解 説

超 1 GHz NMR システムの開発

—高磁場 NMR の将来に向けた超 1 GHz NMR システムの役割と成果—

前田 秀明^{*1,†}, 清水 禎^{*2}Development of an NMR Spectrometer Operated beyond 1 GHz
— The Significance and Prospects of a NMR Spectrometer Operated beyond 1 GHz —Hideaki MAEDA ^{*1,†} and Tadashi SHIMIZU ^{*2}

Synopsis: We have developed the world's highest magnetic-field 1,020 MHz (1.02 GHz) NMR by using a Bi-2223 high-temperature superconducting inner coil and low-temperature superconducting outer coils. High resolution 2D solid-state NMR spectra were achieved for a membrane protein by using the 1.02 GHz NMR. The NMR spectral resolution achieved using the 1.02 GHz NMR was 2.6-fold higher than that achieved using a 700 MHz NMR. This paper describes the historical significance and future prospects of NMR magnets operated beyond 1 GHz.

Keywords: NMR, high temperature superconducting magnet, super-high field NMR, future prospects of NMR magnets
(Some figures in this article may appear in color only in the electronic version)

1. はじめに

物質・材料研究機構、理化学研究所、(株)神戸製鋼所、日本電子(株)の開発チームは、 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ (Bi-2223) 高温超電導 (HTS) 線材を用いて、世界最高磁場を持つ核磁気共鳴 (NMR) 磁石を開発し、膜タンパク質の高分解能 NMR スペクトルの取得に成功した。本シリーズでは、磁石の開発と NMR スペクトルについて解説する。本編では、成果の意義と展望について述べる。

強い磁場に置かれたサンプルに電波を送ると、微弱な高周波信号 (NMR 信号) が戻ってくる。NMR では、これをアンテナで検出し、フーリエ変換して周波数スペクトルを得る。基本的には、携帯電話とよく似たメカニズムである。得られたスペクトルからサンプルの分子構造を求めることができる。NMR は、ライフ・サイエンス、有機化学、無機化学、材料科学などで広く利用されている。例え

ば、有機合成の分野では、合成のプロセスを NMR で細かくチェックするのは一般的な手法であり、NMR は必需品である。生命現象をつかさどるタンパク質の基本構造を決定する国家プロジェクト「タンパク 3000」においても、NMR が大変活躍した¹⁾。また、2015 年のノーベル生理学・医学賞を受賞した北里大学の村智特別荣誉教授も、天然物有機化合物の構造解析に NMR を使用していたことが広く報道された²⁾。このように、NMR は、幅広い分野で利用されている。

ところで、NMR では送受信機とサンプル間でやり取りする電波の周波数は計測核種により異なっており、磁場の強さに比例する。慣例として、電波の周波数で磁石磁場の強さを表わす。例えば、23.5 T の磁場中で水素核 (^1H) とやり取りする電波の周波数は 1 GHz である。NMR では、これを 1 GHz NMR と呼ぶ。

これまで NMR 製品では、ドイツの Bruker BioSpin 社が低温超電導 (LTS) 磁石を用いて製作した 1 GHz (23.5 T) が最高磁場であった。一方、今回達成した NMR 磁場は 1.02 GHz (24 T) である。磁石単体では 1.03 GHz (24.2 T) まで到達した。従来に比べて、磁場の増加はわずか (0.02 GHz (0.5 T)) ではあるが、高温超電導というまったく新しい技術を用いた成果は、世界的にも注目を浴びている。本編では、今回の成果の歴史的な意義と、今後の発展について解説する。

Received June 6, 2016

^{*1} 理化学研究所 NMR 施設

〒230-0045 神奈川県横浜市鶴見区末広町 1-7-22

NMR Facility, RIKEN, 1-7-22, Suehiro-cho, Tsurumi-ku, Yokohama, Kanagawa 230-0045, Japan

^{*2} 物質・材料研究機構 強磁場ステーション

〒305-0003 茨城県つくば市桜 3-13

Tsukuba Magnet Laboratory, National Institute of Materials Science, 3-13 Sakura, Tsukuba, Ibaraki 305-0003, Japan

