

令和元年6月10日現在

機関番号：10101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K21025

研究課題名(和文) 多次元・多ソート化によるエージェント相互作用の証明論的研究

研究課題名(英文) Proof-theoretic study of multi-agent interaction via many-dimensional and many-sorted logics

研究代表者

佐野 勝彦 (Sano, Katsuhiko)

北海道大学・文学研究科・准教授

研究者番号：20456809

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、人間やエージェントが環境と相互作用しながらどのように知識・信念を形成するのかを、どのような情報が伝わったのか、どのように情報が伝わったのか、の二つの観点から探求した。第一に、エージェント間構造とエージェントの選好が相互作用しながらどう変化するのかを分析する論理的枠組みを提案した。第二に、情報告知の際に誤った信念を抱くことを許す推論システムを提案し、不確実性下での推論を扱うための意味論的枠組みの理論的基盤を整備した。第三に、公開告知行為による信念・知識の変化を扱う論理の既存研究の不備を正した推論システムを提案し、その発想をさらに他の情報告知行為をもつ論理へも応用した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、エージェントの知識・信念・選好の動的変化を扱う動的認識論理(DEL)研究の応用を見据えた際の欠落を補い、エージェントが環境と相互作用しながら知識・信念・選好を形成する側面に、DEL研究では無視されがちであった推論システム(証明論)の観点から厳密な形式化を与えた。本研究の成果は、SNSの論理的分析、通信により協調する複数ロボット制御の論理的基盤、裁判官の非単調な信念変化のモデル化に役立つ。

研究成果の概要(英文)：This research aims to investigate how agents interact with each other to change their beliefs and to obtain new knowledge. In particular, we investigate this question in terms of the following two perspectives: i) what pieces of information do agents receive to revise, say, their knowledge?; ii) how is a piece of information transferred from agents to agents? The research output consists of the following three. Firstly, we propose a logical framework of how agents' reliability structure and agents' preference may interact with each other. Secondly, we also offer a logical framework which allows each of agents to have a misbelief on an interpretation of actions from the outside. Finally, we revised a flaw of the previous study of an epistemic logic with public announcement action to propose a new logical system, and we also apply the idea of the revision to a wide variety of other dynamic logics with informing actions.

研究分野：論理学

キーワード：様相論理 ハイブリッド論理 動的認識論理 証明論 信念と知識の論理 Team 意味論

1. 研究開始当初の背景

情報の量的側面を扱うシャノン流の情報理論に対して、情報が担う質的側面を扱った研究には、大きく分けて、様相論理の可能世界意味論をベースにした (Plaza1989, van Ditmarsch et al. 2008) 等による動的認識論理 (以下 DEL と略) と、(Barwise et al. 1997) によるチャンネル理論がある。前者の中心にあるのは、情報伝達行為は「与えられたモデルをどのように変化させるか」で捉えられるという発想であり、 ϕ と情報伝達があった場合のモデル変化は ϕ でない『可能性』の削除で表現されてきた。一方、後者では、ある情報源から情報が通信路を通じてどのように伝達されるか (情報フロー) が、複数の情報源を束ねる核を考えることで説明される。このように、各々には情報伝達についての 'what' (DEL) と 'how' (チャンネル理論) を明らかにできる利点がある。これまで本研究者は前者の DEL について多次元ハイブリッド論理を道具にエージェントの情報伝達行為を時間・状況に相対化して扱う研究を行い、その一応用として法廷での裁判官の非単調な信念変化を扱う論理を提案してきたが、こういった中で以下のような既存の DEL 研究の問題点が明らかとなってきた。

- (1) 情報告知によるエージェント構造の変化：裁判官からみた証言者の信頼性は証言者の発言内容に依存するため、情報告知がトリガーとなってエージェント構造が変化する枠組も必要となる。
- (2) 不確実性下での推論：裁判官のようなエージェントは常に関連する全ての情報を手に入れられず、不確実な状況から合理的判断を下さねばならず、誤りを犯す可能性を許容する必要がある。
- (3) モデル記述の ad hoc さ：裁判官の信念変化に DEL 研究を応用する際には、まず裁判官の信念を表す世界モデルを与える必要があるが、モデルの与え方が ad hoc になる傾向がある。さらには裁判官がもつ知識・仮定の集合の扱いが二次的となる。

