

ワークショップ報告書
**2014年度システム科学技術分野
俯瞰ワークショップ報告書**

2014年10月24日（金） 開催



独立行政法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター
Center for Research and Development Strategy, Japan Science and Technology Agency

エグゼクティブサマリー

独立行政法人科学技術振興機構（JST）研究開発戦略センター（CRDS）では 2013 年 3 月に「研究開発の俯瞰報告書」（以下、俯瞰報告書）を発行した。俯瞰報告書は CRDS が政策立案コミュニティおよび研究開発コミュニティとの継続的な対話を通じて把握している研究開発の大きな流れを、研究開発戦略立案の基礎資料とすることを目的として、CRDS 独自の視点でまとめたものである。

CRDS システム科学ユニットでは、システム科学技術を「望ましいシステムを構築するための科学的な基盤と、それを達成するための技術的な手法の総体」と定義して、この分野の俯瞰活動を行ってきた。最初の俯瞰報告書となった 2013 年版では、システム科学技術分野の下に「意思決定とリスクマネジメント」、「モデリング」、「制御」、「最適化」、「ネットワーク論」、「システム構築方法論」の 6 つの俯瞰区分、さらに、それぞれの区分の下に、より細分化したさまざまな研究開発領域を設定して、各研究開発領域の動向を国際比較も含めて調査し、とりまとめた。

CRDS では 2 年ごとに俯瞰報告書の大幅な改訂を行うことにしており、現在、2015 年版の俯瞰報告書発刊に向けた活動を進めているところである。システム科学技術分野の俯瞰区分としては、2013 年版でもとりあげた「モデリング」、「制御」、「最適化」、「ネットワーク論」、「システム構築方法論」の他に、「複雑システム」、「サービスシステム」の 2 つを新たに追加している。

この俯瞰活動の一環として、システム科学ユニットは 2014 年 10 月 24 日（金）にシステム科学技術分野の俯瞰ワークショップを開催した。そこでは、関連する分野の有識者が一堂に会し、上記の各区分の俯瞰活動などについての現状報告と、それらに対する議論が活発に行われた。本報告書はその時の内容を要約したものである。

「制御」区分では、2 つの研究開発領域「環境エネルギーとシステム制御」および「都市インフラとシステム制御」において、2013 年版とは異なる視点からの俯瞰を試みている。2013 年版の研究開発領域としては、さまざまなシステムで共通に必要な個々の基盤技術に関するものが多かった。今回、上記の 2 つの領域では環境エネルギーや都市インフラといった現代社会において重要なシステムをまず認識し、そこで必要となる要素や制御技術として何があるか、といった視点で俯瞰がなされている。

「システム構築方法論」区分については、この区分に含まれるべきシステム科学技術が十分には体系化されていないため、2013 年版では研究開発領域を設定した詳細な俯瞰ができなかったが、今回、それを一つの形としてまとめることができた。

「複雑システム」区分では、生命系、数物系、工学系、社会経済系のように、人工物としてのシステムだけではなく、自然システムを含む広範な領域が俯瞰されている。

「サービスシステム」区分では、現代社会においてますます必要とされてきているサービスに関する分野横断的な科学技術が価値創造という視点と共にまとめられている。

なお、本ワークショップで議論された内容は 2015 年版俯瞰報告書に生かされることになる。

目 次

エグゼクティブサマリー

1. ワークショップの概要	1
1－1. プログラム.....	1
1－2. 参加者一覧（50 音順）	2
2. システム科学ユニットからの報告	3
2－1. 開会挨拶.....	3
2－2. システム科学技術分野俯瞰概要.....	4
3. 各俯瞰区分からの報告	7
3－1. モデリング.....	7
3－2. 制御.....	13
3－3. 最適化.....	20
3－4. ネットワーク論.....	32
3－5. 複雑システム.....	39
3－6. サービスシステム.....	47
3－7. システム構築方法論.....	55
4. 総合討論	60
付録. ワークショップ後の検討状況	64

1. ワークショップの概要

1-1. プログラム

開催日時：2014 年 10 月 24 日（金） 10:30 ～ 18:00

開催場所：JST 東京本部別館 1 階ホール

プログラム：

総合司会：藤井 新一郎（CRDS フェロー）

午前の部（一部の関係者のみ。詳細な内容は本報告書では非公開）

- | | |
|---------------|--|
| 10:30 ～ 10:45 | 事務連絡およびシステム科学技術分野 A3 図の紹介
藤井 新一郎（CRDS フェロー） |
| 10:45 ～ 11:00 | システム科学技術分野俯瞰図の紹介
木村 英紀（CRDS 上席フェロー） |
| 11:00 ～ 12:00 | 議論（モデレーター：鈴木 久敏（CRDS フェロー）） |

午後の部

- | | |
|---------------------------------|--|
| 13:00 ～ 13:05 | 開会挨拶
木村 英紀（CRDS 上席フェロー） |
| 13:05 ～ 13:20 | システム科学技術分野俯瞰概要
藤井 新一郎（CRDS フェロー） |
| 各俯瞰区分からの報告（各 25 分（講演）＋ 5 分（議論）） | |
| 13:20 ～ 13:50 | モデリング
椿 広計（情報・システム研究機構統計数理研究所 教授） |
| 13:50 ～ 14:20 | 制御
内田 健康（早稲田大学先進理工学部 教授） |
| 14:20 ～ 14:50 | 最適化
土谷 隆（政策研究大学院大学政策研究科 教授） |
| 休憩 10 分 | |
| 15:00 ～ 15:30 | ネットワーク論
長谷川 雄央（東北大学大学院情報科学研究科 助教） |
| 15:30 ～ 16:00 | 複雑システム
合原 一幸（東京大学生産技術研究所 教授） |
| 16:00 ～ 16:30 | サービスシステム
小坂 満隆（北陸先端科学技術大学院大学知識科学研究科 教授） |
| 16:30 ～ 17:00 | システム構築方法論
鈴木 久敏（CRDS フェロー） |
| 休憩 10 分 | |
| 17:10 ～ 17:55 | 総合討論（モデレーター：鈴木 久敏（CRDS フェロー）） |
| 17:55 ～ 18:00 | 閉会挨拶
木村 英紀（CRDS 上席フェロー） |

1-2. 参加者一覧 (50 音順)

有識者

合原 一幸	東京大学生産技術研究所	教授
井上 秀雄	トヨタ自動車 (株) Future Project 部	主査
内田 健康	早稲田大学先進理工学部	教授
北川 源四郎	情報・システム研究機構	機構長
倉橋 節也	筑波大学大学院ビジネス科学研究科	准教授
小坂 満隆	北陸先端科学技術大学院大学知識科学研究科	教授
下村 芳樹	首都大学東京大学院システムデザイン研究科	教授
土谷 隆	政策研究大学院大学政策研究科	教授
椿 広計	情報・システム研究機構統計数理研究所	教授
寺野 隆雄	東京工業大学大学院総合理工学研究科	教授
長谷川 雄央	東北大学大学院情報科学研究科	助教
原 辰次	東京大学大学院情報理工学系研究科	教授
藤澤 克樹	九州大学マス・フォア・インダストリ研究所	教授
藤田 政之	東京工業大学大学院理工学研究科	教授
船橋 誠壽	北陸先端科学技術大学院大学	シニアプロフェッサー
古田 一雄	東京大学大学院工学系研究科	教授

JST-CRDS

木村 英紀	システム科学ユニット	上席フェロー
シン ジャワ	システム科学ユニット	フェロー
鈴木 久敏	システム科学ユニット	フェロー
富川 弓子	システム科学ユニット	フェロー
長須賀 弘文	システム科学ユニット	フェロー
藤井 新一郎	システム科学ユニット	フェロー

(オブザーバー)

文部科学省

栗辻 康博	研究振興局基礎研究振興課	融合領域研究推進官
中川 尚志	科学技術・学術政策局研究開発基盤課	課長補佐

JST

桜井 省一	戦略研究推進部 ICT グループ	主査
古旗 憲一	低炭層社会戦略センター (LCS) 企画運営室	室長
宮田 裕行	経営企画部重点分野推進チーム情報通信技術分野	研究監補佐
森井 利幸	戦略研究推進部 ICT グループ	主任調査員

2. システム科学ユニットからの報告

2-1. 開会挨拶

JST-CRDS

上席フェロー 木村 英紀

「俯瞰」という活動は、JST-CRDS における最も重要な仕事の一つである。俯瞰活動では、CRDS の各ユニットが、それぞれ担当する分野の研究開発の動向を公平、公正に、かつ全体的な視点から調査している。得られた情報は、さまざまな形でわが国の研究開発戦略の立案に役立てられることになる。また、「研究開発の俯瞰報告書」として纏め上げ、各分野の現状を政策担当者、各分野の研究者、さらに科学技術に関心のある一般の方々など、広く社会に分かりやすく公開している。

CRDS にはいくつかのユニットがあるが、その中で俯瞰活動を行っているのは、私どものシステム科学ユニット以外に、情報科学技術ユニット、ライフサイエンス・臨床医学ユニット、ナノテクノロジー・材料ユニット、環境・エネルギーユニットの計 5 つである。現在、各ユニットが 2015 年版俯瞰報告書作成のために、それぞれの担当する分野の俯瞰活動を精力的に進めているところである。

システム科学ユニットが担当する「システム科学技術分野」は、他の 4 つの分野とは、いろいろな意味で異なっている。結局、その違いは俯瞰の難しさにも現れる。システム科学技術に関連する学会はいろいろとあるが、システム科学技術分野としてひとくくりにして全体像を描き出そうという試み、つまり俯瞰がなされたことはおそらくこれまでにない。システム科学ユニットが作成した前回の 2013 年版俯瞰報告書が最初の試みだと思われる。

システム科学技術分野の俯瞰がなぜ難しいか。それは、この分野では対象というよりは方法論に関わる部分が重要となるからである。つまり **what** というよりは **how** の側面が強いということである。例えば、ライフサイエンス・臨床医学分野を例にとると、研究対象によって領域を分けることは比較的容易であり、各領域の目的も非常にはっきりしている。しかし、システム科学技術分野の場合はそれが明確ではない。その一方で、システム科学技術分野においてはシステム、あるいはシステム化という 1 つの属性が共通して備わっており、このことが対象を設定した俯瞰を困難にしている。

しかしながら、現在、システム化の重要性が広く人々に認知されつつあり、それに関わる学問も今、花咲こうとしている。したがって、この分野の俯瞰がますます重要になってきている。どのように俯瞰したらいいか。これは人によって、さまざまな異なる視点があり得ると思われる。CRDS では俯瞰活動を行うにあたり、「区分」および「研究開発領域」を設定しており、本日、システム科学技術分野の各区分における研究開発領域の内容について、各区分を統括する先生方からご報告いただく機会をもつことになった。

システム科学技術分野の俯瞰の難しさが、おそらく本日の議論の中でいろいろと出てくるとと思われる。システム科学ユニットが設定しているシステム科学技術分野の 7 つの区分について、これから統括の先生方にそれぞれお話しいただき、参加されている先生方からコメントをいただき、ぜひ議論を盛り上げていただきたい。最終的には来年 3 月に 2015

年版俯瞰報告書を公表する予定であるが、本日の議論の内容も是非それに盛り込んでいきたい。これまで、各区分で独立して作業を行ってきたが、これからは、まさにシステム科学技術の特徴でもある「統合化」、全体としてのシステム科学技術を纏め上げるステージに進むことになる。今、社会でますます必要とされてきているシステム科学技術の全体像と未来像を描き出すことに向けて、ぜひご協力をお願いしたい。

2-2. システム科学技術分野俯瞰概要

JST-CRDS

フェロー 藤井 新一郎

私たち人間は社会においてさまざまなシステムに囲まれて生きている。CRDS システム科学ユニットでは、社会が期待する重要課題の解決は、望ましいシステムを社会に構築、実装することによって達成されることが多いと考えている。

システムという言葉は多様な意味で捉えられるが、システム科学ユニットではシステムを「ある目的を達成するために機能要素を適切に結びつけた複合体である」と定義している。ただし、この定義については本日の午前中に有識者の方々と議論させていただいたように、人工物だけでなく自然システムを意識したものにする必要があると考えている。また、システム科学技術についても一般的な定義があるわけではないが、システム科学ユニットでは「望ましいシステムを構築・管理するための科学的な基盤と、それを達成するための技術的な手法の総体」と定義している。

JST-CRDS の主要業務の 1 つとして「研究開発の俯瞰報告書」の作成がある。この俯瞰報告書は、わが国におけるこれからのさまざまな研究開発戦略立案の基礎資料とすることを主たる目的として作成される。俯瞰報告書が研究開発戦略立案に活用された例の一つを挙げたい。今年度の文科省の戦略目標のうちの 1 つ「社会における支配原理・法則が明確でない諸現象を数学的に記述・解明するモデルの構築」の策定に当たり、システム科学技術分野の 2013 年版俯瞰報告書が科学的裏付けなどのために利用されたことが文科省のウェブサイトからも確認することができる。

ところで、時々混乱する原因となるので、俯瞰報告書で使われているいくつかの単語の定義を述べておきたい。俯瞰報告書における「分野」には、システム科学技術分野や情報科学技術分野等が対応している。そして、分野の下に「区分」を設けている。今回の 2015 年版のシステム科学技術分野の俯瞰報告書では制御やモデリング等の 7 つの区分がある。区分のさらに下に「研究開発領域」を設けており、それぞれの研究開発領域について研究の動向をまとめている。

6 枚目のスライドはシステム科学技術分野を 1 枚の図でどのようなものかを示した俯瞰図である。ただしこれは、前回の 2013 年版のものである。2013 年版俯瞰報告書作成においては、この中から、リスクマネジメント、モデリング、制御、最適化、ネットワーク論について重点的に調査を行った。

それらのシステム科学技術、さらにはその他のさまざまな分野の要素技術、ICT、社会科学等も含めて、統合化してシステムをつくり上げることになる。その際に、これは明確

には体系化されているわけではないが、おそらくシステム構築方法論というものがあるだろうと考えている。この領域についても 2013 年版俯瞰報告書で俯瞰する予定であったが、実際にはさまざまな困難があり詳しい調査ができなかった。今回、2015 年版俯瞰報告書では前回の経験も生かし、システム構築方法論についても俯瞰を試みている。

この 2013 年版の俯瞰図においては、軸のようなものがなく、分かりづらいという意見もあった。したがって、現在 2015 年版の俯瞰報告書では大幅な修正を行っている。7 枚目のスライドが 2015 年版の俯瞰図（案）である。ただし、この図についても、午前中の議論でご批判、ご意見がかなりあったので、それらも十分に参考にしながら、今後改良を進めていきたい。

この後、各俯瞰区分の統括の先生方から、俯瞰内容についてご報告いただく。今回 2015 年版では、新たに「複雑システム」および「サービスシステム」区分を追加している。

システム科学技術分野俯瞰概要

JST-CRDSシステム科学ユニット

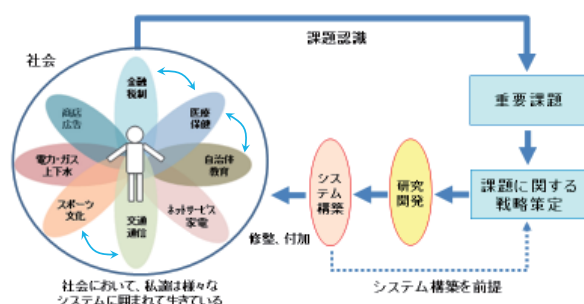
メンバー:

上席フェロー 木村 英紀
フェロー シンジャワ、鈴木 久敏、富川 弓子
長須弘弘文、藤井 新一郎

JST-CRDSシステム科学技術分野俯瞰ワークショップ(2014年10月24日)

適切なシステム構築による社会的期待の実現

- 社会が期待する重要課題の解決は、望ましいシステムを社会に構築、実装することによって達成されることが多い。



システムおよびシステム科学技術の定義

(JST-CRDSシステム科学ユニットでは以下のように定義している)

●システム

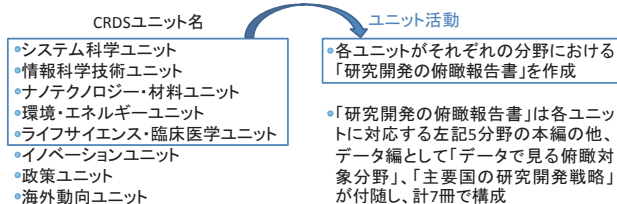
ある目的を達成するために機能要素を適切に結びつけた複合体

●システム科学技術

望ましいシステムを構築・管理するための科学的な基盤と、それを達成するための技術的な手法の総体

JST-CRDSにおける主要業務その1

「研究開発の俯瞰報告書」の作成



H26年度の文科省戦略目標のうちの一つ「社会における支配原理・法則が明確でない諸現象を数学的に記述・解明するモデルの構築」の策定にあたり、システム科学技術分野の俯瞰報告書(2013年版)が科学的裏付けなどのために活用されたことが言及されている。

「研究開発の俯瞰報告書」とは？

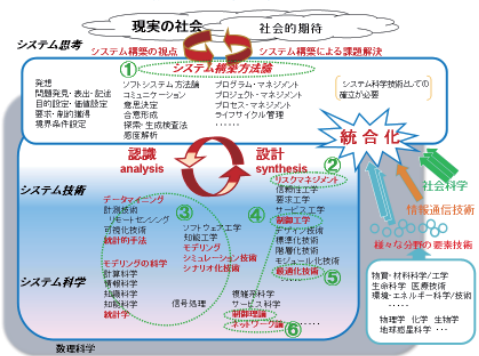
- CRDS が政策立案コミュニティおよび研究開発コミュニティとの継続的な対話を通じて把握している研究開発の大きな流れを、研究開発戦略立案の基礎資料とすることを目的として、CRDS 独自の視点でまとめたもの。
- 2013年3月に初版、2013年11月に概要版(各分野の俯瞰報告書を簡潔に1冊にまとめたもの)、2014年3月に第2版(初版のマイナー改訂版)を作成。2年ごとに内容を拡充することにしており、現在、2015年版作成に向けて活動中。

「研究開発の俯瞰報告書」における単語の定義

分野・・・CRDS各ユニットの分野名に対応

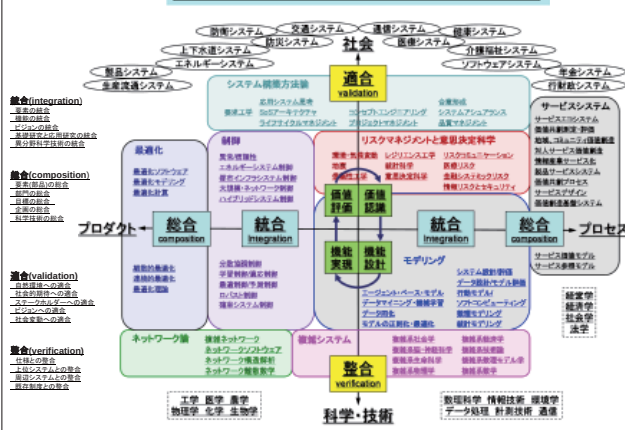


システム科学技術分野 俯瞰図(2013年版)



既にある程度体系化されている基盤的な5学問領域(意思決定とリスクマネジメント、モデリング、制御、最適化、ネットワーク論)に加え、それらを効果的に統合し、社会的期待を実現するシステムを構築するための方法論として、未だ体系化されていないシステム構築方法論を俯瞰図に設定した。

システム科学技術分野の俯瞰図(2015年版)(案)



2015年版俯瞰報告書(システム科学技術分野)

俯瞰区分	統括
モデリング	橋 広計(統数研・教授)
制御	内田 健康(早大・教授)
最適化	土谷 隆(GRIPS・教授)
ネットワーク論	長谷川 雄央(東北大・助教)
複雑システム(複雑系)	合原 一幸(東大・教授)
サービスシステム(サービス科学)	小坂 満隆(JAIST・教授)
システム構築方法論	鈴木 久敏(CRDS・フェロー)

紫:2015年版では大幅拡充 赤:2015年版から新規

(意思決定とリスクマネジメントの俯瞰については今年度の活動としては中止)

3. 各俯瞰区分からの報告

3-1. モデリング

情報・システム研究機構統計数理研究所

教授 椿 広計

2013 年版俯瞰報告書を作成したときと比べて、今回の俯瞰活動では新たな研究開発領域として「人間行動のモデリング」と「データの設計」を加えた。以下に各研究開発領域の概要を紹介する。

「先端的数理モデリング」では、実社会の諸現象・諸問題を理解・解決するための基礎となる数理モデリング技術の開発を行う。日本は、異なる数理モデリング技術に携わる理論研究者間の連携で欧米に遅れをとっている。

「先端的統計モデル」では、高度計量モデリングの統合的活用を目的にして、一般の産業界の方々、統計専門でない方々のモデル利活用のためのインターフェースとなり得る知的基盤システムを創生する。その産業利用については、日本は 25 年前に活用の方向性ができていたと思われるが、そこから先の新しいタイプのモデリングに関する研究開発が進んでいない。

「データ設計」では、新技術や新製品というプロダクションシステムに関係する分野において、仮説探索・検証のための実験や調査情報の収集効率の最大化を行い、モデリングの精度を上げるための実験計画法の開発を行う。欠測データの解析に関しては、日本はこれまで理論的なことをほとんど行っていないが、応用上は海外に追随していると思われる。

「データ同化：新しい戦略分野の開拓」では、観測データをモデル設計のプロセスに適切に取り込み、モデル単独では得られない高精度のシミュレーションを実現する。日本は、基礎研究においては、分野横断の開発に難があり、特に統計科学分野は弱いところがある。

「不確かな行動のモデルとソフトコンピューティング」では、対象の挙動を大局的に捉えて、情報の不正確さを認めた上で、人間の言葉に含まれる曖昧性や主観性を積極的に導入して、人間主体のシステムの構築及び計算技術の知識情報処理パラダイムを創生し、確率的リスクマネジメントに代わる、人間行動の不確かさを表現していく。

「エージェント・ベース・モデルとマクロ・ミクロ連携」では、マルチエージェントモデルを利用して社会のマクロ現象とミクロ現象の関連を解明していく。日本でも最近活発な研究が行われており、協調学習では世界水準になっている。

「モデルの正則化・最適化」では、情報源の疎性に基づく新たなモデル正則化法とその応用、実現のための最適化法の研究を行う。日本では、通信工学、ゲノム科学、脳科学等の解析で欧米発信の既存の手法を当てはめることが進んでいる。

「データマイニング・機械学習」では、データ分析技術を蓄積されたデータに適用し、その中から役立つルールや法則などの知識を見つけ出す技術、並びに人間が経験的にを行っている学習と同様の学習をコンピュータで実現させるための技術を開発する。現状は、産軍主体の研究推進として、国防総省、Google、Yahoo!、Microsoft 等の情報をもっているところが主に行っていて、それが他産業へ展開されている。

「モデルの統合に基づくシステム設計とその評価」では、対象とするシステムを構成す

る要素の動的振る舞いを数式化したモデルを素早く開発し、それらのモデル要素と既存のモデル要素を統合する。そして、目的に合ったシステムの動的振る舞いモデルを構築し、開発されたシステム・モデルを利用して、企画・戦略決定、機能設計、システムの安全性・信頼性・セキュリティなどが十分であることの評価・検証とシステムの維持や調整を行う。日本では、計測自動制御学会（SICE）においてプラントモデリング分科会ができています。

（9 研究開発領域の個別説明：スライドを参照）

< 議論 >

< Q >

- ・ 2 点ある。1 つは、最後のスライドの「モデリングの価値可視化の現状」で、「海外では当たり前」というのは、どのようなイメージをもっているか？（原）

< A >

- ・ モデリングを行って、例えば、予測精度を上げると何らかの利益が出てくるが、モデリングを行った利益が、経済価値にしていくらかということをカウントすることが企業活動等で行われている。予測を行って、ディシジョン等いろいろなことができたということが、どれぐらいに相当するかということを、経済価値評価するようなことが、海外では一般のファンドを与えてくれる方、あるいは企業人に対して行われることになっているということである。（椿）
- ・ なかなかイメージがわからないのだが、社会的にそのようなツールにある程度コンセンサスが取られているという意味なのか？（原）
- ・ アメリカを中心にして、リスク・ベネフィット解析の中でモデルが利用されている歴史がある。その最終的なイメージとして、そのようなモデルに基づく予測を行ってどのぐらい経済的利益があったのかという評価を行う伝統ができつつある。（椿）

< Q >

- ・ 2 つ目は、この範疇に入るかどうか分からないが、今の話は、全部対象のモデリングという感じがした。システムという観点で価値を考えたときに、価値について、椿先生はコトのモデリングと言われた。そこは非常に難しいと思うが、どのように考えるか？（原）

< A >

- ・ 価値のモデリングがあって、現象や行動のモデルを設計するので、価値の測定モデルが重要であると強く認識している。その役割が、モデルの前段階にある要求に当たる部分だと私は理解している。ある種、要求に基づく企画が生じて、モデルの企画設計に当たる部分を、今回の俯瞰では、モデリング以前の段階としてしまったと申し上げた。俯瞰図左側の設計・企画のところで、もしモデルを使うとすれば、先生が言われるように、コト、あるいは価値の測定モデルという話になる。それはそれで、計量心理学も経営学も含めて、いろいろなアプローチがあることは承知している。（椿）
- ・ 全体で見たときに、このモデリングという枠で考えるのか、もう少し大きな枠なのかということも、まだよく分からない。（原）
- ・ そこがマネジメント・サイエンスないしは社会科学の役割。価値をどう測定して、どう

するかというところが、かなり重要な論点である。(椿)

- ・私は価値のリダクションと言っているが、段々落とし込んでいかないと、実際のシステム設計のところまでたどりつかない。そのプロセスも、現在入っていないが、モデリング区分の範疇に入っているという理解でよいか。椿先生だけではなくて、そこは議論する必要があるのではないかと。(原)
- ・その通り。平成 24 年度以来、私が、目的が与えられた後のモデルのプロセスに集中し過ぎていたことはあるかと思う。もちろんモデルの評価において validation の問題が入れば、与えられた目標価値と整合しているかが問題となってくる。(椿)

< Q >

- ・気になることと細かいこと、2 つ申し上げたい。1 つは、予測というキーワードが抜けているような気がする。今人々が非常に不確かな世界に生きていて、例えば、災害や火山噴火等も含めて、予測ということについての関心が高まりつつある。それが、モデリングと密接な関係があるという感覚も、あるレベル以上の人はもっていると思う。予測ということで 1 つの研究開発領域を追加すべきとまでは思わないが、記述の上で「予測」という言葉を少し入れていただきたい。(木村)

< A >

- ・最終的に、モデルの利用の仕方として、予測、制御、行動の最適化等いろいろある。(椿)
- ・目的も。私はおそらく目的が一番だと思う。(木村)
- ・はい、目的論だと思う。(椿)
- ・モデリングすることの目的は、私は 6 割ぐらいまでは予測のためではないかと思う。広い意味での予測。それをお願いしたい。(木村)
- ・了解。そこはモデリングの 1 つの大きな目的としたい。(椿)

