

目次

- ・ 2024年関西支部総会・新年会のご報告……中部主敬 (pp.2-4)
- ・ series ものづくり出前講義 (2) 「ミニ風車」つくり……藤川卓爾 (pp.5-9)
- ・ series 研究最前線 (12) スピンの基礎方程式……瀬波大土 (pp.10-15)

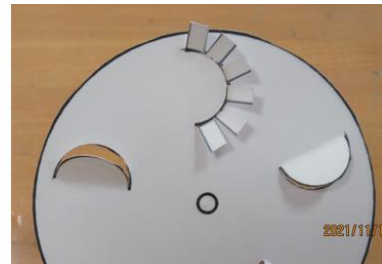
下の写真はものづくり出前講義で作る「ミニ風車」の製作手順です。
 この風車を使って発電し、LEDランプを灯すことができるでしょうか？
 詳しくは、『ものづくり出前講義 (2) 「ミニ風車」つくり』をお読みください。
 数々の工夫と苦勞と失敗と喜びを、読者の皆さんもきっと追体験できると思います。



翼を円板に差し込む



翼の端部を切り込む



翼の端部を折り込む



翼端部をセロテープで貼り付け、両面テープで端板を貼り付ける



天板に押しピンを貼り付け、ストローを差し込み先端部を切り込んでセロテープで貼る

2024 年度関西支部総会・新年会のご報告

関西支部長 中部主敬（S56/1981卒）

2024年1月21日（日）の午後3時からホテルグランヴィア大阪 20階にて関西支部の総会・新年会を開催しました。昨年は「新型コロナ」の2類相当から5類への移行以前でしたが、会場側の感染対策に沿ったリアル開催を基本として講演会のみリアル+オンラインの併設としました。オンラインは広く参加いただける利便性が捨てがたく、今年も講演会ではリアルとの併設にしました。リアルのみ総会・新年会はアクリル板の間仕切りも取り払われ、気兼ねなく談じ、杯を酌み交わしました。感染対策は心して、個々人に委ねられたかたちです。

さて、総会に先立つ講演会では澄川貴志さん（H8/1996 卒：京都大学エネルギー科学研究科教授）の司会で、新宅博文さん（H14/2002 卒：京都大学医生物学研究所教授）が「機械工学と1細胞オミクス解析」と題し、マイクロ・ナノスケールの物理に基づく生物工学的手法によって生命の最小単位である細胞の動態を解明する1細胞生物学を紹介され、その学問分野における機械工学の役割について講演されました。



講演会（新宅教授）

総会は小森一事務局長（H12/2000 卒）の司会で開会し、筆者が支部長として挨拶した後、関西支部の活動報告、具体的には運営委員会・幹事会、産学懇話会、異業種交流会、同窓会企画（京大卒業後10年目および20年目の同期会）、若手会、支部活性化企画、京機カフェ（京都あそ歩、新規事業・イ



総会の様子

ノベーションを考える会、テニスカフェ、文楽鑑賞会、お笑い観劇会、ゴルフカフェ)からの報告がありました。また、会計報告と仲田摩智監事(S54/1979卒)による会計監査の報告がありました。続いて、新役員の選出(支部規約に従った総会における唯一の議決案件)が行われ、以下のとおり決しました。

支部長：中部主敬(前出)

副支部長：横川隆司(H12/2000卒)、澄川貴志(前出)、
久保田修司(S62/1987卒)、長崎達夫(H61/1986卒)、
水口 誠(S57/1982卒)、小森 一(前出)

また、その他の新役員として、

事務局長：吉永光宏(H5/1993卒)

事務次長：八十 格(H5/1993卒)

監事：仲田摩智(前出)

顧問：鴻野雄一郎(S44/1969卒)、成宮 明(S48/1973卒)

