

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 5 日現在

機関番号：12701
 研究種目：基盤研究(C) (一般)
 研究期間：2014～2016
 課題番号：26370446
 研究課題名(和文) Research on the physics of language with particular emphasis on the quantum mechanical properties of syntax
 研究課題名(英文) Research on the physics of language with particular emphasis on the quantum mechanical properties of syntax
 研究代表者
 R・A Martin (MARTIN, Roger Andrew)
 横浜国立大学・大学院環境情報研究院・准教授
 研究者番号：30302342
 交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本科研プロジェクトでは、新たに物理学の手法である行列力学を用いて、自然言語の統語構造で観察される特徴を導出する。最初に、生成文法理論の語彙範疇の素性であるNとVを行列関数に置き換え、名詞や動詞などの語彙範疇を定義し、主要部-補部で用いられる最初の併合を行列乗算に置き換えられ、指定部と語句などの他の併合がテンソル積に置換されることを示し、自然言語に見られる可能な語句の組み合わせ/配列を導き出し、物理学の概念から自然の説明が行えることを示唆した。又、同様に移動の際に観察される連鎖や統語構造のラベルも導かれることを示し、物理学の概念を理論言語学に応用することで、研究を新たな段階に押し進めた。

研究成果の概要(英文)：In this project, we use tools from physics, in particular matrix mechanics, to model syntactic properties of human language. We start with the fundamental assumption that the lexical category features N and V are interpreted as '1' and 'i' respectively. We analyze first-merge (head-complement) as matrix multiplication and elsewhere-merge (specifiers) as a tensor product, arguing that this provides for a natural explanation for the highly limited combinatorial possibilities of human language. We also propose a model of chains as the superposition of two tensor products via matrix addition. Another major result has been the discovery of the Chomsky-Pauli group, which includes all of the major lexical category matrices, interpreted according to the fundamental assumption, and all of the matrices in the Pauli Group. We suggest that this group exhausts the possibilities for linguistic categories (lexical and grammatical categories and their projections).

研究分野：理論言語学

キーワード：生成文法 統語論 併合 語彙のカテゴリー 統語のカテゴリー 行列力学 パウリ行列

1. 研究開始当初の背景

(1) 2000年代に入って、Chomsky が言語構造の産出を司る Language Faculty が言語固有の特徴のみではなく、自然科学の一般の特徴を有し、言語構造の産出の際に行われる操作及び構造にも自然科学の法則が関わると主張し、理論言語学の研究に新たな視点をもたらした。Chomsky はこれらの自然科学の法則及び特徴は第三の要因の一部であると提言し、言語の起源を辿り、言語の探求に生物学的視点を取り入れた生物言語学や脳と言語を実際に結びつけた神経科学の進展を促し、言語構造を産出する際に核となる操作が集合理論に起因する併合 (merge) であることを発見し、研究を大きく前進させた。そして、併合を中心に言語構造を産出する演算にも、数学を含めた自然科学の原理に起因する構造拡大条件 (Extension Condition) や内含条件 (Inclusiveness Condition) が適用されることが判明し、言語の特徴に加え、言語構造を作り出す構造演算・操作にも第三の要因が関わり、Language Faculty を形成することを示した。しかしながら、言語演算に自然科学の法則や特徴が関わることを発見しても、自然法則との具体的な関連性の記述に乏しく、根拠や原因について言及がなく、原理的な説明がなされていない。例えば、言語構造の演算に関係すると言われる最小性原理や最小性探索 (minimal search) に対し、物理法則を始めとした自然法則に基づいた説明が行われていない上に、どのように適用されているかについて研究が進んでいない。又、言語演算で主要な役割を果たしている併合を中心にして、言語の特徴や演算に物理法則や特徴に根差した研究が全く行われていないために、言語演算が物理法則に見られる数学的性質にどう還元できるか全く不明である。以上のことから、第三の要因を解明するには、物理学者との学際研究を進めながら、物理法則及び物理の特徴を基盤にした研究を進める必要性があり、今後の Language Faculty の解明に必須である。

(2) 前回の科研プロジェクトにおいて、幅広い言語事象を取り上げ、従来の分析を進展させながら、物理法則を組み入れ、言語事象に物理学の概念が可能性を示した。例えば、以下に見られる wh 疑問文には、意味役割を与えられる元位置から、wh 疑問文の解釈のために必要とされる文頭の位置に移動すると考えられている。

(i) **Who** did you meet **who**?

