

AI時代のSTEAM教育における判断設計

— Marrの3水準と二層型Can-Do Statementsによる理論整理 —

Judgment Design in STEAM Education in the Age of AI

— A Theoretical Framework Based on Marr's Three Levels and a Two-Layer Can-Do Statements Model

下郡 啓夫*

函館工業高等専門学校*

生成AIの普及により、情報生成や解法提示が容易になる一方で、学習者がどの水準の判断を自ら引き受けているのかを教育的に可視化する必要性が高まっている。とりわけSTEAM教育においては、成果物や活動の完成度に焦点が当たりやすく、学習過程における思考や判断の質が捉えにくいという課題がある。

本研究では、こうした課題を踏まえ、判断を問いの意味づけ、推論の妥当化、実装上の責任選択を含む認知行為として捉える。その上で、Marrの3水準を判断の認知構造として再解釈し、STEAM各領域を判断過程における役割として位置づける理論枠組みを提案する。さらに、19の思考スキルに基づく二層型Can-Do Statementsを統合し、AI時代のSTEAM教育の設計および評価に資する理論フレームを示す。

キーワード：STEAM教育，判断設計，Marrの3水準，Can-Do Statements

1. はじめに

近年、STEAM教育は探究的・創造的な学習を実現する教育実践として広く展開されている。一方で、実践の多くは成果物や活動の完成度に焦点が当たり、学習者が学習過程においてどのような思考や判断を行っているのかが十分に可視化されていないという課題が指摘されている。例えば、STEAMやPBLに関する体系的レビューでは、学習成果や生成物の質、協働の様相といったアウトカム側の評価が先行する一方、課題解決の各段階で学習者がいかなる判断・推論を行ったのかという過程の可視化は相対的に弱いことが繰り返し指摘されている（例：Yimら，2024；Aguilera & Ortiz-Revilla, 2021；Thomas, 2000；Fernandesら，2012）。

特に生成AIの普及により、情報生成や解法提示が容易になる現在、学習者がどの水準の判断を自ら引き受けているのかを教育的に捉える必要性は一層高まっている。実際、生成AI支援下の執筆課題では、高成績者ほど自律的な課題理解→精確な対話→選択的抽出と深い処理という主体的判断の連鎖を示す一方、低成績者は低次処理に偏るなど、判断の引き受け方の差が観察されている（Wangら，2025）。このよう

な認知の外部委託／外在化は、設計次第で主体性を補完し得るが、安易な代替は認知的自律性を損なう可能性がある（Joseら，2025；Rivera-Novoa & Duarte, 2025）。この問題は、STEAM教育において本来学習者が担うべき問いの設定、モデル選択、実装判断といった判断行為が、生成AIによって不可視化・代替されやすい点とも深く関係している。

また、認知科学におけるMarrの3水準は情報処理の計算的目標-手続（表現・アルゴリズム）-実装を峻別する分析枠組みとして広く知られるが、教育実践の設計原理として、特にSTEAM学習者の「判断の役割」を各水準に割り当てて、学習者の判断構造を明示的に扱う形で統合的に設計・評価した研究は限定的である（例：Hardcastle & Hardcastle, 2015；Krafft & Griffiths, 2015；日高，2017）。

こうした課題に対し、本研究はSTEAM教育を「判断の設計」という観点から再構造化することを目的とする。具体的には、認知科学におけるMarrの3水準を教育的に再解釈し、STEAM各領域を判断過程における役割として整理するとともに、思考力Can-Do Statementsを統合した理論フレームを提案する。

2. 関連研究と課題

STEAM教育研究では、教科横断性や創造性、問題解決能力の育成が重視されてきた (Yakman, 2008 ; English, 2016)。しかし、S・T・E・A・Mを並列的に扱う整理が多く、学習者が課題解決のどの段階で、どの領域の知を用いて判断しているのかは必ずしも明確ではない。多くの実践研究においても、探究や設計のプロセスは記述されるものの、判断行為そのものの構造化には至っていない。

