

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成26年6月 1日現在

機関番号：34310
研究種目：基盤研究(B)
研究期間：2011～2013
課題番号：23300101
研究課題名（和文） 図的表現系の能力と図的推論の運用に関する総合的研究
研究課題名（英文） Integrated Study of the Competence of Diagrammatic Representation Systems and the Performance of Diagrammatic Reasoning
研究代表者
下嶋 篤 (SHIMOJIMA, Atsushi)
同志社大学・文化情報学部・教授
研究者番号：40303341
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 11,600,000円、（間接経費）3,480,000円

研究成果の概要（和文）：

本研究の目的は、図的表現系がその意味論的特性に基づいてどのような認知的能力をもっているかを論理・計算論的分析に基づいて予測し、さらにその能力が現実の人間による推論の過程にどのように影響するかを実験を主とした心理分析に基づいて解明することであった。本研究では特に、この統合的研究方法をアイコン表の系に集中的に適用し、行・列レベルの視覚特性に基づく抽象情報の表示と読み取り、また、表に順次情報を追加することによる論理的帰結の自動表示と読み取りを分析した。

研究成果の概要（英文）：

The purpose of this study is to predict, on the basis of logical analysis of its semantic properties, what cognitive competences a diagrammatic system has, and to verify, on the basis of psychological experimentation, how those competences affect the actual processes of human reasoning. In particular, we have applied this integrated method to the systems of iconic tables, and analyzed the expression and comprehension of abstract information based on the visual properties of the row and column level, as well as the automatic expression and comprehension of logical consequences based on incremental expression of information to tabular representations.

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・認知科学

キーワード：推論・問題解決、図的推論

1. 研究開始当初の背景

従来、図的推論は主として、認知科学的アプローチ、計算論的アプローチ、心理学的アプローチの3つの方法で研究されてきた。しかし、それぞれが異なる研究の伝統の中で異なる研究者グループによって行われていたため、それぞれの成果を連結させ、図的推論の総合的理解を得ることはおろか、それぞれのアプローチの役割が峻別されこともなかった。とくに、統語規則・意味規則・推論規則だけによって決まる図的表現系の能力の問題と、人間の認知資源の限界が加わって決まる図的推論の運用の問題が明瞭に区別されることがなかったため、前者を研究する論理学的アプローチ、後者を研究する心理学的アプローチ、両者を結ぶ計算論的アプローチのいずれをとっても、明瞭にその役割を意識して図

的推論の総合的研究に貢献してきたとは言いがたかった。

2. 研究の目的

これに対し、本研究の目的は、認知科学的アプローチ、計算論的アプローチ、心理学的アプローチの役割分担を明確に意識した以下のような着想に基づき、図的推論の総合的な解明を行うことであった。

(1) 従来の論理学的アプローチは、図的表現系の特性の中でも、図を使った推論の容易さや効率に関わる特性は、推論を行う人間の特性に大きく依存するため、形式的な取り扱いが不可能として、研究の対象にされなかった。しかし、図的推論の容易さや効率に関わる特性のうち、図的表現系の能力に帰すべき

側面を運用に帰すべき側面から峻別すれば、前者に対する形式的な取り扱いが可能である。

(2) 従来の計算論的アプローチでは、本来は外的な対象である図を、計算の効率性の観点から、便宜的に内的表象として計算モデルの中に組み入れられていた。しかし、図表現が外的対象であることを正面からとらえ、人が図にアクセスする際に用いる注意操作や知覚操作を陽にモデルに組み入れることによって、しばしば観測される図的推論の容易さと効率を、注意・知覚操作の働きとして説明できる。

(3) 従来の心理学的アプローチでは、実験的方法の本性上、ベン図や地図など、特定の図的表現系における推論課題を研究対象として選はざるをえず、得られた結果を他の図的表現系について得られた結果と関係づけることが困難で、断片的な知見を得るに留まるが多かった。しかし、着想 (1) の論理的アプローチにおいて、図を使った推論の容易さや効率に関わる特性を、複数の系が共有する一般的特性として析出できれば、この特性を対象とした実験を計画的に組織することにより、図的表現系に関する個々の実験結果を関連づけ、図的推論の特徴に関する一般的な理解を得ることができる。

