic Gradients. IEEE Trans. Automat. Contr. 2011, vol. 56, no. 8, p. 1874-1885.
- 10) Iwane, H.; Kira, A.; Anai, H. Construction of Explicit Optimal Value Functions by a Symbolic-Numeric Cylindrical Algebraic Decomposition. Computer Algebra in Scientific Computing. Gerdt, V. P. et al., eds. Springer, 2011, p. 239-250.
- 11) Ohtsuka, T. A Recursive Elimination Method for Finite-Horizon Optimal Control Problems of Discrete-Time Rational Systems. IEEE Trans. Automat. Contr. 2014, vol. 59, no. 11, p. 3081-3086.
- 12) 望田和彦, 加藤寛一郎. 微分ゲームに関する一覽書. 日本航空宇宙学会誌. 1989, vol. 37, no. 428, p. 441-450.
- 13) 平田研二, 内田健康. 分散化と統合化の制御理論. 計測と制御. 2012, vol. 51, no. 1, p. 55-61.

- 14) Maciejowski, J. M. モデル予測制御—制約のもとでの最適制御. 足立修一, 管野政明訳, 東京電機大学出版局, 2005, 397p.
- 15) Mayne, D. Q.; Rawlings, J. B.; Rao, C. V.; Sokaert, P. O. M. Constrained Model Predictive Control: Stability and Optimality. *Automatica*. 2000, vol. 36, no. 6, p. 789-814.
- 16) 藤田政之, 大嶋正裕. 講座・モデル予測制御 VI—ハイブリッドモデル予測制御. システム／制御／情報. 2003, vol. 47, no. 3, p. 146-152.
- 17) 大塚敏之. 非線形 Receding Horizon 制御の計算方法について. 計測と制御. 2002, vol. 41, no. 5, p. 366-371.
- 18) Diehl, M.; Ferreau, H. J.; Haverbeke, N. Efficient Numerical Methods for Nonlinear MPC and Moving Horizon Estimation. *Nonlinear Model Predictive Control*. Magni, L.; et al., eds. Springer, 2009, p. 447-460.
- 19) MPT. <http://control.ee.ethz.ch/~mpt>
- 20) qpOASES. <https://projects.coin-or.org/qpOASES>
- 21) AutoGenU. [http://www.symbal.sys.i.kyoto-u.ac.jp/~ohtsuka/code/index\\_j.htm](http://www.symbal.sys.i.kyoto-u.ac.jp/~ohtsuka/code/index_j.htm)
- 22) AutoGenU Maple 版. <http://www.maplesoft.com/applications/view.aspx?SID=153555>
- 23) ACADO Toolkit. <http://acado.github.io/>
- 24) CVXGEN. <http://cvxgen.com/docs/index.html>
- 25) FiOrdOs. <http://fiordos.ethz.ch/dokuwiki/doku.php>
- 26) 滑川徹. スマートグリッドのための分散予測制御. 計測と制御. 2012, vol. 51, no. 1, p. 62-68.
- 27) Alessandri, A.; Baglietto, M.; Battistelli, G.; Zavala, V. Advances in Moving Horizon Estimation for Nonlinear Systems. *Proc. 49th IEEE Conference on Decision and Control*. 2010, p. 5681-5688.
- 28) <http://control.ee.ethz.ch/~building/research.php>
- 29) Parisio, A.; Rikos, E.; Glielmo, L. A Model Predictive Control Approach to Microgrid Operation Optimization. *IEEE Trans. Contr. Systems Technology*. 2014, vol. 22, no. 5, p. 1813-1827.
- 30) Di Cairano, S. An Industry Perspective on MPC in Large Volumes Applications: Potential Benefits and Open Challenges. *Preprints of 4th IFAC Nonlinear model Predictive Control Conference, 2012*, p. 52-59
- 31) 加納学編. 高度プロセス制御に関するアンケート調査結果報告書. 日本学術振興会プロセスシステム工学第 143 委員会ワークショップ No. 27, 2009.  
[http://ws27.pse143.org/files/WS27\\_APCsurvey2009\\_public.pdf](http://ws27.pse143.org/files/WS27_APCsurvey2009_public.pdf)
- 32) 大塚敏之編. 実時間最適化による制御の実応用. コロナ社, 2015.
- 33) HYSDEL. <http://control.ee.ethz.ch/~hybrid/hysdel>
- 34) Kwon, W. H.; Han, S. *Receding Horizon Control : Model Predictive Control for State Models*. Springer, 2005, 400p.

### 3.2.4 分散協調制御

#### (1) 研究開発領域名

分散協調制御

#### (2) 研究開発領域の簡潔な説明

分散協調制御とは、複雑に影響を及ぼしあう多数のシステムにより構成される大規模システムにおいて、個々のサブシステムが局所的な情報処理、情報交換の下で分散協調的に行動することで全体最適な状態を達成するためのシステム・管理・制御・最適化理論および技術に関する研究開発領域を指す。

#### (3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

分散協調制御は、大規模システムを構成する個々の要素が局所的な情報処理、情報交換の下で分散的に意思決定・制御・最適化を行うことで、全体最適化を達成することを目的とする。分散協調制御が目指す「大規模システムを分散的に制御する」という概念のルーツは古く、「大規模システムの分散制御」という名称で 1970 年代に活発な研究がなされた<sup>1)</sup>。この時代は日本においてはまさに高度経済成長期であり、欧米社会の経済もまだ右肩上がりの時代で、世界的に社会インフラの複雑化に伴う、交通渋滞や、環境汚染、人口増加などの社会問題が研究背景として存在していた。皮肉にもこのことが分散制御の分野における研究の動機となった。1980 年以降はロバスト制御理論の台頭で、世界中の制御研究者の興味がロバスト制御へと流れ、その余波を受けて、分散制御に関する研究は一時下降線を辿る。しかし、ロバスト制御理論が完成期を迎えた 2000 年を過ぎた頃から、アメリカを中心に、動的システム理論とグラフ理論が融合した新しい分散協調制御理論に関する研究が現れ、現在の世界の制御理論界における最重要課題のひとつとなっている。

新たな分散協調制御は必ずしも過去の分散制御の焼き直しではない。分散制御は全体を統括する主体の存在を認めた上でトップダウン的に全体を個々に分割していく手法が主であるのに対し、分散協調制御はこれに加え、スマート化された個体からボトムアップ的に全体を構成するという概念を包含する。また、分散制御ではサブシステム間のつながりは物理的な結合によって生じる受動的なものであると考えるのに対し、分散協調制御は意思決定者同士が情報のやり取りを通じて能動的につながる状況をも想定する。以上の違いは科学技術の進歩に依るところが大きい。実際、このような発想はセンサネットワークやロボットネットワークなど、近年の技術革新による安価で高性能なセンサ・ロボット・通信デバイスの登場によって初めて実現可能となった技術が背景にあり、旧来の電力システムや大規模プラントの制御が課題であった 1970 年代当時とは動機が異なる。同様の概念はわが国において 1980 年代後半に提唱された自律分散システム論<sup>2)</sup>において研究されたものの、対象が抽象的かつ広範であったためか、理論体系が確立されたとは言い難い。

最近の分散協調制御の研究は 2000 年代初頭に米国を中心に始まり、2004 年に IEEE Transactions on Automatic Control において初の特集が組まれた<sup>3)</sup>。2007 年には Proceedings of the IEEE をはじめとした当該分野のほとんどの雑誌で特集が組まれる

など、初期段階の研究はピークを迎えた。その後、欧州・アジア地域にも広がりを見せ、全体として爆発的な論文数の伸びを示している。2014年にはIEEE Control Systems Societyを中心に5つのsocietyが共同し、分散協調制御の研究に特化した論文集を創刊している<sup>4)</sup>。

欧州ではEUを中心に、電力網の国際連携、また水資源の国際連携など、社会インフラの分散制御に関して、その地理的な要因を理由に、1970年代から継続的に研究が進んでいる。その歴史と多様性、研究成果の蓄積はアメリカや日本を凌駕する。しかしながらやはり現時点で時流を掴んでいるのはアメリカであろう。

日本でも、計測自動制御学会制御部門において2007年から2年間フォーメーション制御調査研究会が活動し、学会雑誌「計測と制御」に特集「協調とフォーメーションの制御理論」<sup>5)</sup>が組まれた。これを契機に国内会議における関連研究の占める割合は現在まで右肩上がりの状態である。なお、来年には現時点までの最新情報を含めた書籍が出版される<sup>6)</sup>。

アジアでは米国や欧州のような分散協調制御に関するニーズがこれまで高くなったため、近年まであまり大きな動きはなかった。ただし、韓国では離島における分散電源の必要性から、ソウル大学が中心となり、済州島で分散電源やスマートグリッドへの応用に関する大規模な実証実験が行われている。中国では分散協調制御に関する研究は盛んであるが、やはり従来のロバスト制御理論、現代制御理論に関する研究が主流のように見受けられる。また、応用・産業面での成果も今のところ陽に見えてきていない。

応用研究・実用化の側面からは、上記のセンサネットワーク、ロボットネットワークに加え、それらを融合したモバイルセンサネットワークが、分散協調制御の登場以来重要な地位を占めている。特に、プリンストン大学のグループが中心となり、海洋調査におけるモバイルセンサネットワークの実地研究が進められており、分散協調制御はその運用のキーテクノロジーとなっている。海洋調査自体もそうであるが、その他にも防災・減災やインフラの老朽化が重要課題として認識される我が国<sup>7)</sup>においては、環境モニタリングやインフラ点検を司るこれらの技術および背景にある分散協調制御の発展は今後ますます必要性が増すものと考えられる。

他方、環境・エネルギー問題の顕在化と電力自由化に伴い、従来は純粋に集中型の工学システムであった電力システムに、必ずしも集中管理できない需要家が発電主体あるいは意思決定者として参入することで、分散協調制御技術の導入が必須となる。例えば、分散協調制御理論に基づくリアルタイムプライシングの制度設計に関する研究が世界的に大きな流れとなっている。我が国においても、2012年からCREST「分散協調型エネルギー管理システム構築のための理論及び基盤技術の創出と融合展開」<sup>8)</sup>が開始され、分散協調制御を中心に据えた次世代エネルギー管理システムの構築が進められている。

さらに、高度交通システムの整備が進めば、スマート化された個別の車両と制御・通信技術を装備したインフラが協調することで、効率性・安全性・利便性の増進が技術的には可能となる。ただし、ここでもやはり運転者の意思決定は集中管理が難しく、分散的な決定に基づく全体最適化を目指す分散協調制御の考え方に基づく研究が進められている。

以上の研究分野はサイバーフィジカルシステムと総称され、欧米では多額の研究資金

がこれらの研究に投入され<sup>9), 10)</sup>、結果として膨大な量の良質な学術研究が報告されている。また、これらの機能を装備するまちづくりはスマートシティ/コミュニティ構想として、欧米のみならず、我が国においても重要課題の一つとして認識されている<sup>7)</sup>。

#### (4) 科学技術的・政策的課題

- ・ひとつの大きなシステムとそれを分化したサブシステムの利害が必ずしも一致しないような問題に対して、系統的な問題解決の方法が求められている。これらを分散と協調の観点から、適当な評価関数の設定と適当な情報結合構造の構築問題として扱うことができるかと期待されているが、基礎的な研究課題が山積している。
- ・上記のサイバーフィジカルシステムは人間をシステム中に内包する。そのため、社会的課題の解決に向けては工学システムのみから構成される世界を対象とするのではなく、人間も含むシステムへの取り組みが必須である。
- ・制御工学は横断的な学問であるが、理論研究の進展に伴い抽象度や数学的な難解さが上がったこと、アカデミックな制御研究と実用分野における応用研究との共同プロジェクトの機会が日本では極めて少ないことなどにより、研究者コミュニティはかなり閉鎖的になってきている。また、研究者層は必ずしも厚くない。異分野間の緊密な連携を進め、社会的な課題を解決していくために、上記 CREST プロジェクト<sup>8)</sup>のような大きな誘引剤となる施策の継続が必要である。
- ・従来の「ものづくり」を重視する教育に加え、物事を抽象的に、あるいは俯瞰的に捉えるシステム科学的な視点を養う教育の構築が必要である。我が国におけるものづくりの重要性は論を俟たないが、時代の要請は徐々にそれを統合した全体の管理にシフトしてきており、システムに強い人材を育成することが求められている。

#### (5) 注目動向 (新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など)

- ・やや発散傾向にあった分散協調制御の研究であるが、ここに来て代表的な基本構造が明らかになりつつある。例えば、マサチューセッツ工科大学の研究グループは、個々のサブシステムが自身の局所目的を追求する分散制御と合意制御<sup>11)</sup>に基づくサブシステム間の協調制御を同時に実行することにより、全体最適化が達成されることを理論的に示している。別の構造として、ジョージア工科大学のグループは各サブシステム間の協調のメカニズムを局所目的に埋め込んだ上でサブシステムを分散制御させることで、全体最適化を達成する構造を提案している。1970年代に登場した従来型の分散制御の枠組みに関してもスタンフォード大学のグループを中心に新たな理論が展開されている。
- ・応用面では、米国の主要大学のほとんどが分散協調制御に基づくエネルギー管理システムの構築に注力している。特にカリフォルニア工科大学では、分散協調制御を用いたリアルタイムプライシングの基礎研究が盛んに行われている。カリフォルニア州は一般世帯へのスマートメータ導入がほぼ終了しており、それを利用したスマートグリッド関連の実証プロジェクトが進行している。また、マサチューセッツ工科大学のグループは、経済システム、周波数制御、自動発電制御を俯瞰的に捉えた Transactive Control なる新たなエネルギー管理システムの構築を提案している。

- ・欧州では電力や水資源の国際連携・運用の必要性から昔から実用的な制御に関する基礎研究／応用研究ともに盛んである。最近の動きとしては、例えばスウェーデンの Lund 大学では古典的最適制御と双対分解を用いた、最適制御問題の分散的処理に関する研究が盛んに行われており、北欧における大規模ウインドファームの分散制御への応用研究についても積極的な検討がなされている。2008 年度よりルネサスとスウェーデン研究会議の出資により設立され、大規模複雑系の分散協調制御に関して研究が進んでいる。
- ・センサネットワークの研究では、上であげたプリンストン大学の研究グループが理論／応用の両方で群を抜いている。特に応用面の成果は、分散協調制御が実地研究のレベルで成果を上げた好例として広く認識されている。群ロボットの分野では、スイス連邦工科大学のグループが開発した Kiva システムなど、産業面での貢献が進んでいる。また、昨今の Quadroter の産業応用化は、同グループおよびペンシルバニア大学が開発した制御システムが多大な影響を与えたものと考えられる。
- ・カリフォルニア大学バークレイ校のグループは高度交通システムに関して PATH (Partners for Advanced Transportation Technology) <sup>12)</sup> プロジェクトを立ち上げ、カリフォルニアにおける高度交通網制御に関する研究拠点を構成している。
- ・上記の応用研究を契機に理論研究にも新たな芽が生まれつつある。まず人間を含むシステムの制御に関して 2008 年より、ボストン大学、プリンストン大学、カリフォルニア大学、ワシントン大学の研究グループが共同で、人間と工学システム間の協調を中心に据えたプロジェクトを実施した <sup>13)</sup>。ここでは特に、心理学とシステム制御の融合が図られており、人間心理モデルを組み込んだ研究が盛んに報告されている。また、マサチューセッツ工科大学を中心に、人間同士のつながりそのものを研究対象とする社会ネットワークに関する研究も盛んである。さらに、分散協調制御の構造を横軸に展開し、上位・下位の制御構造を縦軸に据える階層制御に関する研究が米国の主要グループを中心に報告され始めている。