この時に解釈のために元位置にある who と先頭位置にある who の間で連鎖 (chain) を組み、脳において意味を司り、Language Faculty と隣接する概念・意図体系 (Conceptual-Intentional System) と言語演算のインターフェースにて、連鎖が解釈される必要があるとされてきた。従来、インターフェースで連鎖が解釈される必要性は論じられてきたが、連鎖の形成について第三の要

因に基づいた説明がなかった。しかしながら、前回の科研プロジェクトにおいて、Uriagereka 教授との共同研究において、「融解」を始め、量子力学と数多くの性質を共有することを示し、連鎖の形成に物理法則が適用されることを示した。このように、言語事象に物理法則が適用する痕跡が見られることを示し、言語構造の産出を司る言語演算に、量子力学の法則から導かれ、自然科学の特徴を共有する研究指針を示し、第三の要因を推し進めた。(1)に示したように、Language Faculty の解明を進めるためには、この種の研究指針に基づいて、理論研究を進展させる必要が強くある。

(3) (2)の研究方針を深め、更に推し進めるために、プロジェクトの最終年度には、共同研究者であるメリーランド大学の Uriagereka 教授を介し、メリーランド大学の物理学科及び数学科の研究者及び院生と学際研究を行うための研究基盤を打ち立てた。加えて、横断的に研究を進めるために、アリゾナ大学の Piattelli-Palmarini 教授やレディング大学の Saddy 教授などとメールを交わし、物理学と言語学を融合した横断研究組織を作り、国際的に大規模な学会を行う方向性で話がまとまった。(1)の流れに基づき、又、(2)のような物理学の見地から言語学の研究が可能になった現在に、学際研究を推進するために研究基盤を養い、世界の最先端の研究者を集めた国際的な研究組織は非常に重要である。

2. 研究の目的

(1) 昨今の生成文法理論が研究指針として推進する第三の要因に基づいて、物理学と言語学の学際研究を進め、言語演算と随伴する操作に自然法則の一端である物理法則が深く結びついていることを示し、物理法則及び概念によって言語事象及び Language Faculty の諸概念を導出し、Language Faculty が自然法則に従い、特徴付けられることを示し、言語の本質の解明に貢献する。

(2) 以前の科研プロジェクトの研究成果である連鎖形成の研究から更に範囲を広げて、物理学の観点に根差した研究を進め、言語演算の核を成す併合や移動現象を説明し、学際的な理論言語学研究の裾野を広め、広範な言語事象及び言語概念を説明するもの研究手法として、学際研究の基盤を確立する。

(3) 本科研プロジェクトだけではなく、広範的な学際研究組織を打ち立て、世界中から関連する最先端の研究者を集め、物理学など関連分野に根差した言語研究の場として、国際学会を企画する。

3. 研究の方法

(1) 理論言語学と物理学の学際研究を推進するために、以前の科研プロジェクトから研究協力者であり第一線で理論言語学の研究で活躍している Uriagereka 教授とバルセロ

ナ自治大学の Gallego 准教授に加えて、物理学を専門するヨハネス・グーテンベルク大学マインツの Orús 准教授及び当時メリーランド大学の院生で現在ペリメーター理論物理学研究所の Michael Jarret 博士研究員二名を加えて、Skype やメールを中心にオンラインで日常的に国際共同研究として、物理学と理論言語学の学際研究を進展させ、併合や移動など統語操作を中心に言語事象の分析を進めた。