[†] E-mail: maeda@jota.gsc.riken.jp

DOI: 10.2221/jcsj.51.324

2. NMR の高磁場化の歴史

NMR は軍事研究の副産物として誕生した。第二次世界大戦中、米国は軍事用のレーダーを開発するために、MIT にレーダー研究所を作り、全米からトップクラスの科学者や技術者を集めて研究開発を行った。その中には、Rabi、Purcell、Bloch らの一流の物理学者や、最先端の電気技術者が含まれており、異分野間の融合が自然に発生した。このレーダー開発の過程で、物理学者らは最新の電気工学技術を学んだ。その中には、高周波技術（発信器、受信機、検波器、オシロスコープ）など当時の物理学では馴染みが薄かった新しい技術が含まれていた。

NMR の原型は 1937 年に Rabi が開発した原子線ビーム法である。それは、不均一磁場によるゼーマン分裂で 2 本に割れた原子線ビームの軌跡をガラス板上に捉えるものであるが、このままでは定量性がない。Bloch と Purcell は、MIT のレーダー研究所に在職中に、高周波技術を利用すれば、NMR を電氣的信号に変換できるかもしれないというヒントを得ていた。

戦後、大学（Purcell は Harvard 大学、Bloch は Stanford 大学）に戻った彼らは、個別にアイデアを実行に移し、1945 年に、磁場中に置かれた原子核が固有の周波数の電磁波を吸収する NMR 現象を発見した。これにより、NMR が分析装置として発展するブレイクスルーがもたらされた。この功績に対して、二人には、1952 年にノーベル物理学賞が授与された³⁾。

Stanford 大学で Bloch の学生だった Varian 兄弟が、Bloch の後押しを受けて 1947 年に Varian 社を設立し、NMR 装置の製造販売を始めた。Varian 社は Stanford 大学初の大学発ベンチャーで、当初は大学内の一室を借りて事業を行っていたが、その後、世界的な企業に成長した。

初期の NMR 磁石は、鉄芯に銅線を巻いた電磁石で、2 T が超えられない壁であった。この壁は当時の新技術である超電導技術の導入により見事に克服された。1962 年に Varian 社が販売した超電導 NMR の第一号機は 220 MHz(5.2 T)であり、磁場強度は鉄芯電磁石に比べて一気に 2 倍以上向上した。この頃は、丁度 NbZr や Kunzler の Nb₃Sn などの超電導線材が出現し始めた時期にあたる。新しい超電導線材の開発から間髪を入れず、NMR 磁石が製作されたのは驚くべきことではあるが、ダイナミックな時代の息吹を感じさせるものでもある。

NMR で高磁場が要求されるのは、NMR 計測の感度と分解能が磁場と共に向上するためである。高磁場の装置ほど、分解能がよく良質な NMR 信号を取得できる。これ以後 NMR 装置は、高磁場化の歴史をたどることになる。

超電導磁石による高磁場化に導かれて、NMR 計測手法でも革新があった。Ernst らが、パルスフーリエ変換法を考案したのである⁴⁾。これは、 μ 秒レベルの短時間の電磁

波パルスをサンプルに照射し、戻ってくる高周波減衰信号（Free induction decay, FID）をフーリエ変換して NMR スペクトルを得る手法である。これにより、NMR 計測の感度や計測スループットが圧倒的に向上した。これはその後、NMR スペクトルを多次元に展開し NMR ピーク間の相関関係を把握できる多次元 NMR 法に発展した。発明者の Ernst は、1991 年にノーベル化学賞を受賞した。

当時の超電導磁石は、NbTi 線材で製作されていた。当初、NbTi 磁石の最高磁場は 360 MHz (8.5 T) であったが、その後 400 MHz (9.4 T) を発生できるようになった。それ以上の磁場を発生するには、臨界磁場の高い Nb₃Sn が必要であった。当時、Nb₃Sn は Nb と Sn の直接反応で生成していたので、熱処理温度が高く実用化が困難であった。1976 年に、金属材料技術研究所（現 NIMS）の太刀川ら⁵⁾によりブロンズ法が開発され、Nb₃Sn を用いて 400 MHz 以上の NMR 磁石が製作できるようになった。

