

# 平成29年度 共同利用研究報告書

平成 30 年 4 月 20 日

九州大学 マス・フォア・インダストリ研究所長 殿

所属・職名 (一社) ドレスト光子研究起点・理事

提案者 氏名 佐久間弘文 (さくまひろふみ)

下記の通り共同研究の報告をいたします。 記

		※整理番号	20170007	
1.研究計画題目				
2.種別 (○で囲む)	a. 研究集会 I	b. 研究集会 II	c. 短期共同研究	d. 短期研究員
3.研究代表者	氏名	佐久間弘文 (さくまひろふみ)		
	所属 部局名	(一社) ドレスト光子研究起点	職名	理事
	連絡先			
	e-mail		TEL	
4.研究実施期間	平成 30 年 3 月 7 日 (水曜日) ~ 平成 30 年 3 月 8 日 (木曜日)			

5.参加者数・参加者リスト (\*別紙「共同利用研究報告書作成上の注意」参照)

(a,b は参加者数のみ記入し, 集会参加者リストを添付. c. の非公開プログラム参加者と d. は参加者リストに記入. c. は公開プログラムを含めた全参加者数を記入し, 公開プログラム参加者リストを添付.)

参加者数: 24 人

参加者リスト (a,b は記入不要, c. は非公開プログラム参加者, d. は共同研究参加者を記入)

氏名	所属	職名	氏名	所属	職名

6.本研究で得られた成果の概要

ドレスト光子 (DP) の応用技術開発が加速される中、その理論的基礎付けは未だ手つかずの状態である。その状況を打破するために、基礎理論構築に向けての数理研究を本格的に開始した。Neumann による「量子力学の数学的基礎付け」が出版されて半世紀以上の時が経つが、殆どの応用研究に使われる理論は有限自由度系に基づくものである。しかし、現実の多くの系は無限自由度系を成していて、ドレスト光子の理論がこれまで未完成であったその根本理由もそこにある。光に関する古典と量子場理論の間にも深刻なギャップがあるにも関わらずこれまで放置されて来た理由もそこから生まれている。そこで、無限自由度系の理論である Micro-Macro duality Scheme の観点で、DP という応用上重要な問題を考えて見た時にどのような視界が開けるかという点に焦点し、この問題を具体化する為に必要な新たな概念である電磁波に関する Clebsch duality を導入し研究を進めた。主な成果として、この DP 問題は、数理物理学上重要な、ゲージ場理論、群の誘導表現、BCS 超伝導理論、相対論的 Higgs 機構、熱・統計力学、ハドロンの Regge 軌道、負のエネルギー問題等のテーマに共通する特質を有し、それは数論における大テーマであるリーマン予想に関するゼータ関数とも密接な関係にあるという見通しが得られた。

ドレスト光子の関連技術推進の為の基礎的数理研究  
Basic mathematical researches aiming at better understanding of  
dressed photons and related technology

日時： 2018年3月7日(水) 12:50 ~ 3月8日(木) 16:15  
場所： 〒819-0395 福岡市西区元岡744 九州大学 伊都キャンパス  
ウエスト1号館 D棟4階 IMI コンファレンスルーム (W1-D-414)

**【プログラム】**

**1日目 (3月7日・水)**

12:50 ~ 13:00

Opening remarks by H. Sakuma (RODreP) : 佐久間弘文 (ドレスト光子研究起点)  
開会の挨拶

13:00 ~ 13:45

Keynote talk [I] by M. Ohtsu (Univ. Tokyo & RODreP) : 大津元一 (東京大学、ドレスト光子研究起点)  
Dressed photon: Its generic applications and expectation to novel theoretical studies  
ドレスト光子、その包括的応用と理論研究の待望

13:45 ~ 14:30

Oral presentation by N. Tate (Kyushu Univ.) : 豎直也 (九州大学)  
Application of dressed photons to high-efficiency wavelength conversion  
ドレスト光子とその高効率波長変換への応用

14:30 ~ 15:15

Oral presentation by H. Sakuma (RODreP) : 佐久間弘文 (ドレスト光子研究起点)  
Tentative attempt on forming a physical picture of Clebsch dual field as a model of  
dressed photons  
クレブシュ双対場は如何にしてドレスト光子を記述するのか? 現時点での試案

15:15 ~ 15:45 休憩

15:45 ~ 16:30

Oral presentation by A. Ishikawa (Univ. Yamanashi) : 石川陽 (山梨大学)  
Nonequilibrium quantum nanodynamics by the interplay of photons, excitons, and phonons  
光子-励起子-フォノンのインタープレイによる非平衡量子ナノダイナミクス

