

超電導質量分析装置のための極低温実装技術

原子からタンパク質まで 100%の粒子検出効率をもつ質量分析装置

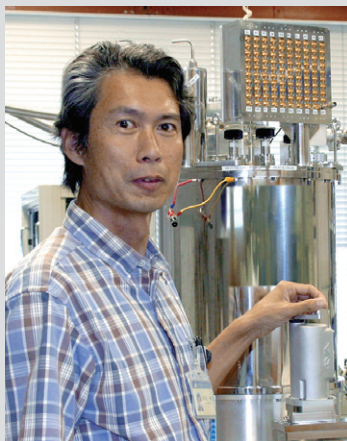
質量分析のための超電導検出器は、信号生成に必要なエネルギーの閾値が非常に低く、原子から数 MDa のタンパク質のような巨大高分子まで、原理的には 100 % の粒子検出効率を発揮する。このため、質量分析装置への搭載が始まっている。しかし、動作に 0.3 K (-272.85 °C) クラスの極低温環境を必要とすることや、有感面積が小さいことが、実用化のボトルネックとなっている。今回、質量分析で必要とされる高速の信号パルスを、0.3 K クラスの極低温環境から常温環境に取り出すための 100 本の同軸ケーブルの導入に成功したことで、並行して開発を進めている、超電導大規模アレイ粒子検出器の実装を可能にした。

Superconducting detectors are promising for mass spectrometers, which are important in proteomics, since the superconducting detectors have 100% detection efficiency for a wide mass range from atoms to proteins. The high detection efficiency relies on a very small threshold to detect quantum energies. However, the smallness of effective detection area and the requirement for a low temperature of 0.3 K (-272.85 °C) are bottlenecks. We succeeded in realized the implementation of cryogenic wiring between a large scale superconducting array detector, which is on a cold stage of 0.3 K, and electronics at room temperature.

大久保 雅隆 Masataka Ohkubo
m.ohkubo@aist.go.jp

計測フロンティア研究部門
超分光システム開発研究グループ研究グループ長

質量分析のための超電導検出器は、元来、宇宙の暗黒物質などの検出のために開発されてきた経緯がある。われわれは、地上にもまだ観測されるのを待っている未知の物質（暗黒物質）があると考えている。これらの暗黒物質の量は多くはないが、さまざまな電子的機能や生体機能に深く関わっている。われわれは、従来の技術では見ることができない暗黒の対象を観測できるようにするために努力を重ねている。本来、私の専門はデバイス開発の分野であったが、近年、分析機器のユーザーである研究者から最新のニーズについて多くを教えられている。深みにはまるデバイスの研究と、高みへ上昇する機器利用の研究をつなぐグルーオンの役割を果たせればと考えている。



研究の背景

超電導検出器は、X線分析¹⁾ や質量分析²⁾ において、半導体などを使った従来の技術では原理的に検出できない軟X線や巨大高分子の検出を可能にする高い性能をもっている。特に、イオン化した分子の飛行時間から分子量を測定する質量分析 (TOF-MS) に超電導検出器を用いると、原理的には、分

子量に依存せず100 %の粒子検出効率を達成することができる。この理想的な特性は、プロテオーム解析や臨床応用において非常に重要である。

超電導検出器を動作させるには、0.3 Kといった極低温環境が必要であるが、この環境で作動させると、事実上熱雑音が全くないノイズレスの計測を実現できる。われわれは、生体高分子

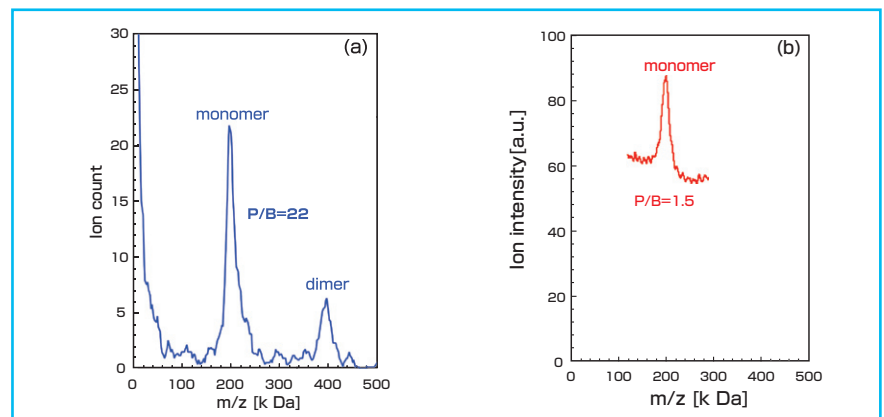


図1 ポリスチレン標準試料 (平均分子量 : 200 kDa) を、開発中の超電導質量分析装置 Super-TOF プロトタイプ (a) と、従来の装置 Applied Biosystem 社 Voyager (b) で測定した場合の質量スペクトルの比較

P/B 比に大きな差がある。また、スペクトルの縦軸は、超電導検出器の場合、検出器に入射した分子数を正確に表しているのに対して、従来の装置では任意単位 (a.u.) である。