その後の NMR 磁場強度の増加を Fig. 1 に示す⁶⁾。「第 3 元素添加 Nb₃Sn 線材」や「内部スズ法 Nb₃Sn 線材」、「超流動ヘリウム冷却技術」などの超電導・極低温分野の最新技術により、1990 年代には 800 MHz (18.8 T)、2000 年代には 900 MHz (21.2 T) の NMR が実現した。我が国でも、物質材料研究機構などが、世界に先駆けて、920 MHz (21.6 T) や 930 MHz (21.9 T) の NMR を開発した。また、2010 年代には Bruker BioSpin 社が 1GHz (23.5 T) NMR を製作した。現在、900 MHz (21.2 T) 以上の NMR 装置が、世界で 50 台以上稼働している⁷⁾。

タンパク質の立体構造解析は生命現象の理解の基本として 2000 年代から重要な研究対象となっている。解析には高磁場 NMR が活用され、網羅的な構造解析が進んでいる。この分野のパイオニアである Wüthrich には、2002 年にノーベル化学賞が授与された⁸⁾。

ところで、上部臨界磁場の制約から、たとえ Nb₃Sn コイルを超流動ヘリウムで冷却しても、NMR 磁場の上限は 1 GHz (23.5 T) である (Fig. 1)。ここで、NMR 磁場の究極の壁ともいえる 1 GHz が現れた。この壁は、上部臨界磁場という物理的な壁なので、製造技術の改良ではとうてい超えられそうにない。大きな技術革新が必要である。このようにして、「高磁場化の歩みが 1 GHz で止まってしまった」というのが、2000 年初頭の NMR の状況であった (Fig. 1)⁶⁾。

ここに至って、「高温超電導内層コイル (HTS) を用いて 1 GHz を超える NMR を開発しよう」という機運が高まってきた。これについては、次章で述べる。

ところで、超電導が NMR にもたらした最大の貢献は磁場強度を向上させたことであると思われるが、実はそれだけではない。超電導化のもう一つの大きな恩恵は磁場の時間的な安定性である。超電導磁石の磁場強度は鉄芯電磁石と比べて最大でも 10 倍程度の向上に過ぎない

Fig. 1 The history of the NMR magnetic field strength. The right vertical axis shows the NMR frequency in GHz.⁶⁾

が、永久電流による磁場安定度の向上は1万倍またはそれ以上である。その結果、長時間計測を必要とする物質（タンパク質のような高分子、微量元素、固体など）への応用が可能になった。300種類以上ある超電導体の中で、NMR磁石としてNbTiとNb₃Snだけが実用化されているのは、安定な永久電流を可能にできる超電導接続技術がNbTiとNb₃Snでしか開発されていないことも一因である。

3. 1 GHz を超える NMR

3.1 欧米における開発

高温超電導内層コイルを利用すれば、1 GHz 以上の磁場の NMR 磁石が可能である。ところが、NMR では、磁場の時間的な安定性 (<10 ppb/時間) と空間的な均一性 (1 ppb) が必要である。高温超電導コイル、磁場強度、磁場安定性、磁場均一性の4者を共存させる技術は、それまで手が付けられていなかった。

2003年にMITのIwasaら⁹⁾は、HTS内層コイルとLTS外層コイルを組み合わせたNMR磁石を外部電源で通電するコンセプトを提案した。これは、その後の超1 GHz NMR磁石構成のひな形になっている（以下、これをLTS/HTS NMR磁石と呼ぶ）。

MITでは、NMR磁石に力点を置いた開発を進めている。既にBi-2223線材を用いて350 MHz (8.2 T) と700 MHz (16.45 T) のNMR磁石を製作している⁹⁾。コイルはオープン型クライオスタットに収納されているので、長期運転は難しく、NMRスペクトルの品質は必ずしも高くはない。但し、世界に先駆けて、新しいコンセプトを提唱し、装置を開発する姿勢は素晴らしい。2007年からは、1.3 GHz (30.55 T) NMR磁石の開発を開始した¹⁰⁾。当初は、700 MHz (16.5 T) のLTS外層コイルと600 MHzのBi-2223/REBCO内層コイルを想定していたが、最近、500 MHzのLTS外層コイルと800 MHzのREBCO内層コイル

に変更した（REBCOはRE₁Ba₂Cu₃O_x、REは希土類元素）。REBCO線材は長手方向の強度が高いので、高電流密度運転が可能であり、コイルのコンパクト化を実現できる。反面、遮蔽電流磁場の影響を受け易く¹¹⁾、剥離による特性劣化が起き易い欠点がある。1.3 GHzという意欲的な磁場目標と併せて、開発の結果が注目される。

