

# “それでも回転体中の核スピンは回転を感じる” — NMR 大御所との真っ向勝負の顛末 —

## “Yet nuclear spin senses rotation in a rotating material body” - How the debate with a big name in the NMR field went head to head-



### 中堂 博之

CHUDO Hiroyuki

スピン-エネルギー変換材料科学研究グループ  
Research Group for Spin-energy Transformation Science

「それでも地球は動いている」とつぶやいたガリレオの心境でした — バーネット磁場を核磁気共鳴 (NMR) 法で観測することというこれまでの常識を覆す実験に成功した中堂博之の研究主幹の開口一番の言葉です。研究者魂に火をつけた体験、そしてさらなる磁性研究への意欲を語っていただきました。

### ものを回転させたら磁場出んの？ それホンマ？

**中堂** 2010年に前川 禎通さんが先端基礎研究センター長になられた時、スピントロニクスの実験研究を立ち上げる際に声をかけてもらったことでグループに加わりました。

我々のグループでは、核スピンの核磁気共鳴 (NMR) と力学回転でスピン流を作ることをテーマにスピントロニクスの研究が始まりました。

力学的な回転と電子スピンの基本的な現象として、バーネット効果とアインシュタイン・ドハース効果があります。バーネット効果は、磁気を帯びていない鉄棒を高速回転させると、回転軸に沿って磁気を帯びる現象で、アインシュタイン・ドハース効果は、逆に静止した鉄棒に外部から磁場を与えると、鉄棒は回転するという現象

My mind was exactly same as Galileo's when he had murmured, "And yet the earth moves."

It was the first words from Hiroyuki Chudo who succeeded in an experiment of observing the Barnett magnetic field using nuclear magnetic resonance (NMR), which can overturn the common knowledge until now. During the interview, he shared his experience that ignited his researcher spirit, as well as his scientific ambition for further research.

### Generating a magnetic field by rotating an object?

**H. Chudo:** I joined the research group of Spin-energy Transformation Science when the former Director General, Dr. Sadamichi Maekawa was inaugurated as director of the Advanced Science Research Center in 2010. He asked me to join and start experimental research on spintronics. So, our group got started the research on creating spin currents driven by mechanically rotating object and observation of nuclear spin through NMR.

Basic physical phenomena regarding mechanical rotation and electron spin include the Barnett effect

です。同時期に発見されたこの二つの現象によって磁気と回転運動とが密接に結びついていることが示されました。

と今偉そうに説明していますが、実は2010年当時の私は、恥ずかしながらこの二つの現象を知りませんでした。私にとって、特にバーネット効果、つまり回転させるとミクロな現象として磁性が生まれるということは、ものすごい驚きでした。

ものを回転させたら磁場出んの？それホンマ？という心境でした。私はNMR屋なので、NMRの世界では昔から試料を回転させながら測定する方法が行われていて、そこでは回転によって生じる磁場などないと考えられていました。分解能をあげるために回転させるけれど、それによって磁場を感じ共鳴周波数がわずかに変化する化学シフトがないというのはどういうこと？とその時頭に浮かんだ疑問が、その後の信じがたい展開につながっていくことになります。

## NMR 業界のタブーに挑む

**中堂** 懸命に研究に取り組みましたがなかなかうまくいかず、方向性を変えようと思った時に、私の中で次第に膨らんでいった最初の疑問、つまりバーネット効果の研究に取り組みたいと思いました。

そこで当時の私のスーパーバイザーである安岡 弘志先生に疑問をおつけ、NMRでバーネット磁場を測定したいと相談したところ、先生に即「そんなんやめとけ！そんなん見つかったらNMR業界が大変なことになるぞ」と言われてしまいました。その理由は、分子構造解析などに使用されている高分解能NMRの分野では分解能を向上させるために試料を回転させながらNMR測定を行うことは昔から行われており、回転によって磁場など発生しないとして膨大な理論や実験が蓄積されていたからです。NMRの世界では回転運動によって磁場が生じるバーネット効果についての言及はタブーとされているんだと実感しました。NMRの歴史はけっこう長く、回転によって磁場など発生しないとして理論や実験が積み重なってきている中で、私がやろうとしている研究は不都合な真実になりうる可能性があったわけです。

