第４章　学習評価の多様性

# 4.1　生理データを用いた学習評価

寺尾　敦

「生理データを用いた学習評価」というこの節のタイトルは，かなり奇妙に思われるかもしれない。学習評価あるいは教育評価という言葉からただちに連想されるのは，テストを用いて学習者の知識やスキルを評価することであろう。学習評価の目的や対象は広範囲におよぶので，テストが学習評価における万能の道具であると考える人はいないだろう。それでも，生理データと学習評価の間には，かなり距離があるように感じられるに違いない。この節では，情意的側面からの学習評価と，認知的な側面からの学習プロセスの理解のために，生理データが有益な情報を提供するということを示す。

## 4.1.1 学習評価に利用可能な生理データ

これまでの学習評価研究で利用されてきた，あるいは，今後利用が期待される生理データには，いくつかの種類がある。**図4-1-1**に示すのは，中山（1993）および中山・清水（2000）による生体反応情報の分類を参考にして，学習評価研究に利用可能な，主な生理データを分類したものである。

学習評価のために測定する生体の活動は，脳活動，眼球運動，自律神経系の活動に大別できる。脳活動は，神経細胞の活動によって生じる電場あるいは磁場を計測するか，代謝あるいは血流を計測することで捉えることができる。脳の電場（電位）を計測した生理指標として脳波およびERP（event-related potential：事象関連電位），脳の磁場を計測した指標としてMEG（magnetoencephalography; 脳磁図），代謝あるいは血流の観測方法としてPET（positron emission tomography; ポジトロン断層法），fMRI（functional magnetic resonance imaging; 機能的磁気共鳴画像法），NIRS（near infrared spectoroscopy; 近赤外分光法）がある。眼球運動を計測した生理データとして，眼球移動（注視点の移動），瞬目，瞳孔反応のデータがある。自律神経系の活動は，心臓血管系反応のデータ（心拍など）や，精神性発汗のデータ（直接に計測された発汗量，あるいは，発汗に伴う皮膚電気活動の変化）を提供する。

**図4-1-1**　**学習評価に利用可能な生理データの分類**

## 4.1.2　テストの限界と生理データへの期待

やや単純化していえば，テストによる学習評価は，何らかの学習領域において，学習者は「何ができるか」，あるいは，「どの程度できるか」を明らかにするものである。行動主義の立場では表出される行動に，認知主義の立場では知識に焦点があてられるというように，評価の理論的背景の違いによって測定の目的や対象は異なるけれども，「何ができるか」あるいは「どの程度できるか」を明らかにしようとしている点は共通である。社会的構成主義あるいは状況的学習論を背景にして，従来のテストを批判し，真正な評価（authentic assessment）を求める立場も，これら２つを明らかにしようとしていることには変わりがない（学習評価およびその背景にある理論の歴史的変遷については，植野，2010を参照してほしい）。学習者ではなく，教材，教育内容，教師，学校といった，学習者をとりまく環境を評価することも学習評価に含まれるが，中核的な関心の対象はやはり学習者である（梶田，1992，序章）。

テストの大きな限界のひとつとして，テストは知識やスキルといった学習者の認知的側面を主に評価するものであって，情意的側面（関心，興味，意欲，態度など）を評価することは難しいということが指摘できる。20世紀の後半に，ブルーム（Benjamin S. Bloom）を中心としたアメリカの教育心理学者により，教育目標の分類体系（taxonomy of educational objectives）がまとめられた（Bloom, 1956; ブルーム／ヘスティングス／マドゥス，1973; Krathwohl, Bloom, & Masia, 1964）。この分類体系では，教育目標を，認知的領域（cognitive domain），情意的領域（affective domain），精神運動的領域（psychomotor domain）に大別し，それぞれの領域において達成されるべき教育目標の系列を示している（梶田，1992，第５章）。主に運動学習での教育目標体系を示す精神運動的な領域はここでの議論から外すとしても，テストで評価できるのはほとんどが認知的領域の目標達成であり，教育目標全体から見れば半分にすぎない。