(6) キーワード

分散協調制御、制御理論、システム理論、最適化理論、大規模システム、ネットワーク論、サイバーフィジカルシステム、スマートシティ／コミュニティ、エネルギー管理システム、センサネットワーク

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↑	・東日本大震災後、集中システムから分散協調システムへの移行の重要性が認識され、基礎研究の重点化が行われ始めている。その一端として、例えばCREST「分散協調型エネルギー管理システム構築のための理論及び基盤技術の創出と融合展開」が開始されている。学術論文レベルでも関連論文の数は右肩上がりの状態である。
	応用研究・開発	○	↑	・分散システムの応用研究は盛んで、特に、スマートメータを代表としたセンサネットワークと分散電源に関する応用研究・開発が進んでいる。
	産業化	△	↑	・東日本大震災後、分散電源、防災、インフラ老朽化対策の必要性が現実化している。そのため応用研究から実用化・産業化のフェーズへの移行が進んでいる。

米国	基礎研究	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>本分野では質・量ともに世界の研究をリードしており、新たな発想のほとんどは米国発と言っても過言ではない。</li> <li>米国電気電子学会では、Control Systems Societyを中心に5つのsocietyが連携してTransactions on Control of Network Systemsを創刊しており、勢いに衰えは見えない。</li> </ul>
	応用研究・開発	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>エネルギー分野では、分散化電源、スマートグリッド、リアルタイムプライシング、様々な分散協調制御への応用研究が世界に先駆けて行われている。</li> <li>DARPA Grand/Urban/Robotics Challengeに代表される無人車両制御の応用研究・開発も盛んに行われている。</li> <li>また、プリンストン大学のグループを中心に、海洋調査のためのモバイルセンサネットワークシステムの開発及び分散協調制御のフィールドワークの事例が報告されている。</li> </ul>
	産業化	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>米国の電力網は日本に比べて信頼性が低く、耐故障性に関する研究が盛んである。</li> <li>サイバーテロに関する防御に関する研究も行われている。</li> <li>また電力自由化に伴い、リアルタイムプライシングの制度設計に関しては世界的に進展している。オバマ大統領がグリーンニューディール政策を提唱してから風力発電を中心とした再生可能エネルギーの分散制御に関する研究成果が顕著に現れている。</li> </ul>
欧州	基礎研究	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>関連論文数は順調な伸びを見せており、研究レベルも高い。 Lund Universityやスウェーデン王立工科大学を中心に革新的な研究成果も報告されている。</li> </ul>
	応用研究・開発	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>基礎研究と同様、応用研究・開発も盛んに行われている。例えばEUにおいて「Control for Coordination of Distributed Systems」というプロジェクトが実施され、実用化の検討も行われている。</li> </ul>
	産業化	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>電力網、また水資源の最適分配の実現のためには国際連携なしには運営が不可能である。</li> <li>欧州では社会インフラの分散協調制御に関して積極的に産業化が行われており、近年水資源の枯渇に対する不安からそれらの重要性はますます高まっている。</li> </ul>
中国	基礎研究	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>爆発的な関連研究論文の伸びを見せているが、玉石混淆であり、どの程度本質をとらえた研究が含まれるかは疑問が残る。ただし、数学レベルの向上は顕著である。</li> </ul>
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>基礎研究に比べ、応用研究・開発の動きはあまり見られない。</li> </ul>
	産業化	△	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>応用研究が強くないため、産業化の動きもあまり見られない。</li> </ul>
韓国	基礎研究	△	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>論文数は増加の傾向にあるが、米国、欧州に比べるとそれほど盛んと言えない。</li> </ul>
	応用研究・開発	△	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>センサネットワークやスマートグリッドに関する応用研究が相対的に進んでいる。</li> </ul>
	産業化	△	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>済州島での分散電源を用いたスマートグリッドの実証研究がソウル大を中心として実施しており、その際に分散制御の応用について検討が行われている。</li> </ul>

(註1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

(註2) 現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○：ある程度の活動・成果が見えている、

△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

（8）引用資料

- 1) Athans, Michael eds. Special Issue on Large-scale systems and decentralized control. IEEE Transactions on Automatic Control. 1978, vol. 23, no. 7.
- 2) 伊藤正美（編）. 自律分散システム. 計測と制御. 1990, vol. 29, no. 10.
- 3) Antsaklis, Panos J.; Baillieul, John, eds. Special Issue on Technology of networked control systems. Proceedings of the IEEE. 2007, vol. 95, no. 1.
- 4) IEEE Transactions on Control of Network Systems. <http://sites.bu.edu/tcns/>
- 5) 滑川徹（編）. 協調とフォーメーションの制御理論. 計測と制御. 2007, vol. 46, no. 11.
- 6) 東俊一ほか. マルチエージェント制御. システム制御工学シリーズ. コロナ社, 2015.
- 7) 内閣府. 科学技術イノベーション総合戦略 2014 ～未来創造に向けたイノベーションの懸け橋～. 2014. <http://www8.cao.go.jp/cstp/sogosenryaku/2014/gaiyo2014.pdf>
- 8) CREST 研究領域 分散協調型エネルギー管理システム構築のための理論及び基盤技術の創出と融合展開. [http://www.jst.go.jp/kisoken/crest/research\\_area/ongoing/bunyah24-1.html](http://www.jst.go.jp/kisoken/crest/research_area/ongoing/bunyah24-1.html)
- 9) Poovendran, Radha et al., eds. Cyber-Physical Systems. Proceedings of IEEE. 2012, vol. 100, no. 1.
- 10) National Science Foundation, Directorate for Computer & Information Science & Engineering . Cyber-Physical Systems. [http://www.nsf.gov/funding/pgm\\_summ.jsp?pims\\_id=503286](http://www.nsf.gov/funding/pgm_summ.jsp?pims_id=503286)
- 11) 藤田政之. 合意・同期・被覆制御. JST 研究開発戦略センター2012 年研究開発俯瞰報告書. 2013, p. 143-148.
- 12) ITS Berkley. California PATH. <http://www.path.berkeley.edu/>
- 13) Center for Human and Robot Decision Dynamics. <http://people.bu.edu/johnb/CHARDD.html>

### 3.2.5 確率システム制御

#### (1) 研究開発領域名

確率システム制御

#### (2) 研究開発領域の簡潔な説明

決定論的な取り扱いが困難な外乱や環境変化を陽に考慮したシステムを構築する理論と応用に関する研究。

#### (3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

実世界のさまざまな現象を数理的にモデリングする際、しばしばその詳細を決定論的に記述することは困難である。例えば、センサ信号などに混入する雑音などは、どの時刻にどのような影響があるかを前もって知ることは難しい。しかしながら、こうした場合においても何らかの統計的な性質は知ることができると仮定し、その影響を考察し制御するのが確率システム制御の立場である。特に、白色雑音と呼ばれる各時刻において独立同分布の統計的性質を有する確率的信号の取り扱いは長い理論研究の歴史を有し、現在の研究でも不可欠な土台となっている。一方で、環境の変化に応じて制御装置を適切に切り替えつつ制御するような状況や、通信ネットワークを介して制御を行いその輻輳状態を考慮する場合などを考えると、対象とするシステムそのものが確率的かつ不連続に変化する状況に直面する。こうした離散的な変化をいわゆるマルコフ連鎖やポアソン過程などを用いて表現し、その振る舞いを理論的に考察する研究も近年活発に行われている。

主要な目的としては、外乱に乱された観測値を基にシステム内部の状況や外乱そのものを適切に推定するフィルタリング問題、外乱の影響が存在してもなお所望の振る舞いをするような制御則を設計する確率制御問題などに分類することができ、どちらも活発に研究されている。前者には例えば、過去（平滑化問題、スムージング）や未来（予測問題）のある時刻の状況を推定する問題やデータ同化、センサ情報からシステムの異常を検出する故障検出といったフォールトトレランスを目指した重要用途も含めることができる。

次に手法の観点から分類する。従来はフィルタリングと制御のどちらの場合においても、カルマンフィルタや線形2次ガウシアン(LQG; Linear Quadratic Gaussian)制御に代表される伊藤解析(Ito Calculus)に基づく確率論的な試みが主流であった。しかしこうした研究は、拡張が図られ続けてはいるものの、システムの非線形性などに対処することは困難である場合が少なくない。これに対して、マルコフ連鎖モンテカルロ法などにより標本経路を生成し適宜利用するなど、高い計算機能力を前提とした手法が近年盛んに開発されている。フィルタリングに対する無香料カルマンフィルタやパーティクルフィルタはこうした流れの研究の代表例であるといえよう。システム制御の分野においてはモデル予測制御と呼ばれるリアルタイム制御の方法論が従来から精力的に研究されてきたが、これに確率的な要素を付加した確率モデル予測制御においても、最適化分野の確率計画法(もしくは確率制約計画問題; Chance constrained programming problem)などの知見も用いつつ、計算量を軽減することが重要な課題のひとつとなっ

ている。

一方で、上述した確率的な雑音に対するロバスト性の獲得を発展させ、大規模かつ信頼度の低いデータから重要な情報を抽出する手法の開発も盛んに研究されている。例えば、単純なデータ解析手法に加え、そのデータの生成過程にある種のダイナミクスを想定することで大幅に情報抽出の効率を向上できる<sup>1)</sup>。こうした一連の研究は、データからダイナミクスモデルを構築するシステム同定と呼ばれる分野と融合し、今後も持続的な進展が見込まれる。この流れにおいて、カーネル法なども適切に用いれば、その単純な計算手法にも関わらず、高度な理論に裏付けされた手法と同等以上の精度でシステムが同定できるといった報告<sup>2)</sup>は特筆に値する。またこうした背景のもと、対象を確率モデルとして学習するという手法・解釈も今後、ますます重要性を増すものと考えられる。

一方で、汎用的な手法の構築もさることながら、特定の応用に特化し、その特徴を利用するシステム構築に関する進展も大きい。またその応用分野としては、機械システムなどシステム制御分野の標準的な対象にとどまらず、新規性の高い分野が多く含まれるので、ここでそのいくつかを例示する。数理ファイナンスの分野においては、その確立当時から確率制御の重要性が認識されてきた。近年、モデル予測制御と呼ばれる手法の専門家を中心に、オプションプライシングやポートフォリオ最適化に制御理論の応用が試みられている。システムバイオロジーの分野では、生体内の確率的挙動の解析やその役割の解明に制御理論研究者が積極的に取り組み、化学マスター方程式の高速シミュレーション手法の開発にも貢献している<sup>3)</sup>。さらに、がん生物学への応用例<sup>4)</sup>に見られるように、今後、この分野においてシステム制御論的な考え方は、大きな役割を果たすことができると期待できる。量子力学系の制御においても確率的な挙動の扱いが中心的な課題となるが、非線形フィルタリングやリスク鋭敏型フィルタリング／制御など理論への還元も盛んに行われている。

以上で述べた動向はおおむね国内外に共通するものであるが、基礎・応用などのフェーズにかかわらず主要な最先端の結果の多くは欧米各国で得られている傾向がある。例えば、確率モデル予測制御に関する理論研究としては、スイス連邦工科大学チューリッヒ校<sup>5)</sup>、ケンブリッジ大学<sup>6)</sup>、スウェーデン王立工科大学<sup>7)</sup>を中心に、確率モデル予測制御、分散最適化の確率的手法など最高水準の研究が行われている。またスタンフォード大学のグループなどによる数理ファイナンスへの応用<sup>8)</sup>、電力ネットワークのデマンドレスポンスの解析<sup>9, 10)</sup>、ビルのエネルギーマネジメントシステムへの応用<sup>11-13)</sup>、量子力学系<sup>14, 15)</sup>など応用研究も盛んである。国内においては特に量子力学系<sup>16)</sup>や電力ネットワークへの応用にかかわる研究<sup>17)</sup>が活発である。また確率制御に関する理論研究は古くから非常に盛んであるが<sup>18)</sup>、今後は既存の定式化にとらわれ過ぎない理論結果が増えることが強く望まれる。

#### （４）科学技術的・政策的課題

- ・現在のところ、どちらかといえば理論研究が先行している状態にある。今後、課題達成型で研究を推し進めるためには、モデリングや実データの取り扱いに立ち戻る必要があると思われる。例えば、風力発電量や日射量など莫大な実データのみが与えられるといった状況で、対象をどのようにモデリングすればよいかは自明ではない。こうした問題は理論・実用両側面から重要であり、統計学や情報理論・学習理論などとも密接に関連している。逆に、こうした情報の入手や開示がこれまで困難であった研究課題においては、データの提供により大きく進展する可能性もある。
- ・一般に、提供が困難なデータと数理的に情報量の多いデータは必ずしも一致するとは限らない。したがって、フィルタリングや制御といった具体的な用途を念頭においた上で、データのもつ情報量を特徴づける方法論を構築することも大変有益である。

#### （５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

- ・従来までは確率的な不確定性はできるだけ避けるべきものであるとしてとらえられることが多かった。一方で、近年、確率的な要素を意図的に導入して、性能を向上させる試みが盛んに行われている。こうした考え方は、統計物理や生物学などでは古くから認識されていたが、本格的に制御系設計にも用いられはじめている。焼きなまし法（simulated annealing）などの単純な改良にすぎない研究も散見するものの、中には分散最適化などの観点からも重要なパラダイムシフトと注目されている研究もある<sup>19)</sup>。
- ・ビルの空調制御のエネルギー効率化など、大規模な対象へ確率モデル予測制御の応用を試みるプロジェクトも進行している<sup>11-13)</sup>。
- ・システム同定や特徴量抽出に由来する数理最適化問題の解法として、Alternating Direction of Method of Multipliers (ADMM) などの手法を積極的に用いることで計算量・メモリの劇的なスケーラビリティを獲得するとともに、並列計算・分散実装と親和性を高めることが新たなトレンドとなりつつある<sup>20)</sup>。
- ・様々な分野でシステムのレジリエンスが重要視されるなか、従来の正規性雑音を土台とした議論では扱うことのできない突発的な外乱やレアイベントの与える影響の評価も、重要な課題として認識されつつある<sup>21)</sup>。