ドイツのBruker BioSpin社は、既に1 GHzのLTS NMR磁石の製品化に成功しているが、次期製品として1.2 GHz (28.2 T) NMRの準備を進めている。開発の詳細は明らかではないが、磁石を1 GHz NMR磁石と類似の大きさのクライオスタットに収め、小型冷凍機でヘリウムを再凝縮しようとしている¹²⁾。既にEUの複数の研究所から注文を受けている。成功すれば大きなインパクトがある。

3.2 わが国における開発

わが国でも、JST 先端計測分析技術・機器開発事業により、2006年に、Bi-2223内層コイルとLTS外層コイルを用いた「超1 GHz NMRシステムの開発」を開始した。開発は、物質材料研究機構、理化学研究所、(株)神戸製鋼所、日本電子(株)からなるチームで進めた。目標は「高分解能計測が可能な超1 GHz NMRの開発」である。高温超電導コイルを用いた高分解能NMRの開発は前例がなく、文字通り暗中模索で進めた。プロジェクトの開始直後に、NMRの学会で、「高温超電導磁石を外部電源で通電する方式では、高分解能NMRスペクトルは取得できない」と言われた言葉が今でも忘れられない。

このような事情もあり、当初の数年間では中磁場500 MHz (11.75 T) LTS/Bi-2223 NMR磁石を開発し、これを用いて通電方式による磁場の安定化、均一化、高分解能NMRスペクトルの取得などに注力した¹³⁾。磁石をFig. 2に示す¹⁴⁾。この実験を通じて、(a) 磁場の安定性や均一性が高温超電導コイルに生じる遮蔽電流に強く影響されること、(b) 高安定化電源と磁場ロック機構を併用すれば、電源通電モードでも十分な磁場安定化と均一化が可能で、タンパク質の高分解能NMRスペクトルも取得できるこ

Fig. 2 A 500 MHz LTS/ Bi2223 NMR magnet, which is driven by an external DC power supply.¹⁴⁾

Fig. 3 An overview of the 1.02 GHz NMR magnet.¹⁶⁾

と^{13,15)}、(c) Bi-2223 線材を用いて NMR に要求される精密形状にコイルを巻くのは容易ではないこと、などが明らかになった。ここで、磁場ロック機構とは、NMR サンプル中の重水素核の NMR 信号に基づいて、磁場の変動を補正する機構である。

以上の基礎実験を通じて、LTS/HTS NMR 磁石を通電する方式により高分解能 NMR スペクトルを取得できることが明らかになったので、同じ方式による超 1 GHz NMR の製作を開始した。まず、500 MHz NMR と同じ程度の内外径で、長さが約 2 倍の Bi-2223 内層コイルを製作し、これを既存の LTS 外層コイルと組み合わせてクライオスタットに収めて NMR 磁石を製作し、超流動ヘリウムで冷却した (2010 年)。磁石の組み立て・設置と冷却が終了し、低電流での通電を開始したところで、東日本大震災に遭遇し (2011 年)、クライオスタットの一部分が損傷を受けた。損傷は深く、(株)神戸製鋼所による補修を終え再励磁するには、2014 年まで待つ必要があった。

NMR 磁石の励磁は、数か月をかけて慎重に進めたが、多くの予想外の困難に遭遇した。担当者の強いチームワークでこれらを乗り越え、1.02 GHz (24 T) に到達した¹⁶⁾。磁場の安定化については、500 MHz NMR の場合とは異なる振る舞いが現れ、安定化が困難であった。磁場の均一化についても、内層コイルの長尺化や強い電磁力のために、予想外に大きな磁場不均一性が生じたので、磁場補正には鉄シムなどの新しい技術が必要であった。

これらの困難を乗り越えて、2014 年末に 1.02 GHz 高分解能 NMR 磁石を完成させた。装置の外観を **Fig. 3** に示す¹⁶⁾。この装置により、膜タンパク質の高分解能 2 次元固体 NMR スペクトルを取得できた。スペクトルを **Fig. 4** に示す¹⁷⁾。左側のスペクトルは、理化学研究所の 700 MHz (16.5 T) NMR で取得したスペクトル、右側が 1.02 GHz (24 T) NMR のスペクトルである。1.02 GHz NMR 装