生理データは，テストで評価することが難しい，学習者の情意的側面を評価するために用いることができるのではないかと期待されている（本間，1984，1987; 堀，1980; 永塚・清水，1993; 中山・清水，2000; 梅沢，1998）。現在のところ，生理データを利用した情意的側面の評価は，テストのように広く普及しているわけではない。学校教育においては，ほとんど行われていないといってよい。しかしながら，情意的側面の評価における生理データの有用性を示す研究はかなり蓄積されている。こうした研究をいくつか紹介する。

## 4.1.3　生理データによる情意的側面の評価

生理データは，実験室において，１人の実験参加者から個別に計測することが一般的である。驚くべきことに，生理データを用いて学習者の情意的側面を評価しようとする初期の試みは，実際の授業場面で行われている。

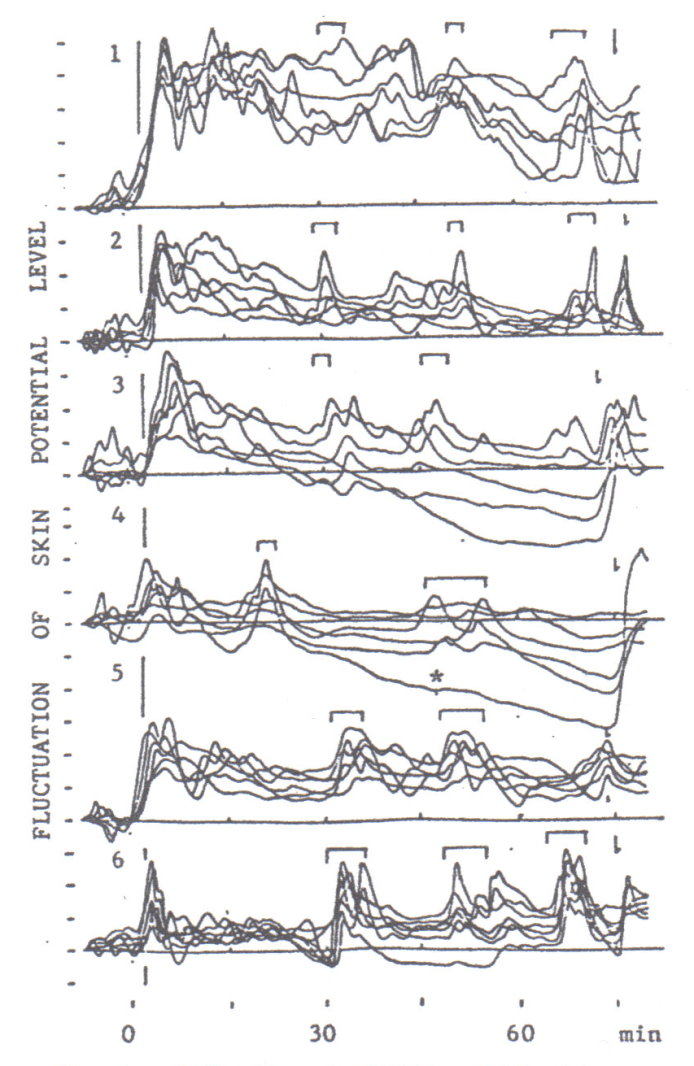
堀（1980）は，自身が担当する心理学の講義において，受講者の皮膚電気活動（electrodermal activity; EDA）を計測し，講義の進行にともなう学習者の情意的側面における変化（授業内容への興味・関心や，緊張・興奮の程度）を検討している。皮膚電気活動は，心理的な緊張によって生じる発汗（精神性発汗）を電気的にとらえたものである。交感神経支配下の汗腺活動を電気的に測定して，測定対象者の情動状態，認知活動，情報処理を評価する（山崎，1998）。授業中における皮膚電気活動の変化は，生徒の注意，集中度，緊張の程度などを反映する。皮膚電気活動は皮膚上で電気的に測定されるさまざまな指標の総称名詞である。堀（1980）は，皮膚の電位変化である，皮膚電位反応（skin potential response）と皮膚電位水準（skin potential level; SPL）を測定し，主に皮膚電位水準の測定から得られた知見を報告している。皮膚電位水準は，注意，集中，不安，緊張，興奮の高まりによって陰性方向に変動し，安静，弛緩，睡眠で陽性方向に変動する。また，授業の中断や終了など，場面の急激な変化に対応して陰性方向に変動する。生体電位の時系列変化を示すグラフは伝統的に上側を陰性として描かれることが多い。堀（1980）の提示している図もこの描き方に従っているので，陰性方向への変動を「上昇」，陽性方向への変動を「低下」と呼ぶ。