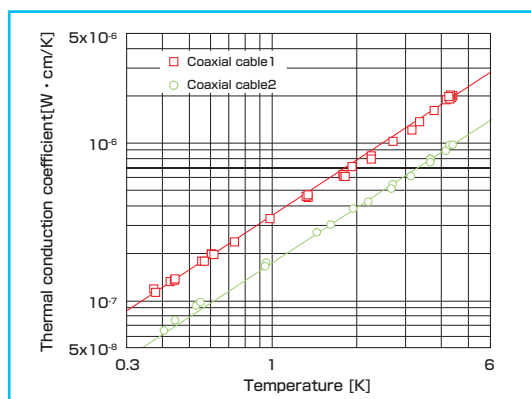


図2 極細同軸ケーブルの熱伝導の実測値

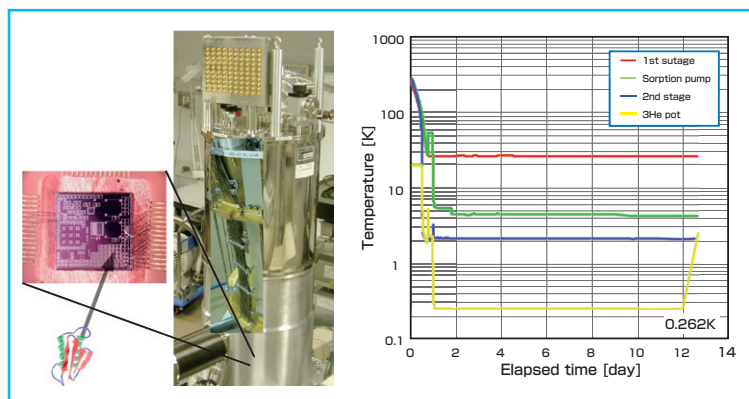


図3 100本の同軸多配線を施した、液体ヘリウムを必要としない0.3 K級冷凍器とその冷却曲線

や合成高分子を用いて、1 MDaまでの広い質量範囲で100%の検出効率が達成できることを実証した。単素子の超電導検出器を使った実験では、200 kDaの合成高分子の場合、従来の装置より1桁以上の飛躍的な検出感度向上が可能である。

質量分析のための要求

実用レベルの短時間分析を実現するためには数100 μm のサイズの超電導検出素子を少なくとも100素子規模のアレイにする必要がある。現状では、ポリスチレンの測定に1時間かかっているが、まだ統計的に十分なカウント数が得られていない。また、高い質量分解能を得るために、イオンが検出器に到達する時間を数ns (1ナノ秒は10億分の1秒)の精度で正確に測定する必要がある。ところが、現状では、その100倍程度の精度しか得られていない。

検出精度を向上させるためには、超電導検出器アレイと室温で動作する半導体エレクトロニクス信号処理系をつなぐ極低温高速多配線が必要である。しかし、これを実現した例は今までなかった。一般に、極低温冷凍器は数100 μW の熱流入には耐えられないので、100本の線材の導入、ましてや高周波を通すために、太くならざるを得ない同軸ケーブルを配線すると、数10

mW以上の熱流入が予想される。したがって、100本規模の同軸ケーブルの導入は不可能と考えられていた。

寒剤フリー冷凍器への実装

今回、同軸ケーブルの直径を0.33 mmと細くし、かつ低熱伝導の金属導体を用いることで、1本あたりの0.3 Kへの熱流入を54 nW以下に抑えることに成功した。この熱流入は、Nbのような超電導体(超電導状態では熱伝導率が著しく低下する)を使っても実現できない小さなレベルである。

この温度領域では、金属材料の加工方法によって熱の伝えやすさの指標である熱伝導率が大きく変わるので、実装の前に、最終加工製品である同軸ケーブルの熱伝導を実測した。これまで、この温度領域において、原材料の熱伝導率測定の実験例はあるが、最終加工

後の同軸ケーブルの実験例はない。

小さな熱流入量を計測できる測定器を開発し、2種類の同軸ケーブルの熱伝導係数を測定した。ケーブルの長さ和使用する温度差がわかれば、このデータを使って正確な熱流入を見積もることができる。今回は、高周波特性も考慮して同軸ケーブル1を選択した。100本の同軸ケーブルで5.4 μW の熱流入に抑えることができる見通しを得たので、これを実装した。

この成果は、実用レベルの超電導飛行時間質量分析装置の実現のために応用できる。また、熱伝導の値がはっきりしているケーブルの供給ができるようになれば、ユーザは予備実験を行うことなく、正確な熱流入量を見積もることができるようになり、超精密計測が可能な極低温環境で動作するデバイスの普及に貢献するものと期待される。

関連情報：

- この成果は、産総研独自のプロジェクトである「多次元情報飛行時間質量分光法(Super-TOF)の開発」(平成15～17年度)により得られたものである。
- ¹⁾ 浮辺雅宏：AIST TODAY, Vol. 4, No.9, p.26 (2004) .
- ²⁾ M. Ohkubo, et al., IEEE Trans. Appl. Super. 15(2) 932, (2005) .
- 大久保雅隆：応用物理学会誌, 72(8), 1057 (2003) .
- <http://unit.aist.go.jp/riif/sssrg/epage/>
- 佐藤浩昭(環境管理研究部門)、茂里康(セルエンジニアリング研究部門)、絹見朋也(ヒューマンストレスシグナル研究センター)、陳銀児、久志野彰寛、浮辺雅宏、齋藤直昭、黒河明、一村信吾(計測フロンティア研究部門)、加藤英幸、島田かより、衣笠晋一(計測標準研究部門) .