

# 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

## On Skill Acquisition Support by Analogical Rule Abduction

金城 敬太<sup>\*1</sup> 尾崎 知伸<sup>\*2</sup> 小林 郁夫<sup>\*3</sup> 原口 誠<sup>\*4</sup> 藤波 努<sup>\*5</sup> 古川 康一<sup>\*6</sup> 升田 俊樹<sup>\*7</sup>  
Keita Kinjo Tomonobu Ozaki Ikuo Kobayashi Makoto Haraguchi Tsutomu Fujinami Koichi Furukawa Toshiki Masuda

<sup>\*1</sup> 沖縄国際大学経済学部経済学科

<sup>\*2</sup> 日本大学文理学部情報科学科

College of Economics and Environmental Policy, Okinawa International Univ. College of Humanities and Sciences, Nihon Univ.

<sup>\*3</sup> 慶應義塾大学 SFC 研究所

<sup>\*4</sup> 北海道大学大学院情報科学研究科

Keio Research Institute at SFC

Graduate School of Information Science and Technology, Hokkaido Univ.

<sup>\*5</sup> 北陸先端科学技術大学院大学知識科学研究科

<sup>\*6</sup> 嘉悦大学大学院ビジネス創造研究科

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

Graduate School of Business Innovation, Kaetsu Univ.

<sup>7</sup> チェリスト

Cellist

In this paper, we report our attempt to realize analogical abduction as an extension of our work on meta level abductive framework for rule abduction and predicate invention. In our previous work, we gave a set of axioms to state the object level causalities in terms of FOL clauses representing direct and indirect causalities by transitive rules. We extend our formalism of the meta level abductive framework by adding rules to conduct analogical inference. We applied the analogical abduction to difficult cello playing techniques of spiccato and rapid cross strings of the bow movement and succeeded to give persuasive explanations how to play them by adopting analogical abduction. We selected forced vibration dynamics as the base world for spiccato and muscular structure of the hand for the cross string bowing.

### 1. はじめに

技芸におけるスキル獲得では、コツの重要性が指摘されている。コツは多くの場合、指導者によって与えられ、「課題 A をこなすためには行為 B を行えばよい」という形で提示される。すなわち、コツは課題依存であり、その効用は非常に大きい。コツのコツたる所以は、「行為 B」が容易には思いつかない点である。もし容易に思いつくのであれば、指導者は不要であろう。さらに、コツがなぜ有効なのかの説得力のある説明が容易には得られないという問題もある。

一方、アブダクションは、「驚くべき事実」が観測されたときに、その事実を説明するために必要な仮説を生成する。もしその事実がありきたりのものであれば、おそらく我々が知っている事柄からその事実が容易に導き出されるはずであるが、それが驚くべき事実であれば、なにか見過ごしている前提があり、その前提を知らなければ、その事実が成り立つことが容易には説明できないことになる。

この枠組みは、スキル獲得にちょうど当てはまる。コツは驚くべき事実であり、その理由は自明ではなく、欠落した前提の発見が必要である。その発見のために、アブダクションを行うことになる。より正確に言えば、行為 B を事実として与えて、課題 A を成り立たせるための仮説の生成問題として、アブダクションを考えることができる。そのとき、A がゴールで、A の証明中に B が証明の末端に出現し、その間に欠落している仮説を発見しなければならない。そのため、コツの説明問題は、ルール仮説の生成問題として形式化される。我々は、このことをルールアブダクションと呼ぶ。ルールアブダクションは、通常の論理プログラムに基づく発想論理プログラミングなどのアブダクションシステムでは

扱えない。我々は、メタレベルアブダクションのフレームワークにより、ルールアブダクションを実現した[古川 09] [Inoue 09]。

しかしながら、ルールアブダクションは、それだけでは不十分である。例として、「高速移弦をこなすためには親指を曲げればよい」というコツを考えてみよう。その場合、必要となる欠落ルールは、そのコツ自身である。すなわち、ルール:「親指を曲げれば高速移弦ができる」がアブダクションで発見されるべきルールとなる。しかし、容易に分かるように、このようなルールは、ルールとしての意味がない。それは、なぜそのルールが有効なのかを説明してくれないからである。