16:30 ~ 17:15

Oral presentation by I. Banno (Univ. Yamanashi) : 坂野斎 (山梨大学)  
Response theory as a basis for dressed photon: Non-linear susceptibility operators and  
electromagnetic potential under a non-resonant condition  
ドレスト光子を基礎づける応答理論: 非共鳴条件下の非線形感受率演算子と  
電磁ポテンシャル

17:15 ~ 18:00

Oral presentation by S. Sangu (Ricoh Co. LTD.): 三宮俊 (株式会社リコー)

Behavior of dressed photons as high-excited states (Numerical simulation analysis)  
高励起状態としてのドレスト光子の振る舞い (数値シミュレーション解析)

## 2日目 (3月8日・木)

10:00 ~ 10:45

Oral presentation by Y. Fukumoto\* & T. Thai (Kyushu Univ.): 福本康秀、金良兵 (九州大学)

Friction induced instability of a shallow-water flow and over-reflection of waves  
底の抵抗が引き起す浅水流の不安定性と波の過剰反射

10:45 ~ 11:30

Oral presentation by M. Yamamoto (Univ. Tokyo): 山本昌宏 (東京大学)

Inverse problems in optical transports related to radiative transport equation  
光の輸送現象に関する逆問題: 輻射輸送方程式を中心として

11:30 ~ 12:15

Oral presentation by T. Yabuki (Rakuno Gakuen Univ.): 矢吹哲夫 (酪農学園大学)

Finite-size corrections to the excitation energy transfer (EET) in a massless scalar interaction model  
光合成色素集団の励起エネルギー伝達への量子論的有限サイズ効果の考察・解析

12:15 ~ 13:30 昼休み

13:30 ~ 14:15

Keynote talk [III] by I. Ojima (RODreP): 小嶋泉 (ドレスト光子研究起点)

Paradox in emergences from Micro to Macro  
マクロ化創発のパラドックス

14:15 ~ 15:00

Oral presentation by H. Ochiai (Kyushu Univ.): 落合啓之 (九州大学)

An overview on Deligne exceptional series  
Deligne の例外系列の紹介

15:00 ~ 15:45

Oral presentation by K. Okamura (Nagoya Univ.): 岡村和弥 (名古屋大学)

Modeling dressed photons via measurement theory  
測定理論によるドレスト光子のモデリング

15:45 ~ (16:15)

Wrap up discussions: 総合討論

## ドレスト光子の関連技術推進の為の基礎的数理研究

### 研究成果の概要

ドレスト光子 (DP) の応用技術開発が加速される中、その理論的基礎付けは未だ手つかずの状態である。その状況を打破するために、基礎理論構築に向けての数理研究を本格的に開始した。Neumann による「量子力学の数学的基礎付け」が出版されて半世紀以上の時が経つが、殆どの応用研究に使われる理論は有限自由度系に基づくものである。しかし、現実の多くの系は無限自由度系を成していて、ドレスト光子の理論がこれまで未完成であったその根本理由もそこにある。光に関する古典と量子場理論の間にも深刻なギャップがあるにも関わらずこれまで放置されて来た理由もそこから生まれている。そこで、無限自由度系の理論である Micro-Macro duality Scheme の観点で、DP という応用上重要な問題を考えて見た時にどのような視界が開けるかという点に焦点し、この問題を具体化する為に必要な新たな概念である電磁波に関する Clebsch duality を導入し研究を進めた。主な成果として、この DP 問題は、数理物理学上重要な、ゲージ場理論、群の誘導表現、BCS 超伝導理論、相対論的 Higgs 機構、熱・統計力学、ハドロンの Regge 軌道、負のエネルギー問題等のテーマに共通する特質を有し、それは数論における大テーマであるリーマン予想に関するゼータ函数とも密接な関係にあるという見通しが得られた。

### 1. 共同研究提案の背景及び研究推進の為の基本的方針

光に関する一般的な意味での「光学」は、大きく分類すると、光の既知の性質を利用して物質との相互作用において応用上有益な様々なものを引き出す事を目指した「光を利用する研究」と、そもそも光とは何かを理解する為の「光そのものに関する研究」の二つに分類される。後者に関しては、19世紀のファラデーやマックスウェル等による古典電磁気学や20世紀中頃の量子電磁気学の確立によって、応用研究を目指す工学のみならず、物理学の分野でさえ“光はすでに理解できたもの”という認識が科学界の常識の様になっていて、その為に現代の光学の圧倒的な主流は光そのものを研究する事に終止符を打ち、「光を利用する研究」にのみ焦点しているという現状がある。

