

# 流動性知能実現の最初の里程碑としての見本合わせ課題

## The Match-to-Sample Task as the First Milestone toward the Realization of Fluid Intelligence

荒川直哉<sup>1\*</sup> ARAKAWA Naoya<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 全脳アーキテクチャ・イニシアティブ

<sup>1</sup> The Whole Brain Architecture Initiative

**Abstract:** In the first half of this paper, I discuss concepts surrounding the term "fluid intelligence," which often appears in general intelligence literature. In the second half, I discuss tasks for testing working memory, which is considered to be an essential cognitive function for the realization of fluid intelligence, and propose to use a sample-matching task to start with.

### 1 はじめに

本稿では、前半において一般知能（汎用知能）における議論でしばしば取り上げられる「流動性知能」という用語の周囲にある概念を整理する。後半では、流動性知能実現にとって基本的な認知機能と考えられる作業記憶をテストする課題について検討し、具体的な課題として見本合わせ課題を最初に用いることを提案する。

### 2 汎用知能と流動性知能

「汎用人工知能」ということばは artificial general intelligence（人工一般知能・以下 AGI）の訳語であり、一般知能（汎用知能）を人工的に再現する試みまたは（将来的に）再現したものを指す。AGIにおける一般性（汎用性）は、特定機能型人工知能（narrow AI）の特定された能力に対比される概念である。すなわち、特定目的で設計される人工知能に対して、設計時に予期されていない課題を解くことができる一般性（汎用性）を持つ人工知能を指す。

一方「一般知能」ということばは元来心理学の用語であり、ヒトの知能（知的とみなされる諸能力）が単一の一般知能因子  $g$  に帰結するという仮説に基づいている [1]。この仮説に基づいてさまざまなテスト（いわゆる知能テスト・psychometrics）が考案された。

この分野では、単一因子仮説にも関わらず、複数の因子が指定される。1943 年には Cattell が一般知能の中に流動性知能（fluid intelligence）と結晶性知能（crystallized intelligence）の違いを指定した [2]。Cattell の当初の定義では、流動性知能は関係を識別する能力、結

晶性知能は流動性知能によって発見された能力が習慣化されたものとされているが [4]、流動性知能の定義は一定ではない。Kievit らの要約では、流動性知能は課題特定の知識によらず、新しい抽象的な課題を解く能力とされる [3]。一方、結晶性知能は学習した知識を適用する能力だと考えられる。

AIにおける一般性（汎用性）についても流動的側面と結晶的側面を区別することができる。大雑把に言えば、学習は流動的側面であり、学習した知識の適用は結晶的側面である。Hernández-Orallo も方策生成能力としての流動性知能を取り上げている [5]（12 章）。強化学習の用語でいえば、探索（exploration）が流動的側面であり、活用（exploitation）が結晶的側面となる。Chollet [6] がいうところの Intelligent System は学習を含む流動性知能、Skill program は結晶性知能に相当する。ここでは、方策の発見と学習を含めた能力を**広義の流動性知能**と呼ぶことにする。

AGIには設計時に予期されていない課題を解きうる一般性（汎用性）を持つことが求められるという点で、新しい問題に学習した知識を使わずに対処する流動性を持つことが求められる。広義の流動性知能では、新しい課題を解く能力が多数の試行錯誤の結果得られるものなのか、内的なシミュレーションによって得られるものなのかについては指定しない。

なお（広義の）流動性知能と結晶性知能という二分法は、二重過程理論 [7] がシステム 1 とシステム 2（大雑把にいうと無意識的推論と意識的推論）という二分法とは一致しない。例えば強化学習（オペラント学習）は、意識的な過程（システム 2）で実行されない場合でも、獲得した知識を使わずに問題に対処する能力という点で流動性知能に分類される。また、ヒトは演繹推論をしばしば意識的な過程（システム 2）で行うものの、獲得した知識を使って行う演繹推論能力は結晶

\*E-mail: arakawa.naoya@gmail.com

性知能に属する。ただし、通常の知能テストでは無意識的に試行を行うような知能の形態は想定しておらず、知能テストで測定される流動的知能にはシステム2が関与すると考えられる。また、ヒトの認知についての理論である二重過程理論をAI一般に適用することは無理があるだろう。