< Q >

- ・不確かな行動のモデルという辺りになると、人間の脳が分からないと本当は分からないのではないかと。(合原)

< A >

- ・その通り。(椿)
- ・我々の分野でも人の要素をどう見るかというのは、一番悩むところだが、その辺はどのようなスタンスで臨んでいるのか？(合原)
- ・行動の最適化については、効用や損失といった目標が分かっているならば、それを最適化するといった話題もある。今回、片桐先生はどちらかというと、ここにあるような論理と数理をつなぐところを中心に考えてくださっている。これはこれで、私は他の領域との関係性がある中で、言葉の話と、他のモデルをつなぐというのは、一つの考え方だと思う。脳のモデルという話について言えば、極めて具体的なモデルになるだろうと思う。(椿)
- ・今言われた前者の方の最適化という話は、そこを否定するところから出てきたのが、例えば複雑系経済学ではないか？限定合理性が典型例。必ずしも最適化していないというのが人間だから、そこをどうするかだと思う。(合原)
- ・その通り。行動の経済学や行動ファイナンスという分野のモデルについては、モデルの

スタイル自体は、かなり計量モデルに吸収されている部分があると思う。そこを、統計モデルなり、計量モデルというところの適用分野の話に落とせるのではないかな。もう1つの話は、最適化で、前回の俯瞰の中にリスクマネジメントと意思決定があったが、あの辺りが、普通の決定理論的な意味での決定のモデルの話になっている。今回、片桐先生が提起していただいたのは別の視点なので、ちょうどバランスが取れているというのが私の認識。(椿)

各俯瞰報告区分からの報告 「モデリング」

椿 広計
統計数理研究所

モデリングに関する作業(H22)

- 平成22年度
 - 平成22年度システム科学技術推進委員会モデリング分科会報告書
 - CRDS-FY2010-XR-20
 - 2010年7月19日から活動
 - モデリング学術領域の確立と研究項目の明確化
 - モデリングの専門家との連携を必須とすべき学術領域の明確化
 - モデリング学術領域の推進に必要な情報基盤整備
 - これらの議論を基に俯瞰作業開始
 - 幾つか絞り込む
 - H24報告
 - 右下線
 - H26報告
 - 赤字
- 平成22年度分科会委員
 - 椿 広計(統計数理研)
 - 合原一幸(東大生産研)
 - 江守正多(環境研)
 - 大澤幸生(東大工学)
 - 太田明(トヨタ自動車)
 - 小野田崇(電力中研)
 - 国友直人(東大経済)
 - 倉橋節也(筑波大ビジネス)
 - 櫻庭千尋(日経)
 - 水流聡子(東大工学)
 - 豊田秀樹(早稲田大文学)
 - 樋口知之(統計数理研)
 - 増井利彦(環境研)
 - 丸山宏(キャンソ:当時)
 - 山田雄二(筑波大ビジネス)
 - 吉瀬章子(筑波大システム情報)

2014/10/24

JSTシステム科学技術俯瞰 WS

モデリング学術領域

- モデリング学からみたシステム科学
 - モデルを用いて「社会的期待に応える行動のシナリオ(機能)」をデザインし、その社会実装を支援する学術
- システム科学の中のモデリング学
 - 社会的期待に応えるためのシナリオやアクティビティのデザイン・実現に資する「モデル(構造)」の生成プロセス、すなわちモデリングプロセスを研究し、よりよいモデルを提供するための学術
- モデリング学の社会的意義
 - 現状
 - 学術的問題解決プロセスの成否が極めて属人的な暗黙知やリーダーシップの中で決まってきた
 - 目指すところ
 - Model Based Research and Development
 - モデルに基づく行動を可能な限り形式化し、透明性の高い「プロセス」知の実装を難易度の高い社会問題解決に要請

2014/10/24

JSTシステム科学技術俯瞰 WS

- 広義モデリング学
 - 一連のモデルに基づいてデザインされた、価値を実現する「プロセス(一連の行動)」を設計するための科学
- 狭義モデリング学と平成22年度俯瞰
 - モデリングプロセス学
 - 価値実現のために一連のモデルを設計・構築する一連の行動を研究する学術



H22年度3提言

- 提言1: モデリング知のプロジェクトへの参画制度
 - 複雑性・不確実性を有する重要課題の解決に当たっては、**モデリングの専門家とモデルの利用の専門家**が、課題解決プロジェクトのメンバーに参画するか、少なくともプロジェクトに対するコンサルテーションを行う事が望ましい。
- 提言2: 高等教育拠点のネットワーク
 - 前記ミッションを遂行できるモデリングの専門知を体系的に有する専門職を系統的に育成することを目指し、**高等教育拠点の全国展開ならびに標準的教育システムの開発**が必要である。
 - この実現に向けて、現在全国の大学の様々な学部・研究科に分散しているモデリング知の研究者ネットワークを早急に形成することが望ましい。
 - 長期的にはモデリング知の専門職の中から、更にモデリング自体の研究を行い、次世代のモデリング専門職を教育するような、研究教育者を育成する研究拠点の全国的NOEが形成されることが望ましい。
- 提言3: 基盤整備とそれに当たる人材の評価
 - モデリングの知を有効活用するための**社会情報データベース、モデル要素の知識ベース、モデル利用知分野にモデルが引き渡す情報の標準化**などの基盤整備活動を早急に行うことが望ましい。
 - その際、これらの活動がこれまで研究活動としては十分評価されてこなかった現状を鑑み、この活動を支援する人材の適切な評価を通じて、実力のある人材が当該分野の活動を支えることに努めなければならない。

2014/10/24

JSTシステム科学技術俯瞰 WS

平成24年度

モデリング領域の一層の絞り込み

- H22年度分科会委員(下線)ないしは委員(イタリック)から推薦されたエキスパートに主要研究項目の執筆と俯瞰

2側面からの記述

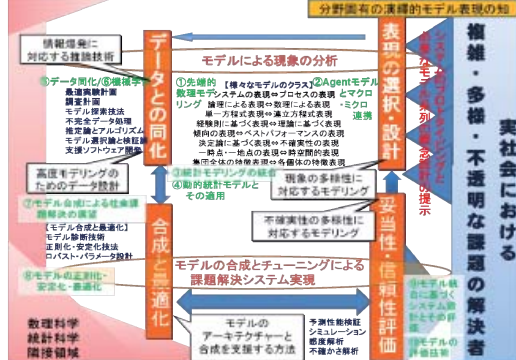
- モデル開発の専門家の知
 - 権 広計(統計数理研)
 - 合原一幸(東大生産研)
 - 田中剛平
 - 小野田崇(電力中研)
 - 倉橋節也(筑波大ビジネス)
 - 樋口知之(統計数理研)
 - 池田思郎
- モデル利用の専門家の知
 - 大島明(トヨタ自動車)
 - 櫻庭千尋(日銀)
 - 増井利彦(環境研)

2014/10/24

JSTシステム科学技術俯瞰 WS

H24俯瞰図第3層 モデリング

現象や行動のモデル化プロセス自体を対象とする横断的学術領域



2014/10/24

JSTシステム科学技術俯瞰 WS

平成24年度の振り返り

モデリングプロセス分類の考え方と研究項目の抽出

- 対象分野固有のモデル表現の知を活用して現象の分析を深化させる順問的フェイズ
 - 対象の表現の選択・設計
 - 現象の数理(演繹)科学的表現を目指す「**先端的数理モデリング**」
 - 現象の計量的表現を目指す「**Agentモデルとマイクロ・メソ・マクロ**」
 - 現象の帰納的表現を目指す「**統計モデル**」の統合
 - モデルのデータとの同化
 - 演繹的表現と帰納的表現との統合
 - 数理としての「**データ同化**」
 - モデルのデータからの探索学習としての「**データマイニング・機械学習**」
- 課題解決に資するモデルを設計・合成する逆問的フェイズ
 - 合成と最適化
 - システム合成方法論の数理科学的な高度化を目指す「**モデルの正則化・最適化**」
 - 妥当性・信頼性評価
 - 「**モデル合成に基づくシステム設計とその評価**」
 - 妥当性・信頼性評価自体の基礎統計数理科学的な高度化を目指す「**モデル評価技術**」
 - モデル利用の知
 - 社会課題解決システム合成戦略としての「**モデル合成による社会課題解決の推進**」
 - 社会的現象の把握の基盤としての「**動的経済モデルと統計整備**」

2014/10/24

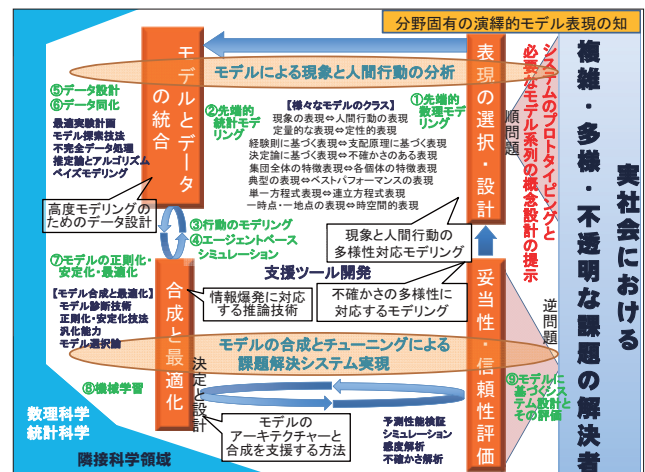
JSTシステム科学技術俯瞰 WS

平成26年度修正 基本的アイデアは踏襲

- 特定分野モデルの総合利用の知は24年度で完成
 - 経済・金融システム
 - 環境システム
- シンプルにモデルの要素・モデルの同定・統合技術に絞る
- 対象とするモデルのクラスの平易な表現
- モデルの新たなクラス
 - 人間行動のモデリングを導入
- 情報の創生技術
 - 表現の選択・設計
 - 数理モデル
 - 統計モデル
 - モデルとデータとの統合
 - データ設計
 - データ同化
 - 前後中間領域
 - 行動のモデリング
 - エージェント・ベース・モデルとマクロ・ミクロ連携
 - 合成と最適化
 - モデルの正則化・最適化
 - データマイニング・機械学習
 - 妥当性・信頼性評価
 - モデルに基づくシステムの設計と評価

2014/10/24

JSTシステム科学技術俯瞰 WS



先端的数理モデリング(改訂)

田中剛平(東大)

- ・ 実社会の諸現象・諸問題を理解・解決するための基礎となる数理モデリング技術の開発
 - － 支配原理・法則が明確でない対象に対して、観測データや経験則に基づいて本質的構造を抽出し数理モデル化する手法論を確立
 - ・ ネットワークモデル、マルチスケールモデル、メゾスコピックモデル、ハイブリッドモデル、マルチフィジックスモデル、データ駆動型モデル
- ・ 欧米がリード
 - － ヨーロッパ数学会、英国応用数学研究所、ドイツ・フランス応用数学会、欧州内研究機関ネットワーク
- ・ 日本
 - － 応用数学会、電子情報通信学会
 - － 明治大学総合数理学部現象数学会(2013)
 - － CREST「現代の数理科学と連携するモデリング手法の構築」
 - － 異なる数理モデリング技術に携わる理論研究者間の連携で欧米に遅れ

2014/10/24

JSTシステム科学技術俯瞰 WS

先端的統計モデル(改訂)

鎌倉稔成(中央大学理工学部)

- ・ 高度計量モデリングの統合的活用を目的として、非専門家のモデル利活用のためのインターフェースたりえる知的基盤システムを創生
 - － 推論形式のモデルチェンジ時期を迎えて、利用計量モデル自体の変革を意識して知識ベース構築の必要性
 - ・ ベイズモデル、一般化線形モデル、グラフィカルモデル、潜在クラスモデル、非線形モデル、状態空間モデル、確率的フロントティアモデル、セミパラメトリックモデル、構造方程式モデル
- ・ 欧米・中国・韓国
 - － 学部・学科レベルで排出される専門家層の厚みを活かし、理論研究から応用研究
 - － 産業利用については、方針は明示、利用産業界は限定的
- ・ 日本
 - － 基礎研究については分野限定的ではあるが貢献
 - － 応用研究は属人的繋がりを中心
 - － 産業利用は、かつては世界最高、現在は25年前の水準を維持
 - － 科研費「統計科学」情報学基礎細目への後進

2014/10/24

JSTシステム科学技術俯瞰 WS

データ設計(新設)

椿 広計(統計数理研究所)

- ・ 産業界における新技術・新製品開発あるいは自然科学・工学・社会科学など諸学術分野の仮説探索と検証のための実験あるいは調査情報の収集効率を上げモデリングの精度を向上させるための、実験計画法、調査計画法の開発
 - ・ 完全実験計画、一部計画、ロバストパラメータ設計、数値実験計画、逐次実験計画、最速実験計画
- ・ ビッグデータ特有の質の悪い不完備調査データの偏り補正技術の開発
 - － 欠測のモデル、プロペンシスコア
- ・ わが国産業界が、新たなデータ設計技法に追いついていない、あるいは科学的精密実験に先回りしているため、機会損失が発生しつつある
 - ・ 日本の実験計画：1990年頃まで
 - ・ 基礎
 - － 代数学的方法論を産業界の活用(MITレポートでの引用)発展(アルム)に波及
 - ・ 理論研究も日本数学会統計数分科会などで盛ん
 - ・ 支援ソフトウェアの開発、世界に輸出
 - － 現在は、数値実験計画では米国系コンサルティング会社、ツールの支援を受ける
 - ・ 英・米・インド：1970年代までの理論貢献
 - ・ 学術研究のための統計的実験計画・調査計画法
 - ・ 最速実験理論の整備
 - ・ 米：1990年代以降日本を追い越す努力
 - ・ 最速実験計画独自設計、大規模実験計画、ベイズ逐次計画などのソフトウェア投入
 - ・ 中国
 - － K. Fangによる一様計画の提唱と米国の採用
 - ・ 欧米：調査データ欠測など不完備調査データのモデリングを推進
 - ・ Heckman Model(ノーベル経済学賞)
 - ・ Propensity Score
 - － 産官の調査、医薬品臨床開発
 - ・ 日本：応用上の追従

2014/10/24

JSTシステム科学技術俯瞰 WS

データ同化：新しい戦略分野の開拓(改訂)

吉田 亮(統計数理研)

- ・ 観測データをモデル設計のプロセスに適切に取り込み
- ・ モデル単独では得られない高精度シミュレーションを実現
 - － データ同化にもとづくモデリングおよびシミュレーション手法の基礎研究を推進
 - － 戦略的応用分野
 - ・ 物理、生物、医薬品開発、医療、情報産業、防災、工業製品設計、社会科学等
 - ・ データ同化にもとづくシミュレーションモデルの実用化
 - － シミュレーション、統計科学、気象・海洋データ同化、創薬、防災・モデル設計、スーパーコンピュータ
- ・ 欧米
 - － NCAR、NASAでの高レベル基礎研究
 - ・ 宇宙工学(火星探査)への応用
 - － 英国Reading大学に研究拠点
 - － 欧州
 - ・ 各国気象局への展開
 - ・ 水・エネルギー循環系シミュレーション等新規応用分野の拡大
- ・ 日本
 - － 基礎研究においては、欧米に比して分野横断の開発に難、統計科学分野は弱い
 - － 気象・海洋学では世界トップクラス
 - ・ 防災：創薬のシミュレーションで試行実験

2014/10/24

JSTシステム科学技術俯瞰 WS

不確かな行動のモデルとソフトコンピューティング(新設)

片桐英樹(広島大学工学部)

- ・ 対象の挙動を大局的にとらえ、情報の不正確な認識のもと、人間の言葉に含まれる曖昧さや主観性を積極的に導入し、人間主体のシステムの構築及び計算技術の知識情報処理パラダイムを創生し、確率的リスク解析に替わる、人間行動の不確かさ表現
 - － 人間とコンピュータとの橋渡し
 - － 言葉の意味と実体との橋渡し
 - － 論理世界と実世界との橋渡し
 - － 記号論理と数値情報との橋渡し
 - ・ 言語に基づく情報処理(日常言語コンピュータリング)
 - － 人間主体、扱いやすさ、頑健性、低コスト、曖昧性、大局性、主観性、ファジイ理論、進化的計算、ニューラルネットワーク、ベイジアンネットワーク
- ・ 欧米
 - － ファジイ理論の提唱、1965
 - － ロンドン大学での開発研究、1974
 - ・ デンマークでの実装
 - － European Center for Soft Computing, 2006設立
 - ・ 可能性理論の進展に寄与：研究層厚くなる
 - － Googleの深層学習
- ・ 日本
 - － 1980年代ファジイ理論等の研究・実装推進の国際拠点
 - ・ 1979-1987:日立製作所仙台市宮地下鉄自動運転システム
 - ・ 1989年に学会設立
 - ・ IEEEの国際会議は1992年
 - ・ 平成15年度科研費「感性情報学・ソフトコンピューティング」
 - － 筑波大学ソフトコンピューティング学域
 - ・ 東京工業大学、九州工業大学、大阪府立大学に研究拠点
 - ・ 近年：建築・土木分野への広がり

2014/10/24

JSTシステム科学技術俯瞰 WS

エージェント・ベース・モデルとマクロ・ミクロ連携(改訂)

倉橋節也(筑波大ビジネスサイエンス)

- ・ マルチエージェントモデルを利用して社会のマクロ現象とミクロ現象の関連を説明
 - ・ 工学的検証、人工的につくられたシステムの全体的な挙動特性を明らかに、複雑なシステム・課題の分析・理解を促進し、問題解決・検証
 - ・ 社会システム・環境相互作用を分析
 - － 欧州・米国のプロジェクト形成
 - ・ 社会シミュレーション、マルチエージェントモデル、政策立案、政策評価、意思決定モデル、環境学等
 - － モデリング手法の標準化に課題
- ・ 社会シミュレーション、マルチエージェントモデル、政策立案、政策評価、意思決定モデル、協調学習
- ・ UNESCOのUniTwinプロジェクト、2013：複雑システム研究横断研究教育ネットワーク
- ・ 欧米
 - － ゲーム理論の境界を踏まえ社会科学者主体となったコミュニティ形成
 - ・ 社会科学とシステム科学との架橋
 - ・ 米国：大規模応用研究の進展・産業化(開発ツール)で世界をリード
 - ・ 欧州：マクロ・ミクロ連携政策科学研究
- ・ European Commission's Framework Programmeの3つのコンソーシアムの一つ
 - 他は、テキストマニング、会話分析
- ・ 日本
 - － 協調学習で世界水準の基礎研究
 - － 日本も活発な研究
 - ・ エージェント学習や複雑ネットワーク研究との融合基礎領域において、世界最高水準
 - － 社会科学者の参画少ない
 - － 国産のツール・サービスの提供・コンサルタント業務の開始
- ・ 韓国・中国でもプロジェクト

2014/10/24

JSTシステム科学技術俯瞰 WS

H22年度3提言

- ・ **提言1: モデリング知のプロジェクトへの参画制度**
 - ・ 複雑性・不確実性を有する重要課題の解決に当たっては、**モデリングの専門家とモデルの利用の専門家**が、課題解決プロジェクトのメンバーに参画するか、少なくともプロジェクトに対するコンサルテーションを行う事が望ましい。
- ・ **提言2: 高等教育拠点のネットワーク**
 - ・ 前記ミッションを遂行できるモデリングの専門知を体系的に有する専門職を系統的に育成することを目指し、**高等教育拠点の全国展開ならびに標準的教育システムの開発**が必要である。
 - ・ この実現に向けて、現在全国の大学の様々な学部・研究科に分散しているモデリング知の研究者ネットワークを早急に形成することが望ましい。
 - ・ 長期的にはモデリング知の専門職の中から、更にモデリング自体の研究を行い、次世代のモデリング専門職を教育するような、研究教育者を育成する研究拠点の全国的NOEが形成されることが望ましい。
- ・ **提言3: 基盤整備とそれに当たる人材の評価**
 - ・ モデリングの知を有効活用するための**社会情報データベース、モデル要素の知識ベース、モデル利用知分野にモデラーが引き渡す情報の標準化**などの基盤整備活動を早急に行うことが望ましい。
 - ・ その際、これらの活動がこれまでで研究活動としては十分評価されてこなかった現状を鑑み、この活動を支援する人材の適切な評価を通じて、実力のある人材が当該分野の活動を支えることに努めなければならない。

2014/10/24

JSTシステム科学技術俯瞰 WS

データマイニング・機械学習(改訂)
小野田崇(電力中央研究所)

- ・ データ分析技術を蓄積されたデータに適用し、その中から役立つルールや法則などの知識を見つけて出す技術。並びに人間が経験的に持っている学習と同様の学習をコンピュータで実現させるための技術の開発
 - － サポートベクターマシンを中心に基礎研究・応用開発研究
 - － カーネル法やベイジアンネットワークなど確率・統計に基づく機械学習の基礎研究が活発化
 - － 計算機の高性能化等により、ある種の機械学習技術が、認識・侵入者検知・音声認識などの用途で産業化
 - － ビッグデータ対象と研究を中心に進展
 - － サポートベクターマシン、カーネル法、アンサンブル学習、ベイジアンネットワーク、統計、得意なデータマイニング、パターン認識、ヒックデータ
- ・ 現状産業界の研究推進
 - － 国防総省・Google・Yahoo・Microsoft
 - － 他産業への展開課題
- ・ 研究予算の面から米国が研究の潮流をリード
- ・ 日本
 - － 基礎研究に携わる研究者: 高い研究レベルを維持
 - － 複雑系数理モデル学基礎理論構築とその分野横断的科学研究応用(FIRST)
 - ・ データマイニング・機械学習の基礎研究に関連するシナリオ
 - － 我が国大学の課題
 - ・ FIRSTなどのプロジェクト終了とともに、データマイニング・機械学習の基礎研究レベルが維持できなくなる
 - ・ データマイニング・機械学習・ビッグデータと体系的研究・教育・研究を推進する基盤整備
 - － 産官学が連携した独自のデータマイニング・機械学習の大規模な応用研究プロジェクトがない

2014/10/24

JSTシステム科学技術俯瞰 WS

モデルの統合に基づくシステム設計とその評価
(改訂)

大島明(トヨタ自動車)

- ・ モデルベース開発(MBD)とモデル利用の知
 - － 対象とするシステムを構成する要素の動的振る舞いを数式化したモデルを素早く開発
 - － それらのモデル要素と既存のモデル要素を統合して、目的に合ったシステムの動的振る舞いモデルを構築
 - － 開発されたシステムモデルを利用して、企画・戦略決定、機能設計、システムの安全性・信頼性・セキュリティなどが十分である。その評価・検証とシステムの維持や調整
 - － 物理モデル、実験モデル、物理・実験モデル統合、制御対象モデル、制御装置モデル、人間モデル、環境モデル、要求モデル、制約モデル、モデルベース開発、システム同定、データ同化
- ・ 欧州
 - － 物理モデル言語の開発・強化、ライブラリーも整備
 - － モデル流通のオープンな枠組み
 - － 多くのツール販売企業
 - － ISO国際標準化で優位に
- ・ 日本
 - － 特定分野でのモデリング
 - － 産業界でのMBDへの関心
 - ・ 欧米開発ツールの利用
 - － 計測自動制御学会プラントモデリング分科会2009年

2014/10/24

JSTシステム科学技術俯瞰 WS

おわりに: まずは社会の支持するモデリング学

- ・ モデリング学の経済効果
 - ＝ 合理的情報収集 + モデリングの効果
 - － 専門職の稼働対価(人材基盤の有無)
 - － 支援ソフトウェア開発コスト
- ・ モデリングの価値可視化の現状
 - － 海外では当たり前
 - － 日本では、成功体験が必要?
- ・ 再度H22の3提言
 - － 先ずは、主要プロジェクトへの集中投入
 - ・ 先ずは、重要課題解決データ基盤の集中整備
 - － 人材育成の拠点 or 道場型さがけ

2014/10/24

JSTシステム科学技術俯瞰 WS

3-2. 制御

早稲田大学先進理工学部
教授 内田 健康

以下に「制御」区分における各研究開発領域の概要を紹介する。

「学習制御／適応制御」では、人間の学習メカニズムを理解する上での学習制御という考え方、あるいは学習制御を展開する上でのメカニズムを学んで、それを取り込もうという研究が進んでいる。適応制御では、これまでもモデル規範型適応制御(MRACS)、STR (self-tuning regulator) 等々の直接型・間接型の適用の研究が進んでいたが、最近ではデータ駆動型制御の研究が進んでいる。極値制御は、再生可能エネルギーへの応用の観点から、今回新たに取り上げた。

「ロバスト制御」の注目動向としては、計算量のボトルネックに対してランドマイズドアルゴリズムを使う展開や、データ駆動型制御へのロバスト制御の考え方の導入が挙げら

れる。

「最適制御／予測制御」に関しては、例えば、最大原理を使うと、開ループの形で制御が求まり、動的計画法でハミルトン・ヤコビ・ベルマンを解くと、フィードバックの形で最適制御が求まる。最大原理を使うと、二点境界値問題という難しい問題になるが、これについては計算法が進み、早く解けるようになってきている。動向としては、いかに状態フィードバックで実現するかに注意が向けられている。その中で、改めて動的計画法や予測制御についての研究が進んでいる。

「分散協調制御」では、与えられた構造の中で最適化あるいは制御をするのではなく、構造自体も協調的に変更させることにより、分散制御を実現していく。応用分野には大変広がりがある。

「確率システム制御」で注目されることとして確率モデルの学習がある。また、最適化手法 (ADMM 等) と融合することにより、計算量の削減や分散化を実現することができる。レジリエンス制御では、突発的な、確率的な変動をどう捉えるかという研究が盛んである。

「ハイブリッドシステム制御」では、離散値と連続値の混ざったシステムの制御を行う。最近の注目動向として、時制論理による仕様の記述により自動設計の実現が進んでいることが挙げられる。

「大規模・ネットワーク制御」の注目動向としては、情報理論を使った関連基礎研究が盛んになっていることが挙げられる。

「異常検出」では、医療やヘルスケア分野で異常検出の考え方が進んでいることが注目される。

「環境・エネルギーとシステム制御」における、電力システムのスマート化制御では、双方向通信インフラの整備を前提に、デマンドレスポンスの促進、エネルギー貯蔵システムの利用、エネルギー需給市場の活性化を通して、それら全体を統合し、関係性を制御するシステム制御の考え方が大事である。活発に研究が行われている。

「都市インフラとシステム制御」では、上下水道網、交通網等のサブシステムを、いかに統合して、全体的な利益を確保するかという研究を進める必要がある。

(10 研究開発領域の個別説明：スライドを参照)

< 議論 >

< Q >

- ・最後の 2 つの研究開発領域についてもう少し詳しく知りたい。ここに書いてあることだけなのか？ (木村)

