

Science Journal K A G A K U

科学

別刷

石巻純才19回

岩 波 書 店

石原純をたずねて

第 19 回

留学中・留学後の 相対論研究

西尾成子 (日本大学名誉教授, 科学史)
にしお しげこ



2年間のヨーロッパ留学を終えて1914年5月はじめに帰国した石原純は、5月23日付けで東北帝国大学教授に任命され、物理学第四講座を担当した(図1)、『東北大学五十年史』によると、彼は直ちに相対論の連続講義を2週間行い、9月の新学期からは、電磁場論を含む物理学各論(二年)、物理学演習(三年)、理論物理学研究(三年)、電子論(三年)の講義を担当した(本連載第14回(1月号)参照)。

留学前の研究

石原は当時の留学生の多くとは違って、留学前にすでに相対論、金属電子論、量子論といった先端的な研究を行い、それぞれ世界的水準の業績をあげていた。彼は留学先で同様のテーマの研究をすすめ、帰国後もその延長線上に研究を発展させて1915年には量子論の一般化という歴史に残る研究と、彼の相対論研究の頂点ともいえる特殊相対論の一般化、重力の理論を発表した。

これから留学中・留学後の石原の相対論研究を

たどっていくつもりであるが、その前に彼の留学前の研究について簡単に復習しておこう。石原は、陸軍砲工学校在職中(1908~11年)に10編、1911年に東北帝国大学に転任してから4編、計14編の論文を書いている。大部分は『東京数学物理学会記事』Proc. Tokyo Math. Phys. Soc. に発表された。14編のうち11編が相対論関係、2編が金属電子論の研究、1編が光量子論の大論文で、この量子論研究は、創刊されたばかりの『東北帝国大学理科報告』Sci. Repts. Tohoku Univ. に載った。また、相対論関係のうちの1編は『東北数学雑誌』Tohoku Math. J. に、1編は180頁に及ぶ相対論の総説でシュタルクの総説誌『放射能および電子学年報』Jahrbuch d. Rad. u. Elekt. に掲載された。アインシュタインがラウプ宛の手紙で、石原から送られた運動物体における電気力学に関する論文を高く評価していたことが知られている⁽¹⁾。シュタルク年報に載った石原の論文は、パウリの『相対性理論』に引用されている⁽²⁾。金属電子論の研究も、ボーアの研究と並んで正当に評価された⁽³⁾(本連載第13回(2007年11月号)参照)。

図1——石原の

留学中の研究

石原はヨーロッパに渡って光化学反応の論文である。理論が3編、9月、ナーレン・デ・ブロー、『放射能および電子学年報』Jahrbuch d. Rad. u. Elekt. に掲載された。留学して間もなく重力の研究をしているように、1915年からアインシュタインの

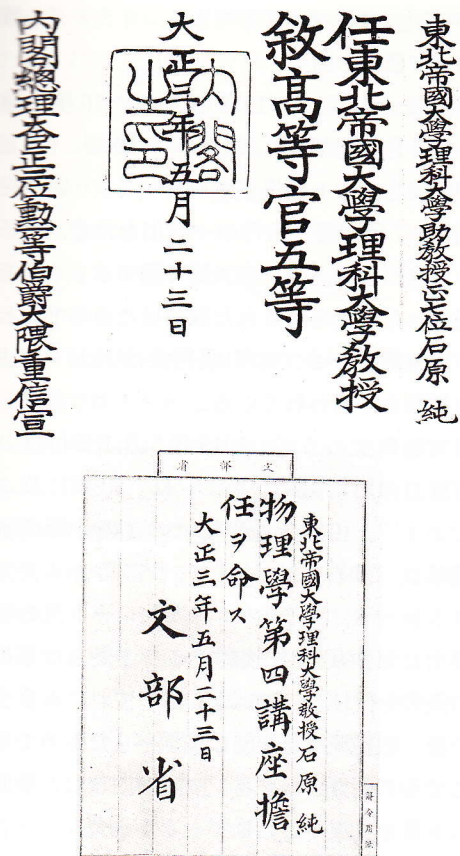


図1——石原の東北帝大教授辞令。

留学中の研究

石原はヨーロッパで9編の論文を書いている⁽⁴⁾。ミュンヘンを去るときに投稿した光量子論にもとづく光化学反応の研究を除いてすべて相対論関係の論文である。そのうち特殊相対論が5編、重力理論が3編。9編のうち6編はドイツの雑誌:『アーレン・デア・フィジク』Ann. d. Phys. に1編、『放射能および電子学年報』に1編、『フィジカリッシェ・ツァイトシュリフト』Phys.ZS. に4編、残る3編のうち1編(重力理論)は『東北数学雑誌』, 2編(特殊相対論)は『東北帝大理科報告』に掲載されている。

