

陶芸の身体的な技能における熟練者と学習者の動作比較

On the skillful movement of clay kneading:

comparison between experts and beginners

島森正裕¹ 山本知幸¹ 藤波努¹

Masahiro Shimamori¹, Tomoyuki Yamamoto¹, and Tsutomu Fujinami¹

¹北陸先端科学技術大学院大学 知識科学研究科

¹School of Knowledge Science, Japan Advanced Institute of Science and Technology

Abstract: Experts' skill of clay kneading is experimentally studied. We focus on the timing of pressure applied to clay with respect to rocking movement of the body. Using a pair of foot pressure sensors and a weight sensor on the table, subjects' movements are measured. Differences between experts and beginners are discussed.

1. はじめに

職人の技といった身体技能は、熟練者の身振りや簡単な説明による指導では伝えることが難しい。一見、動作を再現できているように場合でも、実際の動きとは重要な部分が異なるため、身体的技能を獲得したことにはならない。そこで、簡単に模倣することが出来ない身体的技能をどのように修得しているかという問題に対して、まず技能の特徴を求め、言葉にできないコツやカンを形式化する必要があると考える。

本研究では陶芸における土練りの技能を対象とする。土練りとは、粘土に含まれる気泡を押し出すことと均質にすることである。また、粘土の乾燥を防ぐため短時間で練ることが必要となる。先行研究として、阿部ら[阿部 03] は、モーションキャプチャ装置を用いて、土練りの技能について研究した。この研究では、熟練者と未熟練者間で各関節の関係を比較し、習熟度の違いによって位相関係が変化することが明らかにされた。

土練りは、粘土に力を加えるために体を前進させる倒れ込み動作と体を起き上らせる起き上がり動作からなる。倒れ込み動作の起点は、体を最も起き上らせた状態である。終点は、体を倒した状態であり、最も粘土に力を加えられている地点である。倒れ込み動作の起点は起き上がり動作の終点、倒れ込み動

作の終点は起き上がり動作の起点となる。

本研究では、粘土に加わる力の大きさと倒れ込み動作、起き上がり動作のタイミングの関係について明らかにすることを目的とする。

粘土に加わる力には、体全体の動きを作り出している下半身の使い方が影響すると考え、圧力センサを用いて足裏と机にかかる荷重を測定し、熟練者と学習者の時系列パターンを比較して、熟練者と学習者の身体技能と粘土に加えられる力の関係について考察する。

2. 実験

2. 1 実験概要

実験は、被験者が土練り動作時に足裏と粘土にかかる力の大きさとタイミングについて、測定を行った。被験者は九谷焼技術研修所の技師3名(以下熟練者 A-C)、研修生9名(以下学習者1-9)である。実験では、被験者の両足の靴底に圧力センサシートを装着し、机の内部に体重計を設置して、土練り動作を25秒間測定した。また、測定したデータを解析、比較した。実験の手順については以下に詳述する。

2. 2 実験手順

体重計を机の内部に設置し、f-scan を両足の靴底中敷きの下に装着することにより被験者の土練り運動を測定した。体重計は Phidgets 社製で、内部にロードセルが取り付けられている圧電装置。力を加えると、それを電気信号に変換して、USB ケーブルにより PC

にデータが送られ、保存される。また、f-scan は、ニッタ社製で、両足の靴の中敷きにセンサシートを装着して、カフユニットに取り付け通信ケーブルを使って PC と接続してデータの保存を行う。今回は体重計、f-scan 共に時間分解能は 100Hz で実験を行った。両センサの取り付け位置の詳細を Fig.1 に図示する。



Fig.1 f-scan、体重計の取り付け位置

土練り動作の計測を 12 名に対して行った。実験に使用する粘土の量は被験者自らが選んだ(約 2.5~4kg)。実験は、25 秒間連続して土練りを 3 試行した。f-scan と体重計を同期させるため、実験開始直後に被験者が床に置いた体重計を右足で 1 回踏んだ後に机に設置した。そして、土練りを 25 秒間行った後に体重計を机から取り出し床に置いて右足で体重計を 2 回踏んだ。

3. データ解析

被験者は f-scan を装着し、体重計が内部に設置された机の上で土練りを行った。取得した f-scan と体重計のデータから、熟練者と学習者の身体技能と粘土にかかる力の大きさの関係を明らかにした。土練りは、粘土に加えられた力の力積で評価した。土練り動作を行った時に体重計に加わる力積(25 秒間)を台形公式により積分して求めた。ノイズ除去処理として 4 階の Butterworth フィルタ $f_c=10[\text{Hz}]$ を用いた。

3. 1 粘土に加わる力積

土練りにおける熟練者と学習者の粘土に加わる力積の違いについて、1 回あたりの力積と 25 秒間の回数の関係から分析した。その結果、熟練者は 3 人も 1 回あたりの力積が約 $18[\text{kgw} \cdot \text{sec}]$ 、かつ 25 秒間で約 30 回練っていた。そこで、熟練者 3 人の 1 回あたりの力積と 25 秒間の練る回数の平均値を各々求め、その値と各被験者の値との差を求めた(Fig.3)。Fig.3 から学習者 2、4 以外は熟練者と比べ粘土に大きな力を加えている。また、粘土を練る回数が熟練者よりも少ない結果となった。次に、一回あたりの力積と各被験者の体重との関係について分析した(Fig.4)。Fig.4 から学習者 2、4 以外では、体重が多い人ほど 1 回あたりの力積が大きくなったが、熟練者はそれぞれ体重が異なっているが、一回あたりの力積がほぼ等しい値になっていることがわかる。

また、粘土を練る周期と身長との関係について、文献[YF04]では熟練者は身体を 2 つに折って練っていることがわかっているため、土練り動作を単振り子とみなし、解析を行った。Fig.2 のように、中心からの長さ l 、重力加速度 g とすると変位 θ が小さい単振り子の周期 T は、式(3.1)のように表せる。式(3.1)から周期 T と中心からの長さ l は比例関係にある。そのため、単振り子(Fig.2)は、実際に l が長いと周期は長くなり、質量 m の大きさによって変化しない。

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} \quad (3.1)$$

$$T/\sqrt{l} = 2\pi \frac{1}{\sqrt{g}} \quad (3.2)$$

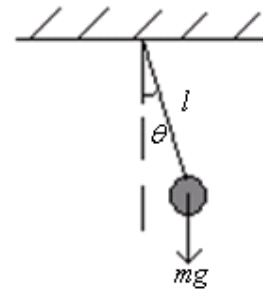


Fig.2 単振り子

式(3.1)を周期 T と中心からの長さ l について整理すると、式(3.2)になる。式(3.2)式の右辺の値は一定となり、左辺の周期 T と中心からの長さによって変化するため、被験者それぞれについての T/\sqrt{l} を求めた。また、熟練者は身体を腰部で 2 つに折って粘土を練っているという観点から、熟練者の T/\sqrt{l} の値に対して、この場合 l は被験者の身長であるため、身長を半分にすると $T/\sqrt{l/2}$ として計算した結果を Fig.5 に示す。熟練者の $T/\sqrt{l/2}$ と学習者の T/\sqrt{l} の値がほぼ等しい結果となった。よって、熟練者は身体を 2 つに折って練っていることが確認された。この結果から熟練者は学習者に比べ、長さ l が短くなるため周期が短くなり、粘土を練る速さが速くなる。

3. 2 土練り動作における時系列パターン

土練りにおける粘土に加わる力の大きさとタイミ

ングの関係について明らかにする。まず、得られた f-scan の左右 (L:左足にかかる荷重、R:右足にかかる荷重) の合計(L+R)を求める。次に、机にかかる力 W から粘土の重さ mg を引くことにより、粘土を練るために使われる力 (W-mg) を求める。そして、被験者の体重 Mg とすると、運動方程式 $ma=F(m$:質量[kg], a :加速度[m/s²],力 F[N])より慣性力 Ma は式(3.3)のように表せる。

$$Ma=Mg-(L+R)-(W-mg)=W+L+R-(M-m)g(3.3)$$

式(3.3)から求めた慣性力 Ma と共に、f-scan、体重計の値を時系列にプロットした結果を以下(fig.6-10)に示す。

熟練者 A では、fig.6 から見られるように、右足で蹴って身体を前進させて腕と左足で粘土を押し、押し戻す時も腕と左足を使って練っていることが推測できる。熟練者 B では、fig.7 から見られるように、右足で身体を前進させ、体重を利用して粘土に力を加えている。押し戻す時は、腕の力と右足で身体を戻している。熟練者 C は、fig.8 から見られるように粘土を練る時に身体から力を出し、押し戻す時にも最初腕で戻し始め、次に左足で戻し、その後右足で身体を戻している。学習者 1 について、fig.9 から右足で床を蹴ることにより身体を前進させ、体重を粘土に加えていることが明らかである。そのため、粘土に最も力がかかっている時には、両足の圧力センサの値が最小になる。学習者 1 が最も力を出しているのは体を戻している時であるため、粘土を練るために力を使用せず体を起こすことに使っている。また、体を押し戻す時に左足を使用しているため、腕を使って体を起こしていない。学習者 2 について、Fig.10 から見られるように下半身を使用せず上半身の力のみで粘土に力を加えている。

4. 考察

はじめに、後進動作について考察する。熟練者と学習者の後進動作において、熟練者は、腕の力を利用して上体を起き上らせる。学習者は、足の力を利用して全身を起き上らせる。この違いにより、熟練者は上体を起き上らせる時においても粘土に力を加えることができる。しかし、学習者は腕の力を使わず、足の力で全身を起き上らせるため、粘土に力を加えることができないと考えられる。

次に、粘土に力を加える前進動作における熟練者と学習者の動作の違いについて、粘土に力を加えるために、熟練者は体重を利用している。体重を利用するとは、重心を粘土に近づけることである。重心を粘土に近づけるために体を腰部で折っている。体を腰部で折って練ることで、重心を粘土に近づけて

いる。学習者は、足で床を蹴って、その力を粘土に加えている。足で床を蹴って出した力を腕に伝えるためには、腰を伸ばした状態の方が力を伝えやすいが、力が伝っていくのに、時間がかかるので、その結果を力積によって評価すると、熟練者に比べ粘土に力を加え過ぎていることになる。学習者の中にも、腰で折って練っている人はいるが、腰を折って練っているため、足からの力が腕に伝わりにくいため、粘土にかけられる力が小さくなる。また、腰を折った状態で上半身だけの力を利用して重心移動による力を使わないため、粘土にかかる力が小さくなると示唆される。

5. まとめ

本研究では、12 人の被験者において土練りの身体的な技能における熟練者と学習者の動作の側面から比較を行った。実験では被験者の両足の靴底に圧力センサシートを装着し、机の内部に体重計を設置してデータを測定した。その結果、熟練者と学習者の動作比較において、熟練者は下半身を重心移動のために使用しているのに対し、学習者は下半身で床を蹴って、その力を粘土に加えていることがわかった。

今後の課題として、粘土の重さの種類を指定して重さを変化させることや土練りを行う時間を長くすることで、より熟練者と学習者における身体的な技能の違いを明らかにすることができると考えられる。

参考文献

- [阿部 03] 阿部真美子,山本知幸,藤波努.技能獲得における身体動作のモーションキャプチャを用いた解析.第 65 回情報処理学会全国大会予稿集,pp.351-352,2003.
- [YF4]Tomoyuki Yamamoto and Tsutomu Fujinami Synchronisation and differentiation:Two stages of coordinative structure.In Proceedings of Fourth International Workshop on Epigenetic Robotics,pp97-104, 2004.

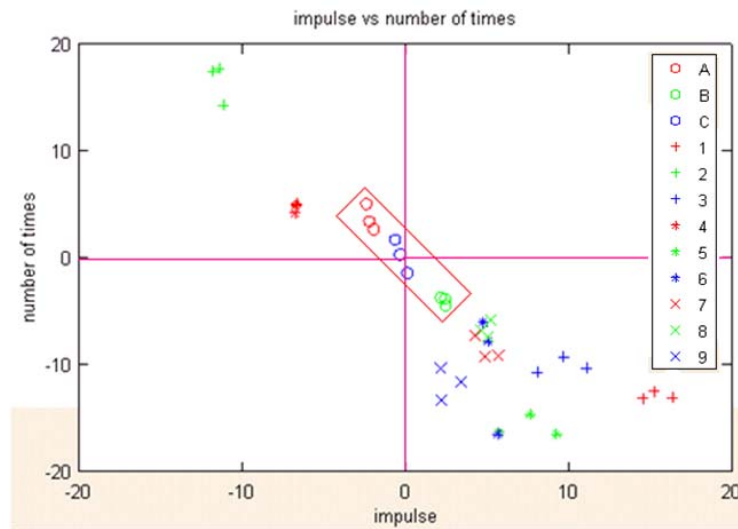


Fig3.1 回あたり力積と回数の関係

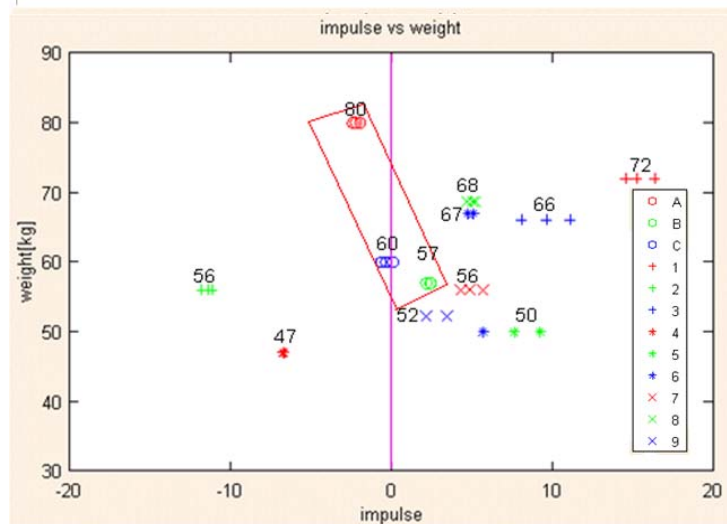


Fig4.1 回あたり力積と体重の関係

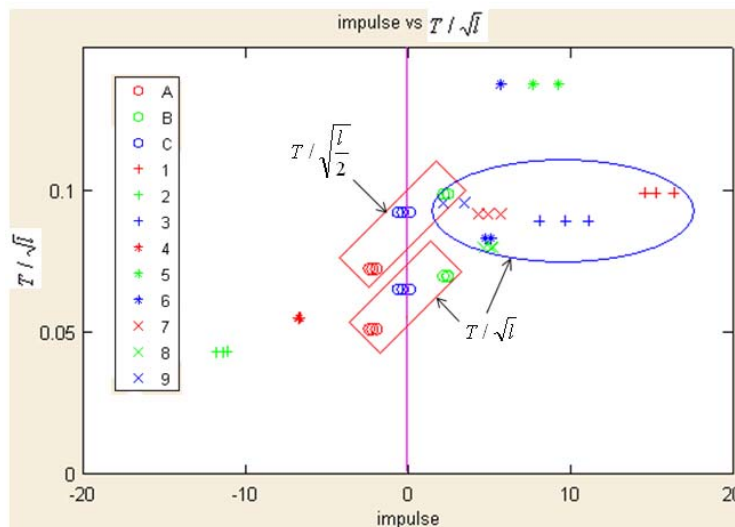


Fig5.1 回あたり力積と T/\sqrt{l} の関係

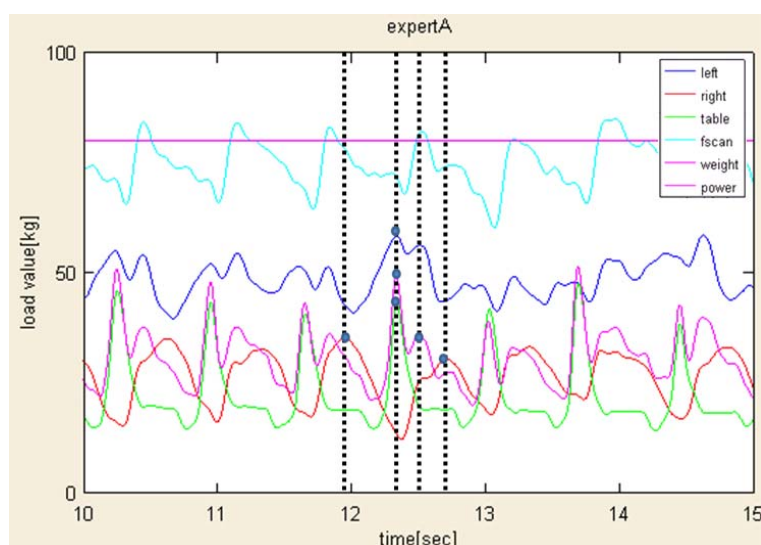


Fig.6 熟練者 A 時系列パターン.

