

可視化技術と情報教育

京都大学高等教育研究開発推進センター・小山田 耕二

概 要

本報告では研究する力をはぐくむ情報教育における可視化技術の役割について述べる。優れた研究者を育成するための仮説検証形の学習では、あるべき姿と現実とのギャップとして認識できる問題の発見を効果的に促す場の構築が重要である。あるべき姿を研究の対象となる現象モデルのシミュレーション結果、そして現実を現状の観察結果と考え、これらを可視化することにより、問題解決に資する仮説の発想につなげるひとつつながりのループをうまく形成することが次世代の情報教育に求められる。

はじめに

日本の教育は大学受験を境に大きく変わる。高校において、多くの生徒の目標は希望する大学に合格することであり、教員も指導する生徒に希望する大学に合格させたいと心から願っていることであろう。教員と生徒の間には相互信頼が存在するものと考えられる。大学入学後、とくに初年時には、多くの学生の希望が明確でなくなる。この時期が学生の意欲向上にとって重要と考えられるが、効果的な教育プログラムを提供している場合が多くない。将来への希望を欠く学生相手に行う授業は教員も身が入らない、したがって教育を軽んじてよいのではないかと思う教員が出てくるかもしれない。いわば負の相互信頼が存在するのではないかと思われる。

大学における正の相互信頼を実現するために、学生と教員がひざつき合わせて教育について意見交換を行うなど、各大学では初年時の学生意欲向上を目的としてさまざまな取り組みをはじめている。京都大学では教育交流会を組織化し、「自由な学風」とされる京都大学の新しい教育のあり方や学生の学びについて、学生と教職員が一緒になって考えていこうとしたり。学生は動機付けが与えられれば、教員が驚くほどの意欲で学習に取り組むことが経験的に知られている。この交流会では、卒業生から卒業後のキャリアと大学での学びとの関係を伝えてもらう場を準備するなど、学生に対して学びへの動機付けを与えるようなさまざまな工夫を行った。

このような学生と教員の協働により初年次学生向けの授業「研究の世界入門」の骨格が決まっていった。この授業では、学生が自由なテーマで研究を行い、その成果を論文にまとめ、研究発表を行うことを通して、研究遂行に必要な情報活用能力を習得するもので、京都大学の基本理念「教育」の自学自習促進・優れた研究者養成に合致するものとなっている。ここでは、研究する力を育成する情報教育を科学教育のひとつとして考えている。この科学教育で教員が教えることは、人文・社会・自然科学の研究で重要な役割を果たした思想である論理実証主義だけである。論理実証主義とは、因果法則の定式化とその実証についての方法論で、大きくは現象の因果関係を仮説により説明することと仮説の真偽を経験的データにより実証することから構成される²⁾。もともと自然科学に

おける方法論であったが、人文・社会科学においても採用されるようになった。このため、この授業は、全学部向けとしている。

本解説では、可視化技術を使って受講生の対話や学習意欲の向上を促すような科学教育の学習環境について述べる。まず、現在、我々が全学共通情報教育として実施している科学教育について説明する。次に可視化技術について説明したあと、可視化技術を使った科学教育学習環境についての提案を行う。

「研究の世界入門」について

研究の世界入門において、受講学生に数居が高い論理実証主義の考え方について、次のような 2 段階の説明を行っている。第 1 ステップとしては、アイデアを数量化可能な概念へ変換（仮説化）することである。たとえば、レベルの高い研究成果を生み出すための大学環境のあり方について関心を持ち、「自由な総合大学からは多くのすばらしい研究成果が生み出される」というアイデアをもったとする。この場合、仮説化例としては、「大学組織の集権化・専門化がすすむほど教員一人当たりの論文数はより少なくなる」ということである。第 2 ステップは、仮説における原因・結果の操作概念化アンケート質問項目への変換を可能とするための概念操作化を説明することである。この仮説では、2つの原因で1つの結果を説明することとなっている。この変換例では、原因 1：集権化・原因 2：専門化・結果：教員一人当たりの論文数については、それぞれ、質問項目として「必修科目が多いですか?」「学部の数が多いほうですか?」「教員は年間どの程度論文を出版していますか?」ということを例示している。