留学して間もなく石原は、特殊相対論の一般化、すなわち重力の理論に関心を向けた。よく知られているように、一般相対論はアインシュタインが1915年から16年のはじめにかけて完成させた。アインシュタインの1905年の相対論は、互いに

等速直線運動をしている系に限られていたのが特殊相対論といわれるが、それを加速度系に一般化した理論が一般相対論あるいは重力場の理論である。重力場の理論にアインシュタインが踏み込んだのは1907年であった。その際彼が基礎においたのは、一様な加速度のある系と万有引力のある慣性系とがそこで生ずる物理現象に関して同等であるということ(等価原理)、つまり慣性質量と重力質量の同等性、であった。このとき彼は一様な加速度をもつ系における空間と時間についての定性的な考察から、太陽面上の光源から発せられるスペクトル線は地上の光源からのものより波長がわずかに赤の方にずれること(赤方偏移)、光線が重力場によって曲げられること、を示した。1911年にはその理論を精密化して、エネルギーはその慣性質量に正確に等しい重力質量をもつことを示し、さらに太陽のそばを通過する恒星からの光がどれだけ曲がるか算定した。

他方このころから、ほかにも重力の理論を試みる人たちが現れ、アインシュタインとの論争が起こった。なかでもアブラハムは1912年の一連の論文で、光速の重力ポテンシャルへの依存を基礎に、等価原理を考慮しないで、重力理論を提出した。それに対してアインシュタインは等価原理をもとにする立場から反論を加えた。アブラハムは運動方程式のローレンツ不変性を放棄するにたつた。少し遅れて、ノルドストレームは光速を一定を保持し、重力質量の変化を与えることにより、相対論の一般化を試みた。1913年9月にウィーンで開かれたドイツ自然科学者医学者大会でアインシュタインはノルドストレームに好意的な講演をした(石原はこの会に出席したと思われる: 前回参照)。同じ年のおわりにアインシュタインはグロスマンの協力をえて、重力場における運動方程式を与えた。

石原は、このように相対論の一般化の試みがまだ混乱した状況にあるとき、この中に参入したのである⁽⁵⁾。彼の最初の重力理論は、アブラハムの立場にたつて、電磁気学の基礎方程式から重力テンソルについてのアブラハムの式を導き⁽⁴⁾⁻⁽ⁱⁱⁱ⁾,

その4次元定式化を試みたものであった^{(4)-(iv)}。彼は等価原理に疑問をもっていたのである。石原が1913年7月にアインシュタインのもとで、エーレンフェスト夫妻、ノルドストレームと会っていることは前回述べた。留学中の特殊相対論関係の論文をみると、彼の関心は、重力理論の研究を視野に入れた、最小作用の原理にたつ相対論の定式化と相対論の基礎の検討にあったことがわかる^{(4)-(iii), -(v)~(viii)}。1914年はじめにロンドンで書かれた、相対論的電磁気学的重力理論の基礎についての論文は、無限小ローレンツ変換の正当性、光速の重力ポテンシャル依存性、最小作用の原理、を基本仮定として展開された理論である^{(4)-(ix)}。これらの研究は、留学後の研究も合わせて、のちに書かれた石原の相対論の解説書、たとえば彼の代表的な著書『相対性理論』(岩波書店、1921)ではもはや省みられていない。しかし、1915年のはじめにこうした一連の重力理論の試みをまとめたクレッチマンの論文には、アインシュタイン、アブラハム、ノルドストレームとならんで石原の名があげられている⁽⁶⁾。科学史家パイエンソンも、当時重力理論を試みた人としてアブラハム、ヘルグロッツ、ラウエ、ボルン、ノルドストレームとともに石原の名をあげている⁽⁷⁾。