Fig. 4 NMR spectra for a membrane protein. Left: The NMR spectrum achieved using a persistent-mode 700 MHz NMR. Right: The NMR spectrum achieved using a driven-mode 1.02 GHz NMR.¹⁷⁾

置は、信号分解能が 700 MHz NMR より 2.6 倍高く、高磁場の効果を十分に実証する結果となった。このようにして、「高分解能 NMR スペクトルを取得する」という当初の目標を達成できた。この成果は、世界的にも高い評価を受けた。

4. 今後の展望

今回開発した 1.02 GHz NMR 磁石は、今後の更なる高磁場化にむけた歴史的な出発点となるものである、高温超電導コイルの高電流密度性を活かせば、中磁場装置も含めた NMR 磁石のコンパクト化にもつながる。オール高温超電導コイル化により、液体ヘリウム以外の冷媒の使用や、小型冷凍機による高温運転も可能になる。このように、今回の成果は、NMR 磁石のパラダイムシフトを産む可能性を秘めている。既に欧米では、この成果を契機に、LTS/HTS 超高磁場 NMR 磁石の開発を加速している。わが国も、早急に、次のステップの開発を進めていく必要がある。これに関連して、筆者らは既に 1.3 GHz NMR (30.55 T) 磁石の開発を構想している。詳細については、文献 17 を参照して頂きたい。

高温超電導線材を NMR に用いる場合、Bi-2223 コイルでは機械強度が不足しており、REBCO コイルでは大きな遮蔽電流磁場が生じる欠点がある。最近、高強度化した Bi-2223 線材や、遮蔽電流磁場が小さい多芯化 REBCO 線材などが開発され始めた。これらを活用すれば、新しいタイプの NMR 磁石設計が可能になる。また、米国などで開発中の Bi-2212 複合多芯線材 (ツイストあり) を実用化できれば、遮蔽電流磁場の問題を克服できる。これらの次世代線材の実用化が、待たれるところである。

2014 年に、REBCO 線材同士の超電導接続の成功が報告され、世界に衝撃が走った¹⁸⁾。永久電流運転の LTS/HTS NMR 磁石を実現できれば、巨大なインパクトがあるので、実用化が待たれる。このように、高温超電導を用いた超高磁場 NMR 磁石技術は、今、大きく飛翔しつつある。

5. まとめ

2000 年代初頭に日米欧でスタートした超 1 GHz NMR の開発競争において、わが国が最初にゴールしたのは大変喜ばしいことである。1969 年に、初めて月面に一歩を印したアポロ 11 号のアームストロング船長にならえば、「NMR 磁石にとっては小さな一歩だが、NMR にとっては偉大な飛躍だ」と言えるのではないかと考えている。

これまで、1.02 GHz NMR 開発の背景と意義を述べてきた。この後の編で、1.02 GHz NMR に関わる技術の開発について詳述する。開発の過程で、何度か「もうだめかもしれない」と思った瞬間があった。手探りの中で、一人一人がどうやってそれを克服し、プロジェクトを成功に導いたのか、そんな苦闘の跡をたどりながら、一読して頂ければ幸いである。