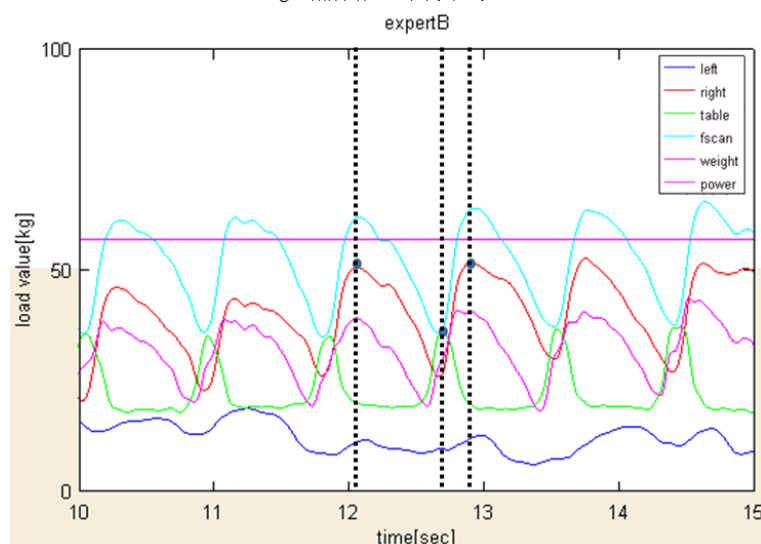


Fig.7 熟練者 B 時系列パターン.

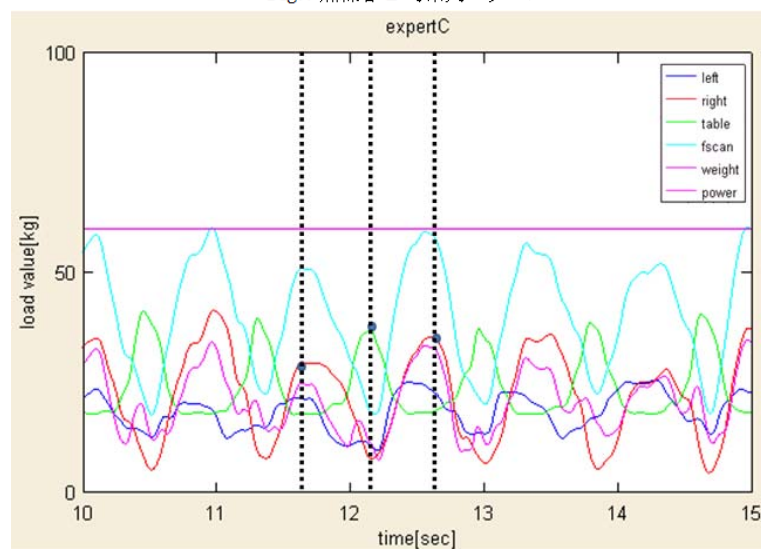


Fig.8 熟練者 C 時系列パターン.

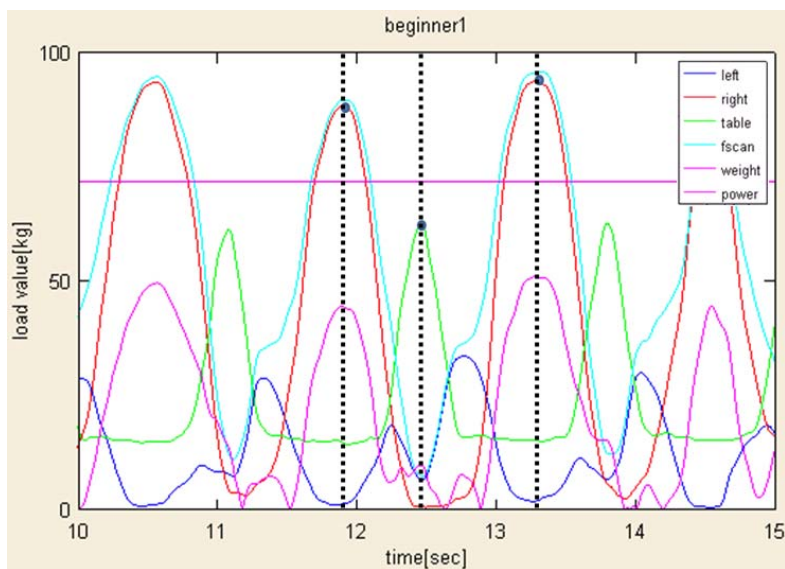


Fig.9 学習者 1 時系列パターン。

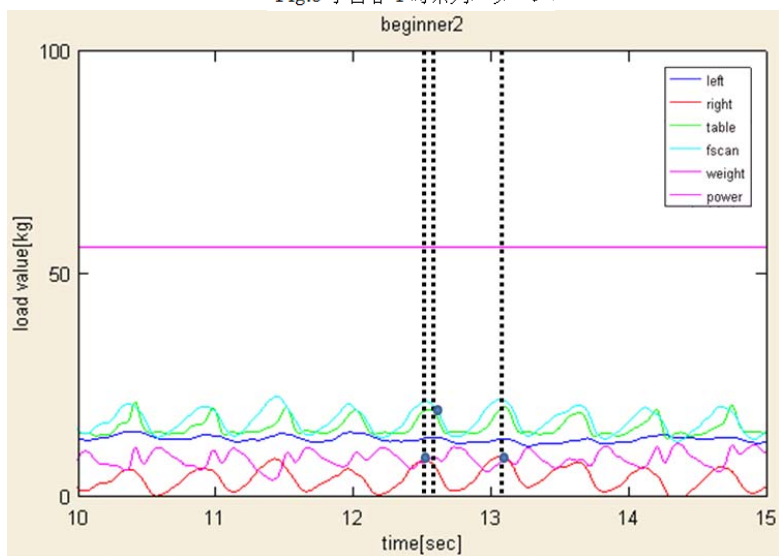


Fig.10 学習者 2 時系列パターン。

ガラス火加工作業における技能レベルの異なる作業者間での手作業の解析

Analysis of burner works in glass processing among technicians with different skill levels

梅村浩之^{1*} 石川 純¹ 遠藤 博史¹
 黒須 隆行^{2,1} 阿部 健太郎¹ 松田 次郎¹
 Hiroyuki Umemura¹ Jun Ishikawa¹ Hiroshi Endo¹
 Takayuki Kurosu^{2,1} Kentaro Abe¹ Jiro Matsuda¹

¹ 産業技術総合研究所デジタルものづくりセンター

¹ Digital Manufacturing Research Center

National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

² 産業技術総合研究所ネットワークフォトンクス研究センター

² Network Photonics Research Center, AIST

Abstract: In the present research, we investigated skills on burner works in glass processing. Three technicians with different skill levels were participated in three types of skill measurement. Firstly, they performed a practice of a rotating movement of a glass bar, which is regarded as the essential skill in the glass processing, and their movements and rotations of the bar were analysed. Then, the technicians actually manufactured products with each of two manufacturing processes; stretching and widening processes. In these processes, we monitored temperature changes and measured accuracy of their products as well as their movements. Results obtained from these analyses indicate that the skill level in the rotating movement affected the production speed and the accuracy of their products.

1 はじめに

少子高齢化によりものづくりの現場では後継者の不足が問題となってきている。そのため、技能の継承のためには現有人材の技能と技術力を効果的に向上させる必要がある。しかし、企業をあげての技能継承に取り組んでいる大企業に比べ、規模が小さい企業では技能の継承に割くリソースを確保することは容易ではない。また、暗黙知という言葉が示すようにこれら技能は多くの場合、遂行できる技能者自身にも言語化することは容易ではなく、どこをどのように鍛えればより高度な技能が体得できるのかが分からないのが現状であり、これも効果的な技術力の継承の上での壁となっている。本研究ではガラス火加工作業をとりあげ、熟練者と初心者の作業を比較することにより、どのような作業の可視化・数値化が有効であるか、そして、その

結果がどのように熟練者と初心者の違いの理解に貢献することができるかを検討することを目的としている。さて、上では「技能」とひとことで述べたが、この技能は階層化した複数の要素に分けて考えることができる。図1は熟練技能者が有する様々な能力についてまとめたものである（[1]をもとに作成）。これらの能力は同一の技能者が有する場合もあれば、単一の能力に長けている場合もある。しかし、技能の形成においては図1に示すようにそれぞれの要素はリンクしていることが予想される。

本研究で特に取り上げるガラス火加工とは、ガスバーナーを用いてガラスを温め、変形させる作業である。この作業は機械化が難しく熟練技能者の手業に頼る部分が多い。このガラスを温める際に重要となる行為がガラス棒の「まわし」とよばれる動作である。これはその名の通り均一にガラス棒を温める際にガラス棒を指で回転させる動作であり、熟練技能者達はこの動作をガラス火加工における基本動作と認めている。しかし、ガラス棒は細く透明であることからその回転は見

*連絡先：産業技術総合研究所デジタルものづくりセンター
 〒305-8564 つくば市並木1-2-1 産業技術総合研究所 つくば東
 E-mail:h.umemura@aist.go.jp

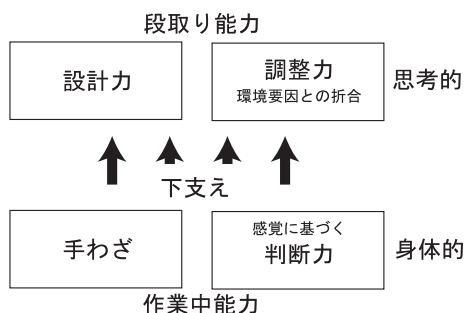


図 1: 技能の階層構造

づらく、また、指の動きも単純なようで複雑である。ここではこのガラス棒のまわしについてその運指、ガラス棒の回転に加えて、作業中の温度や所要時間を比較し、熟練者と初心者の差異について検討を行った。

2 実験

2.1 データ収集・使用機材

実験では技能者が実際に作業している風景をビデオカメラ、サーモグラフィーを用いて撮影した。この撮影時に指の動きが分かりやすいように、被験者の指の各関節及び爪には油性ペンによりマーカーが描かれた。得られた動画像内のマーカーを運動分析ソフト（株式会社ディテクト社製、Dipp Motion XD）を用いて追跡し指の軌跡を得た。これらの追跡は自動追跡機能等を用いて行われたが、最終的には全てのフレームに対してマーカーの追跡が正確に行われていることを筆者自身が確認したのちに分析を行っている。また、できあがった製品の精度測定に円筒形状測定機 RONDCOM65A（東京精密製）を用いた。

2.2 被験者

被験者として共同研究先（ガラス加工会社）により選定された熟練技能者（経験 30 年）、中堅技能者（経験 17 年）、初心技能者（経験 1 年）、の計 3 名が参加した。また、まわし試技条件（下記参照）においてのみ一般人 5 名が参加した。

2.3 対象作業

今回分析の対象とした作業はまわし動作の試技、円筒延伸加工作業、内側円錐加工作業の 3 作業である。特に円筒延伸加工作業及び内側円錐加工作業については技能者との懇談により（1）その作業がガラス加工に

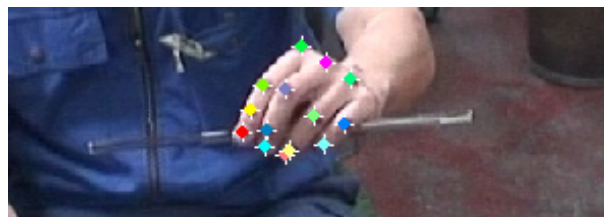


図 2: まわし作業時の 1 場面及び解析に使用されたマーカー部位

において基本的である（2）比較的短時間で製品が仕上がるため分析がしやすい（3）今回分析の対象となるまわし作業の巧拙が製品の出来に影響を与えると予想される、という理由から選定されている。以下にそれぞれの作業の説明及び解析対象を述べる。

2.3.1 まわし動作（試技）

まわし動作の試技（まわし試技）では半径 5mm のガラス棒をバーナーにくべずにまわし動作のみを十数秒間行ってもらった。同動作の解析においては 10 秒間のガラス棒の回転、各指第 2 関節及び親指腹面の運動軌跡を対象とした。ガラス棒には回転を追跡するために幅 2 ミリほどの色テープ 2 種を向かい合わせに貼り付けた。また、本条件においては一般人が 5 名参加している。彼らは、実験に先立ち熟練技能者に 5 分程度のレクチャーおよび 3 分程度の個人指導を受けた後に録画に参加した。ただし、一般人においては継続して 10 秒間のまわし作業が遂行できた被験者がいなかったため、比較的継続して廻し動作ができていた 2 名の結果から 7 秒間の作業を抽出して分析を行った。

ここで、一般人が熟練作業から受けたまわし動作に関して簡単に記述しておく、左手で軽くガラス棒を握り人差し指を押し出す方向へ回転させ、その指を戻すときに先の回転の半分程の角度だけ逆方向へ回転させる、というものであった。

2.3.2 円筒延伸加工作業

この作業と次に紹介する内側円錐加工作業は実際の加工作業であり、通常業務と同じ環境下で作業およびその撮影を行った。円筒延伸加工作業は円柱状のガラス棒を回転させながらバーナーで温め、柔らかくなったら伸ばしながら円錐状に加工する作業である。このとき、片側の円錐については円柱と軸を共有するように精度を出している。これを確認するために精度の測定では円錐部分における同軸度を指標とした。

今回の実験では一本の長い棒（長さ 1m 程度、直径 15mm）から 5 本の製品を作成してもらったが、今回は

そのうちの4本目を加工しているときのガラス棒の回転、指の動き、材料の温度及び製品の中心が出ているかを計測・分析した。ここで4本目を分析した理由はこの作業で用いる材料はまわし試技のそれに比べて太く長いから、材料が長い間は支えとなる台を用いているが、4本目では全ての作業者がこの台を外したため、まわし動作の巧拙の影響が観察しやすいとの推定に基づくものである。また、左手のみで行われるまわし試技と異なり、作業時には右手をガラス筒を支えるために添えて作業を行っていた。

2.3.3 内側円錐加工作業

内側円錐加工作業では直径15mmのガラス筒（上記延伸加工作業で作成されたものを切断した形状）の太い側を温めつつ、その内側に鉄棒をあてて円錐状（漏斗状）に加工する作業である。このとき、円錐の頂点の角度については45度になるように精度を出してもらった。実験では3本の製品を作成してもらったが、そのうちの一本について指の動き、温度の分析を行った。

3 結果と考察

3.1 まわし動作

図3に各作業者におけるガラス管垂直方向への各指第2関節の運動軌跡を、図4に技能者3名のガラス棒に添付したシールの軌跡から推定したガラス棒の回転角度を示した。技能者3名における指の運動が一般人に比べて安定していることが見て取れる。この運動について作業者間での比較を行うと、わずかに初心技能者でピーク間にばらつきが見られるが大きな差は見受けられない。しかし、ガラス棒の回転軌跡（図4）を比較すると、熟練技能者が約270度の正の方向への回転から90度の負の方向への回転を規則正しく繰り返すのに対して、他の2名ではリズムが崩れていることが分かる。

3.2 円筒延伸加工作業

ここからは通常の作業環境下でデータ収集が行われたため、製品1品を作成するための所要時間・作業中のガラスの最高温度・できあがった製品における精度についても言及する。まず、表1に3名の技能者における所要時間、精度（ともに5作製品の平均）及び最高温度を示した。図5は完成前7秒間の管の回転角度を示した。