3. 研究の方法

上記の着想に基づいて、図的推論に対する以下の3つのアプローチのそれぞれを、従来になかった着想において展開し、さらに相互の連絡を密にすることによって、図的推論の機能の総合的理解をめざした。

(1) 論理的アプローチ。ベン図、地図、グラフなど、特定の種類の図を利用する際に我々が用いている統語規則、意味規則、推論規則を体系化し、そうして特徴付けられた図的表現系の特性を数学的証明によって明らかにする。

(2) 計算論的アプローチ。我々が図を使って思考する際に用いる認知的操作を、人間（もしくは計算機）の認知的資源の限界を考慮した上で特定し、推論過程の計算モデルを構築する。

(3) 我々が図を使って思考する際の行動を実験的方法によってとらえ、データの分析により図的推論の特徴を明らかにする。

4. 研究成果

(1) 図表現の意味論的特性。図表現系の統語・意味規則、図要素に対する空間的制約、表現対象が従う制約の観点から、図的推論の容易さや効率に関わる4つの意味論的特性を

整理し、その背後にあり論理的メカニズムを明らかにした。

図1はそれぞれの意味論的特性を可能にしている、論理的メカニズムを表している。4つの図が共通の構造を示していることから分かる通り、4つの意味論的特性の背後には共通の論理的特性が存在し、本研究ではこれを「制約の投射」として特徴づけた。この概念は「図とはなにか」という根本的な概念的問題に対する科学的に有益な答えを与えると同時に、図的推論の容易さや効率性に対する統一的な説明を提示するものとして重要な意味を持っている。

(a)	(b)	(c)	(d)
$\Delta \vdash \delta_i$	$\Delta_1 \quad \Delta_2$	$\Delta \vdash \emptyset$	$\theta \times \mathcal{D}$
$\uparrow \quad \uparrow$	$\uparrow \quad \uparrow$	\uparrow	$\hat{1} \quad 1 \rightarrow 1$
$\Gamma \vdash \gamma_i$	$\Gamma_1 \vdash \Gamma_2$	$\Gamma \vdash \emptyset$	$\sigma \times \mathcal{G}$

図1: 図表現の意味特性 (左から、Free ride 特性、過度の特定性、自己整合性、意味派生) を可能にしている論理的なメカニズム。

この研究の成果は著作として CSLI 出版に提出され、現在レビュー中である。

この研究で分析された4つの意味論的特性のうち、図的推論に関わる free ride 特性は、下記の (2) と (5) においてそれぞれ心理学的、計算論的アプローチによって検証され、図表限の読み取りの効率性に関わるグローバル読解は、下記 (4)–(7) においてやはり心理学的・計算論的に検証されている。

(2) 図表現における仮定的描画。成果 (1) で明らかにされた Free Ride 特性が実際の人間の推論において影響を及ぼすかを、図表現に対する人間の視線運動を追うことによって検証した。

とくに、Free Ride 特性が要求する描画行為が物理的な描画ではなく、描画を想定するだけの「仮定的描画」である場合にも、同様の効果が得られるかことを実験的に確かめ、図的推論研究の分野に大きなインパクトを及ぼした。

この研究の成果は、*Cognitive Science* 誌に掲載された。

(3) 図のグローバル読解の計算論的利点。表、連結図、ベン図という代表的な図表限の系において、それぞれがどのような知覚グルーピングを通してグローバル読解を可能にするかを整理し、図の読み取り課題におけるその計算論的な利点を軽視的な方法で明らかにした。

それぞれの系に対する詳細な分析は残された課題であるが、この研究には、一見非常

に異なる系の意味論的特性を統一的にとらえることに対する示唆が含まれており、成果(3)で述べる単一変数表示系に関する論理学的研究に連絡している。

この研究の成果は、第7回図の理論と利用に関する国際学会 (Diagrams 2012、カンタベリー、2012年8月)において発表された。

(4) 単一変数表示系の論理。アイコン表、統計チャート、連結図、オイラー図など、一見非常に異なるように見える図表限の系が、一対の変数を意味論的にマップしたものととして統一的にとらえられることを明らかにした。それだけではなく、さらに多くの図表現系がこのマッピングを様々な形で制限した結果としてとらえることができ、変数間のマッピングのこうした一般的特性をもとに、成果(2)で整理された意味特性が導出できることも分かった。