2. 研究の目的

本研究では、人間やエージェントが環境と相互作用しながらどのように知識・信念を形成するのかを、どのような情報が伝わったのか (動的認識論理)、どのように情報が伝わったのか (チャンネル理論)、の二つの観点から探求する。特に、本研究では、エージェント構造・世界構造を同レベルにおく多次元ハイブリッド論理を道具に、情報告知によるエージェント構造と信念の変化の相互作用の形式化・誤解を許す不確実性下での信念・知識の論理について研究する。その際、既存研究とは異なり、上述 (3) の難点を回避する証明論的観点に重点を置く。具体的には、エージェント構造と信念変化の相互作用の形式化、不確実性下の信念・知識の論理、情報伝達行為の証明論的研究、の三つの課題に取り組む。

3. 研究の方法

下記の番号付けは上述の DEL の問題点の番号付けと対応している。

- (1) エージェント構造と信念変化の相互作用の形式化：あるエージェントから見た他エージェントの信頼性構造を考え、信頼性構造の変化がどのようなエージェントの信念変化を引き起こすか、さらには、信念変化がどのような信頼性構造の変化を引き起こすかを様々な型の情報告知行為により形式化する。
- (2) 不確実性下の信念・知識の論理：誤解を許す信念の動的論理を考え、エージェント i からエージェント j へ誤解なく情報が伝達される場合に、 i から j へ通信チャンネルが存在するとみなすことで (小林・東条 2009) のチャンネル概念の基礎づけを行う。また、一つの状況・世界ではなく、それらの集まりの上で論理式を評価する様相論理の Team 意味論 (Väänänen 2008) 上で告知行為を考え、不確実情報下での信念・知識変化を捉える枠組みを与える。
- (3) 情報伝達行為の証明論的研究：(Maffezzoli and Negri 2011) は DEL の一種の公開告知論理 (Plaza1989) へとラベル付き証明体系を与えているが、その体系には不備がある (Balbiani et al. 2012)。この不備を正し DEL の様々なモデル変形操作を扱える統一的枠組みである (van Benthem and Liu 2007) へラベル付き証明体系を与えることを目指す。さらには動的認識論理の情報告知行為に情報フローの観点と相性のよい意味論を与え、情報伝達行為の 'how' の側面の形式化を行う。

4. 研究成果

下記の番号付けは上述の研究の方法の箇所の番号付けと対応している。

- (1) まず、多次元論理の証明論の整備を行った。エージェント間関係付きの認識論理である

Seligman らの Epistemic Logic of Friendship (二次元論理) に未解決問題であった、ヒルベルト流公理系とラベル付き式計算体系を与えた (雑誌論文 [7])。ハイブリッド論理の二つの組み合わせである二次元ハイブリッド論理に式計算体系を与えた (雑誌論文 [14])。こういった整備の上で、エージェント間の信頼性構造が各エージェントのもつ選好にどのように影響をあたえるのか、また、各エージェントがもつ選好がどのように信頼性構造に影響を与えるのかについての業績を挙げた (雑誌論文 [12], 学会発表 [5])。さらには、裁判官が判決に至るプロセスでどのように事件に関わるエージェントの信頼性を変えるのかを論理的に分析した (雑誌論文 [8])。

(2) 雑誌論文 [17] において、告知情報のタイプを許可と命令に絞ったうえで、命令を許可と勘違いする、許可を命令と勘違いする、といった誤解を許す信念の動的論理を提案した。雑誌論文 [17] 中の論理では、命令や許可の解釈についての誤解を正す、さらには誤解するといった行為についても扱える。一つの状況・世界ではなく、それらの集まりの上で論理式を評価する様相論理の Team 意味論については告知行為を扱う基盤となる証明論やモデル理論の整備を行った。雑誌論文 [16] では Team 意味論をもつ命題論理や様相論理のヒルベルト流公理化とラベル付きタブロー計算を構築した。雑誌論文 [1,15] では Team 意味論をもつ様相論理がグラフ構造に対してどれほどの表現力をもつのか (定義可能性) について特徴づけを与えた。

(3) 非古典論理の証明論研究 (雑誌論文 [2,3,6,10,19]) を進める一方で、公開告知論理に対して与えられた (Maffezzoli and Negri 2011) のラベル付き証明体系の不備を修正した (雑誌論文 [20])。さらにこの論文の発想を、他人に知られずに情報告知を可能とする Action Model による動的認識論理の証明論の構築にも活かした (雑誌論文 [18])。雑誌論文 [9] では、DEL の様々なモデル変形操作を扱える統一的枠組み (van Benthem and Liu 2007) へラベル付き証明体系を与えた。さらに (van Benthem and Liu 2007) のモデル変形操作を情報フローの観点から捉えなおし、その変形操作が様相論理のモデル理論で最も基本的とみなされる bounded morphism 概念 (様相論理のモデルの準同型と考えて良い) で捉えられることを明らかにした (雑誌論文 [4])。

