不定自然変換理論による比喩理解モデリングの計算論的実装へ向けて
Toward the computational implementation of metaphor comprehension modeling with the theory of indeterminate natural transformation

池田 駿介[1]，高橋 達二[1], 布山 美慕[2], 西郷 甲矢人[3]
Shunsuke Ikeda, Tatsuji Takahashi, Miho Fuyama, Hayato Saigo
東京電機大学[1], 早稲田大学[2], 長浜バイオ大学[3]
Tokyo Denki University, Waseda University, Nagahama Institute of Bio-Science and Technology
tatsujit@mail.dendai.ac.jp

概要
意味の創造過程としての動的な比喩理解の分析と実現のために数学の圏論の概念を用いて提案された不定自然変換理論 (TINT: theory of indeterminate natural transformation, Fuyama & Saigo, 2018; 布山 & 西郷, 2019) の計算論的な実現を目す．その実装の過程で現状の諸課題を浮かび上がらせ，その解決案を提案する．

キーワード：圏論, 比喩, 類似, 類推

1. はじめに
意味の創造過程を探求するための仮説として提案された比喩理解のモデルである不定自然変換理論 (theory of indeterminate natural transformation, TINT) (布山 & 西郷, 2019; Fuyama & Saigo 2018) がある．TINT ではイメージの意味をイメージの間の想起関係として定義し，被喩辞のイメージからの喩辞のイメージの想起を端緒として，動的にイメージの連想ネットワークの構造が変化する過程として比喩理解過程をモデル化する．このモデル化のため，圏論の数学的構造が導入され，イメージの意味はコスライス圏で，喩辞と被喩辞のイメージの意味の対応づけは関手で，そして比喩理解の過程は自然変換の探索で表現される．加えて，比喩理解の動的な過程をモデル化するために，イメージの想起確率を導入し，圏が不定化されている．この想起確率をもとに，自然変換の探索中，あるイメージから別のイメージを想起すると判断される場合，そのイメージの間の射は圏に残り，そうでなければ射は圏から消える．これを射の「励起 (excitaiton)」と「緩和 (relaxation)」と呼び，どのように起こるのかをルールとして定める．この理論化によって，被喩辞と喩辞のもつイメージの意味の構造単位での相互作用を扱うことができると期待される．

しかし TINT はまだ提案段階にあり，具体的な計算論的実装も，データを用いた検証も，なされていない．特に，圏論を実際のデータの動的過程に応用するために肝心な圏の不定化の具体的な定式化が不十分である．射の励起と緩和のルールには，basic rule，neighboring rule，fork rule，anti-fork rule の 4 つのルールがあるが，それらのルールが，どのような順番や規則で適用されるのかが具体化されていない．この課題に対して計算論的に定式化したうえで，TINT を実装し，シミュレーションをどのように行うことができるのかを考える過程で浮かび上がってきた TINT の理論としての曖昧さや課題を報告する．

2. 圏論の概要
圏は大まかに言えば,「対象」とその対象の間をつなぐ合成可能な「射」からなるネットワークである．圏は対象と射を含む体系で，以下の 4 つの条件を満たす．

1. 各射 f には 2 つの対象 $dom(f)$ と $cod(f)$ とが対応づけられていて，それぞれ域 (domain) と余域 (codomain) と呼ばれる．$dom(f)$ と $cod(f)$ は同じ対象であっても良い.「射 f の域が X, 余域が Y である」ということを
$$f : X \to Y$$
あるいは
$$Y \xleftarrow{f} X$$
と記し，こういった矢印を用いて組み上げた表記を図式と呼ぶ.
2. 射 f, g で $cod(f) = dom(g)$ となるものがあるとき，つまり
$$Z \xleftarrow{g} Y \xleftarrow{f} X$$
のとき，こういった f, g に対して，これらの合成と呼ばれる射
$$Z \xleftarrow{g \circ f} X$$

が存在する

3. 次のような図式で表現される状況のとき

$$\begin{tikzcd}
W & & Y \arrow[ll, "h\circ g"'] \arrow[dl, "g"] & \\
& Z \arrow[ul, "h"] & & X \arrow[ul, "f"'] \arrow[ll, "g\circ f"]
\end{tikzcd}$$

平行四辺形の上側を通る経路と下側を通る経路が射として同じものとなるという結合律を要請する．つまり，

$$(h\circ g)\circ f = h\circ(g\circ f)$$

となる．このように，域と余域を共通とする射が合成の順によらず等しいとき，その図式は可換であるという．

4. 最後に，単位律が要請される．単位律とは，任意の X について恒等射 $1_X : X \to X$ があり，任意の射 $f : X \to Y$ に対して，次の図式が可換であることである

$$\begin{tikzcd}
& X \arrow[dl, "f"'] & \\
Y & & X \arrow[ul, "1_X"'] \arrow[ll, "f"'] \arrow[dl, "f"] \\
& Y \arrow[ul, "1_Y"] &
\end{tikzcd}$$

つまり

$$f\circ 1_X = f = 1_Y\circ f.$$

でなければならない．対象とその恒等射は 1 対 1 で対応づけできるため，この意味では対象をその恒等射と同一視できる．言い換えれば対象を射の特殊な事例として見なすことができる．

以上をまとめると，圏は次のように定義される．

定義 (圏)： 圏とは,「対象」と「射」と呼ばれる二つの要素から構成される体系で，射は域と余域と呼ばれる 2 つの対象を持ち，合成と恒等射を備え，また結合律と単位律を満たす．