それでも私の中では疑問がどんどん膨らんで、安岡先生に申し訳ないと思いつつも、やらないではいられない

and the Einstein-de Haas effect. The Barnett effect governs a phenomenon in which a non-magnetic iron rod becomes magnetic along its axis of rotation at high speed, while the Einstein-de Haas effect is a phenomenon in which a stationary iron rod results in mechanical rotation when an external magnetic field is applied to it. These two phenomena, discovered at the same time, proved the close connection between magnetism and mechanical rotation.

Although I am explaining about the two phenomena with a big attitude now, I am ashamed to admit that I did not understand well about them back in 2010. Particularly, the Barnett effect, the fact that magnetism is generated as a microscopic phenomenon when we rotate an object, came as a huge surprise to me.

Frankly, I thought "A magnetic field appears by rotating an object. Is that for real?" You know, I'm an NMR person. In the NMR world, for a long time, we have used the method of measuring the NMR spectrum of samples while rotating them, and it has been thought that there is no magnetic field generation according to rotation of samples. We rotate samples to improve the resolution of NMR measurements, but what does it mean that there is no chemical shift associated with the subtle change of resonance frequency, caused by a magnetic field from the rotating samples? The question that came to my mind at that time, led to things to develop in unexpected ways.

## Challenging taboo of the NMR field

**H. Chudo:** I was working as hard as I could but it did not go well. When I thought there was no way but to change direction, the Barnett effect crossed my mind. I wanted to address

the question that kept lingering on my mind.

To begin with, I raised the question with my supervisor at the time, Prof. Hiroshi Yasuoka, and asked him for advice on measuring the Barnett magnetic field by using NMR. His immediate answer was "Don't do that! The NMR industry will be disoriented or in trouble if something like that is found." The reason is that in the field of high-resolution NMR for molecular structure analysis, NMR measurements have long been performed while rotating the sample to improve resolution, and a vast amount of theory and

い気持ちになってしまって、なんとか実験する方法はないかと突っ走ってしまったわけです。その結果、安岡先生の忠告通り大変な展開になってしまうのですが・・・

私は、理論家の松尾 衛さんに相談してみました。

松尾さんにバーネット磁場というのは、本当に磁場なのか確認すると、それは明らかに磁場だということでした。松尾さんによると、バーネット磁場というのは慣性力で、つまり遠心力とか車が急ブレーキをかけた時に前にぐっとのめるような加速度系になった時に出てくるものなので、測定装置ごと高速で回転して測定する必要があると言われてしまいました。

えーっ、無茶ぶりや！装置がぶっ壊れてしまうやん！  
—私は、どうしたものかと必死で考えました。基本的にNMRは核の磁気モーメントの歳差運動から生じる誘導起電力をピックアップコイルで測定するという原理です。通常は共振回路とピックアップコイルは有線で繋がっていて高速で回転させることはできないんですが、相互誘導を使ってピックアップコイルを無線で電氣的に接続する装置を作りました。それによって、見えたんです。バーネット効果！

これらの実験により核磁気共鳴法を用いて固体中に生じたバーネット磁場を測定することに成功した研究成果を、2014年に発表しました。

この成果は、応用物理学系の雑誌のエディターズチョイスに選ばれ、これで当初考えていたNMRとバーネット効果の矛盾点が解消できたと思いました。

NMRは医療でも使われているMRI診断と核磁気共鳴を利用している点では同じなので、なにか大きな影響が出て大変なことになるのではと懸念していたのですが、実際はそうはなりませんでした。その点はよかったです。

### 雑誌が調査委員会を立ち上げる！

**中堂** ところが2018年の夏のことでした。雑誌編集部からNMR界の指導的な研究者から一本のメールが届きました。それは「バーネット効果など存在しない！試料回転に意味はなく、コイルを回転させるだけでNMRシフトは説明できる！」という超感情的な内容でした。

普通なら編集部はこんなメールは受け付けないと思うのですが、送り手人物は、教科書に名前が出てくるような著名な大物でした。編集部はそんな人物からの一通のメールで、我々への問い合わせもなくいきなり論文を調査する特別な委員会を立ち上げたのです。確かに私の実験結果に対しては最初に論文を投稿したNatureにおい

experiments had been accumulated on the assumption that rotation does not generate a magnetic field so far. I felt like that the Barnett effect, which generates a magnetic field due to rotational motion might be a taboo subject to mention in the NMR world. That means my research could become an inconvenient truth.