学生はそれぞれ立てた仮説に対する概念操作化の結果としてアンケートを作成し、クラス学生を対象としたアンケート調査を行う。クラス全体はグループに分けられ、グループ単位でアンケート調査を実施する。3つのグループがあったとすると1つのグループは、他の2つのグループにアンケート調査を依頼し、その2つのグループからのアンケート調査を引き受けることになる。このようなアンケート調査後、各学生は、クラスの学生数の3分の2程度の母数をもったアンケート調査結果を手に入れることとなる。アンケート調査が不要の仮説を立てた学生も存在する。仮説を検証するためには、アンケートとは別の手段で数値データを取得する。自家用車の燃費を車重・エンジン排気量で説明したいと思っている学生は、国土交通省が公開している数値データを取得することとなる。

仮説検証のための数値データを得た学生は、情報活用能力の主体的習得が期待される。グループ内で授業時間ごとにグループ学生向けに状況報告を行うことになっており、このため学生は情報活用能力の主体的習得を行うことになる。すなわち、自律的に表計算ソフトを使って、情報を整理・分析し、その結果をワープロソフトを使って論文形式のレポートにまとめたり、プレゼンテーションソフトを使ってわかりやすく説明を行うことを通して、適切な情報表現を行えるようになることが期待される。このクラスでは、これらソフトの操作方法について体系的に教える時間をとっていないが、とくに促していなくても高校段階でソフトの使用法を習熟した学生がそうでない学生にコ

一ちしている様子が確認された。

レポートの執筆においては段落の重要性がうまく伝わるように留意した。多くの学生が段落の意味をよくわかっていないようである。段落には、意味上の根幹をなすトピックセンテンスが存在し、そのほかのセンテンスはこの補足的な存在であることを体感できるようレポートの構想段階にはプレゼンテーションソフトでトピックセンテンスを書き込んでいき、つぎにそのレベルをひとつ下げてサポートセンテンスを書き込んでいくように指導した。その成果物は、成果発表における発表資料の作成の際の雛形として活用できるというメリットがある。ワープロソフトへ転記していく際、全体的に見てそのトピックセンテンスでよいのかどうかの吟味を行いやすいように、トピックセンテンスについては色を変えて表示しておくように指導した。

この授業の特長のひとつは、匿名性の査読を学生に課していることである。すなわち、査読者が匿名であるだけでなく、論文は論文番号で識別するようにし、著者名を記入させないようにした。論文草稿については、学生が1部印刷して、持参する。この場合、グループはアンケート調査対象というだけでなく、学生相互査読の対象ということでも重要な役割を発揮する。グループは、2つの顔をもつ。ひとつは編集委員会、もうひとつは投稿者集団である。クラスに2つのグループが存在すると、どのグループに査読されているのかが自明となるので3つ以上のグループが望ましい。どのグループがどのグループの査読を担当するかは教員が決定している。査読は、一般に、新規性・有用性・信頼性の観点で採録可能性を評価することになるが、最初の2つの観点は、実際の研究においては重要なものであるが、研究ベース学習では、論理実証主義を体験的に学ぶことに主眼をおくので、授業中に行う査読としては、仮説化がきちんと行われているかどうか・段落の構成が適切かどうかのチェックを中心に実施するよう指導した。

この授業では、大学の教育情報システムを使って簡便な査読支援システムを構築している。本システムでは、査読者からの査読結果を投稿学生に直接送付するのではなくクラス全体で査読結果をまとめてひとつのファイルとし、それをウェブ上でクラスメンバー限定で公開する。査読結果の内容を受けて、学生は、そこで示された条件をクリアするよう提出原稿を修正し、修正部分を明示する回答書とともに提出する。提出された回答書つき修正稿は査読学生に戻され、採録条件が満たされているかどうかの判断を行う。この際、グループ内で修正内容の適切さを審議し、きちんと対応なされていなければ、さらに修正依頼を行う。

修正作業終了後、プレゼンテーションソフトを用いた成果発表を実施する。成果発表はボトムアップで行う。まずグループ単位で行い、グループメンバーによる相互評価を経てグループ代表者を選考し、次に、クラスレベルでグループ代表者による成果発表を実施し、クラス学生による投票により最優秀発表者を決定する(図1右参照)。最優秀発表者には、学外での成果発表の機会が与えられる。この授業の目的に賛同してくれる民間企業に会場を提供いただきその企業の現役社員に対して講演を行っている。学生が先輩に対して講演を行うことについては心配であったが、聴講していただいた社員からは大変勉強になったとお褒めの言葉をいただいた。