まず、経験に応じて精度が実際に良くなっていることが表1から確認できる。実際に筆者らグループのよ

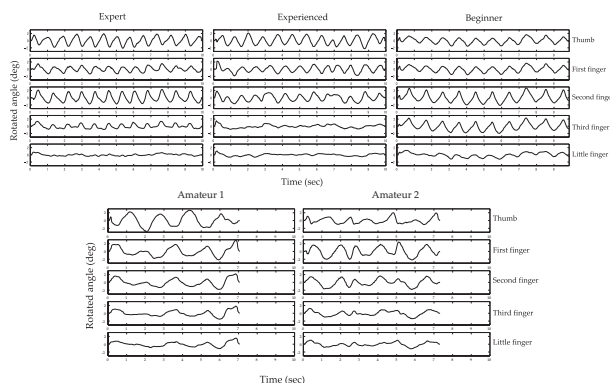


図3: まわし動作における各指第2関節の上下運動。上段左から熟練作業者・中堅作業者・初心作業者、下段は一般人2名

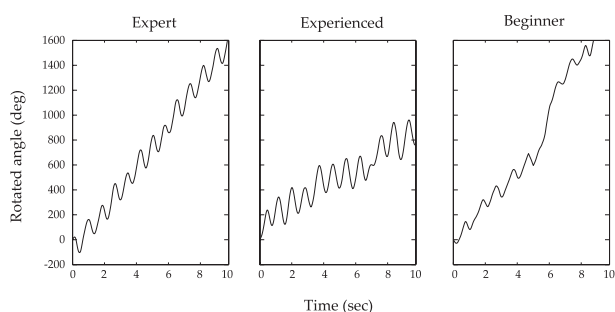


図4: まわし動作におけるガラス管の回転角度。左から熟練作業者・中堅作業者・初心作業者

うな慣れない人間が目視しても全くと言っていいほど差異は分からないのであるが、測定の結果は経験に応じていた。

一方、所要時間、回転の安定性については技能の向上と連関していないように見られる。この点について以下に考察を加えておく。この作業では伸ばす直前まで右手を添えていたため、ガラスが固い段階では上のまわし試技よりまわし作業自体は行いやすいくらいであった。しかし、温め続けることでガラスが柔らかくなると左手のみでガラスを保持し回転させる必要が出てくる。このガラス管が不安定となる状態を避けるため、初心作業者はガラスが十分に柔らかくなる前に伸ばしてしまう傾向にあったと推測される。実際表1に見られるように初心作業者におけるガラスの最高到達温度は他の2名の技能者に比べて低かった。その結果、作業時間が短く、運動の規則性も高いが精度が低いという現象が見られたのだと考えられる。また中堅技術者については小刻みにガラスを回して念入りに温めを続けているが、このため所要時間が増加したのだと考えられる。

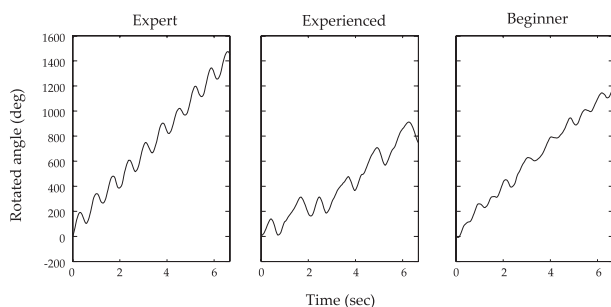


図 5: 円筒延伸加工作業中のガラス管の回転角度

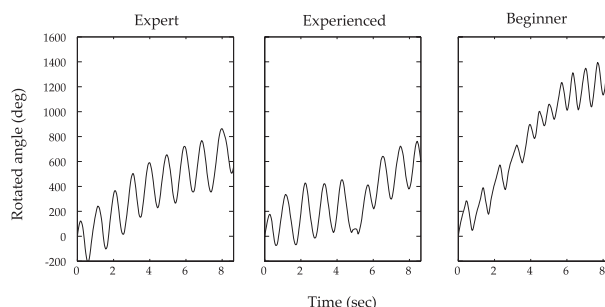


図 6: 内側円錐加工作業中におけるガラス管の回転角度

	熟練	中堅	初心
延伸加工			
所要時間 (秒)	37.8	45.8	30.5
精度 (mm)	0.57	0.77	1.36
最高温度 (度)	1100	1050	950
円錐加工			
所要時間 (秒)	36.7	68.7	57.3
精度 (deg)	37.3	32.7	29.8
最高温度 (度)	1000	1020	960

表 1: 円筒延伸加工作業及び内側円錐加工作業における所要時間・精度・及び最高温度

3.3 内側円錐加工作業

まず、表 1 下部に 3 名の技能者における所要時間、精度 (ともに 5 作製品の平均) 及び最高温度を示した。図 6 に完成前 9 秒間の管の回転角度を示した。

この作業においては、精度については円筒延伸加工作業同様に経験に応じた精度の上昇が見られた (この作業では開いた円錐の角度を 45 度にすることが求められており、角度で見ると差が大きいガラス端の円の直径で比較すると円筒延伸加工作業同様に 1mm 以下の誤差である。)

この作業についての作業者間の注目すべき相違点もほぼ円筒延伸加工作業と同じであった。つまり、初心作業での所要時間が短縮の一方で到達温度の低下、中堅作業での所要時間の増加などである。また、回転角度においても、熟練作業者が安定した回転を行っているのに対して、初心作業では回転速度にムラがあることが分かる。加えて、まわし試技同様に初心作業における回転の往復での速度の違いが見られた。この作業では内部に押しつけた棒を利用してガラス管を開くためにガラス管の安定性が重要であるが、初心作業ではこの回転速度の往復での違いがガラス管の安定を乱していることがまわし試技から予想され、この不安定さが結果として精度が出せないことにつながっ

ている可能性がある。

4 むすび

ここではまわし作業及びまわし作業の正確さの寄与が特に大きいと思われる作業を中心に解析を加えた。熟練作業では試技のみではなく延伸加工中にも安定した回転を行っていたが、他の作業では延伸加工中にはまわしが不安定になる傾向が見られた。これが中堅作業における作業時間の増大や初心作業における精度の低下と関係していると推定される。精度という点では中堅作業は熟練作業と大きく変わらない作業も見られたが、現場からの観点では精度もさることながら速度も非常に要求度の高いファクターである。その意味ではまわしという最も基本的な作業において三者間で差が見られ、その差が現場での作業力と関連したという結果は非常に興味深い。もちろん、作業においては他のファクターも寄与しており、まわし作業の巧拙が作業力の全てであるというわけではないが、その一方で基礎が大切であるというよく耳にする言葉通りの結果であったとも言える。

また、今回の作業分析においては単に動画を解析するのみではなく、できあがった加工物の比較、温度測定からの知見などが解釈に重要であった。ものづくりの現場においてはスポーツなどと異なり目的や手法についての予備知識が乏しいことが多く、その意味では作業、測定方法の選定も含め作業自身との対話や作業からの提案が重要となる反面、あくまで外部からの視点を失わないように心がけることが重要であると考えられる。

参考文献

- [1] 岡根利光, 服部光郎, 松木則夫, 加工技術・技能継承支援ツール「加工テンプレート」の開発, 人工知能学会第 2 種研究会資料, (2007)

発想推論に基づく着眼点の発見

Discovering Knack by Abductive Reasoning

古川康一¹ 小林郁夫² 井上克巳³ 諏訪正樹⁴

Koichi Furukawa¹, Ikuo Kobayashi², Katsumi Inoue³ and Masaki Suwa⁴

¹慶應義塾大学

²慶應義塾大学 SFC研究所

¹Keio University

²SFC Research Institute, Keio University

³国立情報学研究所 情報学プリンシプル研究系

³Principles of Informatics Research Division, National Institute of Informatics

⁴慶應義塾大学 環境情報学部

⁴Faculty of Environment and Information Studies, Keio University

Abstract: In this paper, we investigate how to discover knack in performing skillful tasks. Our approach is to formalize knack discovery problems in terms of abductive inference. We define two problems related to knack discovery: one is rule-abduction which tries to find missing rules to explain observed causality to accomplish hard performance tasks such as “increase sound volume” in playing the cello. The other is new knack discovery which suggests the learner where to focus attention during performance. We utilize an observed knack such as keeping right arm close during bowing which empirically proved to achieve the given task. We provide abductive inference programs to conduct both rule induction and new knack discovery. Especially, we point out the importance of existentially quantified logical formula to express hypotheses including logical variables representing missing nodes to be introduced.

1 はじめに

身体スキルを獲得するに際して、着眼点の発見が果たす役割は、計り知れない。それにより、今までにないスキルレベルへの飛躍的なジャンプが可能になる。着眼点の発見の方法論については、その追求の試みすらほとんどなされていない。そのようなことが果たして出来るのか、といった疑問も提示されることもしばしばである。本論文は、この大問題への足がかりを築くことを狙っている。

はじめに、本研究のきっかけとなった実体験について述べよう。筆者の一人は、新たなチェロ奏法を突然思いついた。それは「右腕の脇を締めて運弓動作を行う」という単純なものである。この単純な奏法を採用することによって、「音を大きくする」という目的の達成が可能となった。その前までは、この問題を解決できるうまい方法が見つからなかったが、この発見により十数年悩み続けてきた課題をついに克服することが出来た。これが、着眼点の発見を考える出発点となった。

我々は、この問題に関連するさまざまなアプローチを検討してきた[1][2]。それらを列挙すると、生体

力学モデルの検討、スキルの計測・可視化、スキルデータの解析・データマイニング、メタ認知、発想推論に基づくスキルの創造・診断支援などである。これらの検討を通して明らかになった点は、飛躍的なスキルの向上を促すコツは、「発見された着眼点」のみに依拠するのではなく、むしろそれとその他の注目すべき多様な事実との関係性のなかに存在する、という事実である。また、それらはルールで表現することが可能である。チェロの運弓動作の例で言えば、「手首を柔軟にすれば、弓の返しがうまくいく」といったルールである。スキルのこのようなルール表現は、発想推論に基づくスキルの創造・診断支援の研究で展開されている[3]。

また、着眼点の発見にとって、その表現のための言葉を如何にして見出すのが大変重要な課題であるが、そこで威力を発揮するのがメタ認知の方法論である[4]。メタ認知は、繰り返しの練習における自己の体の使い方に対して詳細な記述を取り続け、その変化を見て、着眼点の発見に結びつける方法論である。その場合、コーチによって与えられた新たな課題は、学習者にとっては今までの蓄積を越えて、新たなスキルを獲得するきっかけを与えてくれるが、

同時にこれまでの知識体系を一旦取り壊して、新しく再構築する作業を必要とする[5]。その際、新たな注意点と従来の知識体系をどのように関連付けるのかが、最大の問題となる。この関連付けの基本は、やはり関係性である。

上に述べた、「音を大きくするために右腕の脇を締めて運弓動作を行う」という奏法の例では、「脇を締める」ことが「音を大きくする」ために不可欠な（経験的に得られた）着眼点の例である。ところで、この着眼点およびそれに付随する演奏ルールが真に有用であるためには、この演奏ルールの妥当性についての納得のいく説明が必要である。

本論文では、「着眼点の発見」の形式化を「発想推論」を基に行っている。発想推論、あるいはアブダクションは、もともと Peirce[6]によって、人間の発見的な知的活動をモデル化するための道具立てとして導入された論理的枠組みであり、ここでの利用は的を射ていると考えられる。我々が採用しているのは、完全な述語論理の証明器を基にした発想推論システムであり、それによって存在限量された論理式を補うべき仮説として得ることが出来る。この機能を利用して、新述語を表現するノードを表す論理変数を含んだ仮説を生成している。

2 問題設定

本論文ではルール・アブダクションおよび新述語の導入について論じるが、その準備として、チェロの運弓動作を例に問題設定を行う。

チェロの右腕による運弓動作は、音の強弱の制御、円滑な弓の返しおよび移弦、スタッカートやレガートなどのさまざまな弾き方への対応など、大変多様であり、かつ高度なスキルを必要とする。ここで問題にする課題は、「音を大きくする」ことである。音を大きくするためには、弓をコマの近くに当てて弾かなければならない。コマの近くで弦を振動させるためにはより多くのエネルギーを注入しなければならないが、その注入の仕方にむらがあると雑音が入ったり音が途切れてしまったりするので、細心の注意が必要である。より多くのエネルギーを注入するためには、弓が弦の振動に負けないよう、弦に対して一定の力を加え続けなければならない。また、弓の動きを円滑にするためには、手首に余分な力が入らないようにし、弓の返しを柔軟にしかもエネルギーの注入の中断なしに行わなければならない。この課題に対して筆者の一人が発見したのが、「脇を締める」という方法である。すなわち、ここで得られた関係は、図2.1のような因果関係である。

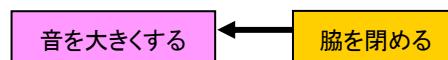


図2.1 観測された因果関係

ところで、ここで重要になってくるのが、なぜこのような因果関係が成立するのか、という問題である。この問題に対する納得のいく説明がなければ、それは技として定着しない。我々が考察により得た説明は、以下の通りである。音を大きくするためには(inc_sound)、弓をコマの近くで弦に当てなければならない(bow_close_to_the_bridge)。そこでの弦の振動を維持するためには、1. 弓を安定させて動かさなければならない(stable_bow_movement)。これは、弦に対して一定の力を加え続けるためである。また、2. 弓の返し時にエネルギーの注入の中断がないように、弓の返しを円滑にしなければならない(smooth_bow_direction_change)。そのためには、手首を柔らかくしなければならない(flexible_wrist)。ここまでの考察に出現した述語と述語間の因果関係を図示すると、図2.2のようになる。

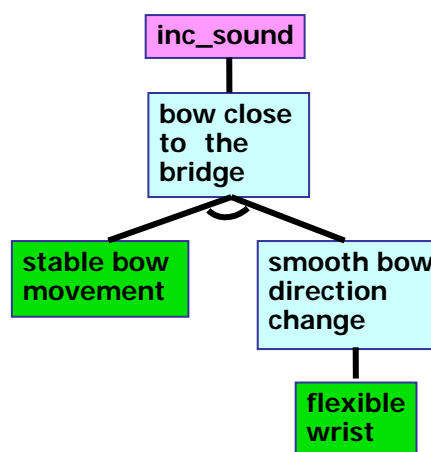


図2.2 音を大きくするための弓と手首の動き

この図の下端にある二つのノードが満たされれば、音を大きくすることができる、ということになる。そのため、我々が観測した事実、すなわち「脇を締める」ことがこれらを成り立たせるのかを考察すればよい。ところが、弓は手で保持しており、手首も脇と離れているので、直接の因果関係を論じるのは無理がある。この事実は、これらの間を埋めるためのノードが必要になることを意味している。実際、解剖学的にも手首と脇の間には、前腕および上腕が存在する。これらに関係する体の使い方の中に、その間を埋めるものがあればよい。実は、我々は次の事実を知っている：「関節のしなやかな動きは、その関節の一つ以上手前の関節を動かすにことよって実

現する。すなわち、「二つ以上手前の筋肉群を用いる」[7]。この事実は、手首の柔軟な動きは上腕の活動が関係していることを示唆している。実際には、単に上腕の筋肉群を用いるという指示だけでは不十分であり、そこでのインピーダンスの増加が必要になる (`increase_upper_arm_impedance`)。この「インピーダンスの増加」は、手首の柔軟な動きを実現するとともに、図2. 2のもう1つの右端ノードである `stable_bow_movement` をも実現してしまう。さらに、生体力学的な考察によって、上腕のインピーダンスの増加は、脇を締める (`keep_one's_arm_close`) ことによってもたらされることが分かるので、このノードの導入によって推論が図2. 3のように完結する。

