

# ぶんせき ①

**Bunseki 2026**

The Japan Society for Analytical Chemistry



日本分析化学会

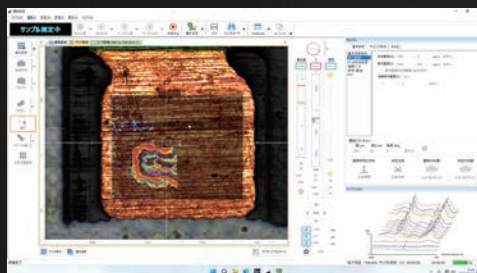
<https://www.jsac.jp>

# Explore with Confidence

マルチチャンネル赤外顕微鏡 IRT-7X は、圧倒的な観察画質の向上と高速化されたリニアアレイ検出器の高次元デジタル処理により、より高速で高精細な赤外イメージングを実現しました。異物解析や材料研究における“観る・測る・解析する”を次の次元へ導きます。

## ■ 1 秒間に最大 160 スペクトルの測定とスペクトル・色分け図表示を同時に実行

16 ch リニアアレイ検出器の各素子にデータ処理回路を備え、測定データを高速に並列処理します。目的成分の分布を測定しながら同時に把握できます。



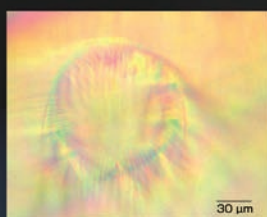
電子基板の電極上の異物測定

## ■ シリコンオイル中の PMMA 粒子の ATR イメージング

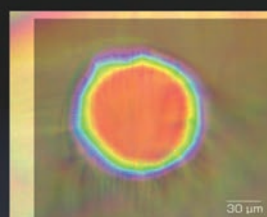
ステージを動かさずに光軸走査する日本分光独自の“スマートマッピング”により、プリズム密着時に試料が観察画像の中央以外に動いても、移動後の部位を測定エリアに指定できます。1 回のプリズム接触でケミカルイメージも取得可能です。



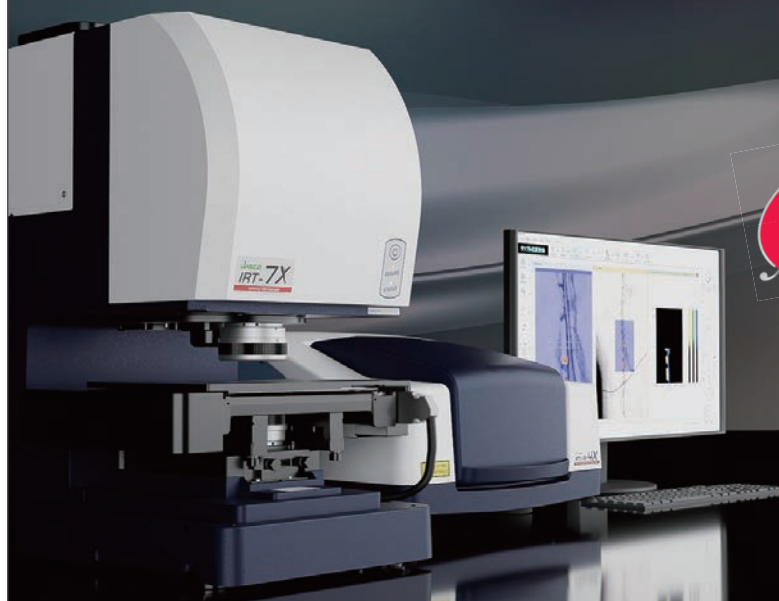
観察画像 (ATR 密着前)



観察画像 (ATR 密着後)



観察画像とケミカルイメージの重ね合わせ  
(1718 cm⁻¹ のピーク高さ)



# IRT-7X

Multichannel Infrared Microscope  
マルチチャンネル赤外顕微鏡

光と技術で未来を見つめる

## 日本分光

日本分光株式会社

〒192-8537 東京都八王子市石川町 2967-5  
TEL 042(646)4111 内  
FAX 042(646)4120

日本分光の最新情報はこちらから

<https://www.jasco.co.jp>

JASCO



高速液体クロマトグラフ

# i-Series

Integrated High Performance Liquid Chromatograph



## Sustainability in Every Separation

近年、地球温暖化により世界中で様々な異常気象が発生し、各国政府は2050年までに温室効果ガスの排出を全体としてゼロにする「カーボンニュートラル」の達成を掲げています。業務効率化がより一層求められる一方で、分析業務のあるべき姿も大きく変わり始めています。脱炭素社会の実現に向けて、