本共同研究のテーマであるドレスト光子(物質場との相互作用エネルギーを身に纏った光子、以下 DP と略記)は、以上の様な光科学界の光に関する常識を打破する歩みとして(例えば、入射光の回折限界以下にも物質の周りには極度に局在する形で“小さな光”が存在するという常識破り)、研究計画組織委員の一人である大津によってかなり前から徐々に実験的アプローチを中心にして研究されたものであり、1990年代頃から近接場光として応用物理学界にも認知されるようになった。常識破りという点について少し補足すると、上記の回折限界に関するものに加えて、「電子のボーア周波数以下の周波数の光を用いて、電子を励起することはできない」や間接遷移型半導体に関する学界に深く浸透していた誤謬「シリコン結晶を用いてレーザーや発光ダイオードを作ることにはできない」等があったが、近年の DP に関する応用研究は、その全ての“常識”が

実は誤謬であった事を明確に示す歩みとなり、現在では、例えば入射光の波長以下の寸法の物質の形を見る事や加工する技術、波長以下の寸法のデバイスを構成する技術や、シリコン結晶を用いてレーザーや発光ダイオードを作る等、様々な分野で DP を活用する技術開発に拍車がかかっている。DP 技術の将来性を見越して、ここ 10 年程の間で大津が行った多くの企業との活動の概略図を次頁の図 1 に示す。

この様に、これまでも DP 技術開発研究という大きな枠組みの中で、試行錯誤を繰り返しつつ研究がなされて来たが、今改めて九大 IMI との共同研究という形で更なる研究の推進を行おうとする理由は、これまでの多くの実験的知見の蓄えを通して、何故 DP はこれまでの既存の理論では捉える事が困難であったのか、その根本的理由が明らかになりつつあるという状況が現れたという事である。現在多くの応用研究が推進されている状況下にあって、未だ解明されていない DP の理論的基礎に関する知見を深める事は、今後の応用研究の為に重要である事は明らかである。物理学において「場」の概念の重要性が認識されたのはかなり以前ではあるが、「場」の相互作用という研究テーマは、現代物理学においても中核的なものであると言える。これまでの光の理論は、

日立、東芝、富士通、日立マクセル、リコー、パイオニア、コニカミノルタオプト、セイコーインスツル、Vテクノロジー、NHK、フジクラ、ウシオ電機、小糸製作所、ソディックLED、大日本印刷、京セラ、三菱化学、浜松ホトニクス、日亜化学工業

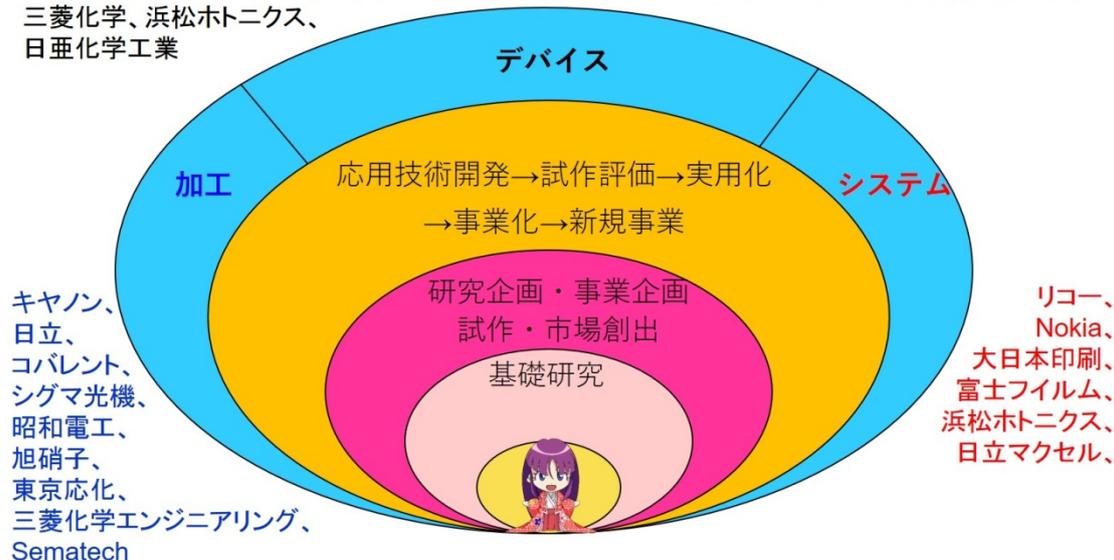


図 1 : 産学連携によるこれまでの DP 技術開発の実績

素粒子論の用語を用いれば、on-shell と呼ばれる自由場的な状態の光から始め、その自由場的な場が物質場と相互作用する過程を比較的低い近似で求めるというものである。相互作用が強い場合は、一般に着目するものと“その環境”をはっきりと識別する事が困難になり、そこに量子場特有の場の不確定性が絡み、状態は 20 世紀物理学を代表する様な世間的にも良く知られた Einstein の  $E=mc^2$  を一般化したエネルギーと運動量が明確な分散関係に従う on-shell 的状态では記述不可能な off-shell 的状态になる。