圏の例は身近に見いだせる.「集合」を対象とし「写像」を射とする圏や,「命題」を対象とし「証明」を射とする圏を考えることができる．また，交通や代謝のネットワークも一例として考えられる．

次に二つの圏の間の構造を保つ対応づけとして関手を次のように定義する．

定義 (関手)： 圏 C の対象から圏 D の対象，圏 C の射から圏 D の射への対応 F が関手 (functor) であるとは，以下の 3 条件をみたすときにいう．

1. C の射 $f : X \to Y$ を D の射 $F(f) : F(X) \to F(Y)$ に対応させる．
2. C の各対象 X の恒等射 1_X について $F(1_X) = 1_{F(X)}$ が成り立つ．
3. C の射 f, g の合成 $f\circ g$ について $F(f\circ g) = F(f)\circ F(g)$ が成り立つ

簡単に言うと，関手は図式あるいは圏の構造を保つ対応づけである．ただし，関手の定め方は一意とは限らず 2 つの圏の間に複数の関手を考えることができる．

関手は普遍的な概念であって，認識・表現・構成・モデル化・理論化などの言葉で言い表されるプロセスは，すべて関手の生成と見なせるほどである．関手を通じて，いわば一つの圏が他の圏に映り込み，自明に異なる現象のあいだに同じさを措定することができる．こういった関手と理論化の関係については，Tsuchiya, Taguchi, & Saigo (2016) において，意識の理論化に関して，関手で対応づけられるモデルが現象に対してどの程度情報を保つモデルと見なせるかが議論されている．

前述した通り，関手の定め方は一意とは限らないため，2 つの圏の間に複数の関手を考えることができる．すると，これら複数の関手の間の変換を考えることができる．これが自然変換である．これは，ある圏と別の圏の一つの対応づけが自然変換を通じて別の対応づけに変換されることと見ることができ，いわば関手自体を対象とみてそれらの間の射を考えることに相当する．

定義 (自然変換)： F，G は圏 C から圏 D への関手とする．t が F から G への自然変換 (natural transformation) であるとは，以下の 2 条件をみたすときに言う．

1. t は C の各対象 X に対して，D の射 $t_X : F(X) \to G(X)$ を対応させる．つまり自然変換は，そもそもの「身分」としては，対象から射への対応の集まりである．
2. C の各射 $f : X \to Y$ ついて $F(X)$ から $G(Y)$ への射として，$t_Y \circ F(f) = G(f)\circ t_X$ が成り立つ．

自然変換をここでは $t : F \Rightarrow G$ と表すことにする．2 つめの条件については，次の図式を用いるとわかりや

すいだろう．

$$\begin{tikzcd} & Y & X \arrow[l, "f"'] \\ F \arrow[d, Rightarrow, "t"'] & F(Y) \arrow[d, "t_Y"'] & F(X) \arrow[l, "F(f)"'] \arrow[d, "t_X"] \\ G & G(Y) & G(X) \arrow[l, "G(f)"] \end{tikzcd}$$

右上が C での射，右下が D での射を表している．ここでは関手 F，G による f の 2 つの映り先と自然変換 $t : F \Rightarrow G$ の関わりが描かれている．2 つめの条件は，この四角形が可換であることを要請するものである．関手から関手への変換を，関手によって映る先の圏 D の構造を保つかたちで行うことである．

次に，圏の一例としてコスライス圏を次のように定義する．

定義 コスライス圏： C を圏，X を C の対象とするとき，コスライス圏 $X\backslash C$ を次のように定義する．

1. 対象は $dom(f) = X$ となる全ての射 $f \in C$
2. 射は $f : X \to a$ から $g : X \to b$ への $h \circ f = g$ を満たすような $h \in C$．このような f, g, h によって作られる構造を，本論文では三角構造と呼ぶ．
3. 射の合成は C の合成で行う．
4. 恒等射は C の恒等射を引き継ぐ．

コスライス圏は，もとの圏 C のある対象 X と他の対象の関係性を対象とし，それらの関係性同士の関係を射とする圏と言える．イメージとしては，世界を神様の視点から俯瞰的に見るのではなく，ある一つの視点 X から見た場合の世界の見え方に対応すると解釈できる．

3. 不定自然変換理論 (TINT) の概要説明

布山 & 西郷 (2019) に従って TINT の概要を説明する．

3.1 被喩辞と喩辞の間の意味ある関手の自然変換の探索

不定自然変換では次のようにイメージとイメージの意味の圏を定義する．

定義 イメージの圏 C の対象はイメージ，C の射はそれらの間の想起関係とする．

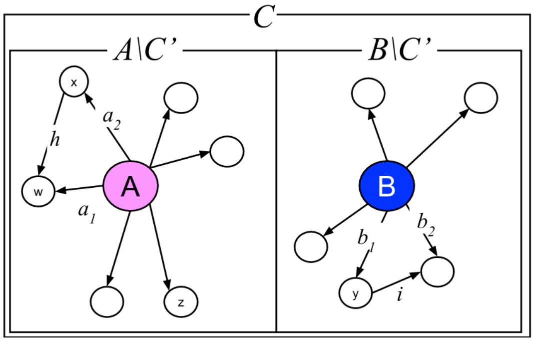

図 1 イメージ A の意味とイメージ B の意味を表現するコスライス圏 $A\backslash C'$ と $B\backslash C'$

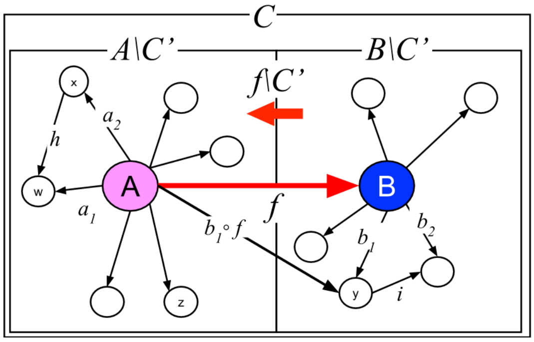

図 2 比喩の措定, A は B のようだという比喩の推定によって射 f が生まれる．射 f を基に $f\backslash C'$ (base of metaphor functor) が生まれる．