Smart：多様な働き方によるやりがいと生産性の向上

Eco：環境負荷の低減

を両立するソリューションを提供します。

新しい一体型LCシステムi-Seriesは従来の卓越した性能を継承しながら、安定してご使用頂ける堅牢性と環境負荷低減に寄与する機能を備え、常に信頼性の高い分析結果を提供します。

### intelligent

診断・予防・復旧の3機能が分析の堅牢性の維持をサポートし  
データ信頼性の向上と分析業務効率化の両方を実現



### innovative

装置の遠隔操作・モニタリングによりラボ外からでも  
分析業務を実施し、ラボ滞在時間を短縮

### intuitive

直感的な操作とメンテナンス性、卓越した装置性能で  
常に安定した分析を提供



Analytical Intelligenceは、島津製作所が提案する分析機器の新しい概念です。システムやソフトウェアが、熟練者と同じように操作を行い、状態・結果の良し悪しを自動で判断し、ユーザーへのフィードバックやトラブルの解決を行います。また、分析機器に対する知識や経験の差を補完し、データの信頼性を確保します。

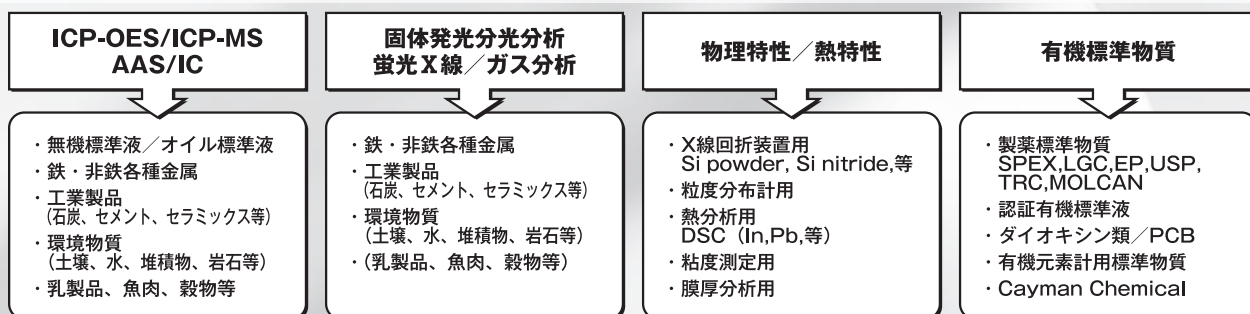


詳しい製品情報はこちら



## 各種標準物質 (RM, CRM)

PFAS関連 (EPA 1633対応など)、RoHS (MCCPs、TBBPA)、REACH規則 (PAHs) など取り扱っております。  
核燃料関連 (ウラン、トリウム、プルトニウム)、環境中放射能標準物質などもございます。



## Cole-Parmer 社 (旧 SPEX 社) 前処理機 (フリーザーミル・ボールミル)

## 凍結粉碎機 (Freezer/Mill)

粉碎容器にインバクター (粉碎棒) とサンプルを一緒に入れ、液体窒素にてサンプルを常時凍結させて運転を開始します。  
インバクターを磁化させ、往復運動させる事による衝撃でサンプルを粉碎します。  
やわらかいサンプルや熱に弱い生体サンプルに最適です。

〈サンプル例〉プラスチック、ゴム、生体サンプルなど、  
〈使用例〉ICP, XRF, GC, LCの前処理 DNA/RNAの抽出の前処理

## ボールミル (Mixer/Mill)

SPEX独自の8の字運動により、効率的な粉碎、混合が可能。  
サンプルに合った粉碎容器、ボールを選択可能。

〈サンプル例〉岩石、植物、錠剤、合金など  
〈使用例〉ICP, XRFの前処理 メカニカルアロイニング



## Environmental Express社 不純物証明&amp;目盛つき容器



## Environmental Express社製ポリプロピレンチューブの特長

## CertiTube

- ・不純物濃度証明書と公差証明書が付属 ⇒ メスアップや保存容器として使用でき容器の移し替え作業を削減できます。
- ・ガラス器具由来の金属コンタミリスクも軽減可能。110℃の耐熱性があり分解容器としても使用できます。  
※130℃以上の温度では使用できません。
- ・15,50mL容器は容器本体蓋の素材が同じ商品です。
- ・Certi Tubeはディスポーザブルで使用可能な価格設定です。
- ・時計皿、フィルターなどのオプションの取り扱いもございます。