< A >

- ・大事なところを非常に大きく整理するとこのようになるということ。電力システムのスマート化のところをもう少し詳しく述べれば、通信インフラ自体も制御の対象になる。また、デマンドレスポンスを進めることに関しては、モデルをどうつくるかということを含めて、全体をとにかく最適化したいために、それぞれのところで現在活発に研究を進めているということ。エネルギー貯蔵システムもまさにそう。それから、エネルギー需給市場について言えば、私は個人的にここに一番興味をもっている。それぞれが大規

模システムとなっているのではあるが、さらにそれらの関係性を制御しなければ、社会的利益に合致するシステムにならないという、非常に大きな問題がある。制御の分野を総動員して取り組まなければいけないぐらいの大きなテーマだと思っている。(内田)

- ・再生可能エネルギーの部分では、例えば、機器そのものの安定化については個別に盛んに行われている。しかしながら、全体として見て、あるいはもう少し長期的に見て、再生可能エネルギーをいかにうまく制御していくかという大きな問題がある。高品質化というのは、これまでも行われているが、周波数、電圧の制御や再生可能エネルギーを導入したことによる逆潮流等、個々の問題があり、電力プロパーの人たちが一生懸命取り組んでいる。それぞれを単体としてそれなりにうまく制御できたとしても、組み合わせると、実はそんなにそこには力を入れなくても、もう少し全体としての関係性を制御した方がうまい結果になる可能性もあるということ。特にシステム制御と書いているのは、そちらの方にも取り組みたいということ。機器単体の制御だけではなくて、システム全体を制御するという方向がある。(内田)

< Q >

- ・太陽光エネルギーの買い取り廃止は、この整理に関係あるか？(木村)

< A >

- ・私は今この関係で取り組んでいる。例えば、買い取り制度(FIT)と、もう1つそれとは対極の方法があるが、モデルを使って理論的にどちらが優れているかという研究も経済分野の人と議論して今進めている。そのようなことも踏まえた上で、基本的な指針ができて、それに合わせて、例えば、少し制度を入れるということも出てくるかもしれない。分散協調制御の「協調」では、与えられたインフラ、与えられた構造の中で制御するだけではなくて、インフラ自身や、あるいは制度も例えば少し変えるとか、人々のインセンティブを使っていい方向に向かわせるとか、そのようなこともやらなければいけない。そうしたことはテーマとしてこの中に含まれている。(内田)

< Q >

- ・この分野は文科省とは別に、経産省関連で、非常に大きなファンディングが次々と出ている。その辺をどう分析されているか？あとは、このような話と、もう少し実用化に近いレベルのことが経産省で進んでいて、それらをどう関連づけたらいいのか？(合原)

< A >

- ・ここは、本当は藤田先生に話していただいた方がいいかもしれない。現在 NEDO を中心にして進んでいるものとしては、おそらく 2016 年に自由化が進んで、あるいは少し環境が変わるということで、そのスパンで何とかうまく現状から悪くならないようなシステムをつくり上げようというのが中心になっていると思う。もう少し先で、極端なことを言えば、制度も変えるとか、どちらの制度がいいとか、そのような指針も出せるような研究に取り組みたいと私自身としては思っている。(内田)
- ・制度の変更までも実現しようとしたときには、大変な障害があると思う。そのルートはあるのか？(合原)
- ・今のところ特にない。(内田)
- ・取りあえずそのためのベースの理論が必要ではないか？(合原)

- ・その通り。方針や政策提言に向けて、こういう方針でやったらどうかとか、そのようなことを行いたい。ただし、制度を変えらるゝはいつても、例えば、マーケットをうまく使うといったことも重要。マーケットを使うということ自体、電気料金を決めるのを透明化するという、ある意味のコンセンサスを得られる土壌がある。また、インセンティブも重要。市場の中で、みんなが認められるような形のインセンティブを与えることによって、例えば、デマンドレスポンスをもう少し盛んにするとか、制度を本当に変えなくても、もう少しいい方向に進む方法がいろいろある。それから、現実の、目の前の安定化の制御で言えば、それこそ電気学会の B 部門でいろいろと行われていると思うが、我々としては、もう少し先を狙って研究を進めている。(内田)

< Q >

- ・制御区分の俯瞰図を見たときに、大きく 3 つに分かれている。仕様に対する理論と、対象に対する理論と、2 つの制御トピックス。異常検出をどうするかは置いておいて、それらの相互関係はどこかで触れるのか？各研究開発領域で、「こういう俯瞰をしている」、と言っているが、それらがまた関係しているのではないか？(原)

< A >

- ・何で今回こうした研究開発領域を俯瞰し、また各領域の関係がどうなっているかについては俯瞰報告書の第 2 章で触れることにしたい。(内田)
- ・エキストラな作業になる感じがしないでもないが、それができるとアピールできるのではないかと思う。(原)
- ・了解。トピックスについては、俯瞰活動の分科会で集まった議論の中で、「今、特に何が問題だろう？」ということ考えたときに、この 2 つ、「環境エネルギーとシステム制御」と「都市インフラとシステム制御」を取り上げようということになった。仕様に対する理論、対象に対する理論では、制御という区分の一番骨格になる部分が何かということ俯瞰する必要があるということで、それぞれの領域の展開を記述している。(内田)

< Q >

- ・2 つのトピックスの俯瞰では、仕様に対する理論や対象に対する理論の中にある研究開発領域で俯瞰されたことがどのような方向に進んでいかなければいけないかが、ある意味で示唆されているのではないか？つまり、制御の中でのフィードバックのような、研究の方向性のようもののフィードバックがかかった内容が含まれているのではないか？(原)

< A >

- ・まさに分散協調制御という考え方は、トピックスからのフィードバックもかなりあり、このように整理するのがいいというところは確かにある。その辺のところにも可能な限り触れたい。(内田)

< Q >

- ・「環境エネルギーとシステム制御」や「都市インフラとシステム制御」のところだが、このときの「制御」という言葉が 2 つの意味で使われている。一つは、いわゆるオン

ライン制御なりリアルタイム制御に近いイメージで、例えば、電気であれば常にバランスが取れなければいけないという意味のもの。もう一つは、先ほども述べられたように、買い取り制度等を入れたときに、消費者はどのように行動していったら、その結果として、システム全体がどのような方向に動いていくだろうかというもの。これらはかなり時定数の違うものであって、俯瞰図の左側の方にある仕様に対する理論や対象に対する理論が使えないようなものが、そうした制御にはどうしても入ってくる。ただし、制御という感覚、あるいはコントロールという感覚からいえば、確かにフィードバックして、次の状況が変わるという点では同じではあるが、方法論としては、必ずしもそうした理論だけでは済まないのではないかというところを非常に心配している。(鈴木)

< A >

- ・トピックスについては、今回俯瞰する 2 つだけということでは決していないが、やはりいくつかに絞るとすれば、制御の分野がどのようなものかを示す意味ではこの 2 つは重要。(内田)

< Q >

- ・原先生の質問と重なるが、あそこの間の距離をもう少し縮める部分がどこかにないといけないのではないかと？リアルタイム制御の部分だけであれば、このままでいいような気もする。(鈴木)

< A >

- ・いや、私は、リアルタイム制御だけではいけないので、そこに向かった制御理論も必要と認識している。制御という分野の中においても、新しい方向へ発展させていかなければいけない。一方で、ある意味で狭い意味の制御というところで閉じて、それは実現できないというのが、鈴木先生の指摘だと思う。それはまさにシステム科学技術分野が、もう少しお互いに連携したところで新しい問題設定をして発展させていくという、少なくとも二段構えでの発展ということを下の例が教えてくれるのではないと思う。(原)
- ・これについては、長期的なモデルと、市場の時定数のモデルと、本当にリアルタイムというのを、今、三層に分けて研究している。私としては、市場とリアルタイムでつなぐ部分の制御理論がどうならなければいけないかというところに取り組んでいるところ。(内田)
- ・例えば、環境エネルギーとか、都市インフラの問題は、制御だけの問題ではもちろんないわけで、これは、大変いい問題提起をしている。例えば、モデリングや最適化のところからは、そのような問題に対してどのようなコントリビューションができるかという形の俯瞰もあるのではないかと。制御の話からは少し離れるが、システムという考え方が実務問題を解決するのにいかに有効であり得るかということにもつながっていくのではないかと。(土谷)

2014. 10. 24

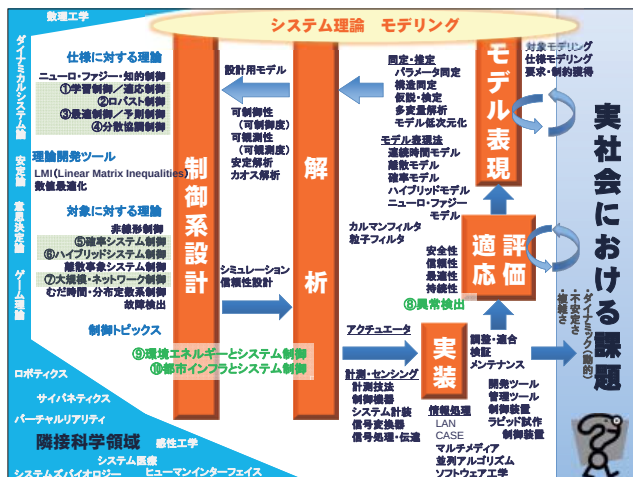
俯瞰区分 「制御」

早稲田大学理工学術院
内田健康

1

俯瞰図第3層 制御

2



研究開発領域

学習制御／適応制御 (金子)
ロバスト制御 (藤崎)
最適制御／予測制御 (大塚)
分散協調制御 (畑中) (新領域)
確率システム制御 (加嶋)
ハイブリッドシステム制御 (平田) (新領域)
大規模・ネットワーク制御 (石井)
異常検出 (加納)
環境エネルギーとシステム制御 (藤田) (新領域)
都市インフラとシステム制御 (滑川) (新領域)

金子 修 金沢大学理工研究域電子情報学系
藤崎泰正 大阪大学大学院情報科学研究科
大塚敏之 京都大学大学院情報科学研究科
畑中健志 東京工業大学大学院理工学研究科
加嶋健司 京都大学大学院情報科学研究科
平田研二 長岡技術科学大学機械系
石井秀明 東京工業大学大学院総合理工学研究科
加納 学 京都大学 大学院情報科学研究科
藤田政之 東京工業大学大学院理工学研究科
滑川 徹 慶應義塾大学理工学部

4



学習制御／適応制御

- 学習制御: 未知の特性、入出力データを反復利用した学習により生成される制御、人間の学習メカニズムとの関連、機械学習との融合
- 適応制御: 未知の特性、環境データに適応して変化させる制御、MRACS、STRからデータ駆動型制御 (IFT、VRFT、FRIT) への展開、未知の目標値に追従する極値制御
- 注目動向: データ駆動型制御、制御パラメータの適応・学習から制御メカニズムの適応・学習へ: 制御とモデリングの一体化、極値制御に代表される応用の拡大
- 国際比較: 欧州、日本 (プロセス制御)

6

ロバスト制御

- 不確かな制御対象を「モデルの集合」でとらえ、全ての集合要素に「一様な性能」を実現する制御（ H^∞ 制御、 μ 制御、LMI/SoS）
- 注目動向：大規模な問題における計算量のボトルネック、ランダム化アルゴリズムに基づく展開、データ駆動型制御、HYCON/HYCON2（欧州）
- 国際比較：欧州（基礎研究）、米国、日本

7

最適制御／予測制御

- 最適制御：最適フィードフォワード制御（最大原理）、最適状態フィードバック制御（動的計画法）
- 予測制御：モデル予測制御、Receding Horizon制御、拘束条件の考慮可能、実時間最適化が必要
- 注目動向：予測制御は最適制御の状態フィードバック実現、実時間解法ツールの開発、プロセス／環境・空調／自動車／EMSなどの予測制御の応用
- 国際比較：米国、欧州

8

分散協調制御

- 分散協調制御：多数のサブシステムにより構成される大規模システムにおいて、各サブシステムが局所的（分散的）な情報交換の下で協調的に行動することで全体最適な状態を達成する制御
- 注目動向：局所目的を追求する分散制御と合意制御に基づく理論的枠組み、応用分野：環境・エネルギー管理システム／社会インフラ（交通システム／水システム／シティ）／センサネットワーク
- 国際比較：米国、欧州

9

確率システム制御

- 確率システム制御：決定論的な扱いが困難な外乱や環境変化をもつシステムに対する制御
- 注目動向：応用分野の拡大（環境・エネルギー／ファイナンス／サイエンス分野）、サンプルに基づく確率システム制御、確率モデルの学習、確率的不確定性の活用、最適化手法（ADMMなど）との融合による計算量削減 及び並列・分散実現、レジリエンス制御への対応
- 国際比較：米国、欧州

10

ハイブリッドシステム制御

- ハイブリッドシステム制御：連続値の動特性と離散値の動特性が混在するシステムの制御
- ハイブリッドシステムのモデル：Hybrid Automata、Switched Systems、Piece-wise Affine Systems、Mixed Logical Dynamical Systems、Max-plus Discrete Event Systems；制御理論の展開と計算ツールの開発
- 注目動向：時制論理による仕様の記述と自動設計実現；計算機科学と制御理論の接近
- 国際比較：米国、欧州

11

大規模・ネットワーク制御

- ネットワーク化制御システム：センサ・アクチュエータ・コントローラの通信ネットワーク化制御システム
- マルチエージェントシステム：無線通信を用いた自律移動ロボット、センサネットワーク
- ネットワーク制御：通信ネットワーク輻輳制御など
- 注目動向：通信制約と制御性能に関する基礎研究、情報セキュリティ、省エネルギー化
- 国際比較：米国、欧州（プロジェクト多数）

12

異常検出

- 異常検出: モデル型異常検出手法とデータ型異常検出手法(MSPCなど)、設備と品質の異常検出
- オフライン分析からリアルタイム監視と予測・制御へ(製品試験による品質保証から工程内品質保証へ)
- フォールトトレラントからディペンダブルシステム設計へ
- 注目動向: Real Time Release Testing、Simulation-Based Engineering Science による製造工程変革、医療やヘルスケア分野への応用
- 国際比較: 米国、欧州

13

環境エネルギーとシステム制御

- スマートグリッドやEMSを代表的な領域とする環境エネルギーに関するシステム制御の研究開発領域
- 電力システムのスマート化制御: 双方向通信インフラの整備を前提に、デマンドレスポンスの促進、エネルギー貯蔵システムの利用、並びにエネルギー需給市場の活性化を通して、社会的利益に合致する電力システムの運用を実現するシステム制御
- 再生可能エネルギーに関わる制御: 安定化と高品質化; 高度な広域連携の実現; 発電量の予測技術との融合
- 国際比較: 米国(CURRENT、FREEDM)、日本(CREST-EMS)

14

都市インフラとシステム制御

- 上下水道網、交通網、送配電網、情報網などのサブシステムを要素とし、サブシステム間相互の作用・干渉を考慮した大規模・動的システムの制御
- 注目動向: 動的システムとしてのモデリング、センサネットワークを備えた都市インフラのCPSモデルと制御、制御仕様としての安全性や災害に対する適応力・回復力、状態の計測と推定、環境発電
- 国際比較:

15

3-3. 最適化

政策研究大学院大学政策研究科
教授 土谷 隆

最適化がどのような使われ方をするかについてまず述べたい。1つは「現実からモデルへ」ということである。まず実際にデータがあったときに、それに対する数理モデルを作って、それにできるだけいいパラメータを推定するためには最適化をしなければならない。これは統計モデルのような最適化の使い方になっている。逆に「モデルから現実へ」の場合では、工学的な設計を最適化することになる。これからシステム設計等を行っていく上では、後者の比重が大きくなってくると思う。

最適化が主に対象とする領域としては、線形計画問題、凸最適化問題、非線形計画問題、離散最適化問題(ネットワーク最適化等)がある。これらの中に、計算技術やモデリング技術等が不可欠なものとして取り込まれている。

線形計画問題は、多面体上で線形目的関数を最小化せよ、というような問題である。これは、モデリングの基本中の基本と言える。次の凸最適化という分野はこの 20 年ぐらいの間にできてきた。計算機のスピードが進んできたことと相まって、凸集合上での線形目的関数最小化が実用化されたことにより、今では数千から数十万次元の空間で最適化ができるようになってきている。

ネットワーク上の最適化は、これまで以上に大事になってくると思う。これは、道路網、鉄道網、ソーシャルネットワーク、人間同士のつながりなど、非常に多くのものをモデリングすることができる道具である。例えば最短路問題や巡回セールスマン問題等がある。混合整数計画問題は、線形計画問題に、いくつかの変数が整数であるという条件がついた問題である。これがきちんと解けると、世の中は間違いなく大きく変わるというトピックスである。この分野で日本は頑張らなければいけないと思う。線形計画問題と並んで大きく注目集めているのが、半正定値計画問題である。

近年の進歩で特筆すべきこととして、凸最適化が使えるようになったこと、シミュレーションベースの遺伝的アルゴリズム等がかなり使えるようになってきたこと、さらに混合整数計画問題という大きな問題が解けるようになってきたことが挙げられる。最適化手法が進展すると、今まで計算できなかったようなモデルが実用化できる。逆に、新しいモデルができると、最適化手法の方も、その問題を解こうということで進展する。

チャレンジとしては、大規模な離散最適化問題や超大規模な凸最適化問題の求解や、大規模時空間のネットワークの最適化が挙げられる。その他には、20 変数程度の一般非線形最適化問題が厳密に解けると、現場ではかなり使えるものになると思われる。

(6 研究開発領域の個別説明：スライドを参照)

< 議論 >

< Q >

- ・混合整数計画問題は解くのが難しいけれども、もし解ければ世の中が変わって、かつ解けつつあるということであった。その困難さというのは、どのぐらいのものか？例えば、NP-hard と比べたらどうか？（合原）

< A >

- ・NP-hard だ。（土谷）
- ・すると、基本的には解けないのか？（合原）
- ・理論的な意味でいいアルゴリズムはない。（土谷）
- ・では、ヒューリスティックに解くという意味なのか？（合原）
- ・ヒューリスティクスではなくて、厳密に解ける。「厳密に」という意味は、大雑把な言い方をすると、まず、解は厳密であり、最適解であることが保証されている。ただし、その最適解であることを保証するためには、いろいろな工夫をしている。そのところは、ある意味でヒューリスティックな工夫をして、最悪の場合は全部数えなのではあるが、実際にはそんなことはなくて、きちんと解ける。（土谷）
- ・では、基本的には小規模な問題ということか？（合原）
- ・いいえ。実用レベルのもので、もちろんいくらでも難しい問題があるが、例えば、先ほ

どのスタッフスケジューリングの問題がある。このような安全安心の世界であれば解けるところまで来ていると思う。したがって、本当にこれがきちんと解けると、例えば、全国の病院が非常に助かる。(土谷)

- ・ただし、そのような技術が既に完成の域に達しつつあっても、それだけでは終わらないという側面もある。例えば、出てきた解を全部使えるかということ、最適だからといって使えない部分もある。人間の感覚では、「これはちょっと変じゃないの？」とかいろいろあって、最適性というだけでは完全に使い切れない部分がある。その部分を解決するために、サービスサイエンスなどがある。結局、仮に最適化の技術が十分なところまで達していても、サービスサイエンスのように、皆さんの実際のところまで届かないという問題がある。したがって、そのような最適解をサービスサイエンスの人たちのところにもって行って照らし合わせ、いいシステムをつくっていくためには、どうすればいいのかということのすり合わせをすることが大事。(土谷)
- ・聞きたかったことをもう少し具体的に述べたい。今度、山本喜久先生の **FIRST** と私たちの **FIRST** をくっつけて、山本先生が **PM** で、内閣府の **ImPACT** のプロジェクトを始めた。そこでは量子人工脳といって、原理的には量子コンピュータで **NP-hard** をターゲットにするものをつくる。今その応用を探しているので、いい応用問題があったら、ぜひ教えてほしい。(合原)
- ・それは、いくらでもある。(土谷)

< Q >

- ・最初の方に「モデリングと最適化」があったが、2つ質問がある。前の図で見ると、モデリングと言っているのは全部最適化の中だから、最適化モデリングであり、最適化数理解で、最適化計算、最適化アルゴリズムだと読めば、この中で閉じているのでオーケーだという気がする。一方で、モデリングと最適化といわれているのは、椿先生のところのモデリングという話とコンフュージングな感じがしないでもない。(原)

< A >

- ・確かにそうかもしれない。ただし、最適化モデリングと言ったときには、結局、それぞれの人が問題を解くのに得意分野があって、その得意分野を使って問題を解こうということ。つまり、自分の土壌にもってくるときの道具。最適化アルゴリズムであるというのが、最適モデリング。(土谷)
- ・あまりいい言葉ではないけれども、何となく最適化の定式化に近い感じがする。ただし、モデリングという言葉の方がもう少しリッチだからいいのかなという感じがして聞いていた。全体を見たときに、「モデリングと最適化 1」で、「現実からモデルへ」と言ったときには、何を意識しているのか？やはり最適化モデリングなのか？(原)
- ・モデリングそのもの。(椿)
- ・その通り。モデリングの中での最適化の役目。(土谷)
- ・モデリングを支える基礎数理として最適化があることを明らかにすること。(椿)
- ・その通り。最適化モデリングという言い方をしている場合と少し違う。(土谷)

< Q >

- ・もう 1 つ、「パラメータを推定すること」と言ってしまうと、非常に問題を矮小化して

いるのではないかと？むしろその意味で言ったときには、モデルの構造のような話はどこに行くのか？（原）

< A >

- ・これは分かりやすく、最小二乗法が一番簡単な最適化問題の例だからということ。（土谷）
- ・例として挙がっているのか？（原）
- ・つまり、あまりいい例ではないというか、これが一番分かりやすいだけで、もっといろいろなことをできる例はあるはず。（土谷）
- ・構造のようなものが大事かなという感じもした。（原）

最適化

土谷 隆
（政策研究大学院大学）

JST-CRDS 平成26年度システム科学技術分野俯瞰ワークショップ
(2014年10月24日)

土谷 隆

- ・ 経歴
 - － 政策研究大学院大学(2010年4月から現在)
 - － 統計数理研究所(1986年4月から2010年3月まで)
- ・ 研究分野
 - － 最適化(統計数理・数理工学)
- ・ JST数学CREST, さきがけの領域アドバイザー
- ・ モデリング・数理・アルゴリズム
 - － 凸最適化アルゴリズムの設計・解析・活用
 - － 内点法アルゴリズムの情報幾何

2010/10/13

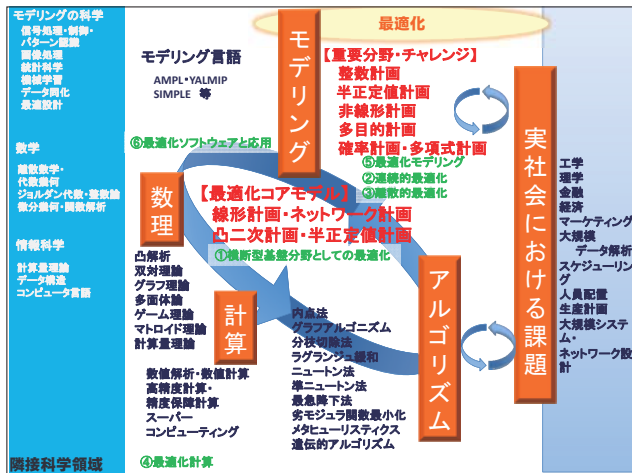
政策研究大学院大学昼食セミナー

俯瞰メンバー

- ・ 土谷隆（政策研究大学院大学）
- ・ 池上敦子（成蹊大学）
- ・ 岩田覚（東京大学）
- ・ 藤澤克樹（九州大学）
- ・ 田辺隆人（NTTデータ数理システム）

分野

- ・ 横断的分野としての最適化（土谷）
- ・ 最適化アルゴリズム
（連続的最適化（村松）・離散的最適化（岩田））
- ・ 最適化計算（藤澤）
- ・ 最適化モデリング（池上）
- ・ 最適化ソフトウェアと応用（田辺）



分野としての最適化

- 数理モデリングと最適化：不可分の関係
 - 良いモデルやシステムを作るためにはモデルやシステムの最適化が重要！
 - システム科学のみに留まらず、多くの分野における基本的道具立て(でありたい)
 - 数学・計算機科学・物理学・生物学等との深い関係
 - 最適化的世界観

モデリングと最適化1

- 現実からモデルへ！
- 数理モデル：対象の数学的(近似)表現
- モデルを現実(データ)に合わせるために、パラメータを推定することは日常茶飯事
- 典型例：統計モデル

モデリングと最適化2

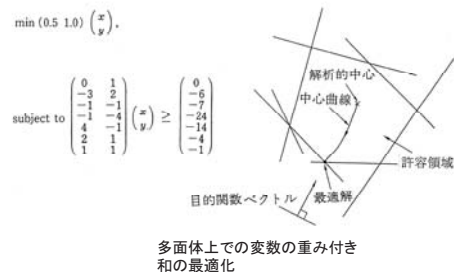
- モデルから現実へ！
- ある基準でできるだけ良い設計をしたい。(工学の目標)
- そのためには最適化が不可欠

最適化

- 線形計画問題・凸最適化問題(多面体や凸集合上での線形関数最適化)
- 非線形計画問題(一般の微分可能関数の最適化を行う)
- 離散最適化問題(ネットワーク最適化、組合せ最適化)
- 計算技術
- モデリング技術
- システム構築の土台！

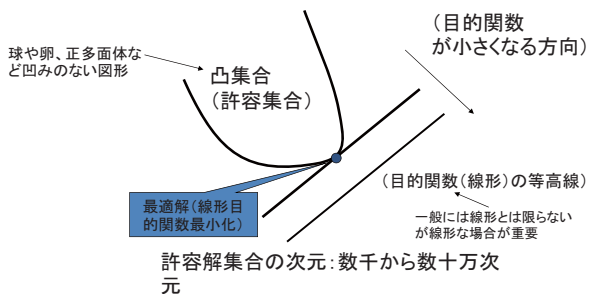
線形計画問題

解ける・役立つ・巨大・モデリングの基本



凸最適化問題

解けつつある・役立つ・モデリング力大



2010/10/13

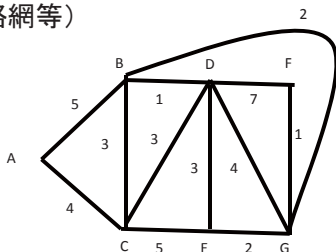
政策研究大学院大学登壇セミナー

半正定値計画問題

- 線形計画の行列版
- 凸最適化のエース
- 解けるようになりつつある
- 機械学習・制御・統計・マーケティング等非常に多くの分野に応用を持つ

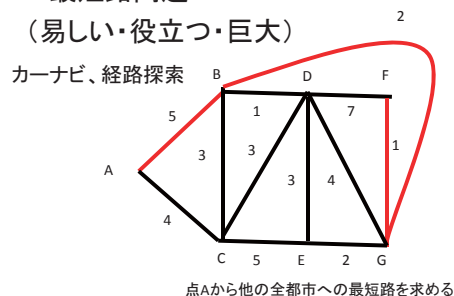
ネットワーク

- 節点(都市)とそれらを結ぶ枝上の重み(距離)からなるもの
- 多くのシステム構築やモデリングの基本(道路網等)



離散最適化問題

- 最短路問題
(易しい・役立つ・巨大)



点Aから他の全都市への最短路を求める

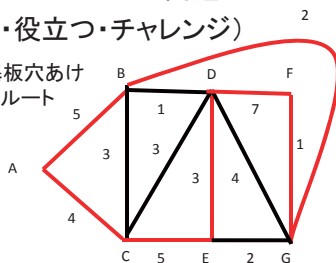
2010/7/23

Operations Research (grips)

離散最適化問題

- 巡回セールスマン問題
(困難・役立つ・チャレンジ)

プリント基板穴あけ
最適配送ルート



点Aから他の全都市を1度だけ通って戻る最短巡回路を求める

2010/7/23

Operations Research (grips)

離散最適化問題

- 混合整数計画問題＝線形計画＋(いくつかの変数は整数であるという条件)
(困難・役立つ・チャレンジ・モデリング力は巨大(これが普通に解ければ世の中は大きく変わる))

2010/7/23

Operations Research (grips)

近年の進歩

- 凸最適化の進展(特に半正定値計画法)
- 遺伝的アルゴリズム等の新しい流れ
- 大規模離散最適化問題の厳密解法の進歩
- スパースモデリング
- スケジューリング・人員配置・生産計画等への活用
- 機械学習・統計・データ同化・ビッグデータ等の分野への活用

最適化手法の進展



新しいモデルの実用化
(両方向の矢印！)

最適化手法の進展

[線形計画・凸最適化 (1990-)
主双対内点法(日本発!)]