学習心理学という講義で６名の学生から記録されたSPLのデータを**図4-1-2**に示す。６枚のパネルはそれぞれ１回の講義に対応し，６名それぞれのSPLの変化（講義開始７分前を基準とする変動。縦軸の目盛りは2mV）を示すグラフが重ねて描かれている。横軸は経過時間であり，パネル番号横の縦線で講義開始時点を，パネル右上の矢印で講義終了時点を示している。グラフの上に示された ⊓ マークは，学生の注意を喚起するための学習活動（まとめ，質疑，討論など）が行われた時間帯を示している。上から４枚目のパネルでSPLが著しく低下したグラフの近くに打たれている \* マークは，生理データの記録とともに行われた行動観察によって，この学生が睡眠状態と判定された時点を表している。

**図4-1-2**でのSPLの変化は講義に対する学生の心理状態の変化を表していると考えられる。講義が始まるとSPLは上昇し，講義に参加しようとしていることがうかがわれる。しかし，講義への興味・関心を維持することは難しく，SPLが次第に低下するパターンがしばしば観察される。質問やまとめによって注意を喚起すればSPLは一時的に上昇するが，注意喚起の効果がほとんど見られないこともある。講義中に眠ってしまった学生は，行動観察によって睡眠状態と判定されるよりかなり前（**図4-1-2**のデータでは15分ほど前）からSPLが直線的に低下している。生理データの記録とともに行われた行動観察において「活発で全員が積極的に取り組んでいる」という判断がなされた時間帯には，SPLにもこれに対応した変化が見られた。

堀（1980）は，皮膚電気活動のデータから受講者の心理状態を解釈するだけではなく，データを授業改善のためのヒントとして活用している。例えば，**図4-1-2**での５回目の講義では，第４回の講義内容が多すぎたことを反省し（主にOHPを使用），板書を丁寧に行ってノートをとらせるようにした。また，講義開始後40分ぐらいでSPLが低下することに注目して，この時間帯に事例の吟味と討論の時間を約10分ずつ２回設けた。その結果，板書をノートにとっていた時間帯には比較的高い覚醒水準が維持された。事例検討と討論では，ほぼ全員の覚醒水準が上昇した。こうした授業改善の試みは，生理データによる形成的評価を行っているといえるのではないだろうか。学習評価の観点から，非常に興味深い試みである。

皮膚電気活動の測定により，実際の授業場面での学習者の情意的側面の評価を試みた研究をもうひとつ紹介する。本間（1984, 1987）は，１学級の児童全員（最大で40人まで）の皮膚抵抗反応（skin resistance response: SRR）を同時測定できる装置を開発し，さまざまな授業で計測を繰り返して得られた多くの知見をまとめて報告している。SRRは皮膚電気抵抗の一過性の急激な変化である。本間の開発した測定装置は，授業中の児童の活動を妨げずに，児童全員の反応が把握できるように工夫されている。SRRは児童の指につけられた電極（使い捨ての細いアルミテープをはりこんだ紙の絆創膏）で検出し，小さな無線発信機で送信する。発信機はベルトで取りつけられるので，授業中に子どもがどれほど動きまわっても問題ない。受信機で受信された信号は個人の状態を示すランプの並んだ表示盤に送られる。ある一定水準以上のSRR反応が得られると，その児童に対応するランプが点灯する。ランプの点滅状況とSRR波形は記録紙に出力される。