## UltiTube

- ・超高純度UltiTubeは、68元素ppbおよびpptの低濃度が保証され、より低ブランクの測定を実現します。



取扱容量：15,50,100mL

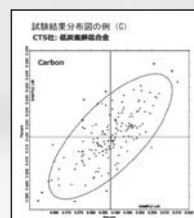
## 海外技能試験輸入代行サービス

## 技能試験 (外部精度管理) とは・・・

技能試験提供機関が提供する未知サンプルを分析することによって、分析者の分析技能を測るテストです。  
分析能力に関して中立的な評価が得られ、国内外の参加試験所と分析能力の比較が出来ます。

## 〈メーカー/サンプル例〉

- |   |                                |
|---|--------------------------------|
| ・LGC (ドイツ)：環境・食品・飲料・アルコール・微生物・化粧品・製薬・オイル・飼料 | ・iis (オランダ)：ポリマー (化学試験)・繊維・化粧品 |
| ・CTS (アメリカ)：鉄鋼・非鉄・樹脂                        | ・NSI (アメリカ)：飲料水・環境・食品・微生物・製薬   |
| ・NIL (中国)：ポリマー (化学試験・物性試験) 鉄鋼原料             | ・TESTVERITAS (フランス)：食品・食肉・野菜   |
| ・PTP (フランス)：非鉄関連・航空宇宙関連試験                   |                                |



YouTubeチャンネル【西進商事公式】

弊社取り扱い製品の情報を公開中です。(順次アップロード予定)



**SEISHIN**

標準物質専門商社

**西進商事株式会社**

<https://www.seishin-syoji.co.jp/>

本社 〒650-0047 神戸市中央区港島南町1丁目4番地4号  
TEL.(078)303-3810 FAX.(078)303-3822  
東京支店 〒105-0012 東京都港区芝大門2丁目12番地7号 (RBM芝パークビル)  
TEL.(03)3459-7491 FAX.(03)3459-7499  
名古屋営業所 〒450-0002 名古屋市中村区名駅4丁目2番25号 (名古屋ビルディング桜館4階)  
TEL.(052)586-4741 FAX.(052)586-4796  
北海道営業所 〒060-0002 札幌市中央区北二条西1丁目10番地 (ピア2・1ビル)  
TEL.(011)221-2171 FAX.(011)221-2010

# Jupiter

Solid nebulizer

レーザーアブレーションの  
“当たり前”を、もう一段上へ。

fsレーザー、ガルバノ光学系搭載により定量精度を確保したJupiter Solid nebulizer。  
新たに機能をアップグレードしました。

## 新機能

1. 強化された撮像系による高解像度試料観察
2. 片手で試料交換可能な新型スライドセルによる、  
位置再現性、メンテナンス性の向上
3. スポット径可変 (5~15  $\mu\text{m}$ ) \*
4. オートローダーによる自動測定 \*
5. 新開発2D・3Dソフトウェア (XQuant3D) \*
6. 無機有機ハイブリッド分析

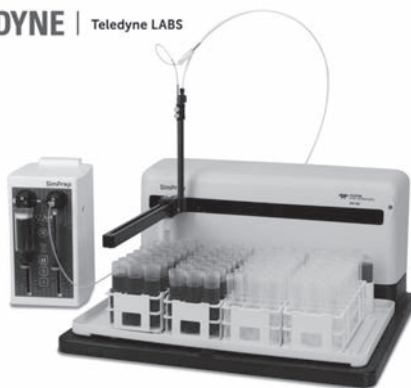
\*オプション



# SimPrep

精度と効率を両立する、前処理の新基準

TELEDYNE | Teledyne LABS



- 試料の希釈、混合、酸添加などの前処理を自動化し  
作業時間を大幅に短縮
- オペレーターの手作業を減らし、人的ミスの低減
- オフラインによる装置稼働率の向上、メンテナンスの簡素化

# MICAP

窒素が拓く、新世代のICP-OES

RADOM™



- 安価な窒素の使用によるランニングコストの低減
- Cerawave™技術によりチラー不要での運用を実現
- 小型化による省スペース設置が可能

S.T. JAPAN INC.