新しいモデルの実用化

[サポートベクターマシン (1990-)・
スパースモデリング(2006-)
(スパースモデリングの源流はAIC(日本発!))]

チャレンジ

- 大規模離散最適化問題の求解
- 超大規模凸最適化問題の求解
- 大規模時空間ネットワークの最適化
- 20変数程度の一般非線形最適化問題の厳密解法
- 不確実さを取り込んだ最適化問題の求解

チャレンジ

- 純粋数学とのより密接な連携
- 現実問題へのより密接な取組
- スーパーコンピューティングと最適化

- 今のスパコンは、10年－15年後のノートブックであることを見据えて研究する
- ハードは10年－15年後のスパコンが大衆化するが、ソフトやモデリング環境はそうならない点が問題

凸錐上の線形計画問題のモデリング技術とアルゴリズムの新展開

- 半正定値計画問題、2次錐計画問題：
 - 良いアルゴリズムは開発され、モデル記述能力の高さでは折り紙つき
 - しかしながら、統合的なモデリング技術としては古典的線形計画問題と比較すると未だに未成熟
 - モデル化された問題が超大規模になった場合のアルゴリズムの開発(2次元・3次元・4次元モデルに対応)
- 統合された総合モデリング技術としての凸錐上の線形計画法を開発・展開する

混合整数計画問題、非線形混合整数計画問題

- 整数条件が付加された最適化問題
- 記述力は大変高い。活用できる分野も広い(スケジューリング・人員配置等)
- 解くのが難しいが、最近はかなり大きな問題も解けるようになってきている

モデリングシステム

- Excel インターフェイス + 高性能混合整数計画ソルバー
 - 人員配置、スケジューリング、予算配分最適化、等直観的にモデリングしやすい！が解きにくい。
 - ソルバーは十分高性能になってきている。
 - 途上国のインフラ整備に大きく貢献できる？
 - フリーで ...

世界の現状

- 米国 巨大・層が厚い
- ヨーロッパ EU 内で着々と連携しつつある
- 日本 単独でそれなりに頑張っている？
 - 国際的にはどこと組むか？アジア？欧米？
- 香港・シンガポール(米国からの留学帰国組が)それなりの存在感。しかし、市場は小さい。
- 中国 今: 米国の一流大学にかなり中国人教授がいる。優秀な学生の拡大再生産。

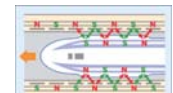
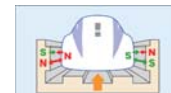
最適化モデリングの例1

リニアモーターカー最適磁気シールド設計
(土谷 隆)

凸最適化(2次錐計画法)によるリニアモーターカー磁気シールド最適設計



山梨リニア実験線



リニアモーターカー：超伝導磁石で浮上、推進
強力な磁場を発生

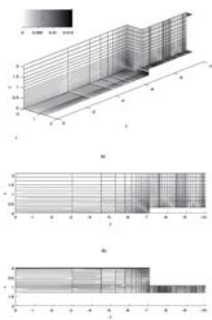
車体内部をシールドして、内部に磁場がもれないようにする。一方、シールドはできるだけ軽くしたい。
→最適設計問題(2次錐計画という凸最適化問題に定式化) (左の図 <http://www.rtri.or.jp>; 右2つの図 <http://www.pref.yamanashi.jp/> より)

6

内点法と呼ばれる多項式時間
解法を開発、この問題を解くの
に用いた。

- 問題の大きさ
主双対変数の数: 5007
自由度(yの次元): 1669
- 計算時間: 0.1秒以下(推測)
(反復回数: 21)

解法の利点: 高速で安定しているため、
異なる想定で一万回解いてロバストな
シールドを設計できた。



最適化されたシールドの形

7

最適化モデリングの例2

(成蹊大学 池上敦子)

全国の病院では毎月3万件以上の看護婦シフト
表作成が発生。

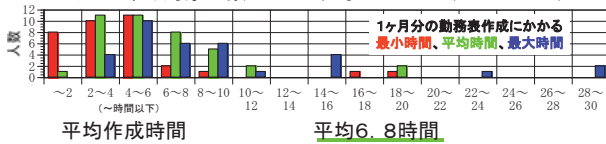
スタッフスケジューリングの中では一番難しい
問題。

スケジューリングの自動化を行いたい。

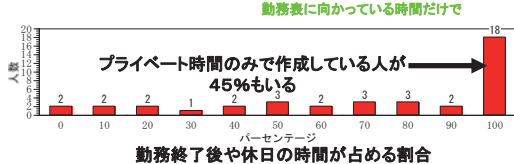
以下のスライドは池上氏によるもの。

1994年 東京の某医科大学附属病院(婦長と主任) 40名

3交替制(34ヶ所) 2交替制(6ヶ所)
スケジューリング対象期間 1ヶ月 20数行×約30列
スケジューリング対象人数 平均24.3人(12~42人)

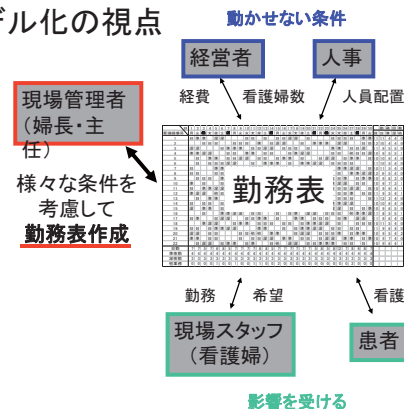


平均作成時間 平均6.8時間



勤務終了後や休日の時間が占める割合

モデル化の視点



拘束条件

●勤務表作成において絶対守るべき条件

- 休日数 38名
- 各勤務の人員確保 36名
- 深夜勤の数 28名
- 準夜勤の数 23名
- 希望する休日 19名
- スキルによる組み合わせ 3名
- 勤務の並び 2名

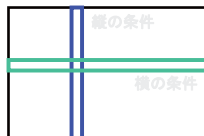
●できれば守りたい条件

- 希望する休日 30名
- 深夜勤の数 25名
- 深夜勤の数 22名
- 各勤務の人員確保 11名
- 休日数 9名
- 勤務の並び 4名
- 公平さ 2名
- メンバーの組み合わせ 2名

各勤務の業務に支障をおこさないための
『人員確保』と『メンバー構成』

各看護婦の勤務負荷を考慮するもの
『勤務や休日の数』『勤務の並び』『休日希望』

大きく5つの条件



完成した勤務表

看護婦	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	
-----	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	--

安全・安心の社会へ(池上研+情報研)

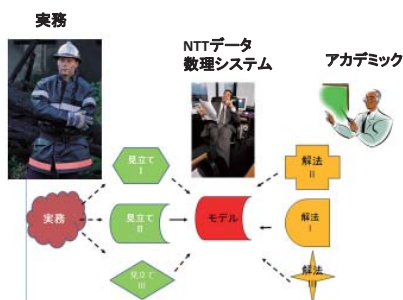


企業における最適化モデリング

以下スライドは田辺隆人(NTTデータ数理システム)氏によるもの。田辺氏は最適化ソフトウェア Numerical Optimizer やモデリング言語 SIMPLE の開発にかかわってきた。

ビジネスとしての数理計画法

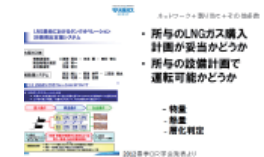
1. 実社会の問題を定式化して解く支援
2. 定式化された問題を解くアルゴリズム・プログラムの開発



インフラ修繕費用の平準化



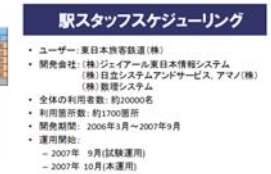
LNGタンクオペレーション



CS進出ナンバーの計算



シフトスケジュール

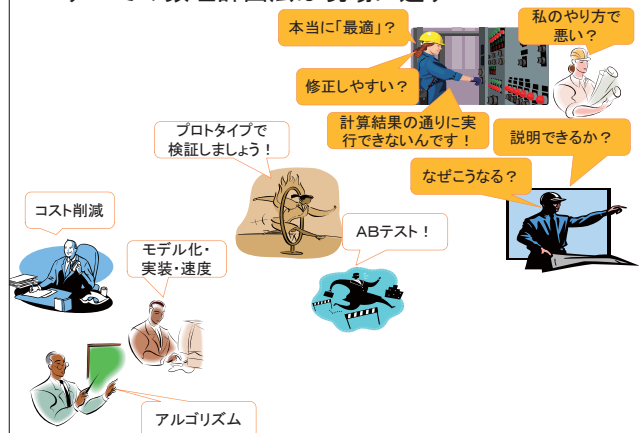


数理計画ビジネスを支える アカデミックな成果

- 「最適性」の導出 ひそかな安心
- 「古典」からモデルと解法の相性を学ぶ
「難しさ」の評価方法を学ぶ
⇒業務的制約の多彩さ
- 問題の自明でない変形
⇒大規模な問題

理論的結果⇒リスクヘッジ

すべての数理計画法は現場に通ず



一方の「常識」

- 費用と時間さえかければ何でもできる
- すべては線形オーダー
- なんでも積み上げ・ウオーターフォール
- 問題は入力できれば必ず解ける
 - すべての制約を満足する解は存在する
- 専門家なら解の出た理由が説明できるはず
- 人間による意思決定が最上

一方の「本音」

- 誰もやっていない「面白い」問題がほしい
- 解よりも構造や分類が重要
- やってみなければ結果はわからない
- 結果はいつ出るか約束できない
- 最高の性能、最適な解でなければ！
- データはいつでも正確
- 問題はいつも十分に定義されている
- 綺麗な構造でなければ...
- スクラッチから作って一回限りしか使われない

「常識」と「本音」を折り合わせる場合は？

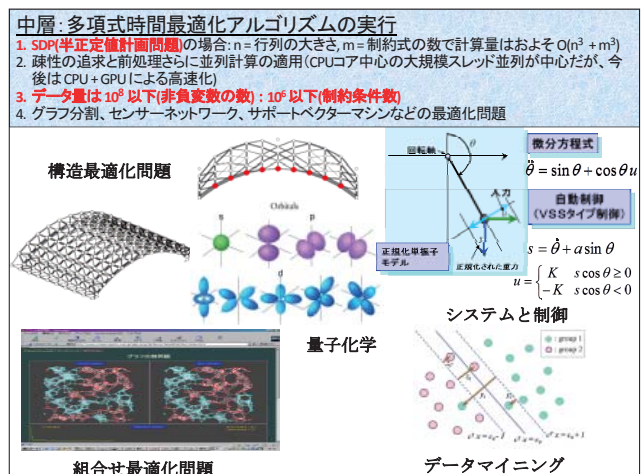
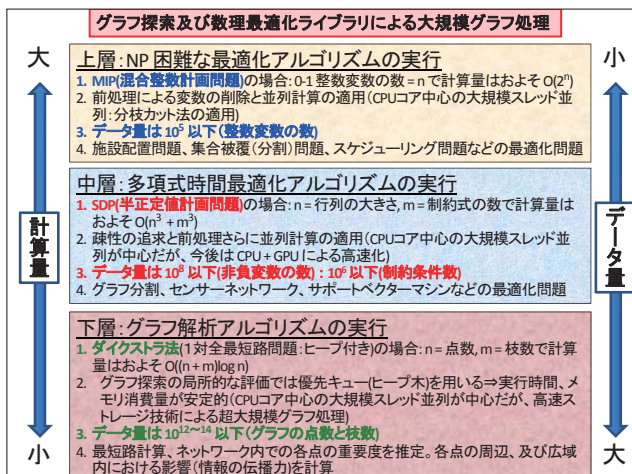
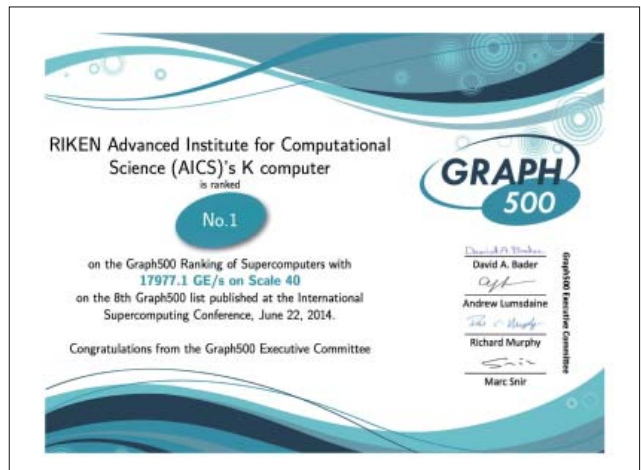
最適化計算

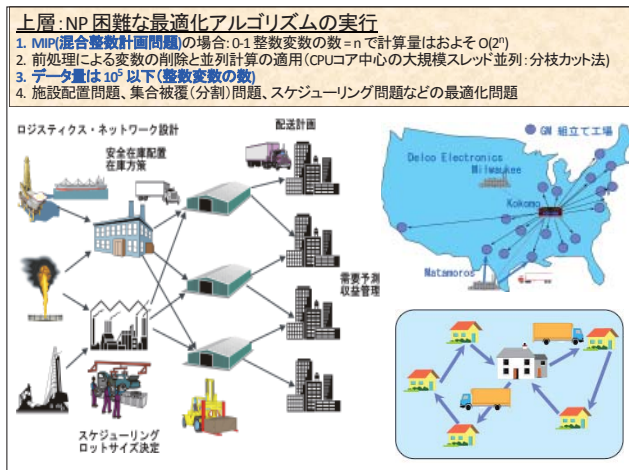
以下のスライドは藤澤克樹氏(九州大学)によるもの

https://dl.dropboxusercontent.com/u/12413370/Graph_Tutorial_140829.pptx

よりの抜粋

藤澤氏は JST CREST「ポストペタスケールシステムにおける超大規模グラフ最適化基盤」のチームリーダー





数理計画問題(最適化問題)と2015年予想(目標)

- **非常に応用が広範(企業、社会、公共政策)** → 高性能なソルバーを作ること自体が最適化問題
- センサーデータによる最適化問題の複雑 & 巨大化
- **半正定計画問題(SDP)**と**混合整数計画問題(MIP)**が2大注目数理計画問題
- **汎用ソルバーの必要性**(個別の問題に対する仮定やチューニングは効果が低い)
- 入力は**疎データ**と**密データ**の混合
 - **疎データ**: 多数のCPUコアによる処理(浮動小数点演算性能に非依存: 密データへ変換) → **GPU系による処理**
 - **密データ**: **GPU系による処理**
 - 理論的性能限界等からボトルネック箇所を特定
 - 数値演算能力とメモリバンド等のトレードオフ関係を把握
 - 計算量とデータ移動量の正確な推定、疎性やサイズなどのデータ特性と性能値の見極め
- 計算量とポストペタスパコンでの想定:
 - 計算量 $O(n^3)$ → 数百万程度, $O(n \log n)$ → 100億以上, $O(n)$ → 100兆以上

(前頁までで藤澤氏のスライドは終わり)

数理・アルゴリズム

- 分野の基礎。この研究なくしては、成り立たない。
- 線形計画問題(1988-2004)
 - 528万倍のスピードアップ
 - 内1600倍は計算機のスピードアップ
 - 内3300倍はアルゴリズムの進歩による!

理論やアルゴリズムの日本発の重要な業績

- 線形計画問題・半正定値計画問題に対する主双対内点法(メイドインジャパンのアルゴリズムとして世界的に使われている。)
- 劣モジュール関数の最適化や離散凸解析(構造のある離散的最適化問題)
- 半正定値計画問題に対する理論やアルゴリズム, ソフトウェア

理論と応用と...

- 理論を伴わない実践は盲目であり実践に繋がらない理論は退廃する
- 理論は時には実践を一举に凌駕するはるか彼方の地平に我々を着地させる
(韓 太舜 電気通信大名誉教授退職講演より)

一気通貫の「文化」が重要

- 私はモデリング屋
- 私はアルゴリズム屋
- 私は数学を研究してる ...
- 最適化問題に定式化したからパッケージに食わせて答えを出そう ...
- 統計科学の研究者は人の3倍研究しないといけない(統計数理研究所 赤池弘次先生)

3-4. ネットワーク論

東北大学大学院情報科学研究科
助教 長谷川 雄央

「ネットワーク論」区分では、要素の詳細を気にせずに、多数の要素からなる要素間のつながりだけに着目して、そのシステムを解析することを行っている。

非常に複雑で巨大なネットワークを解析するネットワーク科学が登場したのは 1998 年頃である。そのきっかけは、インターネットの発展や計算機の性能向上があったことと、それに伴い、多くのネットワークのデータが一般の研究者の手に入るようになったこと、そして、統計物理や工学の研究者の参入により、数学的な厳密さにこだわらずにデータを解析する手法が発達したことが挙げられる。特に分野横断的にネットワークの特徴を調べることで、スケールフリー性やスモールワールド性が、ネットワークの対象を問わず発見されたことは、当時、大きなインパクトをもって迎えられ、ネットワーク科学は周辺分野も巻き込みながら成長してきた。

研究開発領域としては、「複雑ネットワークおよび総論」、「機械学習・データマイニング分野におけるネットワーク構造解析」、「ネットワークに関する離散数学」、「ネットワーク解析用ソフトウェア」の 4 つを取り上げている。

「複雑ネットワークおよび総論」では、さまざまな複雑ネットワークを一般的に理解すること、解析することを行っている。近年の傾向として、テンポラルネットワーク、マルチプレックスネットワーク等の、より複雑化したネットワークの解析が盛んに行われている。

複雑ネットワーク研究が、ある種のネットワークに共通して現れる性質を理解することを重視しているのに対して、「機械学習・データマイニング分野」におけるネットワーク構造解析は、与えられたネットワークデータにおける知識発見や予測を行うことに、より

ウェートを置いている。しかし、近年は SNS 等の普及により、それを共通の対象として取り上げる機会も多く、その 2 つの領域間の距離は接近しつつあると言える。

「ネットワークに関する離散数学」は、グラフ理論及びそれに関連する離散数学を対象にしている。この分野では、日本は世界的に質の高い理論研究を出していて、例えば、アルゴリズム的グラフマイナー理論は日本の河原林氏より始められ、現在もこの分野をリードしていると言える。

「ネットワーク解析用ソフトウェア」の注目動向としては、プラットフォームに依存しないで外部データの利用が容易な JavaScript ベースのソフトウェアの開発が目立つこと、また、オープンソースプロジェクトとして開発が行われているソフトウェアやライブラリとして開発されたソフトウェアの人氣が高いことが挙げられる。

ここ数年は、大規模な複雑ネットワークを共通の対象として、4 つの研究開発領域間の連携が進んでいる。

(4 研究開発領域の個別説明：スライドを参照)

< 議論 >

< Q >

- ・ 2 つほどコメントがある。ネットワークというのは、我々システムを考えている人間から見ると、実は一番システムらしいシステム。しかも、最近システムの中のネットワーク的な側面が非常に重視されつつある。制御区分の中でもネットワークの制御が一つの領域として取り上げられているし、最適化区分にもネットワークが取り上げられている。したがって、ネットワークそのものだけではなくて、ネットワークの考え方がいろいろな分野に普及、広がりつつあるという面もどこかで記述しておいてほしい。ネットワークシステムのシステム科学技術分野への広がりということ。ネットワークそのものについては、非常によくまとめられているが、我々から見ると、その辺が少し物足りない気がする。それと、応用面については取り上げられているか？ (木村)

< A >

- ・ 今回の 4 つの領域の中では、特に 2 つ目にとりあげた機械学習・データマイニング分野におけるネットワーク構造解析にその側面が強い。応用面を独立して取り出すと、国際的な研究情勢が難しいと思ったので、それはしていない。(長谷川)
- ・ 度々お願いしていたのだが、それがそのような形できちんと入れられたということで、感謝したい。(木村)
- ・ 木村先生のコメントとも関連するが、ダイナミクスの観点が少し欠けているのではないか。例えば、ノードをオシレーターとして捉えたカップルドオシレータなどが非常に研究されているし、感染症に関してもノードの中のメタポピュレーションモデルがある。エボラ出血熱は、まさに今それがポイントになってきている。したがって、ダイナミクスな視点を①の総論の中でもう少し触れた方がいいのではないかという印象をもった。単にグラフのような話がベースになっている気がする。応用との絡みからみても、むしろダイナミカルな部分が非常に大事になってきていると思う。(合原)
- ・ 了解。(長谷川)

< Q >

- ・ ご存じだとは思いますが、数学的にはグラフとネットワークは区別している。ところが、ここをほとんど区別せずに、あるときはネットワーク、あるときはグラフという言葉で話されていて、その違いがあまり明確になっていなかった。この俯瞰報告書全体を統一して区別するか、しないのであれば、しないということを最初に言った方がよいのではないかと脚注でもいいので。そうでないと、一体どちらのつもりで話をしているのだろうか？という疑問が出てきてしまう。ネットワークのつもりで、量まで含めたノードや楕円の特性値が入った形でこの問題を捉えようとしているのか、あるいはただ単に、枝と頂点との接続関係だけでこの問題を捉えようとしているのかで、意味が違ってくる。(鈴木)

< A >

- ・ 両方ではないか？(木村)
- ・ 両方が入っているならば、ネットワークとして言わなければいけない。(鈴木)
- ・ ネットワークまたはグラフ理論の「グラフ」と書いてある。(木村)
- ・ 一つ一つのテーマについて、今どちらを前提に話をしているかを明確に区別するか、しないなら、最初からそれは読者がその場で判断しろ、という形で明示しておかないと、読者が違う方向で読み始めて、途中で「あれ？」と思ってしまう。(鈴木)
- ・ 盲点だった。考えてみる。(長谷川)

< Q >

- ・ 合原先生のコメントについては、私も同じことを思った。途中でこの領域が、どうなっているか分からない、生きているかどうか分からないというようなコメントがあったが、その心は何か？(原)

< A >

- ・ 特にネットワーク科学が一時的な流行りで終わってしまうのか確たる分野となるのかは不透明だという意味。俯瞰報告書には「生き残るのか、生き残らないのか」といった表現は使っていないが。(長谷川)
- ・ もちろんそうだ。合原先生のコメントと関連するというのは、まさに今の鈴木先生とも同じなのだが、基本的にグラフの性質だけだよ、という形で言ってしまうと、そのような意味で生き残らないのかなという印象はやはりある。ところが、ネットワークでおのおののノードがいろいろな意味の性質をもつという話だった。合原先生も、我々制御も、ダイナミカルシステムという性質がそこにあることによって、ネットワークの捉え方は全く違うし、やらなければいけない研究や方向性も違ってくる。それはダイナミカルシステムという特性だけではないかもしれない。先ほどから言っているように、人間のネットワークといったときも、単に関係があるか、ないか、ではない。ネットワークにある性質の属性が入って、そこをモデル化して、それらがつながっているというように考えてくと、非常に広がっていく。まさに木村先生が言ったように、ネットワークはシステム科学というものの一つの大きなバックボーンになるという印象がある。単にグラフとして理解されたら5年ぐらいしかもたないかもしれないけれども、実はもっとリッチだよ、という印象をもっている(原)

- ・グラフとネットワーク思想にこだわるのがよく分からなくて、グラフ論というのは、オイラーから始まったもの。その後、ネットワーク、電気回路を研究していた人たちは、そういうのを全く知らなかった。そして、ネットワーク理論というのを、設計理論と組み合わせて構築した。しかしその後に、回路のトポロジーが重要になってくると、例えば、電気間の回路が存在するかしないか、結びつきに矛盾があるか、平面化できるのかどうかという実用的な問題で、グラフ論が必要になってきた。こうしてグラフ論が電気回路の理論に入り込んできた。依然として私は、電気回路は基本的なところでグラフ論的な側面をもっていると思う。回路ではトポロジーというのは重要であり、トポロジーを考えると結合だけしか考慮しないという問題がたくさんある。(木村)
- ・それは否定していない。(原)
- ・グラフ理論の問題の世界と、ネットワークになって起こってくる問題の世界とは違う。その違いを明確に捉えておかないといけない。(鈴木)
- ・当然捉えている。(木村)
- ・いや、どちらもネットワークという言葉で言ってしまう部分もあるので、そこは気をつけないと。今は区別しないのだというのであれば、それはそれでそのような方向性も確かにある。(鈴木)
- ・私は区別しない方がいいと思う。区別できないと思う。そのような側面が共存しているということは、それは学問の性質で、それだけネットワークが分厚い分野だということ。私は専門家ではないが。(木村)
- ・それが、定義として違う。そこはきちんとやらないといけない。そう書けとは言わないが。(鈴木)
- ・私は合原さんと同じ。ネットワークシステムという、少なくともダイナミカルシステムになっている部分は、ネットワークとしてグラフ構造プラスダイナミカルシステムの特徴が合わさったものとしてのネットワークであるということ。(原)
- ・それは、ネットワークの一つの捉え方。ネットワーク全体ではない。ネットワークというのはいろいろたくさんある。それで、最近のスモールワールドはグラフ論で行く。その結果としてあのような新しい知見が出てくる。(木村)
- ・それは全く否定していない。(原)
- ・それをあえて分けたら、かえって変になる。私は門外漢だが、多少いろいろな人との耳学問で、両者は渾然一体となっていると理解している。(木村)
- ・ネットワーク論なり、グラフ理論の教科書を読むと、きちんと区別した上で議論をしている。(鈴木)
- ・教科書の話ではなくて、分野の話。(木村)
- ・専門家も読むのだから、そこを区別しないで議論をするならば、区別しない、ということ、専門家に対してきちんと言っておかないと、クレームがつくということを心配している。(鈴木)
- ・了解。(木村)

