

(案)

提言

科学的発見に資する可視化に向けて



平成 29 年（2017 年）〇月〇日

日 本 学 術 会 議

総合工学委員会・機械工学委員会合同

計算科学シミュレーションと工学設計分科会

この提言は、日本学術会議総合工学委員会・機械工学委員会合同 計算科学シミュレーションと工学設計分科会 ポストペタスケール高性能計算に資する可視化処理小委員会での審議結果を踏まえ、総合工学委員会・機械工学委員会合同計算科学シミュレーションと工学設計分科会において取りまとめ公表するものである。

日本学術会議総合工学委員会・機械工学委員会合同
計算科学シミュレーションと工学設計分科会

委員長	吉村 忍（連携会員）	東京大学大学院工学系研究科副研究科長、システム創成学専攻教授
副委員長	萩原 一郎（連携会員）	明治大学研究知財戦略機構特任教授、先端数理科学インスティテュート所長、東京工業大学名誉教授
幹事	金田千穂子（連携会員）	富士通研究所特任研究員、大阪大学特任教授
幹事	越塚 誠一（連携会員）	東京大学人工物工学研究センターセンター長、大学院工学系研究科システム創成学専攻教授
	高橋 桂子（第三部会員）	独立行政法人海洋研究開発機構地球情報基盤センターセンター長
	藤井 孝蔵（第三部会員）	東京理科大学工学部情報工学科教授
	大倉 典子（第三部会員）	芝浦工業大学工学部教授
	大島 まり（連携会員）	東京大学大学院情報学環、生産技術研究所教授
	大富 浩一（連携会員）	東京大学大学院工学系研究科特任研究員
	加藤 千幸（連携会員）	東京大学生産技術研究所教授
	金子 成彦（連携会員）	東京大学大学院工学系研究科教授
	岸本喜久雄（連携会員）	東京工業大学環境・社会理工学院長、教授
	北村 隆行（連携会員）	京都大学大学院工学研究科研究科長、教授
	木村 文彦（連携会員）	法政大学理工学部教授、東京大学名誉教授
	久保 司郎（連携会員）	摂南大学理工学部教授、大阪大学名誉教授
	小机わかえ（連携会員）	神奈川工科大学工学部教授
	小山田耕二（連携会員）	京都大学学術情報メディアセンター教授
	杉原 正顕（連携会員）	青山学院大学理工学部教授
	中尾 充宏（連携会員）	(独)佐世保工業高等専門学校校長、九州大学名誉教授
	橋口 公一（連携会員）	エムエスシーソフトウェア株式会社技術顧問、九州大学名誉教授

宮内 敏雄（連携会員）	明治大学研究・知財戦略機構特任教授、東京工業大学名誉教授
宮崎 則幸（連携会員）	京都大学・九州大学名誉教授
矢川 元基（連携会員）	公益財団法人原子力安全研究協会会長、東京大学・東洋大学名誉教授
山崎 光悦（連携会員）	金沢大学学長

総合工学委員会・機械工学委員会合同計算科学シミュレーションと
工学設計分科会ポストペタスケール高性能計算に資する可視化処理小委員会

委員長	小山田 耕二（連携会員）	京都大学学術情報メディアセンター教授
副委員長	萩原 一郎（連携会員）	明治大学研究・知財戦略機構特任教授、先端数理科学インスティテュート所長、東京工業大学名誉教授
幹事	竹島 由里子	東京工科大学メディア学部准教授
幹事	渡邊 正宏	富士通株式会社ヘルスケアシステム事業本部研究開発統括部生体シミュレーション開発室室長
	高橋 桂子（第三部会員）	独立行政法人海洋研究開発機構地球情報基盤センターセンター長
	行場 次朗（連携会員）	東北大学文学部文学研究科教授
	越塚 誠一（連携会員）	東京大学人工物工学研究センターセンター長、大学院工学系研究科システム創成学専攻教授
	下條 真司（連携会員）	大阪大学サイバーメディアセンター教授
	田中 克己（連携会員）	京都大学大学院情報学研究科教授
	岡本 孝司	東京大学大学院工学系研究科原子力専攻教授
	小木 哲朗	慶應義塾大学大学院システムデザインマネジメント研究科教授
	小野 謙二	九州大学情報基盤研究開発センター教授
	斎藤 誠一	北海道大学大北極域研究センター教授
	檜山 和男	中央大学理工学部土木工学科教授
	田中 覚	立命館大学情報理工学部メディア情報学科教授
	田村 善昭	東洋大学総合情報学部教授
	土井 章男	岩手県立大学大学院ソフトウェア情報学研究科教授
	中島 憲宏	独立行政法人日本原子力研究開発機構システ

藤代 一成
宮地 英男
美馬 秀樹

ム計算科学センター次長
慶應義塾大学理工学研究科教授
東京都市大学メディア情報学部教授
東京大学総合教育研究センター准教授

本提言の作成にあたり、以下の方に御協力いただいた。

西田 豊明（連携会員） 京都大学大学院情報学研究科教授

本提言の作成にあたり、以下の職員が事務を担当した。

事務	盛田 謙二	参事官（審議第二担当）（平成 27 年 8 月まで）
	石井 康彦	参事官（審議第二担当）（平成 27 年 8 月から）
	松宮 志麻	参事官（審議第二担当）付参事官補佐
	柳原 情子	参事官（審議第二担当）付審議専門職

要 旨

1 作成の背景

オープンデータ時代において、データマイニング、データアナリティックス、深層学習などを活用できるデータサイエンティストの育成が急務となっている。また、人工知能時代の到来により、人間の果たす役割が問われている。データサイエンティストの育成において、重要な基盤は科学的方法である。しかしながら、現状のデータサイエンティスト育成プログラムには、科学的方法の習得がほとんど盛り込まれていない。人工知能時代に、人間が科学的方法を適切に活用して科学的知見を創出するために可視化はどうあるべきかを考えるために本提言を作成した。

2 現状及び問題点

可視化は、見えないものを見えるようにする手法であると定義されている。また、多くの定義では、データは、何かを符号化したもので、また、情報は、データであって、人間が認識したものを指す。人間の認識には、脳へのデータ入力が必要であり、脳とのデータチャンネルが最も大きな視覚を利用して、データの情報化を実現するのがデータ可視化である。この可視化が、現時点で、多くの科学研究領域において、有用なツールであることには異論を持たれることはない。しかしながら、ポスト「京」などの関連研究プロジェクト (<http://www.jst.go.jp/keytech/kouboh26-5.html>) において、残念ながら、可視化技術に関する重点課題は見当たらない。

ここでは、人間が人工知能とともに科学的知見を創出するために可視化が果たすべき役割について、科学的方法と人工知能に関係づけて、問題点を検討した。ここで、科学的方法とは、観察・問題設定・仮説構築・検証・適用の局面から構成される。残念ながら、可視化は、現在、この科学的方法と人工知能に向き合って開発がすすめられているとはいえない。具体的には、以下の問題点が確認された。

- 1) 観察・問題設定の段階において、超大規模なデータを如何に俯瞰させることができるか？
- 2) 仮説構築・検証の段階において、潜在因子を如何に探索させることができるか？
- 3) 適用の段階において、検証された仮説を、関係者の視点に立ってわかりやすく（共感的に）説明させることができるか？
- 4) 複雑で暗黙的な人工知能の理解可能性を如何に高めることができるか？

3 提言の内容

上述した問題を解決するために以下を提言する。

(1) 明確な国家的政策立案と施策

- 1) 国は、オープン科学時代に、人間が人工知能とともに科学的知見を創出する基盤の大きな柱は、可視化技術であるという認識に立って政策を立案するべきである。
- 2) スパコンや大型実験施設など大規模データを生成する装置開発に関する研究プロ

ジェクトでは、評価指標として、計算速度や実験的発見の他に、人間の脳に届くまでの時間や重要特徴に気付くまでの時間も考慮に入れ、この指標を向上させるために一定比率で可視化技術研究開発経費を計上するべきである。

- 3) 科学的方法における観察や問題設定の段階では、超大規模データ向け俯瞰的可視化技術の研究開発が不可欠である。
- 4) 国は、政策意思決定における科学的手法の活用において、膨大なデータからエビデンスを発見するための有用性に鑑み、可視化技術の利活用に積極的に取り組むべきである。

(2) 長期的研究体制と研究コミュニティの構築

- 1) 人工知能における推論（＋学習）メカニズムの適切な可視化技術の研究開発に興味を持つ、個人や組織の属する領域を超えた有機的な連携をする研究コミュニティを形成し、長期的な研究体制を構築すべきである。
 - 2) 革新的ハイパフォーマンズ・コンピューティング・インフラ（HPCI）においては、永続的かつ学際的な可視化技術研究開発組織を構築すべきである。
- ## (3) 人材育成に関して
- 1) 国民すべてにおいて、可視化技術を使って、科学的方法を義務教育の早い段階で習得させるべきである。
 - 2) データサイエンティスト育成においては、科学的方法の習得レベルの確認とそれに応じて、可視化技術の利活用を前提とする必修カリキュラムをデザインすべきである。