定義 A がイメージの圏 C の対象であるとする．この時 A の「意味」をコスライス圏 $A\backslash C$ で表現する．

TINT ではイメージの意味を他のイメージとの想起関係としてとらえる．そして不定自然変換では比喩理解の過程を次のようにコスライス圏の間の関手の自然変換の探索過程とみなす．以上の定義のもとに，不定自然変換は比喩の意味理解を以下のように説明する．

まず,「A は B のようだ」という比喩がなされたとする．すると A から B への想起が起こる．これは図 1 のように表現されたイメージ A と B の意味を表すコスライス圏 $A\backslash C$ と $B\backslash C$ の間に，図 2 に示すように比喩によって一つの射 f が生まれることに相当する．この f によって，厳密には全体の圏が変化するため，C' と記している．ただし，あとで確率過程を導入して定式化しなおす際にこの変化は吸収される．

この f によって，自然に一意にコスライス圏 $B\backslash C'$ から $A\backslash C'$ への関手 $f\backslash C'$ が生まれる．ここで，$f\backslash C' := (\cdot) \circ f : B\backslash C \to A\backslash C$ であり，たとえば，図 2 の $b_1 \in B\backslash C$ を $b_1 \circ f \in A\backslash C$ に写すような関手である．この関手を Base of Metaphor Functor (BMF) と呼ぶ．この BMF は，図 2 で見れば,「B にとっての y」を「A にとっての B

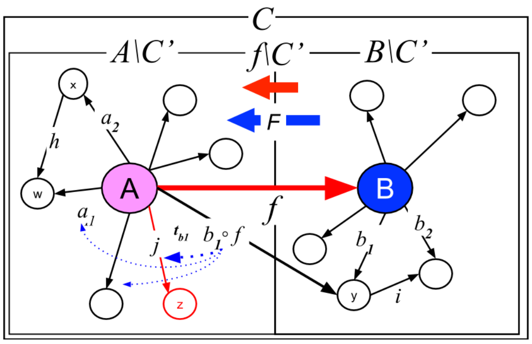

図 3　$f\backslash C'$ から自然変換が探索され，比喩理解の関手 F が構築される．

にとっての y」というようなかたちで，B を媒介として y と A との想起関係を作る．

しかし，このようにイメージ B を経由するかたちでは，イメージ A からの直接的な想起関係でないため，比喩の解釈としては不明確で，比喩理解がなされたとは考えにくい．そこで，$f\backslash C'$ と自然変換をなすような比喩の解釈としてより自然な関手 F を見出し，比喩の意味を理解しようと試みる．これは，たとえば，$b_1 \circ f$ に対応するものを元のコスライス圏 $A\backslash C'$ の中で探索することに相当する．すでに $b_1 \circ f \in A\backslash C'$ なので，$A\backslash C'$ の内での射の探索となっており，BMF に対する自然変換の族の探索に相当する．この探索によって，図 3 のように $b_1 \circ f$ に対応する j が見つかるとき，この対応づけによって新たな関手 F が見出される．(ただし他の対象との関係性も含めて自然変換の定義を満たすように対応づけを行うことが条件である．)

この対応づけでは，「B にとっての y」は「A にとっての z」というように，B と A それぞれから直接に想起されるイメージ同士の間に対応づけがなされ，比喩の意味が解釈される．たとえば，「薔薇のような愛」という比喩なら，「薔薇にとってのトゲ」が「愛にとっての残酷さ」のように対応することで，この比喩の意味の理解が進む．ただし，自然変換は強い条件であり，コスライス圏 $B\backslash C'$ から $A\backslash C'$ への関手そのもの，つまりコスライス圏 $A\backslash C'$ と $B\backslash C'$ 全体に対して見出すことは通常難しいと考えられる．この例で言えば「薔薇」から想起されるイメージ全てに対して「愛」から想起されるイメージの全てを単一の解釈で結びつけることは難しいことがわかる．したがって，コスライス圏 $A\backslash C'$ とコスライス圏 $B\backslash C'$ の部分的な圏同士を結びつける関手に対する自然変換を探索すると考えるのが妥当であろう．部分的な圏を結びつける関手は複数あり，自然変換も複数ありえるため，一つの比喩には複数の解釈がありえ，それらが並存する状態が比喩理解の状態だと考えられる．

3.2 動的な理解過程の記述のための圏の不定化

比喩の措定により射 f が生まれることや，自然変換が探索されて関手 F が見出される圏の時間変化・発展過程は圏論の枠組みの中ではそのまま記述することができない．そこで，これらの動的な過程を表現するために TINT では圏論に確率的な過程を導入する．イメージの圏 C の射である想起可能性の射に確率的な重み μ を導入した上で，この想起の連鎖過程のルールとして射の励起と緩和のルールを導入する．以下にこの不定化のアイデアを比喩理解の過程に沿って列挙する．