自由場的な光と異なり、DP は必ず物質場との相互作用によって生じ、かつ、エネルギー源としての入射光の持つ振動数と波数とはかなりかけ離れた波数領域に空間的に極度に局在化された構造を持って現れるという事実は、DP が off-shell 的な光である事を意味する。しかしながら、これまでの物理・化学界の常識によれば、off-shell 的な見方が重要になるのは原子核以下のスケールのみで、DP が持つ特徴的なスケールであるナノメートルの領域では on-shell 的記述で十分であるという事になる。本共同研究の提案は、この常識的見解に挑戦する為の数理的研究を DP という具体的なテーマを設定して行おうとするものである。

この目的を遂行するに当たっての数理研究においては、二つの大きな切り口に着目して、それを発展的に調べる事を本研究テーマの中核とした。その一つは、現時点での多くの専門書で説明されている古典的電磁場理論と量子電磁気学の間には大きな齟齬が存在するという点である。どの様な齟齬であるのかという事を一言で述べると、量子電磁気学においては電磁波の縦波は不定計量に基づく性質により非物理モードとしてその存在が排除されているが、古典論的には縦波と密接に関係するモードは電磁相互作用で大切な役割を担う Coulomb モードとして存在する立派な物理モードであるという齟齬である。実は、この問題は（一部の数理研究者を除く多くの物理学者の間には未だ浸透していない）無限自由度系の数理に関する Ojima の Micro-Macro Duality Scheme (MMDS) によりその齟齬が如何に克服されるかの核心部分は既に示されている。しかし、世に広く浸透している有限自由度系のみで成立する議論を（本当は無限自由度系である）現実のシステムへ無自覚に適用して多くの混乱が生み出されている現状が未だ根強く存在するので、この問題をより具体的な DP という産業界にとっても重要な応用研究テーマに繋げてこの問題を再考し、議論を精緻化して行く事は、数理研究を現実的な産業の問題解決に役立てるという IMI の基本方針に良く適うものと思われるので今回このテーマを提案した次第である。第二の切り口としては、量子場理論の基礎を与える数理的結論の一つとして、エネルギー・運動量空間での相互作用の記述には、timelike 並びに lightlike な support のみならず、spacelike な support も必要であるという論理的帰結に関するものである。その様な数理的結論は存在するが、研究提案者が知る限りにおいて、DP が絡む力学をはじめとする多くの物理理論において、spacelike 4 momentum の具体的な役割に触れた研究はこれまでに皆無であると思われる。この spacelike 4 momentum の問題を上述の MMDS と如何にリンクさせるのかという点で Sakuma により新たに導入された数理モデルが電磁波に関する Clebsch dual (CD) 場で、それは本共同研究が目指す DP を切り口とした“off-shell 科学”を推進するという現時点の研究活動における一つの「核」となるテーマと見做される為、2017 年度においては、この二つの要素を中心に、これまでの実験及び理論研究を再考する形で研究が進められた。

## 2. 年間の研究活動の概略：三系列の活動

具体的には DP をテーマとしながら、同時にその研究をナノスケール領域に対する新たな“off-shell 科学”の創造へと繋げるといった目的の為に、研究活動をその性質上三系列に分け、其々が IMI との共同研究とリンクする様に全体を調整しながら研究を進めた。活動の中核になるものは、系列 1 の研究提案者が所属するドレスト光子研究起点 (RODREP) での活動である。RODREP においては、2016 年度から組織の立ち上げの準備段階として、DP に関する内部勉強を開始しており、IMI との共同研究が開始された 2017 年度においては、その拡張として若手研究者への研究支援制度を導入して、年数回のセミナー形式の内部勉強会を発足させ、そこで DP 研究及びそれに関する色々な可能性を、時には外部からのゲストを交えて議論した。またその様な純粋な研究活動と並行する形で、ドレスト光子の基礎研究並びに応用技術の重要性を発信するために 2017 年、11 月には IMI との共催で民間企業の技術者を主な対象とする RODREP 設立記念シンポジウムを開催した。

系列 2 としては、IMI との直接的連携を進めた。具体的には、1 節で触れた CD 場はその導入の経緯において流体力学における Hamiltonian 構造が関わっており、またそれを電磁場理論へ拡張する数理には、共形変換群に関わる知見が必須であるために、IMI の福本、落合両氏にはそれぞれ、この二つの分野に関わる研究者として共同研究に参画して頂いた。系列 3 としては、MMDS に関わるマイクロ世界が起因するマクロ世界の創発で、ここで重要となる視点は、観測可能なマクロ世界からマイクロ世界を眺めた時、その創発は数学的には逆問題として扱われるべきものであるという事である。既に述べた様に、有限自由度系の理論に留まるこれまでの主流派の見方は、このマイクロとマクロ世界との相互作用を取り扱う事はできない。最終的には、全ての物理理論の正当性は実験により検証されるべきものなので、その様な意味において、この逆問題的視点は、理論モデルの構築とその検証という文脈の中で重要な役割を果たす観測理論とも密接に関わる新たな分野であると推測される。この問題は特に萌芽的色彩が強く、初期の段階でその具体的な方向性を示す事は難しいが、以上の様な視点を念頭に置き、逆問題で豊富な経験を持つ東大の山本氏にも共同研究に参画して頂いた。以上の三系列の研究を推進し、2018 年の 3 月には、その成果を発表する 2 日間のワークショップを IMI で開催して、共同研究の締め括りとした。