が紹介されました。次に、司会が吉永光宏新事務局長(前出)に交替し、支部幹事会で議論してきた新年度の活動計画ならびに予算が紹介され、総会を終えました。

毎年恒例となったKART(学生フォーミュラ)からの報告が行われた後、仕切り板の無い待望のリアル新年会へと移行です。今回は講演会の始めから千々木亨京機会会長(S54/1979卒)に臨席を賜るとともに、「お酒文化とものづくりを考える会」として石川県の銘酒を差し入れていただきました。この日本酒は元旦の能登半島地震で被災された石川県の方々を応援する意味も込め、日本最高峰の杜氏として知られ、また、現代の名工にも選ばれた農口尚彦氏が日本酒の新しい境地を目指して発表されたお酒、とのことでした。乾杯のご発声は参加者中の最高齢であられた小澤三敏さん(S33/1958卒：元京機会会長)に頂戴しました。恒例のデジタル福引大会ではレググリフ、宇宙食セット、cp対称性の破れトートバック、阪神タイガースのリーグ優勝「あれ(A.R.E.)」と38年ぶり日本一に輝いた記念ピンバ



フィナーレ(琵琶湖周航の歌)

タッチ対など、趣向を凝らした景品が準備され、歓談の場が一層盛り上がりました。そして、全員で「琵琶湖周航の歌」を斉唱し、次回の再会を誓い合いながら散会しました。



集合写真

補足情報 =====

◆参加人数と参加費

- ・ 講演会、総会、学生フォーミュラ報告会@名庭の間
(リアル+オンライン 74 名) : 無料
- ・ 新年会@鳳凰の間 (リアルのみ 71 名) :
 - 2012 年以前学部卒業の会員 10,000 円
 - 2013 年以降学部卒業の会員 7,000 円
 - 学生・大学院生 3,000 円
 - 会員ご家族、2023 年 4 月新入社員の会員 無料

ものづくり出前講義 (2) 「ミニ風車」づくり

藤川卓爾 (S42/1967 卒)

京機会九州支部で最初に出前授業に行った長崎県立諫早高校では「温泉バイナリー発電装置」と「エネルギーのはなし」の二つの講演のあと、「ものづくり」実習で「ミニ風車」を作りました。先方からは「リニアモーターカー」を要請されましたが、これと「コイルモーター」については次回に書きます。

「ミニ風車」を最初に作ったのは、長崎総合科学大学勤務時の長崎市のエコセミナーでした。ここではシニア世代を対象にして「自然エネルギー利用拡大」をテーマに2コマを担当しました。筆者は大学の校舎の屋上に垂直軸型小型風車を設置して風力発電の実用化について研究していました。セミナーの1コマ目の講演でこの風車のことを話したので、2コマ目では「ものづくり」の実習でこの風車をモデルにした「ミニ風車」を作りました。



垂直軸型小型風車



エコセミナーでの「ミニ風車」づくり



「ミニ風車」

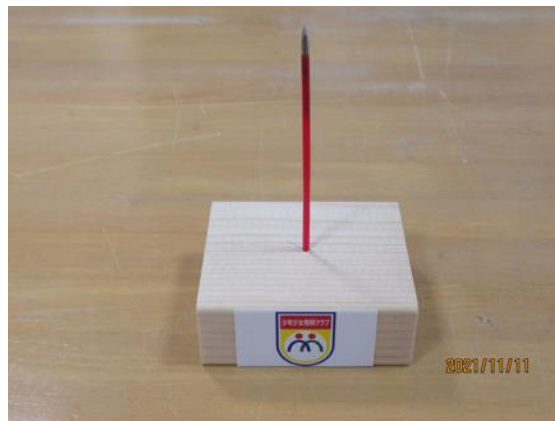


「ミニ風車」の静止部分と回転部分

「ミニ風車」の一番のポイントは翼車の支持方法です。支柱（心棒）に五寸釘を使用して、五寸釘の先端に翼車を載せます。翼車側には釘の先端に当たるところに押しピンの頭を貼り付けて、支持部が金属同士の点接触になるようにしています。これによって回転抵抗トルクが小さくなり、息を吹きかけるだけで回ります。ここに超小型のボールベアリングなどを使用すると、一見高級に見えますが、回転抵抗トルクが大きくなり回り難くなります。正に Simple is best. です。