- 全てのイメージの体系とすべての想起関係は圏 C としてモデル化される．このイメージの想起関係の全体をモデル化した圏を潜在圏と呼ぶ．潜在圏の各射 f_i に対し想起確率 μ_i を対応させる．また，ある時点で励起した射すべてを含む圏を C_{exc} で表し，これを顕在圏と呼ぶ．想起確率 μ と射の励起・緩和のルールは以下のように導入される．
  1 イメージ A の意味はコスライス圏 $A\backslash C$ と射に付与された想起確率 μ_i によってモデル化される．
  2 「A は B のようだ」という比喩表現によって，射 $f: A \to B$ が励起する．f は f の μ の値にかかわらず必ず励起する．この f の射の励起を契機に，励起と緩和の過程を経て BMF からの自然変換により関手 F が構築される
- 射の励起の過程は以下のルールに従う．
  0. (basic rule) : 励起した二つの射の合成によってできた射は μ にかかわらず励起する．域と余域の対象と同一視できる恒等射が励起している射は μ にかかわらず励起する．
  1. (neighboring rule) : 励起した射の余域を域に持つ射は μ に依存して決まるある確率で励起する
  2. (fork rule) : 域を共有している射が励起しているとき，その余域の間の射（あるいは間の射に相当する合成射）が探索され確率 μ に従って励起する．ルール 1 あるいは 2 の特別な場合として，逆射も確率 μ で励起する．
- 緩和の過程は以下のルールに従う (励起に比較して長い時間で緩和過程は起こる)．

3. (anti-fork rule) :域を共有する 2 つの射が互いの余域間に射を持たないときつまり，三角構造を持たないとき，この 2 つの射は緩和されるつまり，2 つの射はその時点の顕在圏 C_{exc} からなくなる．

- 潜在圏 C をもとにして「A は B のようだ」という射 $f : A \to B$ が励起したのを契機にルールを用いて射を励起・緩和させ，顕在圏に浮かび上がらせることで自然変換の探索を行う．以上の過程を経て，不定圏は顕在圏として定まり，励起した射の族は $f \backslash C$（BMF）の自然変換を成す．ここで生まれる自然変換が不定自然変換である．
- ここまでの不定自然変換の過程によって，μ の値が変化する．これは理解した比喩を受けての学習に値する．この想起確率 μ の変化はイメージの想起関係の変化であり，この変化によってイメージの意味 (そのイメージから見た世界の見え方) に変化が生じる．

4. TINT の計算論的な実装に向けて

TINT を実装するうえで，浮かび上がってきた課題がある．特にこの理論で重要な圏の不定化の部分の定式化はこれからの課題である．そのため課題を挙げ，議論を行う．

4.1 圏の初期状態

圏の初期状態にはどのようなものが考えられるか．「A は B のようだ」という比喩表現を考えたときその比喩が広く意味が理解されている，いわゆる「死んだ比喩」と呼ばれるものである場合は，イメージ A，B に対応するコスライス圏は確立していると考えられる．この場合は，二つのコスライス圏の間で自然変換を探索するだけでよい．そうではなく意味があまり理解されていない新規比喩の場合は，イメージ A， B に対するコスライス圏は最初から確立しているわけではないと考えられる．この場合は「A は B のようだ」という射 $f : A \to B$ を基に，射の励起と緩和のルールを用いてコスライス圏を発展させながら自然変換を探索する必要がある．これらの方法の違いからどのような比喩表現がどちらの圏の初期状態と対応するのかを判断する必要がある．しかし，TINT では f を基に圏を発展させながら自然変換を探索することを考えているので，どちらの比喩も扱える．

4.2 ルールの妥当性

射の励起と緩和ルールの適用の順序や適用範囲の具体化が必要である．射の励起と緩和のルールをどのような順番，範囲で適用していくかを決めることで計算理論が作れる．

4.2.1 緩和プロセスの具体化

1 つ目はある条件下で緩和のルール，つまり anti-fork rule が機能しなくなる課題である．anti-fork rule ルールは域を共有する 2 つの射が互いの余域間に射を持たないとき，この 2 つの射は緩和されるというものである．しかしある条件下で射の緩和が起こらなくなってしまう．その条件は neighboring rule を適用した後に，basic rule を適用した場合である．いま $a_1 : A \to w$ が励起しているとする．ここで neighboring rule を適用し新たに $a_2 : x \to w$ という射が励起した．この後に basic rule を適用すると $cod(a_1) = dom(a_2)$ より合成射 $a_2 \circ a_1 : A \to w$ が励起する．こうなると三角構造が自動的に出来上がってしまう．これにより，anti-fork rule による射の緩和が起こらなくなってしまう．射の緩和が起こらないと，圏の中の射の数が膨大になってしまい，自然変換を見つけ出すことが困難になる．したがってたとえ三角構造を持っていたとしても三角構造に何らかの基準を考え，基準を満たしていない三角構造は anti-fork rule で緩和させられるようにする必要があると考えられる．

この残す三角構造の基準を変化させることは，比喩の解釈にも影響を及ぼす可能性がある．それは，例えば「愛は薔薇のようだ」という比喩を考える．愛から想起されるもの，薔薇から想起されるものはいろいろ考えられるが，現在図 4 のような圏を考える．ここで自然変換の要素を含む三角構造は破線で囲んだ部分で

