

アナログカルアブダクションにおける仮説の選択について

On Hypotheses Selection in Analogical Abduction

古川康一^{*1}
Koichi Furukawa

原口誠^{*2}
Makoto Haraguchi

升田俊樹^{*3}
Toshiki Masuda

金城敬太^{*4}
Keita Kinjo

尾崎知伸^{*5}
Tomonobu Ozaki

^{*1} 嘉悦大学大学院ビジネス創造研究科
Graduate School of Business Innovation, Kaetsu University

^{*2} 北海道大学大学院情報科学研究科
Graduate School of Information Science and Technology, Hokkaido Univ.

^{*3} チェリスト
Cellist

^{*4} 沖縄国際大学経済学部経済学科
College of Economics and Environmental Policy, Okinawa International Univ.

^{*5} 日本大学文理学部情報科学科
College of Humanities and Sciences, Nihon Univ.

In this paper, we report our attempt to identify suitable criteria to select hypotheses by experimental studies comparing two analogical models, self-oscillation and stone skipping, in acquiring one-bow staccato technique known to be very difficult. We found two criteria, persuasiveness of analogy and validity of the model. In one-bow staccato case, we conducted experimental studies by asking amateur cellists to practice the task given each explanation and we found that stone skipping is easier to understand and effective in acquiring the skill. We then designed how to realize the selection mechanism in our analogical abduction system based on SOLAR.

1. はじめに

著者は、アブダクションにアナロジーを組み込んで、弦楽器の演奏における困難な課題を可能にするコツの説明を求める研究を遂行し、一階述語論理の定理証明器 SOLAR[Inoue 92][Nabeshima 10]の上にシステムを構築した[金城 14][Furukawa 14]。そこでのアブダクションの役割は、コツの説明(証明)をするために補わなければならない証明図式中の欠落部分を同定することである。すなわち、証明図式でどこを補えば良いのかを探す問題である。一方、アナロジーは、そのように発見された欠落部分の意味を、ほかの系で既知の事実を援用して、類推によって推察する役割を持つ。たとえば、スピッカートにおいて薬指によって弓を支えることが重要であると(専門家によって)知らされた時、それがなぜなのかを強制振動とのアナロジーで説明する、といった具合である。それは、強制振動を成り立たせるための2つの条件、すなわち、エネルギーの注入を最大振幅の直後に行うことと、エネルギーの注入の際に振動系に外乱を与えないことのうち、薬指による弓の保持をどちらかに対応させることで達成される。この場合は、薬指での弓の保持が後者の振動系に対するショックの吸収に対応することを示せばよい。この対応は、物理的にも解釈が可能であり、納得のいく説明を与える。

ところで、アナログカルアブダクションは、アブダクションが抱えている、多くの仮説の中からどのように適切な仮説を選ぶのかという仮説選択問題をそのまま受け継いでいる。あるいは、この問題は、類比系との対応付けの際に生じる新たな選択問題が加わるので、さらに拡大している。

本論文では、チェロの困難な奏法の一つである一弓スタッカートの習得のためのアナロジーによる説明において、2つの異なるモデルを考え、それらのどちらがより適切な説明を与えるのかを被験者による評価実験を通して明らかにし、その適切性の差異が生じる原因を明らかにし、その結果をアナログカルアブダクションシステムに活かすためのアプローチを提案する。

2. 関連研究

ヘッセ[ヘッセ 86]は、科学の分野でのアナロジーの役割について考察し、2つの対象(ベースとターゲット)の間のアナロジーの定式化の枠組みとして、ベースあるいはターゲット内でのコンポーネント間の因果関係、および2つの対象間に同一か差異の関係を導入した。そして、仮説選択の問題を、1. 帰納的支持の強さ、2. 仮説の確率、3. 反証可能性、4. 単純さ、の4点から考察している。

一方、Inoue[Inoue 09]は、二分決定グラフ上で動作する EM アルゴリズムを用いて、述語論理上での発想推論により導出された仮説に対する評価を行う枠組みを提案した。また代謝パスウェイに関する推論を題材に、提案した枠組みの有用性を示した。

アナロジーの問題において、とくにベースが抽象的・一般的に記述されている場合は、抽象物の具体化としてターゲットの一部とマッチングできる。こうした問題として例えば、判例要旨と判例のマッチング問題を考えることができ、喜多[喜多 14]では、動詞の格構造に関して名詞が持つ構造類似性を輸送問題最適解として算出する方法を与え、その有効性を示している。