「ミニ風車」は小学校の低学年でも十分に作ることが出来ます。「ミニ風車」づくりは今までに色々なところで何回も実施して延べ300人以上が体験しましたが、上手く回らなかったことは1回もありません。手前味噌ながら「ロバストな設計」だと思います。

途中で、支柱（心棒）を五寸釘からプラスチック製の細いストロー先端に釘を取り付けたものに変更しました。元の構造では翼車を取り外したときに台板の上に五寸釘が突出した形になり、怪我をする恐れがあったので安全性を考えた設計にしました。



「ミニ風車」の安全設計

諫早高校への「出前授業」では、高校生には「ミニ風車」づくりだけでは物足りないと考えて、アルミニウム製の「ミニ風車」を圧力鍋の蒸気で回して「火力発電」のシミュレーションをすることを試みました。筆者は中学生の頃、缶ビールの缶をボイラとしてレシプロの蒸気エンジンでマブチモーターを回して発電をしたことがありました。マブチモーターをもう一つのマブチモーターで回すと豆電球が点きます。ところが「ミニ風車」をヘアードライヤーの風で回すだけでは回転数が不足して豆電球が灯りませんでした。そこで、回転子半径が大きく磁力も強い大きなマブチモーターで試しましたがやはりだめでした。子どもの頃に減速機として使用していた歯車を逆用して発電機の増速を試みましたが、これも上

手く行きませんでした。再び直結発電機に戻ってヘアードライヤーだけではなく掃除機の排気を利用して「ミニ風車」を回したら 0.88 ボルトで豆電球が微かに点灯しました。発電機の電圧を高めるために自己流でコアレス発電機を試作しました（ネオジム磁石使用、コイル $0.4\phi \times 15\text{m}$ 、6 個直列）。無負荷電圧は 2.4 ボルトと高くなったのですが、豆電球を点けると 0.4 ボルトまで下がってしまいました。

「ミニ風車」発電機 開発メモ	
原点	缶ビール缶のボイラ → レシプロの蒸気エンジン → マブチモーターで直流発電
①	マブチモーターでマブチモータを駆動 → 豆電球点灯
②	紙製「ミニ風車」をヘアードライヤーの風で駆動 回転数不足のため豆電球点灯不能
③	回転子半径大、磁力強の大形マブチモータを使用 回転数不足のため豆電球点灯不能
④	増速機付発電機 回転数不足のため豆電球点灯不能
⑤	直結発電機をヘアードライヤー+掃除機排気で駆動 0.88V 豆電球微点灯
⑥	コアレス発電機 (ネオジム磁石使用、コイル $0.4\phi \times 15\text{m} \times 6$ 個直列) 無負荷電圧 2.4V、豆電球負荷時電圧 0.4V 点灯不能
⑦	諫早高校本番 マブチモーター直結発電機を圧力鍋の蒸気 とブローアの空気で駆動 → 超低電圧 LED ランプ点灯