本論文では、そのようなルールの有効性をアナロジーによって説明する方法を与える。ルールの有効性を示すためには、隠された本当の理由を探さなければならない。そのために必要となるのが、そのような未知の理由を説明するための述語発見とその述語の意味を把握するためのアナロジーである。

本論文では、3つのアナログカルアブダクションの問題を取り上げて、その具体的な解法の提案を行う。

以下、2章では提案方法の概要を述べ、3章で具体例でのプログラムとその実行結果を示し、4章では考察と今後の課題について述べる。

### 2. 提案方法

#### 2.1 アブダクションシステム SOLAR

アブダクション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、一階述語論理上のアブダクションの定義を与える[Inoue 92]。

##### 定義 2.1

**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  $\Gamma$  が与えられたとき、**アブダクション**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。

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

このとき、**H** を (**B,  $\Gamma$**  に関する) **G** の**説明**あるいは**仮説**と呼ぶ。**H** 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。

一階述語論理上のアブダクションシステムとしては、SOLAR が知られている[Nabeshima 03]。SOLAR では、論理プログラムではなく全一階述語論理上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。

SOLAR で仮説を求める方法は、逆伴意法である[Muggleton 94]。アブダクションの問題において、**G** の説明 **H** 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  $\Gamma$  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、 $\neg H$  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。後で述べるように、仮説に現われる存在限量された変数は、述語発見に用いられる。

## 2.2 因果関係に基づくメタレベルアブダクション

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、あるいは事実から上方に因果関係グラフを進めることにより、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、ゴール述語から事実に至る妥当な経路が存在しない。その場合、途切れた経路を結ぶか、あるいは、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による形式化を行う [Inoue 09]。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  $connected(p, q)$  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  $caused(p, q)$  が真であると定義する。このとき、次の2式が成立する:

$$\begin{aligned} caused(X, Y) &\leftarrow connected(X, Y). \\ caused(X, Y) &\leftarrow connected(X, Z) \wedge caused(Z, Y). \end{aligned} \quad (1)$$

すなわち、元々の因果関係が成り立つ世界、たとえば、「親指を曲げる」と「高速移弦」ができる、といった因果関係は、一つのアトム“ $caused$ (高速移弦, 親指を曲げる)”で表現される。

ここで注意を要するのは、 $connected$  あるいは  $caused$  が含意関係のみならず、因果関係をも意味している、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  $connected(p, q)$  は、 $q$  は  $p$  が引き起こされるための原因の一つであることを意味している。

## 2.3 新ノードの導入

以下のような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 2.1):

$caused(g, s).$   
 $\leftarrow connected(g, s).$

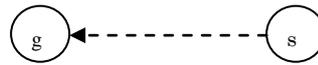


図 2.1 直接因果関係にない観測された関係

これらの観測を説明するために、 $connected$  を **abducible** 述語としたときのフル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。

$$\exists X. (connected(g, X) \wedge connected(X, s)).$$

$X$  は新述語に対応している(図 2.2)。

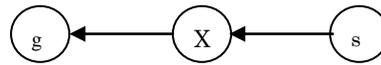


図 2.2 あるノード  $X$  を介した説明

## 2.4 アナロジーの導入

アナロジーは、アブダクションと同様、論理的に正しい推論ではないが、対象世界と類似の系で成り立つ関係を元の世界に持ち込んで推論を続ける方法である。アナロジーを演繹推論に持ち込む方法としては、原口による類比およびメタプログラミングによる手法[Haraguchi 85] [原口 86]および Goebel による等式系による形式化[Goebel 89]がよく知られているが、ここではその手法をメタレベルアブダクションのためのメタルールを拡張することによって実現する。