#### （６）キーワード

確率制御、フィルタリング、モデル予測制御、確率計画法、マルコフ連鎖モンテカルロ法

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>理論研究のレベルは比較的高く長い歴史をもつ<sup>18)</sup>が、定式化レベルでの新規性を主張する結果がやや少ない。</li> <li>次項目の応用研究においてさまざまな結果が得られていることにかんがみると、今後、新たな理論研究課題の創出や、そこからのさらなる展開が期待できる下地は十分にあるといえる。</li> </ul>
	応用研究・開発	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>東京大学のグループ（およびその共同研究者グループ）<sup>16)</sup>により、量子力学系の制御理論に関して最先端の研究結果が得られている。</li> <li>電力ネットワークにおける需要予測などのフィルタリングに関する興味深い研究が行われている<sup>17)</sup>。</li> </ul>
	産業化	△	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>カルマンフィルタや線形2次ガウシアン制御などすでに一般的な手法として十分確立している結果を除くと、これまでに確率システム制御の結果が産業応用にまで適用された例は多くはないと思われる。</li> <li>ただし前項の応用研究に関しては、今後はより実用的な研究フェーズへの展開が期待できる。</li> </ul>
米国	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>確率論、最適化、分散制御などさまざまな観点からの確率システム制御の研究において、最高水準の研究が行われている<sup>12)</sup>。</li> <li>最適化のための手法のひとつとして、ゲーム理論・学習理論の観点などから積極的に確率的挙動を導入する研究が大いに注目を集めている<sup>19)</sup>。</li> <li>非線形フィルタリングに関する結果<sup>22)</sup>をはじめ、次項の応用研究に携わる研究者などによっても、高度な確率論的成果が得られている。</li> </ul>
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>スタンフォード大学のグループなどで確率モデル予測制御の数理ファイナンスへの応用に関する成果が得られている<sup>8)</sup>。</li> <li>カリフォルニア大学サンタバーバラ校<sup>23)</sup>などで、化学マスター方程式といったシステムバイオロジーにおける確率モデルに関する研究が精力的にすすめられている。</li> <li>その他にも電力ネットワークのデマンドレスポンスの解析<sup>9, 10)</sup>などに関しても、最先端の研究結果が得られている。</li> </ul>
	産業化	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>前項の応用研究に対しては、すでにツールボックスのレベルにおいてはさまざまなソフトウェアなどが開発されており、引き続き発展することが見込まれる。</li> </ul>
欧州	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>スイス連邦工科大学チューリッヒ校<sup>5)</sup>、ケンブリッジ大学<sup>6)</sup>、スウェーデン王立工科大学<sup>7)</sup>を中心に、確率モデル予測制御、分散最適化の確率的手法など最高水準の研究が行われている。</li> </ul>
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>もともとモデル予測制御はその応用も含めて欧州で盛んに研究されていたため、上出のグループにおいてさまざまな応用課題に適用が試みられている。</li> <li>風力発電に関連する研究などにおいても、フィルタリングや異常検出に関する研究が多く行われている。</li> </ul>
	産業化	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>ビルの空調制御のエネルギー効率化など、大規模な対象への応用に関するプロジェクトも進行している（OptiControl 6）VIKING Project<sup>14)</sup>。</li> </ul>
中国	基礎研究	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>現在のところ、新規性の強い結果よりも、既存結果を着実に改良する結果が多く見られ、安定性や制御性能評価などの保守性の軽減などやや特定のトピックに偏る傾向がある。</li> <li>国際会議などにおける発表件数の多さとその急激な伸びは、やはり注目を集めており、存在感を高めつつある。</li> <li>欧米各国において多数の留学生が在籍しているため、今後の研究水準の上昇が見込まれる。</li> </ul>
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>このフェーズでの目立った成果は得られていない。</li> </ul>
	産業化	×	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>このフェーズでの目立った成果は得られていない。</li> </ul>

研究開発領域  
制御区分

韓国	基礎研究	○	↗	・国内での研究成果は必ずしも多くはないが、欧米各国において多数の優秀な留学生が在籍しているため、今後の研究水準の上昇が見込まれる。
	応用研究・開発	△	→	・このフェーズでの目立った成果は得られていない。
	産業化	×	→	・このフェーズでの目立った成果は得られていない。

(註1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

(註2) 現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○：ある程度の活動・成果が見えている、

△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

## (8) 引用資料

- 1) Sznaier, Mario. Taming the upcoming data deluge: A systems and control perspective. Semi-Plenary Talk, 51st IEEE Conference on Decisions and Control, 2012.
- 2) Pillonetto, Gianluigi; Dinuzzo, Francesco; Chen, Tianshi; De Nicolao, Giuseppe; Ljung, Lennart. Kernel methods in system identification, machine learning and function estimation: A survey. Automatica. 2014, vol. 50, p. 657-682.
- 3) <http://control.ee.ethz.ch/~ssb/>
- 4) Vidyasagar, Mathukumalli. Computational Cancer Biology: An Interaction Network Approach. Springer, 2012.
- 5) <http://control.ee.ethz.ch/>
- 6) <http://www-control.eng.cam.ac.uk/>
- 7) KTH, ACCESS Linnaeus Centre.  
<http://www.kth.se/en/ees/omskolan/organisation/centra/access>
- 8) <http://soe.stanford.edu/research/japrimbs.htm>
- 9) Baeyens, E.; Bitar, E.Y.; Khargonekar, P. P.; Poolla K. Wind Energy Aggregation: A Coalitional Game Approach. IEEE Conference on Decision and Control, 2011.
- 10) Bitar, Eilyan; Poolla, Kameshwar, Khargonekar, Pramod; Rajagopal, Ram; Varaiya, Pravin; Wu, Felix. Selling Random Wind. Proceedings of HICSS-45. IEEE, 2012.
- 11) <http://www.opticontrol.ethz.ch/>
- 12) Kelman, A.; Daly, A.; Borrelli, F. Predictive Control for Energy Efficient Buildings with Thermal Storage: Modeling, Stimulation, and Experiments. IEEE Control Systems Magazine. 2012, vol. 32, p. 44-64.
- 13) EU VIKING Project. <http://www.vikingproject.eu/new2/index.php>
- 14) Altafini, Claudio; Bloch, Anthony M.; Rouchon, Pierre eds. Special Issue on Control of Quantum Mechanical Systems. IEEE Transactions on Automatic Control. 2012, vol. 57, no. 8.
- 15) <http://pracqsys2012.com/>
- 16) <http://www.cyb.ipc.i.u-tokyo.ac.jp/>

- 17) <http://www.namerikawa.sd.keio.ac.jp/>
- 18) <http://sci-sss.org/sss2012/>
- 19) Marden, J.; Arslan, G.; Shamma, J. Cooperative control and potential games. IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics. 2009, vol. 39, p. 1393-1407.
- 20) Boyd, Stephen; Parikh, Neal; Chu, Eric; Peleato, Borja; Eckstein, Jonathan. Distributed optimization and statistical learning via the alternating direction method of multipliers. Foundations and Trends in Machine Learning. 2010, vol. 3, no. 1, p. 1-122.
- 21) Ohlsson, Henrik; Gustafsson, Fredrik; Ljung, Lennart; Boyd, Stephen. Smoothed state estimates under abrupt changes using sum-of-norms regularization. Automatica. 2012, vol. 48, p. 595-605.
- 22) Van Handel, R. Observability and nonlinear filtering. Probability theory and related fields. 2009, vol. 145, p. 35-74.
- 23) <http://www.ece.ucsb.edu/ccdc/index.html>

### 3.2.6 ハイブリッドシステム制御

#### (1) 研究開発領域名

ハイブリッドシステム制御

#### (2) 研究開発領域の簡潔な説明

連続値をとる動特性および離散値をとる動特性の混在した動的なシステムのモデリング、解析、設計のための理論とその応用に関する研究開発。

#### (3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

微分方程式や差分方程式により記述された連続値をとる動特性と論理条件などにより記述される切り換えなどの離散値をとる動特性の混在したシステムは、ハイブリッドシステムと呼ばれる。ハイブリッドシステムが大きな注目を集める理由の一つは、その適用範囲の広さにあると考えられる。人工物、物理現象を問わず多くのシステムが連続値と離散値の混在した特性を有しており、これらの例は、自動運転<sup>1)</sup>、エンジン制御<sup>2)</sup>、航空機の制御系<sup>3)</sup>および管制システム<sup>4)</sup>、化学反応プロセス<sup>5)</sup>、ロボットに対するタスク生成<sup>6)</sup>、生産プロセスの管理<sup>7)</sup>、遺伝子調節ネットワーク<sup>8)</sup>など、数多く挙げることができる。

ハイブリッドシステムの重要性の指摘は、1960年代にまで遡ることができる<sup>9)</sup>。しかしながら、この時期にハイブリッドシステムに関する体系的な研究が展開されることはなかった。1990年代にかけて、実世界（物理現象）との相互作用を有する電子回路やソフトウェアの検証問題などを通じて、計算機科学者や論理学者の間でハイブリッドシステムの重要性に関する認識が高まると共に、これらの問題意識に刺激を受けた制御理論研究者の間でも活発な研究が展開され始めた。このような中、ハイブリッドシステムに関するワークショップが1991年に開催され<sup>10)</sup>、途中、1998年に名称をHybrid Systems: Computation and Controlと変更しながら<sup>11)</sup>、現在まで継続して開催されてきている。また国内外の学会誌、論文誌に特集号が企画され<sup>12-14)</sup>、IEEE Conference on Decision and ControlやAmerican Control Conferenceといった制御理論に関する主要な国際会議では、ハイブリッドシステムに関するセッションが必ず設けられるなど、1990年代以降現在まで、常に活発な研究分野となっている。

ハイブリッドシステムのモデリング、解析、制御を目的とし、ハイブリッドシステム全般を表現する一般的なモデル<sup>15)</sup>から、対象の特性をより詳細に表現する種々のモデル、例えば、ハイブリッドオートマトン (Hybrid Automata)<sup>16)</sup>、スイッチドシステム (Switched Systems)<sup>17)</sup>、区分的アファインシステム (Piece-wise Affine Systems)<sup>18)</sup>、確率的ハイブリッドシステム (Stochastic Hybrid Systems)<sup>19)</sup>、混合論理動的システム (Mixed Logical Dynamical Systems)<sup>20)</sup>、線形相補性システム (Linear Complimentary Systems)<sup>21)</sup>、Max-plus 代数システム (Max-plus Discrete Event Systems)<sup>22)</sup>などが提案されている。ハイブリッドシステムは、その記述能力の高さと適用範囲の広さゆえに、これを統一的に取り扱うことのできる理論が現在までに構築されているとは言い難い。上記の各種モデルが目的に応じて使い分けられたうえで、解の存在性や一意性、安定性、同定手法、状態推定、コントローラ的设计法および実システムに対する応用など、

多くの研究成果がシステム理論、制御理論の観点から明らかにされてきた。なお近年、ハイブリッドシステムに関するハンドブック<sup>23)</sup>や邦書の教科書<sup>24)</sup>が出版されてきている。2000年代初頭頃までに体系づけられたハイブリッドシステムに関する研究成果は、これらを参照することで効率良く確認することができる。

近年の工学システムの発展は、単一の制御対象の高速かつ高精度な制御から、複数の構成要素からなる複雑なシステムによる高い機能の実現へと、制御理論、システム理論に対する要求と期待のシフトを生んでいる。自動運転の実現<sup>1)</sup>や環境負荷の低いエンジン制御の達成<sup>2)</sup>、航空機の制御系<sup>3)</sup>と安全性を保証する管制システムの実現<sup>4)</sup>、移動ロボットや人と接するロボットに対するタスクの記述と制御<sup>25, 26)</sup>、遺伝子調節ネットワークの解析<sup>8)</sup>などがこれらの例となっている。ハイブリッドシステムに対する今後の研究展開の期待の一つは、複雑なシステムに高度な機能を与える、インテリジェントな制御システムの系統的な構成法確立の可能性にあると考えられる。

システムが備えるべき機能を時相論理などにより記述される仕様として与え、この仕様を満足する制御系の自動設計実現を目指した研究が進展してきている<sup>27-32)</sup>。これらの研究では、例えば、1)連続値をとる動特性の振る舞いを有限の状態遷移で近似する離散抽象化、2)線形時相論理などにより記述される仕様を満足する有限の状態遷移系の設計と検証、3)連続値をとる動特性の望ましい状態遷移を実現するためのコントローラの抽出、といった手順がとられる。有限の状態遷移系に対する仕様の検証は、計算機科学分野のモデル検査や形式証明の概念と密接に関わっている<sup>33)</sup>。したがってこれらの知見を活用した効率の良いアルゴリズムを利用する事も可能である。一方、連続値をとる動的なシステムの振る舞いは、通常有限個の状態のみで構成される遷移系として表現することはできない。そこで、近似における保守性を低減するための多くの離散抽象化の手法が提案されている<sup>34)</sup>。形式仕様による機能の記述とこれを満足する制御系の自動設計は、計算機科学と制御理論が密接に関連する研究分野であり、かつこれまでにない高度な機能を有する工学システムを実現する可能性を秘めている。インテリジェントな制御システムの系統的な構成法確立を目指した、研究者間の交流の活性化と研究の進展が望まれる。

#### (4) 科学技術的・政策的課題

- ・ハイブリッドシステムの振る舞いは多様であり、未解決の課題は多い。最も基本的な概念の一つである安定性については、サーベイ論文<sup>35)</sup>がまとめられるなど、ある程度体系的な理論、認識がまとまりつつあると言える。しかしながら例えば、システムの特徴づける重要な概念である入出力ゲインの解析問題<sup>36)</sup>などを考えても、理論面、数値計算法などに取り組むべき問題が多く残されている。
- ・ハイブリッドシステムの解析、設計は数理科学的側面をもつ。また、解析や設計に必要な最手化計算も計算量の増大を伴う場合が多い。このような中、日本ではシステム理論や最適化に関連する数学者、研究者と制御理論の研究者との交流が、欧米と比較した場合活発ではない。

（5）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

- ・ 米国でのハイブリッドシステムに関連する研究は、例えば、Grand/Urban Challenge<sup>37)</sup>と言った大型プロジェクト型研究により牽引されている側面がある。
- ・ 欧米における近年の研究は、Cyber-Physical Systems<sup>38)</sup>と関連付けられているものが多い。これに伴い、大型の研究プロジェクトや研究予算措置が設けられている。