1



②ミニ風車駆動
直流発電機 1号機



③ミニ風車駆動
直流発電機 2号機
大形マブチモーター

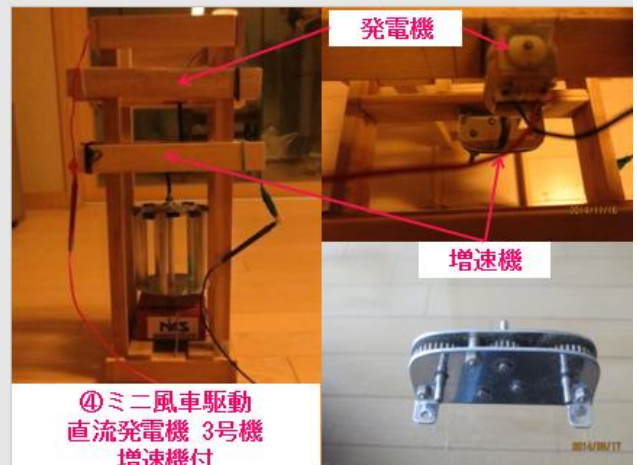
「ミニ風車」発電機 開発の経過



①マブチモーター駆動
直流発電機

原点：レシプロ蒸気エンジン

2



④ミニ風車駆動
直流発電機 3号機
増速機付

発電機

増速機



⑤ミニ風車駆動
直流発電機 2号機
掃除機の排気利用
0.88V 豆電球が微点灯



⑥ミニ風車駆動
交流発電機 4号機
コアレス発電機
無負荷電圧 2.4V
豆電球負荷時電圧 0.4V



「ミニ風車」発電機 開発の経過

結局、諫早高校の本番では大きなマブチモーター直結の発電機を使用しました。圧力鍋の蒸気だけでは回転数が不足、生徒が探してきたブロアーで加勢して何人かの京機会員が総がかりで苦心の末、超低電圧 LED ランプを点灯することが出来ました。しかし、その直後に「ミニ風車」の翼が飛散してしまいました。

⑦諫早高校本番 超低電圧LEDランプ点灯



翌年の小倉高校向け出前授業に向けて、アルミニウム製の風車の組立を接着剤での固定からワイアで縛る方法に変更しました。また、蒸気ノズルの寸法も計算で求めて前回より相当小さいものにしました。それでも予め自宅で試験した結果は配管の途中から漏れる蒸気が多すぎて圧力が立たず、ノズル流速が不足して「ミニ風車」が回らないというものでした。

仕方がないのでこの時は火力発電を諦めました。諫早高校の出前授業時から一緒にやっていた清水 明さん(S46/1971 卒)がネットで新しい発電機を見つけくれました。この発電機は低い回転数でも容易に LED ランプが点灯します。やはりモータはモータ用に発電機は発電機用に作り方があるのだと思います。電気工学を勉強せずに闇雲にやってみても駄目で、「学ばざれば則ち罔く、思いて学ばざれば則ち殆し」を実感した次第です。小倉高校では「ミニ風車」を作った生徒たちもこの発電機を使用して風力発電の体験をしました。



蒸気漏れが多くて圧力が立たず

新しい発電機での風力発電

生徒たちの風力発電体験

次の年の明治学園中学高等学校に向けては、蒸気漏れを防ぐことに注力しました。ボイラには GODIVA のビスケットの缶を使いました。自宅での試験ではアルミニウム製の「ミニ風車」は回らず、重量が軽い紙製の「ミニ風車」が辛うじて回るというものでした。缶の蓋と本体の間にわずかな隙間（1/100 mm のオーダー）があったと仮定すると、直径 160 mm の缶では隙間面積が約 5 mm^2 になってしまいます。これはノズル面積とコンパラブルです。そこで、缶の蓋と本体との間にゴムパッキンを噛ませて締め付けることにより蒸気漏れを低減した結果、本番では「ミニ風車」による火力発電のデモンストレーションに成功しました。ただし、紙製の風車では蒸気に対する耐久力がなく短時間の運転で壊れてしまいました。



蒸気漏れ防止用ゴムパッキン

「火力発電」の実演

壊れた紙製風車

その後、さらに改善しアルミニウム製の「ミニ風車」で発電することに成功しました。最初に試みた諫早高校からまる2年かかってようやく目標達成です。

その次の年の長崎精道三川台小学校では水力発電・風力発電の実演と合わせてアルミニウム製の「ミニ風車」による火力発電の実演をしました。児童たちも自作した「ミニ風車」で風力発電の体験をしました。