考察対象の世界をターゲット世界と名付け、アナロジーを取る世界をベース世界と名付ける。ターゲット世界およびベース世界での因果関係を別個に扱うために、まず初めに(1)式に対応する、それぞれ固有の因果関係式を導入する。

$$\begin{aligned} t\_caused(X, Y) &\leftarrow t\_connected(X, Y). \\ t\_caused(X, Y) &\leftarrow t\_connected(X, Z) \wedge t\_caused(Z, Y). \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} b\_caused(X, Y) &\leftarrow b\_connected(X, Y). \\ b\_caused(X, Y) &\leftarrow b\_connected(X, Z) \wedge b\_caused(Z, Y). \end{aligned} \quad (3)$$

述語  $b\_caused$  は、以下の例では出現しないが、ベース世界と対象世界の対称性を考慮して導入した。また、将来の利用の余地を残しておく意味合いもある。

ターゲット世界とベース世界の類似アトム対(類比)を表す述語  $similar(X, Y)$  を導入する。ここで、 $X$  はターゲット世界での命題を表し、 $Y$  は  $X$  に類似したベース世界での命題を表す。

アナロジーをアブダクションに組み込むのに中心的な役割を果たす公理は、以下の類推公理である。

### 類推公理

$$connected\_by\_analogy(X, Y) \leftarrow b\_connected(XX, YY) \wedge similar(X, XX) \wedge similar(Y, YY). \quad (4)$$

この公理は、図 2.3 に示すように、ノード  $X$  と  $Y$  が、それぞれ類似なベース世界でのノード  $XX$  と  $YY$  の直接連結関係  $b\_connected(XX, YY)$  を模して、類推によって直接連結関係が導かれる ( $connected\_by\_analogy(X, Y)$ ) ことを示している。

類似性は一通りとは限らず、複数の類似性を考えることもできよう。本稿ではそうした事情も勘案し、システムの利用者が気付いた類似性を類似関係のヒントもしくは初期仮説として与え、観察結果を説明するために必要となる別の類似関係を仮説として生成するシステムを与える。

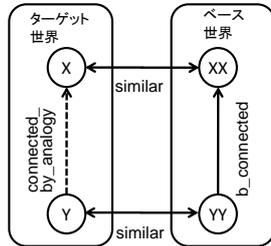


図 2.3 類推公理

ノード X と Y の直接連結を意味する述語  $t\_connected(X, Y)$  は、アナロジーの導入によりいくつかの場合に分化する。それらの定義は、以下の通りである。

$$\begin{aligned}
 t\_connected(X, Y) &\leftarrow originally\_connected(X, Y). \\
 t\_connected(X, Y) &\leftarrow connected\_directly(X, Y). \\
 t\_connected(X, Y) &\leftarrow connected\_by\_analogy(X, Y) \\
 &\quad \wedge print\_connected\_by\_analogy(X, Y). \quad (5) \\
 connected\_by\_analogy(X, Y) &\leftarrow b\_connected(XX, YY) \\
 &\quad \wedge similar(X, XX) \wedge similar(Y, YY).
 \end{aligned}$$

ここで  $originally\_connected$  は直接連結が事実として与えられ、 $connected\_directly$  は、それが仮説として導入されること、さらに  $connected\_by\_analogy$  はアナロジーによって直接連結されることを表す。この節で、 $print\_connected\_by\_analogy(X, Y)$  は、アナロジーによる直接連結をアブダクションの解である仮説に出力するための工夫である。 $connected\_by\_analogy(, )$  自身を *abducible* に出来ればよいのだが、そうするとそれ自身(変数を具体化したもの)が仮説として表れてよいことになるので、実際のアナロジーによる直接連結を調べてくれない。そのため、このようなプリントのためのアトムを置く。そして、このアトム自身を *abducible* にする。