**図4-1-2**　**心理学の講義において記録された６名の学生のSPLの変化**

（出所）堀（1980）より。

本間（1984, 1987）による一連の研究の特徴は，集団的に現れるSRRをとらえている点にある。授業中のSRRは，個人それぞれに独立に起こるのではなく，集団的に連動して生じた。この集団は，学級全体のこともあるが，一般的には空間的にまとまった位置にいる児童集団であった。例えば，音楽の合唱では，特定のパートを担当する集団ごとに，特定のパターンのSRRが出現した。集団は，合唱のパートのようにあらかじめ作られたものではなく，自然に発生することも多かった。例えば，SRRの出現が，教室の前半分と後ろ半分に分かれたり，右半分と左半分に分かれたりした。本間（1984, 1987）は，SRRの出現頻度と学級の雰囲気が対応していると述べている。SRRの反応が多いことは，観察記録や教師の印象において，児童が授業によく入り込んでいるとか，教師の働きかけに対する反応がよいと判断されることと，よく一致した。

学習者の情意的側面の評価に利用可能な生理的指標は皮膚電気活動の他にもいくつかある（**図4-1-1**）。例えば，精神性発汗量（河崎ら，1994），瞬目（小孫・田多，1999, 2000），瞳孔面積（村井・中山・清水，1998; 永塚・清水，1993; 清水・近藤・前迫・熊谷，1987），心拍数（上月，1986; 小孫・田多，1999; 永岑・室田・石井・清水，2002），脳波（永塚・清水，1993; 山口・山口, 2002）などが利用されてきた。これらの指標を用いて学習者の情意的側面の評価を行った研究をいくつか簡単に紹介する。

河崎ら（1994）は，小学6年生21名に，分数の計算問題を７問提示して，課題解決中の精神性発汗量を測定した。誤答の多い問題では総発汗量が多くなったことから，総発汗量は課題困難度を示していると解釈された。また，誤答の多い問題では単位発汗量（１秒あたりの発汗量）が少なくなったことから，単位発汗量は問題に対する集中度を示していると解釈された。したがって，単位発汗量が少なく，総発汗量の多い問題は，その学習者にとって難しく，集中して解答できなかった問題であると解釈された。課題困難度は，学習者の情意的側面を評価したものではなく，課題の特性であると思われるかもしれない。しかし，難しい問題では学習者は精神的な負担を感じるはずだから，これも情意的側面の評価であると考えられる。もう少し一般的には，メンタルワークロード（mental workload）を評価しているといってよい。メンタルワークロードとは，精神的な作業負荷の総称であり（大須賀・寺下，1998），作業自体が原因となるつらさや，しんどさ，心的疲労，ストレスなどを表す構成概念である（山田，1998）。

小孫・田多（2000）は，課題の困難度と注意の方向が，瞬目活動に及ぼす影響を検討した。ハノイの塔を解決した経験のない17名の大学生が，この問題のさまざまなバリエーションに取り組んだ。円盤をイメージで操作する課題（内的注意課題）では，円盤の実物を操作する課題（外的注意課題）に比べ，瞬目率が高かった。円盤をイメージで操作する課題でも実際に操作する課題でも，課題の困難度が高くなると瞬目率が増加した。小孫・田多（2000）は，瞬目は課題困難度および注意の方向の指標として有効であり，教育評価に利用できる可能性があると主張している。瞬目によって評価される課題困難度は，河崎ら（1994）が発汗量を用いて評価した課題困難度と同じく，メンタルワークロードを反映していると考えられる（竹田，1993）。

永塚・清水（1993）は，男子学生４名に，風景写真と女性タレントの写真を提示し，瞳孔面積と脳波を同時に測定した。風景写真に比べ，女性タレントの写真に対しては，瞳孔面積が大きくなり，頭頂部（Pz）でのα波帯域パワーが小さくなった。また，頭頂部から後頭部にかけて，α波帯域でのピーク周波数が高くなった。男子学生は風景写真よりも女性タレントの写真に興味を持つと仮定すると，こうした生理的変化は興味や関心の高まりの指標となると言える。