目 次

1	はじめに.....	1
2	可視化とは何か？.....	2
	(1) 現象のデータ化	3
	(2) データの画像化	4
	(3) 人間による画像の認識	6
	(4) 可視化研究コミュニティ	9
	① 海外の可視化研究コミュニティ.....	9
	② 日本の可視化研究コミュニティ.....	10
	(5) いまなぜ可視化技術を議論するのか.....	11
3	可視化の役割と現状および重要課題.....	13
	(1) 科学と可視化	13
	① 俯瞰的可視化.....	14
	② 対話的可視化.....	14
	③ 共感的可視化.....	15
	(2) 人工知能と可視化	16
	① 倫理的法的社会的問題.....	17
	② 人工知能との共存.....	17
	③ 人間の知能増幅の可能性.....	18
4	提言.....	19
	(1) 明確な国家的政策立案と施策	19
	(2) 長期的研究体制と研究コミュニティの構築.....	19
	(3) 人材育成に関して	19
	参考文献.....	21
	<参考資料 1> 審議経過.....	22

1 はじめに

世界中の公的・科学的由来のデータがインターネット経由で開放されるオープンデータ時代が始まっている。そして、市民がこれらオープンデータにアクセスして、科学に参加できるオープン科学時代が近づいている。さらに、人工知能時代の到来により、市民は、自らの存在感を示すために、より独創的な活動にチャレンジするようになってくると想像される。このようなオープン科学時代には、市民は、科学的手法について、傍観者ではなく、積極的に関与する必要がある。ただ、日本の教育プログラムにおいては、科学的方法の習得を、明示的に盛り込んでいない。この科学的方法では、対象の観察、問題設定、仮説構築、仮説検証、社会実装という流れを辿るが、これらのほぼすべてにデータ可視化・分析技術が関与するようになった。特に最後の社会実装においては、関係者の視点に立ったわかりやすさ（共感性）を担保するために、可視化は重要な役割を果たす。しかしながら、科学的知見の社会実装で重要な役割を果たす「政策のための科学」事業（<http://scirex.grips.ac.jp/>）において、可視化というキーワードは、データ化という意味で利用されており、必ずしもデータを人間が認知するための技術という意味ではとらえられていない。

科学的方法において、発見の対象として重要な仮説は、因果関係で構成されることが多い。因果関係とは、XX ならば YY という形式で記述されることが多く、仮説を操作化したうえで、これらにデータを対応させることができる。統計的手法によりデータ間の相関は、計算できるが、因果関係になると順序性の決定が含まれるために、人間の判断が重要となり、ここにデータ可視化の役割の重要性が確認される。

本報告では、まず、可視化技術について、3つの観点から説明し、国内外の可視化研究コミュニティと議論の重要性について述べる。次に、可視化の役割（あるべき姿）と現状及び課題点について、科学そして人工知能との関係において、詳説する。最後に、まとめとして提言を行う。

2 可視化とは何か？

本稿をはじめにあたり、いくつかの用語の定義を与えよう。後に詳述する 1987 年 11 月に出版された ACM “Computer Graphics” 特別号 “Visualization in Scientific Computing (ViSC)” 通称 ViSC レポート [1] によれば、可視化は、見えないものを見えるようにする手法であると定義されている。また、多くの定義では、データは、何かを符号化したもので、また、情報は、データであって、人間が認識したものを指す。人間の認識には、脳へのデータ入力が必要であり、脳とのデータチャネルが最も大きな視覚を利用して、データの情報化を実現するのがデータ可視化である。

可視化は、多くの科学研究領域において、有用なツールであることには異論を持たれることはないが、ポスト「京」などの関連研究プロジェクト (<http://www.jst.go.jp/keytech/kouboh26-5.html>) において、残念ながら、可視化技術に関する重点課題は見当たらない。果たして、可視化そのものは「研究」になりえるのであろうか？可視化は、1) 興味のある現象からデータ化し、2) そのデータを人間に認識させるために画像化し、3) その画像を認識した人間による重要な特徴への気づきや意味ある行動変容を促進する役割を担う。(図 1 参照) 第 1 の役割は、理・工・医学と、第 2 に役割は、情報科学と、第 3 の役割は、認知科学と関連が深い。可視化が研究対象であるためには、明確な研究的問い (Research question) が存在し、その仮説の有用性を測定するための尺度を定義し、それを測る手段を持つ必要がある。本稿では、可視化が研究対象であるための要件について議論を深め、その後、科学との向き合い方を念頭に入れた可視化 (科学的可視化) のデザインとは何かを考えてみたい。

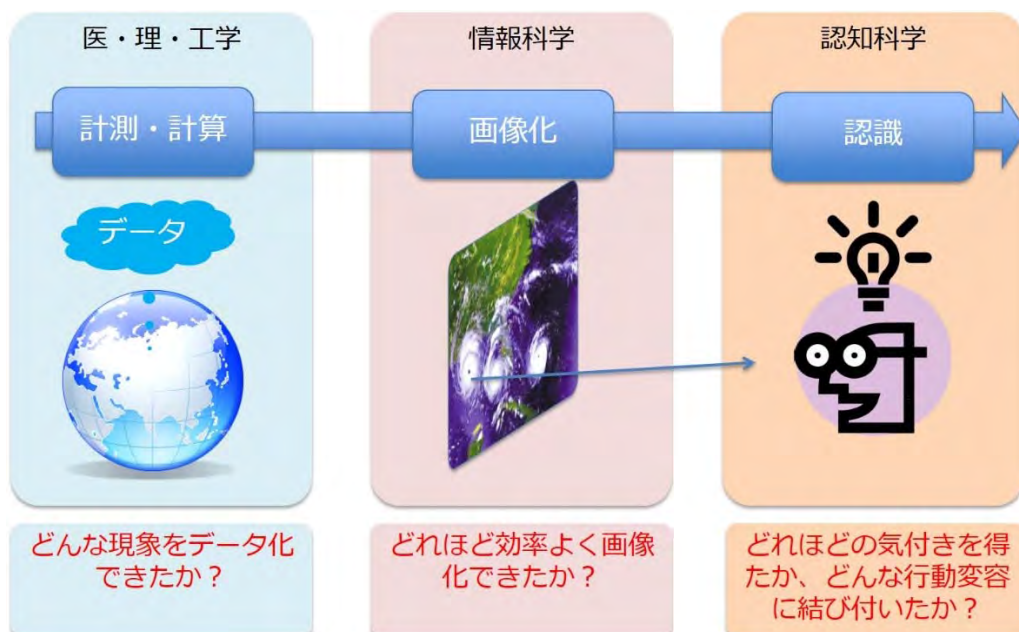


図1 可視化研究と研究的問い

(出典) 小山田耕二 (2014): シミュレーションの世界 可視化は研究の対象か? シミュレーション 33 (4), 288-293 より小委員会で作成

(1) 現象のデータ化

可視化という言葉はさまざまなところで聞かれるようになった。「経営情報の可視化」などというように企業活動におけるオープン化に関連して、可視化という言葉が使われている。大手企業による有価証券報告書への不実記載に端を発して低下した証券市場の信頼性を回復させるために、2006 年金融庁が中心となって日本版 SOX 法を取り纏めた。この日本版 SOX 法を企業内で定着させるために、企業経営者はこぞって、業務や情報システムの「可視化」が重要とのメッセージを発信している。この場合、業務内容をデータ化するという観点で「可視化」という言葉が使われる。また、最近では、冤罪の悲劇をなくすために、取り調べ過程の全面的な録音・録画の義務づけ、検察官手持ち証拠の全リストの開示などを内容とする法案、いわゆる「全面可視化法案」が参議院において可決されたことを受けて、お茶の間で可視化という言葉が広まってきた。この場合も捜査状況をデータ化するという観点で「可視化」という言葉が使われる。

以上のように、対象となる現象をデータ化することを可視化ととらえることも多い。自然科学の観点では、関心の高い現象からのデータ化は、長年にわたってさまざまな形で研究開発が進められてきた。そのままでは見えない流体の動きについて、流れにできるだけ影響を及ぼさない物質を用いて流れを顕在化させることを流れの可視化(Flow visualization)と呼び、たとえば、水流に染料を注入して、層流から乱流への遷移を観察した O. Reynolds (1879 年) の実験は、その代表例として余りにも有名である。1960 年、アメリカ機械学会主催による流れの可視化シンポジウムの開会にあたり、Stanford 大学の S. J. Kline 教授は、流れの可視化の目的として、次の 2 つの目的を実現する研究コミュニティの必要性を訴えた[2]。すなわち、新しい流れ現象の発見、流れに対する数学的モデルの構成、および流れを支配する法則の実証などを内容とする「科学的な解析研究」と、複雑な機器内の流れの観察、機器開発のための模型研究、および流れ場とそれを支配する因子との関係の解明などを含む「工学的な開発研究」である。

物理現象のデータを取得するには、一般に計測装置を用いるが、実際には計測が困難な現象からのデータ取得には、数学的モデルに基づいた計算力学シミュレーション結果を活用することも多い。計算力学は、多くの複雑な因果関係から構成される物理現象のうち、ある観点で因果法則を絞り込み、これらを偏微分方程式の形で表現し、数値解法を提供する。数値解法において、現実の物理現象を再現できるように、例えば、固体・流体・電磁界の観点でそれぞれ、計算固体・流体・電磁力学が確立され、普及している。計算力学は、固体・流体・電磁界の分野で、それぞれ適用事例を増やしてきたが、これらを組み合わせながら計算を行うことを連成といい、例えば、計算固体・流体力学の連成計算では、心筋の運動と血液の流れの双方を考慮するようなヒトの心臓拍動現象を再現することができる。このようなシミュレーションでは、元の偏微分方程式からは想像しえなかったような因果法則が発見される可能性もある。