（6）キーワード

ハイブリッドシステム、離散抽象化、時相論理、形式証明、モデル検査、自動設計

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	・ 2000年代初頭頃までに比較し、ハイブリッドシステムの基礎研究に関する近年の活動は低調である。
	応用研究・開発	○	→	・ 2000年代初頭頃までに比較し、ハイブリッドシステムの応用研究・開発に関する近年の活動は低調である。
	産業化	△	↘	・ 2000年代初頭頃までは、産業界と連携した応用研究も報告されていたが、近年の活動は低調である。
米国	基礎研究	◎	↗	・ 近年のハイブリッドシステムに関する基礎研究は、米国が主導している。
	応用研究・開発	◎	↗	・ Grand/Urban Challengeなどの大型プロジェクト型研究により基礎研究から応用研究までが牽引されている側面がある。
	産業化	△	→	・ 産業界での応用は、今後活発になると期待される。
欧州	基礎研究	○	→	・ 1990年代以降、一定量の研究活動が継続されている。
	応用研究・開発	○	→	・ 1990年代以降、一定量の研究活動が継続されている。
	産業化	○	→	・ 自動車産業やエネルギー産業と連携した応用研究が進展していると考えられる。
中国	基礎研究			
	応用研究・開発			
	産業化			
韓国	基礎研究			
	応用研究・開発			
	産業化			

（註1）フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

（註2）現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○：ある程度の活動・成果が見えている、

△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註3）トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

(8) 引用資料

- 1) Horowitz, R; Varaiya, P. "Control design of an automated highway system". Proceedings of the IEEE. 2000, vol. 88, no. 7, p. 913-925.
- 2) Balluchi, A.; Benvenuti, L.; Di Benedetto, M. D.; Pinello, C.; Sangiovanni-Vincentelli, A. L. "Automotive engine control and hybrid systems: Challenges and opportunities". Proceedings of the IEEE. 2000, vol. 88, no. 7, p. 888-912.
- 3) Lansdaal, M.; Lewis, L. "Boeing's 777 systems integration lab". IEEE Instrumentation & Measurement Magazine. 2000, vol. 3, no. 3, p. 13-18.
- 4) Livadas C.; Lygeros, J.; Lynch, A. N. "High-level modeling and analysis of the traffic alert and collision avoidance system (TCAS)". Proceedings of the IEEE. 2000, vol. 88, no. 7, p. 926-948.
- 5) Engell, S; Kowalewski, S; Schulz, C.; Stursberg, O. "Continuous-discrete interactions in chemical processing plants". Proceedings of the IEEE. 2000, vol. 88, no. 7, p. 1069-1082.
- 6) Song, M.; Tarn, T-J.; Xi, N. "Integration of task scheduling, action planning, and control in robotic manufacturing systems". Proceedings of the IEEE. 2000, vol. 88, no. 7, p. 1097-1107.
- 7) Pepyne, D. L.; Cassandras, C. G. "Optimal control of hybrid systems in manufacturing". Proceedings of the IEEE. 2000, vol. 88, no. 7, p. 1108-1123.
- 8) Batt, G.; Belta, C.; Weiss, R. "Temporal logic analysis of gene networks under parameter uncertainty". IEEE Transactions on Automatic Control. 2008, vol. 53, p. 215-229.
- 9) Witsenhausen, H. "A class of hybrid-state continuous-time dynamic systems". IEEE Transactions on Automatic Control. 1996, vol. 11, no. 2, p 161-167.
- 10) Grossman, R. L.; Nerode, A.; Ravn, A. P.; Rischel, H., eds. Hybrid Systems, ser. Lecture Notes in Computer Science, Springer, 1993, vol. 736.
- 11) Henzinger, T. A; Sastry, S., eds. Hybrid Systems: Computation and Control, ser. Lecture Notes in Computer Science, Springer, 1998, vol. 1386.
- 12) Antsaklis, P. J.; Nerode, A., Eds. "Special issue on hybrid control systems". IEEE Transactions on Automatic Control. 1998, vol. 43, no. 4.
- 13) Morse, A. S.; Pantelides, C. C.; Sastry, S. S.; Schumacher, J., eds. "Special issue on hybrid systems". Automatica. 1999, vol. 35, no. 3.
- 14) Antsaklis, P. J., ed. "Special issue on hybrid systems: Theory and applications". Proceedings of the IEEE. 2000, vol. 88, no. 7.
- 15) Branicky, M. S.; Borkar, V. S.; Mitter, S. K. "A unified framework for hybrid control: Model and optimal control theory". IEEE Transactions on Automatic Control. 1998, vol. 43, no. 1, p. 31-45.

- 16) Alur, R.; Courcoubetis, C.; Henzinger, T. A.; Ho, P.-H. "Hybrid automata: An algorithmic approach to the specification and verification of hybrid systems". Grossman, R. L.; Nerode, A.; Ravn, A. P., Rischel, H., eds. *Hybrid Systems*, ser. *Lecture Notes in Computer Science*. 1993, vol. 736, p. 209-229.
- 17) Liberzon, D. *Switching in Systems and Control*. Birkhauser, 2003.
- 18) Sontag, E. D. "Nonlinear regulation: The piecewise linear approach". *IEEE Transactions on Automatic Control*. 1981, vol. 26, no. 2, p. 346-358.
- 19) Hespanha, J. P. "Modeling and analysis of stochastic hybrid systems". *IEEE Proceedings on Control Theory & Applications*. 2007, vol. 153, no. 5, p. 520-535.
- 20) Bemporad, A.; Morari, M. *Control of systems integrating logic, dynamics, and constraints*. *Automatica*, 1999, vol. 35, no. 3, p. 407-427.
- 21) Heemels, W. P. M. H.; Schumacher, J. M.; Weiland, S. *Linear complementarity systems*. *SIAM Journal on Applied Mathematics*. 2000, vol. 60, no. 4, p. 1234-1269.
- 22) De Schutter, B.; van den Boom, T. *Model predictive control for max-plus-linear discrete event systems*. *Automatica*. 2001, vol. 37, no. 7, p. 1049-1056.
- 23) Lunze, J.; Lamnabhi-Lagarrigue, F., eds. *Handbook of Hybrid Systems Control*. Cambridge University Press, 2009.
- 24) Imura, J.; Azuma, S.; Masubuchi, I. *Control of Hybrid Systems*. Corona Publishing, 2014, in Japanese.
- 25) Belta, C.; Bicchi, A.; Egerstedt, M.; Frazzoli, E.; Pappas, G. J. *Symbolic planning and control of robot motion*. *IEEE Robotics & Automation Magazine*. 2007, p. 61-69.
- 26) van de Molengraft, R.; Beetz, M.; Fukuda, T. *Robot challenges: Toward development of verification and synthesis techniques*. *IEEE Robotics & Automation Magazine*. 2011, vol. 18, no. 3, p. 22-23.
- 27) Tabuada, P.; Pappas, G. J. "Linear time logic control of discrete-time linear systems". *IEEE Transactions on Automatic Control*. 2006, vol. 51, no. 2, p. 1862-1877.
- 28) Kloetzer, M.; Belta, C. "A fully automated framework for control of linear systems from temporal logic specifications". *IEEE Transactions on Automatic Control*. 2008, vol. 53, no. 1, p. 287-297.
- 29) Yordanov, B.; Tumova, J.; Cerna, I.; Barnat, J.; Belta, C. "Temporal logic control of discrete-time piecewise affine systems". *IEEE Transactions on Automatic Control*. 2012, vol. 57, no. 6, p. 1491-1504.
- 30) Ding, X.; Smith, S. L.; Belta, C.; Rus, D. "Optimal control of markov decision processes with linear temporal logic constraints". *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2014, vol. 59, no. 5, p. 1244-1257.
- 31) Karaman, S.; Frazzoli, E. "Sampling-based algorithms for optimal motion planning with deterministic  $\mu$ -calculus specifications". *Proceedings of the 2012 American Control Conference*. 2012, p. 735-742.

- 32) Liu, J.; Ozay, N.; Topcu, U.; Murray, R. M. “Synthesis of reactive switching protocols from temporal logic specifications”. IEEE Transactions on Automatic Control. 2013, vol. 58, no. 7, p. 1771-1785.
- 33) Clarke Jr., E. M.; Grumberg, O.; Peled, D. Model Checking. MIT Press, 1999.
- 34) Alur, R.; Henzinger, T. A.; Lafferriere, G.; Pappas, G. J. “Discrete abstractions of hybrid systems”. Proceedings of the IEEE. 2003, vol. 88, no. 7, p. 971-984.
- 35) Shorten, R.; Wirth, F.; Mason, O.; Wulff, K.; King, C. Stability criteria for switched and hybrid systems. SIAM Review. 2007, vol. 49, no. 4, p. 545-592.
- 36) Hirata, K.; Hespanha, J. P. “L2-induced gain analysis for a class of switched systems”. Proceedings of the 48th IEEE Conference on Decision and Control. 2009, p. 2138-2143.
- 37) Iagnemma, K.; Buehler, M., eds. “Special issue on the DARPA grand challenge, part 1 and 2”. Journal of Field Robotics. 2006, vol. 23, no. 8, 9.
- 38) “Cyber-physical systems”. Program Announcements & Information. The National Science Foundation, 2008. <http://www.nsf.gov/pubs/2008/nsf08611/nsf08611.htm>

### 3.2.7 大規模・ネットワーク制御

#### (1) 研究開発領域名

大規模・ネットワーク制御

#### (2) 研究開発領域の簡潔な説明

通信ネットワークにより多数のセンサ、アクチュエータ、コントローラを接続した大規模な制御システムに関する研究開発。

#### (3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

大規模・ネットワーク制御が扱うシステムは、大別すると、ネットワーク化制御系とマルチエージェント系の2つのクラスがある。近年の情報通信技術の発展に伴い、こうしたシステムが急激に増えており、今後もその研究の重要性は高まると考えられる。背景には、リアルタイム性が非常に高いフィードバック制御にかかわる部分についてもネットワーク化が可能となったこと、組込み機器による制御機器の小型化・低価格化などがあげられる。また最近では、電力分野でスマートグリッドにおける分散制御にも期待が寄せられている。

ネットワーク化制御系（networked system）<sup>1, 2)</sup>では、大規模プラントの監視・制御システムあるいは自動車などのように、多数のセンサ、アクチュエータ、およびコントローラを有線・無線の回線で接続してネットワーク化し、効率的な情報共有を実現した制御システムを扱う。他方、マルチエージェント系（multi-agent system）<sup>3)</sup>は、無線通信を用いた自律移動ロボット群やセンサネットワークなどの応用を指す。ここでは、おのおののエージェントは互いに通信することで得たローカルな情報を基に行動するが、システム全体として所望の仕様が達成できるような協調制御を実現する制御システムを扱う。

どちらのシステムも1990年代以降、応用面で発展してきたが、そうした動きに促される形で2000年頃から基礎研究が始まり、今日に至るまで盛んに研究がなされている。興味深いのは、当初、両システムの研究は独立して行われていたが、その重要性の高まり、および通信との深いかかわりから現在では両者は不可分の関係にある点である。実際、多くの国際的な研究プロジェクトにおいても、大規模ネットワーク化分散制御というキーワードが使われている。また、物理的なシステムを通信を介して制御するという意味において、米国で最近注目されているCyber Physical System（CPS）<sup>4)</sup>の代表的なクラスのシステムである。

近年は制御用ネットワークが一般の通信ネットワークと接続される場合が増えており、その結果、産業用監視制御システム（SCADA：Supervisory Control And Data Acquisition）における情報セキュリティに対する関心が高まっている。例えば、工場や電力系統がサイバー攻撃されると、被害は機密情報の漏えいなどにとどまらず、物理的に機器が故障・破損する可能性があり、非常に危険である。一般の情報機器に対するセキュリティ対策だけでなく、制御機器に特有の通信特性やダイナミクスを考慮した対策の重要性が指摘されている。

他方、インターネットをはじめ通信ネットワーク自体も大規模なネットワーク化シス

テムとみなすことができ、この分野で合わせて議論されてきた。ネットワーク制御（network control）という場合はこちらを指すこともある。多数の端末がいかに自律分散的に送受信を行い、通信速度や安定性を維持・向上させるかという輻輳制御（congestion control）の問題は、通信プロトコルの基礎に関わる重要な課題である。

国際比較については、米国が基礎・応用研究ともにこの分野をリードしている。CPSは重点領域となっており、莫大な予算が基礎研究に投じられている。また、軍事研究の観点からは、情報セキュリティや自律移動ロボット群や飛行体の遠隔操作などは非常に重要であり、そうした分野への予算配分も大きい。欧州においても、大学と産業界が組んだ大規模な研究プロジェクトが多数立ち上がっており、この分野に対する関心の高さがうかがえる。日本は、産業界での研究レベルが高く、技術的なレベルでは世界をリードしているといえる。しかし、多数のメーカーの機器をネットワーク化する際に不可欠となる標準化に関しては影響力が限られている。この分野の基礎研究に関しても、ファンディング面において組織的にサポートする機運は少ない。中国においては、研究者レベルでの関心は高く、研究のすそ野が広がってきており、応用面での技術レベルも今後高くなることが予想される。

#### （４）科学技術的・政策的課題

- ・ ネットワーク化制御を無線通信ネットワークを介して実現するには、携帯電話のような人間同士の通信とは異なる、機械間の通信（Machine to Machine; M2M）が必要となる。しかし、現状では十分な通信速度と信頼性を保証することが難しく、無線通信分野における技術的な課題となっている。
- ・ ネットワーク化制御においては、通信における時間遅延が制御性能に大きな影響をもたらす。一般に遅延時間が変動するため、それを考慮した制御設計が課題である。
- ・ 無線を介した計測のためのセンサネットワークは幅広い応用範囲をもっているが、ひとつのボトルネックは省電力化である。つまり、多くの場合、こうしたシステムは電池駆動であるが、電力消費に占める無線の送受信による割合が高い。通信プロトコルに対する工夫が求められている。
- ・ 電力システムは大規模なネットワーク化システムであるが、近年、スマートグリッドへの関心が高まるにつれて、本領域の研究者が研究すべき対象としての位置づけが明確になってきた。特にスマートグリッドの実現にあたっては、電力会社や需要家における多くのシステム間でのリアルタイムな通信を基にした制御が非常に重要となる。
- ・ サイバーセキュリティ問題への政府レベルでの関心の高さは、米国国土安全保障省が制御システムの安全性に関する委員会を立ち上げていることから伺える<sup>5)</sup>。

#### （５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

- ・ ネットワーク化制御においては、制御と通信の両分野がかかわるが、実際にシステムの安定化に際しては、制御対象と通信回線の性質が不可分に表れる限界がいくつも見つかっている。通信分野のシャノンの理論とも整合性が高く、学術的意義をもつ。
- ・ マルチエージェント系においては、エージェント間の情報交換を表すネットワーク構造が重要であり、協調制御に必要な性質について興味深い知見が得られている<sup>3)</sup>。