株式会社 エス・ティ・ジャパン

URL: <https://www.stjapan.co.jp>

東京本社／

〒103-0014 東京都中央区日本橋蛸殻町1-14-10

TEL: 03-3666-2561 FAX: 03-3666-2658

大阪支店／

〒540-6127 大阪府大阪市中央区城見2-1-61 ツイン21 MIDタワー

TEL: 06-6949-8444 FAX: 06-6449-8445

高分子材料分析の強力な戦力！  
マルチショット・パイロライザー

# EGA/PY-3030D

## 未知試料へ多面的にアプローチ

発生ガス分析や瞬間熱分析などの組み合わせにより  
未知試料を多面的に熱分解GC/MS分析

## 前処理なしで迅速に分析

あらゆる形態のポリマー試料を煩雑な前処理なしで  
簡単・迅速に分析

## 高性能で高信頼

サーモグラムとパイログラムの高い再現性を保証

## 豊富な周辺装置

目的に合わせて選べる周辺装置で分析業務をサポート

微量ポリマーの検出感度が大幅向上！  
**スプリットレス熱分解用オプション装置**  
**MFS-2015E**

キャピラリーGC分析における中・高沸点領域の  
異常ピーク形状を解消！  
**異常ピーク解消キット** **NEW**

試料水中のマイクロプラスチックを簡単に捕集！  
捕集から測定までスムーズな操作を実現  
**Smart 微粒子コレクター** **NEW**



## 迅速凍結粉碎装置 IQ MILL-2070

### 簡単操作！扱いやすい卓上型の粉碎装置

**静かな作動音** … 周辺での会話が可能（粉碎時の騒音参考値 55 dB）

**短時間 & パワフルに粉碎** … 高速上下ねじれ運動による効率的な粉碎

**試料に合わせた細かな条件設定** … 粉碎速度/時間/サイクル数の設定  
種類豊富な粉碎子と容器

**液体窒素消費量が少なく省エネ** … 液体窒素の最小消費量は約300 mL

**DNA抽出用に細胞破碎を効率化する専用モデルもございます**

高分子材料や生体試料などの  
粉碎・攪拌・分散に最適



製品情報

**フロンティア・ラボ 株式会社**

[www.frontier-lab.com/jp](http://www.frontier-lab.com/jp) [info@frontier-lab.com](mailto:info@frontier-lab.com)

高性能の熱分解装置/金属キャピラリーカラム/粉碎装置の開発・製品化に専念して、洗練された製品をお届けしています



# 標準物質



標準物質とは

分析機器の校正、性能向上  
分析技術の進歩、確立  
分析対象物の値づけ

に用いられます。

より正確な分析データを求めるには、高い信頼性のある標準物質を御使用下さい。

標準物質は以下の分野に数多くあります。

- |             |              |           |
|-------------|--------------|-----------|
| ・ 環境、生体、食物  | ・ ガラス、セラミックス | ・ 粘度、密度   |
| ・ 石炭、石油(燃料) | ・ 有機、無機分析    | ・ 比表面積、粒径 |
| ・ 残留農薬      | ・ 薬局方試料、臨床化学 | ・ X線分析各種  |
| ・ 金属、鉱石、鉱物  | ・ 抗血清        | ・ 放射能、核物質 |
| ・ ガス分析      | ・ 高分子(ポリマー)  | ・ 光学分析各種  |
| ・ 安定同位体     | ・ 熱分析各種      | ・ 度量衡     |