Although I felt sorry for Prof. Yasuoka, I couldn't help but find ways to make experiments a success to answer the unsolved question in my mind. As a result, I ended up in a serious situation as advised by Prof. Yasuoka...

To seek a second opinion, I consulted with Dr. Mamoru Matsuo who is a theorist.

When I asked him if the Barnett magnetic field was really a magnetic field, he said it was surely a magnetic field. According to him, the Barnett magnetic field is an inertial force, which comes out when there is a centrifugal force or an acceleration, like we move forward in a suddenly stopping car. His advice was that the measuring apparatus itself must be rotated at high speed in order to measure the Barnett magnetic field.

What? You are joking! It will totally break the device! -I was desperate to figure out what to do. The basic structure of NMR is that the pickup coil measures the induced electromotive force generated by the precession of the magnetic moment of the nucleus. Basically, the resonant circuit and the pickup coil are connected by a wire so that they cannot be rotated at high speed. But I created an idea to use mutual induction to obtain the signal by wirelessly connecting the pickup coil. That's how I finally saw it. The Barnett effect!

In 2014, the results of these experiments which successfully measured the Barnett magnetic field in solids using NMR, were published, and the paper was selected as the Editor's Choice of a journal in the applied physics field. I thought that this resolved the discrepancy between NMR and the Barnett effect.

One thing I am worried that it might have a big impact and caused serious problems because NMR is also used in MRI diagnosis. As a matter of fact, it did not. That was a good thing.

### The investigation committee was set up by the journal!

**H. Chudo:** However, it was the summer in 2018 that the editorial department of the journal received a mail from a leading figure in the NMR field. It claimed



ても、高エネルギー物理学と思われる査読者からは大絶賛され、NMR系と思われる査読者からは否定的なコメントを受けたので、同じような評価が寄せられるのは覚悟していたのですが、たった一通のメールで、調査委員会を立ち上げるなんて思いもしませんでした。

NMRの業界では、先ほども申しましたように試料回転でシフトは生じないことから、核スピンは回転運動から孤立していると考えられていました。ですから試料を回転させることに意味はなく、シフトの原因はコイルを回転させることで説明できると言われたわけです。

それに対して我々の主張は、シフトの見た目は同じだけれど試料を回転させると試料中には必ず慣性力が働くので、試料を回転させることには意味があるというものでした。否定的なコメントを送ってきた人物にも、試料を回転させると試料中には慣性力が働くということを何度も説明しましたが理解されず、議論は平行線でした。

## 大御所研究者と雑誌を論破

**中堂** そんな状況下、雑誌の調査委員会は最終報告を出してきました。それはどんなものかという、実験自体は正しく行われているとしたものの、実験の解釈は私が間違っていて大御所研究者の主張を支持するというものでした。

この報告は到底納得のいくものではなく私の研究者魂に火をつけました。私は研究者として自分の信じた物理を貫く覚悟で、NMRの大御所と真っ向から論戦することを決心しました。

回転体中の核スピンスピンが孤立しているのではなく、明確に回転体中の核スピンスピンが、慣性力として回転場の影響を受けているか証明できるか、そのことに全力で取り組みました。

その結果、核四重極共鳴 (NQR) 測定法を用いると、試料とコイルを同時に回転させた場合、コイルだけを回転させた場合、試料だけ回転させ場合では、全く違うスペクトルが得られることがわかりました。これによって、核スピンスピンは回転運動による慣性力を受けることを明白に証明しました。

人類は長い間天動説を信じていましたが、回転座標系に生じる慣性力であるコリオリ力がフーコーの振り子によって実証され地動説が証明されました。NMR業界でも長い間、試料が回転していても核スピンスピンは回転を感じないという天動説的な考え方が常識でしたが、私の開発

“The Barnett effect does not exist! Measuring rotation of samples is meaningless because NMR shift can be explained enough by simply rotating the coil!”