永岑ら（2002）は，４桁の整数から13を連続して引くという課題を繰り返し用いて，情動の主観測度，生理指標（心拍），行動測度の対応を検討した。７名の男子大学生が２回の実験セッションに参加した。２回目の実験セッションは１回目の実験セッションの１ヵ月半後に行われた。それぞれの実験セッションでは，５分間の安静に続いて５分間の課題遂行という実験試行が５回繰り返された。参加者は，それぞれの実験セッションの最初と最後に，「緊張感」「努力」「集中」などの情動評価を行った。心拍数は，安静時に比べ，課題遂行時に上昇した。心拍数は交感神経の賦活と副交感神経の活動低下によって上昇するので，参加者は暗算課題に対して能動的対処を行ったと考えられた。１回目の実験セッションと２回目の実験セッションを比較すると，２回目の実験セッションでは課題遂行時の反応時間（１回の引き算に要する時間）が短く，心拍数が少なかった。この変化は「緊張感」の低下に対応するものとして解釈された。

## 4.1.4　生理データの解釈の問題

生理データを用いた学習評価で最も注意しておくべきことのひとつは，評価はデータの解釈に基づいているということである。生理データそのものは測定者の主観の入る余地がない客観的データである。しかし，そのデータが何を意味しているかの理解は，分析者の解釈である。類似した生理データが類似した情動や認知を反映しているとは限らない。例えば，皮膚抵抗反応（SRR）は，環境に対して学習者が肯定的である場合にも拒否的である場合にも出現する（本間，1984）。

生理データを解釈するために，行動指標や主観測度との対応がしばしば検討される。課題分析も生理データを解釈するための有効な根拠となる。例えば，授業において学習者集団の皮膚電気活動を測定した堀（1980）および本間（1984, 1987）は，生理データは学習者の様子や教室の雰囲気を反映していると述べている。永岑ら（2002）が２回目の実験セッションでの心拍数の低下を緊張感の低下として解釈した主要な根拠は，心拍数の変化と緊張感の評定値の変化に高い相関が認められたことにある。問題解決中の瞬目を測定した小孫・田多（2000）による研究では，課題分析が容易なハノイの塔課題を用いることで，課題の困難度の指標として瞬目データを解釈することが容易になっている。行動指標，主観測度，課題分析は，生理データの解釈の妥当性を高めることに寄与する。

しかしながら，生理データと他の指標によるデータとの間には，必ずしも対応関係が認められないかもしれない。学習評価に関しては，情意的側面を行動測度や主観的測度で評価することが難しいからこそ，生理データに期待が寄せられている。他の指標でわかることならばわざわざ生理的測定を行う意味は小さいかもしれない。明示的な行動反応や主観的評価を要求しなくても測定できるのが生理指標の利点のひとつだから（入戸野，2005，第２章２節），他の指標によるデータは得られていないかもしれない。あるタイプの障害児のように，言語や表情から情動的な変化を読み取ることが難しく，行動データがほとんど得られない場合もある（上月，1986）。

学習評価という大きな目標を見失わないことが重要である。入戸野（2005，p.35）は，主観，行動，生理という３つの測度は，それぞれが心理活動の独自の側面を反映しており，他の測度で代用できるものではないと述べている。これら３つの測度は，共通の心理活動を反映している部分もあれば，異なった心理活動を反映している部分もある。それぞれの測度の性質を生かして，学習者や学習活動の理解に役立てるべきである。

## 4.1.5　生理データによる学習プロセスの理解

学習者の示す行動（例えば，算数の問題に対する解答）を理解するためには，その学習者の持つ表象と，実行された手続き（方略やアルゴリズム）を明らかにする必要がある。学習者は，提示された課題の表象を構成し，その表象に次々と操作を加えて，最終的な産物にたどりつく。課題表象は，操作される対象であるのみならず，問題解決を方向づける役割も持っている。20世紀中ごろに認知科学が成立してから，こうした学習者観は広く認められている。認知科学の立場での学習評価は，学習者が持っている表象と，学習者が使用している情報処理方略という視点から，学習における進歩を表現する（ブルーアー，1997，p.234）。