## ☆世界の代表的な標準物質製造・作成者一覧☆

NIST(NBS)/NATIONAL INSTITUTE OF STD. & TEC.	標準物質一般
LGC/LABORATORY OF THE GOVERNMENT CHEMIST.	標準物質一般
BCR/COMMUNITY BUREAU OF REFERENCE	標準物質一般
BAS/BUREAU OF ANALYSED SAMPLES LTD.	金属
SP <sup>2</sup> /SCIENTIFIC POLYMER PRODUCTS INC.	ポリマー
PL/POLYMER LABORATORIES LTD.	ポリマー
μM/MICRO MATTER CO.	けい光X線用薄膜
IAEA/INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY	生体・環境
NANOGEN/NANOGENS INTERNATIONAL	農薬(溶液、原体)
CANMET/CANADA CENTRE FOR MINERAL & ENERGY TEC.	鉱石・鉱物
NRCC/NATIONAL RESEARCH COUNCIL CANADA	水質環境用標準物質
ONL/OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY	安定同位体
KENT/KENT LABORATORYS	抗血清
DSC/DUKE SCIENTIFIC CORPORATION	球型、表面積
EP/EUROPEAN PHARMACOPOEIA	医薬品
USP/U.S.P. REFERENCE STANDARDS	医薬品
BP/BRITISH PHARMACOPOEIA	医薬品
NIES/国立環境研究所	環境・生体

ここに記載されている他にも、多数の標準物質を取り扱っております。  
カタログ及び資料希望、お問い合わせについては下記へご連絡下さい。

**GSC 株式会社 ゼネラルサイエンスコーポレーション**

〒170-0005 東京都豊島区南大塚3丁目11番地8号 TEL.03-5927-8356 (代) FAX.03-5927-8357  
ホームページアドレス <http://www.shibayama.co.jp> e-mail アドレス [gsc@shibayama.co.jp](mailto:gsc@shibayama.co.jp)

 **YASUI KIKAI**

SINCE 1953

再現性、精度、信頼性。  
37年以上の実績と公定法と学術論文。



**立体8の字®**

商標登録第 6576850号

**秒速粉碎機**

**マルチビーズショツカー®**

**Multi-beads Shocker®**



MB3000シリーズ

 卓上型・省スペース  極静音設計 40dB以下

製造発売元

 **安井器械株式会社**

本社・工場 〒534-0027 大阪市都島区中野町2-2-8

TEL.06-4801-4831

FAX.06-6353-0217

E-mail:s@yasuikikai.co.jp

<https://www.yasuikikai.co.jp>

©2026 Yasui Kikai Corporation, all rights reserved.

260101





FireSting O2-C 酸素モニター (4ch)

接続するセンサータイプを入れ替えることで、基本機能の光学式酸素モニタリング測定の外に光学式温度測定が可能な測定装置です。

- 一台で最大4チャンネル対応。項目の組合せは自由
- 気相および液相での測定に利用できます
- 酸素濃度測定用のセンサーには通常用と低濃度用があります
- 非接触型など様々なタイプのセンサーをラインナップ

光学式酸素モニタリング測定、光学式温度測定に加えて中性領域のpH測定機能が搭載された複合型の測定装置です。

- 一台で最大4チャンネル対応。項目の組合せは自由
- 測定可能なpH範囲が異なる4種のpHセンサー（PK5～PK8）、海水サンプルを対象とした全水素イオン濃度スケール（Total Scale）対応センサー（PK8T）より選択
- 最新のFireSting ProとpHセンサーの組み合わせの場合、初回使用時のみ校正不要で簡単に測定できます



FireSting pro マルチ分析計 (4ch)

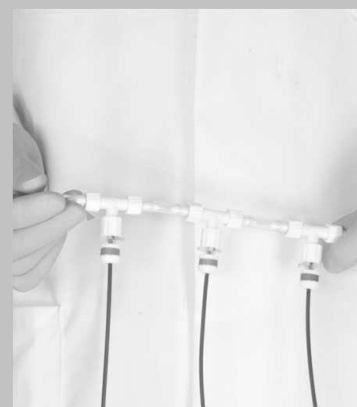
ミニプローブを  
溶液に挿して・・・



密閉容器内の酸素濃度や  
温度の測定に・・・



フローセルタイプで  
流体の測定に・・・



● 製品の外観、仕様は改良のため予告なく変更される場合があります。

**BAS** ビー・エー・エス株式会社

光学式センサーをはじめ各種のアクセサリーについては  
弊社ホームページでご確認下さい!!