### 3 流動性知能と探索

知能テストで計測される流動性知能は、テスト時に外界での試行錯誤を許すようなものではないため、問題解決のための探索（試行錯誤）はエージェント内部で行われると考えられる。以下では、知能テストで計測されるような流動性知能、よって内的なシミュレーションによって課題を解くような（狭義の）流動性知能に話を限定することにする。知能テストでは、何らかの解（Cattellの定義に沿えばなんらかの関係性）を見つけることが求められるが、見つけられた解を方策として学習することは求められない。

探索では、途中で行為の選択が行われ、行為の列が生成される。探索の結果は、ある状態への到達かもしれないし、行為の列によって生成されるパターンかもしれない。探索の結果が目的を満たしているかどうかは何らかの基準によって評価される。結果がある状態への到達である場合のうち、単純なケースではその状態が報酬と連合しているかどうかにより評価される。そうでない場合は、状態や生成されたパターンが一定の基準（制約など）を満たしているかどうかを評価する行動（評価行動）が必要になる。

#### 3.1 例：マトリクス推論課題

知能テストで流動性知能を測定する課題として、しばしばマトリクス推論課題（matrix reasoning task）が用いられる（例：図1）。Chollet[6]がAGI用の課題として提示したARCもマトリクス推論課題の一種である。ここでは、この課題を例として知能テストにおける流動性知能の性質をみてみることにする。

マトリクス推論課題で被験者には行列（マトリクス）が提示される。行列の最後のマスは空白になっている。被験者は最後の行以外の行（最後の列以外の列）で示されたパターンから規則を発見し、最後の行（列）にその規則を適用して最後のマスを埋める。被験者は次のような探索により課題を解くと考えられる。

- ある最後の行以外の行（最後の列以外の列）において最後の列（行）のマスを生成（予測）する規則を（探索的に）生成する。

- 上記規則が他の行（列）にも適用できるか確認する。
- できなければ他の規則を生成する。
- すべての埋まっている行または列に適用できる規則ができたなら最後の行（列）に適用する。

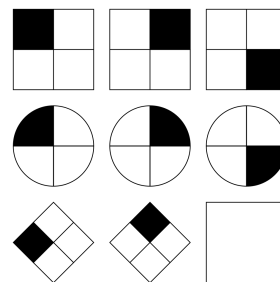


図1: レーヴン漸進的マトリクス課題

CC BY-SA 3.0 Life of Riley @Wikimedia

マトリクス推論課題では、規則は行列の要素に対する何らかの演算とその結果の形をとる。よって、被験者が課題を解くには、行列要素の演算についての課題固有の事前知識と演算を内的に実行する能力がなければならぬ。行列要素が図形の場合、演算の例として回転や縮小、複数要素の位置を変えながらの組み合わせといった変形を挙げることができる。行列要素が数字の場合は算術的演算の知識と暗算のスキルが必要となる。マトリクス推論課題の探索では、適用可能な規則の生成がサブゴールとなり、適用可能性のチェックが評価行動となる。適用可能性のチェックでは、規則によって生成された内部表象と現実のマス内の図形との一致判定が行われる。以上から、マトリクス推論課題に必要な認知機能は次のようなものとなる。

- 対象に対する内的演算能力
- 内的演算の要素（対象と結果）をパターンとして生成・保持する能力
- パターンの適用と一致判断
  - 部分パターンにパターンを適用し、全体パターンを予測・生成する能力
  - 予測・生成されたパターンが現実と一致しているかを判断する能力
- 探索能力
  - 失敗した場合、別のパターン生成を試行する。
  - 失敗したパターンを記憶し、繰り返さない。

### 3.2 用語の整理

ここまで用いられた流動性知能に関連する用語を下記表 1 にまとめた。

表 1: 流動性知能に関連する用語

g				結晶性知能 (Skill Program) - Exploitation -	
広義の流動性知能 (Intelligent System) - Exploration -				要探索	非探索的
内部探索 狭義の流動性知能 関係性の発見		外部探索		経路探索 論理推論 構文解析 など	単純な方 策適用
学習なし	学習あり	学習なし	学習あり		
流動性知能テスト課題	モデルベース強化学習	外部探索による解の発見	モデルフリー強化学習		