一方、思考力研究では、思考スキルの分類やCan-Do Statementsによる行動記述の明確化が進められている。例えば、ベネッセ教育総合研究所による思考力調査では、「比較する」「理由づける」「多面的に考える」などの思考行為が学習者の行動として可視化されている。しかし、これらの思考行為が学習過程のどの判断水準で発揮されているのか、また探究や設計のどの局面で機能するのかについては十分に整理されていない。同様の傾向は、PISAにおける創造的思考の枠組みにおいても見られる (OECD, 2022)。

Marrの3水準 (計算理論・表現とアルゴリズム・実装) は、主として認知過程の分析や説明の枠組みとして用いられてきた (Marr, 1982 ; 日高, 2017)。一方で、教育設計において学習者の判断構造を水準別に整理し、STEAM教育の学習活動や評価と体系的に対応づける枠組みとしての応用は十分に検討されていない。そのため、判断がどの水準で行われているのかを基準に学習活動を設計・評価する視点は、STEAM教育研究において未整理のままである。

本研究はこの点に着目し、学習者の判断水準を軸としてSTEAM教育を再編成する理論的応用を試みる。

3. 提案フレームワーク

本研究では、Marrの3水準を判断の抽象構造、STEAMをその判断を支える領域的役割、Can-Do Statementsを観察可能な行動指標として、抽象度の異なる三層として位置づける。

その上で本章では、Marrの3水準・STEAM各領域・思考力 Can-Do Statements という抽象度の異なる三つの概念体系を、判断の設計という観点から統合するための翻訳原則 (bridging principle) を明示する。

Marrの3水準は本来、認知システムの情報処理を「計算理論」「表現とアルゴリズム」「実装」の三層で構造化するための分析枠組であり、教育デザインやSTEAMの議論に直接適用されるものではない。しかし、この三層は、学習者が課題に取り組む際の判断の成立構造 (何を・どのように・どの水準で決めているのか) を捉えるうえで有効な観点を提供する。

そこで本研究では、

1. Marrの3水準を「判断の認知構造」へと再解釈する段階 (抽象)。
2. STEAM各領域を、その判断構造が実装される“役割”として割り当てる段階 (準抽象)。
3. Can-Do Statementsを、その役割が観察可能な形で現れる“行動指標”として位置づける段階 (具体)。

の三段階の翻訳プロセスを設定し、異なる体系を一つのフレームに統合する。

この翻訳により、

- Marr = 「判断が成立する構造」
- STEAM = 「その構造がどの領域の知に支えられているか」
- Can-Do Statements = 「その判断が具体的にどのように観察されるか」

という三層の相互対応関係が明確化される。

特に本研究が強調するのは、Can-Do Statementsは、Marrの水準を“満たしているか”を測る具体的な行動記述になるという点であり、これにより「学習者がどの判断水準で活動しているか」が初めて可視化可能となる。

以上の原則を踏まえたうえで、次節ではMarrの3水準・STEAMの役割・二層型 Can-Do Statementsをどのように対応づけたかを詳述する。

3.1. Marrの3水準の教育的再解釈

Marrの3水準は本来、認知科学において情報処理システムを「計算理論」「表現とアルゴリズム」「実装」の三層に区別するための分析枠組である (Marr, 1982)。

教育学やSTEAMの文脈では一般的に用いられていないが、学習者が課題解決においてどの水準の判断を行っているかを区別して捉えるうえで、その構造が極めて有効に機能する。

本研究では、前節で述べた翻訳原則に基づき、Marrの三層を以下のように「判断の認知構造」として再定義する：

- 水準1 (計算理論) : 課題の意味や目的の適切性

を判断する水準

- 水準2 (表現とアルゴリズム) : 情報の構造化・モデル化・推論の妥当性を判断する水準
- 水準3 (実装) : 制約や安全性、社会的影響を踏まえて判断を実行する水準