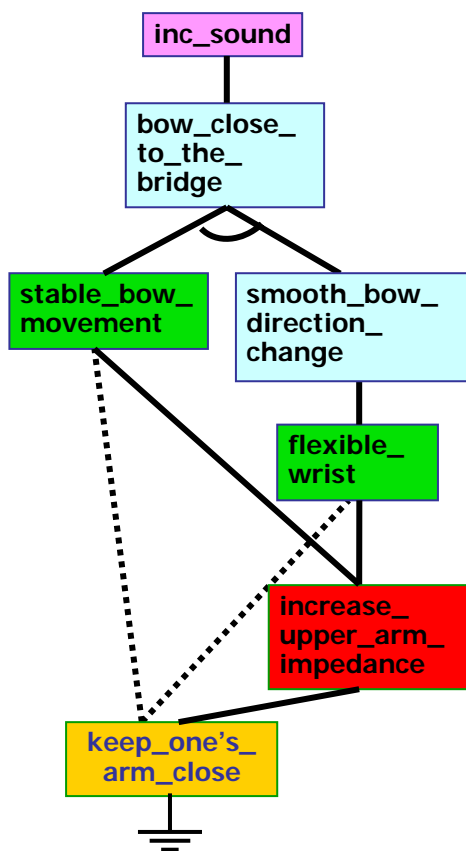


図2. 3 `increase_upper_arm_impedance`ノードの導入によって完結した推論パス。接地記号は対応ノードが事実として成り立っていることを示す。

本論文では、この推論図の完成を目指す、そこに至る二通りの問題設定を行う。

1. `increase_upper_arm_impedance` ノードが既知で、それが `stable_bow_movement` および `flexible_wrist` の実現を可能にしていることも知っている場合。

2. `increase_upper_arm_impedance` ノード自身が未知の場合。

問題設定1で我々が必要とするのは、図2. 3において、`keep_one's_arm_close` ノードから `increase_upper_arm_impedance` ノードへの因果リンクを張ることによって、破線で示されたリンクを取り除くことである。そのためには、この新しいルールを導入するために、ルール・アブダクションが必要になる。

一方、問題設定2においては、`increase_upper_arm_impedance` ノード自身を導入しなければならない。これは、新述語の導入問題である。

以下に、問題をより明確に記述するために、いくつかの用語を定義する。

ゴール述語は、与えられた困難な課題を表す述語である。**隠れ着眼点**は、求めるべきルールの頭部となる述語である。**経験的着眼点**は、与えられた困難な課題の解決に役立つ、経験的に発見された着眼点である。**隠れルール**は、観測された因果関係がなぜ与えられた困難な課題の解決に役立つのかを説明するために不可欠なルールで、ルール・アブダクションのターゲットとなる。

これらの用語の関係は、図2. 4のように表される。図2. 3の例で言えば、ゴール述語は `inc_sound` であり、隠れ着眼点は `increase_upper_arm_impedance` である。また、経験的着眼点は `keep_one's_arm_close` である。

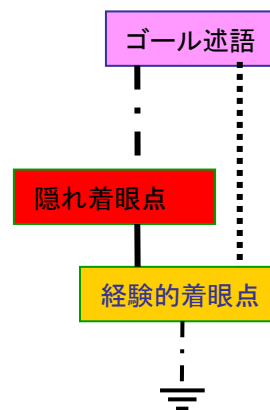


図2. 4 ゴール述語, 隠れ着眼点, 経験的着眼点の関係。一点鎖線は推論パスの存在を意味する。点線は観測された因果関係（経験則）を表す。実線は隠れルールを表す。

3 発想推論によるルールの発見

3.1 発想推論システム SOLAR

発想推論は必ずしも正しい結論を導くわけではないが、証拠を説明する仮説を生成する推論過程と考えられる。以下に、発想推論の定義を与える。

定義 3. 1

B を背景知識を表す節集合とし、 G を観測事象を表すリテラルの集合とする。また、 Γ を候補仮説を表すリテラルの集合とする。 Γ の要素であるリテラルおよびその例を**仮定可能**(abducible)リテラルと呼び、これらのリテラルがもつ述語記号を**仮定可能**(abducible)述語と呼ぶ。

B, G , および Γ が与えられたとき、**発想推論**は以下の2つを満足する仮定可能リテラルの集合 H を求める[8].

1. $B \cup H \models G$,
2. $B \cup H$ は無矛盾である。

このとき、 H を (B, Γ に関する) G の**説明**と呼ぶ。 H の仮説は変数を含むことが可能で、その場合存在限量されていると仮定する。説明 H が変数を含まなければ基礎(ground)説明と呼ぶ。

定義3.1 において、条件1 は背景知識 B に H を補うことにより観測事実 G が説明できるようになることを示している。なお、論理プログラムではなく述語論理の節理論を用いるため、一貫性制約は一般に B の中で負節として表現され、条件2 の無矛盾性の条件が一貫性制約を満たすことに相当する。

発想推論を実際に動かすことの出来る計算方式に、SOL 導出[8]があり、SOL導出を実現しているシステムにSOLAR [9]がある。以下では、論理式の集合 S と、 S に含まれるすべての論理式を論理積で結んだ論理式 $\bigwedge_{F \in S} F$ を同一視する。

まず、SOL導出を用いて発想推論を実現するために、定義3.1 の条件1 と同値である次の関係式を用いる。これは、**逆伴意**(inverse entailment)として知られた関係の発想推論への適用にもなっている。

$$B \wedge \neg G \models \neg H$$

いま G と H はともにリテラルの論理積とみなせるため、 $\neg G$ と $\neg H$ はともに節である。また、定義3.1 の条件2 は $B \models \neg H$ と同値である。よって、発想推論の問題において、 G の説明を計算するためには、 $B \wedge \neg G$ の定理であって B の定理ではないような結論 $\neg H$ を計算しその否定を取ればよい。このとき、 H の要素はすべて仮定可能リテラルであることから、 $\neg H$ を構成するどのリテラルも Γ のある要素の例の否定となっている。また、節集合の

定理は節として求められるため、中に含まれる変数はすべて全称限量されているが、否定を取った式ではこれらの変数が存在限量されることになる。

SOL導出では、与えられた節集合の論理的帰結であり、限定された言語に属するリテラルのみからなる節を計算する。このために、Prolog の基にもなった順序付き線形導出において、 $\neg G$ を先頭のゴールとし、選択されたサブゴールのリテラルが Γ の要素の例の否定であるときに、融合を行う代わりにSkip と呼ばれる操作を行ってこのリテラルを保存し次のリテラルを解きに行く。このようにして証明が終了したとき、Skipされたリテラルを集めてできる節は公理集合からの論理的帰結となる。SOLAR ではこの計算をタブロ方式によって高速に実現しており、無駄な再計算を可能な限り削減している。SOLAR は任意の一階述語節理論において、結論発見に関して完全である。このため、逆伴意で求められる仮説の否定の計算においても完全性が保障されている。

3.2 因果関係に基づく発想推論の形式化

因果関係を論理的関係によって表現すると、論理の持つ推論能力を利用することが出来る。また、同時に、発想推論も可能になる。発想推論では、推論図を完成させるために補うべき論理式を求めることが問題となる。そのため、推論図における欠落部分(空隙)の発見を必要とする。

因果関係を表す推論図は、因果関係グラフを表していると考えられる。因果関係は、因果関係グラフにおける有向アークに対応する。この因果関係グラフにおいて、到達可能性は因果連鎖を表す。ゴール述語から下方に、あるいは経験的着眼点から上方に因果関係グラフを辿ることにより、因果連鎖を調べることが出来る。因果関係グラフが不完全な場合、ゴール述語から経験的着眼点に至る妥当な経路が存在しない。その場合、その経路上に新たなノードを追加して、経路を完結させるのがここでの目的となる。

因果連鎖を表現するために述語論理式による表現形式を用いる。いま、ノード q からノード p に対して直接的な因果関係が存在するときに $\text{connected}(p,q)$ が真であると定義する。また因果関係の連鎖によりノード q からノード p に到達できるときに $\text{caused}(p,q)$ が真であると定義する。このとき、次の2式が成立する：

$$\begin{aligned} \text{caused}(X,Y) &\leftarrow \text{connected}(X,Y). \\ \text{caused}(X,Y) &\leftarrow \text{connected}(X,Z) \wedge \text{caused}(Z,Y). \end{aligned}$$

もしノード q からノード p に直接的な因果関係が存

在しないことがわかっていれば、統合的制約として

$\leftarrow \text{connected}(p,q).$

と書いておけばよい（この表現は、論理的否定を用いた表現 $\neg \text{connected}(p,q)$ の節表現である）。

ここで注意を要するのは、**connected** あるいは **caused** が含意関係を意味しているわけではない、という事実である。また、ここで扱った因果関係自身、完全な原因-結果の関係を表しているのではなく、たとえば $\text{connected}(p,q)$ は、 q は p が引き起こされるための原因のひとつであることを意味している。

3.3 ルール・アブダクション

いま例えば、ゴール述語 g 、経験的着眼点 s 、隠れ着眼点 r の間に、以下のような直接的因果関係および制約が存在する場合を考える（図3.1）：

$\text{connected}(g, r).$

$\leftarrow \text{connected}(g, s).$

g と s の間にはこの制約により直接的な接続はないが、観測としては次の因果連鎖がある場合を考える：

$\text{caused}(g, s).$

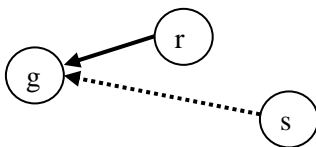


図3.1 直接的因果関係と直接因果関係にない観測された関係の共存。矢印は、因果関係の方向を示す。

この観測を説明するために、アブダクションを実行する。その際、得られる仮説の候補としては、**connected** 述語だけが現れて欲しいので、そのことを表すために、**connected** のみを **abducible** 述語として指定する。そして、述語論理におけるアブダクションを実行すると、例えば以下の仮説を得る。
 $\text{connected}(r, s)$

これは、因果関係を表すルールなので、ルール・アブダクションとなっている。このルールを付け加えると、観測された因果関係は2つの **connected** の関係から導かれ、図3.2のような証明図を得る。

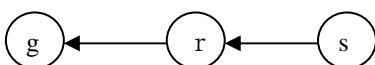


図3.2 ノード r を介した説明

3.4 新ノードの導入

つぎに、以下のような2つの観測された因果関係と、関連する制約が存在する場合を考える（図3.3）：

$\text{caused}(g, s).$

$\text{caused}(h, s).$

$\leftarrow \text{connected}(g, s).$

$\leftarrow \text{connected}(h, s).$

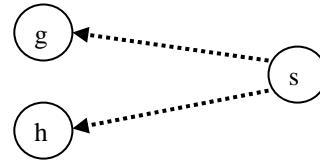


図3.3 直接因果関係にない観測された関係

これらの観測を説明するために、**connected** を **abducible** 述語としたときの述語論理におけるアブダクションを用いると、例えば以下の仮説を得る。

$$\exists X. (\text{connected}(g, X) \wedge \text{connected}(h, X) \wedge \text{connected}(X, s)).$$

X は前節のように既存のノードと単一化してもよいが、もし新ノードであると考えれば、それは新述語の導入に対応している（図3.4）。

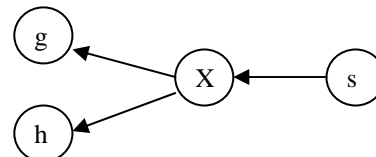


図3.4 あるノード X を介した説明

別の解としては、複数のノードを介した仮説：

$$\exists X \exists Y. (\text{connected}(g, X) \wedge \text{connected}(h, Y) \wedge \text{connected}(X, s) \wedge \text{connected}(Y, s)).$$

も存在する。これは、 X と Y が別のノードである場合（図3.5）やどちらかが既存のノードと単一化する場合（図3.4）などを含んでいる。さらに、2つのノード X, Y を介した説明が別の構造を持つ可能性もあり、例えば、

$$\exists X \exists Y. (\text{connected}(g, X) \wedge \text{connected}(X, Y) \wedge \text{connected}(h, Y) \wedge \text{connected}(Y, s)).$$

は図3.6で表される構造に相当する。

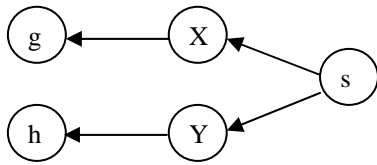


図3. 5 2つのノード X, Y を介した説明(1)

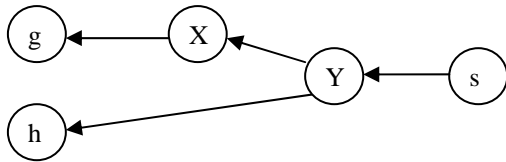


図3. 6 2つのノード X, Y を介した説明(2)

このように、述語論理における限量論理式を用いることにより、ネットワークの様々な構造を表現することができる。

以上のような述語論理におけるアブダクションは SOL 導出 [6] で実現可能であり、これを実現しているシステムとしては SOLAR [7] が存在する。

音を大きくするための問題設定においては、以下のような因果関係と制約を考えることができる：

```
connected(inc_sound, bow_close_to_the_bridge).
connected(bow_close_to_the_bridge,
           stable_bow_movement).
connected(bow_close_to_the_bridge,
           smooth_bow_direction_change).
connected(smooth_bow_direction_change,
           flexible_wrist).
```

← connected(inc_sound, keep_arm_close).
観測された因果関係として以下を考える：

```
caused(inc_sound, keep_arm_close).
```

この論理式は、「脇を閉めると音が大きくなる」という因果関係が観測されたことを意味する。我々は、さらに以下の2つの派生的な“観測された因果関係”を必要とする。これらは、実際に音を大きくするために必要なサブゴールが経験的着眼点によって満たされることを意味している。

```
caused(stable_bow_movement, keep_arm_close).
caused(smooth_bow_direction_change, keep_arm_close).
```

アブダクションシステムは、これらの観測事実を与えて、それを証明できるように、欠落している仮説を探し出す。

この観測を説明する仮説の一つは次の通りであ

る：

```
∃ X. (connected(stable_bow_movement, X)
      ∧ connected(flexible_wrist, X)
      ∧ connected(X, keep_arm_close)).
```

この論理式の X に `increase_upper_arm_impedance` を代入すれば、`increase_upper_arm_impedance` という新述語を導入し、さらにそれと他の述語間に成り立つルールをアブダクションで得たことになる。それらのルールは図2. 3の `increase_upper_arm_impedance` ノードから出ている3本の実線に対応している。

実際に SOLAR を用いた実験では、深さ10の推論制限、仮説長の上限4の下で93個の説明パターンを生成しており、上の解はその中の一つである。

4 導入された新ノードの同定

前章の例で得られたルールに表れる変数 X は、式

```
∃ X. (connected(stable_bow_movement, X)
      ∧ connected(flexible_wrist, X)
      ∧ connected(X, keep_arm_close)).
```

を見れば分かるように、`stable_bow_movement` ノードおよび `flexible_wrist` ノードの原因にならなければならない。同時に、`keep_arm_close` ノードの結果とならなければならない。ところで、我々は X として `inc_upper_arm_impedance` を選択するといろいろなことが都合がよく説明できることを知っている。このようなノードを同定することがここでの問題であり、その結果は、対象ドメインで考えれば、そこでの新述語の導入と考えられる。そのためには、前章で用いた因果関係以外の、多面的な関連情報を必要とする。関連情報は、各述語に対してさまざまな情報を付与したデータベースの形で用意すればよい。そして、そのデータベースに対して適切な検索要求を発することにより、新述語にふさわしい述語をデータベースの中から選び出せばよい。これらの有用な情報は、ドメインに依存する。身体スキルの場合、身体構造、可観測性、可制御性がキーになる。身体スキルを扱う論理プログラムに記述する情報は、(1)観測可能なもの、(2)制御可能なもの、(3)スキルに関連する定性的な知識に現れる要素、などから構成するのが妥当である。

(1)は計測機器を使った実験や、演技者以外の第三者(コーチなど)による観測からもたらされるものを含むが、最も重要なのは特に演技者本人が演技中に動的に確かめられる種類のものである。演技のパフ

パフォーマンスを評価する情報と同時に、演技を行った時の体感情報も重要である。前者のパフォーマンス評価情報としては、スポーツでいえば自分の体の全体や部分やボールなどの時空間上での運動が理想的か、器楽でいえば音程・音色・音量や他の演奏者とのタイミングが理想的か、といったことが考えられる。後者は、地面や道具からの反力や摩擦力や、振り子運動・鞭運動の結果として体幹や四肢から直に感じられる感覚である。前者は後者に比べてパフォーマンスを明確に示してくれるのに対し、後者はより制御によりそった情報である。