- ・日本では、学会レベルでの交流は分野横断的に行われており、ネットワーク制御システムにかかわりの深い研究会が 2005 年以降、継続的に活動している。最近のものでは、計測自動制御学会の「社会基盤システムにおける分散意思決定のためのシステム制御調査研究会」、「物理と情報をつなぐ次世代システム制御研究会」、また電子情報通信学会の「高信頼制御通信時限研究専門委員会」などがあげられる。
- ・米国では、米国科学財団 (NSF) が 2000 年頃より、情報通信技術に対して重点的に予算を配分してきたが、その中においてもネットワーク化制御は重要な位置を占めてきた。例えば、MIT、カリフォルニア大学バークレイ校、イリノイ大学などでは早い時期から大型の基礎研究および応用寄りの研究プロジェクトを立ち上げ、大きな成果をあげてきた。より最近では、情報通信技術をいかに社会の中で有効に使うかという観点から、研究の重点が CPS にシフトしてきたが、やはり物理的なシステムを情報・通信機器を用いて制御することの重要性は引き続き強調されている。
- ・また米国で特徴的なのは、CPS 関連のプロジェクトへの参加者が、制御、通信、情報科学、生物学、社会学などの各分野から集まっている点である。例えば、カリフォルニア大学サンタバーバラ校では、20 名以上の研究者からなる学際的な教育研究プログラム Network Science IGERT が 2013 年に立ち上げられた<sup>6)</sup>。大規模システムの階層化および各階層におけるスケールの異なるネットワークをテーマとして、多岐にわたる研究が行われている。イリノイ大学においても、主に工学系と情報系の研究者から構成される新たな研究組織 Information Trust Institute がつくられ、データ科学、電力系統、システム・通信、衛生情報などの分野を網羅した研究・教育活動を行っている<sup>7)</sup>。情報セキュリティに対する重要性も強調されており、組織内でいくつもの共同研究プロジェクトが立ち上がっている。他にも複数の研究機関が参加する共同研究プロジェクトとして、スタンフォード大学とカリフォルニア大学バークレイ校による STARMAC<sup>8)</sup>やペンシルバニア大学が主導する SPARCS<sup>9)</sup>などがあげられる。
- ・欧州では、欧州連合の政策執行機関である欧州委員会 (European Commission) の下の大規模な研究プロジェクトとして、HYCON (Highly-Complex and Networked Control Systems)<sup>10)</sup>が 2004 年より継続的に続いてきた。そこには、制御工学の理論と応用の関係者が 7 カ国 23 機関 (大学および企業) から参加しており、毎年 1 億円以上の予算がついている。プロジェクト開始当初は、ハイブリッドシステムに焦点を当てていたが、近年はネットワーク化された大規模システムへとシフトしている。
- ・欧州では、他にも同様のプロジェクトで複数の機関が参加するものは多数立ち上がっている。イタリアのトレント大学とオランダのアインドーベン工科大学を中心とした WIDE: Decentralized and Wireless Control of Large-Scale Systems<sup>11)</sup>や、より最近のものでは、ドイツの DFG が支援する Control Theory of Digitally Networked Dynamical Systems<sup>12)</sup>がある。スウェーデンの王立工科大学では、複雑ネットワーク系関係の研究所として、ACCESS Linnaeus Centre (Automatic Complex Communication nEtworks, Signals, and Systems) が 2006 年に設立された<sup>13)</sup>。学際的な研究をサポートすることが目的で、制御、信号処理・通信、情報科学、応用数学の各分野から 60 名の研究者、100 名前後の博士課程学生が所属している。

（6）キーワード

大規模制御、ネットワーク制御、ネットワーク化制御、大規模・複雑制御システム、制御用ネットワーク、センサ・アクチュエータネットワーク、通信制約、産業用監視・制御

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>大学における制御工学あるいは無線通信の研究は、非常に基礎的な理論研究から、より応用寄りの実験ベースのものまで、幅広く行われている。ただし、この領域に対して組織的に取り組むための仕組みはあまり見受けられない。</li> </ul>
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>制御用ネットワークで用いられるプロトコルの標準化などの活動に、企業からの参加がある。また、企業間でプロトコルを共有も進んでいる。</li> </ul>
	産業化	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>大型プラントや自動車、ロボットなど、多くの産業分野においてネットワーク化された制御システムが導入されている。その普及レベルは非常に高い。</li> </ul>
米国	基礎研究	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>米国の大学における基礎研究のレベルは非常に高い。特に他分野の研究者との共同研究が盛んで、新たな研究分野の開拓も多い。</li> <li>予算面においては、NSFからはCPSやスマートグリッド関連のもの、国防省からは軍事に近い応用に関するものが、基礎研究費として潤沢に交付されている。</li> <li>予算面で重点化されていることから、新しい研究者の参入も多い。</li> <li>米国電気学会（IEEE）では、本領域を対象とした論文誌 Transactions on Control of Network Systems を2014年に発刊した。</li> </ul>
	応用研究・開発	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>遠隔制御によるロボットや飛行体など、将来的なアプリケーションおよびその産業化に向けた研究が盛んである。</li> <li>スマートグリッドに必要な通信や分散制御に関する研究が新しい分野として、ここ数年来、関心が高まっている。</li> <li>産業監視制御システムにおける情報セキュリティに対する関心が高まっている。電力システムや工場などがネットワーク化され、外部と接続された場合に起こり得るサイバー攻撃や情報流出に対処する組織的な対策が進みつつある。</li> <li>高速道路における自動運転や運転補助に関する研究は伝統的に盛ん。</li> </ul>
	産業化	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>マイクロセンサを用いたセンサネットワークなどの応用は、ベンチャー企業を中心に産業化が進んでいる。</li> </ul>
欧州	基礎研究	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>欧州内での国際的な共同研究の活動レベルが高い。</li> <li>欧州をベースとする国際自動制御連盟（IFAC）では、2004年に新しい技術委員会として Technical Committee on Networked Systems が立ち上げられ、最近ではほぼ毎年、シンポジウムを主催している。</li> </ul>
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>複数の大学と企業が行う本領域での共同研究が盛んである。例えば、センサネットワークの実装や電力システムの情報セキュリティ対策といった応用研究に対しても、基礎研究を行っている研究者が参加している事例がある。メリットとして、基礎的な課題設定をする際に実用面の事情を確認できることなどがある。</li> </ul>
	産業化	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>ドイツやスウェーデンの自動車や計測・制御機器の企業における制御用ネットワークに対する関心は非常に高く、1990年代初頭からの取り組みが続いている。</li> </ul>

研究開発領域  
制御区分

中国	基礎研究	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>・2000年以降、大学における基礎研究が重視された結果、博士課程学生が増えている。本領域は世界的にも注目されているため、新しい研究者の参入が顕著である。今後の発展が予想される。</li> <li>・CPS関連の米国電気学会（IEEE）および米国情報処理学会（ACM）の会議が一堂に会するイベント CPS Week は2012年に北京で開催された。</li> </ul>
	応用研究・開発	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>・同上。</li> </ul>
	産業化	△	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>・大規模プラントなどの施設のうち、古いものは情報化・ネットワーク化があまり進んでいないと思われるが、急速な経済発展を背景に、今後、伸びる可能性が高い。</li> </ul>
韓国	基礎研究	△	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>・米国で博士を取得した研究者が多いため、米国の研究動向に敏感であり、一定の研究レベルを保っている。</li> </ul>
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>・同上。</li> </ul>
	産業化	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>・自動車内LANはネットワーク化制御が実際に用いられる代表的なシステムである。自動車産業が伸びているため、今後の発展が予想される。</li> </ul>

（註1）フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

（註2）現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○：ある程度の活動・成果が見えている、

△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註3）トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

## （8）引用資料

- 1) Bemporad, A.; Heemels, M.; Johansson, M., eds. Networked Control Systems. Springer, 2010, 371p. (Lecture Notes in Control and Information Sciences, vol. 406).
- 2) Tarraf, D. C. ed. Control of Cyber-Physical Systems. Springer, 2013, 380p. (Lecture Notes in Control and Information Sciences, vol. 449).
- 3) Bullo, F.; Cortes, J.; Martinez, S. Distributed Control of Robotic Networks: A Mathematical Approach to Motion Coordination Algorithms. Princeton University Press, 2009, 320p. (Princeton Series in Applied Mathematics).
- 4) PCAST. Designing a Digital Future: Federally Funded Research and Development in Networking and Information Technology. 2010.  
<http://www.whitehouse.gov/sites/default/files/microsites/ostp/pcast-nitrd-report-2010.pdf>
- 5) U.S. Department of Homeland Security, Control Systems Security Program.  
[http://www.us-cert.gov/control\\_systems/icsjwg/](http://www.us-cert.gov/control_systems/icsjwg/)
- 6) Network Science IGERT, University of California, Santa Barbara, CA, USA.  
<http://networkscience.igert.ucsb.edu/>
- 7) Information Trust Institute, University of Illinois at Urbana-Champaign, IL, USA.  
<http://www.iti.illinois.edu/>

- 8) The Stanford/Berkeley Testbed of Autonomous Rotorcraft for Multi-Agent Control (STARMAC).  
<http://hybrid.eecs.berkeley.edu/starmac/>
- 9) Synthesis of Platform-aware Attack-Resilient Control Systems (SPARCS).  
<http://rtg.cis.upenn.edu/HACMS/>
- 10) The FP7 NoE HYCON2. “HYCON 2”. <http://www.hycon2.eu/>
- 11) WIDE: Decentralized and Wireless Control of Large-Scale Systems.  
<http://ist-wide.dii.unisi.it/>
- 12) Control Theory of Digitally Networked Dynamical Systems (DFG-Priority Program).  
<http://spp-1305.atp.ruhr-uni-bochum.de/index.php>
- 13) KTH Royal Institute of Technology. “ACCESS Linnaeus Centre”.  
<http://www.kth.se/en/ees/omskolan/organisation/centra/access>

### 3.2.8 異常検出

#### （1）研究開発領域名

異常検出

#### （2）研究開発領域の簡潔な説明

製造設備、発電所、自動車など人間社会を支えるあらゆるシステムについて、それらが要求される性能を発揮し、安全に利用されるために、異常が発生したときにそれらを検出し、その影響を最小限にとどめ、安全な動作継続やシステム停止を実現するための技術に関する研究開発。異常検出の対象は人工物に限らず、病気の早期発見など人間そのものも対象となる。

#### （3）研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

異常検出は典型的な分野横断型技術であり、製造設備、発電所、自動車など人間社会を支えるあらゆるシステムの安全を確保するために不可欠な技術である。制御システムを有効に機能させるためにも、その前提として、設備が正常に動作していることを確認・保証しておく必要がある。仮に設備が正常に動作していない場合には、できるだけ早期に異常を検知するとともに、適切な対策を施さなければならない。異常検出手法は、モデル型（model-based）とデータ型（data-driven）の2つに大別される。モデル型異常検出<sup>1, 2)</sup>では、システムの正常な挙動を第一原理モデル（物理・化学法則に基づいて現象を数式で表現したモデル、物理モデル）で表現し、システムの実際の挙動とモデルが予測する挙動とを比較し、その差によって異常の発生を検知する。一方、データ型異常検出<sup>3, 4)</sup>では、計測したデータに統計的手法を適用して、システムの正常な状態を表現するモデルを構築し、正常状態からのズレを指標として異常の発生を検知する。対象システムを十分に理解した上で、迅速かつ正確な異常検出を実現するという観点では、モデル型異常検出が望ましいといえる。モデル型異常検出は比較的モデル化が容易な機械系システムへの応用が多い半面、複雑なシステムの物理モデル構築は技術的に難しく、コストも大きくなるため、データ型異常検出が利用されることも多い。データ型異常検出手法としては、特に製造業を中心に多変量統計的プロセス管理（Multivariate Statistical Process Control; MSPC）の研究開発と産業応用が目立つ。異常が発生した場合、それらを早期に検出する必要があることは当然であるが、さらに異常の原因を究明し、然るべき処置を行う必要があるため、そのために異常診断技術が重要となる。異常検出と異常診断に関する研究開発は現在も極めて活発に行われている。そこには当然ながら、2011年に発生した事故によってわが国でも安全性に対する議論が活発化している原子力発電所を対象とした研究開発も含まれる<sup>5)</sup>。

上述の異常検出・異常診断技術を基盤として、さらに、異常や故障に適切に対応して高い信頼性を維持する機能をシステム自身にもたせるディペンダブル（dependable、高信頼化）システムの設計に関する研究開発も進められている。システムを高信頼化するために、元来、システムの構成要素を冗長化しておく方法が主として採用されてきた。このような技術はフォールトトレランス（fault tolerance、障害許容）技術、また構成要素の一部が故障しても正常に処理を続行するシステムはフォールトトレラント（fault

tolerant) システムと呼ばれる。近年、より広い観点から高信頼化を再定義する流れがあり、フォールトトレラントに代えてディペンダブルという言葉が使われるようになった。ディペンダブルシステムやディペンダブルコンピュータなどである。このようなフォールトトレランス技術やディペンダブルシステム技術は、絶対的な安全性が要求される鉄道や航空などの旅客分野や、他に類を見ない安全性が要求される原子力分野において研究開発および実用化が進められ、今では多くの産業分野で活用されている。制御分野においては、フォールトトレラント制御<sup>6)</sup>という呼称が一般的である。対象システムそのものの異常に加えて、誤操作などヒューマンエラーや例外的な事象に対する安全・信頼性確保も重要である。例外には多種多様な要因による多種多様な結果が含まれるため、その対策には綿密な解析が必要となり、システム設計も複雑になる。

製造業においては、設備の異常検出に加えて、製品特性・品質の異常検出も重要である。製品特性は特殊な分析機器を用いてオフライン分析されることが多い。このような場合、オフライン分析値だけを頼りに品質管理を実施すると、分析頻度が低いために、大量の不良品を製造する危険性が高い。そこで、装置の操業状態から製品特性を予測できるモデルを構築し、予測値を利用して品質管理を実施する戦略が有用となる。このような目的で仮想計測技術がさまざまな産業界で研究されている。例えば、石油化学産業ではソフトセンサーと呼ばれ、予測値を用いた製品品質のリアルタイム監視のみならず、予測値に基づく大規模制御や最適化も行われ、多数の実績が報告されている<sup>7)</sup>。半導体産業では Virtual Metrology (VM) と呼ばれ、歩留りの向上、検査回数低減によるコスト削減などの効果が期待されており、上述の MSPC とともに研究開発が活発に行われている。また、製薬産業では、米国 FDA (Food and Drug Administration) が 2004 年に発出した「製造および品質保証システムの目指すべき方向性に関する指針—PAT」<sup>8)</sup>に従い、日米欧の医薬品規制に関する調和を目指す ICH<sup>9)</sup> (日米 EU 医薬品規制調和国際会議; International Conference on Harmonisation of Technical Requirements for Registration of Pharmaceuticals for Human Use) から、科学的根拠に基づいた品質および製造管理システムのパラダイムシフトを促すことを目的とした Q トリオと呼ばれる 3 種のガイドラインが発出された<sup>10-12)</sup>。PAT (Process Analytical Technology) とは、各工程における製品の重要品質特性をリアルタイムでモニタリングし、それに影響を与える変数を制御することによって品質管理することを指向した概念である。PAT の適用により、製造プロセスに対する理解が深まることが期待され、従来の「工程終了後の試験結果による品質確認」というパラダイムから「工程内での重要品質特性の制御」という新しいパラダイムへのシフトが可能となる。このように仮想計測技術を用いて製品特性を予測し、その予測値をフィードバック制御に利用する方法は近年ますます重要となっている。