以上のようなグループ学習を促進するために通常教室利用による協調学習環境を整備した。グループ学習を効果的に行うためには、パーティションを用いて集中度を高くし、また、メンバー間でワープロ・表計算・プレゼンテーション画面を共有するために、大型表示装置付稼働 PC を利用した(図 1 左参照)。また、クラス全体での成果発表や教員の講義・お知らせ、そしてテレビ会議システムの設置された他教室との共通演習用にタイルド表示装置を利用した(図 1 中参照)。タイルド表示装置は、通常の表示装置を複数枚タイル上に配置して高解像度を実現し、複数人数向けに情報を提示する。

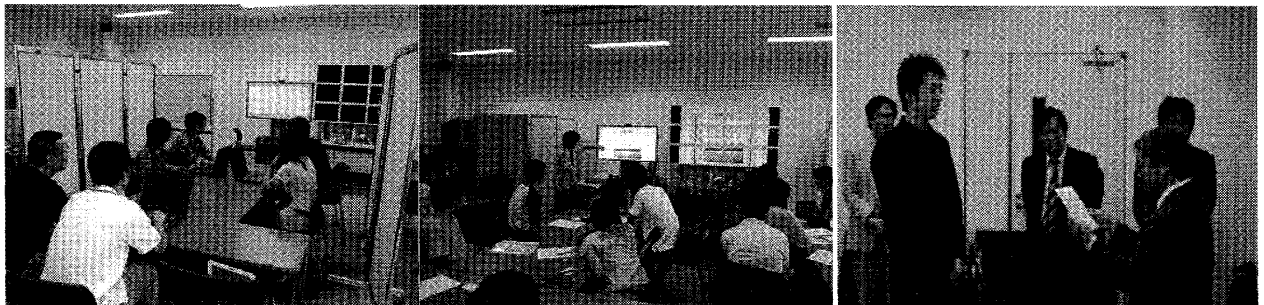


図 1 左:協調学習環境(グループ), 中:協調学習環境(クラス), 右:表彰式

グループ学習環境として MIT の Technology-Enabled Active Learning (TEAL) が有名である。この環境を用いた科学教育の評価について、学習前後における学習成果向上比を使った科学的手法を取り入れている³⁾。ヒトが認知能力をもたない磁力線を直感的に理解させるために可視化技術を使った教材を開発・利用している。TEAL では、磁力線の弦としての性質を理解させるための可視化コンテンツを開発・利用している。可視化は万人にとっての共通言語であり、数理モデルで物理現象を理解する上でのきっかけとなることが期待されている。

可視化技術について

可視化技術は 3 次元空間で定義された数値データ (ボリュームデータ) から目的に適った点・線分・面といった幾何データに変換し、それらをコンピュータグラフィックス技術により画像化する過程であると定義されることが多い。ボリュームデータでは、格子分割された空間において格子点で離散的に数値データが定義されている。その格子の規則性に応じて、構造格子・非構造格子と分類され、前者は、3 次元画像データ・有限差分法解析結果データとして、そして後者は、有限体積法・有限要素法解析結果データとして得られることが多い。

可視化の歴史は 1987 年からはじまる。この年、スパコン・計測装置から生成される数値データを効果的に活用するために可視化技術の開発が重要であるという所謂 ViSC レポート⁴⁾が出版され、多くの 3 次元可視化技術が開発された。重要な可視化技術がほぼ出揃った 2005 年には、可視化技術の意義・効能がきちんと議論されなければ世の中の役にたっていないとする VRC レポート⁵⁾が出版された。このレポートでは 2003 年までに生成された紙媒体を含むすべての情報の量は、それ以降 2005 年までに電子的に生成された情報の量よりも下回ってしまったという情報爆発の衝撃的な事実を伝えている。単に可視化して絵を作ったということではすまされない段階にき

ていると考える。

これまで開発された可視化技術を科学教育の教材に利用することが可能である。情報科学の講義として、たとえば可視化情報学という体系的な内容としてまとめることも可能である。可視化技術を別の教科の教育に利用することも物理法則や数学を使った可視化技術は、わかりやすい物理や数学の教材として適切だと考える