精道学園と京機会ロゴ入り「ミニ風車」

火力発電・水力発電・風力発電装置

series 研究最前線 (12)

スピンの基礎方程式

瀬波 大土 (H11/1999 卒)



「スピンの基礎理論はどこまでわかっているのか？
教科書に載っているようなことだから全てわかっている？」

1. 知られざるスピン

量子力学の教科書を学ぶと、電子は固有の角運動量であるスピンをもつとある。当初はこの角運動量は電子の自転として理解されたため、この名前がついている。古い量子力学の教科書、例えば朝永振一郎の『量子力学』などには自転との記述が残っている[1]。スピンの自転であるという考えは現在では捨てられている。観測されている電子の角運動量を持つとして、電子の表面の速さが光の速さ(相対性理論によりいかなるものの速さも光の速さを超えないと知られている)でまわっているとしても、電子の大きさは観測されている大きさよりも大きくないとつじつまが合わないためである。現在では、スピンは古典物理学の概念の中ではとらえられず、質量や電荷と同じように粒子に固有の性質とされている。

電子のスピンは見つかったから100年ほどの年月が経っている。たとえ昔の教科書では不正確な表現があったとしても、今は十分に理解されているだろうと思うのが普通と思う。しかし物性理論の研究者でも良くわかっていないことが多々ある。例えばマクスウェル方程式である。電子のスピンの揃って同じ向きを向いて磁石となる性質は知られているが、マクスウェル方程式中にスピンは出てこないと思われている。磁場(H , 磁束密度: B)に関するマクスウェル方程式は次の2式である。

$$\text{rot}H = j + \frac{\partial D}{\partial t}, \quad \text{div}B = 0$$

(D は電束密度) 実はこの電流 j にスピンの含まれている。多くの人には退屈と思われるが、少し式を見ていく。電流は電子の流れであり、相対論的量子論では、

$$j = -ec\varphi^\dagger \alpha \varphi$$

と書かれる。 φ は4成分の波動関数で、 $e > 0$ は電子の電荷、 c は真空中の光の速

さ、 $c\alpha$ は速度の演算子である。これを非相対論的な近似を用いて式変形すると、

$$\mathbf{j} \simeq -\frac{e}{m} c\psi^\dagger \mathbf{p}\psi - \frac{e}{m} \text{rot} \psi^\dagger \mathbf{s}\psi$$

となり、運動量 \mathbf{p} で書かれた第一項が見慣れた電流を与えている。ここで m は電子の質量、 ψ は(非相対論近似における)波動関数、 \mathbf{s} はスピンの演算子である。第二項はスピンの回転(スピン渦)であり、マクスウェル方程式に戻って考えると $\text{rot}\mathbf{H} \Leftrightarrow \text{rots}$ となっており、スピンの回転が磁場を与えることがわかる。学会等で物性理論の研究者に、このように電流にスピン渦が含まれていて、それがマクスウェル方程式にしたがってスピン起源の磁場を与えることを説明するとたいていの場合には驚かれる。このように電磁気学に関わるレベルですらスピンの理解はよく知られていない。次の章ではスピンの理論について最近新たにわかってきたことを紹介していきたい。

2. スピンに対する運動方程式

量子力学における物理量の時間発展はハイゼンベルク方程式によって記述される。ハイゼンベルク方程式はシュレーディンガー方程式と等価である。シュレーディンガー方程式は

$$i\hbar \frac{d\psi}{dt} = H\psi$$

ここで太字でない H はハミルトニアンであり、 \hbar はプランク定数 h を用いて $\hbar = h/2\pi$ 。ある演算子 O で表される物理量 $\langle O \rangle$ は

$$\langle O \rangle = \int d^3x \psi^\dagger O\psi$$

であり、このとき $\langle O \rangle$ の時間発展は

$$\frac{d}{dt} \langle O \rangle = \frac{d}{dt} \int d^3x \psi^\dagger O\psi = \frac{i}{\hbar} \int d^3x \psi^\dagger (HO - OH)\psi$$