帰国後の研究

先に述べたように、アインシュタインはその後1915年に、重力場の方程式をえることに成功し、そこで水星の近日点移動も示した。これらは15年のいくつかの小論文で発表され、16年に『アナーレン』論文にまとめられたのであるが、石原はそれを知らなかった。彼が帰国して約2カ月後には第1次世界大戦が勃発し、そのためにヨーロッパとくにドイツとの研究上の交流が途絶え、ドイツの科学雑誌はほとんど入手できなかったのである。石原は14年の中頃までのヨーロッパでの研究の動向をもとに、重力理論の研究をすすめていく以外になかった。彼がアインシュタインの一般相対論の原論文を直接読んだのは戦後(1918

年)のことと思われる(イギリス、オランダの雑誌を通じて概略を知っていたが)⁽⁸⁾。

帰国後の石原には1918年までに16編の論文がある。『東京数物学会記事』に10編、『東北帝大理科報告』に6編掲載されている。9編が相対論関係、7編が量子条件の一般化を含む、原子構造とスペクトル、エックス線に関するものである。印刷された形で発表された論文はこの年で終わるが、東京数物学会での口頭発表は1920年4月4日の年会まで行われている。

相対論研究のうち、1915年5月1日付けの論文「重力の相対論について」は、50頁に及ぶ力作である⁽⁹⁾。1914年前半までのこの分野の研究を概観し、アインシュタイン、アブラハム、ノルドストレーム、ミー(ノルドストレーム流の考えを提出した)の研究を検討することからはじめ、その優劣を付けるのではなく、いずれにも妥当な線で統一的な理論を展開しようとしたものである。ここでもアインシュタイン一人が固執した等価原理の本質を見抜くことはできなかった。

続いて、上の論文への補遺(15年12月2日付け、電子の運動に関連して電磁気的力をいくらか変更したもの)⁽¹⁰⁾、「物理的世界の5次元多様体について」(12月6日付け)は電磁場と重力場を統一的に扱い5次元多様体内の10成分ベクトルで表すというノルドストレームの理論を体系的に展開する試みである⁽¹¹⁾。「トールマンの相似の原理と重力の法則について」(12月21日付け)では、14~15年に『フィジカル・レビュー』に載ったトールマンの一連の研究を自分の理論とノルドストレームの理論から検討する⁽¹²⁾。「重力場における電子の変形と単位系の重力ポテンシャルへの依存性」(16年1月15日付け)⁽¹³⁾、『数物学会記事誌』に載った「電子の電磁質量に対する表式の修正」(15年10月16日数物学会常会で発表)⁽¹⁴⁾、同じく重力理論と絶対単位に関する論文(16年4月3日数物学会年会で発表)⁽¹⁵⁾は互いに関連している。これら一連の論文はほとんどノルドストレームの理論に関わっており、ノルドストレームにひかれていることがわかる。この時期フィンラン

ドのノルドストレーム
ったことにもよるの
ー・ポテンシャルの
シュタインの新理論
知ってはいたが、
ないまま書かれた。
変化は考えたが特
えようとしなかつ
で成功した水星の
分の理論ではえら
さも重力ポテンシ
入して、アインシ
る近日点の移動角
戦後1919年5
結果は、アインシ
を通過する恒星
のであった。そ
ンシュタインと
られた。およそ
説者として登場