学習者の持つ表象と実行された手続きを明らかにするために，生理データを利用することができる。特に，fMRI（functional magnetic resonance imaging; 機能的磁気共鳴画像法）によって得られるデータは，この目的にかなっている。賦活部位が特定できることから，課題遂行において用いられた表象を推測することができる（Dehaene et al. 1999; Masataka et al. 2007）。fMRIの時間分解能は高くないが，それでも詳細な課題遂行プロセスを説明する認知モデルの妥当性を示すことができる（Anderson, 2005; Andersonほか，2008）。もちろん，認知的な学習評価に利用可能な生理データはfMRIによるものだけではない。ERPやNIRSなど，他の手法にも期待が寄せられていることを付記しておく（舩田・舩田・渋川・赤堀，2011; 黒田，2007）。

**(1) 数の表象**

数の処理を遂行中の脳活動を，fMRIを用いて計測した研究から，数の処理には頭頂葉にあるいくつかの領域が関与していることが明らかになった。数の処理で賦活する頭頂葉の部位の多くは，空間的処理への関与が示されてきた部位でもある（Dehaeneほか，1999）。Dehaene et al. (2003) は，数処理に関する研究をレビューして，頭頂葉にある３つの領域が数の処理を担っていると主張した。彼らによれば，左右両側の頭頂間溝（intraparietal sulcus）には，数量に固有の表象システムがある。これは心理学者が心的数直線（mental number line）と呼んできたものに相当する。このシステムを，数の言語的操作を行う左半球の角回（angular gyrus）と，心的数直線の上での空間的注意を担う両側の後上頭頂小葉（posterior superior parietal lobule）が補助する。

Masatakaほか（2007）は，ローマ数字（例えば，CMXCIX）の学習にともなって，活動する脳部位がどのように変化したかを報告している。この実験では，ローマ数字の読み方を知らないとき，ローマ数字の読み方を教えられた直後（まだうまく読むことはできない），ローマ数字の読み方を２時間にわたって訓練した後，さらに訓練を重ねて困難なくローマ数字を読めるようになった後の，４回の計測が行われた。１回目から３回目までの計測は同じ日に，４回目の計測はその２カ月から３カ月後に行われた。

呈示される刺激が学習者にとって単なるアルファベットであった段階（１回目の計測）に比べ，刺激が数字としての意味を持つようになった段階（２回目）で，頭頂葉の活性化が明確に認められるようになった。アルファベットであった刺激に数字としての意味が付与されたことで，数の表象を担うシステムが起動したと考えられる。この段階（２回目）では，実験の参加者はまだローマ数字をうまく読むことができていない。それでも，数の表象を担うシステムは働いており，学習が進められていると考えられる。

数の処理が（少なくもその重要な一部は）空間的な表象や処理に基づいて行われているという知見は，数や演算の理解における心的数直線（空間的表象としての性質を持つ）の重要性を強調する学習指導（例えば，Griffin, Case, & Siegler , 1994）に，新たな裏づけを与える。

**(2) 学習の認知モデルの検証**

認知アーキテクチャの理論であるACT-R理論を長年にわたって発展させてきたJohn Anderson は，fMRIを利用して詳細な認知モデルの妥当性を検証するという，斬新なアプローチの研究を行っている（Anderson, 2005; Andersonほか，2008）。このアプローチでは，ACT-R のモデルから fMRI の信号変化を定量的に予測し，実際のfMRIデータとの対応をとることで，モデルの検証を行う。

近年のACT-Rのアーキテクチャは，脳の異なった部位に対応づけられた，いくつかのモジュールを仮定している。例えば，大脳基底核に対応する手続き的モジュール，前帯状皮質に対応するゴールモジュール，前頭前皮質に対応する宣言的モジュールなどが仮定されている。ACT-Rのモデルは，これらのモジュールにおいて，いつどのような認知的処理が行われるかを示す。こうしたモデルから，モジュールに対応する脳部位での信号変化が導かれる。