本社 〒131-0033 東京都墨田区向島 1-28-12  
東京営業所 TEL: 03-3624-0331 FAX: 03-3624-3387  
大阪営業所 TEL: 06-6308-1867 FAX: 06-6308-6890

セミナー講演内容などビー・エー・エス株式会社の最新情報はメールニュースで随時配信しております。配信ご希望の方はお気軽にお問い合わせ下さい ⇒ E-mail: sp2@bas.co.jp

【ア行】

(株)エス・ティ・ジャパン…………… A1

【サ行】

(株)島津製作所…………… 表紙 2

西進商事(株)…………… 表紙 3

(株)ゼネラルサイエンス  
コーポレーション…………… A3

【ナ行】

日本分光(株)…………… 表紙 4

【ハ行】

ビー・エー・エス(株)…………… A8

フリッチュ・ジャパン(株)…………… A5

フロンティア・ラボ(株)…………… A2

【ヤ行】

安井器械(株)…………… A4

製品紹介ガイド…………… A6~7

分析試料の前処理作成用粉碎機

FRITSCH GERMANY



ドイツ フリッチュ社製

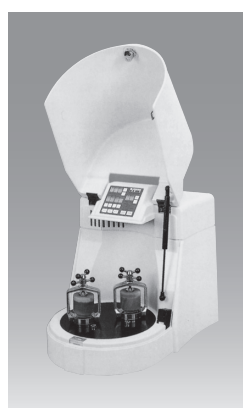
ミニミル P-23



- ナノ粒子を1-2分で作成
- 処理量0.1-5mlの少量試料作製に最適
- 重量7kg、寸法20×30×30cmと極めて小型
- 容器。ボールの材質はジルコニア、ステンレス、プラスチック
- 研究室だけでなく、DCを使って外部での使用も
- 更に、グローブボックス内での使用も可能
- マイクロチューブにも対応。Max 2ml×6個

ドイツ フリッチュ社製

遊星型ボールミル  
Classic Line P-7



- Fritsch 伝統の遊星型ボールミルの小型タイプ
- 容器のサイズは45ml、または12ml。2個搭載可能
- 容器、ボールの材質はメノウ、ジルコニア等7種類
- ポット回転数はMax1,600 rpmの強力パワー
- 試料作製だけでなく、本機目的の研究開発用機器としてもご使用いただけます

カタログおよび価格表は弊社にお問い合わせください

フリッチュ・ジャパン株式会社

本社 〒231-0023 横浜市中区山下町252  
大阪営業所 〒532-0011 大阪市淀川区西中島7-2-7  
福岡営業所 〒819-0022 福岡市西区福重5-4-2

info@fritsch.co.jp <https://www.fritsch.co.jp>

Tel (045)641-8550 Fax (045)641-8364  
Tel (06)6390-0520 Fax (06)6390-0521  
Tel (092)707-6131 Fax (092)707-6131

# IC-MS を用いたイオン性化合物の網羅分析

高橋 政 友

この度、2026 年の入門講座として「精密な定量解析を支える網羅分析：基礎技術から実践的応用まで」を企画いたしました。

網羅分析は、複雑なサンプルに含まれるさまざまな成分を包括的かつ高精度に解析する手法であり、複数の成分を同時に定量することが可能です。現在、環境分析、製薬、オミクス解析、材料科学など、幅広い分野でその重要性が増しており、膨大なデータを正確に解析し、必要な情報を迅速に抽出する能力が求められています。

本入門講座では、「精密な定量解析を支える網羅分析：基礎技術から実践的応用まで」と題しまして、網羅分析に必要な基本的な原理や手法、分析対象に対する包括的な理解とアプローチ方法についてご執筆いただきました。分析化学者が実際の解析業務に役立つ知識を深めるきっかけとなれば幸いです。