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 20 件)

[1] [Katsuhiko Sano](#) and Jonni Virtema, Characterising Modal Definability of Team-Based Logics via the Universal Modality, *Annals of Pure and Applied Logic*, to appear.
doi: 10.1016/j.apal.2019.04.009 (査読有、掲載確定済み)

[2] [Katsuhiko Sano](#) and Minghui Ma, 'Sequent Calculi for Normal Update Logics', In: Khan M., Manuel A. (eds) *Logic and Its Applications. ICLA 2019. Lecture Notes in Computer Science*, vol 11600. Springer, Berlin, Heidelberg, pp.132-143, 2019.
doi: 10.1007/978-3-662-58771-3_13 (査読有)

[3] Youan Su and [Katsuhiko Sano](#), 'Double Negation Translation in Logics for Knowability Paradox', *Proceedings of the 4th Asian Workshop on Philosophical Logic*, pp. 3-15, 2018. (査読有)

[4] Ryo Hatano and [Katsuhiko Sano](#), 'Relation Changers are Bounded Morphisms', *Proceedings of the 4th Asian Workshop on Philosophical Logic*, pp. 138-150, 2018. (査読有)

[5] Giulia Sindoni, [Katsuhiko Sano](#), and John G. Stell, 'Axiomatizing Discrete Spatial Relations', *Relational and Algebraic Methods in Computer Science*, J. Desharnais et al. (Eds.): *RAMiCS 2018, Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 11194, pp. 1-18, 2018.
doi: 978-3-030-02149-8_8 (査読有)

[6] Tadeusz Litak and Dirk Pattinson and [Katsuhiko Sano](#) and Lutz Schroeder, Model Theory and Proof Theory of Coalgebraic Predicate Logic, *Logical Methods in Computer Science*, Volume 14, Issue 1, March 20, 2018.
doi: :10.23638/LMCS-14(1:22)2018 (査読有)

[7] [Katsuhiko Sano](#), 'Axiomatizing Epistemic Logic of Friendship via Tree Sequent Calculus', In: Baltag A., Seligman J., Yamada T. (eds) *Logic, Rationality, and Interaction, LORI 2017, Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 10455, Springer, Berlin, Heidelberg, pp.224-239, 2017.
doi: 10.1007/978-3-662-55665-8_16 (査読有)

[8] Pimolluck Jirakunkanok, [Katsuhiko Sano](#), and Satoshi Tojo, 'Dynamic epistemic logic of belief change in legal judgments', *Artificial Intelligence and Law*, pp.1-49, 2017.

doi: 10.1007/s10506-017-9202-0 (査読有)

[9] Ryo Hatano, [Katsuhiko Sano](#), and Satoshi Tojo, 'Cut Free Labelled Sequent Calculus for Dynamic Logic of Relation Changers', Editors: Yang, Syraya Chin-Mu, Lee, Kok Yong, Ono, Hiroakira (Eds.), *Philosophical Logic: Current Trends in Asia, Proceedings of AWPL-TPLC 2016*, pp.153-180, 2017.

doi: 10.1007/978-981-10-6355-8_8 (査読有)

[10] Sakiko Yamasaki and [Katsuhiko Sano](#), 'Proof-Theoretic Embedding from Visser's Basic Propositional Logic to Modal Logic K4 via Non-labelled Sequent Calculi', Editors: Yang, Syraya Chin-Mu, Lee, Kok Yong, Ono, Hiroakira (Eds.), *Philosophical Logic: Current Trends in Asia, Proceedings of AWPL-TPLC 2016*, pp.233-258, 2017.

doi: 10.1007/978-981-10-6355-8_12 (査読有)

[11] [Katsuhiko Sano](#) and John G. Stell, 'Strong Completeness and the Finite Model Property for Bi-Intuitionistic Stable Tense Logics,' Sujata Ghosh and R. Ramanujam (eds.), *M4M@ICLA 2017, EPTCS 243*, pp.105-121, 2017.

doi: 10.4204/EPTCS.243.8 (査読有)

[12] Sujata Ghosh and [Katsuhiko Sano](#), 'Valuing Others' Opinions: Preference, Belief and Reliability Dynamics', In *Proceedings of the 9th International Conference on Agents and Artificial Intelligence (ICAART 2017)*, Vol. 2, pp. 615-623, 2017.

doi: 10.5220/0006204806150623 (査読有)

[13] Ryo Hatano, [Katsuhiko Sano](#), and Satoshi Tojo, 'Teaching Modal Logic from the Linear Algebraic Viewpoint', *The IfColog Journal of Logics and their Applications (FLAP)*, vol. 4, no. 1, pp. 111-148, 2017.