(2)は厳密に言えば脳を含んだ運動指令に関係する神経系統全体の問題である。これを粗く考え、まずは「このように体を動かそう」という意図のレベルでとらえることとする。「脇を締めておこう」とか「親指と他の指で挟む力を加減して弓を制御しよう」といったような、演技過程を通じて、または特定の段階で意識的に注意を喚起して実行しようとするものとしておく。

(3)は科学的な知識、経験的な知識の双方に現れるさまざまな要素であり、(1)の観測情報と(2)の制御要素とを様々な状態で結びつける。医学、解剖学、運動心理学、力学を含む諸科学、特に生体力学の知識は身体の構造やそれを用いた運動の構成について、一般に成立する知識を与える。「関節の大きなトルク」や「上腕の強いインピーダンス」は、科学の知見をプログラムに取り込むために必要になる。一方、個々の演技者の体は細かい部分で異なっているので、特定のパフォーマンスを得る最良の方法がすべての人に共通するというにはならない。パフォーマンスと体感情報との関連、パフォーマンスと意図との関連における経験は固有の知識であり、力の入れ具合やタイミングの連続的な調整のみならず、時には方略そのものの定性的な見直しが必要になる。

新述語も身体スキルに関連するため、3つに大別される情報のいずれかであり、達成しようとする課題を表現したプログラムに未出現の情報と仮定する。たとえば、「力のモーメント」は各関節周りに、「(筋)強い活性化」は各筋肉群に出現しうることをデータベースに記録する。さらに、近接した体の部位は遠く隔たった部位よりも強く関連して機能することから候補を絞られるように、各部位の連なりを表現しておく。また、これらの関係の因果関係としての方向性に関する情報をも同時に用意しておく。

これらの情報をあらかじめ用意しておくことによって、得られた新述語の解釈を提供することが可能になる。

5 着眼点と関係性

我々は、着眼点の発見を発想推論の枠組みを使って行ったが、そこで重要な役割りを果たしたのが観測事象および因果関係である。観測事象自身も因果関係を表している。これは、新しいスキルの発見に付随する特性である。また、アブダクションのプログラム中に現れた制約自身、「直接の因果関係が成り立たない」という形で表現されている。

一方、メタ認知による着眼点の発見においても、関係性が重要な役割りを演じている。メタ認知に現れる言語表現は、他の対象と関連付けることによって、その重要性が測られ、注目すべき着眼点の発見につながると思われる。

そのような関係性の1つが因果関係であると考えられるが、その他にも種々の関係性が有用になってくるかもしれない。たとえば、脳神経系で言えば、反射的な動き自身、ある種の関係性と考えることが出来る。左腕の肘を急激に引き上げる動作は、反射的に右腕の肘の収縮をもたらす可能性があるが、これはチェロの演奏にとっては大変なマイナスになる[3]。これは、無意識的に引き起こされる関係性の例である。また、その逆に、ある点に着目することによって、新たな関係性を作り出すことが出来るかもしれない。

関係性に着目して、複合的な現象を記述し、そこからある種の結論を導き出す手法として、キーグラフ法[10]やベイジアンネットなどが知られている。

因果関係に基づくアブダクションの手法は、それらの手法と対比してその利害得失を考えるべきであるが、それらとの比較は新たな知見を得るのに有用かもしれない。しかしながら、論理に基づく方式以外に、新述語の導入につながる形式化はこれまでなされていないと思われる。この点は、我々の研究のオリジナリティを主張できるものと考えている。

因果関係についてもう1つ言えることは、それがメタ的な関係になっている点である。それはより具体的な関係、たとえば骨格での隣接関係や筋とそれが作用する骨との関係、力と動きの関係など、さまざまな関係を抽象化した関係と捉えることができる。

我々の例では、2章で述べたように、「関節のしなやかな動きは、その関節の一つ以上手前の関節を動かすにことよって実現する。すなわち、二つ以上手前の筋肉群を用いる。」という事実から、手首の柔軟な動きは上腕の活動が関係していることが分かり、そのことからさらに、上腕のインピーダンスの増加の必要性を導いているが、ここでどのようにして重要な着眼点であるインピーダンスが導き出されたかは、依然として不明である。この例は、因果関係以

外の関連性をも取り上げなければならないことを暗示している。

さらに、着眼点はその性質上、身体の動きの理解を促進する言葉でなければならない。これは、トレーナーがどのような指示をすれば学習者が理解できるのかという問題である。そのためには、日常的な動作に翻訳するために、動作のアナロジーや、メタ認知的な手法による表現力の強化が必要になると思われる。

6 おわりに

本稿では、発想推論に基づく着眼点の発見についての試みを報告した。とくに、チェロの演奏技法を例に取り、経験的に得られた（観測された）ルールを説明するために必要な隠れ着眼点および隠れルールをルール・アブダクションによって得る方法を示した。我々が採用したのは、SOL 導出法による SOLAR である。この発想推論システムにより、存在限量された論理式を仮説として求めることにより、着眼点および隠れルールが得られた。さらに、より既知の情報が少ない状況で、観測された経験的ルールを説明するために必要な新述語とそれに付随する複数のルールを同時に発見する方法を、同じ枠組みを使って実現した。さらに、得られた新述語の意味づけを行うための方法の提案を行った。

本稿で取り上げた例題では SOLAR による解は 93 であり、それほど多くはなかったが、より複雑な現実的な問題では、その解は膨大な数に上ると考えられる。ここでは取り上げなかった実際に観測された因果関係が複数ある例では、その数は 700 以上に上った。これらの中から意味のある解をどのように選択するのかが、今後解決を要する問題である。

本論文でメカニズムを提案したルール・アブダクションが、学習者（例えばスポーツ選手）のメタ認知を促進する（自分の身体を考えることを助ける）役目を担うことは十分想定できる。目的がメタ認知を促進することであるのであれば、必ずしも発想推論システムが最適解を求めて提示する必要はない。人間とのインターフェースを考えれば、むしろ、有力な候補を提示して、後はユーザーに考えさせる方がメタ認知を促進するとも考えられる。スポーツの現場で有能なコーチは、選手に考えさせるために必ずしも答えを与えない。700 以上という選択肢をユーザーに与えても情報爆発で役に立たないであろうから、有力候補に絞るところは何らかの方法で自動化しなければならないが、最後の判断は人間に任せるということでも構わない。

着眼点の発見は、スキルサイエンスにとって大変

重要な問題であり、我々のアプローチはその取っ掛かりに過ぎない。この取り組みを土台にして、その上にさらに研究を積み重ねていく必要がある。中でも重要なのは、経験的着眼点自身の発見の支援である。ここでの研究がうまく展開できたのは、経験的着眼点およびルールを与えたからである。この困難な問題に対して科学的なアプローチの可能性を示すことが出来たのは、このような問題設定を行ったからである。着眼点の発見の最も困難な問題は、依然として未解決のまま残されているといえよう。しかし、その問題に対しても、本アプローチは重要なヒントを提供していると考えられる。

謝辞

本研究の一部は、平成 20 年度国立情報学研究所共同研究「身体的メタ認知を促す即時フィードバックソフトウェアの開発」の助成による。

参考文献

- [1] 古川康一, 植野研: AI とスキルサイエンス, 人工知能学会誌, Vol.20, No.5, pp. 510-517, (2005)
- [2] 古川康一編著, 植野, 諏訪他著: スキルサイエンス入門, 人工知能学会編, オーム社, 近刊
- [3] Kobayashi, I. and Furukawa, K.: Modeling physical skill discovery and diagnosis by abduction, 人工知能学会論文誌, Vol.23, No.3, pp. 127-140, (2008)
- [4] 諏訪正樹: 身体知獲得のツールとしてのメタ認知的言語化, 人工知能学会誌, Vol.20, No.5, pp. 525-532, (2005)
- [5] Masaki Suwa: A Cognitive Model of Acquiring Embodied Expertise Through Meta-cognitive Verbalization. *Transactions of the Japanese Society for Artificial Intelligence*, 23(3), pp. 141-150, (2008)
- [6] Peirce, C.S. *Collected papers of Charles Sanders Peirce*. Vol.2, 1931--1958, Hartshorn et al. eds., Harvard University Press
- [7] 古川康一: スキルサイエンス, 人工知能学会誌, Vol.19, No.3, pp. 355-364, (2004)
- [8] K. Inoue: Linear Resolution for Consequence Finding, *Artificial Intelligence*, 56(2,3), pp. 301-353, (1992)
- [9] H. Nabeshima, K. Iwanuma, K. Inoue: SOLAR: A Consequence Finding System for Advanced Reasoning, *Proc. TABLEAUX 2003*, LNCS Vol. 2796, pp.257-263, Springer (2003).
- [10] 大澤幸生, Nels E. Benson, 谷内田正彦: KeyGraph: 単語共起グラフの分割・統合によるキーワード抽出, 電子通信学会誌論文誌 J82-D1 No.2, pp.391-400 (1999)

アスリートが「身体を考える」ことの意味

What does “athletes’ thinking own body” mean?

諏訪正樹¹ 西山武繁²

Masaki Suwa¹, Takeshige Nishiyama²

¹ 慶應義塾大学環境情報学部

¹ Faculty of Environment and Information Studies, Keio University

² 慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科

² Graduate School of Media and Governance, Keio University

Abstract: The present paper discusses the necessity of athletes’ thinking own body meta-cognitively, argues what kind process it is, and points out research issues involved in the process from the viewpoint of coaching and leaning environment.

1. はじめに

「アスリートは頭がよくないと大成しない」。これは有名人の誰そのの明言というわけではなく、単に本論文の筆者諏訪が常々思っていることである。頭がいいとは学業成績がいいということではもちろんない。「身体を考える」ことを探究心を以て継続的に行う認知力があることを指して「頭がいい」と表現していると思っていただきたい。プロ野球監督の野村氏の掲げたID野球も、単にデータ収集に意味があるわけでない。何に（この論文では以後は「着眼点」という言葉で表す）注目してデータを収集するか、収集したデータを基に何をどう考えるか、それを自分の身体にどう当てはめるかなどを「考える」ことを野村氏は推奨しているのだと筆者は解釈する。

プロのトレーナーの廣戸氏の著書で「4スタンス理論」[1]がある。野球、ゴルフなど様々なスポーツに当てはまる実践的理論として注目を浴びている。この実践的指南書の最大の意味は、正しいフォームはひとつとは限らないことを示した点にある。身体の先天的もしくは後天的特質に応じて、大きく分けて4つの理想的フォームがあることを説き、読者やワークショップに参加した多くのアスリートが彼の理論に心酔している。安定した（と自分が感じる）立ち方をしたときに、重心がつま先寄りにかかっているか踵寄りにかかっているかでまずタイプが分かれる（前者がAタイプ、後者がBタイプ）。それと独立の軸として、重心が脚の裏の内側寄りにかかっているか、外側寄りにかかっているかでタイプがわかれる（前者がタイプ1、後者がタイプ2）。2×2で4つのタイプに分けられ、それぞれのタイプに適

した理想的なフォームがあると説く。

正しいフォームはひとつではないとすると、身体スキルの学習やコーチングの事情は大きく変わってくる。新しいものの考え方や見方でコーチはアスリートを指導する必要がある。アスリートは、コーチという言葉が鵜呑みにするのではなく、身体に適合するフォームを能々吟味して模索するべく、意識を変えなければならない。より一般的に言えば、個人性と普遍性が混在することを前提で、身体スキルの学習や教育の問題を捉える必要がある。

本論文では、アスリートが「身体を考える」ことの意味を再度問い直し、身体にまつわるスキルサイエンスが採るべき方向性を論じる。

2. 身体を考えるとは

2.1 Expert-novice difference 研究だけでは不足

実験心理学（もっと言えば自然科学方法論）の影響を色濃く受けた研究手法のひとつに Expert-novice difference という方法論がある。多くの熟練者と多くの素人を統計的に分析し、熟練者は素人に比べて何が違うかを客観的に明確にするという手法である。

「何が違うか」の「何」が着眼点である。過去の研究や研究者（現場のコーチ）の直感に基づいて注目すべき着眼点が推測できる場合、この研究手法は確固たる研究結果が出て、素人が何（what）を修正すべきかが明確になる。筆者はこれを「whatの研究」と称する。

現場の学習において What の研究だけでは足りないというのが筆者の主張のひとつである。どこが熟練者に比べて劣っている（あるべき状態になっていない）と指摘されても、それを実現する方法（how）は必ずしも自明ではないからである。草野球で年間20試合以上に出場する野球選手である第一著者（諏訪）の例を挙げよう。諏訪は大学野球レベルで活躍したある方（K氏）に継続的なコーチングを受けた経験において、以下のような現象に何度も遭遇している。

- 着眼点とその修正方向を示されても、それがどのような意味を持つのかは必ずしもその時点では理解できない

後述するように、一般に身体スキルの獲得は学習者（アスリート）が身体の動かし方に関する統合モデルを模索するプロセスである。統合モデルとは、身体や環境に偏在する多くの着眼点同士の関係性から成る[2]。いきなりコーチから新たな着眼点を与えられても、その時点でアスリートが意識できている統合モデルとどのように関係づければよいのかが見えない限り、アスリートには「意味がわからない」。一般に、意味とは関係性のなかにあるという人工知能や認知科学の考え方に照らしても、この現象は納得できる。

コーチの指摘や科学的な観察に基づいて得られた what の意味を学習者（ここではアスリート）が模索するプロセスが how である。how のプロセスがどのように進むのか、それを支援できる環境をどのように整えるのか（どんな環境がよいのかも含めて）に関する研究がいま求められている。

2.2 「身体を考える」方法論としてのメタ認知

本論文のタイトルにある「身体を考える」とは、与えられた着眼点を自分の意識に取り込み、自分の身体に適した身体統合モデルを構築する行為と解釈してよい。それは生田[3]がいうところの「単なる形の模倣を超えた型の習得」に相当する。では「身体を考える」ためには何をすればよいのか？ 単に身体を動かしたときの「何となく感じる」体感だけに任せてスキルを模索するのではなく、より積極的な意識的努力が必要であると筆者は説いて来た。人間は言葉を使う生き物である。言語化という行為の力を「うまく」利用しながら身体を考えるべきであるという考え方として、筆者は「身体的メタ認知」の理論と実践法を模索している。

身体的メタ認知の詳細は文献[4][5]に任せ、ここでは簡潔にその意味するところを解説する。身体的

メタ認知とは、

- 身体が体感していること（既に感知できる着眼点）をできるだけ言葉にし、
- 言葉領域の推論で新たな着眼点を得て、
- 新たに得た着眼点を視点に加えて再度自分の身体の動きを見つめ直す（体感を感じようとする）

行為である。我々は小さい頃から「きちんと論理的にしゃべりなさい」「しゃべることに矛盾があったり支離滅裂では駄目」という教育を課されているため、「言葉にする」という行為に誰しも多かれ少なかれ障壁を感じている。体感などという曖昧模糊としたこと（専門用語で言えば暗黙知）を言葉にするなんて無理だという意見も多い。諏訪が説く身体的メタ認知では、言葉といっても、

- 完璧に論理的である必要はない
- 身体を正確に反映しようとする意図や、そういう言葉をしゃべろうとする必要はない
- 第一義的にはあくまでも自分の内省のための言葉である。他人に伝えてコミュニケーションするための言葉である必要はない（コミュニケーションを否定はしない。大いに奨励はするが、それは第二義的である）