「ぶんせき」編集委員会

## 1 はじめに

液体クロマトグラフィーの一種であるイオンクロマトグラフィーは、主に水溶液中に存在するイオン性物質の分離に広く使用されるクロマトグラフィー技術である<sup>1)</sup>。イオンクロマトグラフ (IC) は高濃度の不揮発性の塩を溶離液として使用することから、これまで質量分析計 (MS) と接続することは技術的に困難であった (実際、揮発性の塩を溶離液として使用した IC-MS 分析事例も存在はしているものの、溶離液のイオン強度が低いために、ごく一部の化合物の分離・分析にしか適用できない)。この制約を克服する契機となったのが、1990 年に Simpson ら、あるいは Conboy らが報告した研究である<sup>2)3)</sup>。彼らは、溶離液中の不揮発性の塩を連続的に除去可能なサプレッサーを用いることで、IC と MS を直接接続した IC-MS を初めて構築することに成功した。この報告を契機として、IC-MS は環境研究や法医学の領域において、無機・有機化合物の分離、同定、定量分析に活用されるようになった。現在では、これらの研究領域に加えて、医薬品化学、食品、細胞生物学、メタボロミクスなど、さまざまな研究領域で幅広く応用されるようになった<sup>4)</sup>。筆者らの研究グループにおいても、メタ

ボロミクス研究に IC-MS を取り入れ、各種生物の生体内に含まれる高極性のイオン性代謝物を網羅的かつ精度よく分析できる手法を確立してきており、当該手法を用いた代謝研究で一定の成果を挙げている<sup>5)</sup>。本稿では、IC-MS の網羅分析への使用事例として、メタボロミクス研究 (各種生物の生体内に含まれるさまざまな代謝物の網羅的な解析) に焦点をあてて概説する。

## 2 イオンクロマトグラフ-質量分析 (IC-MS) について

### 2.1 IC-MS の概要

イオンクロマトグラフィーは、液体クロマトグラフィーの一種であり、溶離液を移動相、イオン交換体を固定相とした分離カラムを用いて試料中のイオン種成分を分離・定量する手法である<sup>6)</sup>。イオン種成分の検出には、電気伝導度検出器 (ECD) が頻用されており、その他にも紫外可視吸光検出器 (UV-Vis)、蛍光検出器 (FLD) など使用されている。近年では、サプレッサー (溶離液中の不要なイオンを除去する仕組み) の革新により、不揮発性の無機塩を嫌う MS も検出器の一つとして適用可能となっている。図 1 に IC-ECD-MS の装置構成を示す。

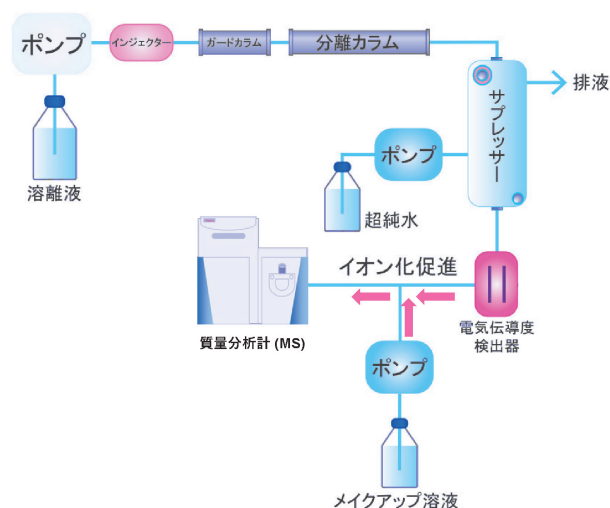


図 1 IC-ECD-MS の基本構成



IC-MSはその原理上、高極性のイオン性化合物の分離・分析に優れている。例えば、環境中に存在する過塩素酸塩や、農薬として用いられるグリホサートのような陰イオン、または生体試料中のヌクレオチドや糖リン酸といった代謝物が挙げられる<sup>7)</sup>。これら化合物は、従来、キャピラリー電気泳動-質量分析計(CE-MS)やイオンペア試薬を用いた逆相クロマトグラフ-質量分析計(IP-MS)、親水性相互作用クロマトグラフ-質量分析計(HILIC-MS)などを用いて分析されてきた。しかし、これらの分析手法は、分離能、感度、操作性、および分析系の運用といった観点において、それぞれに長所と短所を有している。例えば、CE-MSは化合物の分離性能に優れ、測定できるイオン性化合物の網羅性が高いという長所を有している。その反面、泳動時間の再現性が悪く、安定運用には高度な技術が必要となるといった短所が挙げられる。また、試料導用量が30 nL以下と少量であるため、微量化合物を検出するためには、前処理の工夫が必要となる。IP-MSは、特別な技術を必要とせず比較的感度でハイスループットな解析が可能である。ただし、イオンペア試薬が質量分析装置を汚染するため、専用機としての運用が必須となる。HILIC-MSは、IP-MSのように質量分析装置を汚染することはないが、異性体分離能や感度の点で十分とはいえない。一方、IC-MSは、異性体分離能、感度ともに優れており、保持時間やピークエリア値の再現性も高い。その結果、ピークアライメントやピーク同定などのデータ解析に要する時間を短縮でき、高精度な化合物同定が可能といった特徴を有している<sup>4)</sup>。