異常検出は医療やヘルスケアの分野への応用も期待されている。製造設備の異常を人間の病気に置き換えれば、製造業を対象にして開発されてきた異常検出技術が医療やヘルスケアの分野にもそのまま適用できることは明らかであろう。例えば、健康診断や人間ドックで取得される大規模な健診データを統合・活用して、これまで以上に的確に受診者の健康状態や特定の病気に罹患するリスクを評価する研究開発が進められている。さらに、心電モニターや加速度センサーといったウェアラブルな計測機器の進歩が著し

く、そのような機器を用いたリアルタイム監視の研究開発も進められている。例えば、心拍変動解析を用いたてんかん発作予兆検知技術、ドライバーの眠気検知技術、ストレス評価技術などである。これらの研究開発は社会的影響も大きく、その進展に注目が集まっている。

安全確保のために異常検出は必要不可欠な分野横断型技術であるが、あくまで黒子的な役割を担う技術であり、本技術が企業のコア技術として表舞台に立つことはない。また、実システムの安全を保証するという重責を担うため、技術そのものに高い信頼性が求められる。このような共通点がある一方で、産業分野ごとに故障や異常に対する考え方や活用されている技術は異なる。しかし総じていえば、研究開発および産業化において欧米が抜きん出ているといえよう。この理由として、石油メジャーやメガファーマのように業界をリードするグローバル巨大企業における研究開発に割く人材および予算の充実、さらに大学との積極的な共同研究（コンソーシアムを含む）があげられる。一方、韓国や台湾における半導体産業、韓国における鉄鋼業のように個別分野ではアジア地域の急進が目立つ。これらの国では欧米で学位を取得した研究者が母国で活躍するケースも多く、博士を使いこなせない日本企業とは対照的に見える。中国では、大学からの論文発表件数が急増しており、まだ欧米や日本の研究の後追いが多いものの、肩を並べるのも遠い未来ではないだろう。日本の研究レベルは高いと考えられるが、本分野の研究者数は十分とはいえず、産業によっては欧米に遅れをとっているのは否めない。

#### （４）科学技術的・政策的課題

アンケート調査<sup>13)</sup>などから、製造業が抱える主な課題は、原料や設備の特性変化に適応可能な技術の開発であることが判明している。製品特性への要求が非常に厳しくなる中で、ロットごとの原料特性のバラツキ、設備の経年劣化、保守作業に伴う装置特性の急激な変化などの影響が深刻化しており、これらの変化がある状況下でも高い信頼性を維持できる異常検出・仮想計測技術の開発が求められている。

欧米では、コンソーシアムを活用して、複数の企業と複数の大学が共同して産業化を目指した研究開発を実施している。例えば、カナダの McMaster Advanced Control Consortium (MACC)<sup>14)</sup>や米国の Texas-Wisconsin-California Control Consortium (TWCCC)<sup>15)</sup>では、産業分野の垣根を越えて分野横断型技術の研究開発が行われており、優れた産業化事例が報告されている。故障検出や異常検出は分野横断型技術であるため、このような取り組みが効果的であると考えられ、日本でも推進されるべきであろう。

医療・ヘルスケア分野への応用については、日本における医療機器に対する承認審査の厳しさが実用化の障壁になりうる。実際、米国との比較で、この点への国内医療従事者の不満は小さくない。

### （５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

製薬産業では、医薬品開発段階で、各医薬品の製造過程に応じたリスクを明確にし、そのリスクを適切に管理するための製造および品質管理システムを確立すること、さらに製品化後も製品ライフサイクルにわたって継続的な品質改善を行えるシステムを確立することが技術開発の方向性として明確に示された。従来の「製品試験による品質保証」から「工程内での品質保証」へというパラダイムシフトの結果として実現が期待されるのが、RTRT（Real Time Release Testing）、すなわち製品試験を省略する出荷システムである。製品試験の省略によるコスト削減、出荷までのリードタイム短縮、非破壊迅速分析技術の適用による環境負荷の低減（製品試験で使用する溶媒の削減）などのメリットがあり、欧米のメガファーマを中心に研究開発と実用化が急速に進められている。

ハードウェアとソフトウェアの両面による計算機パワーの向上によって、精密な第一原理モデルに基づくシミュレーションを工学や科学の諸分野で活用できる環境が整備されつつある。NSF（National Science Foundation）は“Simulation-Based Engineering Science（SBES）”に関する2006年のレポート<sup>16)</sup>において、SBESは科学・工学分野において米国がリーダーシップを取り続けるために不可欠であり、多岐にわたる分野の進歩にコンピュータシミュレーションが中心的な役割を果たすと述べている。これを受けて、SBESの研究開発に関する調査<sup>17)</sup>が実施され、国際比較の結果も報告されている。SBESによる製造条件の動的最適化などもすでに実用化されており、精密なシミュレーションに基づく故障検知・異常検出・仮想計測技術に関する研究開発も今後活発化すると考えられる。日本でも石油化学産業でミラープラントやトラッキングシミュレータというコンセプトの技術開発が進められており、期待したい。

### （６）キーワード

異常検出、異常診断、多変量統計的プロセス管理（MSPC）、フォールトトレラント制御／システム、ディペンダブル制御／システム、品質管理、仮想計測、ソフトセンサー、Process Analytical Technology（PAT）、Virtual Metrology（VM）、ウェアラブルセンサ、ヘルスケア

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	↗	・研究レベルは高いが、研究者の層が薄い。
	応用研究・開発	○	↗	・欧米との比較で、より活発な産学連携が求められる。
	産業化	○	↗	・研究者層の厚い欧米企業と比較すると遅れがちに見える。加えて、製造業の現場ではベテラン運転員の技能に依存する傾向があり、それが実装を遅らせている一面がある。 ・産業分野の垣根を越えた連携が必要と考えられる。
米国	基礎研究	◎	↗	・多岐にわたる分野で質量ともに充実している。 ・NSF (National Science Foundation) は2006年のレポートにおいて、Simulation-Based Engineering Science (SBES) は科学・工学分野において米国がリーダーシップを取り続けるために不可欠であり、多岐にわたる分野の進歩にコンピュータシミュレーションが中心的な役割を果たすと述べている。これを受けて、精密なシミュレーションを前提とした各種技術開発が活発化している。
	応用研究・開発	◎	↗	・産学連携（コンソーシアム）により、基礎研究から応用研究への展開が速い。例えば、米国のTexas-Wisconsin-California Control Consortium (TWCCC) やカナダのMcMaster Advanced Control Consortium (MACC) では、産業分野の垣根を越えて分野横断型技術の研究開発が行われており、優れた産業化事例が報告されている。
	産業化	◎	↗	・グローバル巨大企業を中心に多くの産業分野で優れている。
欧州	基礎研究	◎	↗	・質量ともに充実している。
	応用研究・開発	◎	↗	・研究人材が豊富で、レベルも高い。
	産業化	◎	↗	・多くの産業分野で、巨大企業を中心に優れている。
中国	基礎研究	○	↗	・質にバラツキはあるものの、研究者数・論文数が急増している。
	応用研究・開発	○	↗	・基礎研究のレベル向上を反映し、応用研究のレベルも向上している。 ・台湾からの半導体分野での論文投稿が多い。
	産業化	△	↗	・全般にまだ日本や欧米とは差がある。
韓国	基礎研究	◎	↗	・海外から優秀な研究者を集めている。
	応用研究・開発	◎	↗	・大学・企業ともに海外にも人材を求めており、レベルが向上している。
	産業化	◎	↗	・半導体や鉄鋼分野でのレベル向上が著しい。

（註1）フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

（註2）現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○：ある程度の活動・成果が見えている、

△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註3）トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

(8) 引用資料

- 1) Isermann, R. Model-based fault-detection and diagnosis - status and applications. Annual Reviews in Control. 2005, vol. 29, p. 71-85.
- 2) Venkatasubramanian, V.; Rengaswamy, R.; Yin, K.; Kavuri, Surya N. A review of process fault detection and diagnosis Part I : Quantitative model-based methods. Computers & Chemical Engineering. 2003, vol. 27, p. 293-311.
- 3) Venkatasubramanian, V.; Rengaswamy, R.; Kavuri, Surya N.; Yin, K. A review of process fault detection and diagnosis Part III : Process history based methods. Computers & Chemical Engineering. 2003, vol. 27, p. 327-346.
- 4) Kourti, T. Application of latent variable methods to process control and multivariate statistical process control in industry. International Journal of Adaptive Control and Signal Processing. 2005, vol. 19, no. 4, p. 213-246.
- 5) Ma, J.; Jiang, J. Applications of fault detection and diagnosis methods in nuclear power plants: A review. Progress in Nuclear Energy. 2011, vol. 53, no. 3, p. 255-266.
- 6) Zhang, Y.; Jiang, J. Bibliographical review on reconfigurable fault-tolerant control systems. Annual Reviews in Control. 2008, vol. 32, no. 2, p. 229-252.
- 7) Kadlec, P.; Gabrys, B.; Strandt, S. Data-driven Soft Sensors in the process industry. Computers & Chemical Engineering. 2009, vol. 33, no. 4, p. 795-814.
- 8) US Food and Drug Administration (FDA). Guidance for industry, PAT - A framework for innovative pharmaceutical development, manufacturing, and quality assurance. 2004.
- 9) PMDA. “日米 EU 医薬品規制調和国際会議”.  
[http://www.pmda.go.jp/ich/ich\\_index.html](http://www.pmda.go.jp/ich/ich_index.html)
- 10) ICH. “ICH Harmonised Tripartite Guideline-Pharmaceutical Development Q8-”. 2005.
- 11) ICH. “ICH Harmonised Tripartite Guideline-Quality Risk Management Q9-”. 2005.
- 12) ICH. “ICH Harmonised Tripartite Guideline-Pharmaceutical Quality System Q10-”. 2008.
- 13) Kano, M.; Ogawa, M. The state of the art in chemical process control in Japan: Good practice and questionnaire survey. Journal of Process Control. 2010, vol. 20, no. 9, p. 969-982.
- 14) McMaster Advanced Control Consortium. <http://macc.mcmaster.ca/>
- 15) Texas Wisconsin California Control Consortium. “TWCCC Overview”.  
<http://twccc.che.wisc.edu/>
- 16) National Science Foundation Blue Ribbon Panel. Simulation-Based Engineering Science. 2006, 66p. [http://www.nsf.gov/pubs/reports/sbes\\_final\\_report.pdf](http://www.nsf.gov/pubs/reports/sbes_final_report.pdf)
- 17) Research and Development in Simulation-based Engineering and Science.  
<http://www.wtec.org/sbes/>

### 3.2.9 環境エネルギーとシステム制御

#### (1) 研究開発領域名

環境エネルギーとシステム制御

#### (2) 研究開発領域の簡潔な説明

環境エネルギーに関するシステム制御研究が多岐にわたるなかで、スマートグリッド (Smart Grid) <sup>1)</sup> やエネルギーマネジメントシステム (Energy Management Systems; EMS) <sup>2)</sup> に関する研究開発が代表的な領域としてあげられる。米国では老朽化等により転換期を迎えつつある電力系統設備を刷新し、かつ低炭素化社会の実現を目指したスマートグリッドの研究開発が、日本においては再生可能エネルギーをはじめとした多様なエネルギーの需給を最適に制御する分散協調型エネルギーマネジメントシステム構築を目指した研究開発が重要となる。

#### (3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

地球温暖化や気象変動の影響が増す中で、質の高い生活や確かな経済的成長を維持するために、低炭素化を目指すさまざまな研究開発が 21 世紀に入り進んでいる。米国では 2009 年にエネルギー長官スティーブ・チュー (U.S. Energy Secretary, Steven Chu) がスマートグリッドに関するビジョンを発表し、研究が加速されてきている <sup>3)</sup>。欧州では伝統的な環境問題への高い意識から、再生可能エネルギーの導入が積極的に進められており、日本においても東日本大震災以降、分散協調型エネルギーマネジメントシステムの構築が急務となっている <sup>4, 5)</sup>。これらの研究開発には、システム科学における制御・最適化・モデリングの学術融合に加えて、センサーやネットワーク技術の進歩が大きく貢献している。

従来型の火力発電所等からの電力供給を前提とした電力系統システム制御工学については、一定の研究がこれまで進んでいるものの、これに対して再生可能エネルギーの安定的導入を可能とする新しい電力網の構築を目指した研究は重要性が増すばかりである <sup>6-8)</sup>。再生可能エネルギー源として代表的な風力発電 (Wind Energy) や太陽光発電 (Photovoltaics; PV, Solar Energy) は、いずれも気象状況等による変動性、不確かさ、間欠性などの技術的課題を有している。このため再生可能エネルギーの導入に際しては、停電のリスクを最小限に減じ安定供給を確保したうえで、さらに周波数・電圧を維持して高い電力品質を保つ制御方法の研究が活発に推進されている <sup>9, 10)</sup>。風力発電については、北海を臨む欧州北部を始めとして、米国・欧州共に研究が盛んである。高性能な風力発電機のメカニカル制御も進んでおり、一方で洋上風力発電についても開発が進められている。また太陽光発電については日本における研究の歴史も長く、米欧と共に研究が進んでいるといえる。関連する技術開発としては、送配電側に設置される蓄電池の効率的活用方法、広域化によるならし効果の検証などもあげられる。気象観測データや地球環境モデルに基づく風力風速・日射量など再生可能エネルギー生成に関する予測技術の向上も欠かせない技術開発分野となっている。

広域連携された電力システムの制御法についても、近年研究が活発である。センサー側における PMU (Phase Measurement Unit) あるいはシンクロフェザーと呼ばれる位

相計測装置の開発が進化したことにより、米国では老朽化しつつある電力系統の信頼度の回復を目指して、広域制御 (Wide Area Control) の研究がひとつの焦点となっている。アクチュエータ側にはパワーエレクトロニクスの発達による FACTS (Flexible AC Transmission Systems) 機器も用いられるようになり高性能化が図られている。日本においても電力システム改革に沿って広域系統運用が実施されることになり、広域制御の重要性が高まっている。米欧と日本の間にはメッシュ状とくし型という電力系統の特徴の違いがあるが、いずれにしても周波数制御、電圧制御、AGC (Automatic Generation Control)、最適潮流 (Optimal Power Flow; OPF) など、さまざまな制御手法の高度化が進んでいる。また震災以降の日本においては、災害時においても頑強なエネルギーインフラの構築も重要な課題となっている。

米国における近年のシェールガス開発の急展開により、卸電力市場を通じた最適な電力の取り引き方法に関する研究も始まっている。対して日本においては電力システム改革に伴う全面自由化に備え、電力の小売市場の設計やインセンティブについても経済学的な見地も踏まえて考察が進められている。需要側と供給側それぞれの利己的な意志決定を社会的利益につなげるために、人間行動を考慮したメカニズムデザインの研究が望まれている。