注 1) 単純化しているなので、例外が見つかるかもしれない。

注 2) 表内のどの過程も「意識的」に行われるかもしれないという点、また表内のどの過程にも「無意識的」な過程（例えば知覚）が関与し、「無意識的」な探索もありうるかもしれないという点で、表の分類は二重過程理論の分類とは独立である（個別の課題においてはヒトのシステム 2 が寄与しているかどうか判定することができるかもしれない）。

注 3) ヒトの場合、構文解析以外の探索的な結晶性知能は概ね「意識的」に行われるため、流動性知能を測る知能テスト課題と同様の認知機能（地頭）が動員されるかもしれない。

注 4) 古き良き人工知能 (GOFAI) が得意としてきたのは探索的な結晶性知能であった。

### 3.3 流動性知能の実現

少なくともマトリクス推論課題については、アルゴリズムとして実現できない部分は見られない。ただし、探索的な部分は現在の人工知能業界の主流となっている人工神経ネットワークとはそれほど相性がよいわけではない。MuZero [8] などのボードゲーム学習システムは、人工神経ネットワークとモンテカルロ木探索などの探索アルゴリズムを組み合わせることで探索に対処している。人工神経ネットワークと探索機構を含むアーキテクチャに、課題の対象に対する演算能力を事前に用意するか学習させるようにして、(ARC を含む) マトリクス推論課題を解かせることを検証することが考えられる。

ここで、AI にとって流動性知能と結晶性知能の差が決定的なものかどうかということについては注意が必要である。マトリクス推論課題を効率的に解くための知識が与えられたり学習されたりしたシステムは、結晶性知能によって課題を解いているのだと捉えられるかもしれない。一方 AI は、学習された知識や事前知識を一般的な解法部分と分ける形で設計できるかもしれない。

## 4 流動性知能と作業記憶

流動性知能のテストとして用いられるマトリクス推論課題に必要な認知機能として、適用すべきパターンの保持（記憶）や失敗したパターンの記憶を挙げた。これらは課題遂行に必要な一時的な記憶であり、定義上「作業記憶」ということになる。一般的に探索を行うためには、失敗したり部分的にうまくいったりした経路を覚えていなければならないので、作業記憶が必要である。

作業記憶を記号的なシステムで実現するのは容易である一方、モデル、応用の両面で研究が進んでいる人工神経ネットワークにおいては、どのように実現するべきかについて決定的な手法がない。また、脳の中で作業記憶がどのように実現するかについても決定的なモデルがない。AGI を人工神経ネットワークや脳を真似た形で実現するとすれば、流動性知能（あるいはより基本的な機能としての探索）にとって基本的な認知能力である作業記憶のモデルを明確にしておくことは重要であろう。

## 5 課題提案

認知機能の検討にあたっては、機能がどのような課題で測定されるかを決定しておく必要がある。作業記憶のテストとしては、現在呈示されている刺激が N 回前の刺激と同じかどうかを答える **N-back 課題**、少し前に提示された刺激（通常はエサ）の位置を答える **遅延反応課題** (delayed response task)、**遅延見本合わせ課題** (delayed match-to-sample task・詳細下記) といった課題が提案されている。以下では、これらのうち程度の高さを持つ遅延見本合わせ課題をとりあげる。

遅延見本合わせ課題では、まず見本図形が提示され、見本図形が隠された後、複数のターゲットとなる図形が提示される。被験者は、ある基準に従って見本と同じとみなされる図形を選択する。被験者はターゲット図形選択の際、見本図形の属性を記憶していなければならないため、この課題は作業記憶をテストする課題となる。また、複数の比較基準（例えば形や色）が切り替えて用いられる場合、被験者は基準を記憶してい

必要がある。比較基準は、自然言語で与えられたり、セッションの前に提示されるサンプルセッションによって与えられたりする。非言語的なサンプルセッションが用いられる場合、サンプルセッションと比較基準、遂行する課題の間は学習されなければならない。学習した知識を用いるという意味で、非言語的な被験者の遅延見本合わせ課題は純粋に流動性知能を計測するわけではない。