この成果は、非常に広範囲の図表現系の意味特性、およびそこから予想される認知機能を体系的に説明する理論を予見させるものであり、大きな学術的ポテンシャルをもっている。

この研究の成果は、第3回オイラー図国際ワークショップのキーノート・スピーチにおいてはじめて発表される。

(5) 表を用いた思考の計算論的特性。この研究ではとくに、下図にあるような表に情報を加えながら、与えられた条件合致した労働シフトを見いだすという課題に焦点を当て、その過程で表が推論にどのような影響を及ぼすのかを計算論的な手法を用いて評価した。

	M	T	W	F
a			○	×
b	×			×
c	×			
d				

その結果、(1)の研究で明らかになった、図のもつFree Ride効果が実際上の計算論的利点として量化することが可能であることが見いだされ、またそれが(3)の研究で予測されたグローバル読解の効果を反映するものであることが分かった。

この成果は第8回図の理論と利用に関する国際学会 (Diagrams 2014、メルボルン、2014年8月)で発表する予定である。

(6) 図のグローバル読解における知覚的組織化。上記(2)で図のグローバル読解の計算論的利点を分析するのと並行して、グローバル読解に必要な知覚的組織化の機序を心理物理学の実験により調査した。その結果、知覚的に定義される境界に依存せず、表を異なる情報単位に分断する処理の存在が明確になり、グローバル読解に必要な知覚処理が小要素のグループ化であるという考え方

に対し、大要素の分断化であるという新たな視点を示した。

この成果は、第7回図の理論と利用に関する国際学会 (Diagrams 2012、カンタベリー、2012年8月)において発表された。

(7) 図のグローバル読解の脳内基盤。(2)の研究において、グローバル読解の知覚的組織化の機序を行動データによって明確にしたことを受けて、この研究ではさらに、脳画像データに基づいて、グローバル読解の脳内基盤についてより直接的な知見を得ることを目指した。その結果、グローバル読解の準備段階と実行段階の双方において、ローカル読解時のそれとは異なる脳部位が活性化することが分かり、とくに、下前頭接合部

(inferior frontal junction)の活性化が観察された(図2)。この部位は、知覚刺激に即応する処理を抑え、課題に関連した反応を促進する、いわゆる認知的コントロールに関連することが分かっており、この結果は、ローカル読解に帰すことができない、独立したプロセスとしてのグローバル読解の存在を知覚的組織化の観点から示す点できわめて重要である。

本成果は、第8回図の理論と利用に関する国際学会 (Diagrams 2014、メルボルン、2014年8月)にて発表される。

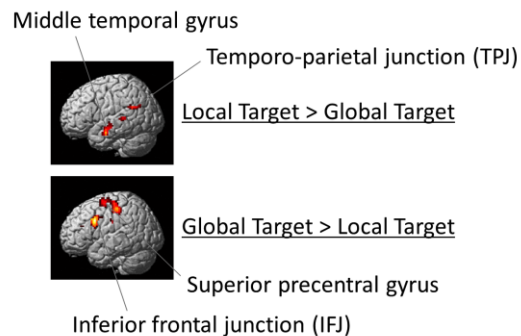


図2: 図のグローバル読解における下前頭接合部の活性化

(8) 各アプローチの連携。図3は、上記7項目の成果の関連を示している。この図から、本研究においては、当初構想されたような、論理的、計算論的、心理学的アプローチの統合が実現されていることが分かる。これらの分野の連携は、図表現研究のみならず、昨今の認知科学全体を見渡してもまれな事例であり、認知研究における一つの方法論的モデルを示している。

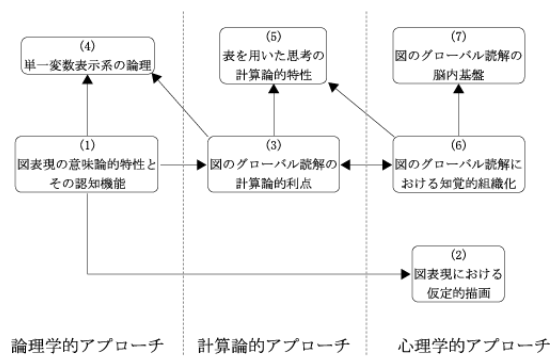


図3：本研究における、各アプローチの成果の連携

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 5 件)

Atsushi Shimojima, Yasuhiro Katagiri, An Eye-Tracking Study of Exploitations of Spatial Constraints in Diagrammatic Reasoning, *Cognitive Science*, 査読あり, Vol. 37, 2013, 211-254, DOI: 10.1111/cogs.12026.