という考え方でしゃべることを奨励する。認知科学に外化という言葉がある。考えをとりあえず外に出すという意味である。メモやスケッチも外化の一種であり、言葉を吐くことも外化である。外化をすると、外化する前には思いも寄らなかった副作用が外界で起こり、そこに新たな糸口が見えることは多々ある（多くの分野の研究でもその現象が観察されている（例えば[6]））。体感をとりあえず言葉にすることが肝要である。矛盾しているかどうかは一切気にせずとにかく外化し、それを蓄積する。蓄積しておけば後で再度自分の体感の言葉を俯瞰して考えることができる。「身体を考える」行為において俯瞰は非常に重要である。正しいことをしゃべろうという意識は、言葉を日々蓄積することに大きな妨げとなり却ってマイナスである。たとえ一時的に矛盾することを言葉にしたとしても、それは「俯瞰プロセスで（もしくは実際に身体を動かしたときに何らかの不整合が起き）将来的に捨て去られる運命にあるから大丈夫」という意識をもつことが重要である。

2.3 アスリートがもつべき意識

アスリートはコーチが示す着眼点（what）を鵜呑みにするべきではない。それが自分の身体においてどのような意味を有するのかを探究するための身体的メタ認知を行うべきであると考え、そのために

は

1. 現在自分が有している身体統合モデル(どのように体を動かすスキルを発揮しているか)を明確に意識しなければならない
2. 新しい着眼点を得たときに、それと真剣に考えるべきかどうかの評価をしなければならない(何が自分の身体にとってプラスであるかに関するアンテナを常に張り、キャッチする力を有していなければならない)
3. 2で go サインを自分で下したときは、新しい着眼点を含むことができるような新しい身体統合モデルの構築を目指すことになる。そのためには現在のモデルを一旦破壊して再構築しなければならない。一旦モデルを破壊すると一時的にパフォーマンスは低下することが多々あるため、これは勇気を要する。

大リーグマリナーズのイチロー選手は「自分の身体がどのように動いてヒットを打っているかを説明できることが非常に重要である」という趣旨の言葉をテレビのインタビューで何度も口にしている。まさに1の意識である。

2の点は非常に難しい問題である。廣戸氏の理論を考えればすぐわかることであるが、コーチが選手と違うタイプの間であった場合、しかもコーチがそれを意識できていない場合、コーチが提示する着眼点は必ずしも選手にとってプラスには働かない。筆者の経験談で言えば、K氏と諏訪は明らかに違うタイプの選手であったことに、廣戸氏の理論を知って初めて気がついた。それ以前にK氏からコーチングされたときに指摘された着眼点を重点的に意識すればするほど成績が下がってしまったという体験がある。K氏の指摘のなかには、普遍的に成り立つことと身体固有性に根ざすことが混在していたことにK氏も諏訪も気付いていなかったのである。

何が普遍的で何が個人に根ざすことなのかの境界は非常に曖昧である。廣戸氏の理論に触れ、諏訪は廣戸氏がいうA1タイプであることを実感したときに、即座にそれまでの方針の一部を変更する必要性に気付く(2008年1月の出来事)、それがその後成功を収める大きなきっかけになった(2008年夏に打撃スキルが飛躍的に向上し、夏以降の11試合で約5割の打率を誇った(詳しくは[7])).何がどう作用して、「即座に方針変更」をできたのかは未だ解明できない。それまでに数年のメタ認知の蓄積があったからこそ、有効な着眼点に対するアンテナが張れており適切な着眼点をキャッチする力がついていたのではないかと解釈している。

3に関しても難しい問題を孕んでいる。諏訪は上記のことがきっかけで2008年のシーズンインと

もにまず4~7月にフォームのマイナー修正を試みた。案の定打率は全く伸びず、恐れを為して元のフォームに戻そうとしたが、それもうまく行かず打率は更に低下した。そこで敢えて7月に大々的な修正に着手し、8月初めには全く違うフォームを完成させた。8月以降の成功は上述の通りである。フォーム改造に際しては、身体的メタ認知をより積極的に行い7月までに有していた身体統合モデルを敢えて破壊し、新たな統合モデルを構築した(統合モデルの構築例は、違う時期のフォーム改造の例ではあるが、[2]に詳細に示した)。

現有の身体統合モデルを一旦破壊すると、諏訪の例でも分かる通り、パフォーマンスは低下する。諏訪はプロの選手ではないため、シーズン中にフォームを大きく変えても生活には響かない。しかしスポーツが生活の糧であるアスリートがいつ大々的なフォーム改造に乗り出すかは難しい問題である。パフォーマンスの低下を恐れてシーズン中には全く身体的メタ認知を行わないのも問題がある。先にも述べたように日々身体的メタ認知の習慣付けができていないと、注目すべき着眼点をキャッチするアンテナ力が醸成できない。またメタ認知的言葉の蓄積もされていなければメタ認知の効用が薄れる。パフォーマンスを極度に落とさないようなメタ認知と、身体統合モデルを大々的に変更するようなメタ認知の両者が存在するのだと筆者は考えている。それぞれのものかに関しては未だ解明されていない。今後の研究課題である。

3. 身体統合モデルを模索する行為

3.1 入力か出力か

コーチに示された(もしくは自分で発見した)着眼点が上記の2のプロセスで、真剣に模索すべき対象であると判断したとしよう。そのときに更にひとつ難しい問題が控えている。その着眼点は、結果的に身体がそのように振る舞わなければならない点なのか、それとも意識をそこに注入すべき着眼点なのかは、多くの場合わからないのである。前者を出力としての着眼点、後者を入力としての着眼点と仮に呼ぶことにする。ある着眼点があるアスリートにとって入力であるべきか、出力しての結果なのかは、身体固有性に依る。スキーで前傾姿勢を保つというパフォーマンスを実現するために、あるコーチは向こう脛を靴に押し付けるくらいに膝を前に出すべきだ(着眼点1)と指導し、別のコーチは手の拳を前に出し決して身体の線よりも後ろに流されないように留意すれば(着眼点2)結果的に身体が後傾にな

ることはない」と指導する。ある選手にとっては、意識すべきは着眼点1であり、その結果として着眼点2もそのようになる。別の選手はその逆のこともある。つまり、着眼点と意識すべきポイントはイコールではないということである。何を意識の入力点とするかは、本人の身体的メタ認知により模索する以外に方法はないと考える。コーチの示唆が及ばない範疇ではないかと思われる。

3.2 一カ所を変えることですべてが変わる

ある着眼点での身体の動かし方に関して修正を行うと、それはすべてに影響する。例えば、野球の打撃において「グリップの位置を少しだけ上にしてみる」という修正は、グリップ位置だけの変更には留まらない。グリップ位置を変えることによって、腕の筋肉の活性化状態が変わる。スウィング軌道が始まるまでの過程が変わる。バットという重量のあるものが今までよりも上に移るため、身体全体の重量に関するバランスが全く変わる。身体部位や道具はそれぞれ互いに関係しあっており、その関係性の総体としてひとつのスキルが成り立っている。ある着眼点に基づく部位状態の修正は必然的に数多くの部位に影響を与える。身体統合モデルを構築する（再構築する）とは、まさにその全体関係性を作り上げる作業である。

もちろん他の部位や道具と関係性の強い着眼点もあれば、それほど強くない着眼点もあろう。どの着眼点がどれほどの関係性を含有するものかも個人性に属する側面が強い。アスリート本人の身体的メタ認知により、自らそれを考えざるを得ない。パフォーマンスを極度に落とさないようなメタ認知と、身体統合モデルを大々的に変更するようなメタ認知の両者が存在するのではないかという仮説を上で述べたが、着眼点の関係性の強さを自覚しながら身体的メタ認知を行うことができれば、2つのメタ認知を制御できる可能性がある。

3.3 キーになる着眼点

ある着眼点を得たが故に、一気に身体統合モデルが意識の中で完成することがある。諏訪がメタ認知を行ってきた体験のなかでは、2007年の冬（[2]に詳説した）と2008年の夏（[7]に触れた）の2度、そういう現象に遭遇した。前者は、音楽家のN氏のアドバイスにより、バックスウィング時の股関節の開閉度合いという着眼点を意識したときである。後者は、回転軸と身体的位置関係（Aタイプは回転軸が身体の前側に保たれているべきであるという理論）という廣戸理論に基づいて、バックスウィング時の左足の動きという着眼点を自ら発見したときである。

前者については[2]に詳説があるので参照いただきたい。

いろいろ着眼点を模索してもモデルの構築が遅々として進まないとき、何かの着眼点を得て一気にモデルが完成するときがあるという現象がなぜ起こるのか、一気に完成を促す着眼点を予め予測できないのかなどに関しては未解明である。一気にモデル構築が進むためには、少なくともそれまで様々な着眼点を意識し模索する時期（その多くがパフォーマンスがスランプに陥る時期でもある）が必要であろう。上でも述べたように、スランプにもめげずに継続的に身体的メタ認知を蓄積する時期があって初めて、突然のモデル完成とそれによるパフォーマンスの大ブレイクが成り立つことは明白である。

まさにhowのプロセスである。キーとなる着眼点に関する洞察が得るためには、個々のアスリートのメタ認知データに基づく意識とパフォーマンスの変遷のケーススタディ的研究（例えば[8][9]）を積み重ねる必要がある。

3.4 体感、メタ認知的言葉、パフォーマンス

総じて言えば、身体統合モデルの構築、破壊、再構築というプロセスは、アスリート本人が、コーチなどのアドバイスを受けて着眼点の候補を獲得しながら、身体で実践した自らの体感をよく「聴き」、言語化して、身体的メタ認知の進め方を調節するという道程である。体感、メタ認知的言葉、及び身体が示す結果の3つが示唆する様々な可能性のなかで、その時々に進むべき方向を決断して実行しては、結果や体感が示すことを解釈し、再発見をして方向を修正する必要がある。

4. 「身体を考え」させる支援環境

諏訪研究室では「身体を考える」ことを促す支援環境として、現在2つのツールを開発中である。

4.1 フォームの分節化表現が考えを促す

第一は、メタ認知的にフォームを探究するアスリートが、身体部位の動かし方や意識を修正したときにフォームがどのように変化したかを非常に簡単に可視化し、意識の注入と結果に関する解釈を促し、更なるメタ認知を促す（新しい着眼点の発見を促す）ための映像ツールである。モーションキャプチャでアスリートの運動を計測する。10数点のマーカー位置から身体と道具の総体を簡単な三角形の組み合わせで表現し、各三角形の属性や互いになす角度（法線ベクトルの内積）を計算することによって、各時間フレーム（例えば一フレームが1/240秒）での身

体姿勢を多次元空間の一点にマッピングする．例えば2秒間の身体運動の場合480個の点が空間上にプロットされる．それをK-means法によりクラスタリングし，同じクラスと判定されたフレームを同じ色で表現して元の時系列に戻すと，運動の1試行での姿勢変化（一連の姿勢変化総体を「フォーム」という）が図1に示すようなカラーバーで表現できる．1試行中の連続的な姿勢変化を分節化したことになる．複数試行のカラーバーを図2に示すように並べることで，試行間のフォームの差異が検出できる．試行間のフォームの違いは，色の長さの違いや，時間的に同じタイミングでの異なる色として顕在化されている．アスリートは試行ごとに自分が意識したことと，その結果としてのカラーバーを比較・検討・解釈することで，メタ認知の思考を深めることができる．アスリートが選択した試行のビデオ映像のスライダーの位置に，該当するカラーバーを貼付けたような映像ビューワー（図3）も開発済である．どの色のときには身体がどのようなになっているかを観察することができ，更に複数試行をその観点から比較することができ，アスリート本人のメタ認知的思考を活性化させる．現在図1～3のツールを用いた実験経験を蓄積している．ツールの手法や使用経験（如何にメタ認知を活性化できたかに関する評価）の詳細は[10]を参照していただきたい．

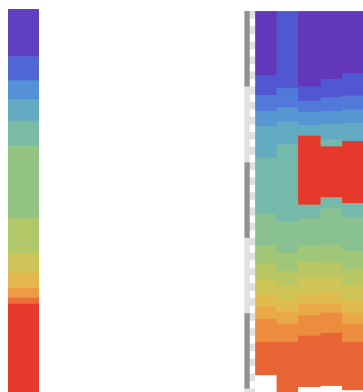


図1：一試行のカラーバー



図2：複数試行のカラーバーの比較



図3：カラーバーを貼付けた映像ビューワー

このツールの本質は，姿勢変化という連続性のあるデータを分節化することにより，試行間の比較検討が可能になり，更にアスリートが自らの動きを解釈することが可能になった点にある．コーチが一方的にある着眼点（what）を指摘するのではなく，試行時の体感の善し悪しがフォーム全体ではどのような差異となって現れるのかをアスリート自らに考えさせるためのツールである．コーチとアスリートが共同してカラーバーを解釈するというコミュニケーションの場を形成することも有意義かもしれない．

4.2 メタ認知の変容の様を可視化する

第二のツールは，日々書き溜めたメタ認知的な言葉を学習者本人が振り返って分析するためのデータマイニングツールである．詳しくは，同日の身体知研究会で伊藤が発表した論文[11]を参照いただきたい．大澤が開発したKeyGraph手法[12]を採用し，メタ認知の日記に登場する頻出語と頻出語間の共起性を図として可視化するものである．

本ツールでは，KeyGraphをブログベースのソフトウェアに改良することにより，日々の書き込みと本人による振り返り分析をシームレスにつないだ．またキーグラフのノードとリンクに属性を付けた．例えば分析対象の全期間の文章を期間という属性で前半と後半に分類し，KeyGraph図のノード（頻出語を表す）に，その言葉が前半に多いのか後半に多いのかを表す円グラフをつけた（図4を参照）．その比率に応じて空間上にノードを配置する位置を決定すれば，期間ごとの比較が容易に行える．また，リンクにも属性をつけた．前半に多いリンクと後半に多いリンク（ユーザーが選ぶ数だけの上位リンク）を色を変えて表示する（図4では前半が緑リンク，後半が青リンクである）ことによって，前半と後半の様々な比較が行える．

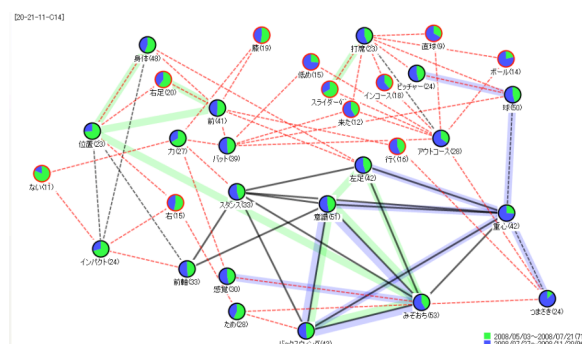


図4：属性付きKeyGraph分析ツールの出力例

5. スキルサイエンス研究のあり方

スポーツを代表例とするスキルサイエンスの研究においては、そもそもどういう着眼点に注目して「科学」すればよいかのわからないケースが多い。従来のスポーツ科学や運動学習の多くの研究は、自然科学的な客観主義、普遍主義に過度に縛られるが故に、着眼点の発見という最重要事項をやらずにすまして来た。例えば熟練者と素人の違いが観察できると過去の研究で既にわかっているような指標（着眼点）を別の研究でも継承して使うというスタイルである。もしくは着眼点の選択は、研究者や現場のコーチの暗黙知に委ねられてきた。そして多数の被験者の運動を既知の着眼点に関して計測し、結果を統計的に分析することで客観性、普遍性を保持した。

スキルサイエンスの研究はその縛りから脱却すべきであると考えられる。あるスキルを解明しようとするに際して（例えば、アスリートがあるスキルに関して次第に熟練度を増していくプロセスの探究）、着眼点は既知ではない。アスリート本人のメタ認知的な意識と身体的パフォーマンスは密接に結びついているため、熟練度が増すにつれて意識も身体も変わる。スキルの分析が客観的に観測するためだけのものではなく、4章で示した例のように、分析をシームレスにアスリート本人にフィードバックすることが学習支援環境として効果があるのであれば、本人が発見する着眼点は熟練度が増すにつれて変化するはずである。

そもそも注目すべき着眼点も既知ではなく、熟練度とともにそれも変化し、着眼点を本人に考えさせるという支援環境そのものが学習システムの内部に入っているような系においては、客観的な観測という自然科学の大前提に縛られず探究すべきであろう。そのような学習系において有意義な着眼点を発見するためには、まずは、被験者数を少数に絞り、深く長期間に渡る個人分析（ケーススタディ）が必要である。次に、そのようなケーススタディを積み重ねることによって少数の個の中に普遍を見出すという研究手法を採用すべきであろう。スキルサイエンスが人間の心や意識と身体の接点を扱う以上、個人性を孕む個のデータを深く長期に渡り探究し、そこに普遍への糸口を見出すという研究手法を「人間科学の研究手法および評価法」として確立する必要があると考える。