物理法則を利用した可視化技術

物理法則を利用した可視化技術としてボリュームレンダリングがある⁶⁾。ボリュームレンダリングはスカラボリュームデータを対象とした可視化技術で、各画素毎に視点を通過する視線上で輝度値方程式の計算により画素値を決定する。この輝度値方程式では視線に沿ってスカラ場に関する物理量を積分することになっており、多くの情報を盛り込んだ可視化画像の作成が可能となる。このボリュームレンダリングは医用画像診断装置から出力される3次元画像から筋肉・骨・血管・腫瘍に代表される病巣を可視化する効果的な手法として臨床現場で利用されている。また、流体シミュレーション結果において流れによって運ばれる物理量の全体分布を理解するうえで必要不可欠な可視化手法として利用されている。これらは初等物理学等々のわかりやすい教材になりえると考え

る。

ボリュームレンダリングでは、仮想的に与えられたスカラボリュームデータより画素の大きさに対して小さな直径をもつ粒子群を生成する。粒子は、不透明で発光する性質を持ち、その密度は一樣ではなく、重要とされる場所で高く、そうでない場所では低くなるように設定される。画素の値を計算する輝度値方程式では、視線を軸とする円筒を考え、そこに含まれる粒子による発光のうち視点に届くものを計算している。粒子の分布はポアソン分布を仮定しており、輝度値方程式中の指数項は当該粒子よりも視点側の円筒中に粒子がまったく含まれない確率を表している。この確率を透明度と呼ばれ、これを1から差し引いたものを不透明度と呼ぶ。粒子密度はこの不透明度の関数として表すことができるので、粒子密度を設定するには、不透明度の設定を行えばよい。この設定は、ボリュームレンダリングソフトウェアにおける伝達関数操作によって実現される。伝達関数は、スカラデータに対する粒子の発光強度と不透明度の関係を表現し、利用者により対話的に設定される。この設定により与えられたスカラ場より粒子密度場を設定したことになる。

ボリュームレンダリングでは、輝度値方程式を使って各画素値を計算することが多いが、設定された粒子密度を使って粒子群を生成し、これをそのまま画面上に投影してもよい。原則的には同様の可視化画像が生成されるはずであるが、ポアソン分布にしたがう粒子群では生成ごとに粒子位置が一意に決定されないため、連続性に欠ける画像となる。この問題を解決するために、同じ粒子密度を使って複数回粒子群を生成し、その結果得られた画像を保存しておき、これらを平均化することにより最終画像を得るようにすればよい⁷⁾。これは、衛星画像のノイズ除去のために行われるアンサンブル平均と同様の処理と考えてよい。

数学を活用した可視化技術

ボリュームレンダリングは、3次元空間を俯瞰して全体的な理解を促進する可視化手法であるの
にたいして、数学を活用して分析的に可視化する手法を、スカラ・ベクタ・テンソルデータごとに
紹介する。これらは微分位相幾何学等のわかりやすい教材になりえると考ええる。

ボリュームレンダリング以外でスカラボリュームデータに対する可視化手法として等値面表示技
術がある。等値面とは、スカラボリューム中であるきめられたスカラ値をもつ点の集合として定義
され、一般に曲面となる。等値面を表示するには、ボリュームデータを構成する格子毎に等値面を
抽出し、その抽出処理をすべての格子で行うことにある。格子の数が多くなってくると、等値面と
交差する格子の数は、格子総数に比べて、十分小さくなるが、格子と等値面の有無判定をすべての
格子に対して行っていると表示時間の増大につながる。このため、等値面と交差している格子だけ
を処理の対象とする手法の重要性が理解できる。いくつか手法が提案されているが、そのうちのひ
とつを紹介する⁸⁾。いま等値面と交差する格子がひとつ見つかっていると仮定すると、等値面と格
子面との交差を計算し、交差のない格子面と隣接する格子は処理の対象からはずすようにすれば、
等値面表示の高速化が期待できる。この場合、最初に等値面と交差する格子をどのように特定する
かが重要な技術となる。スカラボリュームからスカラ勾配がゼロとなる特異点を生成しておき、そ
れらを勾配ベクタ場に沿って接続した特異点グラフを使って、このシード格子の特定を容易にする
手法の提案を行っている。