となる。この方程式は、よく知られた次のハイゼンベルク方程式とみなせる。

$$i\hbar \frac{d}{dt} \langle O \rangle = [O, H]$$

これに基づいて、スピンに対するハイゼンベルク方程式は[2]

$$\frac{d\mathbf{s}}{dt} = -c\boldsymbol{\alpha} \times \mathbf{p}$$

と知られている。ここまでは教科書にも載っている普通の話である。

我々の研究グループでは、ハイゼンベルク方程式の導出の

$$\frac{d}{dt}\langle O \rangle = \frac{i}{\hbar} \int d^3x \psi^\dagger (HO - OH)\psi$$

の式に対してハミルトニアンを直接的に微分等の演算子として作用させることを考えてきた。さらに積分値ではなく、ある場所 x での密度量としての物理量を考える。具体的な物理量として、次のスピン密度を考えることとした。

$$\langle \mathbf{s}(x) \rangle = \psi^\dagger(x) \mathbf{s} \psi(x)$$

スピンを取り扱うので相対論効果を取り入れたディラック方程式のハミルトニアンを用いて計算すると、

$$\frac{d}{dt}\langle \mathbf{s}(x) \rangle = \frac{i}{\hbar} \psi^\dagger(x) (H\mathbf{s}(x) - \mathbf{s}(x)H)\psi(x)$$

$$H = c\boldsymbol{\alpha} \cdot (\mathbf{p} + e\mathbf{A}/c) + \beta mc^2 - e\phi$$

となる。 A はベクトルポテンシャル、 ϕ は静電ポテンシャル、 β はディラックの β 行列である。(量子論では電場と磁場ではなくベクトルポテンシャルが主役である。) このハミルトニアンの計算を見るのは退屈であろうから結果だけ載せると、

$$\frac{d}{dt}\langle \mathbf{s}(x) \rangle = \psi^\dagger(x) (-c\boldsymbol{\alpha} \times \mathbf{p})\psi(x) + \frac{-c}{3} \nabla \psi^\dagger(x) \boldsymbol{\alpha} \cdot \mathbf{s} \psi(x)$$

である[3]。スピンのハイゼンベルク方程式と比べ、スピン密度の運動方程式には第二項が追加されており、スピン密度を考えると通常のスピントルクとは異なるトルクが働いていることがわかる。(もちろん全空間で積分すると第二項は0となり同じ式になる。)

第二項のスピン密度に対するトルクの存在という予言を検証する研究を行った。スピン密度に対するトルクの測定という実験は難しすぎることに、また簡単な実験を行う程度の実験能力も私には備わっていないことから、量子状態計算を用いて検証を試みることにした。具体的には以下のようなことを考えた。スピンの定常状態を考えるとスピンは時間とともに変化しないはずなので、スピンの運動方程式の左辺は0でなくてはならない。そうすると右辺の二つの項はきれいに相殺するはずである。ハイゼンベルク方程式に基づいてある場所でのスピントルク密度を計算しても0にはならず局所的にはスピン定常状態の描像は得られないが、スピン密度に対するトルク密度はスピン定常状態に対しては0となる。つまり局所的にも成立する運動方程式を得ることができるという予言が得られた。そこで