(2) 上智大学の福井直樹教授及び東京大学の酒井邦嘉教授が中心となって進める AMED-CREST の研究プロジェクトと協力し、2016年3月4日及び5日に上智大学にて国際シンポジウム First International Symposium on Physics of Language 2016 (POL 2016) を開催した。POL2016 は物理学に根差した理論言語学研究を進める国際研究組織の礎となる国際学会であり、本科研プロジェクトを含め、更なる学際研究を前進させるために研究基盤となる組織の結成に向けて話し合いを行った。この国際学会において、科研プロジェクトに基づく発表を2つ行い、研究成果を公表した。

(3) POL2016 に伴い、来日した Gallego 准教授とレディング大学の Krivochen 研究員によるコロキウムを3月7日に横浜国立大学にて開催し、二人とも理論言語学においてそれぞれの最先端の研究を発表した。加えて、3月11日に同じく横浜国立大学にてサレルノ大学の Vitiello 教授の研究会を開催し、量子力学を中心に脳科学研究の研究成果を発表してもらった。

(4) 2017年1月6日から15日に掛けて、Gallego 准教授の招聘により、バルセロナ自治大学に出向いた。当地では、Uriagereka 教授と Orús 准教授ともに、科研プロジェクトに基づく統語論のセミナーを連日行った。又、Uriagereka 教授と Gallego 准教授と連日打ち合わせを行い、科研プロジェクトの核となる国際共同研究を大きく前進させた。他にも、同大学の Boeckx 教授と Hinzen 教授と面談した。

4. 研究成果

(1) Uriagereka 教授、Gallego 准教授、最初に、行列の概念を用い、言語構造の基礎となる名詞や動詞などの語彙項目 (lexical item) と時制などの機能項目 (functional item) を規定し、言語演算となる入力要素を定義し、範疇素性 (categorial feature) を $N = 1$ 、 $V = i$ と定めた。この定義により、下記の通り、範疇で定めたベクトルを用いて伝統的に Chomsky が定めた語彙項目をそれぞれ決められる

(i) 名詞 $[+N, -V] = [1, -i]$

動詞 $[-N, +V] = [-1, i]$

そして、(i) に定義されたベクトルを用いて、併合と行列を同義に扱える上に、名詞と動詞の非対称性という重要な特徴を導き出した。

(ii) $\{_{VP} \{_{NP} N, N\}, V\} =$

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -i \end{pmatrix}$$

上記のように、言語演算の基本を成す head-complement の外的併合を行列乗法によって定義した。加えて、語句の外的併合をテンソル積によって定められることを示し、パウリ行列 (Pauli matrices) で同等に扱うことが可能になり、統語操作の根本を成す併合に数学要素が観察されることを説明した。又、統語構造を形成する際に最初の演算として、同一併合を行う必要性を示し、併合において片方の統語項目 (syntactic item) が併合の結果に出来た統語構成素 (syntactic object) の範疇になると言う非対称性を導き出した。このように行列が複数の語彙項目から成る統語構成素の範疇 (= ラベル) を自然に決定することを示し、語彙項目の組み合わせが限定されている事実や言語構造の特性である指定部 (specifier) がテンソル積が示す対称性を有する事実を導出した。加えて、移動を行列に基づいて定義することにより、連鎖がヒルベルト空間を形成することを導いた。このように自然言語の性質を自然科学の数学法則に帰し、自然科学の概念により、自然言語及び言語演算を規定し、Chomsky が推進する第三の要因に基づいて、自然言語を特徴付け、今後につながる物理法則を基にした研究につなげる基盤を作り出した。