### 3. プログラムと実行結果

本章では、アナログカルアブダクションの例として、3つの問題を取り上げる。第1は、類比的発見問題である。第2は、アナロジーの成り立つ2つの系自身の類比的を求める問題である。第3は、類比と述語発見を同時に求める問題である。

#### 3.1 類比的発見

ここで取り上げる問題は、スピッカート奏法を実現させるために必要とされる「薬指で弓を保持する」ことの理由を、強制振動での「ショックアブソーバ」との類比で説明する問題である。簡略化した問題は、以下のように表現できる。

スピッカートは強制振動に類似している。強制振動を起こさせるには、振動系へエネルギーを補給する際にショックを吸収しなければならぬ。すなわち、スピッカートは弓の弦への打撃時にショックを吸収するために薬指を用いて弓を保持すればよい。

ここで、アナロジーのターゲット世界はスピッカートを達成する運弓動作が行われる世界で、ベース世界は強制振動の力学モデルである。この両世界のアナロジーの関係を図 3.1 に示す。

以下に、この問題を解くアナログカルアブダクションプログラムを与える。

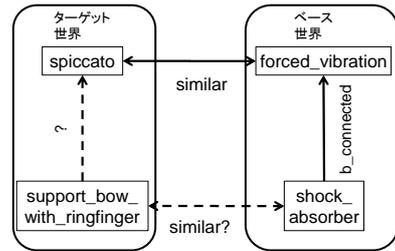


図 3.1 スピッカート奏法でのアナログカルアブダクション。破線の部分を仮説として求める。

観測(G):  $t\_caused( spiccato, support\_bow\_with\_ringfinger )$ .  
 仮定可能述語( $\Gamma$ ):  $[ connected\_directly/2, similar/2, print\_connected\_by\_analogy/2 ]$

背景知識(B):  
 ベース世界:  $b\_connected( forced\_vibration, shock\_absorber )$ .  
 ターゲット世界:  
 $\leftarrow connected\_directly( spiccato, support\_bow\_with\_ringfinger )$ .  
 類比:  $similar( spiccato, forced\_vibration )$ .  
 公理:  
 $b\_caused(X, Y) \leftarrow b\_connected(X, Y)$ .  
 $b\_caused(X, Y) \leftarrow b\_connected(X, Z) \wedge b\_caused(Z, Y)$ .  
 $t\_caused(X, Y) \leftarrow t\_connected(X, Y)$ .  
 $t\_caused(X, Y) \leftarrow t\_connected(X, Z) \wedge t\_caused(Z, Y)$ .  
 $t\_connected(X, Y) \leftarrow originally\_connected(X, Y)$ .  
 $t\_connected(X, Y) \leftarrow connected\_directly(X, Y)$ .  
 $t\_connected(X, Y) \leftarrow connected\_by\_analogy(X, Y)$   
 $\quad \wedge print\_connected\_by\_analogy(X, Y)$ .  
 $connected\_by\_analogy(X, Y) \leftarrow b\_connected(XX, YY)$   
 $\quad \wedge similar(X, XX) \wedge similar(Y, YY)$ .  
 $\leftarrow connected\_by\_analogy(X, Y) \wedge connected\_directly(X, Y)$ .

本プログラムで与えているのは、ベース世界でショック吸収(shock\_absorber)が強制振動(forced\_vibration)を引き起こす原因の一つになっていること、および、スピッカートと強制振動の類比が成り立っていることの2つの事実である。プログラム中のターゲット世界に現われる負節は、スピッカートを達成するのに support\_bow\_with\_ringfinger, すなわち、薬指による弓の保持自身を仮説として仮定してはならないことを表している。

推論深度上限 10, 仮説長制限 4 とした場合、このプログラムの実行により、7つの解が得られた。そのうちの1つが以下に示すように、我々が想定した答えとなっている。

$print\_connected\_by\_analogy( spiccato, support\_bow\_with\_ringfinger )$   
 $\wedge similar( support\_bow\_with\_ringfinger, shock\_absorber )$