ベクタボリュームでは、流線表示がよく利用される。流線は、接線がその点におけるベクタデー
タと平行となるような曲線であり、適当な開始点よりベクタデータを積分することにより求められ
る。等値面同様、格子単位で流線を計算し、脱出点をもつ格子面を通して隣接する格子で出口を進
入点と見なして流線を計算する。これを繰り返して、ボリュームデータの境界かまたは速度ゼロと
なる点、すなわち特異点に到達した段階で計算を終了する。流線を使った可視化では開始点の選択
が重要である。適切な開始点を選択しないと、例えば、渦を探したい場合には、多くの試行錯誤を
繰り返すこととなる。渦を可視化する場合であれば、まず、ベクタボリュームで特異点を探索し、
つぎにその特異点まわりに流れ場を線形近似することにより、特異点の分類を行い、渦中心と分類
された特異点付近に開始点を配置して流線を描画することにより効果的に渦を可視化することがで
きる⁹⁾。

テンソルボリュームは、テンソルデータをベクタやスカラに変換して、それぞれベクタデータ・
スカラデータ用可視化技術を使うことが多い。よく用いられるのは、テンソルの固有値・固有ベク
タを利用することである。医用画像計測装置の機能が高まり、気軽に拡散テンソル画像を撮影する
ことができ、非侵襲で脳の神経線維を可視化することが可能となっている。神経線維を可視化する
には、テンソルの最大固有値に対する固有ベクタについて流線を描画することとなる。固有ベクタ
には方向の任意性があるので、格子内部で固有ベクタの補間を行うときは注意が必要である。計測
装置の機能が高まっても撮像の解像度がまだまだ荒く、ひとつの画素に100程度の神経線維が通過

する程度なので、格子で神経線維が交差するケースをうまく処理できない場合がある。神経線維の方向がきちんとそろっている場合には格子において固有値の最大値が突出して大きい、交差してしまう場合には、最大固有値とその次の固有値の大きさに差が余りない状態となる。このような格子を特定するには、最大固有値とその次の固有値の大きさが等しくなってしまうような点とその格子に存在するかどうかを調べる。このような点を縮退点¹⁰⁾といい、その探索手法の開発は可視化研究のテーマとなっている。

可視化技術を活用した科学教育

このような可視化技術を活用した科学教育を考える場合、その効果を評価する仕掛けが必要となる。可視化の効能とは何かについては、可視化の意義に関心をもつ多くの可視化技術研究者の興味を捕らえはじめている。

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¹¹⁾。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を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1億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。

この可視化の効能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。可視化の効能の定性的な側面は、気づきがおきやすいということである。脳科学学者茂木一郎により広く世に知れたアハ体験では、脳を鍛えるゲームのも世に出ており、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。神経細胞がつなぎかわって、「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。3つの単語からある単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¹²⁾。

今後、科学教育環境のひとつの実現例として、可視化技術を使った論理実証主義の学習環境を考

えたい。この環境では、可視化された現実と理想がうまく対比できるように提示され、その差を認識して、グループメンバーの対話や学習意欲の向上を促し、有効な仮説の発想に結びつけることを期待する。具体的には、自然科学の領域では、実験観察結果から得られるリアル映像とそのシミュレーションモデルの計算結果から得られるバーチャル映像がオンデマンドで取り出せ、さらにそれらを対比できる形で可視化表示するような環境である。前者は現実、後者は理想に対応しており、複数人数向けに提示する場合には、タイルド表示装置を活用することが重要である。