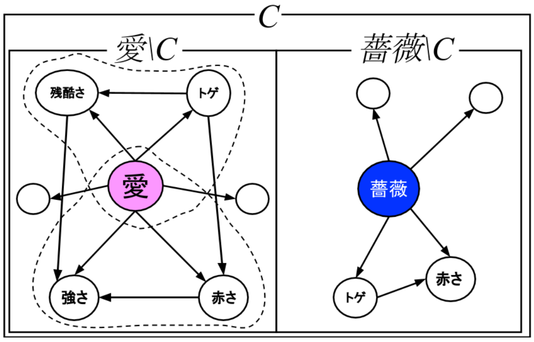

図 4　「愛は薔薇のようだ」という比喩の三角構造の例

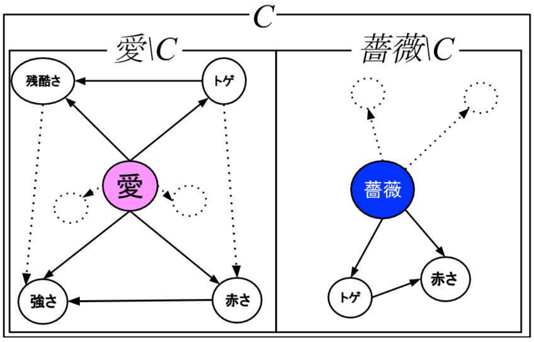

図 5　自然変換の要素を含む三角構造以外を緩和させる

ある．今回の場合は自然変換の要素を含む三角構造以外を緩和させることを考えると図 5 のようになる．ここでの比喩の解釈を取ると「愛にとっての残酷さは薔薇にとってのトゲ」,「愛にとっての強さは薔薇にとっての赤さ」という比喩になる．ここで注目するべきは「残酷さ」から「強さ」と「トゲ」から「赤さ」の射である．これらは残す三角構造に入らなかったので緩和された．しかし，自然変換を含む三角構造の間の射というものは重要であると考える．もしこれらの射が緩和されず残った場合の比喩を考えると「愛のにとって残酷さは薔薇のにとってトゲ」,「愛にとっての強さは薔薇にとっての赤さ」,「残酷さにとっての強さはトゲにとっての赤さ」といった解釈が得られる．愛の強さと残酷さの関係と，薔薇のトゲと赤さの関係には何か関係があると解釈できる．これは「残酷さ」から「強さ」と「トゲ」から「赤さ」の射も残すような緩和の方法により豊かな比喩の解釈が得られることを示している．どのような三角構造を残こせばこのような豊かな比喩の解釈ができるのかについては，これからシミュレーションなどを行って基準をどのように設けるかを検証していく．

4.2.2　射の種類分け

2 つ目は fork rule によって励起される射には 2 つの種類があり，その射の区別ができないという課題である．fork rule で励起する射のうち，1 つは自然変換の要素となる射である．これは BMF によって移される射 f_{bmf} と $A\backslash C$ にもともと存在した射 f_a があるとき $cod(f_{bmf})$ から $cod(f_a)$ への射である．もう 1 つは自然変換の要素にはならない射である．fork rule によって励起する射が，もともと $A\backslash C$ にある射の組の余域間を結ぶ射，BMF でうつされる射の組の余域間を結ぶ射，もともと $A\backslash C$ に存在した射の余域から，BMF によって移される射の余域への射であるとき，これらは自然変換の要素にはならない．この区別がつかなければどの部分が自然変換の要素であるかがわからず，結果として自然変換の探索は困難になる．

1 つ目, 2 つ目の課題に共通しているのは自然変換の要素を含む三角構造というものをどのように判別するのかという課題である.「A は B のようだ」という比喩を考えたときに自然変換の要素を含む三角構造は $A\backslash C$ の中にあり，域を共有する 2 つの射の域が A である三角構造に限定される．これを判別するための方法は現在 $A\backslash C$ に存在する射の中で BMF で $B\backslash C$ からうつされた射を見つけ出すことである．BMF でうつされる射というのはもともとコスライス圏 $B\backslash C$ に存在する射である．つまり BMF でうつされた射が判別できれば，それ以外の射はもともと $A\backslash C$ にあった射ということが判別でき自然変換の要素を含む三角構造を見つけ出すことができる．自然変換の要素を含む三角構造が判別できればそれ以外の三角構造は緩和させる候補になり得え，また fork rule を用いてもこの三角構造は自然変換であると判断でき，BMF から関手 F を構築できる． この課題が解決できれば，多くのシミュレーションが検討可能になるため重要である．

4.2.3　自然変換の優先度・妥当性

3 つ目は自然変換の優先度・妥当性を判断する方法が明らかではないという課題である．自然変換の優先度・妥当性を判断する必要がある場合を以下で説明する．

fork rule を適用していく中で，BMF でうつされる射 f_{bmf} ともともと $A\backslash C$ に存在する射 a_1, a_2 を考える．$cod(f_{bmf})$ から $cod(a_1)$ への射が励起するとこの射は自然変換の要素になる．さらに $cod(f_{bmf})$ から $cod(a_2)$ への射が励起するとこの射も自然変換の要素になる．この場合 1 つの対象に複数の自然変換の要素が存在してしまう．この自然変換から関手 F を構築しようとしたときに，この関手 F は関手の条件を満たさない (関手は写像であるため)．したがって，どの自然変換が妥当かを判断し，選択する必要がある．最も妥当であると判断する基準として，射に備わっている想起確率が最も大きな値を持つ自然変換を妥当なものとして選択する方法が考えられる．しかし，fork rule で励起する射は直接繋がっている射だけではなく，直接つながっている射と同一視できる合成射が存在する場合も想起確率 μ で励起する．直接つながっている射には想起確率が存在し，どれが妥当かを判断することができ