謝辞

本研究の一部は、平成20年度日産科学振興財団特別研究課題「身体的感性に応じたデザインの基礎技

術としてのメタ認知方法論の探究—言語化による身体知開拓の学習支援—」及び、平成20年度国立情報学研究所共同研究「身体的メタ認知を促す即時フィードバックソフトウェアの開発」の助成による。

参考文献

- [1] 廣戸聡一：4スタンス理論—正しい身体の動かし方は4つある—，池田書店，(2007).
- [2] 古川康一編著，植野，諏訪他著：スキルサイエンス入門—身体知の解明へのアプローチ（7章），人工知能学会編，オーム社，近刊
- [3] 生田久美子：「わざ」から知る，東京大学出版会，(2007).
- [4] 諏訪正樹. (2005). 身体知獲得のツールとしてのメタ認知的言語化，人工知能学会誌，Vol.20, No.5, pp.525-532.
- [5] Masaki Suwa. (2008). A Cognitive Model of Acquiring Embodied Expertise Through Meta-cognitive Verbalization. *Transactions of the Japanese Society for Artificial Intelligence*, 23(3), 141-150.
- [6] Goel, V.: 1995, *Sketches of Thought*. MIT Press, Cambridge.
- [7] 諏訪正樹：身体性としてのシンボル創発，計測と制御：「高次機能の学習と創発」特集，Vol.48, No.1 (to appear)
- [8] 諏訪正樹、伊東大輔：身体スキル獲得プロセスにおける身体部位への意識の変遷，第20回人工知能学会全国大会，CD-ROM，(2006).
- [9] 諏訪正樹、高尾恭平：パフォーマンスは言葉に表れる：メタ認知的言語化によるダーツの熟達プロセス。第21回人工知能学会全国大会, IH3-6(CD-ROM), (2007).
- [10] 西山武繁，諏訪正樹：身体運動時の姿勢変化の分節化によるスキル熟達支援，人工知能学会第2種研究会「身体知研究会」2008年度第1回研究会，SKL-01-03, (2008).
- [11] 伊藤貴一，諏訪正樹，大澤幸生：メタ認知を促進するツールとしてのKeyGraph分析，人工知能学会第2種研究会「身体知研究会」2008年度第3回研究会，SKL-03-05, (2008).
- [12] 大澤幸生：チャンス発見の情報技術—ポストデータマイニング時代の意志決定支援，東京電機大学出版局，(2003).

メタ認知を促進するツールとしての 属性付き KeyGraph 分析

伊藤貴一^{*1} 諏訪正樹^{*1} 大澤幸生^{*2}
Takaichi Ito Masaki Suwa Yukio Ohsawa

^{*1} 慶應義塾大学

Keio University

^{*2} 東京大学

The University of Tokyo

Abstract: Past literature indicated that meta-cognition is effective for acquisition of embodied skills. Reflecting on at later times what one has meta-cognitively verbalized and accumulated is a “must-do” thing in a meta-cognitive custom. Keygraph, a data-mining technology Ohsawa has devised, could be potentially used for that purpose. However, the original Keygraph is not necessarily suitable for easy visualization of comparison among periods, especially visualization of how a user’s meta-cognition has changed. We have devised a feature-attached Keygraph; which nodes and links are frequent and strong, and how it changes over different periods are visualized and easily interpretable by users. We have applied this tool to the meta-cognition of a baseball player. By looking into the change of structure of nodes and links in the feature-attached Keygraph, we found it possible to interpret how meta-cognition has changed over half a year during which his batting average has drastically changed.

1.はじめに

[諏訪 2005]の中で、身体知獲得するために、メタ認知していることを頑張って言葉にすることの有用性が説かれている。メタ認知とは、自分の認知していることを認知することである。身体知獲得においてメタ認知は、言語化しにくい身体の暗黙知をできるだけ言語にすることで、一度、環境と身体関係を壊し、それを再構築することである。

しかし、論文の中で書かれているように、メタ認知を継続的に続けるのは難しい。人間

は日々の生活の中で、認知をし続けている。しかし、認知したものはすぐ忘れてしまうため、文字として書き留めておかないと消えてしまう。メタ認知をするためには、文章として外部に書き留めておくことが必要である。

また、書き溜めるだけではもったいない(効果が少ない)。今まで書き溜めたものを振り返る、反省のフェーズが必要である。メタ認知を再度振り返ることもまたメタ認知である。メタ認知したことを再度認知して外化することも含めてここでは「メタ認知」と称している。

過去に書いた文章から、環境と身体の関係を振り返ることで、好調の時と不調の時とを比べることで自分の頭の中が徐々に整理され、さらなるメタ認知につながっていくはずである。

このようなメタ認知の研究のためには長期にわたるメタ認知の記述を蓄積し、瞬時に分析するツールが必要である。ここで敢えて「瞬時に」が重要であることを強調しておく。瞬時に分析できるような環境が整っていないと、気軽に過去のメタ認知を振り返る習慣が生まれにくいからである。本論では、メタ認知を書き留め、更に過去のメタ認知を振り返り外化する習慣をつけるためのツールを開発したこと、及びそのツール（特に属性付きキーグラフ）を使ってメタ認知の変容の様を可視化することの有用性や解釈について論じる。

2. 認知の言語化の蓄積・メタ認知の俯瞰ツール

2.1 ツールの目標と目的：ブログベース

このツールの目標は、自分が認知していったことを書いていく中で、簡単に過去の自分を振り返られるようにする（メタ認知）ことである。メタ認知を記述していくプラットフォームとして、既存のブログサービス（はてなダイアリー）を利用した。ブログを利用したのは、多くの種類の端末からどこにいても書き込めるからであり、ブログがネット上に公開されているという点を利用したいからではない。現に今回扱うデータは、プライベートモードであり、公開されていない。

メタ認知を書き込むことと、書き溜めたメタ認知を振り返ることをシームレスに繋ぎ、

日々のメタ認知を活性化することを狙うが故に、ブログベースのツールを開発したのである。このツールを使えば、メタ認知日記を書き込むそばから、日記データを取り込んで形態素解析をし、KeyGraph（次章で説明する）の分析結果を見ることができる。イントロダクションで「瞬時分析」の意味を述べたが、処理は一分以内に終了する。

2.2 KeyGraph

テキストマイニング手法として、KeyGraph[大澤 2003]を使う。KeyGraph は言葉と言葉の関係を可視化し、さらに、低頻度の重要な言葉を抽出し、図示することができる。KeyGraph を使うことで、地の文から離れ、鳥瞰的に文章の構造を見ることができる。そのため、通常の文章にしたとは違う“メタ”認知をすることができる。

2.3 ツールの主な機能

ツールの機能をまとめると、1. WEB ブラウザ機能 2. KeyGraph 機能 3. ログの収集機能の三つである。Web ブラウザ機能はブログに書き込めるようにするためであり、現在見ているブログを元に即時に KeyGraph にすることが出来る。

KeyGraph 画面[図 1]では、下のタブでパラメータの調整などのいくつかの操作が可能である。後述する属性付き KeyGraph も下のタブから可能である。ログの収集機能[図 2]では、過去の日記を取得し、一覧表示をする。KeyGraph にしたい日記を指定できる。

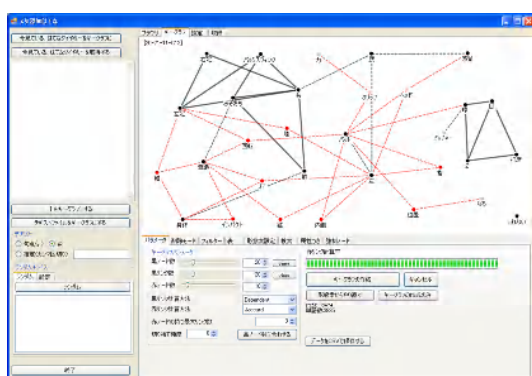


図 1 ツールの KeyGraph 画面

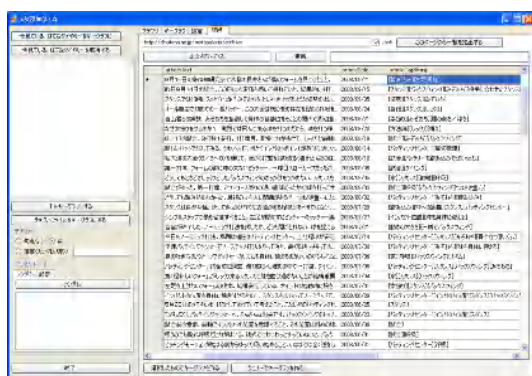


図 2 ツールのログの収集機能

このようにしたことで、従来の KeyGraph ツールとは違い、データを生成し、形態素分析をし、アルゴリズムにかけ、可視化するという手間の掛かる一連の処理をボタン一回押せばすぐにできるようになっている。そのため、KeyGraph をメタ認知のために用いる障壁が下がっている。

3. メタ認知の変容の様を可視化する属性付き KeyGraph

通常 KeyGraph では、一つのデータセットを順序・属性の情報などを無視して、関係を取得する。そのため、「変化」「差分」というものがわからない。変化を可視化する KeyGraph として、従来手法として紙芝居 KeyGraph があり、新手法として属性付き KeyGraph がある。

3.1 紙芝居 KeyGraph

紙芝居 KeyGraph [大澤 2006] は、複数の KeyGraph を重ね合わせて見てみたい、という要望から生まれたものである。単純に、複数の KeyGraph の同じ言葉のノードは同じ場所に配置し、すべてのリンク関係を用いてバネモデルによる配置の算出をするという手法である。それぞれ別の条件で作ったデータを元に KeyGraph を作成することで、構造的変化・差異を発見することが出来る。しかし、あくまで構造的な変化であるので、明確な構造的な差異が存在しないと、違いがよくわからない。差異が小さいと細かい言葉遣いの差ばかりが目立ってしまう。本論文で使用したドメインは後述するように身体運動に関するメタ認知である。身体動作の分析の場合、使用される語彙が限定されるため、言葉のレベルでは大きな差は発生しづらい。そのため、本論文では紙芝居 KeyGraph は使用しなかった。

3.2 属性付き KeyGraph

属性付き KeyGraph [伊藤 2008] は、元々アンケートなどの自由回答文と、回答者属性をクロスして分析したいという発想から作ったものである。文章に属性をつけたデータを用意し、通常 KeyGraph を作成する。そして、ノードの中に属性ごとの頻度の割合を円グラフで書き込み、属性ごとに集計した関係性の強い上位の関係を線（リンク）で円グラフと同じ色で描画する。それによって、量的な変化とリンク構造の変化を可視化する。ここでいう属性とは、文章に付随するものであり、たとえば、文章を書いた人の性別・年齢・ポジションや、書いた日付などであり、文字列として扱う。

本論文では、日付を属性とし、分析対象の

すべての文章の日付を2つまたは3つの期間に分類したものを上位概念の属性とし、可視化する。そうすることで、複数の時間的変化の量的変化を可視化することができる。

各期間（2つもしくは3つ）において関係性の強い上位リンクは、全期間のキーグラフ構造の上に色で表示するという手法を採用した。これにより、各期間の特徴を際立たせ、更に期間同士の比較（メタ認知がどのように変容しているか）を理解しやすくする。4.2節で例を詳細に論じる。

一度に多くの上位リンクを可視化すると、情報量が多すぎて、解釈ができない（する意図が削がれる）。そこでリンク数1（「最上位の関係リンクだけを表示する」ことに相当する）から少しずつ数を増やし（「上位リンクから次第に下位へ」に相当）ながら可視化する仕組みを作成した。このツールの目的はメタ認知を行うユーザーに、自分のメタ認知を振り返って更に「考え」させることにある。ユーザーが少しずつリンク数を操作しながら時期比較（メタ認知がどのように変容して来たか）を解釈できる機能は非常に重要である。また、属性毎に表示のON/OFFを実装し、属性数、リンク数が増えすぎたときにも見やすくした。

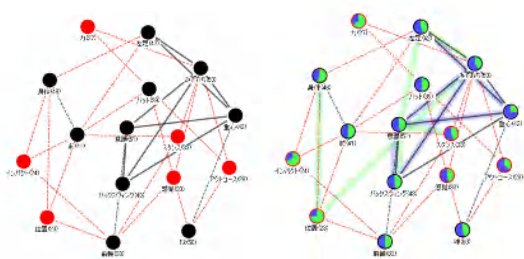


図3 (左) 通常の KeyGraph (右) 属性付き KeyGraph

このツールの機能をまとめると次のようになる。

1. 文章に書いた人の性別・年齢・ポジションや、書いた日付などの属性を付与したデータを用意する。日付などの連続値の場合は2つ3つに分けて纏めたものを上位の属性とする。
2. まずは通常の KeyGraph を作る。
3. 各ノードの中に属性ごとの頻度の割合を円グラフとして書き込む
4. 表示している KeyGraph に含まれるノードの中から、各属性ごとにまとめた共起関係算出し、それを元に、リンクを指定個数描く。情報の多さを克服するために
 - ① リンク数1から徐々に見せる仕組みを実装した。
 - ② 属性毎の表示のON/OFFを実装した。

4.分析と解釈

分析対象として、第2著者が野球のバッティングについて書き溜めたメタ認知の記録を使用する。被験者（第2著者）はそれまで打率1割台のスランプだったのを脱出し、2008年夏に5割台にもいくほど成績が伸びた[図4]。この間に書かれたブログの記事数の合計は44日分の日記である[表1]。被験者はこの期間、フォームの改造を試みていた。この分析をする。

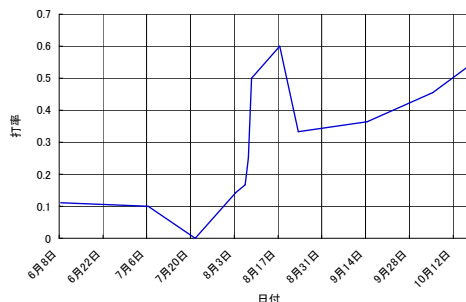


図4 2008年夏の被験者の打率の推移

年	月	記事数
2008	5	10
2008	6	5
2008	7	9
2008	8	10
2008	9	3
2008	10	3
2008	11	4

表 1 : ブログの記事数

4.1 二分割で分析する

日付を属性として、二つに分割し、上位の属性を「5月3日～7月21日（前期）」と「7月27日～11月29日（後期）」した分析である。これは打率が低迷していたときと、打率が伸び始めてきたときの比較である。黒ノード数20，黒リンク数20，赤ノード数10，リンク指標は Jaccard で作成した。通常の KeyGraph[図 5]と属性付き KeyGraph[図 6]である。円グラフの緑が前期、青が後期である。ノードの配置は、割合を元にソートし配置し、バネモデルで計算している。そのため、左から前期の割合が大きいもの順になっている。前期・後期と言う情報を付加したため、割合の違いという意味がノード（言葉）に付与された。

単純に高頻度の語の黒ノードで割合に偏りがあるものを取り出すと、前期は「位置」「インパクト」「身体」「力」であり、後期は「つまさき」「重心」「みぞおち」「アウトコース」である。これだけ見ても、位置や身体そしてインパクトに意識が向いていたものから、重心、つまさき、みぞおちという身体と力の具体的ところに意識が変化していることが見えてくる。従来のキーグラフ[図 5]ではそういった変化を可視化はしてくれない。さらに、前期・後期別々で集計したリンク