社会・心理現象のデータを取得するには、人間の認知構造の可視化に強い関係をもつインタビュー・カウンセリング手法を用いることが多い。本稿では、人間の認知構造の

可視化手法として、評価グリッド法[3]について注目したい。評価グリッド法は、半構造化インタビューを用いた定性評価手法である。半構造化インタビューとは、質問の流れがある程度決まっているインタビューで、一般的な自由形式の非構造化インタビューと、質問の流れが完全に固定された構造化インタビューとの中間にあたる。評価グリッド法は環境心理学の分野で讃井によって開発され、その後マーケティング、感性工学と適用分野を広げてきた。評価グリッド法は、デプスインタビューとしての側面も持っており、回答者が自覚していない深層心理を引き出すことができる。

評価グリッド法によって引き出された価値判断のネットワークを評価構造と呼ぶ。価値判断のネットワークとは、すなわち、人が可視化結果を評価する時に、どのような価値観を重視しているか、ある要因が満たされたときどのような価値観が満たされるか、ある価値観を満たすためにはどのような要因が必要であるかといった価値判断の接続関係である。評価グリッド法のインタビューは基本的には1人ずつで行い、個人毎の評価構造図を作成する。その後、回答者全体の評価構造を把握するために、個人毎の評価構造を統合し全体評価構造を作成する。また、評価構造中の価値判断の単位のことを評価項目と呼ぶ。評価グリッド法は、調査対象者の価値判断の全体像を把握する上で有効である。

現象データ化の観点では、可視化の研究的問いは、「重要な現象をデータ化できたか？」であり、その現象を取り扱う研究コミュニティで合意されている、その現象の重要性やそのデータ化の困難さをどう克服したかが評価指標であり、その測定手段は、これまでに十分に確立されている場合が多いと考えられる。

(2) データの画像化

データとは、何かを符号化したものである。データと同様な文脈で利用されることの多い情報とは、データであって、かつ人間が認識したものと定義される。人間に認識させるには、人間の感覚器を通して、データを脳に伝達する必要がある。1972年発行の『産業教育機器システム便覧』によると、五感による知覚の割合は、視覚が83%、聴覚が11%、臭覚3.5%、触覚1.5%、味覚が1.0%であるとされている。したがって、データを伝達するには、画像化というのは大変効率のよい手段だと理解できる。

興味ある現象から取得されたデータがそれほど大規模・複雑でない場合には、そのまま画像化することで可視化が実現されたが、計測器や計算機的能力が向上する1980年には、データの規模や複雑性が増大し、データを画像化するための技術開発の重要性が指摘されるようになった。このころからはじまったデータ画像化技術の対象は、3次元格子で定義されたデータであるためにボリューム画像化と呼ばれることが多い。このボリューム画像化技術の本格的な発展は1986年からはじまる。ViSC レポート[1]の序文は、データ画像化の幕開けについて、具体的に説明している。1986年11月National Scientific Foundation(NSF)の一部門であるDivision of Advanced Scientific Computing (DASC)はグラフィックス・画像処理・ワークステーションに関するパネル討論会を主催した。当時NSFが資金提供したスーパーコンピューターセンターがグラフッ

クスソフトウェアとハードウェア整備について予算要求を行っていたことを受けての開催であった。グラフィックス・画像処理技術を計算科学に適用することは当時としては新しい研究分野の創出につながったので、パネル参加者はこれを Visualization in Scientific Computing (ViSC) と名づけた。このパネル討論会では二つの勧告が出された。ひとつは、NSF による省庁横断型ワークショップの開催であり、もうひとつは、その結果を受けての ViSC についての新しい主導権を確立することである。

ワークショップ“Workshop on Visualization in Scientific Computing”は、学术界・産業界・政府からの多くの参加を得て、1987 年 2 月にワシントンで開催された。コンピュータグラフィックス・コンピュータビジョンの専門家は先端技術についての分析結果、連邦機関代表からは可視化に対する要求や関心について講演が行われた。物理、数学、化学や医用画像の研究分野を代表する科学者からは、フィルム・ビデオ・スライドを用いた計算機利用による映像が披露された。日本のデータ画像化研究・コンピュータグラフィックスによるアニメーション作成についての最新技術についてのチュートリアル、そして当時利用可能な商用のハードウェア・ソフトウェアについての発表は議論をさらに深めた。

この議論を受けて出版された ViSC レポートではデータ画像化技術における主導権確立のためにパネリストの発見や勧告がわかりやすく掲載された。本編は、データ画像化についての定義・領域・勧告の三部構成で、巻末の付録は、研究領域・データ画像化環境・産業競争力についての幅広い項目が見やすく整理されている。本編は 14 ページから構成されているのに対して、付録は 70 ページもの紙面が割かれている。特に産業競争力編では、日本のコンピュータグラフィックス業界についての説明に 5 ページも割かれており、当時のアメリカが感じていた日本の脅威をうかがい知ることができる。

ViSC レポート出版以降、多くの 3 次元データ画像化技術が開発された。特筆すべきは、CG 研究の世界的権威である国際会議 SIGGRAPH で 1987 年に現在多く活用されている等値面表示手法”マーチングキューブ法” [4]に関する講演論文が、そして続く 1988 年にはボリュームレンダリングについて三本もの講演論文が発表されたことである。大きな意義としては今後の標準となるこれらデータ画像化手法に名前が与えられたことである。それまでも等値面表示やスカラデータの俯瞰的表示手法の提案はあったが、単純明快な名前で国際的権威の会議で発表されたことは、データ画像化技術の普及において重要な意味を持っている。データ画像化技術の研究発表については、次に述べる新しい国際会議に舞台を移したが、1993 年に SIGGRAPH でベクトルボリュームのデータ画像化に大きな影響を与えることになる Line Integral Convolution (LIC) [5]が提案された。ベクトルボリュームとは、3 次元格子で定義されたベクトルデータを意味する。この提案では、データ画像化というよりむしろ画像データに対する特殊効果の観点で有用な技術とされていたが、1997 年に IEEE Visualization においてこの手法をベクトルボリュームのボリュームレンダリングに拡張した研究発表[6]が行われた。

データ画像化の観点では、可視化の研究的問いは、「どれほど効率よく画像化できたか？」であり、可視化研究コミュニティで十分に共有されてきた。また、提案手法に対

する有用性の検証では、明確な性能評価指標（計算速度や必要計算機資源）が存在し、その測定手段は、これまでに十分に確立されている場合が多いと考えられる。

(3) 人間による画像の認識

ViSC レポートの後継として 2006 年に出版された、後で詳述する VRC レポート[7]で指摘された可視化の効能については、多くの可視化研究者の興味を捕らえはじめている。データから画像が作成された場合、この画像を人間がどう認識したのかを定量的に測定することが問われている。

日本では、乗用車の製造工程で可視化の効能を利用した取り組みが以前よりなされており、遠藤はこれを「みえる化」と命名している[8]。みえる化では、売り上げ目標と売り上げ高といった理想と現実のギャップを問題として認識させるためにさまざまな視覚に訴える仕組みを開発・利用している。みえる化の効能は、火事場の馬鹿力という言葉で説明されている。すなわち、火事という問題を現実目の当たりにした人々が、家具を運び出すために普段以上の能力を発揮したり、たまたま隣り合ったまわりの人々と連携したりするための駆動力のことである。逆に、その現場を見なかった人たちにいくら言葉でその大変さを説明しても、その人々には火事場の馬鹿力は生まれないということを示している。この効能を高めるには、意思とは関係なく「みえる」状態にしておく必要があるとされ、視野いっぱい提示する環境が望まれる。重要な電子メールについては、重要フラグをつけてデジタル媒体に保存しておくよりむしろ大きく印刷してアナログ的に壁に貼っておくことが効果的と考えられている。

電子的な壁としては、タイルド表示装置の利用が進んでいる。人間の網膜には一億個レベルの視細胞があるものの、商用の表示装置はせいぜい数百万画素程度の解像度であり、より視力に適う解像度を実現するには比較的低コストで高解像度の実現が可能なタイルド表示装置の活用が望まれる。タイルド表示装置とは、商用の液晶モニタをタイル上に配列させ、安価で高解像度を実現するための表示機構である。それぞれのモニタに表示するための PC が必要となる。図 2 は、京都大学でアクティブラーニングを推進するために、2012 年秋に普通教室に設置されたタイルド表示システム：アクティブラーニングシアターを示す。46 型液晶ディスプレイ（解像度 10,880 x 2,304）×24 台（2 組）、これら 24 台の液晶ディスプレイは 1 台の PC で駆動される。