(2) POL2016 の開催を通じて、物理学・数学・言語学だけではなく、脳科学・生物言語学という幅広い分野に基づいて、言語の起源・言語演算・言語の多様性・統語上の法則など多種多様な項目を扱う研究発表が集まり、自然言語の言語演算及び特徴の理解が大幅に深まった。又、世界的に第一線の研究者を様々な分野から集めることにより、国際共同研究を学際的に進める基盤を築くことが可能になり、今後の学際研究の道を開いた。又、科研プロジェクトの研究発表を二つ行うことにより、質疑応答などを通じて行列統語論の基礎や関連する言語事象について、他の発表者聴衆を含め、広範な意見をもらい、科研プロジェクトの研究内容が大幅に進展させられた。又、学会の前後に発表者を中心とした会合を開催し、科研プロジェクトの内容について活発な議論を行って、各分野の知見に基づいて貴重な意見をもらい、科研プロジェクトの内容を大幅に前進させ、プロジェクトの方向性を確かなものにした。国際学際共同研究の一端として、大成功を収めた。

(3) Gallego 准教授と Krivochen 研究員による発表は、言語の特徴について統一的な説明を試みるものであり、本研究プロジェクトが根差す自然科学の法則によって自然言語の演算の説明に結びつくものであった。又、Vitiello 教授の講演会は量子力学と関連す

る脳科学の研究成果を幅広く扱い、言語演算や自然言語の特徴を検討する際にも大変有意義なものであった。研究会の前後において、三名と科研プロジェクトの内容について、十二分な情報交換を行い、興味深い学術情報の提供を受けることができ、科研プロジェクトに関係する知見を深め、更なる進展につながるものであった。

(4) 最初に、Uriagereka 教授と Orús 准教授と行った統語論セミナーにて本科研プロジェクトの核を成す行列統語論を概観し説明することにより、研究成果をまとめ、セミナーを受けた院生を中心とした研究者から貴重なコメントを受けた。加えて、共同研究者と連日行った研究の打ち合わせを通じて、科研プロジェクトの最終段階に向けて、研究内容を詰め、それぞれの研究項目を精査し、更に本研究プロジェクトが扱っている行列の概念が他の言語事象や言語概念に適用できるか、詳細に議論した。加えて、今後の研究プロジェクトの方向性について、話し合いを行うことができた。最後に、Boeckx 教授と Hinzen 教授に本科研プロジェクトの内容について、脳科学の視点に基づいた示唆深い意見をもらい、科研プロジェクトに組み入れられ、研究プロジェクトがより広範的なものになった。今回の出張により、言語演算に見られる様々な法則が行列統語論だけではなく、物理法則や物理学の概念に帰せられる可能性について論じることができ、今後の研究プロジェクトの深化に結びついた。

(5) 本研究プロジェクトは個々の言語演算及び操作の特徴を行列から導き出し、自然言語の基礎的な概念に数学的性質が見られることに対して統一的に説明を与えた点で、学際的研究として大きな成果をあげた。又、POL2016 で創出した研究組織を基に、アメリカ・スペイン・ドイツ・カナダ・日本から成る国際共同研究を核として、研究対象とする言語演算・言語概念及び言語事象の範囲を広げ、更に研究プロジェクトの成果を基に量子力学など物理法則を用いて、説明汎用力を広げられるよう研究基盤を築けたことは将来に大いにつながるものである。

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)

[学会発表] (計 4 件)

① Juan Uriagereka, Roger Martin, Ángel Gallego, “Language Combinatorics as Matrix Mechanics: Conceptual and Empirical Bases,” *First International Symposium on the Physics of Language* (POL2106), Sophia University, 2016/03/05.

② Juan Uriagereka, Roger Martin, Román Orús, “Elements of Matrix Syntax,” *CLT Lecture Series*, Autonomous University of Barcelona (Spain), 2017/01/09–11.

[その他]

ホームページ等

<http://www.ling.ynu.ac.jp/pol2016/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

R · A MARTIN (MARTIN, Roger Andrew)
横浜国立大学・環境情報研究院・准教授
研究者番号：30302342

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

Juan Uriagereka (URIAGEREKA, Juan)
Román Orús (ORÚS, Román)
Michael Jarret (JARRET, Michael)
Ángel Gallego (GALLEGO, Ángel)