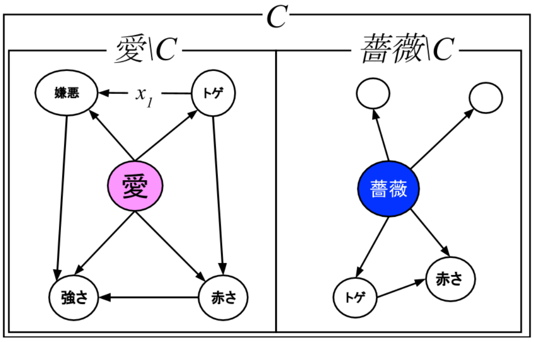

図 6　「トゲ」から「嫌悪」への射 x_1 が励起する

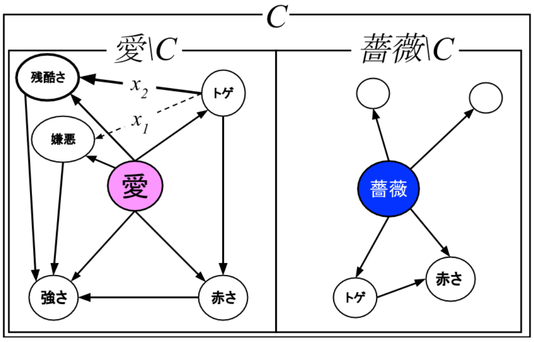

図 7　新たに「トゲ」から「残酷さ」への射 x_2 が励起する

るが，合成射そのものには想起確率が割り振られておらず何かしらの方法を用いて合成射の想起確率またはそれに準ずる値を設定する必要がある．この合成射の想起確率をどのように定めるのかが明らかになっていない．しかし，この課題を解決することでルールの適用中に比喩の解釈がより妥当なものへ変化する可能性がある．例えば，4.2.1 と同じ「愛は薔薇のようだ」という比喩を考える．この場合の圏を図 6 とする．

これは図 4 とは違い,「残酷さ」が「嫌悪」になっている．この場合「トゲ」から「嫌悪」への射 x_1 が自然変換の要素になっている．この圏を射の励起のルールを用いて発展させたものを図 7 とする．ここで新たに「愛」から「残酷さ」への射が励起し，その後 fork rule で「トゲ」から「残酷さ」への射 x_2 が励起した状態である．この射 x_2 は自然変換の要素である．この場合，x_1 と x_2 の 2 つが「トゲ」に対する自然変換の要素になってしまう．ここで自然変換の優先度がつけられることで，先に「トゲ」に対する自然変換の要素であった x_1 よりも x_2 の方が優先であると判断されると x_2 の方を「トゲ」に対する自然変換の要素として更新する．これは，今まで比喩の解釈だと考えていたものがイメージの意味の圏の構造が変わることで，より良い比喩の解釈に更新しながら自然変換の探索を行うことができる．これは圏の構造を発展させながら自然変換の探索が行える TINT の長所である．

4.3　想起確率の取得法

想起確率がどのようなデータから取れるかという事が明らかではない．TINT を用いて比喩表現が理解できるような想起確率を取るためにはデータの性質としてどのようなものが求められるのかということが明らかではない．現状どの射が励起されやすいのか，どの射の間に対応が見つかりやすいのかというのは想起確率に大きな影響を受けてしまう．この想起確率がうまく付与されていないと自然変換が見つかるような射の励起と緩和が起こらない．したがってデータにどのような性質が求められ，どのようなデータが利用できそうかという点を検証するのが重要である．

4.4　比喩理解後のフィードバック方法

比喩が理解された後の潜在圏へのフィードバックの具体的な方法が定まっていない，TINT では比喩理解がなされた後にイメージ間の想起確率 μ の値が変化する (学習が起こる)．この μ の変化はイメージの想起関係の変化であり，この変化によって私たちの世界の見え方が変化する．この世界の見え方が変化するというのは,「A は B のようだ」という比喩が理解されてイメージ A の意味が変換するというだけで終わりではない．例えば A の世界の見え方が変化したことで，今まではイメージ A の意味となんら関係のないと思われていた C というイメージの意味との間に関係を見出すことができるようになる可能性がある．そのためどのような学習法を用いればイメージの意味が豊かにし，また今までは見出すことのできなかったイメージの間の関係性を発見できるようになるのかを検証する必要がある．

5.　シミュレーション案

4.1, 4.2 において述べた課題からコスライス圏が確立していない場合の実装は現状困難である．したがって，コスライス圏が与えられた場合の実装を考える．想起確率に使用するデータは Nelson による大規模な連想ネットワーク (Nelson et al., 1999) を用いる．このデータは実験参加者に対し刺激語 (cue) を 1 つ提示しする．その刺激語に対して有意義に関連している，または強く関連していると考えた 1 つの単語 (target) を，提示された刺激語の隣の空白に記入するといった個別