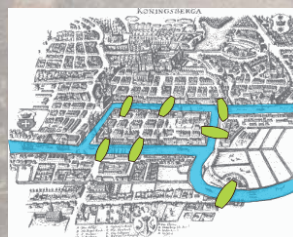
俯瞰区分 「ネットワーク論」

長谷川雄央（東北大学大学院情報科学研究科）

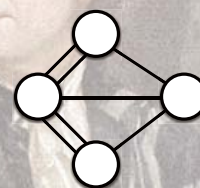
ネットワーク

…またはグラフ理論の「グラフ」

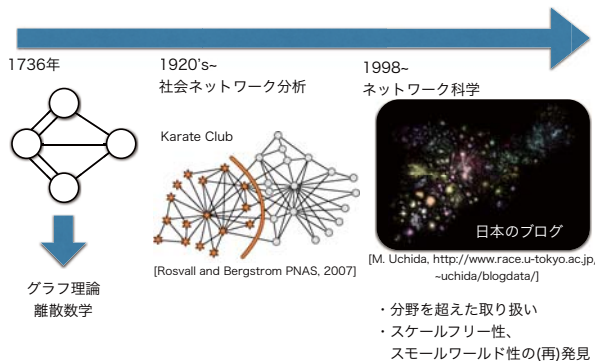
ケーニヒスベルクの橋問題：島の周りを流れる川にかかる7つの橋を全て、1回ずつだけ渡って散歩することができるか



[from wikipedia]



「グラフ」から「ネットワーク」へ



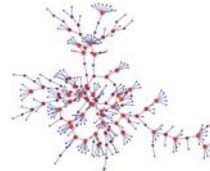
社会

ソーシャルネットワーク



[P. Butler, <http://on.fb.me/hy6dmb>]

性的交渉



[M. E. J. Newman, SIAM Review 2003]

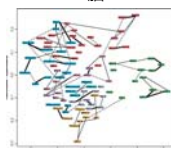
研究者の共著関係



[Girvan and Newman, PNAS 2002]

生物

脳



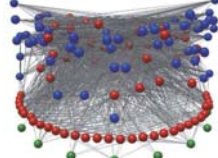
[Salvador, Cereb. Cortex 2005]

代謝



[Almaas et al, Nature 2004]

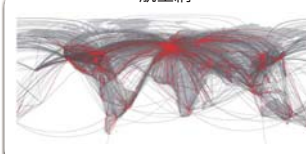
食物網



[J. A. Dunne et al, PLOS Biology 2013]

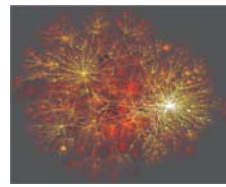
情報 交通

航空網



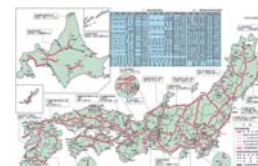
[D. Grady et al, Nature Communications 2012]

インターネット



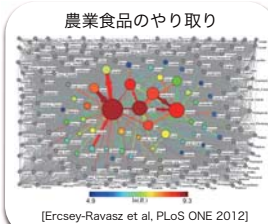
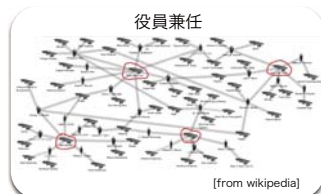
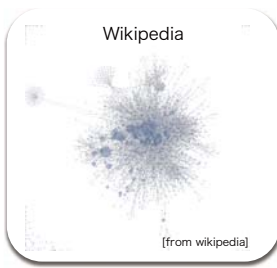
[K. C. Claffy, <http://www.caida.org/publications/papers/bydate/index.xml>]

道路網



[国土交通省道路局・高規格幹線道路網図から]

その他



執筆者一覧

① 複雑ネットワークおよび総論

執筆者：東北大学大学院 情報科学研究科 長谷川 雄央 助教

② 機械学習・データマイニング分野におけるネットワーク構造解析

執筆者：京都大学大学院 情報科学研究科 鹿島 久嗣 教授

③ ネットワークに関する離散数学

執筆者：東京大学大学院 情報理工学系研究科 岩田 覚 教授

④ ネットワーク解析用ソフトウェア

執筆者：筑波大学 システム情報系 橋本 康弘 助教

① 複雑ネットワークおよび総論

概要

- ・ 1998年頃から工学・統計物理学等の研究者の参画により発展
- ・ 基礎研究：ネットワーク生成モデル、感染症伝播などのダイナミクス解析、中心性、コミュニティ分割
- ・ 応用研究：感染症制御、生態系保全、人間の移動を考慮したネットワーク、電力網のコントロール、創薬

注目動向

- ・ 複雑ネットワークの複雑化(テンポラル、マルチプレックス)
- ・ 理論の人が応用へ。10年後に応用・産業で成果を出せるか
- ・ Google、Facebook などとの相互作用

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	○	△	理論研究や実データを用いた基礎研究が国内で行われるようになってきたのは、2004年頃であり、欧米に大きく遅れをとっている。そのひとつの証左として、ネットワーク研究の代表的な総説論文に引用されている日本発の論文数はわずかにある。 ・ 2007年頃以降、研究者の数は非常に増えており、物理学系、情報科学系、電子通信工学系などの中にネットワークを冠した学会のセッション、研究会組織などが存在し、定期的に研究会を開催している。 ・ 2012年10月よりJST ERATO 河原林大次郎プロジェクトがスタートし、コンピュータ科学の研究者の参入が進んでいる。
	応用研究・開発	△	→	・ 日立グループが、世界に先駆ける技術で、人の職場における動きや、対人相互作用を高精度で記録するシステムを開発した。国内外の大学にアータを提供したり、国内の企業への試験的導入（一部は商品化）を行っている。
	産業化	△	→	・ サイバリアン社が、複雑ネットワーク理論に基づいて、アマゾンなどの購買サイトであるような、商品を買ったときに他の商品を買わせるレコメンデーションシステムを商品化し、国内外から高く評価されている。 ・ 職場などの人間関係ネットワーク解析を請け負うコンサルティングサービスは、過去10年程度の間にいくつもの会社が提供した実績である。しかし、特筆すべき成功事例はない。顧客の収益化の見通しのないまま商品化を行ってしまったことが原因であると思われる。
米国	基礎研究	○	→	・ 1998年と1999年にそれぞれ1本ずつ発表された論文がネットワーク科学の基盤として世界的に認識されている。これらの論文は米東海岸発であり、以来、米国は本分野の基礎研究を行う研究者の質量において、他国を圧倒している。 ・ ネットワーク科学を代表する国際会議のシリーズが、米国を母体として毎年開催されており、毎回数百人の研究者が集う。 ・ Northeastern大学、Indiana大学などに、ネットワーク科学の研究センターがある。
	応用研究・開発	○	→	・ ネットワークの基礎研究の礎をつくったような研究者が、遺伝子システム、感染症の制御などについて、大型プロジェクトを運営している。 ・ Google社の検索エンジンのアルゴリズムに近いPageRankが、論文誌のランキングについて、既存の有名な手法（Impact Factor）の弱点を克服するものとして開発され、世界中の学術機関で使われているWeb of Scienceというデータベースにも実装されている。 ・ シカゴにおいて、チーム作業の生産性などといった独創的な応用研究が進められている。

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
米国	産業化	○	△	・ ネットワークの理論を用いて、企業組織のネットワークをコンサルティングし、生産性の向上を目指すプロトコルが、商品化されている。 ・ Googleの後援エンジニアには、1998年に西海岸で開発されたページランクというアルゴリズムが搭載されている。ページランクはその後のGoogleの発展を牽引した。産業化における、ネットワークの基礎理論の最大の成功例として認知されている。 ・ facebookの中には、ネットワークの三角形を増やすようなユーザに推薦する機能など、ネットワーク科学の知見に基づく仕組みが搭載され、コミュニケーションの円滑化や拡大に間接的に貢献している。
欧州	基礎研究	○	→	・ 特にスペインとイタリアにおいて、統計物理学の背景をもつ多くの研究者が基礎研究を行っている。ハサンダリとフィッシャーは、他の分野の平均には比べて本分野における基礎研究が盛んである。近年は各国からイギリス、フランス、ドイツなどへ有力研究者の移動がある。 ・ ネットワーク科学に関する（数百年ヨーロッパから多いもので2000万ユーロを超える規模の）大規模プロジェクトが複数ある。 ・ スペインのBascompteのグループは、食物網の解析、その生態学的機能などの研究において、世界をリードしている。
	応用研究・開発	○	△	・ 米国の研究者と共同して、いくつかの欧州の国における携帯電話による社会ネットワークのデータの取得と解析が2007年以降行われている。災害時の移動、マーケティング、感染症制御などへの応用可能性がある。 ・ フランスの携帯電話事業者が、自社の提供する携帯電話通話記録データを用いた研究のコンペティションを主催している。
	産業化	△	→	・ 世界的に知られるような産業化の動きはなし。
韓国	基礎研究	○	→	・ 優秀な部分を含む統計物理学者のかなりの割合がネットワーク研究を行っている。そのため、上位の学術誌には、日本よりも多くの基礎研究成果が発表されている。 ・ 米国のボストンやカリフォルニアの世界的なネットワークの研究センターと間に太いつながりが以前からあり、継続的に、人員の交流が行われている。そのため、最先端の情報が入りやすい。 ・ 統計物理学関係以外のネットワークの基礎研究はあまり盛んでない。
	応用研究・開発	△	→	・ 韓国最大のsocial networking serviceであるCyworldと大学が提携して、その構造解析などを行っている。ただし顕著な後継研究は見当たらない。

② 機械学習・データマイニング分野 におけるネットワーク構造解析

● 概要

- データマイニングの一分野(リンクマイニング)
- 知識発見や予測などの動機。数々の産業化

● 注目動向

- ビッグデータ
- Carnegie Melon 大のグラフマイニングプロジェクト、Stanford 大のSNAP Project
- データ供用に際する公民連携の必要性(日本)

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	○	／	・ グラフ構造データを使うデータマイニング技術については、その初期の段階から、大阪大学のチームをはじめとして日本が重要な貢献を行っている。 ・ 基礎研究と産業化の結びつきが弱い。
	応用研究・開発	△	→	
	産業化	○	／	
米国	基礎研究	○	／	・ 国内ソーシャルメディアにおける情報推薦、楽天、アマゾンなどのオンラインショッピングモールなどでの推薦システムなど、関係予測の産業利用が見られる。 ・ 当該分野を牽引する研究グループが多く存在する。Carnegie Mellon大学のChristos Faloutsos氏のグループやStanford大学のJure Leskovec氏のグループが大規模なグラフ解析を積極的に進めている。Stanford大のDaphne Koller氏、Maryland大のLise Getoor氏のグループなどが、統計的な関係データ解析研究を積極的に推進している。 ・ Netflixのチャレンジが特に推薦方式の進展を加速した。また、Twitter、facebook、LinkedInなどの主要なソーシャルメディアの多くは米国発であることもあり、これらの研究者・エンジニアによる研究開発も盛んである。
	応用研究・開発	○	／	
	産業化	○	／	
欧州	基礎研究	○	／	・ Twitter、facebook、LinkedInなどのソーシャルメディアにおける情報推薦、amazon.comなどのオンラインショッピングモールなどにおける商品の推薦など、世界的に利用されているサービスにおける技術利用が盛んである。 ・ 米国に劣る形で発表している。欧州は伝統的に論理に基づく関係データ解析に強く、帰納論理プログラミングを得意とさせてきた。Imperial College LondonのStephen H. Muggleton氏のグループなど多くの有力な研究グループが存在する。
	応用研究・開発	○	／	
	産業化	○	／	
中国	基礎研究	○	／	・ Mines ParisTechのJ.-V. Vert氏のグループをはじめとして、生体ネットワークや金融一掃の関係ネットワークなどをターゲットとしたネットワーク解析研究が盛んである。 ・ Microsoft Research Asiaや有力大学からコンスタントに論文が発表されている。 ・ 海外ソーシャルメディアへのアクセスが制限されるなか、中国国内のソーシャルメディア、オンラインショッピングなどが独自に進化しており、推薦などの技術が用いられていると推測される。
	産業化	○	／	

③ ネットワークに関する離散数学

● 概要

- グラフ理論、グラフアルゴリズム
- 電気回路、分子構造などに動機づけられて発展
- 1980年代以降のグラフマイナー理論
- 計算機科学と応用分野への拡大(水・物流などのフロー、建造物の骨組み、分子構造解析など)

● 注目動向

- 2010年の京都賞は Prof. Lovász へ

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	○	／	・ アルゴリズム的グラフマイナー理論、多品物流問題、組合せ最適性理論において、画期的な結果が、若手研究者によって発表されている。 ・ 世界水準の競争に参加している研究者層の厚さという点では、改善の余地がある。 ・ ERATO同僚研巨大グラフプロジェクトが発足し、多くの若手研究者が応用研究に積極的に参画して成果をあげている。 ・ 2部グラフのDM分解を用いて半導体メモリの不具合を診断する方式が開発され、実用化された(東芝)。
	応用研究・開発	○	／	
	産業化	○	→	
米国	基礎研究	○	／	・ 模造的グラフ理論の研究で、他を圧倒している。 ・ ネットワークゲーム理論、評判の伝播モデルなど、新たな問題設定で野心的な研究テーマが追究されている。 ・ IBM、Microsoft、Yahoo、Googleといった企業が、離散数学・計算機科学の分野の学位取得者の主要な就職先になっている。その中には、世界的に広く知られた研究者も少なくない。 ・ 分子動力学が証明される以前から、その正当性を前提に、分子運動の自由度を解析するソフトウェアが開発されている。 ・ 木幅の変種を用いたルーティング方式の開発された(Bell 研究所)。
	応用研究・開発	○	→	
	産業化	○	→	
欧州	基礎研究	○	→	・ ドイツ、フランス、オランダにおいてはグラフアルゴリズム、特にパラメータ固定計算量の研究が充実している。 ・ グラフ最適化に関する研究では、ハンガリーの研究者の活躍が顕著。 ・ ドイツでは、数学の工学的応用を推進するプロジェクトMATHEONが推進され、産業界の諸問題に数学者が取り組む体制が整ってきた。 ・ グラフアルゴリズムのパッケージソフトウェアが販売されている。
	応用研究・開発	○	／	
	産業化	○	／	
韓国	基礎研究	○	／	・ KAISTでは、Sang-il Oumが中心になって、外国人若手研究者を多数招き入れた流動的なグループを形成している。
	産業化	○	／	

④ ネットワーク解析用ソフトウェア

● 概要

- ネットワークを特徴づける諸特性量の計算機能
- 2次元に視覚化(可視化)するための機能

● 注目動向

- ブラウザで動作するJavascriptフレームワークの開発
- オープンソース化
- RやPythonなどのライブラリとして開発
- グラフデータベースの開発

ネットワーク解析ソフトウェア

ソフトウェア名	開発者	開発年	特徴
Pajek	スロベニア: Vladimir Batagelj	1996	可視化
Graphviz	米: AT&T研究所	2000	可視化
Siena/RSiena (with R)	英: オクスフォード大学	2000	分析・可視化
BGL (Boost Graph Library) (with C++)	米: インディアナ大学	2000	分析
GTL (Graph Template Library) (with C++)	独: パッサウ大学	2001	分析
visone	独: コンスタンツ大学	2002	分析・可視化
UCINET for Windows (商用)	米: Analytic Technologies社	2002	分析・可視化
Cytoscape	米: Institute for Systems Biology	2002	分析・可視化
NetDraw	米: Analytic Technologies社	2002	可視化
statnet (with R)	米: ワシントン大学	2003	分析・可視化
Tulip	仏: ボルドー大学	2003	分析・可視化
LGL: Large Graph Layout (with Java)	米: テキサス大学オースティン校	2003	可視化
JUNG (with Java)	米: カリフォルニア大学アーバイン校	2003	分析・可視化
SNAP (with C++/Python)	米: スタンフォード大学	2004	分析
igraph (with R)	洪: 科学アカデミー	2005	分析・可視化
CFinder	洪: エトヴェシュ・ローランド大学	2005	分析・可視化
Network Workbench (with Java)	米: インディアナ大学	2006	分析・可視化
GraphStream (with Java)	仏: ル・アヴェル大学	2007	分析・可視化
NetworkX (with Python)	米: LANL研究所	2008	分析・可視化
NodeXL (Excelプラグイン)	米: Microsoft Research	2008	分析・可視化
Gephi	仏: Gephi コンソーシアム	2008	分析・可視化
Cuttlefish	瑞: チューリッヒ工科大学	2009	分析・可視化
graph-tool (with Python)	独: ダルムシュタット工科大学	2009	分析・可視化

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情報など
日本	基礎研究	△	→	・ソフトウェア開発において基礎研究とプロトタイプングの差は現状小さくなっていると考えられるため、「応用研究・開発」にまとめるものとする。
	応用研究・開発	△	→	・国外で開発された定評のあるソフトウェアの日本適化といったプロジェクトは存在するものの、ソフトウェア開発に関する組織的・継続性を持った独自の活動は見られない。
	産業化	△	→	・科学・技術系ソフトウェアベンダーが商用の統計分析パッケージの一種として一般的なネットワーク分析機能を提供するケースや、国外で開発された定評のある統計分析パッケージの輸入代理店のみ、Big Dataへの取り組みの一環としてネットワーク分析ソリューションとして提供している企業は一定数存在するが、パッケージソフトウェアとして提供している例は見られない。
米国	基礎研究	○	↗	・同下
	応用研究・開発	○	↗	・歴史的にも著名な開発プロジェクトが米国の大学や研究機関を中心に多く存在し、研究者にとっても標準ソフトウェアとしてよく利用されている。現在アクティブに開発されているプロジェクトも多い。
	産業化	○	→	・ネットワーク分析に特化した商用ソフトウェアを提供しているベンダーが多く存在する。
欧州	基礎研究	○	↗	・同下
	応用研究・開発	○	↗	・個別ではドイツ発祥の開発プロジェクトが多いものの、国際的な人材交流も活発であり、ハンガリー、イギリス、フランス、イタリア、スペイン、北欧など、大学機関を中心に特徴ある開発プロジェクトが存在する。
	産業化	○	→	・ネットワーク分析に特化した商用ソフトウェアを提供しているベンダーが存在する。

2012年以降の注目動向

- ・ ネットワークに関する巨大プロジェクト
 - ・ JST ERATO 河原林巨大グラフプロジェクト (日本)
 - ・ 期間：平成24年10月～平成30年3月、予算総額：約14億円
 - ・ NETWORKS (オランダ)
 - ・ 期間：2014年から10年間、予算総額：22.7 million euros
- ・ 自社データ提供型の研究コンペティション：
 - ・ Twitter data Grants (アメリカTwitter社)
 - ・ D4D challenge (フランスOrange社)

3-5. 複雑システム

東京大学生産技術研究所
教授 合原 一幸

「複雑システム」区分の問題を考える上で、W. Weaver の論文は非常に重要である。彼が、今後重要になる問題として取り上げた「組織された複雑さの問題」が、現在の複雑系の科学の研究に対応している。また、複雑システムを考える上では、ダイナミクスとネットワーク構造とビックデータをどう扱うかも重要な観点になる。

「複雑システム」区分における研究開発領域は、生命系、数物系、工学系、社会経済系に分けて考えることができる。以下に各研究開発領域の内容を紹介する。

「複雑系生命科学」は、階層的構造をもつ生命システムの普遍的な性質を抜き出そうとしている。生命系で難しいのは、分子数が多くないためにゆらぎがあることと、さまざまな反応がフィードバックを含むためダイナミカルに変動することである。従来の研究のように、取り除くとシステムが動かなくなる必要条件を探すのではなく、自分たちでシステムを構成して、この条件でどのような機能が出てくるかという十分条件を探索している。

「複雑系脳・神経科学」については、最近の脳科学の潮流として、これまで単一脳研究であったのが、ペア脳研究もできるようになってきている。脳の相互作用を見ることができると、コミュニケーションの問題に入っていける。その意味で、ペア、あるいはより大きな社会の方向に、神経科学自体も進んでいこうとしていると言える。

「複雑系技術論」については、例えば、技術者は企業という組織の中で人工物をつくるが、組織というのは一種の複雑系になっていて、そこでは意思をもつ人間を含んだシステムをどう考えるかという難しさが基本にある。また、例えば、自動車の乗り心地や橋の振動等を、要素として捉えるのではなくて、創発現象として、システムとして見ていく観点が重

要。都市やインフラも複雑な人工物として捉えていくことが重要である。

「複雑系社会学」では、人々の相互作用があるために、社会を個々の性質には還元できない創発特性をもたらすシステムとして捉える。特にオートポイエティック・システムを重視している。また、ミクロとマクロのリンクが非常に重要である。

「複雑系経済学」では、ビックデータを分析することで、普遍的法則を見つけられる可能性が出てきた。また、ビックデータの観測とシミュレーションにより、社会・経済現象を研究すれば、一つの自然科学のような学問になり得るだろうという主張がされている。さらに、危険な大変動の予兆を検出する市場変動観測所をつくることも提案している。

「複雑系数理モデル学」については、例えば、我々が開発した動的ネットワークバイオマーカー（DNB）を使うと未病状態を検出できる。これについては、医学部の人たちと共同で研究を進めているところである。また、DNB は上記の経済市場における大変動の予兆検出などにも応用可能である。

（8 研究開発領域の個別説明：スライドを参照）

< 議論 >

< Q >

- ・ 1 つコメントだが、システムという視点を、もう少し強く書いていただけると有り難い。我々の目的はシステム構築だが、各研究開発領域の原稿の内容からは、使うシステムの方にも使えるのではないか。基本的にはアナリシス。最後の方は制御の方まで入ってきている。そこで、アナリシスについてだが、このような視点が将来の複雑な社会システム構築にどう使えるのかを、書いておいていただけると有り難い。（木村）

< A >

- ・ 了解。（合原）

< Q >

- ・ 私自身はランダムウォーク仮説など全く信用していないが、問題は、世の中、例えば、今ベイズモデルなどが私の周辺でも出てきて、私は本来ベイジアンではなかったが、フィクストイフェクトのようにパラメータを非常に多くするよりも、方便というか、うそであつてもランダムイフェクトというものにした方がよくなっている。要するに、限られた情報量というか、事実との整合性を考えて、それから予測などにするときには、パラメータ数を少なくすることだけがランダムネスの過程の中で意味をもって、有効性をもつのではないか？先ほどのスパースモデリングというの、本来はすべてのものがある種、外部の情報量が限られているので圧縮してしまうということが、応用上、有効になるという話があると思う。現象の認識というか、モデルとしては、明らかにこれは複雑系であつて、ランダムとは全く別のダイナミクスが働いていると確信するようなところがある。しかし、これを技術的に利用するとき、何か他の、もっとシンプルで、相当方便として使っているようなものとの間のスコープというようなものが要るのではないかという気がする。その辺、むしろ先生方の中で、どのような感じの印象をもっているかを聞きたい。（椿）

< A >

- ・そこは重要なポイントで、実際に実務で使っている方たちも、ランダムウォークではないことは気づいている。ところが、利用可能なソフトウェアとかが、基本的に従来の金融工学のものしかない場合が多くて、仕方なく使っている場合が多いようだ。したがって、実務者がきちんと利用できる形でプログラムまで提供すれば、みんなが使うようになるのではないかと、高安さんも原稿の中で書いている。(合原)
- ・経済に関して言うと、経済学者という人も、何でもモデリングする。論文を見ていると、何でも論文のネタになっている。一方で、物理学者はモデル帝国の大元なので経済学者がモデリングするときと、物理学者がモデリングするときは、できるだけ独立にやってもらって、勝負してもらいたいという、私の興味があり、そういうのはできないのかなと思う。(土谷)
- ・経済プロパーな人が、経済物理学をどう捉えているか、そこが問題。あまり認知していない人が多いのではないかという印象。本当は、マンデルブロがもう少し長生きして、ノーベル経済学賞でももらっていると、かなり状況が変わったと思うが、そこは残念。彼は、もらってもおかしくなかったと思う。これからどうなるかは分からないが、このようにビッグデータが取れ始めているので、それをどう分析するかという話になる。経済学では、データをほとんど見ないような理論も多い。経済の理論をつくる方には、本当に数学のようなことをしている方もいる。したがって、データドリブンな研究が出てきて、そこから、例えば、実用になるような理論が出てくるといったことが起きてくると、重要な展開になってくると思う。その辺の研究の進展を私は期待している。(合原)
- ・やはり私がいるような大学では、経済学者というのは大変影響力があるという感じ。その意味では、新しいものの見方とかがどんどん発展していってくれるとよい。(土谷)
- ・しかし、影響力のある経済学者というのは、理論をやっていないのではないか。数学はやっていない。他方で、数学をやっている経済の理論研究者は、泥くさい実データは詳しく見ていないのではないか。そこも分かれているのではないかと思う。(合原)
- ・使うモデルが限られていたり、検定などをしたりするときも、多重性とか、専門家は気にするのではあるが、世の中のかなりの部分ではあまりそのようなことは関係なく、意識していない。(土谷)
- ・データを扱う実務家と、経済学理論をつくる人というのは、かなり分離されているような気がする。そこを複雑系経済学のようなものがつなぐと、おもしろい話になるのではないかという期待がある。(合原)

< Q >

- ・非常におもしろかった。ただ、少し冷静に今の話を聞いたときに、では、複雑システム理論というのは、分岐論だけか、という疑問がでてきた。そうではないという理解でよいのか？(原)

< A >

- ・全然違う。(合原)
- ・分岐理論というのは非常によく分かっているということであるが、その辺はどのぐらいの広さなのか？(原)

- ・自分の話になるが、我々が **FIRST** でつくったのは3つの柱。1つ目は、複雑系のダイナミクスを制御に結びつける複雑系制御理論。これは、制御理論と力学系理論を融合してつくった。2つ目は、複雑系はネットワーク構造をもつので、ネットワーク構造を解析して、例えば、最適化に結びつける複雑ネットワーク理論。3つ目として、ビックデータを解析して、予測に結びつける、もしくはデータ駆動型モデリングを行う非線形データ解析理論。我々としては、この3つの柱があれば、かなりのことはできるということを、最初の段階できちんと認識した上で、**FIRST** ではこの3つの柱をつくった。もちろんこれ以外にもあり得るのだが、4年しかなかったので、この3つをつくった。(合原)

< Q >

- ・複雑システム区分の俯瞰図を見ると、制御とか最適化とかモデリングというのが入っているから、やはり複雑性という切り口があって、全部いろいろなものが絡んでいるよ、ということと言おうとしたのではないかという気がする。そういうことはどこかで書くのか？(原)

< A >

- ・では、俯瞰報告書の第2章で何か書きたい。(合原)
- ・そうしていただくと、複雑性というメガネで見るということの位置づけがはっきりしてくる。(原)
- ・第2章でそのことや、先ほど木村先生が言われたシステムのことを書くという感じになるかと思う。それはやりたい。(合原)

< Q >

- ・とても細かいことだが、俯瞰図で一番下のところが人文系ではなくて、実は社会系ではないか？(寺野)

< A >

- ・人文とは言わないのか？(合原)
- ・人文とは言わない。(寺野)
- ・ここは社会なので、では社会経済系の方がまだよいか？(合原)
- ・社会経済系だとよいかと思うが、人文系だと、心理学が入ってきたり、文学が入ってきたりする。(寺野)
- ・了解。(合原)

< Q >

- ・最後の病気になるという部分は、それは確かにそうだと思うが、ものの例えで分かりやすくお話ししてくださっているからかもしれないが、実際には「何でも使えますよ」と言っても、それぞれの場合に、それぞれの場合に従う方程式などがあると理解しているのか？(土谷)

< A >

- ・その通り。(合原)
- ・そのところが結構大変で、そこをアイデンティファイして、というところにもっていくのが大変なところ。(土谷)

- ・まさにその通り。基本的なコンセプトはこれでいいのだが、電力に使用しようとすれば、電力方程式をつくって解析しなければいけないし、経済データは、またそれ用の解析が要る。したがって、コンセプト自体はそれでいいという話。全部これで説明できたら、カストロフ理論と同じ話になるので、そうではない。(合原)
- ・了解。(土谷)

JST-CRDS 2014年度システム科学技術分野俯瞰ワークショップ
2014年10月24日:JST東京本部別館1Fホール

複雑システム

合原一幸

東京大学 生産技術研究所
東京大学最先端数理モデル連携研究センター
東京大学 大学院情報理工学系研究科 数理情報学専攻
東京大学 大学院工学系研究科 電気工学専攻

W. Weaver, "Science and Complexity,"
American Scientist, 36, 536-544, 1948:

1. 17世紀から19世紀にかけての、少数変数の決定論的法則を研究する「**単純さの問題**」(Problems of Simplicity),
2. 1900年前後から行なわれた、無数の変数からなる系の平均的挙動の確率・統計的法則を研究する「**組織されない複雑さの問題**」(Problems of Disorganized Complexity),
3. 「**組織された複雑さの問題**」(Problems of Organized Complexity).