## 3. IMI での成果発表の概要：その 1

一年の研究活動を総括するワークショップでは、本共同研究推進の意義を含め、DP 研究の歴史および現状、並びにその方向性についての keynote speech を二つ行う事を企画して、研究全般についての keynote speech 1 (KP1) では DP 研究のパイオニアである RODREP の代表理事である大津元一氏に講演を依頼し、off-shell 科学推進の数理研究を keynote speech 2 (KP2) として、これについては顧問の小嶋泉氏に講演をお願い

いた。その他の口頭発表については、(1) DP に直接関わる研究；(2) DP の周辺テーマに関する研究；(3) 数理的側面に特化した研究の三つの subsection に分けて発表が行われたが、本研究提案に関するメインテーマは、keynote speech 2 と研究代表者が進める CD 場に関するものなので、以下においては、成果発表の概要をその 1 とその 2 に分け、その 1 では、二つの keynote speech と CD に関するもの、その 2 では、それ以外の発表の概要を記述する。

(i) KP1 は、「ドレスト光子、その包括的応用と理論研究の待望」というタイトルで行われた。科学の発展を振り返ってみると、その当時は正しいとされていた知見が、後には誤りである事が証明された事例は少なくはない。光に関係するその様な事例として、既に 1 節で触れた、①光の回折限界、②ボアの周波数条件、③間接遷移型半導体の三つを例にとり、科学の“誤謬”に終止符を打った DP の実験結果が紹介され、その様な背景で今新たな理論研究が待望されているとの発信があった。その次には、これまでの光とは大きく異なるナノスケールという小さな空間領域に局在する“止まった”光としての DP の特性が説明され、既存の理論の枠組みでは記述不可能である事が指摘された。しかし、これまでの研究の歩みの中から、理論構築にむけての基本的方向性も生まれつつある事も事実で、それは、素粒子論の場の相互作用の記述において重要な概念である off-shell 的な見方で DP を理解するというものであるという事が力説された。講演の後半においては、現在進行形で進んでいる応用技術のブレークスルーとして、①光の波長以下の寸法の物質の形を見る、加工する、②光の波長以下の寸法のデバイスを構成する、③シリコン結晶を用いてレーザーや発光ダイオードを作る、の 3 例が紹介された。

(ii) KP2 は「マクロ化創発のパラドックス」というタイトルで、無限自由度系量子場理論における力学系の理解とは如何なるものかという視点を与える MMDS により DP を考えた場合、そこから“off-shell 科学”に関してどの様な広い観点が生まれ得るのかという事が示された。量子スケールにおける非可換性がプランク定数をゼロに近づける古典極限で物理量は可換となるというのが、常識的「量子古典対応」の理解ではあるが、無限自由度系においては、有限自由度系には無い「マクロ化創発の過程」が起こり得て、そこでは元々ミクロレベルでは存在しなかった物理変数が、マクロレベルにおいて物理的な自由度として現れることが起きる。不定計量に起因する確率解釈の困難の為に、ミクロレベルでは「非物理モード」として排除される縦波光子が、マクロ世界における電荷間のポテンシャルを記述する物理量としての Coulomb モードに「化ける」という事が、光の場合の「マクロ化創発の過程」として捉えるべきものであり、本発表においては、問題を起こした「不定計量」はどうなったのかという問いを「マクロ化創発のパラドックス」というテーマの基に投げかけて、この問題が多くの数理学（ゲージ理論、群の誘導表現）や BCS 超伝導理論や相対論的 Higgs 機構等の物理学（熱力・統計力学、ハドロンの Regge 軌道、本研究テーマである DP）上の重要なテーマと関わっている