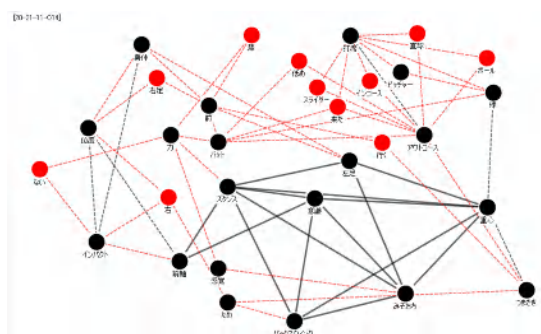


図 5 通常の KeyGraph

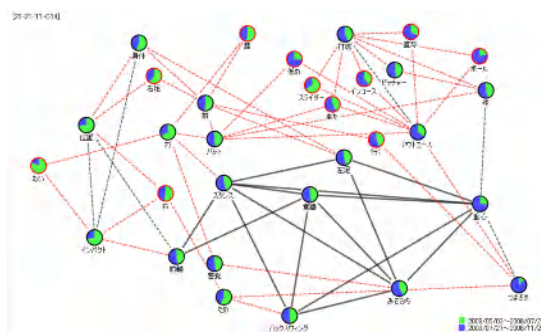


図 6 属性付き KeyGraph

の上位 10 個を付加したものが [図 7]である。前期で、リンクを多く持つノードは「位置」「みぞおち」「意識」であり、後期では、同様に、「重心」「みぞおち」「意識」「ボックスウイング」である。共通にもつ「意識」であっても、前期では「位置とみぞおち」への意識であり、後者は「重心、みぞおち、ボックスウイング」である。

4.2 上位リンクが黒リンク上にはないケースの解釈

後期の上位リンク（青の太線）は大方、全時期での黒リンクになっているものばかりである。一方、前期の上位リンクは、全時期での黒リンクではないものが多い。そもそも、黒リンクが発生するのは、データ全体で関係性が強いものである。指標は Jaccard ($A \cap B / A \cup B$) を使っているため、A と B の頻度の差が小さくて（ともに大きくて）共起関係が強

[20-21-11-C14]

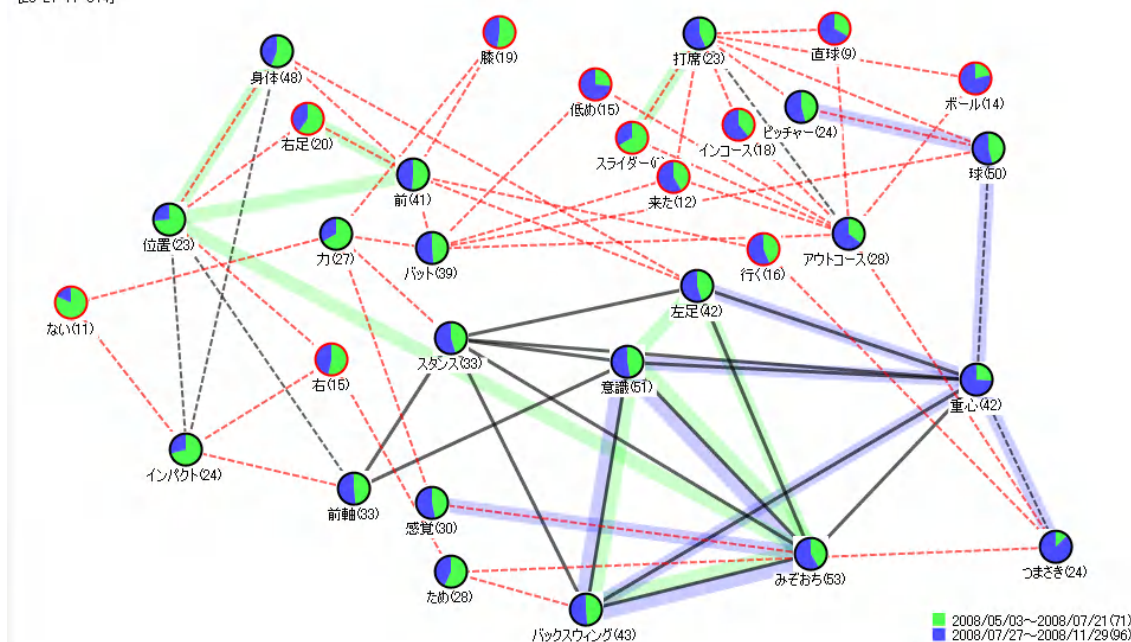


図 7 二分割で各属性に上位 10 個のリンクを描画させた属性付き KeyGraph

いものの評価が高くなる。そのため、当たり前のような関係を指し示すことが多い。つまり、黒リンクは前期・後期合わせた形での被験者の頭の中にある「常識的」な構造である。したがって、前期（もしくは後期）の上位リンクが黒リンク上にないケースとは、全時期に頻度が高かった思考とは異なることをその時期には考えていたことを意味する。前期にそれが現れた場合、前期にはそのリンク（ノード間の関係性）を強く考えていたが、後に棄却されたことを意味する。後期にそれが現れた場合、それまでには考えていなかったような新たな関係性に気付き始めていることを意味する。そういう観点でみると、「位置-みぞおち」「位置-前」「意識-左足」という関係は前期には頻繁に考えていたがその後被験者の中で捨てられたものである。一方、後期は、すべてが黒リンク、赤リンク（同じ指標を使っているので準黒リンクといえる）の上にある。

まとめると、被験者のメタ認知は、前期に

強く意識していた「位置」周辺などの関係（「黒リンクではない箇所に緑リンク」という関係を後期には捨て去り、前期にも頭の片隅にあった関係（即ち「黒 or 赤リンク上に青リンク」）の一部に意識が集中してきた、つまり、意識を再構築し、身体の動かし方に関する意識が統合されて来たといえるだろう。

それは、青リンクと緑リンクの構造の違いも見て解釈できる。注目すべきは多角形リンクである。上位リンクが多角形を為すということは、まさに該当ノードとノード間の共起関係が被験者の意識を占有していること（収束）を意味する。つまりそれだけ思考がまとまりを見せて来ていることの証拠である。前期と後期に共通する三角形がある。「みぞおち-バックスウィング-意識」である。これは前期間を通して意識を占有していた関係性である。後期は、それ以外に、「バックスウィング-意識-重心」という三角形が存在し、しかもそれは「みぞおち-バックスウィング-意識」と互いに 2 つのノードを共有している。つまり三

角形同士の関連性が強い。それに対して前期のもう一つの三角形は「左足-意識-みぞおち」であり、同じく「みぞおち-バックスウィング-意識」と2つのノードを共有しているが、一辺「左足-意識」はその後捨てられる関係性である。

放射状リンクにも注目しよう。前期の緑リンクは「位置」と「みぞおち」を中心に放射状に延びている。「位置」から延びるリンクのほとんどは後には捨て去られる関係性である。放射状リンクは、何か中心的なノードから、様々な変数への関係性を広げている状態（発散）を指すと解釈できる。後には捨てられた関係性が放射状リンクの一部を為しているということは、それは一時的な意識拡大であり結局は意識の根幹的な統合には関与しなかったということである。それに対して、後期の青リンクは、「重心」と「みぞおち」から放射状に延びるリンクが存在する。いずれも赤、黒リンク上の青リンクである。これを見ても、後期にはメタ認知の意識が収束に向かったことが現れている。

以上論じたように、時期ごとのリンクの位置や構造を比較することにより、被験者の意識は発散のフェーズから収束のフェーズに移行したと解釈することができる。8月以降（上の分析では後期に合致する）の成績がスランプを脱却して5割以上の打率を保ったという事実が、言葉の分析ではこのような形で現れているのである。

4.3 三分割で分析する。

同じデータを元に、日付を属性として、三つに分割して分析をする。分割の切れ目は、6月の下旬、8月の中旬である。2番目の（中間の）時期は、被験者の成績は低迷する時期

であり、その後の成績が伸びる前の時期でもあり、いわばスランプ脱却期であるといえる。一度に三種の関係を可視化すると情報量が多いため、前期・中期のペア[図8]、中期・後期のペア[図9]で描画したものを提示する。

前期・中期に注目する [図8]。前期は、二分割の時でも述べたように関係に纏まりがなく、後に捨てられる関係性（緑リンクのみ）をいろいろと考えていたこと、発散的に考えていたことが伺える。中期は、前期と比べれば割と考えがまとまり始めている。しかし、青リンクが必ずしも黒リンクに沿っているわけでもない。三角形構造も、「左足—みぞおち—意識」に唯一見られるが、その一辺「左足—意識」はその後捨てられる。「打席-ボール-直球」という、他の青リンクとは結合されない単独の意識（試合での出来事）が念頭にあるようだ。

中期・後期の比較をしよう[図9]。「重心-左足-スタンス-意識-バックスウィング-みぞおち」から作られる黒リンクの多角形構造を見て欲しい。中期には、「バックスウィング」は「みぞおち」としか関係しない（青リンク）。しかし後期には、「みぞおち」「重心」「バックスウィング」「意識」の4つのノードの間に4つの三角形構造がいずれも橙リンクになっている。ひとつ特記すれば、「重心-みぞおち」という関係は中期には「左足」介して遠回りに考えていたのに対し、後期には「重心-みぞおち」という直接の強い関係性を持ち出したと考えられる。いろんなものがいろんなものにつながるという構造が理論構築の証拠ではないかという仮説を4.2節で述べたが、3分割の比較では、特にその傾向が見て取れる。

[20-21-11-C14]

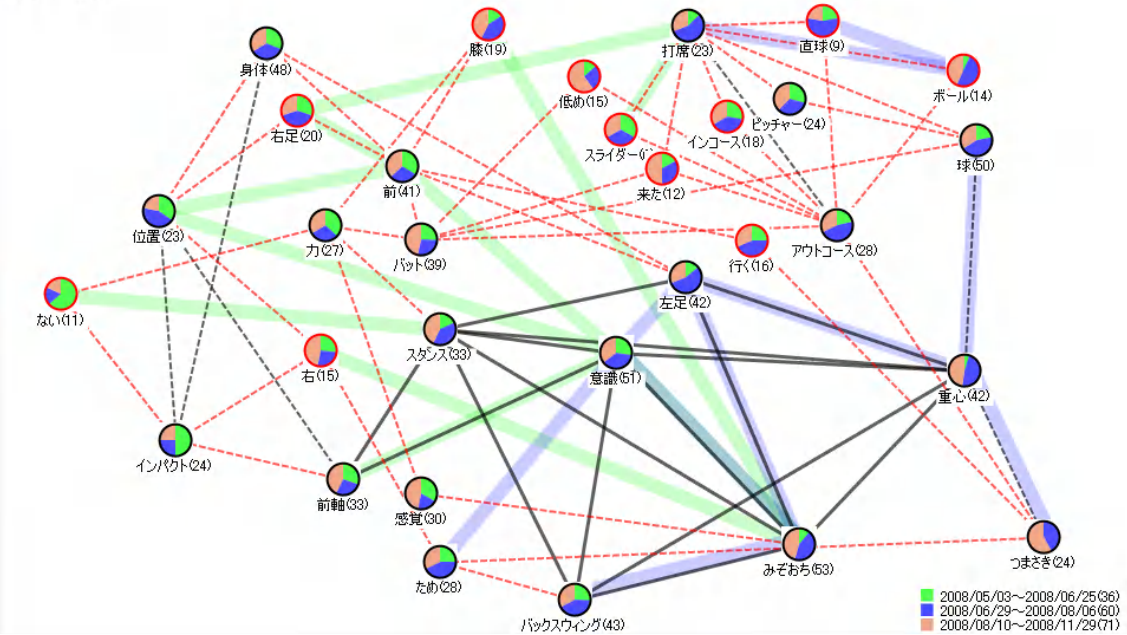


図 8 三分割で前期、中期を描画した属性付き KeyGraph

[20-21-11-C14]

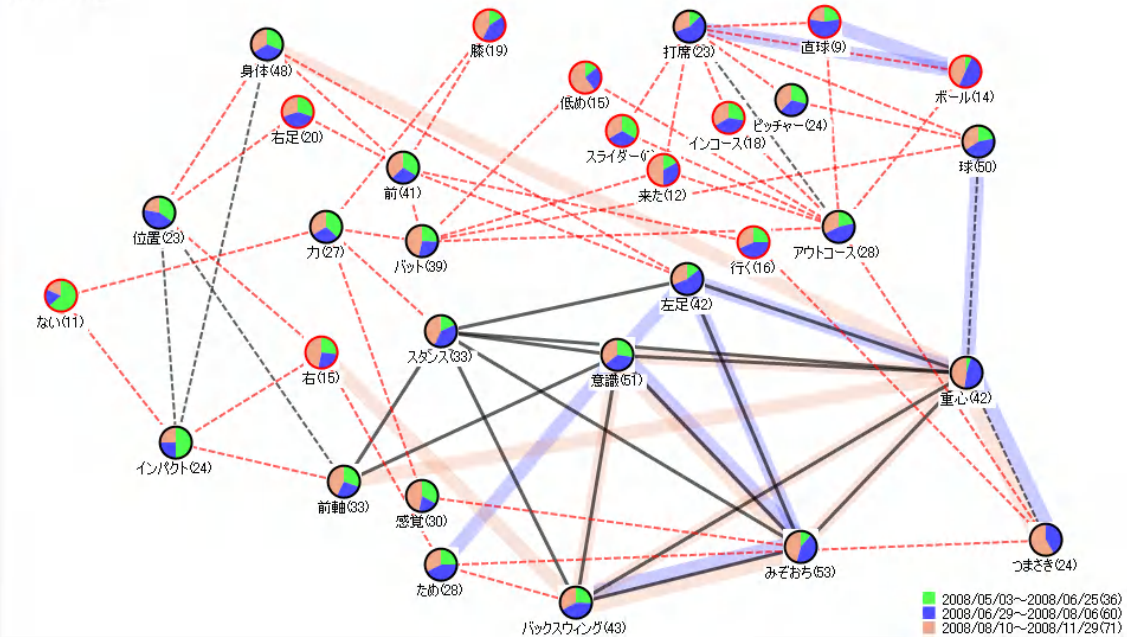


図 9 三分割で中期、後期を描画した属性付き KeyGraph

さらに、後期には、「重心-前軸」「ボックスウィング-右」といった新たな関係（黒リンクなしの橙リンク関係）を意識し始めていることが伺える。多角形構造を為している中心的ノードである「重心」と「ボックスウィング」から新たな変数への発散的思考も現れ始めていると解釈できる。この時期までに構築した「身体と環境」の関係をまた壊し、再構築しようとする意識の現れかもしれない（これが実際に再構築に繋がるかどうかは今後をまたないと結論付けは出来ないが）。2分割という大雑把な分割ではみえなかったことが前期—中期、中期—後期と3分割を二つのグラフに分けて見せることによって顕在化し、解釈可能になったことの良い例であろう。

5. 結論

メタ認知の蓄積と瞬時の可視化により、時間変化に従って自分の考えは纏まってきているのか、そうでないのかをリンク構造で顕在化させることができる。メタ認知を活性化させるためには、このように「反省のフェーズ」を生々の文章から離れて俯瞰的に行うことが必要であると考え。このような分析が可能になるためには、日々のメタ認知の言語化と蓄積が必要である。ブログベースになっているこのツールは、蓄積と分析がシームレスに結びついて習慣化できるため威力を発揮する。本論文での分析は後になってからこのツールで現象を検証したに過ぎないが、メタ認知をしているそばからユーザーが時期を指定して振り返ることで、その後のメタ認知を促す効果があるのではないかと考える。今後その観点からの使用経験を積み、ツールの有効性発見と更なる開発を目指す。

謝辞

本研究の一部は、国立情報学研究所共同研究「身体的メタ認知を促す 即時フィードバックソフトウェアの開発」の助成によるものである。

参考文献

- [諏訪 2005]諏訪正樹:身体知獲得のツールとしてのメタ認知的言語化, 人工知能学会誌, Vol.20, No.5, pp.525-532(2005)
- [大澤 2003]大澤幸生:チャンス発見の情報技術—ポストデータマイニング時代の意志決定支援, 東京電機大学出版社(2003)
- [大澤 2006]大澤幸生:チャンス発見のデータ分析—モデル化+可視化+コミュニケーション→シナリオ創発, 第8章, 東京電機大学出版社(2006)
- [伊藤 2008]伊藤貴一, 大澤幸生: 属性付きキーグラフ, 第22回人工知能学会全国大会, 2B2-04, (2008)