Normally, the editorial department would not have accepted such a mail, but the sender was prominent enough to appear in textbooks. Moreover, the editorial department, suddenly set up a special committee to investigate the paper without even contacting us. When I first submitted this paper to Nature, our experimental results were highly rated by reviewers in the field of high energy physics, whereas reviewers in the field of NMR made negative comments on, so I was kind of prepared to receive such evaluation. Nevertheless, it never occurred to me that the investigation committee was set up by a single mail.

As I mentioned earlier, the NMR industry has considered that the nuclear spin is isolated from rotational motion by the reason that rotating samples does not cause a shift. Therefore, they think that there is no point in rotating the sample as far as the cause of the shift can be explained just by rotating the coil.

On the other hand, our claim is that rotation of samples always causes inertial forces to work in the rotating sample, so rotating samples has a meaning and it can't be ignored. We repeatedly tried to explain it to the person who sent us the negative comment, but our claim was not accepted.

## Giving a detailed refutation

**H. Chudo:** Under such circumstances, the investigation committee came up with its final report. The report concluded that the experiment itself had been conducted correctly, but that I was wrong in my interpretation of the experiment, which supported the claims of the big-name researcher.

Not being convinced at all by this report, I decided to rebut the report's conclusions and his claims. As a researcher, I was determined to stick to the physics I believed in.

The bottom line was to prove that the nuclear spin in a rotating body is not isolated, but is clearly affected by inertial forces in the rotational magnetic field. I exerted myself to find the way how to demonstrate it.

As a result, I found out that completely different spectra could be obtained in the respective cases that the sample and coil were rotated simultaneously, only the coil was rotated, and only the sample was rotated, by using the nuclear quadrupole resonance (NQR) measurement technique. Through NQR, it became clear

した装置で、核スピンの働く慣性力を実証しました。大げさに例えるならNMRを地動説へ昇華したといえるでしょう。

というわけで 大御所と雑誌の調査委員会を完全に論破したつもりなのですが、彼はスピンの回転運動と相互作用しているということは認めたものの、回転運動の慣性力として磁場が生じるという証明にはならないといまだに主張しています。雑誌は、この議論は面白いのでコメント&リプライしたいということで同誌に論文が掲載されていますが、基本的には回転磁場を巡る論争はまだ続いていると思われま

## 大学時代、成績の悪さからやむなく進んだ磁性体の研究

**中堂** 今回の実験でも、装置を作るということは重要なポイントでしたが、私は小さい時から物を作るのが好きでした。NHKの「できるかな」という番組が大好きで必ず見ていました。家の中は私の作ったものであふれていたと親は言っていました。

大学学部時代は、学生時代にしかできない事をやろうと、もともと好きだったボクシングをやりました。勉強など一切せずに4年間ひたすらボクシングに打ち込みました。十何キロも落とす辛い減量に入ると何もできず授業はほとんど出たことはありません。まあ、大した選手ではありませんでしたが、最後はボクシング部の主将として関西ボクシングリーグの技能賞を取ったので、ある程度の結果は残せたと納得してこれ以上ボクシングを続ける事はやめました。

そんなわけで成績がめちゃくちゃ悪い特別指導学生だった私は、三回生の専攻選択ではあまり人気のなかった材料工学に、さらに研究室選択でもあまり人気なかった磁性体の研究に行かざるをえなかったわけです。

磁性体の研究に進んだのは全くポジティブな選択ではありませんでした。しかし、学生時代に基礎的な学問を学び、そこで得た知見を生かして将来的には新しいものを作りたいというぼんやりとしたビジョンは持っていましたので、磁性体を研究することも悪くはないかなと考えていました。ですので、ボクシング部を引退してからは勉学に励み、院試ではトップクラスの成績で合格しました。また、学生当時思いもよらなかった巡り合わせで、比較的応用分野に近いスピントロニクスへ研究分野を移れた事は結果的に良かったと思います。将来的にはもっ

that nuclear spins are subject to inertial forces due to rotational motion.