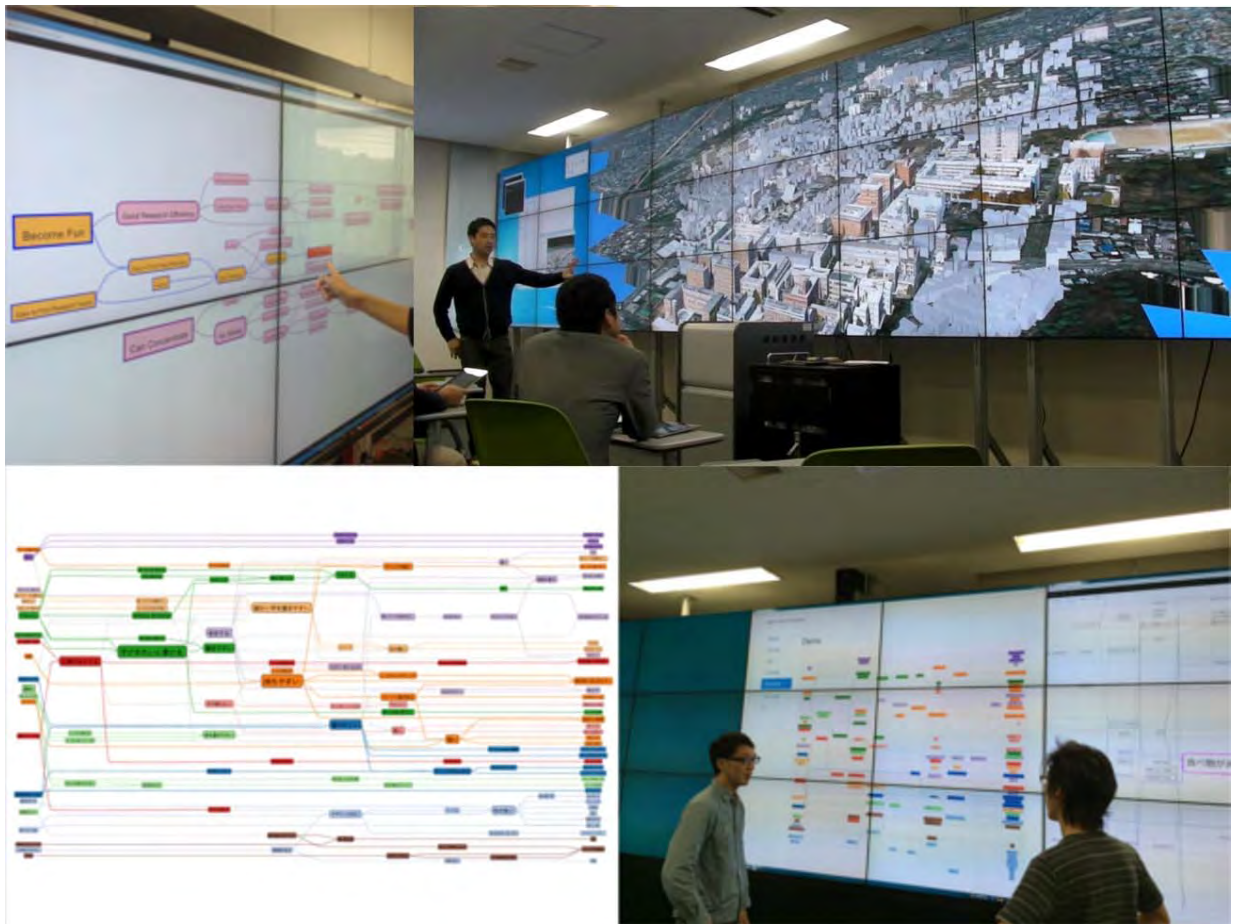


図2 アクティブラーニングシアター

(出典) 京都大学で撮影されたアクティブラーニングシアターの画像より小委員会で作成

可視化の効能におけるひとつの側面は、気付きの促進であろう。この気付きの定量化を脳科学の問題と捉えている研究がすすんでいる。脳科学学者茂木健一郎により広く世に知れたアハ体験では、脳を鍛えるゲームも世に出ており、販売元のセガのホームページでは、

「アハ！体験 (aha! experience) は、「わかったぞ」という体験を表す言葉として、英語圏では広く使われているとともに、人間の脳の不思議な能力を表すキーワードとして、最先端の脳科学で注目されています。アハ！体験では、0.1 秒ほどの短い時間に、脳の神経細胞がいっせいに活動して、世界の見え方が変わってしまいます。神経細胞がつながりかわって、「一発学習」が完了し、今までと違った自分になってしまうのです。」

という説明がなされている。また、3つの単語からある複合語を類推させるタスクを使って、アハ体験と脳の賦活領域との関連を調べた脳科学学者もいる[9]。

可視化の効能におけるもうひとつの側面は、行動変容の促進であろう。行動変容に結び付く可視化のあり方は、認知科学の問題と捉えることもできる。可視化に対する人間の認知構造の評価が可視化効能の評価に活用できる可能性がある。図2下では、アクティブラーニングシアターを使った評価グリッド法の実践例を示す。評価グリッド法のインタビューの手順は、オリジナル評価項目の抽出とラダーリングの繰り返しである(図

3 参照)。オリジナル評価項目とは、インタビューの起点となる評価項目であり、ラダーリングとは、オリジナル評価項目からより抽象的な評価項目とより具体的な評価項目を引き出すための手順である。インタビューにあたって、いくつかの調査対象物を刺激要素として準備しておく。効果的な可視化技術に関する調査であれば、いくつかの可視化画像を用意するといった方法が取られる。オリジナル評価項目の抽出では、刺激要素の中から 2 つを回答者に提示し、どちらの方が好ましいか尋ねる。そして、何故それを好ましいと思ったのか理由を尋ね、回答された理由をオリジナル評価項目として記録する。理由が複数ある場合は、それらを全て記録する。刺激要素の数が多い場合には、インタビューの時間が長引き回答者の負担になる場合があるので、刺激要素をグループ化することで時間短縮を行う場合がある。

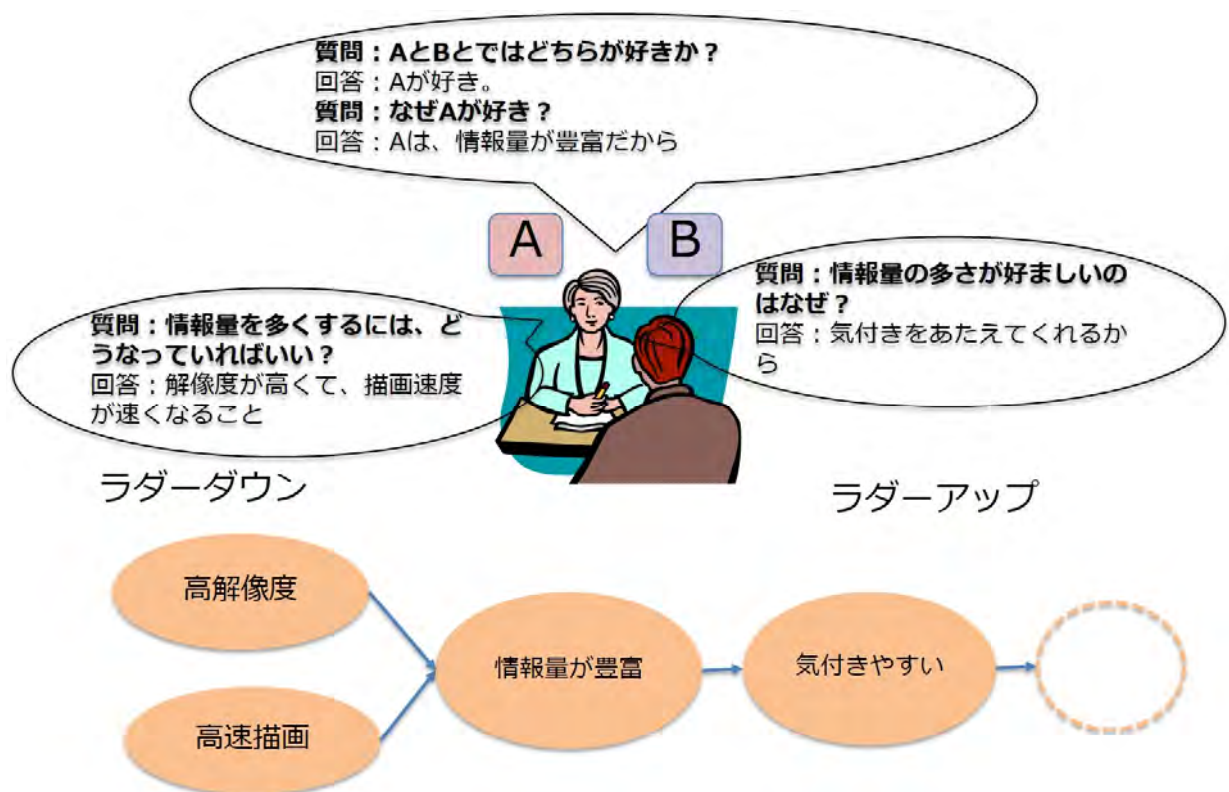


図3 評価グリッド法のインタビューの手順

(出典) 讀井純一郎(2003): 商品企画のためのインタビュー調査: 従来型インタビュー調査と評価グリッド法の現状と課題, 品質, 33(3), 281-288 より小委員会で作成

ラダーリングでは、オリジナル評価項目からより抽象的な上位概念を引き出すラダーアップと、より具体的な下位概念を引き出すラダーダウンを行う。ラダーアップでは、オリジナル評価項目として挙げられた理由「〇〇」について、「〇〇だと何故良いのですか」と尋ね、回答された理由を上位項目として記録する。さらに、回答された上位項目についてラダーアップを行い、それ以上の上位項目が引き出せなくなるまで続ける。ラダーダウンでは、オリジナル評価項目としてあげられた理由「〇〇」について、「具体的にどういうところが〇〇なのですか」と尋ね、回答された理由を下位項目として記録す

る。ラダーアップと同様に、引き出された項目についてさらにラダーダウンを行い、それ以上の下位項目が引き出せなくなるまで続ける。途中で理由が複数挙げられた場合は、上位項目または下位項目を枝分かれさせつつ上述の手順を繰り返す。刺激要素の全てのペアに対してオリジナル評価項目の抽出とラダーリングを行えばインタビューを終了とする。

人間による画像認識の観点では、可視化の研究的問いは、「どれほどの気づきを得たか？または、どんな行動変容に結び付いたか？」であり、認知科学コミュニティで共有されてきた。可視化研究コミュニティでは、これまで認知科学コミュニティで確立されてきた性能評価指標の利活用が重要であり、その測定手段を含めて、これからの検討が期待されているものと考えている。