Anderson（2005）は，代数方程式（例えば，）の学習において生じる変化を説明するACT-Rモデルを提示し，fMRIのデータを用いた検証を行った。11歳から14歳の10人の生徒が，１日５時間ずつ，６日にわたって代数方程式を解く練習を行った。２日目と６日目の訓練はfMRIの実験として行われた。訓練にともなって，問題解決に要する時間は短くなっていった。学習の初期段階では，生徒は方程式の解き方についての教示をひとつひとつ検索し，それを解釈して，必要な式変形を行うと考えられる。ACT-Rモデルはこうした問題解決プロセスを表現している。このモデルによれば，学習にともなう解答時間の短縮は２つの変化によるものである。まず，練習を繰り返すことで情報検索が速くなる。さらに重要な変化として，教示の検索と解釈の繰り返しが，単一のプロダクション・ルールに変化する（production compilationと呼ばれる。学習初期および後期のモデルから予測されるfMRI信号は，学習２日目および６日目に行われたfMRI実験において，それぞれのモジュールに対応する脳部位から得られたfMRI信号と非常によく適合した。

　ACT-Rによる学習や問題解決のモデルが検証されることは，知的チュータリングシステム（intelligent tutoring system）が行う学習評価に役立つ。ACT-Rの認知モデルは算数・数学領域での知的チュータリングシステムの基盤を提供してきた（Koedinger & Corbett, 2009）。こうしたチュータリングシステムは，認知モデルに基づいて，学習者の使用した方略や学習者が獲得した知識を評価する。モデルが妥当であれば，チュータリングシステムが行うこうした学習評価も妥当なものとなる。

**引用文献**

Anderson, J. R. (2005) “Human symbol manipulation within an integrated cognitive architecture”, *Cognitive Science*, **29**, pp. 313-341.

Anderson, J. R., Carter, C. S., Fincham, J. M., Qin, Y., Ravizza, S. M. & Rosenberg-Lee, M. (2008) “Using fMRI to test models of complex cognition”, *Cognitive Science*, **32**, pp. 1323-1348.

Bloom, B. S. (Ed.) (1956) *Taxonomy of educational objectives. Handbook I:Cognitive domain*. New York: David McKay Company.

ブルーム, B. S., ヘスティングス, J. T., マドゥス, G. F.（著）梶田叡一・渋谷憲一・藤田恵璽（訳）(1973) 『教育評価法ハンドブック―教科学習の形成的評価と総括的評価―』第一法規．

ブルーアー, J. T.（著）松田文子・森敏昭（監訳）(1997) 『授業が変わる―認知心理学と教育実践が手を結ぶとき』北大路書房．

Dehaene, S., Piazza, M., Pinel, P., & Cohen, L. (2003) “Three parietal circuits for number processing”, *Cognitive Neuropsychology*, **20**, pp. 487-506.

Dehaene, S., Spelke, E., Pinel, P., Stanescu, R., & Tsivkin, S. (1999) “Sources of mathematical thinking: Behavioral and brain-imaging evidence”, *Science*, **284**, 970-974.

舩田眞里子・舩田忠・渋川美紀・赤堀侃司 (2011) 「正答率で定義した反復学習効果の事象関連電位による推定」『日本教育工学会論文誌』，**35**，193-203．

Griffin, S. A., Case, R., & Siegler, R. S. (1994) “Rightstart: Providing the central conceptual prerequisites for first formal learning of arithmetic to students at risk for school failure”, In K. McGilly (Ed.), *Classroom lessons: Integrating cognitive theory and classroom practice*. MIT Press.

本間明信 (1984) 「授業における思考と情動とのかかわりおよびその集団的相互作用：生理指標としての授業GSR」『日本教育工学雑誌』，**8**，97-106．

本間明信 (1987) 「生理情報による教材の評価」 放送教育開発センター（編） MME研究ノート第44号『教育番組のタクソノミー開発―番組分析と視聴行動の研究―』（pp. 79-89）

堀忠雄 (1980) 「生理心理測定による教授・学習過程の分析」『福井大学教育学部教育実践研究指導センター紀要』，**4**，48-58．

梶田叡一 (1992) 『教育評価[第２版]』有斐閣．

河崎雅人・小西忠孝・高島征助・坂口正雄・亀井智成・中島浩二・大橋俊夫 (1994) 「精神性発汗量を用いた分数計算能力の評価」『信学技報』，**ET94-111**, 63-70.