参 考 文 献

- 1) 文部科学省大規模研究開発事業「ターゲットタンパク研究プログラム」:「タンパク 3000 プロジェクト」
http://www.tanpaku.org/pdf/protein3000/pamphlet_j.pdf (参照 2016-06-06)
- 2) 「特別寄稿一大村智博士のノーベル賞受賞を祝して」、学校法人北里研究所広報誌「雷 (いかずち)」No.19 (2016)
http://www.kitasato.ac.jp/newsletter/download/ikazuti_no19_10.pdf (参照 2016-06-06)
- 3) "Nobel Prize for Physics, 1952", Nature **170** (1952) 911-912
- 4) R.R. Ernst and W.A. Anderson: "Application of Fourier transform spectroscopy to magnetic resonance", Rev. Sci. Instrum. **37** (1966) 93
- 5) K. Tachikawa: "Development of multifilamentary superconducting compound wires", TEION KOGAKU **10** (1975) 124-133 (in Japanese)
太刀川恭治:「化合物極細多芯線の開発」、低温工学 **10** (1975) 124-133
- 6) J.-H. Ardenkjaer-Larsen, et al.: "Facing and overcoming sensitivity challenges in biomolecular NMR spectroscopy", Angewandte Chemie International Edition **54** (2015) 9162-9185.
- 7) Y. Tsusumi of Bruker Biospin: Private communication (July, 2016)
- 8) K. Wüthrich: "NMR of Proteins and Nucleic Acids", John Wiley & Sons, New York (1986)
- 9) S. Hahn, J. Bascunan, H. Lee, E.S. Bobrov, W. Kim, M.C. Ahn and Y. Iwasa: "Operation and performance analyses of 350 and 700 MHz low-/high-temperature superconductor nuclear magnetic resonance magnets: A march toward operating frequencies above 1 GHz", J. Appl. Phys. **105** (2009) 024501
- 10) J. Bascunan, S. Hahn, D. K. Park and Y. Iwasa: "A 1.3-GHz LTS/HTS NMR magnet - A progress report", IEEE Trans. Appl. Supercond. **21** (2011) 2092-2095
- 11) Y. Yanagisawa, et al.: "Operation of a 400MHz NMR magnet using a (RE: Rare Earth) Ba₂Cu₃O_{7-x} high-temperature superconducting

coil: Towards an ultra-compact super-high field NMR spectrometer operated beyond 1GHz", J. Magn. Reson. **249** (2014) 38-48

- 12) G. Roth: "UHF Magnets at Bruker", presented at the workshop on Ultra-high Field NMR and MRI: Science at Cross roads, held at NIH (2015)
- 13) Y. Yanagisawa, H. Nakagome, K. Tennmei, M. Hamada, M. Yoshikawa, A. Otsuka, M. Hosono, T. Kiyoshi, M. Takahashi, T. Yamazaki and H. Maeda: "Operation of a 500 MHz high temperature superconducting NMR: Towards an NMR spectrometer operating beyond 1 GHz", J. Magn. Reson. **203** (2010) 274-282
- 14) H. Maeda and Y. Yanagisawa: "Recent developments in high-temperature superconducting magnet technology (review)", IEEE Trans. Appl. Supercond. **24** (2014) 1-12
- 15) Y. Yanagisawa, H. Nakagome, M. Hosono, M. Hamada, T. Kiyoshi, F. Hobo, M. Takahashi, T. Yamazaki and H. Maeda: "Towards beyond-1GHz solution NMR: Internal 2 H lock operation in an external current mode", J. Magn. Reson. **192** (2008) 329-337
- 16) K. Hashi, S. Ohki, S. Matsumoto, G. Nishijima, A. Goto, K. Deguchi, K. Yamada, T. Noguchi, S. Sakai, M. Takahashi, Y. Yanagisawa, S. Iguchi, T. Yamazaki, H. Maeda, R. Tanaka, T. Nemoto, H. Suematsu, T. Miki, K. Saito and T. Shimizu: "Achievement of 1020MHz NMR", J. Magn. Reson. **256** (2015) 30-33
- 17) H. Maeda, T. Yamazaki, Y. Nishiyama, M. Hamada, K. Hashi, T. Shimizu, H. Suematsu and Y. Yanagisawa: "Development of super-high-field NMR operated beyond 1 GHz using high-temperature superconducting coils", eMagRes **5** (2016) 1109-1120
- 18) Y. Park, M. Lee, H. Ann, Y.H. Choi and H. Lee: "A superconducting joint for GdBa₂Cu₃O_{7-δ}-coated conductors", NPG Asia Materials **6** (2014) e98

前 田 秀 明

1949 年 8 月 31 日生。1975 年早稲田大学理工学研究科修士課程修了。1975 年東京芝浦電気(株)総合研究所勤務。超電導磁石技術開発に従事。2002 年より理化学研究所勤務。NMR 装置開発に従事。低温工学・超電導学会、日本核磁気共鳴学会、電気学会会員。工学博士。

清 水 禎

1959 年 4 月 3 日生まれ。1988 年東京大学理学系研究科博士課程修了。1988 年東京大学物性研究所勤務。固体物理および NMR の研究に従事。1990 年より金属材料技術研究所(現在の物質・材料研究機構)勤務。日本物理学会、低温工学・超電導学会、アメリカ物理学会、日本化学会会員、固体 NMR・材料フォーラム代表。理学博士。