見直しに関する説明が行われた。

まず、この「不定計量」が如何にして姿を消し、その代わりに何が現れて来たのかという事を、i) ゲージ場理論としての量子電磁場理論と、ii) Lie 群  $G$  が非コンパクトかつ半単純なら既約有限次元表現は不定計量を持つという状況下において、 $G$  の極大コンパクト部分群  $H$  の表現から定まる  $G$  の誘導表現は、無限次元正定値 Hilbert 空間上に実現される、という二つの例を取り、前者に対しては不定計量の心配のない古典的凝縮モードとしての縦波 Coulomb モード、後者に関しても不定計量を持たない Wigner 回転というものがあるという事が説明された。その後で、見かけ上は大きく異なる、熱・統計力学、ハドロンの Regge 軌道、DP の仕組み全てに共通すると予想される特質に関する説明も付け加えられた。特に、回転群  $H=SU(2)$  のユニタリー表現から定まる Lorentz 群  $G=SL(2,C)$  の誘導表現を考え、それを定義する無限次元線形空間を考えると、 $G/H$  の Wigner 回転に付随する水平リフト  $G \leftarrow G/H$  を使えば、誘導表現の定義域  $G$  は  $G/H$  上に移すことができ、無限次元線形空間の元が保型形式となる事が示せる。保型形式は、Mellin 変換によってゼータ函数に移るので、対称空間  $G/H$  を持つ  $(G, H)$  の対は数論的テーマと繋がることになる事が示された。従って、この対称空間上に定義された適切な保型形式を同定できれば、DP が生み出す非自明な動的諸現象は、それによって記述できるであろうことが示された。すなわち、DP の力学が思いもかけずに数論における大テーマであるゼータ函数に繋がる事になる。

(iii) CD 場について：1 節で触れたキーワードの一つである off-shell 概念が DP という具体的テーマの中で如何なる形で現れるのかと言えば、それは場の相互作用を担う仮想粒子（光を扱う議論では仮想光子）という形で関係すると言える。既に述べた様に、電磁相互作用において中心的役割を担う力場は Coulomb 場で、それは“先端的な”量子電磁気学においては非物理モードとして排除されている電磁場の縦波モードと深く関係している。従って学問分野の縦割的な構造によって「古典」と「量子」「業界」の間に分断的に散在する既存の知見をどう整合的に繋ぐかという事が本研究の第一着手点で、今年度はそれに関する研究に焦点し、本報告の末尾に記載した発表論文の一つ（論文番号 [1]）でその成果を報告した。

良く知られている様に、古典電磁場の数理的側面は、Maxwell により統一され、その後、Heaviside によりベクトル解析的な視点をもってその表現が洗練された。その時点では、交代テンソル場として表現される電磁場  $F^{\mu\nu}$  の 4 元ベクトルポテンシャル  $A^\mu$  は、物理量ではなく表現の記述に便利な数学的補助場と見做された。しかし、この認識は、量子力学におけるゲージ場理論が登場すると大きく変わり、実験的にも外村等による AB 効果の検証で Heaviside の見解は大きく修正された。ベクトル解析の帰結から得られる良く知られた知見に、任意のベクトルは、あるスカラーの勾配によって表わされる非回転的な部分と発散がゼロになる回転的な部分の和として表現できるという Helmholtz の分解定理がある。この定理の視点から AB 効果の検証の議論を眺めると、

そこで物理的に重要になるのは回転的な部分で、非回転的な部分については何も語っていない事がわかる。上記の論文 (1) では、ゲージ固定条件に直接的にリンクする非回転部分が、これまでに古典電磁気学の分野で報告されている電磁場の縦波モードと、あるいはまた、無限自由度から起因する複数のセクター分類空間を持つ量子系の理論であるマイクロ・マクロ双対スキームの帰結として導かれる凝縮されて古典モードとして振る舞う縦波モードやスカラー光子モードとどの様に整合的に結び付くかを示した。

この整合的な縦波やスカラーモードの解釈によりスカラー量  $\partial_\mu A^\mu$  も数学的な補助量ではなく、それ自体物理量として見做し得る事がわかり、更には、その量をヌル測地線の運動学的記述に「渦」構造を導入できる Clebsch parameterization の手法を用いて、新たに定義される4元の電磁場ポテンシャル  $U^\mu$  に結び付ければ、それは既存の  $A^\mu$  に対する Proca 方程式と時間・空間的な意味において双対となる“spacelike”な電磁場となる事が示される。この様にして、DP 研究において重要となる①電磁相互作用における仮想光子 (Coulomb モードと密接な関係にある縦波モード) を記述する新たなモデルという側面と、②相互作用における spacelike な 4-momentum を表現する為の“基底”的なものという側面がある CD 双対場導入の為の物理的意義付けに必要な数理的研究を大きく進展させた。また、spacelike なエネルギー・運動量は必然的に負のエネルギーを意味するので、数学的には CD 場を量子化した Dirac 場も自然に考える事ができ、その場合かつて Dirac が提唱したものの真空は電荷を持たないという事実で否定された“Dirac の海”の概念が、CD モデルにより電荷を持たない“負のエネルギーの海”として蘇る可能性もあり、その場合は、(ii) の議論で DP の力学が思いもかけずに数論の大テーマであるゼータ函数に結び付いた様に、CD 理論は宇宙論の大きなテーマである dark energy と結びつく可能性がある事を指摘した。