ヨーロッパを
の大連作とし
ララギ』誌上に
仙台の歌は19
巻10号(1915
の夏」と題す
る：“わが頭脳
の伸べいたに
鋼鉄のうへの
ひそまれる実

文献と注

- (1) 1910年、9回に引用係論文をい力(elektroでこの問題唯一のもについてなる。実際最初の論文、石

ランダの雑誌

に16編の論文

0編、『東北帝

る。9編が相対

を含む、原子構

するものである。

この年で終わる

は1920年4月4

1日付けの論

50頁に及ぶ力

の分野の研究

ブラハム、ノル

ーム流の考え

とからはじめ、

ずれにも妥当な

したものである。

固執した等価原

った。

年12月2日付

的力をいくらか

の5次元多様体

場と重力場を統

成分ベクトルで

論を体系的に展

ンの‘相似の原

21日付け)では、

ュー』に載った

理論とノルドス

「重力場におけ

ンシャルへの依

「数物学会記事

対する表式の一

で発表)⁽¹⁴⁾、

る論文(16年4

互いに関連して

どノルドストレ

ドストレームに

時期フィンラン

ドのノルドストレームが研究の主な交信相手であったことにもよるのだろう。最後の論文「スカラー・ポテンシャルの重力の相対論」⁽¹⁶⁾も、アインシュタインの新理論の概略と主な結果を間接的に知ってはいたが、その論文を手にするのができないまま書かれた。これまでと同様に、光速の変化は考えたが特殊相対論の時空構造に変更を加えようとしなかった。アインシュタインの新理論で成功した水星の近日点移動についての修正を自分の理論ではえられないことがわかり、時間も長さも重力ポテンシャルに依存するという仮定を導入して、アインシュタインの式と近似的に一致する近日点の移動角の式をえている。

戦後1919年5月末にみられた皆既日食の観測結果は、アインシュタインの予想した太陽のそばを通過する恒星からの光線の曲がりを検証するものであった。それが公表されると(11月)、アインシュタインと相対論は世界中に熱狂的にむかえられた。およそ2年後、石原は相対論の優れた解説者として登場する。

* *

ヨーロッパを題材にした石原の歌は、いくつかの大連作として1916年から18年にかけて『アララギ』誌上に掲載された(前回参照)。帰国後の仙台の歌は1915年から現れる。『アララギ』第8巻10号(1915年10月1日発行)にある「実験室の夏」と題する歌8首から、はじめの3首をあげる：“わが頭脳^{あたま}おもたげに垂る、真夏の陽厚き鉛の伸べいたに照る”，“夏の日^かは実験室は寂しかり、鋼鉄^{はがね}のうへの面錆^{おもさび}をみる”，“微かなる音^{かす}も厭^{いと}はし、ひそまれる実験室を響かしぬれば”。

文献と注

- (1) 1910年11月のラウプ(J. Laub)宛の手紙：本連載第9回に引用したが、“最近、ある日本人から相対論関係論文をいくつか受け取った。そのうちの一つは動電力(elektromotorische Kraft)に関するもので、これまでこの問題に関して書かれたうちで疑わしい点のない唯一のものだと私は思う。εとμの値が一定の物質についてならば、彼の結果は正しいと思う”と書いている。実際アインシュタイン-ラウプの電磁力に関する最初の論文では、アブラハム、ボルン、ノルドストレーム、石原、ジルバーシュタインなどの研究がたどら