この再解釈により、従来 STEAM 教育で曖昧に記述されがちであった「学習者がどの判断を担っているのか」を、水準に応じて明示的に捉えることが可能となる。

3.2. STEAM を判断過程における役割として捉える

STEAM 各領域を単なる「教科」ではなく、判断構造を支える機能的役割 (functional role) として再整理することが、本枠組の第二の翻訳段階である。

すなわち、

- Arts/Science は「問いの価値・意味づけ (計算理論)」を支える
- Mathematics/Science は「推論・構造化 (表現・アルゴリズム)」を支える
- Technology/Engineering は「実装判断・制約条件 (実装)」を支える

という形で、Marr の三層に STEAM の知が対応することが明確になる。

これにより、従来 STEAM で「S・T・E・A・M がどの段階で使われているのか不明確」だった問題を解消し、学習者の判断の背景にある知の源泉を体系的に理解できる。

3.3. 思考力 Can-Do Statements (二層構造) の統合

本研究で用いる「思考スキル19項目」は、泰山らによって先行研究に基づき整理された思考力の体系を基盤としている。これらは、比較・分類・多面的検討・理由づけ等の認知的思考操作を中心に構成され、学習者の思考過程を行動レベルで可視化するための枠組みとして提案されている (泰山, 2014; 泰山, 小島, 黒上, 2014)。また、これらの19項目は、教科横断的に用いられる認知的思考操作を中心に整理されたものであり、特定教科固有の技能を列挙したものではない。

本研究では、この枠組みを Can-Do Statements として再整理し、判断水準との対応づけに用いる。

Can-Do Statements の二層構造 (思考操作レベル / 関係性・責任レベル) は、上記で対応づけた Marr × STEAM の判断構造を、観察可能な行動に落とし

込む第三の段階である。

思考力を評価可能な形で捉えるため、本研究では Can-Do Statements を以下の二層で整理する。

- Layer① : 個人の認知的思考操作
 - Layer② : 感情・関係性・責任を伴う判断行為
- この二層構造により、同一の思考スキルであっても、判断水準や文脈に応じて異なる形で発揮されることを捉えることができる。

4. 統合モデルの全体像

図1に、Marrの3水準、STEAMの役割、二層型 Can-Do Statements を統合したモデルを示す。図中の Can-Do Statements は、各判断水準を代表する行動例であり、実際には19の思考スキルに基づく複数の指標が対応し得る。

	Marrの水準 (判断水準)	STEAMの役割 (知の支え)	Can-Do Statements (観察可能行動)
水準1	計算理論 (意味・目的)	Arts/Science	Layer① 思考操作 問いを設定する Layer② 判断行為 意味を説明する
水準2	表現とアルゴリズム (推論妥当性)	Mathematics/ Science	Layer① 思考操作 構造化・推論 Layer② 判断行為 妥当性を説明する
水準3	実装 (責任・制約)	Technology/ Engineering	Layer① 思考操作 実行・調整 Layer② 判断行為 影響を引き受ける

図1 : Marr の 3 水準を判断の認知構造として再解釈し、STEAM の知の役割および二層型 Can-Do Statements による観察可能行動を対応づけた判断設計の統合モデル

なお、縦方向は Marr (抽象) → STEAM (準抽象) → Can-Do (具体) の抽象度を示す。Can-Do は各判断水準の達成を行動レベルで確認するゲートとして機能する。

本モデルは、STEAM教育における学習活動を、成果物ではなく判断の連続体として捉え直すものであり、学習過程の可視化と評価に理論的基盤を与える。さらに本モデルは、三者を並置するのではなく、判断水準を軸に対処づけて統合した点に特徴がある。