(4) 可視化研究コミュニティ

可視化の研究的問いは、可視化研究コミュニティで共有されてきた。ここでは、可視化研究コミュニティについて、海外・日本にわけて簡単に説明する。

① 海外の可視化研究コミュニティ

SIGGRAPH における可視化に関するインパクトの高い研究発表がきっかけとなり、可視化技術の技術討論に焦点をあてた国際会議 IEEE Visualization が発足し現在では、可視化技術について最も権威のある国際会議として位置づけられている。国際会議におけるセッション名を時系列的に眺めることによってそのときどきにおける可視化技術の重要性の変遷を知ることが可能である。興味深いこととしては、第1回目にも第20回目にもボリュームレンダリングに関するセッションが存在する点である。手法としては20年前に提案されたものと違いはないものの可視化対象のデータの大規模化・複雑度がすすむことによる性能向上への要件が多く、質の高い研究開発を必要としている。

また、ヨーロッパや環太平洋地区における可視化技術の議論の場として、国際会議 Eurovis や PacificVis が発足した。2008 年、第1回が京都で開催された PacificVis は、アジアの可視化技術研究者に関係が深いものの、日本人研究者による口頭発表が極めて少ない。2017 年までの10年間における発表件数（2008 0/29, 2009 2/26, 2010 1/27, 2011 0/26, 2012 0/30, 2013 1/34, 2014 2/29, 2015 1/28, 2016 1/29, 2017 0/30）では、毎年全体で30件程度が採択される中で、高々2件である。ここで、分母は、全体件数で、分子は日本からの発表件数である。

ViSC レポート発行以降の可視化の分野の進捗状況を評価し、未来の研究プロジェクトに焦点を当てて指向することを助け、研究課題の変化と速いペースで進む情報技術領域の方法の成熟に応じて国家資源を配分する方法についての指針を与えるために、2004 年と2005 年に Workshop on Visualization Research Challenges を二度開催し、その報告を受けて NSF と NIH は、2005 年 Visualization Research Challenges Report (通称 VRC レポート) [7] を出版した。

VRC レポートでは、可視化研究分野の現状を探究し、国内および国際的な重要分野

への可視化の潜在的な影響を調べ、成長する可視化研究分野の未来のために所見と勧告を提示する。ViSC レポート出版以来 17 年の間に、重要な可視化技術が多く開発され、同時に世界は、データの爆発的増大を経験してきた。特筆すべきことは、2003 年以降の 2 年間に生み出された新しいデータは、それ以前に作り出された全ての文書に含まれるデータを凌駕していることである。2003 年以降に生み出されたこの新しい全てのデータのうち、90%以上がデジタル形式を取り、紙とフィルムの形式で作りに出されたデータをはるかに上回っている。しかし、生データはそれ自体では価値に疑問があるものである。VRC レポートでは、データ量の莫大な成長と猛攻を理解し、大規模なデータを有効かつ効率的に利用するために可視化の効能を絶えず意識するよう促している。

さらに、現在は、ビッグデータの時代といわれる。2011 年に IDC という調査会社が年間 1.8 ゼタバイトのデータが年間生成されているというレポートを出版してからビッグデータというキーワードが広まってきた。1.8 ゼタバイトというデータは、32GB の iPad を全世界の人々がひとり 10 台持たないと収めきれないデータ量である。しかし、そのデータもそのままでは何も生み出せないであろう。サイズが大きすぎてまさにデータの洪水となる。人類はそのようなデータに初めて向き合っており、どのように取り組むかが問われている状況である。

② 日本の可視化研究コミュニティ

日本では、NSF と NIH に対応する政府機関において、永続的かつ学際的に、可視化技術に関する方針を検討することはなかったものの、日本の学会では可視化情報学会・日本シミュレーション学会において可視化技術を議論する場が設けられている。可視化情報学会ではビジュアルデータマイニング研究会として視覚的分析論に関する研究成果の発表の場が設けられている。日本における先進的可視化技術の議論の場として位置づけられ、2008 年に開催された国際会議 PacificVis の京都開催では中心的な役割を果たした。また、2015 年に神戸で開催された国際会議 SIGGRAPH ASIA では、国際シンポジウム “Visualization in High Performance Computing” 実施を企画している。日本シミュレーション学会では、シミュレーションと可視化研究会が設置されており、シミュレーション結果における有用な可視化技術についての研究発表の場のみならず、シミュレーション技術を活用した可視化技術開発の模索を検討する場として機能している。

日本学術会議では、平成 25 年度に、可視化のあるべき姿を議論するために、計算科学シミュレーションと工学設計分科会のもとに、ポストペタスケール高性能計算に資する可視化処理小委員会（以降、小委員会）が設置された。本小委員会における具体的な論点は以下のとおりである。

- 1) 可視化効能の評価のあり方
- 2) 科学的発見を支援するための可視化技術のあり方
- 3) 計算科学の社会実装を行う上で可視化技術の果たす役割

全 10 回の委員会開催があり、日本学術会議講堂において、以下の 2 回の可視化シンポジウムを開催した。

ア 「可視化ービッグデータ時代の科学を拓くー」(平成 26 年 9 月 22 日)

本シンポジウムでは、ビッグデータ時代において、可視化は、科学の発展との向き合い方に大きな期待がかかっているが、今後どうあるべきであるのか、以下の問いを提起した。

- 1) 科学的方法の実践において、可視化はどのように関与しているのか？
- 2) ビッグデータ時代における可視化研究における重要課題はなにか？
- 3) 科学的発見における可視化の効能の指標はなにか？
- 4) 次世代計算機開発において、設計指標はどうあるべきか？

本シンポジウムでは、可視化先進活用・研究について、第一人者の取り組み、事例、経験について報告を聞き、会場の聴衆とともにビッグデータ時代の可視化について自由闊達な議論を行い、その結果は、本提言の 3 (1) 科学と可視化に反映されている。

イ 「人工知能と可視化」(平成 28 年 11 月 30 日)

2045 年には、計算機がヒトの計算性能を超えることが予想され、あらためてヒトと計算機の関係が問われている。ビッグデータ時代、高性能計算機と人工知能技術が将来進展するとヒトは不要になってしまうのではないかという不安を持つ人たちも増えている。ヒトはビッグデータを効率よく認識するためには、どのように可視化に向き合えばよいのか以下の問いを提起した。

- 1) 人工知能との連携を進めるに当たって、社会との接点で生じる様々な問題について、どのような配慮が必要か？
- 2) 人工知能との共存を前提とした科学的方法の実践はどうあるべきか？
- 3) 人工知能研究の進展により人間知能の増幅はどこまで可能になるのか？

本シンポジウムでは、人工知能先進活用・研究について、特に可視化との関係において、第一人者の取り組み、事例、経験について報告を聞き、会場の聴衆とともに人工知能時代の可視化について自由闊達な議論を行い、その結果は、本提言の 3 (2) 人工知能と可視化に反映されている。

(5) いまなぜ可視化技術を議論するのか

オープンデータ時代において、仮説検証といった科学的方法を実践するうえでデータ分析・可視化は必要不可欠になってきている。データマイニング、データアナリティクス、深層学習などを利活用できるデータサイエンティストの育成も急務となっている。この状況に対して可視化の果たす役割は何であろうか？

計算機で自動的に行われるデータ分析は、通常科学において重要な役割を期待されている。可視化は、これまで拠って立っていた基盤を変革するようなパラダイムシフトにも通じるような科学では、外れ値や特徴的なパターンの発見など、本質的に人間の判断が重要とされ、このような判断を支援するビジュアルデータマイニングやビジ

ュアルアナリティックスといった可視化技術の利活用が重要になってくるものと考えている。

データサイエンティストの育成において、重要な基盤は科学的方法である。2011年、後述するビッグデータ宣言以降、掛け算の九九のように、肌感覚でこの科学的方法を身につけさせるために、世界中の小学校で様々な取り組みが行われてきた。特に、英語圏では、小学校の授業でそのまま使えるビデオコンテンツにより歌や踊りでその重要性を体得させようとしている[10]。深層学習に代表される人工知能技術は、データからパターンを自動抽出することで脚光を浴びており、データからパターンを抽出している人間に対する脅威になりつつある。科学的方法習得の低年齢化は、この状況に対する一種の知能増幅の動きともいえる。

本稿では、科学的発見における、これまでの可視化技術の利活用の実態を概観することにより、高性能計算機や高度計測装置から出力される膨大な量のデータを情報化し、適切に人間に認識させ、人工知能とともに科学的知見の創出を可能にするために、先進的可視化技術に関する研究開発とその適用が持続的に行なえるオールジャパン体制の研究コミュニティの構築を提言する。

3 可視化の役割と現状および重要課題

可視化の概要について述べたので、以降では、可視化において、科学と人工知能に関係づけて、あるべき姿（役割）・現状および課題を抽出する。

(1) 科学と可視化

まず、科学と可視化の向き合い方について考えてみたい。本稿では、データとは、科学的方法（図4）の文脈で利用されるデータと仮定する。科学的方法とは、観察・問題設定・仮説構築・検証・適用の局面から構成される。この科学的方法では、なんらかの現象に興味をもつことから始まり、その現象をじっくり観察することにより、なぜだろう？という問いを立て、問題設定の局面に移る。この問いは、その現象の原因を推定することである。ある瞬間に気づきを得て、推定された原因と結果の組み合わせで構成された仮説を構築し、それを検証するために実験計画を立案し、実際に実験を行って、データを取得する（仮説構築の局面）。取得されたデータに対して、統計手法などを用いて、仮説検証作業を行い、結論を得る（仮説検証の局面）。結論は、学術論文・学術的提言・科学技術政策・公共政策などの形で、社会に適用される。