れている：バイエンゾン『若きアインシュタイン』(坂垣良一他訳、共立出版、1988)287頁

- (2) 第5版の邦訳(内山龍雄訳、講談社、1974)。原書初版は1921年、数学百科全書の1項目として書かれたもので、そのときまでになされた相対論研究が網羅されているはずであるが、日本の雑誌に発表されたものは引用されていない。したがって日本人の名前は石原のみ。日本の雑誌はヨーロッパではまだ余り読まれていなかったことがわかる。石原のシュタルク年報論文と留学中に書いた『アナレーン』Ann. d. Phys. 論文が引用されている。
 - (3) D. Enskog, Ann. d. Phys., 38(1912)p. 731：廣川俊吉「石原純——その物理学研究を中心に」『科学』50巻12号(1980年12月)p. 768
 - (4) 前2回(第17, 18回)に、すべての論文をあげてはいるが、それらを以下にまとめておく：
 - (i) “Das photochemische Gesetz und die molekulare Theorie der Strahlung”, Phys. ZS., 13(1912)pp. 1142~1151(ミュンヘン, 1912年9月4日)
 - (ii) “Zur Theorie der Gravitation”, Phys. ZS., 13(1912)pp. 1189~1193, “Berichtigung”, Ibid., 14(1913)p. 128(ベルリン, 1912年10月24日)
 - (iii) “Über den Zusammenhang der Formeln für die Massen mit den Raumzeit-auffassungen”, Phys. ZS., 14(1913)pp. 26~29(ベルリン, 1912年11月23日)
 - (iv) “Die neue Gravitationstheorie in Vierdimensionalvektoriellen Darstellungen”, Tohoku Math. J., 3(1913)pp. 9~14(ベルリン, 1912年12月7日)
 - (v) “Zur Diskussion der Relativitätstheorie”, Sci. Repts. Tohoku Univ., 2(1913)pp. 149~161(ベルリン, 1913年1月)
 - (vi) “Über das Prinzip der kleinsten Wirkung in der Elektrodynamik bewegter ponderabler Körper”, Ann. d. Phys., 42(1913)pp. 986~1000(チューリヒ, 1913年7月15日)
 - (vii) “Die elektronentheoretische Begründung der Elektrodynamik bewegter Körper”, Jahrbuch d. Rad. u. Elekt., 11(1914)pp. 167~186(ロンドン, 1913年12月)
 - (viii) “Die elektronentheoretische Begründung der Elektrodynamik bewegter Körper”, Sci. Repts. Tohoku Univ., 3(1914)pp. 65~100(場所, 日付, 記載なし)
 - (ix) “Grundlagen einer relativistischen elektromagnetischen Gravitationstheorie I. II”, Phys. ZS., 15(1914)pp. 294~290, pp. 506~510(ロンドン, 1914年2月8日, 3月1日)
- なお、これまで、たとえば第9回に、留学中の研究は8編としてきたが、シュタルク年報の論文(vii)を見落としていた。安孫子誠也氏のご教示。
- (5) 石原は桑木宛のはがきに書いている(第17回参照)：アインシュタインの11年の理論をどう思うか(ミュンヘン, 12年6月8日付け)、アインシュタインとアブラハムの理論がなんとなく将来の発展を待っているように思われる、アブラハムは相対論にすっかり反対になってしまった(ベルリン, 10月22日付け)、と。

- (6) E. Kretschmann, Ann. d. Phys., 48(1915)p. 907: 廣川俊吉, 前掲書(3)
- (7) パイエンソン『若きアインシュタイン』(板垣良一他訳, 共立出版, 1988)116頁
- (8) フィンランドのノルドストレームとの論文交換はなされていた: 石原「カスタニーの蔭」『アララギ』第9巻6号(1916年6月発行)
このとき国内で相対論に関して立入った議論ができたのは, 九州帝大の桑木瑛雄であった: 石原から桑木宛の手紙が, 1915年に集中して5通ある。数学科の小倉金之助も話し相手になったと思われる。哲学的問題に関しては, 科学概論の田辺元も話し相手になった。
- (9) “Zur relativistischen Theorie der Gravitation”, Sci. Repts. Tohoku Univ., 4(1915)pp. 111~160. この前に14年10月付けの特殊相対論の論文がある: “Zur relativistischen Dynamik”, Sci. Repts. Tohoku Univ., 3(1914)pp. 321~335
- (10) “Nachtrag zu meiner Abhandlung: ‘Zur relativistischen Theorie der Gravitation’”, Ibid., 4(1915)pp. 407~411
- (11) “Über die fünffache Mannigfaltigkeit der physikalischen Welt”, Sci. Repts. Tohoku Univ., 5(1916)pp. 1~32
- (12) “Über Tolman’s ‘Prinzip der Ähnlichkeit’ und das Gravitationsgesetz”, Ibid., 5(1916)pp. 33~43
- (13) “Über eine Formänderung des Elektrons im Gravitationsfeld und die Abhängigkeit der Masseinheiten vom Gravitationspotential”, Ibid., 5(1916)pp. 45~52
- (14) “Eine Revision des Ausdrucks für die elektromagnetische Masse des Elektrons”, Proc. Tokyo Math. Phys. Soc., 8(1916)pp. 362~367
- (15) “Die Unmöglichkeit des absoluten Masssystems als eine Folgerung aus der neuen relativistischen Gravitationstheorie”, Ibid., 8(1916)pp. 431~436
- (16) “Eine relativistische Theorie der Gravitation von skalaren Potential”, Ibid., 9(1918)pp. 326~341