5. 考察と教育的示唆

本研究のフレームワークは、STEAM教育における評価を成果物中心から判断過程中心へと転換する可

能性を持つ。また、生成AIが学習過程に介在する環境において、人間が担うべき判断の水準を明確化する点でも意義がある。

今後は、本フレームを単元設計やルーブリック構築に応用し、授業実践や教員研修を通じた検証を行うことが課題である。なお、本研究は理論整理を主眼とするものであり、学習成果やAI活用効果への実証的検証は今後の課題である。

例えば単元設計においては、水準1（問いの意味づけ）から水準2（推論構造の判断）、水準3（実装と責任判断）へと、学習者が担う判断の水準を段階的に配置することが重要となる。加えて、AIの活用は主として水準2（表現・アルゴリズム）を補完する位置づけとし、最終的な問いの正当化（水準1）および実装上の責任判断（水準3）は学習者（人間）が引き受ける設計原則を採用する。

謝辞

本研究はJSPS科研費 JP 23K02151の助成を受けたものです。

参考文献

Yim, I. H. Y., Su, J., & Wegerif, R. (2024). STEAM in practice and research in primary schools: A systematic literature review. *Research in Science & Technological Education*, 43(4), 1065-1089.

Aguilera, D., & Ortiz Revilla, J. (2021). STEM vs. STEAM education and student creativity: A systematic literature review. *Education Sciences*, 11(7), 331.

Thomas, J. W. (2000). A review of research on project based learning. Buck Institute for Education.

Fernandes, S., Flores, M. A., & Lima, R. M. (2012). Student assessment in project based learning. In L. C. de Campos, E. A. T. Dirani, A. L. Manrique, & N. van Hattum Janssen (Eds.), *Project approaches to learning in engineering education: The practice of teamwork* (pp. 147-160). Sense/Brill.

Wang, F., Tang, X., & Yu, S. (2025). Cognitive outsourcing based on generative artificial intelligence: An analysis of interactive behavioral patterns and cognitive structural features. *Acta Psychologica Sinica*, 57(6), 967-986.

Jose, B., Joseph, D., Mohan, V., Alexander, E., Varghese, S. K., & Roy, A. (2025). Outsourcing cognition: The psychological costs of AI era convenience. *Frontiers in Psychology*, 16, 1645237.

Rivera Novoa, A., & Duarte, D. A. (2025). Generative artificial intelligence and extended cognition in science learning contexts. *Science & Education*. Advance online.

Hardcastle, V. G., & Hardcastle, K. (2015). Marr's levels revisited: Understanding how b publication rains break. *Topics in Cognitive Science*, 7(2), 274-285.

Krafft, P. M., & Griffiths, T. L. (2015). Levels of analysis in computational social science. *Proceedings of the 37th Annual Conference of the Cognitive Science Society* (pp. 1121-1126). Cognitive Science Society.

日高昇平(2017). 最適化を超えた認知科学の新たなパラダイムに向けて：Marr の情報処理の三水準の再考. *認知科学*, 24(1), 67-78.

Yakman, G. (2008, June). STEAM education: An overview of creating a model of integrative education. In *Proceedings of the PATT 19 Conference: Research on Technology Education* (pp. 335-358). Salt Lake City, UT.

English, L. D. (2016). STEM education K 12: Perspectives on integration. *International Journal of STEM Education*, 3, 3.

OECD. (2022). OECD PISA 2022 creative thinking framework. OECD Publishing. <https://www.oecd.org/pisa/publications/PISA-2022-Creative-Thinking-Framework.pdf> (アクセス日：2026年1月23日)

Marr, D. (1982). *Vision: A computational investigation into the human representation and processing of visual information*. W. H. Freeman.

泰山裕 (2014) 思考力育成を目指した授業設計のための思考スキルの体系化と評価. 関西大学審査学位論文

泰山裕, 小島亜華里, 黒上晴夫 (2014) 体系的な情報教育に向けた教科共通の思考スキルの検討：学習指導要領とその解説の分析から. *日本教育工学会論文誌*, 37(4) : 375-386.