3. 一弓スタッカートの二つの類推ベース

3.1 自励振動モデル

自励振動とは自分自身の動きが振動源になっている振動現象であるが、その一つである摩擦振動はとくに動きの途中に摩擦による躓きが起り、その躓きによって繰り返し同じ現象が発生する現象である。摩擦振動の発生は、速度が変化すると摩擦力も変わってくることで、とくに、速度が遅くなると摩擦力が却って大きくなることに起因している。このような現象を負性抵抗と呼ぶ。静止摩擦は動摩擦に比べて大きいことが知られているが、これも負性抵抗の例である。

摩擦振動の例としては、黒板上での白墨の破線引きがよく知られている。白墨で破線を引く場合、2つの点が重要である。その一つは、白墨の進行方向と白墨自身の成す角度である。そ

連絡先: 古川康一, 慶応義塾大学名誉教授

〒168-0065 東京都杉並区浜田山 4-22-14, TEL: 03-3312-1905, kfurukawa109@gmail.com

の角度が適度な鈍角(たとえば 120 度程度)を維持し続けると、白墨がうまく黒板に引っ掛かり、その摩擦力により、連続して破線を引くことができる。もう一つは、指のバネである。白墨をしっかりと持って、指と一体にすることにより、指のバネを復元力に使うことが可能になる。

3.2 石の水切りモデル

一弓スタックートの第2のモデルである石の水切りは、平らな小石を水面に出来るだけ水平に投げて、水面に石を連続的に弾ませる遊びである。石の水切りが成功するためには、その投げ方を工夫しなければならない。最も大切なのは、石が水に当たったときの角度で、その角度が 10~20 度が良く弾むことがシミュレーションによって示されている。また、石が回転していることも上手くいく条件のようである。

ところで、水切りから得られるヒントは、石の投げ方である。石の水切りでは、石の入射角を水面に対して 10~20 度になるように、上腕と前腕の成す面を最適な角度で一定に保ち、投石すると仮定した。これを一弓スタックートに応用するには、第1に上腕、前腕および掌が平面を成すように工夫する。具体的には、上腕と前腕の成す平面を運弓中維持し、さらに、手首も折れないようにする。また、指先もできるだけ曲がらないように、親指を伸ばして弓を保持し、ほかの指も伸ばして弓を保持する。また、弓を弾ませる時にその反動で弓が大きくぶれないように、弓をしっかりと保持する。通常の弓の保持のように親指を曲げ、弓をつまんで指の関節を柔軟にしようとする、弓をしっかりと持つことができず、そこで力が逃げてしまう。一弓スタックートでは、むしろ、弓を挟んで持つのが良い。さらに、親指だけでなく、ほかの指も伸ばして弓を持つとさらに安定する。指と指の間隔も広げた方が弓の安定性が増す。

石の入射角を真似するためには、アップボーの場合、右肘を少し上げて弓を動かす。

4. 一弓スタックートスキルの習得実験

本論文の第1著者が所属しているアマチュアオーケストラのチェロセクションのメンバー4人に、上に述べた2つのモデルを説明して、一弓スタックートの習得を促す実験を行なった。以下では、実験に使われた指示を示す。

4.1 自励振動モデルによる習得実験

以下は、自励振動モデルでの習得実験の際に被験者に示された説明文である。

- 弾き方1 自分の弾き方で弾いてみてください。
- 弾き方2 肘を上げて弾いてみてください。
- 弾き方3 肘を上げ、かつ弓を強く挟んで弾いてみてください。
- 弾き方4 弾き方3と同じです。ただし、以下の説明を読んでから、弾いてみてください。

弾き方3は、自励振動をモデルにしています。自励振動の詳しい説明はしませんが、黒板にチョークで破線を引くときの現象です。その方法は、やってみれば分かりますが、チョークの進行方向と黒板の角度を鈍角に保ち、かつチョークを指でしっかりと挟んで持ってバネを作ると、うまく出来ます。チョークが黒板上で引っかかりながら前進し、そのために破線が引けることになります。この原理を応用するのです。チョークの進行方向と黒板の角度を鈍角に保つことは、弓の力の方向と弓の面の角度を鈍角に保つことに相当します。弓の力の方向は、アップボーの場合、肘を上げると弓の方向に対して鈍角になります(ダウンボーの場合は、反対に肘を下げると鈍角になります)。もう一つの、チョークのバネは、弓のバネになります。弓をしっかりと保持すればよいことになります。しっかりと保持するには、弓を

挟めばできます。すなわち、親指を伸ばしたままにして、親指とその他の4指で挟みます。このやり方が、弾き方3の説明です。

4.2 石の水切りモデルによる習得実験

石の水切りモデルでの習得実験の際に被験者に示された説明文は、以下のとおりである。

- 弾き方1 自分の弾き方で弾いてみてください。
- 弾き方2 肘を上げて弾いてみてください。
- 弾き方3 肘を上げ、かつ親指を伸ばして弓を挟んで弾いてみてください。指全体が突っ張るような感じで、弓を保持してください。手首、指は、固めにしてください。上腕の力が必要かもしれませんが。前腕と上腕が作る平面を意識的に維持してください。
- 弾き方4 弾き方3と同じです。ただし、以下の説明を読んでから、弾いてみてください。