Koedinger, K. R., & Corbett, A. (2009) 「Cognitive Tutor：テクノロジーが教室に学習科学を実現する」ソーヤー, R. K.（編）森敏昭・秋田喜代美（監訳）『学習科学ハンドブック』培風館，第５章（pp. 53-65）．

小孫康平・田多英興 (1999) 「連立方程式の解答に伴う瞬目と心拍の変化」『日本教育工学会論文誌』，**23**，47-57．

小孫康平・田多英興 (2000) 「瞬目を指標とした「ハノイの塔」問題解決時の課題困難度と注意の評価」『日本教育工学会論文誌』，**24**，83-92．

上月節子 (1986) 「心身障害児のテレビ視聴時における生理・心理反応」『日本教育工学雑誌』，**10**，31-42．

Krathwohl, D. R., Bloom, B. S., & Masia, B. B. (1964) *Taxonomy of educational objectives. Handbook II:Affective domain*. New York: David McKay Company.

黒田恭史 (2007) 『脳科学の算数・数学教育への応用』ミネルヴァ書房．

Masataka, N., Ohnishi, T., Imabayashi, E., Hirakata, M. & Matsuda, H. (2007) “Neural correlates for learning to read Roman numerals”, *Brain and Language*, **100**, 276-282.

村井真樹・中山実・清水康敬 (1998) 「テレビ番組視聴時の瞳孔面積と画像内容への興味・印象との関連」『映像情報メディア学会誌』，**52**，1748-1753．

永岑光恵・室田真男・石井源信・清水康敬 (2002) 「繰り返しの暗算課題遂行における緊張感と心拍数の変化」『日本教育工学雑誌』，**25**，237-245．

永塚守・清水康敬 (1993) 「視覚刺激による瞳孔面積と脳波の変化」『電子情報通信学会論文誌』，**J76-A**，1351-1358．

中山実 (1993) 「生体反応情報による効果測定」 清水康敬（編）『教育システム工学　第２巻　教育情報メディアの活用』第一法規，第２章（pp. 19-40）．

中山実・清水康敬 (2000) 「生体情報による学習活動の評価」『日本教育工学会論文誌』，**24**，15-23．

入戸野宏 (2005) 『心理学のための事象関連電位ガイドブック』北大路書房．

大須賀恵美子・寺下裕美 (1998) 「メンタルワークロードの生理心理学的研究」山崎勝男・藤沢清・柿木昇治（編）『新 生理心理学　３巻　新しい生理心理学の展望』北大路書房，第11章（pp. 116-125）．

清水康敬・近藤俊一・前迫孝憲・熊谷龍 (1987) 「瞳孔面積測定装置の開発と心理的変化に関する一検討」『日本教育工学雑誌』，**11**，25-33．

竹田眞理子 (1993) 「問題解決と眼球運動」 苧阪良二・中溝幸夫・古賀一男（編）『眼球運動の実験心理学』名古屋大学出版会，第10章（pp. 219-237）．

植野真臣 (2010) 「知識観の変遷と評価理論」 植野真臣・荘島宏二郎『学習評価の新潮流』朝倉書店，第１章（pp. 1-36）．

梅沢章男 (1998) 「教育工学と生理心理学」 山崎勝男・藤沢清・柿木昇治（編）『新 生理心理学　３巻　新しい生理心理学の展望』北大路書房，第21章（pp. 250-263）．

山田冨美雄 (1998) 「心的負荷の生理心理学的研究」 山崎勝男・藤沢清・柿木昇治（編）『新 生理心理学　３巻　新しい生理心理学の展望』北大路書房，第1章（pp. 2-11）．

山口有美・山口晴久 (2002) 「脳波を用いた幾何学的課題解決過程における学習者の生体情報工学的研究」『岡山大学教育実践総合センター紀要』，**2**，71-79．

山崎勝男 (1998) 「皮膚電気活動」 藤沢清・柿木昇治・山崎勝男（編）『新 生理心理学　１巻　生理心理学の基礎』北大路書房，第12章（pp. 210-221）．