この解は、薬指による弓の保持が強制振動でのショックアブソーバとの類比によってアナロジーで説明できることを示している。

#### 3.2 ベース世界のヒントからの類比的発見

ここでの問題は同じくスピッカート課題であるが、ベース世界での「ショックアブソーバ」の有効性が知られているときに、それをスピッカートと強制振動の類比を発見することによって説明する問題である。すなわち、奏法を実現するために、両世界のアナロジーが認識されていない状況でベース世界からのヒントが与えられた場合である。これらの関係を図 3.2 に示す。以下にこの問題のアナログカルアブダクションプログラムを示す。

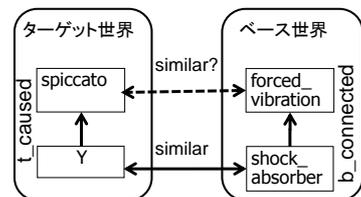


図 3.2 ベース世界のヒントからの類比的発見例

観測(G):  $t\_caused(spiccato, Y) \wedge similar(Y, shock\_absorber)$ .  
 仮定可能述語( $\Gamma$ ):  $[connected\_directly/2, similar/2,$   
 $print\_connected\_by\_analogy/2]$

背景知識(B):

ベース世界:  $b\_connected(forced\_vibration, shock\_absorber)$ .

なお、本プログラムには、このほかに前節でのプログラムと同じ公理が必要であるが、ここでは省略した。先ほど同様、推論深度上限 10, 仮説長制限 4 とした場合、求められた解は、全部で 5 つあり、その一つが以下のとおりである。

```
print_connected_by_analogy( spiccato, _0 )
  ^ similar( _0, shock_absorber )
  ^ similar( spiccato, forced_vibration )
```

この解は、スピッカートが強制振動と類似であり、かつ、スピッカートがある命題変数( $_0$ )によって達成され、かつ、その命題がショックアブソーバと類似していることを表している。

### 3.3 述語発見を含むアナログカルアブダクション

ここでの問題は、高速移弦( $cross\_strings\_cross$ )を実現させるための親指の屈伸( $bend\_thumb$ )の有効性を、親指( $thumb$ )とそれ以外の指関節( $knuckle$ )の骨格構造( $b\_connected(knuckle, thumb)$ )と対応する指の屈伸とのアナロジーと述語発見によって示す問題である。ここでは、類似性は、親指に関するもの( $similar(bend\_thumb, thumb)$ )のみを与えている。この問題の興味深い点は、類比と述語発見の両方を同時に行うところである。図 3.3 に本問題の図式を示す。

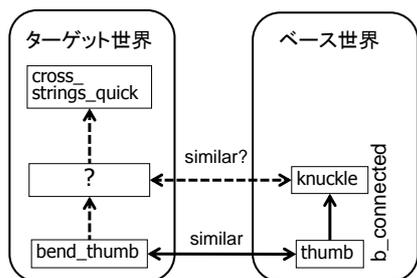


図 3.3 述語発見を含むアナログカルアブダクション

以下にプログラムを示す(本プログラムも公理は省略した)。

観測(G):  $t\_caused(cross\_strings\_quick, bend\_thumb)$ .  
 仮定可能述語( $\Gamma$ ):  $[connected\_directly/2, similar/2,$   
 $print\_connected\_by\_analogy/2]$

背景知識(B):

ベース世界:  $b\_connected(knuckle, thumb)$ .

ターゲット世界:  $\leftarrow connected\_directly(cross\_strings\_quick, bend\_thumb)$ .