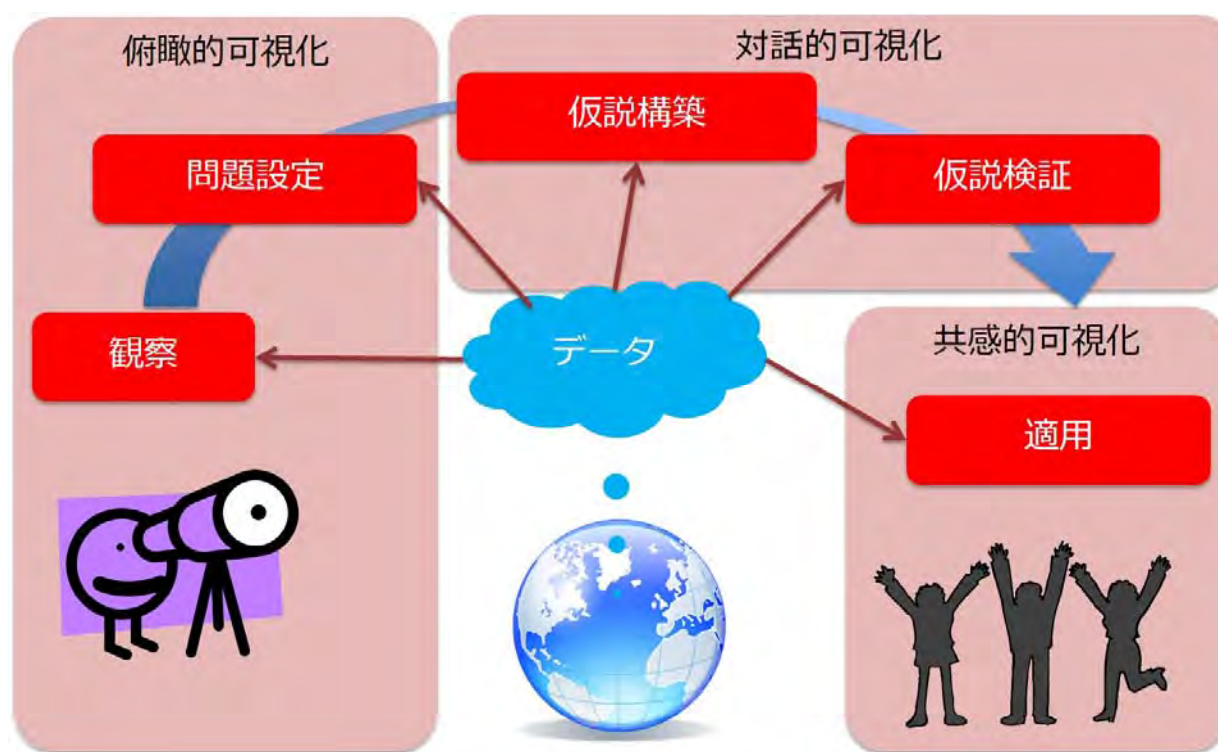


図4 科学的方法と可視化

（出典）学術大型研究計画 説明資料（区分Ⅰ）計画番号157 学術領域番号34-1，あらゆる分野の因果推論を支援するデータ解析・可視化研究コミュニティの構築—1億総明晰社会実現に向けて—より小委員会で作成

科学的方法は、科学的研究を支える土台になっており、これまでは、大学における卒業研究などで、暗黙的に学ぶことが多かったが、最近では、小学校から学ばせる国も出て

きている。科学的方法を学ばせているイギリスの小学校に通う児童 25 人が、2011 年に一流の研究者でも掲載が困難とされる学術誌に、マルハナバチに関する研究成果を掲載した[11]。この成果が大きな駆動力となり、小学校で科学的方法を教えることを支援する音楽教材が開発された[12]。

2011 年のビッグデータ時代宣言以降、科学的方法のすべての局面で、データを人間に認識させるために可視化が重要となりつつある。実際に、気象予測においては、多くの方がスマホなどを通して気象シミュレーションデータの可視化結果を見ながら、今後の行動への参考にしている。また、社会現象については、ソーシャルメディアから生成されるデータを可視化することにより、世論動向の観察ができるようになっている。

可視化技術の開発において重要であるのは、データと科学的方法との関係にうまく向き合うことである。ビッグデータを使った観察や問題設定では、全空間における俯瞰的可視化の実現が重要である。また、仮説構築や検証では、関心領域の設定のために対話的可視化が重要である。そして、検証された仮説を社会に適用するには、共感的可視化が重要である。

① 俯瞰的可視化

自然科学や社会科学の分野で利用されるスーパーコンピュータからのビッグデータの俯瞰的可視化については、利用者の手元の計算機環境で、軽快に俯瞰的可視化や複数のデータを融合的に可視化できることが望ましい。俯瞰的可視化において、奥行方向に様々なデータを重ねながら半透明表示を行うことは、情報量を高めるうえで効果的な手法であるが、変化する視点ごとに重ね合わせ対象のデータのソート処理が必要とされ、このため計算時間がかかり、対話的表示が困難とされてきた。この問題を解決するために、拡張性に優れた可視化手法の開発が望まれている。具体的には、点・線・面・立体などさまざまな種類の幾何形状データに対して、それらがお互いに交差していても、それらの視点方向から見たソート処理の高速化かまたは、ソート処理を不要にする、拡張性の高い可視化手法が必要とされている。

IoT や高性能計算機により数多くの時系列データが生成されるようになってきた。これらを単独で俯瞰的に可視化する必要性も高いが、さらにこれらのデータ間の因果関係が重要な意味を持つ問題も多く存在する。多くの時系列変数データから因果関係を俯瞰的に可視化する場合、時系列データ間の因果関係を評価する必要がある。この計算のためには、グレンジャー因果[13]や収束的交差写像[14]などの方法が提案されているが、各変数間の因果関係の評価を行うために多くの計算時間が必要とされる上に変数間の組み合わせ数も膨大である。このために、あらかじめ、深層学習で時系列データ間の因果関係を学習しておき、その結果を利用して、効率よく因果関係を俯瞰可視化する方法が必要とされている。

② 対話的可視化

データ間の因果関係については、データをひとつの節点とするような因果グラフを用いて可視化されるが、このグラフを計算するうえで利用した観察データ以外の原因：潜在因子を考慮する場合、専門家に、潜在因子を探し出すことを支援するための対話

的可視化環境を構築する必要がある。具体的には、因果グラフを俯瞰的に可視化して、対話的に潜在因子候補を仮配置し、その説明能力の変化をリアルタイムに確認することのできる可視化環境のことである。この場合、因果グラフにおいて、グラフを構成するリンクの交差ができるだけ少なくなるような、グラフ可視化手法の開発が必要となる。

将来的には、観察データから導出される因果関係だけでなく、自然言語で表現された因果関係に対して、これを構成する仮説を検証するための効果的なデータ探索が望まれている。このためには、対象となる因果関係に対して、自然言語処理技術を用いた概念操作化を行い、その結果導出された原因と結果に対応するデータで、世の中で公開されているものに一致するものがあるかどうかをリアルタイムに検索する技術が必要である。ここで、概念操作化は、因果関係を構成する原因と結果に対応して、アーカイブされている観察データを紐づける機能のことを指す。このような検索システムがあれば、研究打ち合わせにおける発想支援に有益になると考える。

③ 共感的可視化

データは可視化の対象とするときにその元の現象に関わる属性（出自データ）は、取り去られている。科学的方法で社会適用の段階にあるときは、共感性の向上のためにこれらの出自データを復活させ、そのデータとともに可視化することが望ましい。具体的には、AR (Augmented Reality) 技術などを活用し、検証された仮説を提示するコミュニティの共感性を向上させるようなデータとともに可視化することである。ここで、AR とは、現実世界の物事に対してコンピュータによる情報を付加することである。

共感的可視化に関する重要な論点をもうひとつ示してみよう。認知構造において、もともと対立関係のあった対象において、共通理解を促進させるのはどうしたらよいかという観点である。可視化効能の測定に利用可能な評価グリッドにおいて、可視化技術に関する認知構造の評価が行われたとしよう。(図5参照) オリジナル評価項目の抽出のために、刺激要素として、二対の可視化画像を提示し、どちらがよいかをたずねることから開始して、前述の方法に従い、可視化技術に関する評価構造が得られたとする。

評価構造の下位概念において、仮に「三次元可視化がよい」と「二次元可視化がよい」のような、一見対立する項目が抽出されたとする。従来だと、このような項目が独立して抽出されるとそれぞれの支持者には感情的なしこりが残ってしまう。ここで、評価構造の可視化において、その上位概念において、「わかりやすさを追求したい」という項目が見つかり、これがそれぞれ「三次元可視化がよい」と「二次元可視化がよい」という項目と接続されていることが判明したとしよう。そのような場合、対立軸が存在することは、どうしようもないが、それぞれは、共有の上位概念を持つことが明らかになり、感情的なしこりが消え、相互理解が促進されるような、ある意味で一条の光明を見つけることができ、共感性の向上につながることも期待できる。