関連付けタスクと呼ばれる手順で収集されたものである．例えば実験参加者に提示された刺激語が BOOK であった場合，強く関連する単語が READ であると考えたならば READ と記入するといった形式である．このデータを用いた理由としては，cue から target を連想する強さがどの程度であるかがデータとして存在すること，cue の数が 5019 単語，cue に対する回答数が 72,176 回答存在するという大規模なデータであることから，Nelson らのデータを用いる．

コスライス圏の抽出は「A は B のようだ」という比喩を考えたときのイメージ A を考える．A を域に持つ射の集合を取る．その中で想起確率が上位 r 番目までの射を励起させる，その後圏の定義を満たすように合成射を追加する．そして，その励起した射の余域を域に持つ射の集合を取り同じことを行う．これを n 回行う．これによって A から n ステップの広がりを持つようなコスライス圏 $A\backslash C$ が抽出できる．コスライス圏 $B\backslash C$ に関しても同様に抽出する．射の励起と緩和のルールの適用の流れについてはアルゴリズム 1 の流れで行う．

まず「A は B のようだ」という比喩のイメージ A,B とそのイメージの意味の圏 $A\backslash C, B\backslash C$ が与えられる．「A は B のようだ」という射 $f : A \to B$ をが励起し，$B\backslash C$ の射が BMF をとして $A\backslash C$ にうつる．これをアルゴリズム 2 で示す local_basic_rule で行う．その後，自然変換の探索をアルゴリズム 3 で示す local_fork_rule で行う．4.2 で述べた通り BMF でうつった射の余域から，もともと $A\backslash C$ に存在する射の余域への射が自然変換の要素になる．コスライス圏が与えられている場合，その射がどちらの射なのかを判別することができる．そのため local_fork_rule では BMF でうつされた射と，もともと $A\backslash C$ に存在する射の間を直接つなぐ射のみを考え，自然変換の探索を行う．これは，ルールの適用範囲を域を共有する 2 つの射の全体に適用するのではなく，域を共有する BMF でうつされる射と，もともと $A\backslash C$ 存在する射の組に制限している．また local_fork_rule 中に BMF でうつされた射 1 つから，複数のもともと $A\backslash C$ 存在する射の間で射が励起した場合には，その中で最も高い想起確率を持つものを自然変換の族として選択した．そして自然変換の族を含む三角構造を記録しておく．その後，記録された三角構造以外を切るためにアルゴリズム 4 で示す local_anti_fork_rule を適用する．これにより BMF からの自然変換をなすような関手 F が構築できていれば，それが TINT による比喩の理解である．

6. 結び

6.1 まとめ

ここまでで TINT の実装方法や，シミュレーションの設計を考える過程で浮かび上がってきた課題を述べた．これらの課題をうけて，TINT の計算論的な実装を行うための解決すべき課題が明確になった．今後は発見した課題の解決に向けて理論の精微化や，さらなる検証を行っていく．

6.2 TINT の長所

現状提案段階ではあるが，TINT には現在までに提案されてきた様々な比喩理解の理論 (内海 2013) と比べて喩辞と被喩辞の構造の相互関係をより豊かに扱い，記述することができるという長所がある．例えば，2 つの概念の間の対応付けを，それらの概念を構築する要素の体系同士の対応付けと考える理論として Gentner（1983）の構造写像理論をもとに，比喩理解の理論として提案された隠喩履歴理論（Bowdle & Gentner, 2005）がある．TINT も構造の間の対応付けを扱うという点でこの理論と類似している部分がある．しかし，構造写像理論や隠喩履歴理論では，実際には概念の要素の one-to-one mapping を行っているため，構造を同士の対応づけを同型にしなければいけない．そのため構造同士の相互作用としては十分でなく，また「構造として同じ」という「同じ」の定義が強すぎる．TINT は「同じ」ということを圏論の枠組みである関手や自然変換として定義している．自然変換は準同型としてとらえられるため，同型よりも対応付けられる範囲が広がる．これにより構造同士の相互作用の表現として，適当な表現になりうる．

6.3 今後行うべきこと

6.3.1 想起確率として利用可能なデータの検証

想起確率として利用可能なデータの検証については，まずデータに求められる性質として考える必要がある．まず人間の連想，想起，共起などについて集められたデータであり，そのなかで確率に変換ができそうなものの中でさらにイメージの意味を豊かにするために，あるイメージが多くのイメージとつながっているようなデータが望ましい．現在利用を検討しているデータは現在 3 つある．

1 つ目は Nelson らの大規模連想ネットワークである．このデータは人間の連想のデータであるため，想

起確率として用いることが可能である．しかし，データを集める際に 1 つの刺激語に対して 1 つ単語しか回答していない．これは 1 つの単語から 1 つの連想しか考えない形になっているためイメージの意味の広がりとしては，小さい可能性がある．

2 つ目は word2vec である．word2vec は単語をベクトルとして表現する方法の 1 つである．word2vec は類推に類似している構造がベクトル空間上に表現されていると報告されている（Mikolov, Chen, Corrado, & Dean, 2013; Mikolov, Sutskever, Chen, Corrado, & Dean,2013）．word2vec での単語間のコサイン類似度などの距離を想起確率の逆数のような形で用いることができるのではないかと考えている．

3 つ目は大規模コーパスの共起行列である．単語の意味を表現しているという観点から言うと，あるイメージ *A* の意味を表現するときは「*A* とは...」という説明の文章に出てくる単語などが考えられる．そうすると，大規模コーパスなどの共起行列などを用いることが考えられる．共起した回数などを用いてイメージ間の想起確率として表すことができるのではないかと考えている．