➤ 弾き方3の説明(1)

弾き方3は、水切りをモデルにしています。水切りは、平たい石を静かな水面に水平に投げて、連続的にバウンドさせる投げ方です。水切りのフォームを採り入れるのがここでの眼目です。現象的にも、一弓スタックートを行うときに最初、弦に弓をバウンドさせて、その勢いで引き続いてバウンドさせる動きが、水切りの動きと類似している、と考えられます。水切りで重要なのは、腕の振り方です。腕の動きを水面と並行になるように、掌、前腕と上腕によって作られる平面を維持するように動かします。掌を平らにするために、親指を伸ばして、弓を挟んで持ちます。手の動きは、上腕、前腕、掌を一体にして動かします。

➤ 弾き方3の説明(2)

弾き方3の別の説明です。腕の振りの周期に着目すると、一弓スタックートでは、一弓全体の動きで周期が決まります。一弓でない場合に比べて、2音なら周期が倍に、3音、4音なら、それぞれ3倍、4倍と遅くなります。遅い周期の運動を行うためには、振り子長をより長くするために、振り子の支点を手首、肘、肩の順に、移動させる必要があります。そのとき、単に振り子の支点を移動させるだけでなく、指、手首など、視点でなくなった個所は、どちらかという固定しなければなりません。固定しないと、そこが支点になってしまうからです。たとえば手首を固定するためには、前腕の筋肉を緊張させる必要があります。また、指を固定させるためには、手首から指にかけて、突っ張るように力を入れる必要があります。このために親指を伸ばして、弓を挟んで持ちます。

4.3 一弓スタックートスキル習得実験結果の考察

- (1) アナロジーの納得性: 納得できるアナロジーでなければ、受け入れられない。チェロの一弓スタックートの例で、「自励振動」および「石の水切り」の二つのアナロジーによる実験を行った結果、前者の「自励振動」では奏法の改善が認識できた被験者が皆無であったが、後者の「石の水切り」モデルでは、4名中3名が一弓スタックート技術の改善を認めた。すなわち、「石の水切り」の方が納得が得られることが判明した。その理由として考えられるのは、「自励振動」についての予備知識が被験者に欠落していること、すなわち、力学モデルの理解の難解性が挙げられる。一方、「石の水切り」は、比較的イメージしやすく、また、動作の類似性があること、さらに、力の入れ具合への直接的な応用が可能で、などがその理由と考えられる。
- (2) モデルの妥当性: より厳密に考えると、二つのモデルの重大な違いがその原因かも知れない。自励振動モデルでは、負性抵抗により、振動のサイクルごとに、摩擦が引き起こす躓きによる新たなエネルギーの注入が行われるが、一

方、水切りモデルでは、はじめの大きな弾みだけでそのあとの連続ジャンプがなされている。そして、一弓スタックカートでは、後者のモデルの方がより近いのではないかと思われる。

さらに、一弓スタックカートでは、果たして負性抵抗現象が発生しているのか否かが明らかではない。むしろ、発生していない可能性もある。もし、負性抵抗になっていない場合、自励振動モデル自身が成り立たなくなることになる。

5. 反証実験

最も明確な仮説選択手法は、無矛盾性の検査である。上に述べた一弓スタックカートの例では、もしそれが負性抵抗の性質を持っていないければ、自励振動モデルは成り立たなくなる。そのような検査は、理論的な考察でなされる場合もあるが、実験的に確かめられる場合もある。一弓スタックカートの場合、果たして負性抵抗現象が現れているか否かを調べるには、弓が弦を擦る時の摩擦現象を精密に測定して明らかにすることもできるが、もうひとつの方法としてはチェロの被験者に対するインタビュー調査によって、弓が躓くような感触を得られたかどうかを確認することによって、明らかにすることも可能である。これらの反証実験は、モデルの納得性をより強固にするのにも役立つと思われる。

6. アナログカルアブダクションの制御への反映

6.1 (1), (2)のアナロジーの構造類似性・重みへの写像

上記のようなアナロジーの納得性やモデルの妥当性を判定して仮説を選択するために、アナロジーを行う際に導出される因果関係に対して重みを与えることが考えられる。ある事象 X および Y の間に直接的な因果関係があるとした場合、connected(X, Y)という述語で表現される[Furukawa 14]。仮に仮説にこうした関係が出てきた場合に実際に因果関係が強いのか否かを connected(X, Y)に付随する重みとして引数 W を追加し、仮説選択の際に、この W が高いものを選択する。これらの W については、実験が可能な場合、相関係数や独立係数を利用することも想定される。本研究の(1)と(2)の例では、下記のように表現できる。