この「**組織された複雑さの問題**」が、まさに複雑系の科学の研究に対応している。
Weaver は、その例として、生命システム、経済システム、社会システムなどを挙げるとともに、その研究のためには、第2次世界大戦中に開発が加速された電子計算機が重要な役割を果たすことを述べている。

実世界の複雑系に挑む！

背景
脳、生命、健康、癌、免疫、新興・再興感染症、環境、エネルギー・電力、情報、通信、交通、経済、地震等々の21世紀の重要課題
→ 複雑系の問題として、とらえることができる

本分野
複雑システムの多面的研究

出口
複雑システム科学技術に基づいた、多彩な実学応用を拓く
複雑系科学技術イノベーションの確立

解決すべき
各複雑系応用課題

数理モデリング

ダイナミクス

全体

構造・関係性
ネットワーク構造

各要素

ビッグデータ

理論的プラットフォーム

ダイナミクス

複雑系制御理論
(力学系理論と制御理論の融合)

最適化

予測

複雑ネットワーク理論

非線形データ解析理論
(データ駆動モデリング)

ネットワーク構造

観測ビッグデータ

複雑系の (1)ダイナミクスと制御機能に関する複雑系制御理論、(2)ネットワーク構造と最適化機能に関する複雑ネットワーク理論および (3)観測ビッグデータと予測機能に関する非線形データ解析理論の3つの基礎理論から成る複雑系数理モデル学の理論的プラットフォーム。

脳・神経科学

複雑システム

生命系

①複雑系生命科学(金子修彦)
階層性、多様性、複製、ホメオスタシス、適応、細胞分化、進化補助応答関係、遺伝的均化、集団的安定性

②複雑系脳・神経科学(津田一郎)
大自由度力学系、非自励力学系、進化と発達、機能分化のダイナミクス、再生可能ネットワーク

動物系

③複雑系物理学(佐野雅己)
非平衡系の普遍法則、時空間の自己組織化の原理と制御、ゆらぎ解析と制御、情報熱力学

④複雑系物理学(佐野雅己)
非平衡系の普遍法則、時空間の自己組織化の原理と制御、ゆらぎ解析と制御、情報熱力学

工学系

⑤複雑系数理モデル学(合原一幸)
複雑系制御理論、複雑ネットワーク理論、非線形データ解析理論、ロバスト分岐

⑥複雑系技術論(齊藤文)
要求定義、複雑系設計論、事故調査、工学倫理、複雑系人工物

人文系

⑦複雑系社会科学(今田高俊)
社会生成論、創発性論、複雑適応系としての社会、ゆらぎを通じた自己組織化、オートポイエーシス

⑧複雑系経済学(高安秀樹)
経済物理学、経済ネットワーク解析、エージェントモデル、システミックリスク、ソーシャルメディア分析

隣接科学領域

実社会における課題

■数理モデルの疾病診断・治療や政策最適化への応用

■新興インフルエンザやバイオテロの数理解析とワクチン接種計画最適化などのリスク管理への応用

■複雑システム科学技術による経済発展とエネルギー効率向上のための基礎構築

■全く新しい非線形原理に基づくAD/DA変換器、複雑系制御回路、複雑系情報処理技術の確立

■複雑系制御理論に基づく交通流、通信ネットワークや電力ネットワークの制御

■要求定義、複雑系設計論、事故調査、工学倫理、複雑系人工物

■環境予測技術とその電力・エネルギーシステムへの応用

■脳、生命システムの複雑系数理モデルとBMI、ロボット、医療への応用

■組織の持続に必要なゆらぎ要因とゆらぎの活用

■経済変動の複雑性の解明

脳・神経科学

複雑システム

生命系

①複雑系生命科学(金子修彦)
階層性、多様性、複製、ホメオスタシス、適応、細胞分化、進化補助応答関係、遺伝的均化、集団的安定性

②複雑系脳・神経科学(津田一郎)
大自由度力学系、非自励力学系、進化と発達、機能分化のダイナミクス、再生可能ネットワーク

動物系

③複雑系物理学(佐野雅己)
非平衡系の普遍法則、時空間の自己組織化の原理と制御、ゆらぎ解析と制御、情報熱力学

④複雑系物理学(佐野雅己)
非平衡系の普遍法則、時空間の自己組織化の原理と制御、ゆらぎ解析と制御、情報熱力学

工学系

⑤複雑系数理モデル学(合原一幸)
複雑系制御理論、複雑ネットワーク理論、非線形データ解析理論、ロバスト分岐

⑥複雑系技術論(齊藤文)
要求定義、複雑系設計論、事故調査、工学倫理、複雑系人工物

人文系

⑦複雑系社会科学(今田高俊)
社会生成論、創発性論、複雑適応系としての社会、ゆらぎを通じた自己組織化、オートポイエーシス

⑧複雑系経済学(高安秀樹)
経済物理学、経済ネットワーク解析、エージェントモデル、システミックリスク、ソーシャルメディア分析

隣接科学領域

実社会における課題

■数理モデルの疾病診断・治療や政策最適化への応用

■新興インフルエンザやバイオテロの数理解析とワクチン接種計画最適化などのリスク管理への応用

■複雑システム科学技術による経済発展とエネルギー効率向上のための基礎構築

■全く新しい非線形原理に基づくAD/DA変換器、複雑系制御回路、複雑系情報処理技術の確立

■複雑系制御理論に基づく交通流、通信ネットワークや電力ネットワークの制御

■要求定義、複雑系設計論、事故調査、工学倫理、複雑系人工物

■環境予測技術とその電力・エネルギーシステムへの応用

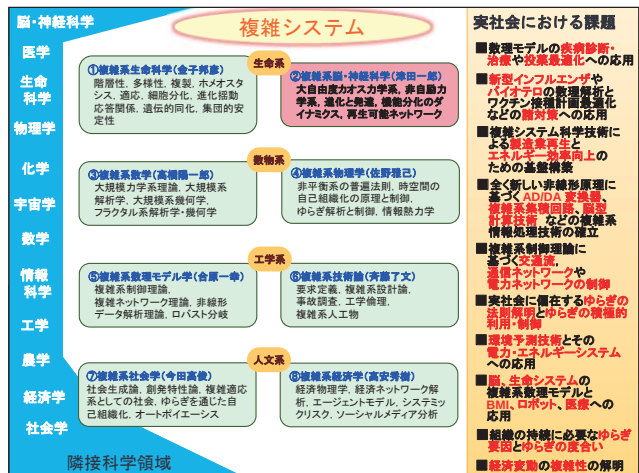
■脳、生命システムの複雑系数理モデルとBMI、ロボット、医療への応用

■組織の持続に必要なゆらぎ要因とゆらぎの活用

■経済変動の複雑性の解明

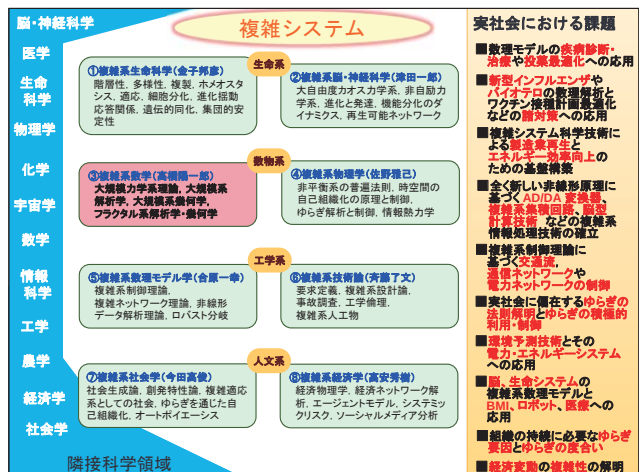
複雑系生命科学(金子邦彦)

- ・ 階層的構造を持つ生命システムの普遍的性質の理解。
- ・ 全体は部分が集まってできているけれども、各部分は全体の性質で規定されるという循環を重視し、分子、細胞、個体、生態系といった階層システムがいかに動的に安定した状態を形成するかに着目。
- ・ 個々の細胞反応は、分子の衝突によるので確率的、しかも分子数が多くないのでゆらぎ、様々な反応がフィードバックを含むのでダイナミカル。
- ・ 従来の研究のように取り除くとシステムが動かなくなる分子を探る「必要条件」でなく、つくりあげた条件でシステムを構成し、それによってどのレベルの生物機能が現れるかという十分条件の探求。
- ・ 合成(synthetic)生物学:何か目標を持って、ある性質をデザインするという工学的な志向性。
構成的(constructive)生物学:こちらで条件を作って、そこからどのような生命の論理が引き出されるかを見る発見的志向性。



複雑系脳・神経科学(津田一郎)

- ・ 脳ダイナミクスは非定常、非周期的だが決してランダムではなくカオスの挙動であり、遷移的、臨界的、準定常的性質を有する。
- ・ コミュニケーション神経情報学(単一脳研究からペア脳研究へ)。
- ・ 静的脳観から動的脳観へ。
Japanese Gang of Five
ダイナミックブレインフォーラム(DBF)
Cognitive Neurodynamics 誌

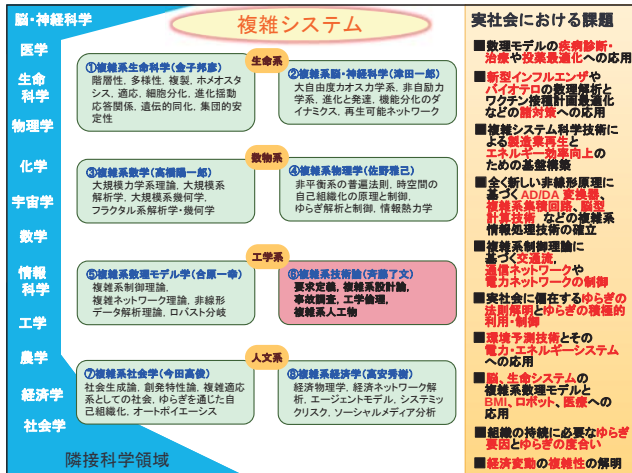


複雑系数学(高橋陽一郎)

- ・ 数学の記述形式: 定式化を与えると同時に解析や解明に向けて自動的に動き出す。(数学の言語と道具の2面性)。

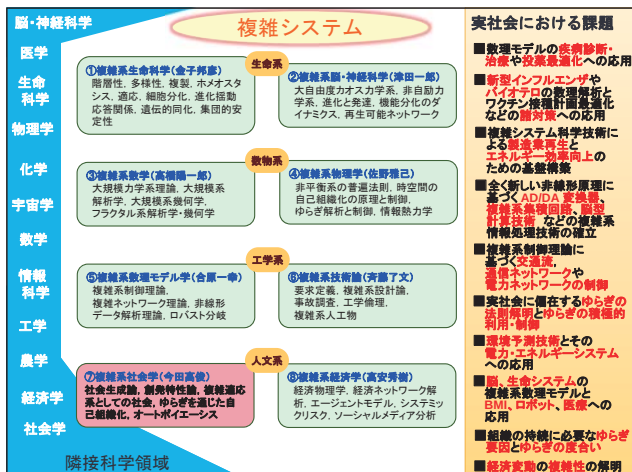
Attractors of Dissipative Dynamical Systems

Attractors	Dynamics	Trajectories in State Space	Time Series	Topological Structure	Dimension	Lyapunov Spectrum	Bifurcation Diagram
Equilibrium Point	Static			Point	0	$\lambda_1 < 0$	
Limit Cycle	Periodic			$\mathbb{R}/\mathbb{Z}$	1	$\lambda_1 = 0$ $\lambda_2 < 0$ (1, 1)	
Torus	Quasi-Periodic			$\mathbb{R}^2/\mathbb{Z}^2$	2	$\lambda_1 = \lambda_2 = 0$ $\lambda_3 < 0$ (1, 1, 1)	
Strange Attractor	Chaotic			Fractal	Real Number	$\lambda_1 > 0$ $\lambda_2 = 0$ $\lambda_3 < 0$ (1, 1, 2)	



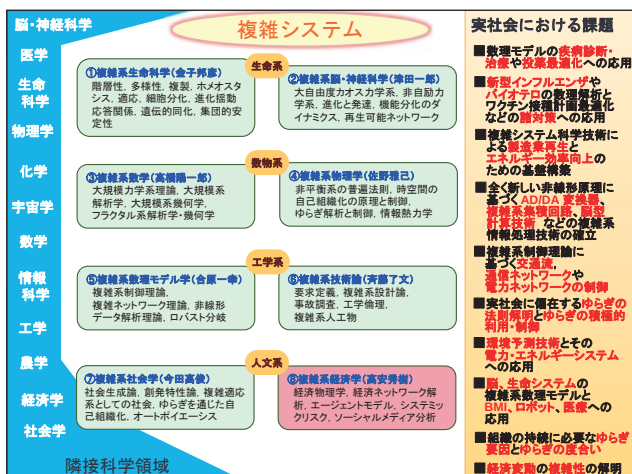
複雑系技術論(齊藤了文)

- 現在のテクノロジーは複雑な現象を扱っている。
- 技術者は、企業という組織の中で人工物を作る。組織との相互作用 → 複雑系。意志を持つ人間を含んだシステム。
- 自動車の乗り心地や振動 → 人工物に関する「創発」。
- 都市やインフラ → 複雑な人工物。時間とともに劣化し、現状が設計時と微妙に変更し、しかもその変更した知識が明示的になっていない。



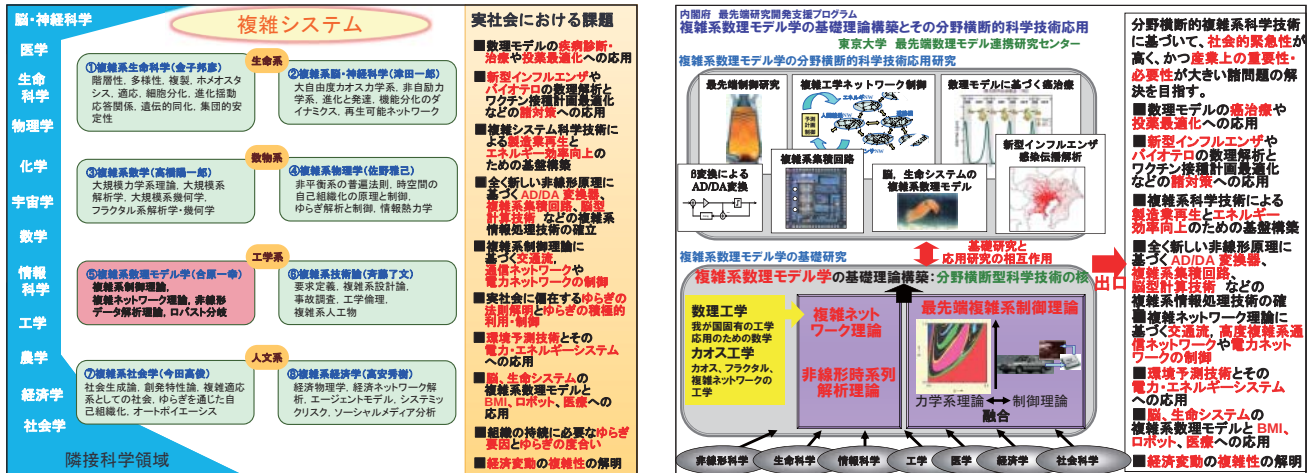
複雑系社会学(今田高俊)

- 社会 → 人々の相互作用により個々人の性質には還元できない創発特性をもたらしシステム。
- オートポイエティック・システム: 要素を生産する要素が円環的なネットワークによって再帰的に自己に関わり、自己を再生産しつつシステムを維持。
- 個人と社会をつなぐミクロ・マクロリンクの問題。
- 民族主義の嵐は冷戦後の国際社会にとって最大のゆらぎ。



複雑系経済学(高安秀樹)

- 自然現象を越えるほどの膨大な社会・経済ビッグデータ → それらの分析による普遍的法則性の確立。
- 観測とシミュレーションによる社会・経済現象の研究。
- 金融工学: 市場価格の変動のランダムウォーク仮説、マンデルブロ: 市場変動はベキ則の裾野を持つ。
- 経済物理学, 社会経済物理学。
- ビッグデータ解析を支えるデータサイエンティスト → OD問題の解決。
- 専門転換のための研究資金。
- 市場変動観測所: 市場変動を客観的に捉え、全地球的な規模での経済変動を丸ごと観測し、分析し、危険な大変動の予兆を検出した場合には注意を促し、金融危機の発生を未然に防ぐ。



3-6. サービスシステム

北陸先端科学技術大学院大学知識科学研究科
教授 小坂 満隆

先進国の GDP の 3 分の 2 以上がサービスであり、製造業もサービスが大事だということを出している。ソリューションとしてサービスを提供しようとする、IT 技術や分野知識、最適化の技術等いろいろなものを統合して、お客にとっての価値創造を行っていかねばならない。そこで、サービスをシステムとして捉えるサービスシステム研究が重要になってくる。

サービスシステムの目的は、価値を最大化することである。サービスシステムの要素として、カスタマーという要素と、サービスプロバイダーという要素がある。サービスシステムとは、その 2 つが共創して価値をつくり出すシステムと捉えることができる。つまり、我々が考えているシステムの枠組みでサービスを捉えることでいいシステムをつくらうとすると、カスタマーとサービスプロバイダーがいかにうまくやり取りをして価値をつくり出すかというプロセスが非常に大事になる。

今回の俯瞰では、新しい応用領域がある。製造業がモノだけではなくてサービスをどうプラスして価値を提供するかという「製造業のサービス化」、地域の高齢化や医療をどうコミュニティとして支えていくかという「コミュニティ・安心社会」、お客と一緒に価値共創をしていくような業務はどうやっていくかという「業務のマネジメント」の 3 つの領域である。この 3 つの領域でサービスシステムを応用できると想定している。

要素技術で最近非常に進んできたのは、顧客のセンシングである。エスノグラフィ、脳計測応用、M2M センシング等のセンシングでデータを集めてきて、それを分析することにより、適切なサービスのタイミングなどを見つけるタイプのセンシングが非常に進んできている。

これからのサービスシステム研究で大事なことは、要素技術のセンシングと、価値共創、設計を併せて、システム研究を行って、応用研究に展開していくことである。価値創造を目的とするシステム技術をしっかりつくっていかなければならない。

また、横断型科学技術は重要である。特に人が動的に関与するので、その辺の新しいシステム技術が期待される。産業論的な面からの期待は非常に大きいものがある。特に製造業でこれからグローバルビジネスを進めていくときのシステム研究的なバックグラウンドが求められていると認識している。サービスを、従来のマーケティングや情報ではなくて、システム科学研究として重点化することが求められていると考えている。

(9 研究開発領域の個別説明：スライドを参照)

< 議論 >

< Q >

- ・サービスシステムの第3世代モデルだが、サービスシステムを実現する上で、一番右側の第3世代だけがあればサービスシステムができるという意味ではなくて、第1世代の上に第2世代のものが乗っかって、さらに第3世代のものが乗っかって、本当の意味でのシステムになっているという認識だと思う。技術としては、第1世代、第2世代、第3世代というのは分かるが、システムとして捉えるときには、むしろどんどん拡張しているというか、上に乗っていくというイメージに表現して、世代というのはどちらを表しているのかを明確に表しているのかを明確にしておいた方がいいという気がした。(鈴木)

< A >

- ・了解。この辺の部分は、最初の入口で書いておけばよいか？(小坂)
- ・そう思う。そうでないと、私が担当のシステム構築方法論とのすみ分けが非常に難しいと思いながら見ていた。(鈴木)

< Q >

- ・小坂先生は最初に「サービスとは受益者とプロバイダーとの」と言われた。このようなフレーズが、ほとんどすべての研究開発領域の原稿の最初に説明されている。1つの原稿を読むのなら、そういうのがあってもよいが、全体を通して読むと「どこでも書いてあるな」と感じる。新しい領域なので、そのように書かなければいけないと思われることはよく分かるが、どこかに1つまとめていただいて、どこかの章で、「ここで言っているとおり」くらいにして単純化してもよいのではないかな。もう一度分科会の集まりを行うという話なのでそこでも議論してほしい。(木村)

< A >

- ・一応、集まろうと思ってはいるが、原稿を見ていると、レベル感が違うので、1人がある程度全体のコンセプトをもって書かないと、原稿としてのまとまりが出てこないのではないかと私は心配している。木村先生が感じていることと全く同じ。(小坂)
- ・これは、サービス区分だけに限らず、全体にある程度言えることなので、その辺はまた最後に申し上げようと思っていた。(木村)

< Q >

- ・10枚目のスライドで、タイトルが「サービスシステム—第3世代のシステム科学」というのがあったが、それで本当によいのか？（原）

< A >

- ・それでよいと思った。（小坂）
- ・全体として、そのような側面があるということはよく分かったが…。（原）
- ・なぜ、名前をそうつけたかということか？（小坂）
- ・はい。（原）
- ・第3世代のシステム科学の1つとしては認めるけれども、第3世代がシステム科学全部だと言われるといかがなものか？（鈴木）
- ・サービスシステムという側面で見たときには非常によく分かって、なるほどと思ったが、全体がシステム科学と言っているときに…。（原）
- ・ここを第3世代と言っていていいかということだが、これを外しておけばよいのか？（小坂）
- ・いや、そうではなくて、これは全体に関わるという印象をもって、まさにそこにある価値創造システムというのは、第3世代のシステム科学だと思った。（原）
- ・前のスライドにサービスプロバイダーとカスタマーとのというのがあったが？（鈴木）
- ・そのような印象。サービスシステムというのは、全部なのか。その辺のスタンスは？（原）
- ・全体の中でということか？（小坂）
- ・はい。（原）
- ・算数をやっている方がシステム科学技術を見るとこうなるということ。（木村）
- ・そこは非常によく分かった。（原）
- ・私はそれでいいような気がする。やはりハードからソフトへというのが、第1世代から第2世代への変化を表すもの、あるいは、ハードからデジタル化と言ってもいい。デジタル化からシステム化というのが、第2世代から第3世代に相当する。モノづくり、コトづくり、システムづくりと、そのような感覚で捉えると、これは自然に見える。（木村）
- ・私もそう思っていて、すごくいいのだが、全体としては、今木村先生が言われたストーリーがあって、それとのマッチングとしてどうかな、と感じるところがある。（原）
- ・今回は全体の第3世代のシステム科学ということで、その中の1つの価値創造パートがここですよという位置づけであるとしたが、もっとはっきりした方がよいということか？（小坂）
- ・その通り。（原）

< Q >

- ・7枚目のスライドだが、もちろんこの全体がサービスシステムである、あるいは、第3世代のシステム科学としては、この全体のカスタマーまで含めたものをシステムと考えるべきだと、人を含めてシステムと考えるべきだとすること。そこはよく分かる。しかし、一番右側のサービスプロバイダーが提供しているもの、これを従来システムとよんでいる場合もある。すると、何かその2つをうまく区別するネーミングがほしい。「今どちらのシステムを指しているのか」ということが、読者が分かるようなネーミングがあると、私が担当しているシステム構築方法論もやりやすい。（鈴木）

< A >

- ・ バーゴという人は、グッズとサービスイズと同じで、提供するだけであつたら s をつけている。つまり、services という複数でカウンタブルにしまっている。すると、提供側からはそのサービスだけだと。しかし、価値を創造するプロセスとしてサービスを捉えて、サービスシステムにすると、つまり、単数で書くと、このような形の構造になる。(小坂)

システム科学研究開発の俯瞰図中間発表(2014. 10. 24)

サービスシステム

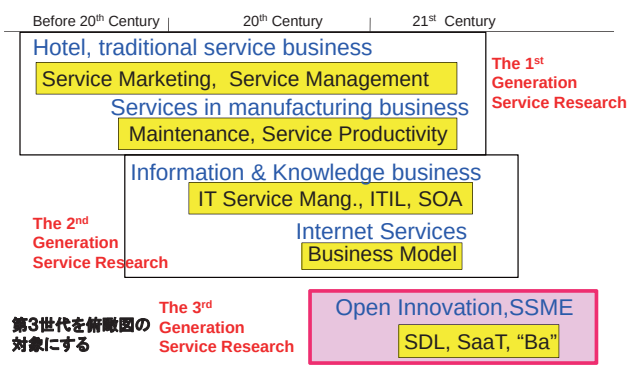
Michitaka Kosaka(kosa@jaist.ac.jp),
Japan Advanced Institute of Science and
Technology(JAIST),

1. サービスシステム研究の重要性

1. 先進国のGDPの3分の2以上がサービスに関連する。サービスの競争力確保のための研究
2. サービスは、マーケティング、IT技術、分野知識(金融、流通、医療、地域他)の統合が必要
Transdiscipline, Multidiscipline, Interdiscipline的なアプローチ システムとして捉える
3. 欧米他、各国で重要プロジェクト
 - ・ SSMEの本流が価値創造システム
 - ・ Future ICT: EU、社会とICTの共生
 - ・ Horizon2020: 技術によるサービスイノベーション
4. 日本としてもサービスシステム研究は重要

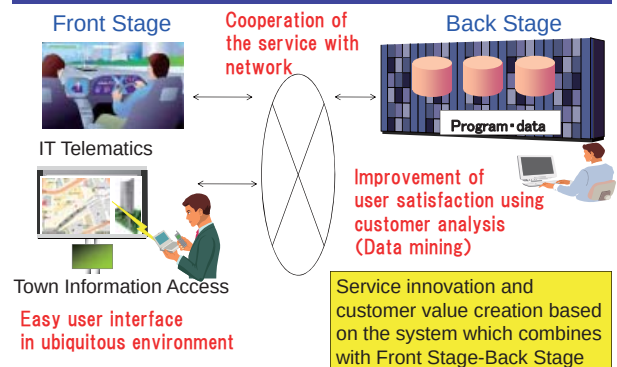
1

2. サービス研究の進展と対象とする第3世代研究



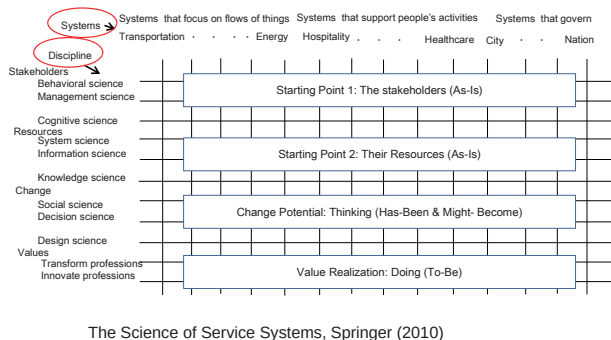
2

3. Significance of IT for Service Innovation



3

4. 米国のサービスシステムの捉え方



5. Service Dominant Logic

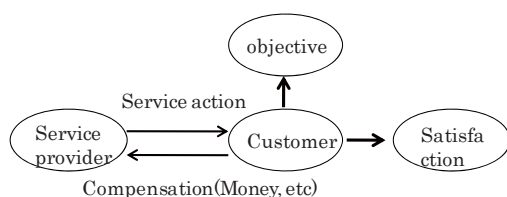
- Our economy is a “service economy”
- From goods dominant logic to service dominant logic

Dominant logic	Goods	Service
Role of customer	The customer is the recipient of goods	The customer is a co producer of service
Determination and meaning of value	Value is determined by the producer	Value is perceived and determined by the consumer on the basis of “value in use”
Interaction	Customers are acted on to create transactions with resources	Customers are active participants...