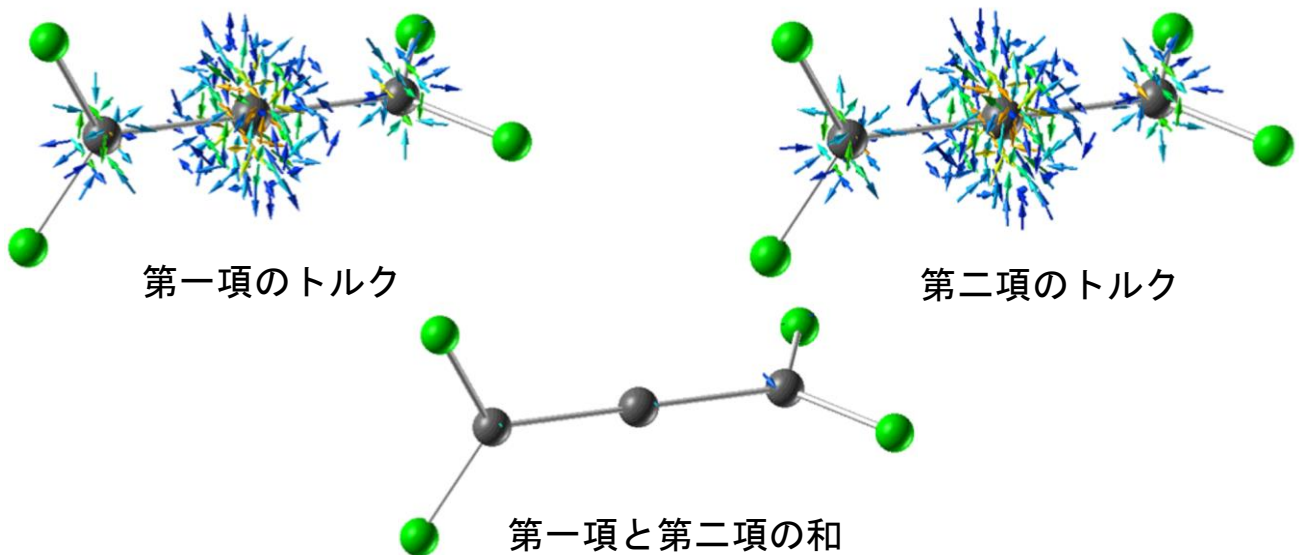


図1 : C₃H₄ 分子でのスピン密度に対するトルクの検証

このトルク密度が本当に相殺して0となるかを、いくつかの分子に対して数値計算を行い実証してきた[4, 5]。図1はその一つでC₃H₄分子に対する結果である。赤に近い色の矢印が大きなトルク密度を表し、青に近い色が小さなトルクを表す。矢印の向きはトルクの向きを表し、ある閾値より小さなトルクは記載していない。第一項だけのトルク、第二項だけのトルクは0ではない値を持っており、その矢印の向きは逆向きであることが見て取れる。そして、その和を描画した図においては、相殺によりトルクが非常に小さくなっていることがわかる。これにより、スピン密度に対するトルク密度の描像が少なくとも数値計算上は正しいことが検証できた。今後も研究を続けて量子力学の教科書にも追加されるように検証を進めたい。

3. スピン渦と電流の線形関係

スピンの運動方程式以外にも次に記す新たな式を提案している。

$$\text{rot } \psi^\dagger s \psi = \lambda j$$

この λ は行列であり、電流とスピン渦の線形関係を主張しており、電気伝導率が物質中での電流と電場の関係を与えるように、スピンと電流の関係を与えると期待している。

この式はまだ論文に発表前でもあり発案のアイディアの詳細は省く。厳密に導出されたものではなく、相対論における基礎方程式であるディラック方程式から導かれる式から直観的洞察に基づいて近似的な関係式として提案している。厳密

な式ではないことから、例えば電気伝導率や誘電率のように右辺に電流の2乗などの高次の項も現れうる。そういう非線形の効果はおいておいても電流とスピントに線形性があるという主張である。1章で述べたように電流の中にはスピントの成分が含まれていることから、この式はスピント以外の電流である運動量に比例する電流とスピントが線形関係を持つことを主張している。直観的には運動量とスピントの分布は独立であることからこの式は奇妙なように思われる。