6.3.2 トイデータを作成，トイデータを用いたシミュレーションの実装・検証

トイデータの作成としては，今回シミュレーション案を考えたが実際に動かすことを考えると，やはり最初は小さなトイデータを用いて検証を行うことが重要である．最初はトイデータを用いてシミュレーションを行い．その結果から理論や実装方法，シミュレーションの流れなどの課題をあぶり出し，改善を行っていく．そして徐々にデータを大きくしながら検証と改善を繰り返し行うことで，効率的な検証が行える．そのため，まずはトイデータ作成を行い，シミュレーションの結果としてどのようなものがでてくるのかの確認を行いたい．

6.3.3 実験による人間の想起確率の取得

想起確率として利用可能なデータがない場合に実験を通してデータを収集することが必要になってくる．そのため，どのような実験を行えば人間の想起確率のデータを取得できるのかを考える．例えば Nelson らが大規模連想ネットワークのデータを取得した方法である，個別関連付けタスクの拡張を行う．つまり提示された刺激語 cue に対して有意義または強く関連していると思う単語を上位 *n* 個回答してもらう．これによって Nelon らのデータでの欠点である，イメージの意味の広がりが小さいといった課題が解決できるのではないかと考えている．

他に必要なデータとして，ある「*A* は *B* のようだ」という比喩表現から TINT が生み出した比喩の解釈と，人間が生み出した比喩の解釈の間にどのような関係が見られるのかといったデータも将来的には必要になってくる．実験の設計について今後考えていくことは重要である．

References

布山 美慕 西郷 甲矢人, (2019). 不定自然変換理論の構築：圏論を用いた動的な比喩理解の記述, 知識共創, 8, III, 5, 1–11.

Fuyama Miho, Saigo Hayato (2018). Meanings, Metaphors, and Morphisms: Theory of Indeterminate Natural Transformation (TINT). arXiv:1801.10542

Tsuchiya,N., Taguchi, S., & Saigo, H. (2016) Using category theory to assess the relationship between consciousness and integrated information theory. Neuroscience Research, 107, 1–7

Nelson, D. L., McEvoy, C. L., & Schreiber, T. A. (1999). The University of South Florida word association norms. Retrieved from http://w3.usf.edu/FreeAssociation

内海 彰 (2013). 比喩理解への計算論的アプローチ一言語認知研究における計算モデルの役割, 認知科学, 20, 2, 249–266.

Gentnerm, D. (1983) Structure-Mapping: A Theoretical Framework for Analogy., Cognitive Science, 7(2), 155–170

Bowdle,B. F. & Gentner, D. (2005). The Career of Metaphor. Psychological Review, 122(1), 193–216.

Mikolov, T., Chen, K., Corrado, G., & Dean, J. (2013) Efficient estimation of word representations in vector space. arXiv preprint, arXiv: 1301.3781.

Mikolov, T., Sutskever, I., Chen, K., Corrado,G. S., & Dean, J. (2013) Distributed representations of words and phrases and their compositionality. In Adavances in neural information processing systems 26, 3111–3119.

付録 (アルゴリズム)

Algorithm 1 TINT flow

```
Input: A, B, A\C, B\C
C_exc.add_edge(A, B)
local_basic_rule(A, B, A\C, B\C)
BMF_pair, F_pair , nat_trans ← local_fork_rule(A, B, A\C, B\C)
local_anti_fork_rule(A\C, B\C, BMF_pair, F_pair)
if is_nat_trans(B\C, A\C, BMF_pair, F_pair) then
    比喩理解
else
    比喩不理解
end if
```

Algorithm 2 local basic rule

```
Input: A, B, A\C, B\C
for B_edge ∈ B\C.edges do
    if dom(B_edge) == B then
        edge ← (A, cod(B_edge))
        A\C.add_edge(edge)
    else
        A\C.add_edge(B_edge)
    end if
end for
```

Algorithm 3 local fork rule

```
Input: A, B, A\C, B\C
B_edges ∈ B\C.edges
for B_edge ∈ B_edges do
    if dom(B_edge) = B then
        edge ← (A, cod(B_edge))
        BMF_edges.add(edge)
    end if
end for
for all edge such that A\C.edges ∉ BMF_edges do
    if dom(edge) = A then
        A_edges.add(edge)
    end if
end for
for BMF_edge such that edge ∈ BMF_edges do
    for A_edge such that edge ∈ A_edges do
        cod1 ← cod(BMF_edge)
        cod2 ← cod(A_edge)
        if is_exc(cod1, cod2) then
            A\C.add_edge((cod1,cod2))
            BMF_pair.add((cod1, cod1))
            F_pair.add((cod1, cod2))
        end if
    end for
end for
return BMF_pair, F_pair
```

Algorithm 4 local anti-fork rule

```
Input: A, B, A\C, B\C, BMF_pair, F_pair
remain_B\C ← [(B,edge[0])   for   all   edge ∈ BMF_pair]
remain_A\C_dom ← [(A,edge[0])   for   all   edge ∈ F_pair]
remain_A\C_cod ← [(A,edge[1])   for   all   edge ∈ F_pair]
remain_A\C ← remain_A\C_dom ∪ remain_A\C_cod
for all edge such that edge ∈ A\C do
    if edge ∉ remain_A\C then
        A\C.remove_edge(edge)
    end if
end for
for all edge such that edge ∈ B\C do
    if edge ∉ remain_B\C then
        B\C.remove_edge(edge)
    end if
end for
```