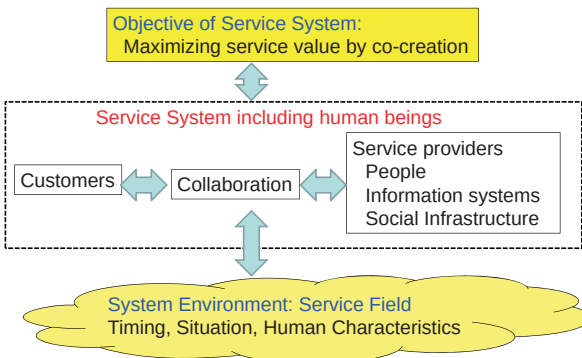
Source: Vargo, S. and Lusch, R., “Evolving to a New Dominant Logic for Marketing,” Journal of Marketing, Vol. 68, No. 1, pp.1-17,2004.

6. サービスの定義

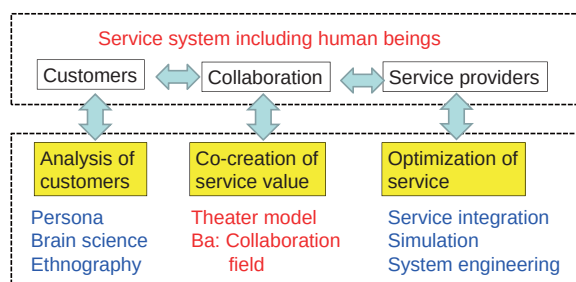
サービスを「人や組織がその目的を達成するために必要な活動を支援するサービス行為を提供し、目的達成によって顧客に価値をもたらし、それによって対価をいただくプロセス」と定義する。



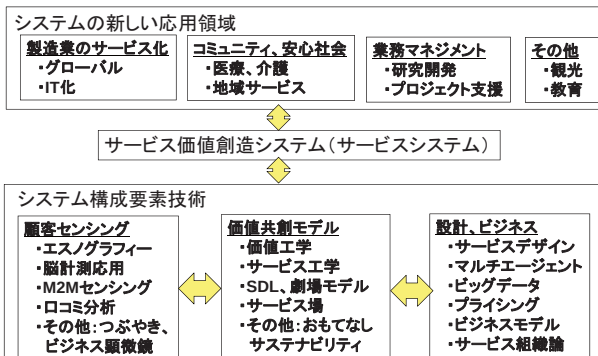
7. サービスシステムの定義



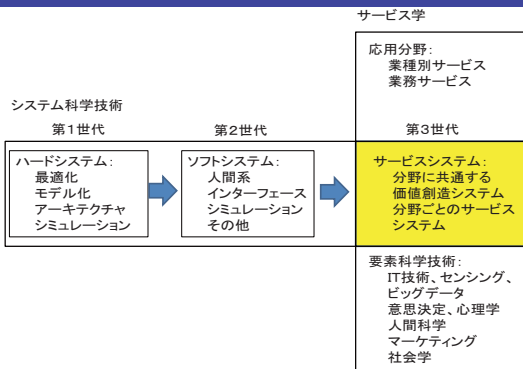
8. Transdisciplinary Technology in Service Science



9. 俯瞰図の概要



10. サービスシステム—第3世代のシステム科学

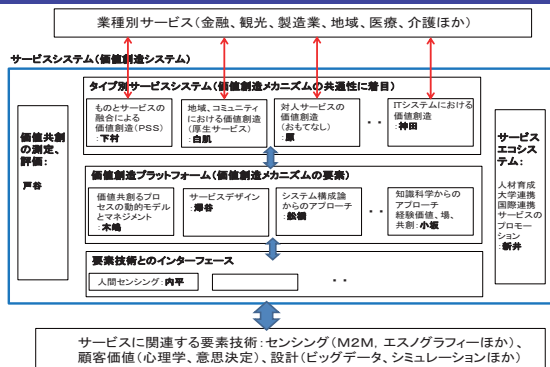


11. システム科学 CRDS サービス科学の担当メンバ

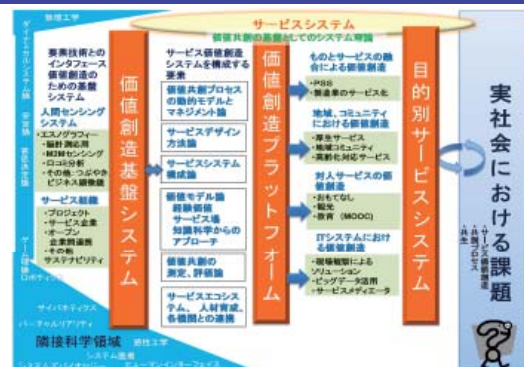
北陸先端科学技術大学院大学 知能科学研究科
 教授 小坂 満隆 (取りまとめ、サービス価値モデル) (主査)
 教授 神田 陽治 (情報産業におけるサービス化)
 教授 内平 直志 (サービス価値創造基盤システム)
 准教授 白肌 邦生 (地域・コミュニティにおける価値創造(厚生システム))
 シニアプロフェッサ 松橋 誠壽 (サービスシステムの参照モデル)

芝浦工業大学 教育イノベーション推進センター
 教授 新井 民夫 (取りまとめ、サービスエコシステム)
 京都大学 経営管理大学院
 教授 原 良憲 (対人サービスの価値創造)
 東京工業大学 社会理工学研究科
 教授 木嶋 恭一 (価値共創プロセスのモデリング)
 首都大学 システムデザイン研究科
 教授 下村 芳樹 (PSS、製品サービスシステム)
 早稲田大学 研究戦略センター
 教授 澤谷 由里子 (サービスデザイン)
 明治大学 グローバル・ビジネス研究科
 教授 戸谷 圭子 (価値共創の測定・評価値)

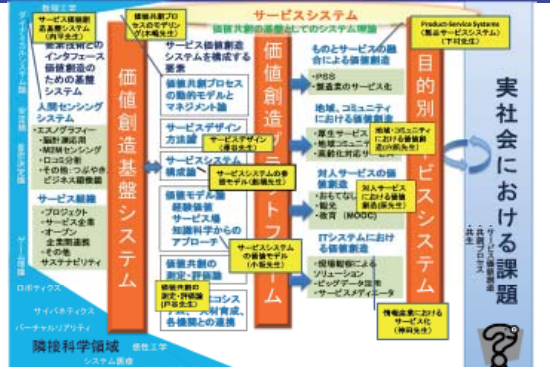
12. サービスシステムの構成



13. JSTにおけるサービスシステム研究俯瞰図



14. JSTにおけるサービスシステム研究俯瞰図



15. PSS、製品サービスシステム：下村 芳樹

【研究開発領域の説明】
 「製造業のサービス化」において、製品とサービスの高度な統合により、製品価値を最大化するビジネスモデルを「製品サービスシステム(PSS: Product-Service Systems)」と呼び、そこでの価値創造に関する研究開発を行う。

【国内外の動向】
 ・欧州は事例分析、事例開発中心の研究開発に主軸を置き、主として旧来型ビジネスからPSS型ビジネスへの移行方法に関する研究を行った。
 ・ドイツではHigh-Tech Strategy 2020 Action Planに基づき国策を推進。モノづくりとITの高度統合による高付加価値達成のための研究開発が一層加速する傾向にある。
 ・英国では、PFIやPartneringなどの実践的な研究開発、北欧圏では、持続可能型消費や環境調和性などの持続可能性に関するキーワード、Function Selling, Integrated Product Service OfferingなどのPSSに関する研究開発が活発に行われている。
 ・北米においてもこれまでのサービスサイエンス系とは視点の異なるサービス関連研究としてPSSに関する研究開発が勃興している。

【科学技術的・政策的課題】
 ・PSS関連の研究を活性化させ、国内の全体的な研究アクティビティを高める必要がある。
 ・国策により、日本製造業が有するPSS化を妨げる障壁を取り払うことを急ぐべきである。

16. 地域・コミュニティにおける価値創造:白肌 邦生

【研究開発領域の説明】

地域・コミュニティにおける価値創造研究は、人間の潜在能力の拡大を含め**生活の質の向上のための価値創造**について、地域や任意のコミュニティに存在する**サービス要素をシステムの視点で理解し、問題状況の改善を目指す研究開発領域**である。

【国内外の動向】

・地域社会をサービスシステムとして構築する試みとして、中森らの、地域社会をサービスシステムとして捉える**地域再生システム論**(現在は**地域活性化システム論**)がある。
・サービスマーケティングの分野では、TSR: Transformative Service Researchがあり、これは、「個人やコミュニティそして生態系に至るまで、消費に関わる実在の**Well-being**に改善や良い変化を形成することに主眼をおく研究」と定義される(Rosenbaum et al.(2011)5)。価値共創のシステムとして**サービス研究の中でシステムの発想で地域の価値創造を考察する取り組み**は始まったばかりであるといえる。

【科学技術的・政策的課題】

・地域・コミュニティにおける価値創造には、多様な市民の価値観を把握・共有したり、価値を共創するために**必要な知識を普及しするための技術開発**が必要である。
・複雑な地域サービスシステムにおける価値創造を考えた場合、市民も自らの価値を形成する主体として存在する。公共政策論の既存の方法論だけでなく、**多主体で構成される、より価値創造・共創志向のシステム方法論の開発**が必要となる。

17. 対人サービスの価値創造:原 良恵

【研究開発領域の説明】

対人サービスは、**人間から人間に対する支援を行うサービス**であり、要望の認識は、動作、振る舞い、会話などのインタラクションにより規定される。ホテル、観光、教育、介護、小売り、飲食などにおける**ホスピタリティ、おもてなしのマネジメント**を含む。

【国内外の動向】

・米国では、産業研究を中心に、**品質、戦略、ICT活用に関する研究**が多い。また、欧州では、経済的統合に起因する環境変化に対応する戦略研究が主流になっている。
・ホスピタリティ研究については、**米国では観光を中心とした産業研究**であるが、**欧州では、当該産業における人的資源管理に注力した研究**がなされている。また、アジアでは、経済発展と共に、香港、台湾で観光サービスを中心に研究がなされている。
・日本は、サービス品質が高いにもかかわらず、おもてなしの事例研究、ロボットへの適用研究等を除いては、まだこれからの段階である。

【科学技術的・政策的課題】

・持続的発展に対する科学技術的課題としては、対人サービスのマネジメントをホスピタリティ産業のマネジメントと狭義に限定して研究を行うのではなく、**広義のサービス概念に立脚した理論的研究**が必要である。
・生産性向上に対する政策的課題としては、提供者、利用者に対する学習が必須であり、**サービス・デザイン力、リテラシー力のある高度人材育成の強化**が必要である。

18. 情報産業におけるサービス化:神田陽治

【研究開発領域の説明】

情報産業は、サービスビジネスへの転換を余儀なくされている。情報産業のサービス化のためには、サービス時代に対応できる**情報産業のためのビジネスモデル**の開発と、それを支える**計測技術や分析技術の開発**が重要となる。

【国内外の動向】

・大きなインパクトを与えたのが、**クラウドコンピューティングの登場**で、サービスビジネスモデルへの転換が余儀なくされる。
・第一の方向は、様々な分野の企業と新たに連携して、**サービスエコシステム**を創り出すことに挑戦することである。第二の方向は、大量に雇い入れている**人材を活かすサービスビジネス**を創り出すことに挑戦することであり、ICTシステムと現場のギャップを埋めることで、**ICTシステムを価値創造システムに進化**させることを手伝うサービスである。

【科学技術的・政策的課題】

・クラウドコンピューティングを利用したサービスビジネスでは、**定量分析が中心**となるだろうし、人材を活用するサービスビジネスでは、**定性分析が中心**となる。
・計測における、**プライバシーの問題**がある。特に企業の現場に計測技術を持ち込んで測定する際には、この問題は重大に見える。この問題の解決が必要である。

19. 価値共創プロセスのモデリング:木嶋 恭一

【研究開発領域の説明】

サービスシステムにおける価値共創プロセスを、**サービスドミナントロジック**の立場から、**顧客とプロバイダ間の相互作用**としてとらえ、その説明・分析のためにプロセスモデルを構築しようとする研究開発領域である。

【国内外の動向】

・ギャップモデルとSERVQUAL モデル:SERVQUAL モデルは、知覚品質における概念形成、計測のための基準、手法を生み出し、80 年代よりサービス品質研究の中心。その根幹をなすギャップモデルではギャップを埋め、顧客の期待を上回るサービスを設定。
・価値共創プロセスの4フェーズモデルとバリエーション:プロバイダ(提供者)と顧客による価値共創プロセスを4つのフェーズにより説明・分析するモデルである。
・PCN解析モデル:顧客と提供者が形成するネットワーク型プロセスとそこでの相互作用を視覚的に表現するPCN Diagramsを用いた解析枠組みである。
・サービスインタラクションのISPARモデル:ISPAR モデルは、価値共創の相互作用のサービスインタラクションのプロセスフローを、規範的なモデルとして樹形図の形で記述。
・Service Systems Modeling:モデリングのためのモデリングのメタモデリング手法。

【科学技術的・政策的課題】

・サービスシステムデザインにおける**Transdisciplineの重要性と有用性**は、研究者、実務家、政策担当者、ファンディング・エージェンシーの共通の理解となっている。

20. サービスデザイン:澤谷 由里子

【研究開発領域の説明】

サービスデザインは、サービスイノベーションのシステムティックな創出を目指し、物理的なモノだけでなく、**サービスインタラクション、サービスシステムをデザイン**の対象とする新しい研究開発領域である。

【国内外の動向】

・デザイン領域では、インターフェースからインタラクションのデザインへと研究領域が拡張されてきた。**Interaction Design**および**User Centered Design, Human Centered Design**では、主に製品の**User Interface**やその使用による**User Experience**を総合的にデザインする。・サービスサイエンス初期の領域が拡張され、Service Science, Management, Engineering, + Design, Art and Public Policy, SSMDAPと広がってきている。Product-Service Systemsをベースに、研究開発対象はサービスシステム、サービスライフサイクルへと拡張されてきている。
・サービスシステムを対象とした研究開発、サービスデザインとマネジメント領域の融合研究開発に注目する。

【科学技術的・政策的課題】

・欧州では、Horizon 2020、米国では、NSFを中心に複雑化するサービスシステムの課題設定を行い、研究開発プログラムの作成に向け動き出した。
・サービスデザイン人材を育て、**人材を活用するエコシステム**を構築する事が望まれる。

21. 価値共創の測定・評価論:戸谷 圭子

【研究開発領域の説明】

経営分野、特にサービス経営分野で急速に鍵概念となりつつある「**共創価値**」に関して、**概念定義の明確化**と、その数量化を可能にする**計量モデル・測定尺度**、および活用方法の研究開発。

【国内外の動向】

・サービスの提供者と被提供者が共に資源を供出し、相互作用において価値を創造する「**共創価値**」の概念は1990年代から提唱されているが、**具体的な測定尺度は開発されていない**。
・S-D Logicは概念的でありマネジリアルな適用が難しいという批判を受けて、より実務適用を意識した研究として、S-D Logicの各主張を企業のケイバリティとして読み替え実務適用に生かす研究が進行している(Karpen.I et al 20)。
・価値共創概念は理論的には確立しつつあるが、**測定・評価モデルは未だ研究途上**。顧客価値、従業員価値、企業価値のそれぞれの主体にとっての価値測定研究として行われているもの、共創においては個々の視点ではなく、**統合的な最適化**が必要。

【科学技術的・政策的課題】

・尺度内容に関しては、感情・感性的な価値やステークホルダーに蓄積される知識・スキルの価値を考慮した測定尺度の開発が必要となる。
・新たなKPIである**共創価値評価**には**国策による大規模プロジェクト**が必要であろう。

22. サービスシステムの参照モデル: 船橋 誠壽

【研究開発領域の説明】

特定の応用によらないサービスシステムの一般的なモデル表現に関する研究分野である。マーケティング、システム技術、情報システム技術など、多様な分野からの議論のためには、対象物に関する共通認識としての参照モデルを持つ必要がある。

【国内外の動向】

- ①概念モデル: サービスシステムの基本的構造、Hill^[1]によるモデル、Grove & Fisk^[2]によるサービス劇場モデル、Tomiyamaのサービスシステム、Service Dominant Logicなど
- ②応用モデル: サービスシステムを具体的に構成する上でのガイドラインともなるべきモデル、システムの静的な要素間関係を表す構造モデルと、システムの要素間の動的な振舞いを表す振舞いモデル
- ③ライフサイクルモデル: サービスシステムのライフサイクルを分析、評価する

【科学技術的・政策的課題】

・多様な研究者が相互に啓発して発展的にサービスシステム分野を展開する上で、サービスシステムのメタ構造を表す参照モデルの研究領域が重要な役割を果たす
・今後、多様な展開が想定されるサービスシステムの標準化のリーダーシップを確保するためにも、格段の注力が望まれる研究領域である。

23. サービス価値モデル: 小坂 満隆

【研究開発領域の説明】

サービスシステムの目的は、顧客にとっての価値創造である。価値をどうモデル化するか、それをサービスシステムにどう応用するかを研究開発する。

【国内外の動向】

- ・価値の捉え方として、Value-in-use, Experience Value, Value-in-Context, などが議論されており、価値の捉え方が、サービス研究に大きな影響を与えてきた。これらは、すべて米国発のコンセプトである
- ・日本では、上田らは、価値を歴史的にサーベイし、サービスの共創に関する3つのクラスを提案し、中島らはサービス実践における価値共創モデルを提案している
- ・価値を提供者と利用者の関係性を場の概念で捉えるサービス場概念の提案とそれに基づくサービス価値プロセスを知識科学のアプローチで行う研究もおこなわれている。

【科学技術的・政策的課題】

・価値は、人間の嗜好や価値基準に依存し、人によって異なることから、これまでシステム系や理系の学問として取り扱ってこなかったが、価値モデルは大きな課題といえる。
・多くの異なる専門分野の研究者、実務者が、サービスの価値を議論する場が重要である。こうした活動を活性化するためサービス学会が設立されたが、政策的にもこうした学会の活性化を支援することが望まれる。

24. サービス価値創造基盤システム: 内平 直志

【研究開発領域の説明】

サービス価値創造を行うための情報・知識処理基盤を「サービス価値創造基盤システム」とする。価値創造基盤システムは、単体としての要素技術でなく、それ自体がシステムを形成しており、サービス価値創造システムのサブシステムと位置づけられる。

【国内外の動向】

- ・物理センサによるサービスセンシング: 様々なセンサを搭載するウェアラブルデバイスの普及およびデータを収集するためのM2Mネットワークインフラ
- ・人間センサによるサービスセンシング: ソーシャル・ネットワーキング・サービス(SNS)
- ・分析: 統計的分析、機械学習、テキストマイニングなどの手法。データが、Volume、Variety、Velocityの軸で“ビッグ”になり、対応する技術開発が進められている。
- ・活用: そのタイミングにより、「実時間活用」と「事後活用」がある。

【科学技術的・政策的課題】

・匿名化などの適切な処理をした上でのオープンデータ化による共有資源としてのデータ活用は、サービスの質と効率の向上には必要である。
・各種サービスセンシングで収集されるビッグデータの処理には、従来のクラウド型のアーキテクチャでは対応できない。これらのエッジ・ヘビー・データを処理するための新しいアーキテクチャが必要である

25. サービスシステム研究の要素技術と応用領域

サービスシステム研究の要素技術

- ・顧客センシング(エスノグラフィ、脳計測、M2M、つぶやきほか)
- ・サービス価値共創(価値工学、サービス工学、SDL、劇場モデル、サービス場、サステナビリティほか)
- ・設計、ビジネス(デザイン、ビジネスモデル、プライシングほか)

サービスシステム研究の応用領域

- | | |
|-----------|----------------------|
| 製造業のサービス化 | ・サービス化組織論 |
| コミュニティ | ・成功事例研究 |
| 業務マネジメント | ・地域コミュニティ |
| その他 | ・医療、介護、研究開発、プロジェクト支援 |
| | ・観光、おもてなし |

26. まとめ

- (1) サービスシステムへの期待
 - ・価値創造を目的とするシステム技術
 - ・多くの関与者、関係技術の統合による価値創造横断型科学技術の重要性
 - ・動的、人が関与、等の新しいシステム技術
- (2) 産業論的な面からの期待
 - ・ICTと地域、社会の新サービス
 - ・グローバル化時代のエコシステム(共創)
- (3) 欧米他、世界で重要視される技術分野
 - ・EUの巨大プロジェクト、Future ICT, Horizon2020
- (4) システム科学研究として重点化する分野

3-7. システム構築方法論

JST-CRDS

フェロー 鈴木 久敏

「システム構築方法論」とは、社会の期待やニーズを捉え、工学的仕様として設計し、実システムとして具現化し、システムが影響するさまざまな利害関係者との関係を調整し、システム機能を社会に提供して、社会的経済的価値を生み出す一連の活動・プロセスとそれを支える科学的な技術の体系をいう。ここで重要なのは、工学的な観点だけでなく、社会科学の観点も入れなければ、システム構築方法論にはならないというスタンスである。

システム構築方法論には、社会的な側面、技術的な側面、マネジメント的な側面がある。社会的側面では、「合意形成」と「応用システム思考」を取り上げた。技術的側面では、「高信頼要求工学」、「システムアシュアランス」、「コンセプトエンジニアリング」、「SoS アーキテクチャ」を取り上げた。マネジメント的側面では、「ライフサイクル・マネジメント」、「プロジェクトマネジメント」、「品質マネジメント」を取り上げた。

「合意形成」とは、実社会に関する課題について人々が有する多様な見解や選好を、相互理解を図りながら共通の理解や解決策につなげる実践的かつ系統的な取組とプロセスに関する理論及び手法をいう。

「応用システム思考」とは、システム概念やシステム・モデルを用いて、組織や集団・社会など多様な意思決定主体を含む複雑な問題状況の改善・解決をするための思考の体系をいう。

「高信頼要求工学」は、非機能要求(システム機能についての特性や制約)を明らかにして、その要求の妥当性を確認する領域である。

「システムアシュアランス」とは、システムの開発者、利用者を含む利害関係者にシステム属性について十分な「確信」を与えることをいう。

「コンセプトエンジニアリング」とは、コンセプトを適切に定義し、それをシステム化に結びつけるため、システムの理想的なあり方を戦略的に表現したもので、新しいシステム価値を具現化するための概念を構築し、体系的に実現して行く技術である。

「SoS アーキテクチャ」とは、実社会の課題を解決に導く複雑な社会技術システムを SoS (System of Systems) として捉え、環境、経済、政策、技術の観点から、さまざまな利害関係者からの要求を満たし、社会的価値を最大化するアーキテクチャと、それを導き出すためのプロセスや技術アプローチをいう。

「ライフサイクル・マネジメント」とは、システムのライフサイクルの各段階においてシステムの実現性を確認し、進捗を管理していくことである。

「プロジェクトマネジメント」とは、未経験な事態を前提に新しいチャレンジが必要とされるプロジェクトを、組織として成功へ導くための一連の科学的方法論のことである。

「品質マネジメント」とは、顧客や社会のニーズを満たすシステム価値の提供と、提供するプロバイダー側で働く人々の満足を通して、プロバイダー側の組織の長期的な成功を目的に、システムの構築・運営に関わるさまざまなプロセスの維持向上、改善、革新を行い、効率的な組織運営を実現する活動のことである。

(9 研究開発領域の個別説明：スライドを参照)

<議論>

(時間の都合上、次の「総合討論」の中で他の内容と合わせて議論を行った。)

俯瞰区分

システム構築方法論

JST-CRDS フェロー 鈴木 久敏

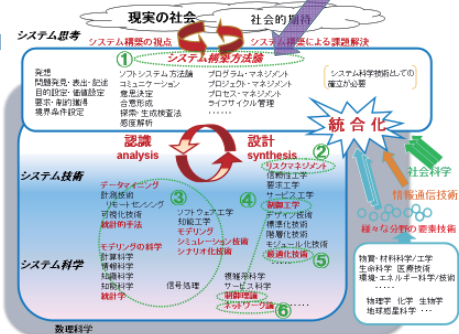
システム構築方法論とは-2013年版-

- 望ましいシステムを構築するために必要な「実社会とシステム科学技術を結ぶ様々な方法論」
- システムの全体を統合的に管理するための方法論（プロセス管理法）やシステム要素の感度解析手法、また、特に人間と社会を対象としたシステムの構築に向けて開発されてきたソフトシステム方法論など
- 日本ではその展開が遅れている分野