そこで数値計算により本当にこの関係式が成立しているかの確認をする研究を行ってきた。OpenMXというプログラムを用いて、グラフェン、シリセンやヘリセンに電極をつないだモデルに対して量子電気伝導状態の計算を行った。両端にかける電位差を変えながら、電流とスピントを計算し全ての電位差に対して一つの行列 λ で等式が成立するか確認したが、まさに一つの行列で表されることが分かった。図2は一例として野曾原氏との共同研究によるグラフェン内の一定領域に対する電流とスピントの線形性を示した図である。

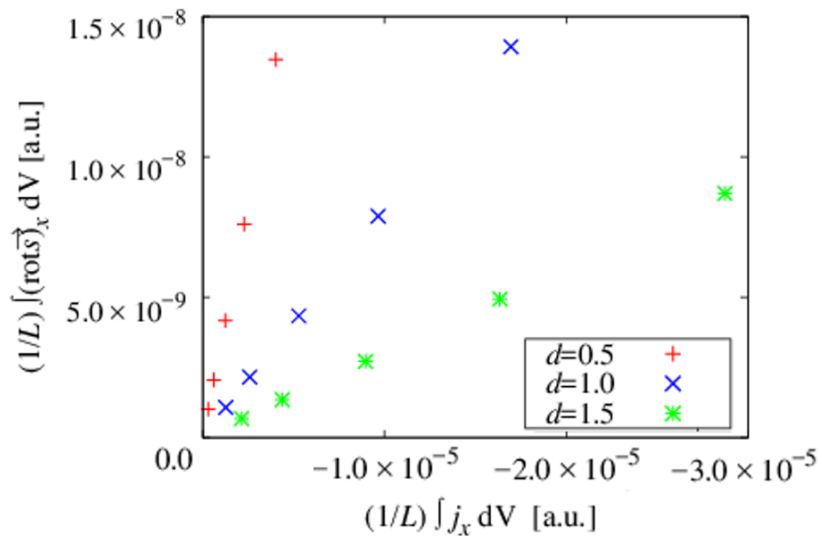


図2：グラフェンにおけるスピントと電流の線形関係

一見関係なさそうなスピントと電流の間に何らかの線形関係があることを実証できた。しかし、行列 λ というのがいったい何なのかということやどのような性質を持つのかといったことは何もわかっていない。スピントに対する最も大きな相互作用はスピント軌道相互作用なので、何か関係があると予測しているが明確な対応関係は今のところ示せていない。今後は行列 λ の物理的実体は何なのか明らかにしていきたい。

4. まとめ

量子力学の理論ですら、まだ教科書に載っていない理論的な研究の展開があることを、特に私の研究しているスピンに対する基礎方程式の面から紹介してきた。理論物理の研究者となったからには、自分の名前がつくような(つかなくてもいいが自分が提案した)新しい式や概念が将来の教科書に載るような研究をしたいと思って研究を行ってきた。特に今は量子力学の教科書に載っていない新たな理論式の提案と研究を行っている。次は京機短信ではなく教科書上でみなさまにお名前をお見せできるように一層研究を進めていきたい。

参考文献

- [1] 朝永 振一郎, 量子力学 I, みすず書房 (1969).
- [2] J. J. サクライ, 上級量子力学, 丸善プラネット (2010).
- [3] A. Tachibana, New Aspects of Quantum Electrodynamics, Springer (2017) and references therein.
- [4] M. Fukuda, M. Senami, A. Tachibana, Prog. Theor. Chem. Phys. 27 (2013) 131.
- [5] M. Fukuda, K. Soga, M. Senami, A. Tachibana, Int. J. Quant. Chem. 116 (2016) 920.

Profile

京都大学工学研究科マイクロエンジニアリング専攻生命数理科学研究室 講師
1976年、釧路市に生まれる。1999年、京都大学工学部物理工学科を卒業。2001年に同大学原子核工学専攻修士課程修了。2004年、同博士課程修了後、博士号取得。2007年から京都大学工学研究科助教。2015年より現職。

研究室HP : <https://www.inoue-lab.info/>