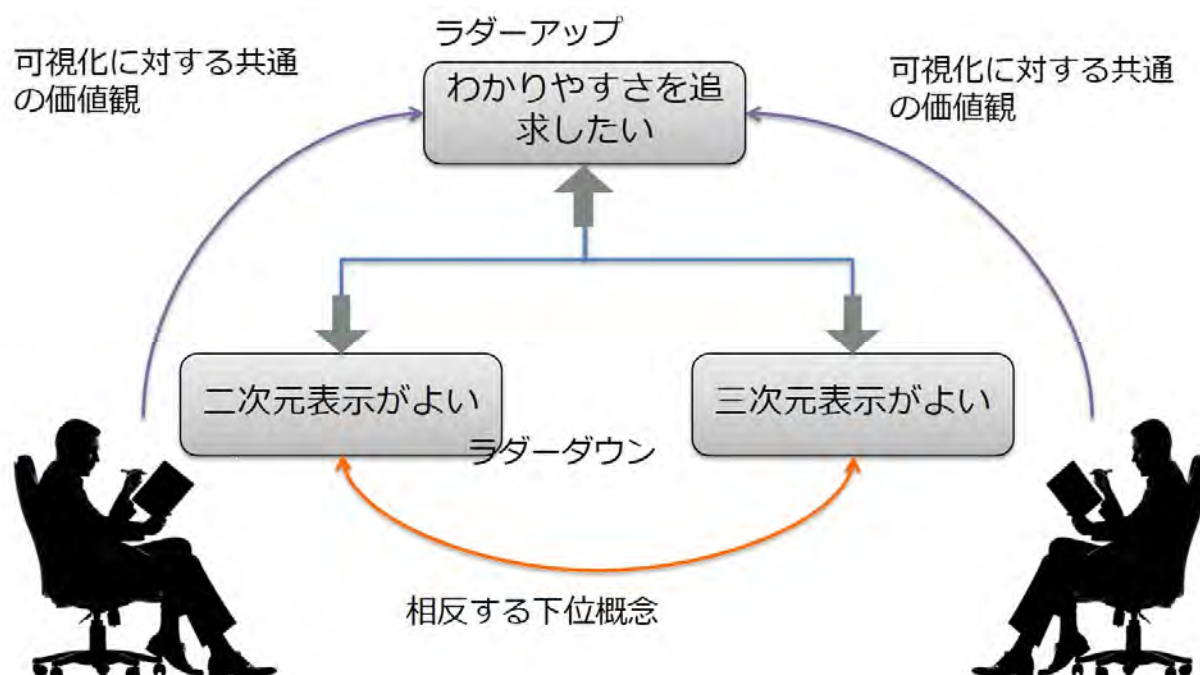


図5 行動変容:対立から共感へ

(出典) 讀井純一郎(2003): 商品企画のためのインタビュー調査: 従来型インタビュー調査と評価グリッド法の現状と課題, 品質, 33(3), 281-288 より小委員会で作成

(2) 人工知能と可視化

2045年、計算機能力が人間を超えることが予想され、あらためて、計算機を含む機械と人間の関係が問われている。計算機能力は、最近注目を浴びている人工知能の性能と関係することより、将来、人工知能に奪われる可能性の高い仕事のリストがいくつか発表されたが、これらの職業の多くは、単純作業に属するものであった。ただ、このようなリストを目にすると、人工知能が将来格段に進歩し、人間は不要になってしまうのではないかという不安を持つ人たちも増えていることも納得できる。さらに、人工知能と先端科学が結託して人間を滅亡させるような終末期が映画などのメディアによってリアルに描かれてしまうと、人間が生き延びるためには、人工知能研究に何らかの規制が必要であるとの認識も強まる。

最近では、実際に、人工知能の弁護士や医師が出現している。これらは、高度な専門職人材が従事していた職業であるが、内容的には、形式知を問題解決に活用するものであり、人工知能の得意分野とも考えられている。さらに、科学の世界にも人工知能が進出してきており、2001年ノーベル物理学賞の受賞理由となったボース=アインシュタイン凝縮実験を1時間足らずで再現したとの報告もある[15]。ただ、科学的方法において、本質的なのは、研究的問いを立て、それに対する仮説を構築することであり、このような知的活動は、まだまだ人間の活躍が十分に見込めると信じたい。このように、人工知能が進化した時代であっても、人間は、人工知能と共存しながら、人工知能単独では困難な、本質的な領域で貢献し続けると期待したい。このような期待に応えるためには、可視化の役割は、ますます重要になっていくものと考えられる。

以上のように、現在、「機械に学習させる」人工知能が格段に進歩しつつある現在において、「人間に学習させる」可視化の重要性がより注目されるようになったが、日本において、人工知能と人間の共進化を促進する可視化を実現するには、どうすべきであるのか、いくつかの論点を提起したい。

① 倫理的法的社会的問題

人工知能との連携を進めるに当たって、社会との接点で生じる様々な問題（いわゆる ELSI : Ethical Legal Social Issues）について、配慮が求められ、国内外で、さまざまな活動が行われている。特に、インパクトが高いのは、米国スタンフォード大学での取り組み「Stanford AI100」である[16]。これは、長期的に人工知能が社会にもたらす影響の調査・推定を目的に設置され、レポートが公開されている。可視化との関係では、人工知能の説明責任性や透明性を担保するために、この推論のメカニズムを可視化する必要性に向き合っていることである。人工知能を代表する深層学習では、入力データパターンを学習させ、層数、各層のユニットの数、学習率などのパラメータ、入力時系列データに対するデータ表現を変えながら、説明対象に反応するニューロンを明らかにするが、利用者は、なぜそのような推論結果に至ったのか説明を受けることがない。この推論メカニズムを適切に可視化することにより、人工知能の説明責任性や透明性を高める必要がある。

日本では、人工知能学会における取組が進んでいる。当学会は、「人工知能の研究開発が人間社会にとって有益なものとなるために、人工知能研究開発者は高度な専門的職業に従事する者として自らの良心と良識に従って倫理的に行動すべきである。」との考えのもとで、人工知能研究者の倫理綱領案を公表した[17]。この綱領案は、2016年度人工知能学会全国大会における倫理委員会企画による公開討論における意見募集のために作成された時点の案文とされた。また、総務省においても「AI ネットワーク社会推進会議」[18]が開発者向けガイドラインを策定中である。これらの取り組みは、人工知能研究者向けのものであるが、人工知能のサービスを受ける側についても倫理的議論が必要である。特に、知的財産権については、未着手であるので、早急に検討を始める必要がある。具体的には、深層学習によってさまざまなデータから開発されて得られたモデルを使って得られた科学的知見の知的所有権はどこにあるのかについては、早急に議論を開始する必要がある。この場合、予備調査としては、ELSI を検討するためのエビデンスとして、評価グリッド法などを使って、人工知能に関する認知構造を可視化することが望ましい。

② 人工知能との共存

人工知能との共存を前提とした科学的方法の実践において、人間が得意な領域と人工知能が得意な領域を考える。

俯瞰的可視化を構築するうえで、大規模なデータをストレスなく表示するための可視化パラメータなどを学習させておき、与えられたデータに対する適切な可視化パラメータを推薦する。対話的可視化を実施するうえでは、膨大なデータから、既存の因果関係評価手法（グレンジャー因果[13]、収束的交差写像[14]）を使って教師データ

とし、与えられた時系列データを学習させておき、与えられたデータに対する適切な因果関係の可能性の高そうな変数の組み合わせを推薦する。また、共感的可視化を実現する場合には、どのような出自データがどのコミュニティの構成員に対して共感性向上に役立つのかを学習させておき、対象となるコミュニティの構成員に対して、適切な出自データを推薦する。

③ 人間の知能増幅の可能性

これまで人工知能の代替・共存という文脈で知能増幅という考えが示されている。1956年、知能増幅（IA: Intelligence Amplification）という用語は、ウィリアム・ロス・アシュビーが著書 *Introduction to Cybernetics* で使った “amplifying intelligence” という言葉が元になっている[19]。1960年に心理学者で計算機科学者の J・C・R・リックライダーは人間の脳と計算機械を密に結合して相互依存しつつ共生させることで互いの力を補足しあうことができるとした[20]。これらは、脳（意識）の状態をデジタルデータとして保存して、クラウド上にアップロードするというマインドアップローディングという概念に継承されている。

人工知能研究の進展により人間知能の増幅はどこまで可能になるのか。例えば、多くの知能を学習して構成された人工知能との連携で得られた大きな発見や発明の知的財産権はどうなるのか、世界的な議論が必要である。

4 提言

これまでの議論で、可視化の役割と現状および重要課題を明らかにすることができた。可視化は、海外や日本の研究コミュニティの研究活動を通じて、データ化・画像化技術が開発され、現在では、生成画像における人間の認識に関心が広がってきている。これらを基盤として、可視化は、科学的方法を支える知的基盤として、ますます発展していくことが期待されている。可視化の利活用がうまく進まないと、人間は盲目的に人工知能の指示に従わざる状況に陥る可能性があり、人間自身が科学的方法を使って知的発見を行うことが困難となる。このため、人工知能とともに人間が知能増幅を実現するための基盤として可視化を利活用することが望ましい。以降で、科学的方法を支える基盤としての可視化を利活用するための施策について述べる。

(1) 明確な国家的政策立案と施策

- 1) 国は、オープン科学時代に、人間が人工知能とともに科学的知見を創出する基盤の大きな柱は、可視化技術であるという認識に立って政策を立案するべきである。
- 2) スパコンや大型実験施設など大規模データを生成する装置開発に関する研究プロジェクトでは、評価指標として、計算速度や実験的発見の他に、人間の脳に届くまでの時間や重要特徴に気付くまでの時間も考慮に入れ、この指標を向上させるために一定比率で、可視化技術研究開発経費を計上するべきである。
- 3) 科学的方法における観察や問題設定の段階では、超大規模データ向け俯瞰的可視化技術の研究開発が不可欠である。大規模かつ失敗の可能性があって時間の要する可視化技術の研究開発に対しては、国は府省庁を越えた立場に立って長期的・俯瞰的な観点から高度な舵取りを行うための組織を作るべきである。
- 4) 国は、政策意思決定における科学的手法の活用において、膨大なデータからエビデンスを発見するための有用性に鑑み、可視化技術の利活用に積極的に取り組むべきである。