#### 4. IMI での成果発表の概要：その2

##### (1) DP に直接関わる研究

(iv) 次世代光制御・光変調デバイスの開発を推進している「九大堅ラボ」の堅直也氏から、実験研究における先端的トピックとして、DP を介したエネルギー移動テクノロジーの重要な応用例が紹介された。太陽電池は可視光域の光エネルギーを電気エネルギーへと変換するものであるが、DP を利用すると、デバイスの感度波長域外 (紫外、赤外域) の光エネルギーを可視域の光エネルギーへと高効率で変換できる事が報告された。

(v) これまで DP の理論モデル構築に深く関わって来た山梨大学の小林研究室から石川氏に参加して頂き、光子と励起子の相互作用、およびフォノン環境と非平衡開放系の量子ナノダイナミクスに関する最近の研究成果が報告された。

(vi) 山梨大学の坂野氏は、近接場光や DP のこれまでの研究を簡単にレビューし、主に応答理論の見地からの研究の現状に関する説明を行った。特に、Near Field Optics (NFO) と Far Field Optics (FFO) の違いは、入射縦電場の存在の違いをもたらす事

や、この違いは共鳴条件下では現れない為に、非共鳴条件が NFO にとって重要である事を説明し、これから向かうべき研究の方向性を「展望」として議論した。

(vii) リコーの三宮氏からは、主にシミュレーション研究に関わって来た視点から、DP の局在性の描像に関してのこれまでの理論およびその限界についての説明と、最近新たに着手した、量子ウォーク的なモデルに取り組んでいる現状に関する報告が成された。

## (2) DP の周辺テーマに関する研究

(viii) CD 場の持つ spacelike な特性を反映して、この場の存在は負のエネルギー場の存在と密接な関係をもっている。電磁場とは直接関係はないが、負のエネルギーモードに関わる over-reflection と呼ばれる興味深いテーマが流体力学においても存在するという事が IMI の福本氏によって紹介された。

(ix) 東大数理で産学連携を推進している山本氏から、逆問題とは何かという事を中心にして、複数の事例紹介が行われた。また、経験的知見としての「逆問題 6 つのポイント」が提示され、例えば、順問題が難しい場合は逆問題がやさしくなるという事が言えて、カオスの逆問題は容易という指摘があった一方、逆問題は、そもそも「直接見えないものを利用可能なデータで決定する」という“本来無理”な話であるので安易に考えるてはいけない問題であるとの説明があった。すぐ上で述べた、「直接見えないものを利用可能なデータで決定する」という事は、本共同研究のテーマの中核にある見えないミクロから見えるマクロが創発する過程と酷似するものなので、この問題をどう具体化するのかが今後の大きな課題であるという事を再認識した。

(x) 酪農学園大学の矢吹氏からは、光合成における植物の励起エネルギー伝達メカニズムを量子解析により解明する研究の紹介が行われた。光合成によるエネルギー伝達は非常に高い事が知られているが、そのメカニズムは未解明のままである。本共同研究の文脈から見ると、フェルミの黄金律に基づく標準的な解析では、Coulomb 力による共鳴エネルギーからの寄与しか着目していないが、実際には、仮想光子による共鳴エネルギー外でのエネルギー伝達への寄与があると推測されるので、そこへと向かう研究の歩みが紹介された。

## (3) 数理的側面に特化した研究

(xi) 本共同研究におけるテーマである CD 場の理解という観点で、twistor が spinor の共形拡張として出て来る様に、U(1) ゲージ場として働く電磁場を考えて、それを共形拡大したらどの様なものが出るのかという、問題意識を持って、群とその表現を研究している IMI の落合氏からは、Lie 群がどの様に分類されているのかという知見の紹介と共に、Lie 代数に基づく Freudenthal magic square と Deligne の例外系列の話題提供があった。

(xii) 名古屋大の岡村氏からは、代数的量子・作用素環論に基づく量子測定理論とはどの様なものであるかという解説が、理論の中におけるインストルメントの定義やその

統計的意味を含めて行われた。また観測理論は、有限自由度系ではほぼ完成しているが、無限自由度系では未完成との事。特に相互作用の渦中に発生する DP の測定理論は挑戦的課題であり、セクター理論に基づいた量子電磁場の新解析法を目指したいとの表明があった。

## 5. 年間を通じての対外発表活動

- ★ IMI との共同研究成果である旨が謝辞に書かれている国際誌（以下のリストの[1]）
- ★ High Impact Factor の国際誌（以下のリストの[12], HIF=11）

### [1] 原著論文

- [1] H. Sakuma, I. Ojima, and M. Ohtsu, “Gauge symmetry breaking and emergence of Clebsch-dual electromagnetic field as a model of dressed photons,” Appl. Phys.A (2017) 123:750.
- [2] H.Saigo, I. Ojima, and M. Ohtsu, “Dressed photons from the viewpoint of photon localization: the entrance to the off-shell science,” Appl. Phys.A (2017) 123:724.
- [3] J.H. Kim, T. Kawazoe, and M.Ohtsu, "Dependences of emission intensity of Si light-emitting diodes on dressed-photon—phonon-assisted annealing conditions,” Appl. Phys.A (2017) 123:606.