- (1) connected(一弓スタックカート, 振動のサイクルごとの摩擦が引き起こす躓きによるエネルギーの注入, W_1)
- (2) connected(一弓スタックカート, 大きな弾みとその後の連続ジャンプ, W_2)

ただし、 $W_1 \leq W_2$ 。

また、これらの関係の重みだけではなく、ターゲットとベースにおける因果関係の構造の類似性が上記のようなアナロジーの納得性に結びついている可能性もある。これらを考慮して、グラフ間の距離を導入する方法もある。例えば、写像した場合にベースの中に余分な関係が多いか少ないかを利用することや、グラフ的な距離の近さを利用してグラフ編集距離などを利用して判定することも可能であろう[Bunke 98]。

6.2 アナログカルアブダクション選択機構の実現

仮説選択機構の最も単純な実現方法は、推論結果の後処理として、仮説選択を行うというものである。一方で、推論機構そのものに仮説選択機構を直接組み込むことで、より効率的かつ効果的な仮説選択の実現が期待できる。一般的に、発想推論は探索問題として定式化できるので、アナロジーの納得性やモデルの妥当性を重みとして表現することを考えると、これらの重みに関するある種の最良優先探索のような機構を導入することで、望まれる仮説を優先的に導出することが可能となると考えられる。

一方で、Meta-Interpretive Learning システムである Metagol [Muggleton 14]のように、導出すべき仮説のクラスや形式毎に精緻な推論システムを準備し、それらを順番に適用するという考えられる。これは、ある意味でバイアスを変更しながら複数回の推論を行うというものであり、優先すべき仮説の形式やクラスが直接表現可能な場合に強力な手法となると考えられる。

いずれにせよ、推論システムへの仮説選択機構の導入に関しては、今後更なる検討が必要である。

7. おわりに

本稿では、チェロの一弓スタックカート奏法の獲得を例に取り、自励振動と石の水切りの二つのモデルを取り上げて、仮説の選択問題への切り口を論じた。そして、アナロジーの納得性および仮説の妥当性の二つが仮説の選択にとって大きな意味を持つことを示した。加えて、この二つの選択基準を如何にして実際アナログカルアブダクションシステムに反映させれば良いのかについて論じてきた。実システムへの導入は、今後の課題である。

謝辞

本研究は、平成 24 年度~26 年度にわたる科研費「ルールアブダクションとアナロジーによるスキル創造支援」(課題番号 24500183)によってサポートされた。また、一弓スタックカートの習得実験では、吉祥寺フィルハーモニー管弦楽団のチェロセクションの皆様のご協力を得た。ここに深謝する。

参考文献

- [Nabeshima 10] H. Nabeshima, K. Iwanuma, K. Inoue, & O. Ray: SOLAR: An automated deduction system for consequence finding. *AI communications*, 23(2), 183-203, 2010.
- [Inoue 92] K. Inoue: Linear Resolution for Consequence Finding, *Artificial Intelligence*, Vol.56, No.2, 301-353, 1992.
- [金城 14] 金城 敬太, 尾崎 知伸, 古川 康一, 原口 誠: アナロジーを組み込んだルール発想推論によるスキル獲得支援, *人工知能学会論文誌* Vol. 29, No. 1, 188-193, 2014.
- [Furukawa 14] K. Furukawa, K. Kinjo, T. Ozaki, & M. Haraguchi: On Skill Acquisition Support by Analogical Rule Abduction, In *Information Search, Integration, and Personalization*, Springer International Publishing, 71-83, 2014.
- [ヘッセ 86] メアリー・B・ヘッセ, 高田紀代志(訳): 科学・モデル・アナロジー, 培風館, 1986.
- [Inoue 09] K. Inoue, T. Sato, M. Ishihata, Y. Kameya, & H. Nabeshima: Evaluating Abductive Hypotheses using an EM Algorithm on BDDs. In *IJCAI*, 810-815, 2009.
- [喜多 14] 喜多 陵: 記述の構造類似性に基づく法的観点と判例のマッチング, 北海道大学大学院情報科学研究科コンピュータサイエンス専攻, 修士論文, 2014.
- [Bunke 98] H. Bunke, K. Shearer: A graph distance metric based on the maximal common subgraph, *Pattern recognition letters*, 19(3), 255-259, 1998.
- [Muggleton 14] S.H. Muggleton, D. Lin, N. Pahlavi, & A. Tamaddoni-Nezhad: Meta-interpretive learning: application to grammatical inference, *Machine Learning*, 94, 25-49, 2014.