従来は電力のいかなる需要に対しても、主に供給側を一方的に管理・制御することにより調整を実施することが常識であった。しかしこれまでのように供給側ばかりではなく、需要側をも能動的に管理していくことで電力需給の最適化を図る研究が強力に進められている。いわゆる需要のスマート化であり、電力需要の固まりをバーチャルパワープラント (Virtual Power Plant) として見立てることもできる。特にデマンドレスポンス (Demand Response) に関する手法が数多く研究報告されている。電力需要の予測方法や電力料金の設定に関しダイナミックプライシングを行う方法、さらにスマート家電・インテリジェント家電が増えていく中で可制御・可変な負荷に対するデマンドサイドマネジメント (Demand Side Management) の各種方法の研究が行われている。関連して近年米欧を中心に TCL (Thermostatically Controlled Load) のモデリングと制御に関する研究に成果がみられる。また電気自動車 (Electric Vehicle; EV) やプラグインハイブリッド車 (Plug-in Hybrid Electric Vehicle; PHEV) を外部電池とみなすことにより、これを効率的にスケジューリングする研究も進められている。

上述のデマンドレスポンスと共に成長が期待される分野は、各種の電力エネルギー貯蔵 (Energy Storage) に関する技術開発である。特に高性能な蓄電池 (Battery) は、送電と配電の双方の需給制御において鍵となる要素技術であり、そのシステム管理技術の確立が期待される。他に燃料電池 (Fuel Cell) も電力の需給安定化には重要な役割を果たすことになる。さらに熱エネルギーと電気エネルギーの協調も今後欠かすことができないものであり、ヒートポンプを含む CHP (Combined Heat and Power)、コジェネレーション、HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioning) 関連の技術開発も行われている。以上のような研究開発が統合された BEMS (Building Energy Management Systems) や HEMS (Home Energy Management Systems)、さらにはマイクログリッド (Micro Grid) の構築研究が期待される。

電力を計測するための各種スマートメーターや AMI (Advanced Metering

Infrastructure) の開発整備は、これから需給安定化のみならず、その効率最適化に向けて重要な役割を果たすことになる。機器開発に関わるハードウェア的な側面の他に、機械学習理論を駆使した電気エネルギーの使用に関するデータアナリティクス手法の進展が期待される。しかしながら一方で、同時にサイバーセキュリティやプライバシーに関する研究の進展もこれから益々重要になってくるであろう。

#### （４）科学技術的・政策的課題

センサー側では PMU (Phase Measurement Unit) の導入、アクチュエータ側では FACTS (Flexible AC Transmission Systems) 機器の採用を促進し、新たな制御方法の技術開発を進めて広域制御の実現を図ろうとしている。再生可能エネルギーの導入に関しても、シェールガスの開発が進む中で電力市場における経済的なインセンティブの付加や統合的なメカニズムデザインの検討を進め、新たに低炭素化を目指す方向にある。欧州は各国が一体化することでロバストなシステムを構築し、大量の再生可能エネルギーが生成される地域から大規模な需要地域へ電力が送配電されるように制御技術の開発が着実に進められている。

これに対して平成 32 年（2020 年）に向けて電力システム改革が進められようとしている中、日本では再生可能エネルギーの可能な限りの導入を実現し、広域システム運用を実施する新たな広域機関による安定かつ最適な需給調整技術の確立が重要な課題となっている。同時に、卸電力市場の活性化に加えて小売市場の全面自由化に伴い、システム運用者・市場参加者・エネルギー需要家の協調・連携による需給管理技術の確立も急務の課題である。電気エネルギーを供給するサイドにおけるさらなる広域化と、その需要サイドにおける一層の分散化が同時に進行することとなり、電力需給を最適に制御する技術の確立に向けて多くの課題がある。

米欧と日本いずれにおいても、需要家参画型の仕組みや需要のスマート化の方向性は今後も最も重要な課題のひとつとなっている。需要の予測や監視、そして制御が課題達成の鍵となってくる。スマートメーターや AMI (Advanced Metering Infrastructure) の更なる普及を見越していく中で、デマンドレスポンスの手法の開発やデマンドサイドのマネジメント手法の開発に関して一層の研究を進めていく必要がある。同時に、サイバーセキュリティやプライバシーに関する課題も複雑に絡み合っていくことと考えられる。

#### （５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

- ・ 米国国立科学財団 (National Science Foundation; NSF) の支援による ERC (Engineering Research Center) プログラムとして、テネシー大学等を中心とした CURENT (Center for Ultra-wide-area Resilient Electric Energy Transmission Networks) プロジェクト<sup>11)</sup>、あるいはノースカロライナ州立大学等を中心とした FREEDM (Future Renewable Electric Energy Delivery and Management) プロジェクト<sup>12)</sup>に注目することができる。NSF ERC は大規模で学際的な研究開発拠点を構築するための支援プログラムであり、産学連携のみならず人材育成の面にも大きな重きを置いている点などに特徴がある。環境エネルギーに対するシステム制御研究に関

連するこれら CURENT や FREEDM プロジェクトでは、最大で年間 4 億円、最長で 10 年間総額約 30 億円の支援がなされるようになっている。

- ・日本においては、平成 24 年（2012 年）より JST CREST 研究領域「分散協調型エネルギー管理システム構築のための理論及び基盤技術の創出と融合展開」が開始されている。8 年間で総額 40 億円の支援が見込まれている。この研究領域の運営には新たにステージゲート方式の採用が試みられており、異分野の融合展開をはかる超領域的な研究の推進が成されようとしている。同時に JST と米国 NSF、ドイツ DFG との国際連携も積極的に進められており、社会的課題達成型のイノベーションプロジェクトとして進行している。
- ・環境やエネルギーに関わるシステム制御研究が進展していくに連れて、このような研究を中核としつつさらに大きな広がりもつスマートシティ（Smart City）に関する研究の成立が注目動向としてあげられる。エネルギーと共に人間社会には欠かせない水資源のマネジメントシステム、都市や地域における暮らしと密接に関わっている交通のマネジメントシステム、さらには社会インフラや環境モニタリングをも一括し管理・制御するシステムの構築研究が統合的に進められようとしている。社会インフラと融合したスマートシティへの展開である。すでに IEEE にはこの新興の研究分野を統括するワーキンググループが発足しており、活動を始めたところである<sup>13)</sup>。IEEE Control Systems Society 内にも同様の Technical Committee が設立されたばかりであり、すでに国際会議が開かれるなどしている。

#### （6）キーワード

エネルギーマネジメントシステム、スマートグリッド、再生可能エネルギー、太陽光発電、風力発電、蓄電池、広域制御、電力市場、デマンドレスポンス、電気自動車、マイクログリッド、BEMS、HEMS、スマートメーター

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↗	・JST CREST研究領域の発足などにより、異分野の融合展開による超領域的な研究が加速され、学術的な基礎研究のレベルが向上してきている。
	応用研究・開発	○	↗	・経済産業省による4地域（横浜市、豊田市、けいはんな学研都市、北九州市）における実証事業などにおいて、再生可能エネルギー導入や低炭素化に向けた技術開発が進められている。
	産業化	○	↗	・JST CRESTの課題解決型基礎研究や4地域等における実証事業研究の成果を受けて、今後産業化が進んでいくことが期待される。
米国	基礎研究	◎	↗	・国等からの研究費の大幅な増加に伴い、基礎研究面での研究者数・論文数が著しく伸びている。その結果、世界の基礎研究をリードしているといえる。
	応用研究・開発	◎	↗	・当初の電力システムの信頼度の回復という側面から、シェールガスの開発などを経て、低炭素化社会の実現へ向けて様々な研究プロジェクトが実施されている。
	産業化	◎	↗	・エネルギー供給側の電力システムに関する産業ばかりでなく、電力市場・エネルギー需要家サイドに関わる産業も発展しつつある。特に需要家サイドに関連する産業は裾野が広く、今後の更なる展開が期待される。
欧州	基礎研究	○	→	・理論的な基礎研究と技術的な基礎研究がバランスよく進められている。欧州北部では風力発電に関する研究が特に進んでいる。
	応用研究・開発	◎	↗	・環境に関する高い意識を背景に、再生可能エネルギーの導入を推進する研究が活発に行われている。各国個別でなく国を超えて欧州全体を一体化して捉えた環境エネルギー問題の研究も活発である。
	産業化	◎	↗	・再生可能エネルギーによる電力供給だけでなく、電力市場や需要家サイドの管理など様々な面で産業化が進みつつあるといえる。
中国	基礎研究	△	→	・米国におけるスマートグリッド制御の基礎研究をキャッチアップしつつ、研究者や論文数が増加しつつある。しかしながら科学技術イノベーションには達していない。
	応用研究・開発	○	↗	・急速な経済成長による電力需要の増加を充足するために、国レベルの事業が行われている。また新規の都市開発型のエネルギー関連プロジェクトも始められている。
	産業化	△	↗	・社会インフラ整備や都市開発を牽引する産業の成長はこれからである。
韓国	基礎研究	△	→	・学術的な基礎研究においては他国に比べて特筆すべき動きは少ない。むしろ応用技術開発の方に傾注している。
	応用研究・開発	○	→	・済州島におけるスマートグリッド実証事業など、経済の活性化を意識した国レベルの実証事業が進められている。
	産業化	△	→	・実証事業と民間の技術開発の間にはまだギャップがあり、産業化が十分に進んでいるとは言えない。

（註1）フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

（註2）現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○：ある程度の活動・成果が見えている、

△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註3）トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

（8）引用資料

- 1) Annaswamy, Anuradha M.; Amin, Massoud; DeMarco, Christopher L.; Samad, Tariq, eds. IEEE Vision for Smart Grid Controls: 2030 and Beyond. IEEE, 2013.
- 2) JST CREST. 分散協調型エネルギー管理システム構築のための理論及び基盤技術の創出と融合展開.  
<http://www.jst.go.jp/kisoken/crest/ryoiki/bunyah24-1.html>
- 3) Samad, Tariq; Annaswamy, Anuradha M., eds. The Impact of Control Technology - Overview, Success Stories, and Research Challenges. IEEE Control Systems Society, 2011.
- 4) 特集 グリーンイノベーションと制御理論. 計測と制御. 2012, vol. 51, no. 1, p. 8-86.
- 5) 特集 大規模エネルギーマネジメントシステムを支える省エネソリューション. 計測と制御. 2014, 53(1), p. 2-73.
- 6) Bakken, David E.; Bose, Anjan; Chandy, K. Mani; Khargonekar, Pramod P.; Kuh, Anthony; Low, Steven H.; von Meier, A.; Poolla, Kameshwar; Varaiya, Pravin P.; Wu, Felix F. GRIP - Grids with Intelligent Periphery: Control Architectures for Grid 2050. Proc. of the 2011 IEEE SmartGridComm, 2011, p. 7-12.
- 7) Andersson, Goran; Ilic, Marija D.; Madani, Vahid; Novosel, Damir, eds. Special Issue on Network Systems Engineering for Meeting the Energy and Environmental Dream. Proc. of the IEEE. 2011, vol. 99, no. 1, p. 15-232.
- 8) Chakraborty, Aranya; Ilic, Marija D., eds. Control and Optimization Methods for Electric Smart Grids. Springer, 2012.
- 9) Fagiano, Lorenzo; Morari, Manfred; Rotea, Mario A.; Stewart, Greg, eds. Special Section on To Tame The Wind: Advanced Control Applications in Wind Energy. IEEE Transactions on Control Systems Technology. 2013, vol. 21, no. 4, p. 1045-1222.
- 10) Annaswamy, Anuradha M.; Callaway, Duncan; Chow, Joseph; DeMarco, Christopher L.; Hill, David; Khargonekar, Pramod P.; Rantzer, Anders; Stoustrup, Jakob eds. Special Section on Control Theory and Technology. IEEE Transactions on Smart Grid. 2014, vol. 5, no. 4, p. 2031-2172.
- 11) NSF ERC. CURENT. <http://curent.utk.edu/>
- 12) NSF ERC. FREEDM. <http://www.freedm.ncsu.edu/>
- 13) IEEE Smart Cities. <http://smartcities.ieee.org/>

### 3.2.10 都市インフラとシステム制御

#### (1) 研究開発領域名

都市インフラとシステム制御

#### (2) 研究開発領域の簡潔な説明

都市インフラシステムは、個々のサブシステム間の複雑な相互作用および相互干渉を含む大規模分散階層ダイナミカルシステム、つまりシステムのシステム (system of systems) と見なすことが出来る。その主な構成要素としては上下水道網<sup>1-4)</sup>、交通網<sup>5-7)</sup>、送電網<sup>8, 9)</sup>、情報網<sup>10)</sup>が挙げられる。これまでは、都市インフラの各要素がどのように相互作用・相互干渉し、その結果、大規模な動的システムが構成されているかについてシステム制御工学的な解析が充分に行われていなかった。豪雨による土砂災害 (2014) や東日本大震災 (2011) のような最近の大規模天災は、現在の都市インフラシステムにおける個々の社会基盤システム間の相互連携不足を露呈し、現状の都市インフラシステムが災害や事故に脆い事実が改めて浮き彫りとなった。現在、都市インフラシステムのモニタリングおよび制御のために、情報端末や計測制御装置が導入され始め、これに伴い都市インフラシステムの各サブシステム間の相互依存度が益々高まってきている<sup>11, 12)</sup>。

都市環境の成長度は一般に人口もしくは人口密度で表現出来る。つまり都市インフラシステムは、システム工学的には、水、電気、天然資源を入力、排出物・廃棄物を出力、人口もしくは人口密度をシステムの状態として扱うことにより、システム科学アプローチが応用出来るであろう<sup>13)</sup>。現在、システム理論、制御理論、情報理論、意思決定理論および持続可能な設計からの概念を使用し、都市インフラシステムの分析、設計および最適化について研究が行われつつある。

#### (3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

##### (3-1) 複雑な都市インフラシステムの動的モデリング

都市インフラシステムは、時間的にも空間的にも振舞いも形態も一種のダイナミカルシステムと見なすことが出来る。更にはこのダイナミカルシステムは決定論的/確率論的性質を有する高度に複雑な系である。大規模複雑系である都市インフラシステムを時変システムとしてモデリングし、得られたモデルを用いて、サブシステム間の干渉、独立を含めた複雑動的システムの振舞いを予測・分析する研究が進んでいる<sup>14, 15)</sup>。

##### (3-2) サイバーフィジカル都市インフラシステム

サイバーフィジカルシステムは、実世界 (Physical System) に浸透した組み込みシステムが構成するセンサネットワークの情報を、サイバー空間 (Cyber System) の強力なコンピューティングツールと結び付け、より効率のよい高度社会を実現するためのサービスおよびシステムである。都市インフラシステム分野においては、埋め込みセンシング、コンピューティングと制御技術に関する研究が盛んであり、特にスマートセンシングインフラ、高度交通網 (ITS)、サブエリアの電力モニタリングと制御、上下水道分配システムについての研究が進んでいる<sup>16)</sup>。