Koji Mineshima, Yuri Sato, Ryo Takemura, Mitsuhiro Okada, Towards Explaining the Cognitive Efficacy of Euler Diagrams in Syllogistic Reasoning: a Relational Perspective, *Journal of Visual Languages and Computing*, 査読あり, Vol. 25, 2014, pp. 156-169, DOI:10.1016/j.jvlc.2013.08.007.

Ryo Takemura, Proof Theory for Reasoning with Euler Diagrams: a Logic Translation and Normalization, *Studia Logica*, 査読あり, Volume 101, 2013, 157-191, DOI: 10.1007/s11225-012-9370-6

Koji Mineshima, Mitsuhiro Okada, and Ryo Takemura, A Diagrammatic Inference System with Euler Circles, *Journal of Logic, Language and Information*, 査読あり, Vol. 21, pp. 365-391, 2012, DOI: 10.1007/s10849-012-9160-6

[学会発表] (計 9 件)

Atsushi Shimojima, Dave-Barker Plummer, The Barwise-Seligman Model of Representation Systems: A Philosophical Explication, T. Dwyer et al. (Eds.): *Diagrams 2014*, LNAI 8578, pp. 233-247. Springer, Heidelberg, 2014.

Ryo Takemura, Atsushi Shimojima, Yasuhiro Katagiri, Logical Investigation of Reasoning with Tables, T. Dwyer et al. (Eds.): *Diagrams 2014*, 査読あり, LNAI 8578, pp. 263-278. Springer, Heidelberg, 2014.

Takeshi Sugio, Neural Mechanism of Global Reading, T. Dwyer et al. (Eds.): *Diagrams 2014*, 査読あり, LNAI 8578, pp. 200-214. Springer, Heidelberg, 2014.

Ryo Takemura, A Heterogeneous Logic with Tables, First International Workshop on Diagrams, Logic and Cognition (DLAC 2013), 2013, Jadavpur University, Kolkata, India.

Atsushi Shimojima, Semantic Uplifting in Graphical Notations: Examples and Cognitive Potentials, Ninth International Conference on Cognitive Science (ICCS 2013), 2013, Kuching, Malaysia.

Atsushi Shimojima, Many Faces of Diagrams: From General Properties to Practical Advantages and Disadvantages. Thirty-Fourth Annual Meeting of the Cognitive Science Society (Cogsci 2012), 2012, Sapporo, Japan.

Ryo Takemura, Atsushi Shimojima, and Yasuhiro Katagiri, A Logical Investigation on Global Reading of Diagrams, P. Cox et al. (Eds.): *Diagrams 2012*, 査読あり, LNAI 7352, pp. 330-333, Springer, Heidelberg, 2012, DOI: 10.1007/978-3-642-31223-6_42

Ryo Takemura, Proof-Theoretical Investigation of Venn Diagrams: a Logic Translation and Free Rides, . Cox et al. (Eds.): *Diagrams 2012*, 査読あり, LNAI 7352, pp. 132-147, Springer, Heidelberg, 2012, DOI: 10.1007/978-3-642-31223-6_17

Takeshi Sugio, Psychological Evidence of Mental Segmentation in Table Reading, Cox et al. (Eds.): *Diagrams 2012*, 査読あり, LNAI 7352, pp. 124-131, Springer, Heidelberg, 2012, DOI: 10.1007/978-3-642-31223-6_16

[産業財産権]

○出願状況 (計 件)

名称：
発明者：
権利者：

種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況（計 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

下嶋 篤 (SHIMOJIMA, Atsushi)
同志社大学・文化情報学部・教授
研究者番号：40303341

(2) 研究分担者

杉尾 武志 (SUGIO, Takeshi)
同志社大学・文化情報学部・准教授
研究者番号：60335205

(3) 研究分担者

片桐 恭弘 (KATAGIRI, Yasuhiro)
公立ほこだて未来大学・複雑系知能学科
研究者番号：60374097

(4) 研究分担者

竹村 亮 (TAKEMURA, Ryo)
日本大学・商学部・助教
研究者番号：70583665