類比:  $similar(bend\_thumb, thumb)$

本プログラムの実行により6つの解が得られた。そのうちの一つが以下のとおりである。

```
connected_directly( cross_strings_quick, _0 )
  ^ similar( _0, knuckle )
  ^ print_connected_by_analogy( _0, bend_thumb )
```

この解が図3.3を正確に表現していることが分かる。

### 4.考察と今後の課題

類推公理とベース世界、ターゲット世界の導入により、いくつかの問題でアナログカルアブダクションが成功した。

第 1 に、スピッカート奏法を例として、ターゲット世界の概念(薬指による弓の保持)とベース世界の概念(ショックアブソーバ)の類比の発見に成功した。

第 2 に、同じくスピッカート奏法を例にとり、ベース世界のヒント(ショックアブソーバの有効性)から、ターゲット世界とそれに類

似したベース世界の対を発見することに成功した。この発見は、やはり類比の発見であるが、実際、この類比は 2 つの系の発見と考えることができる。

第 3 に、当初の目的である、述語発見と、発見された述語変数のアナロジーによる意味付けにも成功した。

アブダクションの実行上、 $abducible$  の選択に注意を要するという問題がある。より具体的に言えば、我々はアブダクションの答えとして  $connected\_by\_analogy(,)$  を  $abducible$  にしたいところであるが、それはできない。その理由は、もしそうすると  $connected\_by\_analogy$  述語自身が「事実」として成り立つという解を生成してしまい、実際に類推公理を用いた推論パスを探索しなくなってしまうからである。しかしながら、我々としては類推公理を用いて直接連結を求めたという証拠を出力してほしいので、出力用述語として  $print\_connected\_by\_analogy$  を導入し、それを  $abducible$  とした。この点は、本アプローチで分かりにくいところである。今後、よりエレガントな解を探してゆきたい。

本論文では、ターゲット世界に類似なベース世界を陽に与えてアナログカルアブダクションの定式化を行ったが、実際に問題を解く際には、ベース世界自身を見つけ出すことから始めなければならない問題も考えられる。あるいは、2つの系が与えられた時に、それらの一部分を取り出して、類似な世界を求める場合も想定される。これらの問題を扱うためには、系の各要素の性質を調べて、性質間の類似性から類似な 2 つの部分系を抜き出すが必要になるであろう。類比の抽出問題は、原口の研究[Haraguchi 85], [原口 86]が参考になると思われる。

### 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。ここに深謝する。

### 参考文献

- [Goebel 89] Goebel, R.: A sketch of analogy as reasoning with equality hypotheses, *Analogical and Inductive Inference*, LNCS, Springer, Vol. 397, pp.243-253(1989)
- [Haraguchi 85] Haraguchi, M.: Towards a mathematical theory of analogy, *Bull. Informatics and Cybernetics*, Vol.21, No. 3/4, pp.29-56(1985)
- [Inoue 92] Inoue, K.: Linear Resolution for Consequence Finding, *Artificial Intelligence*, Elsevier, Vol.56, No.2, pp. 301-353(1992)
- [Inoue 09] Inoue, K., Furukawa, K., Kobayashi, I., Nabeshima, H.: Discovering Rules by Meta-level Abduction, *Proc. 19th International Conference on Inductive Logic Programming (ILP 2009)*, Leuven, Belgium(2009)
- [Muggleton 94] Muggleton, S., Raedt, L.D.: Inductive logic programming: Theory and methods, *Journal of Logic Programming*, Elsevier, Vol.19, pp.629-679(1994)
- [Nabeshima 03] Nabeshima, H., Iwanuma, K., Inoue, K.: SOLAR: A Consequence Finding System for Advanced Reasoning, *Proc. TABLEAUX 2003*, LNCS, Springer, Vol.2796, pp.257-263(2003)
- [原口 86] 原口誠, 有川節夫: 類推の定式化とその実現, *人工知能学会誌*, Vol.1, No.1, pp.132-139(1986)
- [古川 09] 古川康一, 井上克巳, 小林郁夫, 諏訪正樹: 発想推論に基づく着眼点の発見, 第 23 回人工知能学会全国大会, 1K1-OS8-5(2009)