(2) 長期的研究体制と研究コミュニティの構築

- 1) 人工知能における推論（+学習）メカニズムの適切な可視化技術の研究開発に興味を持つ、個人や組織の属する領域を超えた有機的な連携をする研究コミュニティを形成し、長期的な研究体制を構築すべきである。
- 2) 革新的ハイパフォーマンズ・コンピューティング・インフラ（HPCI）においては、永続的かつ学際的な可視化技術研究開発組織を構築すべきである。

(3) 人材育成に関して

- 1) 国民すべてにおいて、知的発見を促進する科学的方法を義務教育の早い段階で習得させるべきである。初等教育における「算数の九九」に相当する教育コンテンツの開発とそれを活用した教育を実施する。その際、科学的方法のすべての局面で人間がデータを認識する必要があることより可視化技術の利活用の優先順位を高くすべき

である。

- 2) データサイエンティスト育成においては、科学的方法の習得レベルの確認とそれに応じた必修カリキュラムをデザインすべきである。その際、意味のあるリアルワールドデータを可視化し、うまく仮説が検証できれば、そのまま社会実装することも視野に入れるべきである。

<参考文献>

- [1] B. H. McCormick, T A DeFanti, and M D Brown. Visualization in Scientific Computing. Computer Graphics, 21(6), 1987.
- [2] S. J. Kline, Opening Address, Symposium on Flow Visualization, ASME Annual Meeting New York City, 1960
- [3] J. Sanui: Proceedings of the 3rd Design & Decision Support System in Architecture & Urban Planning Conference, pp. 365-374. (1996)
- [4] William E. Lorensen, Harvey E. Cline, Marching Cubes: A high resolution 3D surface construction algorithm. Computer Graphics, 21(4), 1987
- [5] Cabral, Brian; Leedom, Leith Casey, "Imaging Vector Fields Using Line Integral Convolution". Computer Graphics, 27(4), 1993.
- [6] V. Interrante and C. Grosch, "Strategies for effectively visualizing 3D flow with volume LIC," in Visualization'97, (1997) pp. 421-424
- [7] C.R. Johnson, R. Moorehead, T. Munzner, H Pfister, P. Rheingans, and T. S. Yoo. NIH/NSF Visualization Research Challenges (Final Draft, January 2006). Technical report, 2006.
- [8] 遠藤功, "見える化-強い企業をつくる「見える」仕組み," 東洋経済新報社, 2005.
- [9] Jung-Beeman and et al. "Neural Activity When People Solve Verbal Problems with Insight," PLoS Biol 2(4), (2004)
- [10] Scientific Method Dance, <https://youtu.be/DoqgHWK1-sA>, (2015)
- [11] P. S. Blackawton, et al." Blackawton bees," Biology Letters, 7, pp. 168-172, 2011
- [12] Scientific Method Song, https://youtu.be/KIFz_-KzURY, (2015)
- [13] C. Granger, "Investigating Causal Relations by Econometric Models and Cross-Spectral Method," Econometrica 37 (3), 424-438 (1969)
- [14] G. Sugihara, et al. "Detecting Causality in Complex Ecosystems," Science 338 (6106), 496-500 (2012)
- [15] P. B. Wigley, et. al, "Fast machine-learning online optimization of ultra-cold-atom experiments," Scientific Reports 6, Article number: 25890 (2016)
- [16] Peter Stone, et. al, "Artificial Intelligence and Life in 2030." One Hundred Year Study on Artificial Intelligence: Report of the 2015-2016 Study Panel, Stanford University, 2016.
- [17] 人工知能学会倫理委員会, <http://ai-elsi.org/archives/info/20160607>
- [18] 総務省 AI ネットワーク社会推進会議, <https://goo.gl/221DnL>
- [19] W. R. Ashbyn, "Introduction to Cybernetics," Chapman & Hall, 1956
- [20] J. C. R. Licklidge, "Man-Computer Symbiosis". In: Transactions on Human Factors in Electronics, volume HFE-1, pp 4-11, 1960

＜参考資料 1＞ 審議経過

総合工学委員会・機械工学委員会合同 計算科学シミュレーションと工学設計分科会及びポストペタスケール高性能計算に資する可視化処理小委員会で提言について審議したのでこれらを時系列に並べる。

平成 25 年

9 月 3 日（火）小委員会（第 1 回）

第 22 期役員を選出し、小委員会体制と議論の出口として、提言案を作成することを確認した。可視化技術と科学的の発展に関して意見交換を行い、なぜ今可視化技術を議論するのかを確認した。

10 月 28 日（火）小委員会（第 2 回）

可視化技術における効能の評価と科学的発見を支援するための可視化に関して、あるべき姿（役割）・現状と課題について意見交換を行った。

12 月 27 日（金）小委員会（第 3 回）

各科学的研究分野で科学的発見がどのようなプロセスで実現され、そこに可視化がどう関与しているかに焦点を当てた議論を行った

平成 26 年

3 月 14 日（金）小委員会（第 4 回）

各科学的研究分野で可視化利活用の現状やヒトの認知能力の限界について意見交換を行うとともに、各委員からの提言案についても情報共有を行った。

6 月 17 日（火）小委員会（第 5 回）

提言案に盛り込める情報が多く入手できるようにシンポジウムの企画を行った。具体的には、ポストペタスケール高性能計算のための可視化技術と関係の深い話題提供を配置した。また、シンポジウムの参加者とともに、一足早く、日本版の課題トップ 10 の策定を試みるためのパネル討論を企画した。

平成 27 年

5 月 26 日（火）小委員会（第 1 回）

第 23 期役員選出、実施したシンポジウムでの議論を参考に可視化技術の進むべき方向について討論した。

8 月 6 日（木）小委員会（第 2 回）

人工知能時代における可視化のアプローチについて、最先端分野における取り組み例につ

いて情報共有を行い、提言案に盛り込める観点の絞り込みを行った。

12月25日（金）小委員会（第3回）

科学的発見で重要な役割を果たす因果推論における可視化の役割について意見交換を行った。

平成28年

3月31日（木）小委員会（第4回）

科学的発見の社会実装において、関係者への説明にどう向き合うかについて意見交換を行い、共感的な可視化技術の重要性について確認した。また、共感的可視化における、没入分析環境の有用性についても情報共有を行った。

9月13日（火）小委員会（第5回）

提言案に盛り込める情報が多く入手できるようにシンポジウムの企画を行った。ビッグデータ時代における科学的発見では、可視化と同様に、人工知能の先進活用も期待されている。人工知能の活用について、第一人者の取り組み、事例、経験について、情報共有できるようにプログラムを構成した。

平成29年

3月8日（水）小委員会（第6回）

人工知能時代において、人間が科学的方法を適切に活用して科学的知見を創出するために可視化はどうあるべきかに論点を整理し、取り纏めた提言案について審議し、承認された。

3月15日（水）～21日（火）

計算科学シミュレーションと工学設計分科会（第5回）（メール審議）において、小委員会でのコメントをもとに修正を行った提言案について審議し、承認された。

○月○日（）日本学術会議幹事会（第○○回）

提言「科学的発見に資する可視化に向けて」について審議し、承認された。

提言等の提出チェックシート

このチェックシートは、日本学術会議において意思の表出（提言・報告・回答、以下「提言等」という）の査読を円滑に行い、提言等（案）の作成者、査読者、事務局等の労力を最終的に軽減するためのものです。

提言等（案）の作成者は提出の際に以下の項目をチェックし、提言等（案）に添えて査読時に提出してください。

	項目	チェック
1. 表題	表題と内容は一致している。	① はい
2. 論理展開 1	どのような現状があり、何が問題であるかが十分に記述されている。	① はい 2. いいえ
3. 論理展開 2	特に提言については、政策等への実現に向けて、具体的な行政等の担当部局を想定している（例：文部科学省研究振興局等）。	① 部局名：文部科学省初等中等教育局、高等教育局、科学技術・学術政策局、研究振興局
4. 読みやすさ 1	本文は 20 ページ（A4、フォント 12P、40 字×38 行）以内である。※図表を含む	①. はい
5. 読みやすさ 2	専門家でなくとも、十分理解できる内容であり、文章としてよく練られている。	①. はい
6. 要旨	要旨は、要旨のみでも独立した文章として読めるものであり 2 ページ（A4、フォント 12P、40 字×38 行）以内である。	①. はい
7. エビデンス	記述・主張を裏付けるデータ、出典、参考文献をすべて掲載している。	①. はい
8. 適切な引用	いわゆる「コピペ」（出典を示さないで引用を行うこと）や、内容をゆがめた引用等を行わず、適切な引用を行っている。	①. はい
9. 既出の提言等との関係	日本学術会議の既出の関連提言等を踏まえ、議論を展開している。	①. はい
10. 利益誘導	利益誘導と誤解されることのない内容である。	①. はい
11. 委員会等の趣旨整合	委員会・分科会の設置趣旨と整合している。	①. はい

※チェック欄で「いいえ」を記入した場合、その理由があればお書きください

記入者（委員会等名・氏名）：総合工学委員会・機械工学委員会合同 計算科学シミュレーションと工学設計分科会 委員長 吉村忍

参考： 日本学術会議会長メッセージ、「提言等の円滑な審議のために」（2014 年 5 月 30 日）。

<http://www.scj.go.jp/ja/head/pdf/140530.pdf>