<http://www.collegepublications.co.uk/downloads/ifcolog00010.pdf> (査読有)

[14] [Katsuhiko Sano](#), 'Seligman-style Internalized Sequent Calculus for Two Dimensional Reasoning', *Proceedings of the Twelfth International Workshop of Logic and Engineering of Natural Language Semantics 12 (LENLS 12)*, pp. 163-172, 2015. (査読有)

[15] [Katsuhiko Sano](#) and Jonni Virtema 'Characterizing Frame Definability in Team Semantics via The Universal Modality', *Logic, Language, Information, and Computation, Lecture Notes in Computer Science, Volume 9160*, pp. 140-155, 2015.

doi: 10.1007/978-3-662-52921-8_24 (査読有)

[16] [Katsuhiko Sano](#) and Jonni Virtema, 'Axiomatizing Propositional Dependence Logics', *24th EACSL Annual Conference on Computer Science Logic (CSL 2015)*, Stephan Kreutzer editor, *Leibniz International Proceedings in Informatics (LIPIcs)*, Schloss Dagstuhl-Leibniz-Zentrum fuer Informatik, pp. 292-307, 2015.

doi: 10.4230/LIPIcs.CSL.2015.292 (査読有)

[17] [Katsuhiko Sano](#) and Satoshi Tojo, 'Dynamic logic for multi-agent (mis-)communication', *Proceedings of The Seventh International Conference on Knowledge and Systems Engineering (KSE 2015)*, IEEE, pp.256-261, 2015.

doi:10.1109/KSE.2015.73 (査読有)

[18] Shoshin Nomura, Hiroakira Ono and [Katsuhiko Sano](#), 'A Cut-free Labelled Sequent Calculus for Dynamic Epistemic Logic', *Logical Foundations of Computer Science, Vol.9537, Lecture Notes in Computer Science*, pp.283-298, 2015.

doi: 10.1007/978-3-319-27683-0_20 (査読有)

[19] Sakiko Yamasaki and [Katsuhiko Sano](#), 'Constructive Embedding from Extensions of Logics of Strict Implication into Modal Logics', *Studia Logica Library*, Yang et al. (Eds): *Structural Analysis of Non-Classical Logics*, pp.223-252, 2015.

doi: 10.1007/978-3-662-48357-2_11 (査読有)

[20] Shoshin Nomura, [Katsuhiko Sano](#) and Satoshi Tojo, 'Revising a Labelled Sequent Calculus for Public Announcement Logic', *Studia Logica Library*, Yang et al. (Eds): *Structural Analysis of Non-Classical Logics*, pp.131-158, 2015.

doi: 10.1007/978-3-662-48357-2_7 (査読有)

〔学会発表〕(計6件)

[1] Katsuhiko Sano, 'Goldblatt-Thomason-style characterization for intuitionistic inquisitive logic', Inquisitive Logic Workshop, University of Amsterdam, Amsterdam, The Netherlands, 26th July 2018.

[2] Katsuhiko Sano, 'Strong Completeness and the Finite Model Property for Bi-Intuitionistic Stable Tense Logics', Second Workshop on Mathematical Logic and its Applications, Kanazawa, Japan, 8th March 2018.

[3] 佐野勝彦, 「数理形態学のための双直観主義様相論理」, 科学基礎論学会 2017年度 総会と講演会, 琉球大学, 沖縄, 2017年6月17日.

[4] 佐野勝彦, 'Analytic Sequent Calculus for Bi-intuitionistic Stable Tense Logic', 第52回MLG数理論理学研究集会, 静岡大学, 静岡, 2017年12月2日.

[5] Katsuhiko Sano, 'On interdependence between belief updates and reliability structures: an approach from two-dimensional hybrid logic,' 4th International Workshop on Philosophy and Logic of Social Reality, Hokkaido University, Sapporo, Japan, 29th October 2016.

[6] Katsuhiko Sano, 'Public Announcements over Neighborhood Modelling of Knowledge and Belief', LORIA-JAIST joint workshop, LORIA, Nancy, France, 11th September 2015.

〔図書〕(計1件)

[1] 菊池 誠編・佐野勝彦・倉橋 太志・薄葉 季路・黒川 英徳・菊池 誠 著 『数学における証明と真理—様相論理と数学基礎論—』 共立出版、2016年, pp.23-96.

〔産業財産権〕

- 出願状況(計0件)
- 取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://k2sn.sakura.ne.jp/>

<https://researchmap.jp/read0113623/>

6. 研究組織

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。