Humans had believed in the geocentric theory for a long time, but Foucault's pendulum demonstrated the Coriolis force, which is an inertial force that occurs in a rotating coordinate system, proving the heliocentric theory. However, with the apparatus I developed, the inertial force acting on nuclear spins was identified, and It may be an exaggeration to say that I have sublimated NMR to the heliocentric theory.

So, I think everything has become clear after I debunked him and the investigation committee, but he still insists that it does not prove that magnetic fields are generated by the inertia of the rotational motion, except the spin interacts with the rotational motion, The journal has published the paper because they want to comments and replies to the interesting discussion, but basically I think the debate over the rotating magnetic field is still going on.

## My poor grades in university led to the research for magnetic materials

**H. Chudo:** I loved to make things from a young age, and I always watched a TV show called "Dekirukana?" (means "can I do it?"). It was an educational show for children by NHK on crafts. My parents told me that the house was filled with things I had made.

During my undergraduate years, I devoted myself to boxing for four years without studying at all. When starting to lose weight for the matches, I could not do anything and hardly attended any classes. I can't say I was not a great boxer, but I became the captain of the boxing club and was awarded for good skill in the Kansai Boxing League. After I had achieved satisfactory results, I decided to stop boxing.

So, as an underachieving student with very poor grades who needed special attention, I had no choice but to go to the laboratory for magnetic materials majoring in materials engineering, which was least popular in my third year.

It is true that it was not a voluntary choice at all, but I had thought vaguely of studying basic science to create something new in the future, so I thought that studying magnetic materials would not be a bad idea. After I retired from the boxing, I worked hard on my studies and passed the graduate school exam with top grades. Also, I think it was a good thing that I was able to move my research field to spintronics, which is relatively close to the applied field, by an unexpected

と実用寄りの研究をして何か新しいものを作りたいな  
と、これまたぼんやりとしたビジョンをもっています。

### 研究にとって大事なことは夢にみるほど考え続けること

**中堂** 研究にとって大事なことは、考え続けることだと思います。夢に見るくらいまで考え続けて、一回思考をシャットダウンするとそこから何かポツと出て全てがつながる気がします。とにかく私は疑問に思ったことは、ずーっと考え続けて止まらなくなるタイプです。

これからも磁性の研究を続け、常識をひっくり返すような新しいことを見つけたり、作ったりするのが夢です。

私は大阪人ですから、それでベンチャーを立ち上げてほろ儲けして悠々自適の老後を送ることなんかをちらっと夢見たりします（笑）が、これまでもこれからも研究だけはまじめにやろうと、自然の前には誠実でありたいとそこだけは自分の軸としてこだわっています。

coincidence when I was a student. In the future, I would like to do more practical research and create something new, which is one of my vague thoughts.

### Keep thinking until it appears in your dream for your research

**H. Chudo:** I think the most important thing for research is to keep thinking. When you keep thinking as much as you can dream about something and then block out a thought, there comes the moment that something pops out and the dots become connected on it out of nowhere. Anyway, I'm the type of person who can't stop thinking about things I have questions about.

My dream is to continue my research on magnetism and create something new that will turn common sense upside down.

As I am from Osaka (Osaka is a traditional merchant town, and its people are thought to have merchant spirit), I also dream of starting a venture for making big money and enjoying a happy retirement life (laughs).

But there is one thing that I never want to change up until now and from now on, is to be genuinely serious about my research, in front of nature.



(左)無線信号 NMR 信号検出器のピックアップコイル (中)高速回転ローター (右)1 ユーロコイン  
Pickup coil for wireless NMR signal detector(left) High-speed rotating rotor (center) 1 Euro coin(right)