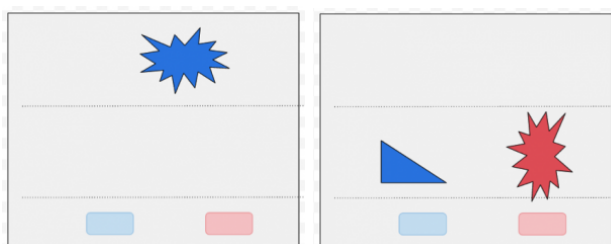


図 2: 遅延見本合わせ課題  
左側が見本

より簡単な課題としては、遅延のない見本合わせ課題を考えることができる。遅延のない見本合わせ課題でも、ヒトのように中心視により同時に複数の箇所の図形を認識できない場合は、眼球運動の前後で識別した図形を記憶していなければならないため、作業記憶が必要になる。また、複数の比較基準が切り替えて用いられる場合、被験者はサンプルセッションなどで提示される基準を記憶している必要がある。

作業記憶の仕組み自体のテストではないが、課題に若干の一般性を持たせるために見本とターゲットの図形の間画像の縮小や回転などの操作を加えることが考えられる (invariant object identification 課題)。

実装については、例えば PEBL<sup>1</sup> や PsyToolkit<sup>2</sup> などの既存の心理学実験ツールキットを用いることが考えられる。これらのツールキットには遅延見本合わせ課題の例題も用意されているが、筆者らは上記の仕様をみたく純粋な Python 実装を行うために PyGame を用いて課題環境を実装した<sup>3</sup>。

## 6 おわりに

本稿では「流動性知能」という用語にまつわる概念を整理し、ついで流動性知能実現にとって基本的な認知機能と考えられる作業記憶課題について検討し、提案を行った。

筆者らは、本稿で述べた見本合わせ課題を遂行する認知アーキテクチャを、脳にヒントを得て実装するオ

ンラインハッカソン (競技会) の開催を計画している<sup>4</sup>。人工ニューラルネットでの作業記憶の実現方法にも決定的なものがないことが一つのチャレンジとなる。また、哺乳類の作業記憶の生物学的な仕組みは完全にわかっていないことから、ハッカソンでは哺乳類の作業記憶のモデルの生物学的妥当性についても評価を行う (事前にモデルを募るモデラソン<sup>5</sup> も実施した)。読者の方々が競技会に参加し、作業記憶と流動性知能の実装にとりくんでいただければ幸いです。

## 参考文献

- [1] Spearman, C.: General Intelligence, Objectively Determined and Measured, *The American Journal of Psychology*, Vol.15, No.2, pp.201–292. doi:10.2307/1412107 (1904).
- [2] Cattell R.B.: The measurement of adult intelligence, *Psychol. Bull.*, Vol.40, pp.153–193. doi:10.1037/h0059973 (1943)
- [3] Kievit, R.A., et al.: A watershed model of individual differences in fluid intelligence, *Neuropsychologia*, Vol.91, pp.186–198 (2016)
- [4] Brown, R.: Hebb and Cattell: The Genesis of the Theory of Fluid and Crystallized Intelligence, *Front. Hum. Neurosci.*, Vol.10, doi:10.3389/fnhum.2016.00606 (2016)
- [5] Hernández-Orallo, J.: *The Measure of All Minds: Evaluating Natural and Artificial Intelligence*, The Cambridge University Press (2017)
- [6] Chollet, F.: The Measure of Intelligence, arXiv:1911.01547 [cs.AI] (2019)
- [7] Kahneman, D.: A perspective on judgement and choice, *American Psychologist*, Vol.58, No.9, pp.697–720. doi:10.1037/0003-066x.58.9.697 (2003)
- [8] Schrittwieser, J. et al.: Mastering Atari, Go, Chess and Shogi by Planning with a Learned Model, arXiv:1911.08265 [cs.LG] (2020)

<sup>1</sup><http://pebl.sourceforge.net/>

<sup>2</sup><https://www.psychtoolkit.org/>

<sup>3</sup><https://github.com/rondelion/M2S/tree/main/m2s>

<sup>4</sup>[https://github.com/wbap/WM\\_Hackathon/wiki](https://github.com/wbap/WM_Hackathon/wiki)

<sup>5</sup><https://wba-initiative.org/15968/>