システム構築方法論とは-2013年版-

- 「システム構築方法論」は、学問体系としてのシステム科学技術と現実の課題を解決するためのシステム構築をつなぐ方法論、必ずしも確立していない。
- 特に、実社会において対象となるシステムをどのように分析し（認識）、また構成するか（設計）については試行錯誤の状態。
- システム科学技術の発展に貢献するが、一方でその適用がシステム構築の段階やシステム特性などにより異なるため、やや雑多な感が免れない。
- 以下の 3 カテゴリーに大別
 - 実社会とシステム科学技術をつなぐための方法論
 - システム科学技術の方法論として開発されてきたが、未だ方法論としては確立・体系化されていない方法論
 - システム科学技術以外の分野で確立された方法論であり、まだシステム科学技術としての位置づけが明確でない方法論（ゲーム理論や学習など）

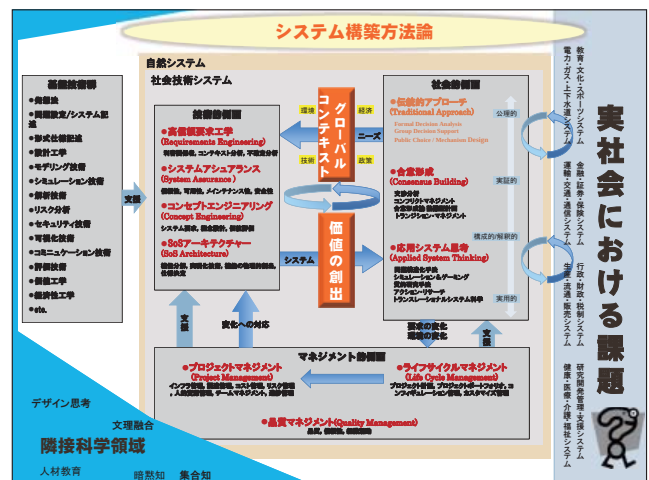
システム科学技術分野の俯瞰区分図(2013年版)

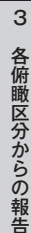


既存のシステム科学として既に体系化されている5俯瞰区分(リスクマネジメント、モデリング、制御、最適化、ネットワーク)を統合し、社会的期待を実現するシステム構築方法論の体系化を、本領域の眼目と位置付ける。

システム構築方法論とは-2015年版-

- 社会の期待やニーズを捉え、工学的仕様として設計し、実システムとして具現化し、システムが影響する様々な利害関係者との関係を調整し、システム機能を社会に提供して、社会的経済的価値を生み出す一連の活動・プロセスとそれを支える科学的な技術の体系
- 工学的観点だけでなく、利害関係者との調整、システムライフサイクルやシステム開発プロセスそれ自身のマネジメントなど、社会科学的な観点も含めた技術の体系





システムアシュランス

- 安全性やディペンダビリティなど、システム属性(attribute)に関する二つの立場
 - 絶対的立場：完全、客観、絶対を求める。
 - 相対的立場：リスク評価やそれに基づく機能安全を求める。
- 絶対的立場は、属性は客観的な法則や事実に基づく評価で、そのように評価されるべきとする。システム属性はYes-Noの二者択一で、判定結果のみが重要
- 相対的立場は、属性の評価方法にも判断基準にも、評価者の主観が入るとの前提。判定結果だけでなく、評価の過程が明示することが重要
- システムアシュランス(System Assurance)は、システムの開発者、利用者を含む利害関係者にシステム属性について十分な「確信」を与えること
 - より強い確信を得るためのアシュランス活動(Assurance Activity)は、全ライフサイクルにわたり検証と妥当性確認(Verification and Validation, V&V)を展開。V&Vのため採用した方法の適切性確認(V&V過程自体の確認)にも及ぶ。
- キーワード
 - システムアシュランス、アシュランス活動、検証、妥当性確認、一般システム理論、観察、アシュランスケース、メタアシュランスケース、形式アシュランスケース、定理証明支援系、確信、モデル検査、model based testing

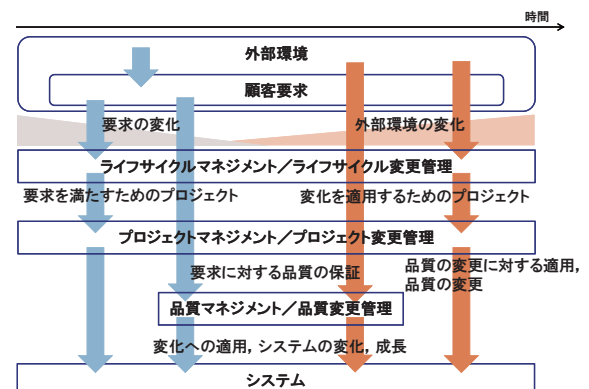
コンセプトエンジニアリング

- コンセプトを適切に定義し、それをシステム化に結びつけるため、システムの理想的なあり方を戦略的に表現したもので、新たなシステム価値を具現するため**概念を構築し、体系的に実現していく技術**
 - ①アイデアの測定、②アイデアに基づくプロトタイプ製作、③実装スペックの確定の3プロセス
- キーワード
 - Concept Engineering, Conceptual Design, Concept Making, Innovation, Idea Creation

SoSアーキテクチャ

- SoS (System of Systems)とは、異質な個々に独立して動作可能な複数のシステムが、ある共通したゴールに向けて共にネットワークされている大規模な統合されたもの
- 実社会の課題を解決に導く複雑な社会技術システム(製品やサービス)をSoSとして捉え、環境、経済、政策、技術の観点から、様々な利害関係者からの要求を満たし、**社会的価値を最大化するアーキテクチャ**と、それを導き出す**プロセスや技術的アプローチ**
- キーワード
 - System of Systems, アーキテクチャ、システムズエンジニアリング、社会技術システム、CPS(Cyber Physical System)、システムライフサイクル、System of interest、システム設計、システム開発、モデルベースシステムズエンジニアリング、コンテキスト分析、システム解析

マネジメント的側面の研究開発領域



マネジメント的側面を考慮する際の前提(1)

- 社会環境、経済環境、技術など、システムの外部環境は変化する。
- 外部環境の変化に応じて、顧客や社会のシステムに対する要求も変化する。
- 良いシステムは、それ自体を変更し、成長させ、変化に対して適応できるシステムである。

マネジメント的側面を考慮する際の前提(2)

- システム構築は計画段階と運用(オペレーション)段階に大別
 - 計画段階では、システムに対して要求される機能を満足するシステムアーキテクチャを計画
 - 運用段階では、様々な変化する環境において、常に要求を満足する機能を実現
- マネジメント的側面では、計画段階と運用段階におけるプロセスに着目し、システムを実現する技術と支援方法を整理
 - 大規模に激変する社会における社会技術システムは、外部環境の変化を深く考慮したシステムの計画、運用が重要な課題
 - System of Systemsの時代では、多様なシステムが複雑に関連し合うので、変化に対する適応性が必須
 - 顧客・社会の要求、外部環境などの変化に対する対応を広義の変更管理(Change Management)として捉え、システムの適応性を実現する方法論を整理

ライフサイクル・マネジメント

- システムを実現する際の設計、構築、廃棄といった複数段階をライフサイクルといい、各段階において**システムの実現性を確認し、進捗を管理**すること
 - ①システムライフサイクルの実現性を測るライフサイクル特性を最大化するマネジメント、②ライフサイクルの各段階の進め方、③各段階でタスクを進める適切な順序(プロセス)など
- キーワード
 - ライフサイクルプロセス、ライフサイクルモデル、イリティ、レジリエンス、DSM(Design Structure Matrix)、MDM(Multi Domain Matrix)、エンジニアリングシステム、プロジェクト計画、プロジェクト・ポートフォリオ、コンフィギュレーション管理、カスタマイズ管理

プロジェクトマネジメント

- 未経験な事態を前提に新しいチャレンジが必要とされる**プロジェクトを、組織として成功へ導く**ための一連の科学的方法論
 - 価値創造を担うシステム構築は、絶えず新しい作業へのチャレンジを必要とし、プロジェクトとして取り組まれる。
 - プロジェクトは必ず新しい何かを含むため、過去に成功した方法が必ず成功を保証しない。
- キーワード
 - 不確実性のマネジメント、ソーシャル・プロジェクトマネジメント、パーソナル・プロジェクトマネジメント、アジャイル・プロジェクトマネジメント

品質マネジメント

- 顧客や社会のニーズを満たすシステム価値の提供と働く人々の満足を通じた**組織の長期的な成功**を目的に、システムの構築・運営に関わる様々な**プロセス**(インプットをアウトプットに変換する活動)の**維持向上、改善、革新**を組織の全部門・全階層の参加を得て科学的手法を駆使して行い、外部および内部の環境変化に適した効果的かつ効率的な組織運営を実現する活動
 - システムの構築・運営は、多くの人が働く組織によって行われるため、組織が適切にマネジメントされていないと、どんなに優れた技術を用いても期待する成果は得られない。
 - 品質とは、顧客および社会の明示的、暗黙的、ないし潜在的なニーズをシステムが満たす程度であり、高性能、高機能、高信頼性だけを意味しない。
- キーワード
 - 顧客ニーズ、プロセス、PDCAサイクル、未然防止、全員参加、方針管理、小集団(チーム)改善活動、品質保証、品質賞、マネジメントシステム認証

4. 総合討論

< Q >

- ・小坂先生の発表で、正直言って違和感があったのが、第1世代、第2世代、第3世代と書いてあって、第1世代に最適化が入っていたから不満があるというわけではないが、それが世代なのと言われると違和感がある。その部分ですらまだうまく行っていないところがある。要するに、世代の意味としては、昔あった困難を乗り越えて新しくなって、そのような進歩が第2世代につながり、第3世代というのは、それまでのことを完全に含んでいるというのが、イノベーティブな感じがする。では、最適化の問題は、サービス科学の中でもう解決しているのか？ということ。最適化のことばかりではなくて、あそこを書いてあることが全部解決しているのかといえば、そんなことは全くない。したがって、その辺の世代という捉え方に違和感がある。それはどう考えるか？（土谷）

< A >

- ・書き方が悪かったかもしれない。最初のベースができたものは、ずっと続いているというご指摘だと理解した。そうすると、マーケティングで、サービスができたのではあるが、それはITが出てきたから終わっているわけではなくて、ベースとして続いているということになる。その場合、階段をつくっておいた方がいいかもしれない。2枚目のスライドにあるように、サービスから見ると、マーケティングの分野は80年代ぐらいにできたのだが、それは今でもずっと続いている。しかも、強く続いている。そして、ITが出てきても、IT系のサービスはいまだずっと続いている。同じように強く。しかし、その2つで足りない部分が下で出てきて、それが新たにシステムの側面でサービスを捉えなければいけないというもの。システム科学も全く同じだと思う。（小坂）
- ・その意味では、技術なり、考え方が生まれたときを…。（鈴木）
- ・そう。したがって、「世代」という言葉遣いが悪いのかもしれない。（小坂）
- ・趣旨はよく分かった。（土谷）
- ・同様に、これも21世紀の後ろまで今後も続くという形で表現していただけると、きつと納得いただけるのではないかと。（鈴木）
- ・横軸で、それぞれのレイヤーでイノベーションが起これ続けているという理解でよいのか？（土谷）
- ・その通り。逆に言えば、例えば、ITで出てきた問題を、上のORで解いていくとか、上で解けなかった、例えば、予約システムなどは、ITを使うことによって結構スムーズにできるとか、そのようなものがそれぞれの領域でインタラクティブに問題を解決しているという側面があると思う。（小坂）
- ・よく分かった。（土谷）
- ・「世代」を使うとよくないのかもしれないが、一般用語として「世代」という概念も変わってきた感じがするので使っている。言葉遣いについては全体で統一したい。（小坂）
- ・技術の意味での、生まれた世代というイメージと理解した。（鈴木）

< Q >

- ・最後に鈴木先生が発表されたシステム構築方法論だが、とても期待している。2013年版俯瞰報告書の俯瞰図にもシステム構築方法論というものの確立が必要という事項があ

る。私は、これはやはり科学技術になるべきなのではないかと思う。システム構築学のような形になるのではないかという気がする。CRDS は、これを方法論として別個に切り出して議論していくという考えなのか？それとも、モデリングや何々マネジメントという形で、一つの科学技術の体系として、将来、下の方に入れていくものとして考えるべきものなのか？その辺の考えを聞かせていただきたい。（倉橋）

< A >

- ・「下の方」というのは、2013 年版俯瞰報告書における俯瞰図の下の方ということか。（鈴木）
- ・そう。その下の部分に入っていくものなのか、それともあくまでも上の部分に置いておく方法論なのか。上の方というのは、科学でも技術でもないのだという形で置いておくのかという意味で言っている。（倉橋）
- ・2013 年版の俯瞰図をつくったときには私はいなかったが、私の感覚では、下の方のシステム技術の中に入っていくものだと思う。（鈴木）
- ・鈴木先生の説明でいいと思うが、よく聞かれるのは、システム科学技術の本質はどこにあるのかということ。何がキーテクノロジーかと。例えば、下の方にある制御やモデリング、最適化を指して「これがありますよ」と言っても、やはりそれだけでは不満が残ってしまう。それは、確かにシステム構築に使われるけれども、単にツールにすぎないのではないかと。要素的な技術ではないかと。「本当にシステムをつくときの困難さというのは、制御やモデリングを使っても解消されないのではないか」という感じの質問をよく受ける。それがどのような形の学問になっているのかと。（木村）
- ・私はシステム構築の本当の難しさというのは、学問に最終的にならないと感じている。ただし、少しずつ進歩しながら出来上がったものは、下の方の「領域」に降りていくと思う。どんどん具体化されて、例えば制御のように。例えば、データマイニングというのは、2 年ぐらい前は、「あれが学問か」ということだったが、もうあれは下に降りていい領域になったと思う。そのように、段々困難を乗り越えつつ、領域化、ディシプリン化していく媒介になるのがシステム構築方法論だという感じがしている。そのため、あのような形で上の方に置いておいた。先ほどの鈴木先生的話でも分かるように、現状でもまだ曖昧模糊としている。聞く人によっては、薄っぺらな感じで、「これは一体何をやっているんだ」と思うかもしれない。その辺はいつも鈴木先生とけんかのような形で議論している。私はいろいろな意味で不十分で、あのままでは出せないと思っているのだが、ある種の宿命だと感じている。システムをつくときの要素をいろいろ組み合わせるときの難しさから考えると、現状では基本的にまだアーツ。アーツを乗り越えながら学問をつくっていくプロセスとして、システム構築方法論を捉えたい。これは私の個人的な意見だが、ユニットでも大体そのような合意ができていると思う。このような説明でよろしいか？（木村）
- ・よく分かった。（倉橋）
- ・6 枚目にあるシステム構築方法論の俯瞰図で、私は、既に技術として確立しているものは左側に置いて、今回は、それらをシステム構築方法論の研究開発領域の中に入れない形で議論を進めている。一方で、一番右側の社会的側面のところで書いたものは、どう見ても今までは技術だとあまり思われていない部分である。しかし、このようなものも入れていかないと、実際にはシステムをつくれないので、そこまで含めて、システム構築方法論という形でまず俯瞰をしていくことが必要だろうと考えた。それらがさらに

進歩して、今、木村先生が言ったように、システム技術のレベルに落ちていけばいいのだと思っている。逆にそうするための第一歩が現在の俯瞰なのだとということ。(鈴木)

< Q >

- ・今日、半日聞かせていただいて、今ふと思ったのは、特別、鈴木先生のスライドというわけではないけれども、必ずしもイクスプリシトには人間、ヒューマンとのインタラクションは、どの俯瞰区分の報告においても含まれていなかった。他の関連分野が、最近どんどんヒューマンとのインタラクションを研究テーマにしていく中では、システム科学はとても特徴的だと思った。それがイル・コンディションな問題過ぎて、そのようなキーワードをあまり取り上げないという感じなのか？(藤田)

< A >

- ・どうしてそう取られてしまったのかと思っている。小坂先生の話も、私の話も、人間を入れた形、あるいは社会を入れた形、さまざまなステークホルダーを入れた形で捉えていかなければいけない、というつもりで話しているのだが。(鈴木)
- ・その気持ちはよく分かるが、イクスプリシトには、人間、ヒューマンというキーワードはほとんど出てきていなくて、いずれも社会やサービスというある種トラクタブルな形の表現で、大学の先生や企業の管理職の方が考える切り口のような印象を受けた。コンピュータやロボティクスの人たちは、ずっと前からヒューマンインタラクションを非常に強く言っているので、今ふとコントラストを感じた。例えば、EMS も究極は人間がどうするかというところに、どんどん問題が行ってしまうので、物理法則で書けるところや、マーケットの最適性の原理で書けるところは、それなりに進められるが、最後、需要家がどう動くかは究極の問題になったりするので、こんな質問をさせていただいた。(藤田)
- ・私たちは、ヒューマンと言わないで、顧客という言葉をつい使う。ただし、必ずしも営利企業だけを前提にしているわけではない。顧客と言ったときに、必ずしも「モノを買ってくれる人だけ」あるいは「サービスを買ってくれる人だけ」というわけではないという立場で議論をしている。(鈴木)
- ・今回新たに作成中のシステム科学技術分野全体の俯瞰図を見れば、少しは藤田先生も納得いただけるのではないと思う。我々は正面から価値というのを取り上げている。それはまさに人間的なもので、他の分野とは少し違う。この真ん中の緑のところがそうだ。価値認識、実はこれは価値選択にすべきだという意見が午前中の議論であった。価値を取り上げているということは、人間を取り上げていることに相当する。確かに人間情報処理とかヒューマンインターフェイスという言葉は、我々はあまり使っていないが、あの中に我々の考えがある。しかし、確かに人間、ヒューマンといった言葉をもう少し使ってもいいような気がする。ご指摘、感謝する。(木村)

< Q >

- ・全体的な感じだが、我々がシステムあるいは社会システムの構築と言ったときは、それは最初から設計してうまく行くとは思っていない。やはりシステムは社会のいろいろなものとインタラクションしながら成長していく、とインプリシトに思っている。そのところをもう少し何かで表現できればよいのではないか？(原)

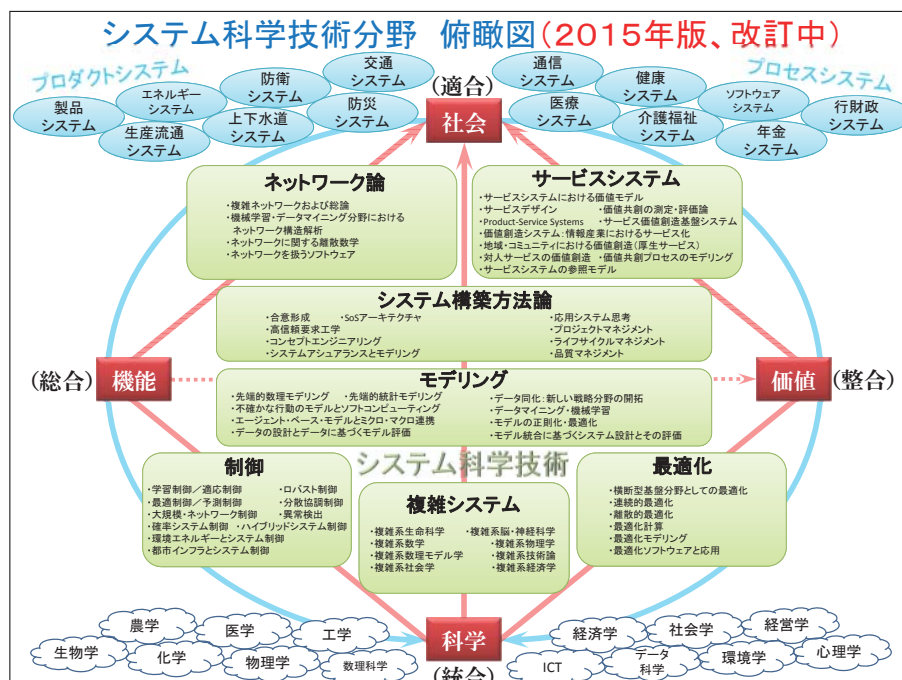
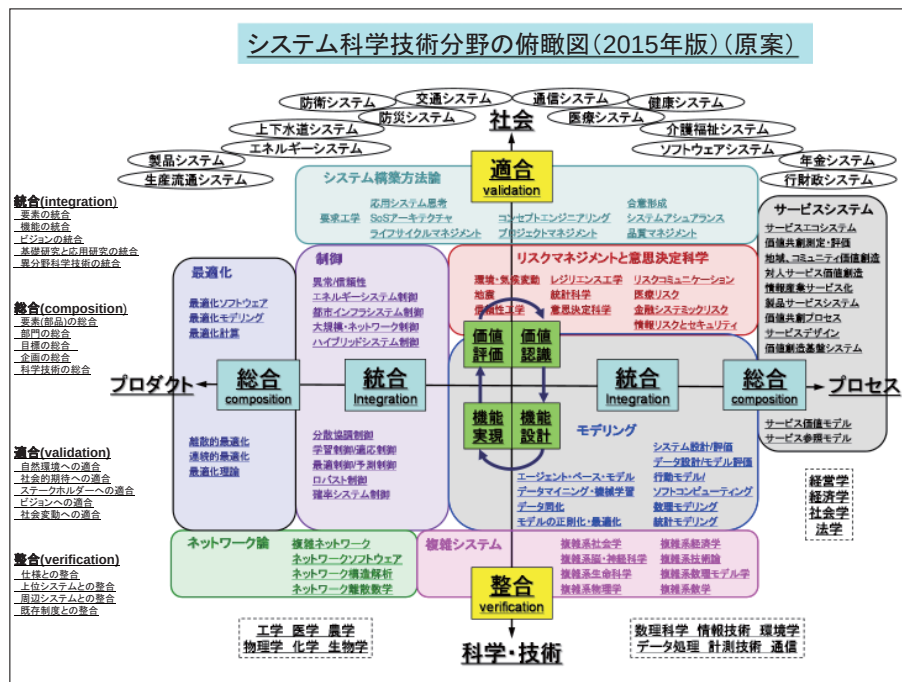
< A >

- ・このループにその気持ちを込めている。(鈴木)
- ・それもあるが、いろいろなところでもう少し、まさにシステムとして考えて、メンテナンスではなくて、何か他にいい言葉が欲しい。まさに適合していくというのは、最初から適合しているわけではなくて、「そのようなものをつくりましょう」という発想ではないはず。段々いろいろなことをやりながら、社会になじんでいって、「最終的に適合します」というイメージの言葉を私自身もずっと探している。(原)
- ・スパイラルのような感じか？(小坂)
- ・はい、スパイラルになっていってという、そこのイメージが、ある意味でシステム科学というか、我々が目指しているところの一つの大きな特徴で、何かうまく出せるとよい。(原)
- ・各俯瞰区分の中で、それぞれのところで、そのようなことを強調していくのが1つの重要な問題。椿先生のモデリング区分の俯瞰図でも、実はそうになっていたのではないかな。今回はこの右側のところだけという感じで、全体としてはスパイラルのイメージは入っているのか？(鈴木)
- ・そのつもりではいる。最後の鈴木先生のシステム構築方法論は、本当はいろいろな分野に降りていると言っていると思う。特にアーキテクチャの話があったが、システムには価値がある以上、ミッションがあって、それを取り巻く自然環境があると同時に、さらに、その周りに人間がいてステークホルダーがいる。そうした中で、アーキテクチャに何が書かれているかというのは非常に重要。例えばアーキテクチャの要素がモデルに、一つの記述要素がモデルになっているという感覚。(椿)
- ・アーキテクチャも一つのモデルではあるが。(鈴木)
- ・そうだが、むしろメタモデルと言うべきもの。それが我々のようなモデリングの要素のところまで降りてくると、全体が非常に明確になる。私は、アーキテクチャ論は、設計的方法の中では非常に重要なものだと思う。普段はあまり意識していないが。それに、アーキテクチャがあると、要求やコンセプトという話が本来はスタートポイントとして出てくる。(椿)
- ・ここでは要求に合わせてアーキテクチャをつくって、その要求を実現する…。(鈴木)
- ・そう。つまり、ミッションが定義され、価値が定義され、要求が定義されて、ということ。(椿)
- ・私は予定しない部分も含めてアーキテクチャと言わなければいけないと思っている。リクワイアメントに従ってアーキテクチャはできてくるのだが、そこでできた空間そのものもアーキテクチャに含まれるということになる。すると、空間そのものは我々がデザインしたものではないけれども、その空間の意味づけが変わってきて、システムのスパイラルが決まっていくという理解。その典型的な例がインターネット。それこそ、システムとしては非常に単純だったが、アーキテクチャとして非常に豊かなものになってきた。その辺がアーキテクチャという言葉の重要なところではないか。(寺野)
- ・長いこといろいろご議論いただいたことに感謝したい。本日のコメントを踏まえて、それぞれの俯瞰区分で修正を進めていって、報告書という形にまとめたい。(鈴木)

付録. ワークショップ後の検討状況

JST-CRDS システム科学ユニット

ワークショップ（午前の部）で議論になったシステム科学技術分野俯瞰図について、ワークショップ終了後、大幅な改訂を行ってきている。参考までに、原案と現在までの改訂案を以下に示す。



■報告書作成メンバー■

木村 英紀	上席フェロー	(システム科学ユニット)
シン ジャワ	フェロー	(システム科学ユニット)
鈴木 久敏	フェロー	(システム科学ユニット)
富川 弓子	フェロー	(システム科学ユニット)
長須賀 弘文	フェロー	(システム科学ユニット)
藤井 新一郎	フェロー	(システム科学ユニット)

※お問い合わせ等は下記ユニットまでお願いします。

CRDS-FY2014-WR-14

ワークショップ報告書

2014年度システム科学技術分野 俯瞰ワークショップ報告書

平成 27 年 2 月 February 2015

独立行政法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター システム科学ユニット
Systems Science Unit
Center for Research and Development Strategy (CRDS)
Japan Science and Technology Agency (JST)

〒 102-0076 東京都千代田区五番町 7 番地 K's 五番町 10F
電 話 03-5214-7481
ファックス 03-5214-7385
<http://www.jst.go.jp/crds/>
© 2015 JST/CRDS

許可無く複写／複製することを禁じます。

引用を行う際は、必ず出典を記述願います。

No part of this publication may be reproduced, copied, transmitted or translated without written permission.

Application should be sent to crds@jst.go.jp. Any quotations must be appropriately acknowledged.

ISBN 978-4-88890-425-4