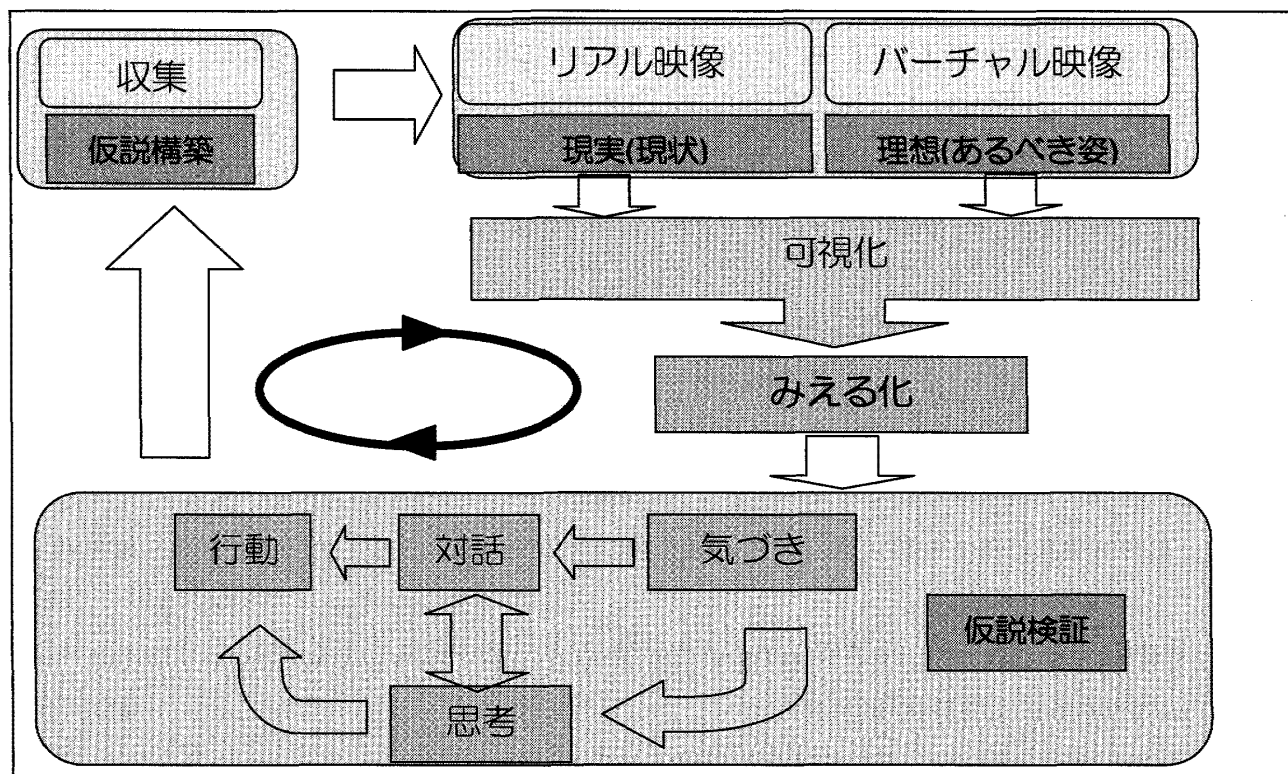


図2 研究する力をはぐくむ情報教育における可視化技術の役割

参考文献

- 1) 吉安亮介, “京都大学教育交流会プロジェクト・活動報告” 共通教育通信, Vol.5, 2005 (<http://www.z.k.kyoto-u.ac.jp/pdf/link/link0189.pdf>)
- 2) 坂下昭宣, “社会科学方法論” (http://mba.kobe-u.ac.jp/eureka/2003/030725/life/syllabus/survey_research.pdf)
- 3) Y. Dori and J. Belcher, “How Does Technology-Enabled Active Learning Affect Undergraduate Students’ Understanding of Electromagnetism Concepts?,” THE JOURNAL OF THE LEARNING SCIENCES, 14(2), 243-279, 2005
- 4) B. McCormik, T. DeFanti and M. Brown, Visualization in Scientific Computing, National Science Foundation, 1987.
- 5) C. Johnson and et.al, “NHI-NSF Visualization Research Challenges,” 2006 (<http://www.merl.com/papers/docs/TR2006-118.pdf>)
- 6) P. Sabella, A Rendering Algorithm for Visualizing 3D Scalar Field, Computer Graphics, 22(4), 51-58, 1988.
- 7) 小山田耕二, “アンサンブル平均による非構造格子向けボリュームレンダリング,” 信頼性, 31(6), 262-269, 2009
- 8) T. Itoh, and K. Koyamada, “Automatic Isosurface Propagation by Using an Extrema Graph and Sorted Boundary Cell Lists,” IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 1(4), 319-327, 1995
- 9) K. Koyamada and T. Itoh, “Seed Specification for Displaying a streamline in an Irregular Volume,” Engineering with Computer, 14, 73-80, 1998
- 10) X. Zheng, B. Parlett, and A. Pang, “Topological Lines in 3D Tensor Fields and Discriminant Hessian Factorization,” IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 11(4), 395 - 407, 2005
- 11) 遠藤功著 “見える化強い企業をつくる「見える」仕組み” 東洋経済
- 12) M. J. Beeman, and et.al, “Neural Activity When People Solve Verbal Problems with Insight,” PLoS Biol 2(4): e97.