### [2] 国際会議講演

- [4] B. Thubthimthong, T. Kawazoe, and M. Ohtsu, “Spectral Analysis of a High-Power Infrared Silicon Light Emitting Diode of Dressed Photons,” Abstracts of the OSA Laser Congress: Advanced Solid State Laser Conference, October 1 – 5, 2017, Nagoya, Japan, paper number JTh2A
- [5] H. Sakuma, I. Ojima, and M. Ohtsu, “Novel Attempt in Formulating a Theory of Near-field Optics Beyond the Framework of On-shell Dynamics”, Abstracts of the 24<sup>th</sup> Congress of the International Commission for Optics, August 21-25, 2017, Tokyo, Japan, paper number W1H.
- [6] H. Sakuma, I. Ojima, and M. Ohtsu, “Novel View Towards Gauge Condition as a Conceptual Basis of Dressed Photons”, Abstracts of the 11<sup>th</sup> Asia-Pacific Conference on Near-Field Optics, July 10-13, 2017 , Tainan, Taiwan, p.32.
- [7] I. Banno and M. Ohtsu, “Irrationality of the Permittivity in Non-resonant Near-field Optics”, Abstracts of the 11<sup>th</sup> Asia-Pacific Conference on Near-Field Optics, July 10-13, 2017, Tainan, Taiwan, p.35.
- [8] M. Ohtsu, “New Routes to Future Studies of Dressed Photons”, Abstracts of the 11<sup>th</sup> Asia-Pacific Conference on Near-Field Optics, July 10-13, 2017 , Tainan, Taiwan, p.37.

### [Plenary Presentation]

- [9] M. Ohtsu, I. Ojima, and H. Saigo, “Who Has Seen A Free Photon? ---From Mathematical Physics to Light-Matter Fusion Technologies---“, Abstracts of the 11<sup>th</sup> Asia-Pacific Conference on Near-Field Optics, July 10-13, 2017, Tainan, Taiwan, p.54.
- [10] J.H. Kim, T. Kawazoe, and M. Ohtsu, “The study on the principle of light emission of Si LED using dressed-photon-phonon”, Abstracts of the 11<sup>th</sup> Asia-Pacific Conference on Near-Field Optics, July 10-13, 2017, Tainan, Taiwan, p.55.
- [11] I. Banno and M. Ohtsu, “The Nonlinear Response Theory for Near-field Optics and Application to Non-resonant Effect”, Abstracts of the 11<sup>th</sup> Asia-Pacific Conference on Near-Field Optics, July 10-13, 2017, Tainan, Taiwan, p.62.

### [3] 解説論文

- [12] H.Sakuma, I. Ojima and M. Ohtsu, “Dressed photons in a new paradigm of off-shell quantum fields,” Progress in Quantum Electronics Vol.55, September 2017, pp.74-87.
- [13] 大津元一、「複雑系としてのドレスト光子とその応用」、レーザー研究、第45巻、第3号、2017年3月、pp. 139-143.

### [4] 著書

- [14]大津元一、「これからの光学」、朝倉書店、東京、2017年10月（167ページ）
- [15] M. Ohtsu and T. Yatsui (ed.), Progress in Nanophotonics 4, Springer, Heidelberg, January 2017 (146 pages).

### [5] 国内会議講演

- [16] B. Thubthimthong, T. Kawazoe, and M. Ohtsu, “Spectral Analysis of a High-Power Infrared Silicon Light Emitting Diode,” 第78回応用物理学会秋季学術講演会予稿集(福岡、2017年9月)、講演番号7a-A405-4 (p.133)
- [17] 川添忠、杉浦聡、橋本和信、大津元一、「高出力ホモ接合シリコンレーザーの作製(2)」、第78回応用物理学会秋季学術講演会予稿集(福岡、2017年9月)、講演番号7a-A405-5】
- [18] 坂野斎、大津元一、「近接場光学における非線形共鳴効果の理論Ⅱ:非線形応答理論によるドレスト光子の基礎づけの試み」、第78回応用物理学会秋季学術講演会予稿集(福岡、2017年9月)、講演番号7a-A405-9
- [19] 佐久間弘文、小嶋泉、大津元一、「仮想光子としてのドレスト光子理解に向けての新たな試み」、第78回応用物理学会秋季学術講演会予稿集(福岡、2017年9月)、講演番号7a-A405-10