### (3-3) 都市インフラシステムの適応力と回復力

高層ビルと大型橋梁のような大型構造物は、長期間にわたる耐用年数の間に継続して安全性を保持することを要求されるため、地震、台風、突風、高潮、高波、風雪などの極端な負荷に起因する巨大な不確実性も考慮して設計されなければならない。今日の都市インフラシステムが直面する主な挑戦課題の1つは、これらの極端な負荷による破壊と損害のリスクを軽減し、かつ都市のインフラストラクチャーの回復力を増強する方法の探索である。例えば、大型構造物の動的な振舞いや動的な構造に適応するため、アクティブ/パッシブ制御システムを構築して極端な変形およびストレスを抑え、さらには大型構造物が破損・故障した時には、スマートに形状と剛性を適応的に再構成・再設計させる構造について研究が進んでいる。

### (3-4) 超低消費電力センシングと都市インフラシステムの状態推定

大規模で知的な都市インフラのフィードバック制御を実現するには、リアルタイム最適化や意思決定のための大規模リアルタイムセンサネットワークの構築が必要である。このためにはセンシングデバイスの低コスト化とダウンサイジング、そしてセンサバッテリーの長寿命化と超低消費電力センシングデバイスの開発を進めなければならない。この都市インフラの計測データセットは莫大になり、所謂ビッグデータとなるため、システム制御理論、コンピュータサイエンスおよび機械学習理論などを駆使して有効活用する研究が進展している。

### (3-5) スマート水道網

従来の水道システムでは、一般消費者の水消費需要に対応するため、様々な所有権および管理境界は緩く相互連結していたに過ぎず、端部での流入流出量などの部分的な流量計測が長周期で行われていた。スマート水道網では、計測制御技術と ICT 技術の進展に伴い、全水道網の状態をリアルタイム計測することにより、水流と情報の流れを連繫させ、水道網を完全自動制御出来るだけでなく、水道管のトラブルなどの故障検出も可能となる。また水需要に合わせた効率的な水分配の実現を目指している。さらに、消費情報を基に、当該エリアにおける社会・経済活動についてもデータを蓄積することが出来る。

### (3-6) 環境発電

社会システムに電力エネルギーを給電するシステムとして、従来の発電機を用いない環境発電が注目されている。具体的には、社会システムの振動現象からエネルギーを抽出することが期待されている。抽出した電力を都市インフラのモニタリングのためのデバイス駆動に使用すれば、これらのデバイスは一般に消費電力が少ないので、サステナブルなモニタリングが可能となる。またモニタリング用のセンサデバイスは、対象システムに埋め込まれるケースが多く、そのため物理的にアクセスし難く、バッテリー交換は現実的でない。そのような場合、アンビエント振動エネルギーは、センサへ供給可能な数少ない動力源のうちの1つである。また別の例として、海上波発電システムは、浮遊システムが電力変換システムと接続され、海岸のコミュニティーに電力を供給する。

これら両方の例において、振動エネルギーの有効利用には、電力変換技術の基本的制約およびエネルギー源の予測困難な振舞いを扱う必要がある。

#### （４）科学技術的・政策的課題

都市インフラと制御に関しては世界的に研究が推進されており、日本に於いてもこの分野の強化を早急に実施しなければならない。次節「（５）注目動向」で述べるワークショップ②では MIT の建設工学科の研究者と制御工学者、情報工学者が共同研究することにより、新領域における研究を推進している。日本においては土木建設に関する学界、研究グループが比較的閉じているためか、このようなコラボレーションはあまり見受けられない。

甚大な被害が想定される大規模災害に対し、新しい防災アプローチのパラダイムとして、予防だけでなく、回復力を加味したレジリエンス（回復性、強靱性）を高めるため、社会科学、人文科学等も含めた幅広い学術分野の総合的な研究開発を進め、強くて弾力性のある社会の実現を目指すことが重要である。

渋滞や交通事故の抜本的な削減、環境負荷の低減など安全・安心で快適な交通社会を実現するため ITS を高度化することが重要である。これにあわせて、安全・安心で快適な生活を目指すスマートコミュニティの実現も見据えて技術開発を行うことが必須である。

#### （５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

2014年12月にロサンゼルスで開催された 53rd IEEE Conference on Decision and Control 2014 は世界的にも制御理論に関して質、量ともに一流の会議であるが、その会議において社会インフラと制御に関する以下の 2 つのワークショップが開催されたことは特筆すべき動向であり、この事実はこの分野の大きな発展と今後の展開の兆候を示している。

##### ①社会的規模のサイバーフィジカルシステムのためのビックデータ解析<sup>17)</sup>

カリフォルニア大バークレイ校の S. Shankar Sastry を中心にカーネギーメロン大、マサチューセッツ工科大、スウェーデン王立工科大の研究グループが集まり、レジリエントな（回復力を有する）社会的規模のサイバーフィジカルシステム（CPS）について議論している。本ワークショップでは最も急速に発展している CPS、特にエネルギー部門に注目し、社会的規模の CPS のための工学的アプローチとして自動制御、システム同定、圧縮センシング、プライバシー、セキュリティおよび機械学習を紹介している。またこれらの応用分野としての産業的ニーズ、インセンティブ設計、災害からの回復力とセキュリティ、プライバシー保護の制御工学的手法についても紹介している。

##### ②災害からの回復力を有するサイバーフィジカルインフラシステム<sup>18)</sup>

マサチューセッツ工科大建設工学科の Saurabh Amin と Hamsa Balakrishnan を中心にイリノイ大学、ジョージア工科大、スウェーデン王立工科大、ハネウエルの研究グループが集まり、偶発的な故障およびテロやアタックの両方に対する回復力を有するインフラストラクチャーの構築問題について議論している。現代のインフラシステムは高度の ICT の発達により益々相互連結度を高めているため、ネットワーク制御の問題およびカスケード故障の問題の重要性が高まっている。この問題に対して、災害回復力のあるインフラシステムの構築への制御工学とシステム理論的なアプローチ

に関する研究が進展している。具体的には、フォールトトレラント制御、ロバスト制御・最適化を含むサイバーフィジカルシステム、侵入検知、セキュリティ、ソフトウェア検証、ヒューマン・オートメーション相互作用、メカニズム・デザイン、モデリングシミュレーションなどが挙げられる。これらの技術は、交通輸送、電気エネルギー、通信および水道と都市ガスのシステムのような一連の社会インフラシステムのために研究されてきた。このワークショップでは、災害からの回復力のあるサイバーフィジカルインフラストラクチャーを構築するために、制御理論的アプローチの中でも最先端技術のものを紹介している。

（6）キーワード

都市インフラシステムの動的モデリング、サイバーフィジカル都市インフラシステム、適応力と回復力、超低消費電力センシング、状態推定・状態予測、スマート水道網、環境発電

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>国交省を中心に構造物への対策（老朽化、長寿命化、低コスト化）、設備・サービスの強靱化、ハード/ソフト施策間の連携に関して研究開発が進められている。</li> <li>ビックデータに関するプロジェクトが2014年度にスタートしているが、土木建設、制御、最適化の分野の参画は十分と言えない。</li> </ul>
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>横浜、豊田、けいはんな、北九州でスマートグリッドに関する実証実験が進んでいる。</li> </ul>
	産業化	×	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>東日本大震災後、再生可能エネルギー導入に関わる動きが活発化し特に太陽光発電とスマートメータ導入が進んでいる。</li> <li>2013年に電力システムの改革方針が閣議決定され、2020年を目途に送配電分離とリアルタイム市場の創設が準備されつつある。</li> </ul>
米国	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>サイバーフィジカルシステム、サイバーセキュリティーに関して盛んに研究が進んでいる。土木建設、制御、情報、通信、機械学習などの分野が横断的に連携した研究が進みつつある。</li> <li>NSFで2009年より Resilient and Sustainable Infrastructures に関する大型ファンディングが進んでいる。</li> <li>NISTでは2009年より Advanced Sensing Technologies for the Infrastructure: Roads, Highways, Bridges and Water Systems も進んでいる。</li> </ul>
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> <li>ICTと連携した様々なビックデータの収集、応用展開に関する研究開発が強力に推進されている。</li> </ul>
	産業化	○	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>スマートグリッド関連事業への助成を背景に、多くのプロジェクトが進んでいる。</li> <li>電力網については老朽化した設備が増えてきているが、ITを活用してその更新費用を抑えつつ、供給信頼度向上を目指すプロジェクトが進んでいる。</li> <li>州間電力連繋、カナダやメキシコとの国際電力連繋に関するプロジェクトが進んでいる。</li> </ul>

研究開発領域  
制御区分

欧州	基礎研究	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>・歴史的に社会インフラ（電力網や上水道）の国際連携が進んでいるため、それをニーズとして、大規模複雑システムの研究が進んでいる。</li> <li>・欧州発祥のIFAC（国際自動制御連合）では社会インフラを扱ったLSS（Large Scale Complex Systems）というSymposiumが隔年で開催されている。最近の主なトピックスはスマートグリッドやセキュリティである。</li> <li>・2011年よりMAINLINE（MAINtenance, renewaL and Improvement of rail transport iNfrastructure to reduce Economic and environmental impacts）というプログラムが進んでいる。</li> </ul>
	応用研究・開発	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>・電力網の国際連携、上水道の国際連携に関わる研究が昔から行われており、歴史的にも社会インフラの制御技術に関して先駆的に研究が進んでいる。</li> </ul>
	産業化	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>・スマートグリッドの重要要素技術であるスマートメーターの導入が2000年代に入って急速に伸びている。</li> <li>・ドイツではE-Energyプロジェクトが2008年より展開されている。鉄道、道路など個別分野で専門的な老朽化対策プロジェクトが組まれている。</li> </ul>
中国	基礎研究	△	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>・The 13th IFAC Symposium on Large Scale Complex Systemsを誘致し、2013年に上海で開催している。これに伴い研究者層が増えている。</li> </ul>
	応用研究・開発	△	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>・社会インフラ整備が未整備なエリアが多く、盛んに開発が行われている。</li> </ul>
	産業化	△	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>・都市部では交通・物流、エネルギー、通信等のインフラ整備が進むと共に、国際比較で遅れ気味の汚物処理等のインフラの整備が進む。</li> </ul>
韓国	基礎研究	△	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>・論文数は増加の傾向にあるが、米国、欧州と比べるとそれほど盛んとは言えない。</li> </ul>
	応用研究・開発	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>・済州島のスマートグリッド実証事業を推進しており、スマートグリッドなど電力インフラの応用開発が盛んである。</li> </ul>
	産業化	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>・2011年に世界初のスマートグリッド支援に係る法律を制定するなど、電力インフラの産業化を官民一体で推進している。</li> <li>・2010年にスマートグリッド普及ロードマップを作成し、これに沿って法整備を進めている。</li> </ul>

（註1）フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

（註2）現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○：ある程度の活動・成果が見えている、

△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註3）トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

## （8）引用資料

- 1) Brdys, Mietek A. Operational Control of Water Systems: Structures, Algorithms, and Applications. Prentice Hall, 1994.
- 2) Sampathirao, Ajay Kumar; Grosso, Juan Manuel; Sopasakis, Pantelis; Ocampo-Martinez, Carlos; Bemporad, Alberto; Puig, Vicenc. Water demand forecasting for the optimal operation of large-scale drinking water networks: The Barcelona Case Study. Preprints of the 19th World Congress of the International Federation of Automatic Control, 2014, p. 10457-10462.

- 3) 長岡裕. 上下水道施設におけるシミュレーション技術の現状と今後. 環境システム計測制御学会誌. 2012, p. 3-6.
- 4) 柏木雅彦, 臼井正和. 上下水道システムの現況と新しい概念. 電気学会誌. 1991, vol. 111, no. 3, p. 211-218.
- 5) Chen, Bo; Cheng, Harry H. A Review of the Applications of Agent Technology in Traffic and Transportation Systems. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2010, vol. 11, no. 2, p. 485-497.
- 6) Kamal, Md. Abdus Samad; Imura, Jun-ichi; Hayakawa, Tomohisa; Ohata, Akira; Aihara, Kazuyuki. Smart Driving of a Vehicle Using Model Predictive Control for Improving Traffic Flow. IEEE Trans. on Intelligent Transportation Systems. 2014, vol. 15, no. 2, p. 878-888.
- 7) Chien, C. C.; Zhang, Y.; Ioannou, P. A. Traffic density control for automated highway systems. Automatica. 1997, vol. 33, no. 7, p. 1273-1285.
- 8) Camacho, E. F.; Rubio, F.; Berenguel, M.; Valenzuela, L. A survey on control schemes for distributed solar collector fields (part 1 and 2). Solar Energy. 2007, vol. 81, p. 1240-1272.
- 9) Varaiya, Pravin P.; Wu, Felix F.; Bialek, Janusz W. Smart Operation of Smart Grid: Risk-Limiting Dispatch. Proceedings of the IEEE. 2011, vol. 99, no. 1, p. 40-57.
- 10) Giani, Annarita; Bitar, Eilyan; Garcia, Manuel; McQueen, Miles; Khargonekar, Pramod; Poolla, Kameshwar. Smart Grid Data Integrity Attacks. IEEE Transactions on Smart Grid. 2013, vol. 4, no. 3, p. 1244-1253.
- 11) 倉田成人. 都市のスマートセンシング. 計測と制御. 2013, vol. 52, no. 11, p. 943-945.
- 12) 柴崎亮介, 関本義秀, 藤田秀之. 都市情報センシング. 計測と制御. 2013, vol. 52, no. 11, p. 946-952.
- 13) van Beurden, Heidy. Smart City Dynamics : Inspiring views from experts across Europe. HvB Communicative BV. 2011.
- 14) Zhang, Pengcheng; Peeta, Srinivas. Dynamic and disequilibrium analysis of interdependent infrastructure systems. Transportation Research Part B. 2014, vol. 67, no. 9, p. 357-381.
- 15) Eusgeld, Irene; Nan, Cen; Dietz, Sven. "System-of-systems" approach for interdependent critical infrastructures. Reliability Engineering & System Safety. 2011, vol. 96, no. 6, p. 679-686.
- 16) Li, Husheng; Dimitrovski, A.; Song, Ju Bin; Han, Zhu; Qian, Lijun. Communication Infrastructure Design in Cyber Physical Systems with Applications in Smart Grids: A Hybrid System Framework. IEEE J. of Communications Surveys & Tutorials. 2014, vol. 16, no. 3, p. 1689-1708.
- 17) <http://www.eecs.berkeley.edu/~ratliff/CDC2014WS/cdc2014ws>
- 18) <http://www.mit.edu/~hamsa/CDC2014ResilientInfrastructureWorkshop.html>