## 2.2 ICの装置構成

ICの基本的な構成は液体クロマトグラフ(LC)と同様、送液部、試料導入部、分離部から構成される<sup>8)9)</sup>。

### 2.2.1 送液部

送液部は脱気装置(デガッサー)、送液ポンプ、そしてミキサーから構成される。溶離液は一般的に酸性やアルカリ性であるため、接液部にはPEEK(ポリエーテルエーテルケトン)や人工サファイアなどの非金属の材質のものが用いられており、金属腐食や金属イオン溶出の影響を低減する工夫が施されている。

### 2.2.2 試料導入部

試料導入部は、ループインジェクション方式、ダイレクトインジェクション方式のいずれかが採用(一部、トラップ&エリユート方式を採用)され、いずれの方式でも一定量(数~数百μL)の試料を高い再現性で注入できるよう設計されている。さらに、送液ユニットと同様に接液部には非金属材質が用いられ、金属腐食や金属イオン溶出の影響を低減するだけでなく、試料中のリン酸

化合物など金属表面に吸着しやすい化合物の損失が抑制されている。

### 2.2.3 分離部

分離カラムには主としてポリスチレン、ポリメタクリレート、ポリビニルアルコールなどの基材にイオン交換基が導入されたものが用いられる。分析対象に応じて陽イオン交換カラムや陰イオン交換カラムが選択される。陽イオン交換モードでは、硝酸、塩酸、メタンスルホン酸などの酸性溶液を溶離液とし、陽イオン交換基(例えば硫酸や炭酸などの官能基を有するものなど)が導入されたカラムが使用される。一方、陰イオン交換モードでは、水酸化カリウムなどのアルカリ性溶液を溶離液とし、陰イオン交換基(例えば4級アミンなど)が導入されたカラムが用いられる。測定イオン種はカラム内でイオン交換体に一時的に保持され、その後、溶離液由来のイオンと交換されて溶出する。測定イオン種はイオン半径、価数、疎水性などの違いにより分離される。一般的に、価数の多いイオンほど強くイオン交換体に保持される傾向があり、疎水性の高いイオンほどイオン交換樹脂との相互作用が大きいため溶出が遅くなる<sup>10)</sup>。

## 2.3 ICとMSの接続を可能にしたサプレッサー

ICにおける分離対象は、イオンそのもの、あるいはイオンの状態になった化合物であることから、ICはMSに直接接続するのに非常に適合性の高い分離技術であると言われている。しかしながら、カラム分離後の移動相には溶離液(不揮発性の塩)が高濃度に含まれていることから、ICをそのままMSに接続すると、溶離液によるMS検出器のサチュレーションや、MSの物理的な損傷を引き起こす<sup>11)</sup>。近年の技術革新により、これら不揮発性の塩を連続的に高い効率で除去できるサプレッサーが開発されたことで、ICとMSを接続できるようになった。

サプレッサーは、“電気伝導度検出器を用いる場合、測定するイオン種成分の検出を損なうことなくバックグラウンドとなる電気伝導度を低減する装置”と定義されており、ICの検出器として頻用されている電気伝導度検出器における測定感度を高めるための装置と位置づけられている<sup>6)</sup>。図2に膜型の電解再生サプレッサーの動作原理の概要を示す(他にも様々な原理に基づいたサプレッサー装置が存在しているがここでは割愛する)。陽イオン交換モードにおけるサプレッサーの内部において、メタンスルホン酸溶離液に由来するメタンスルホン酸イオンは、イオン交換によって水酸化物イオン(陰極での水の電気分解によって生成)と交換され、流路内から除去される。同様に、陰イオン交換モードでは、溶離液として使用される水酸化カリウム溶液に由来するカリウムイオンが、陽極での水の電気分解によって生成され

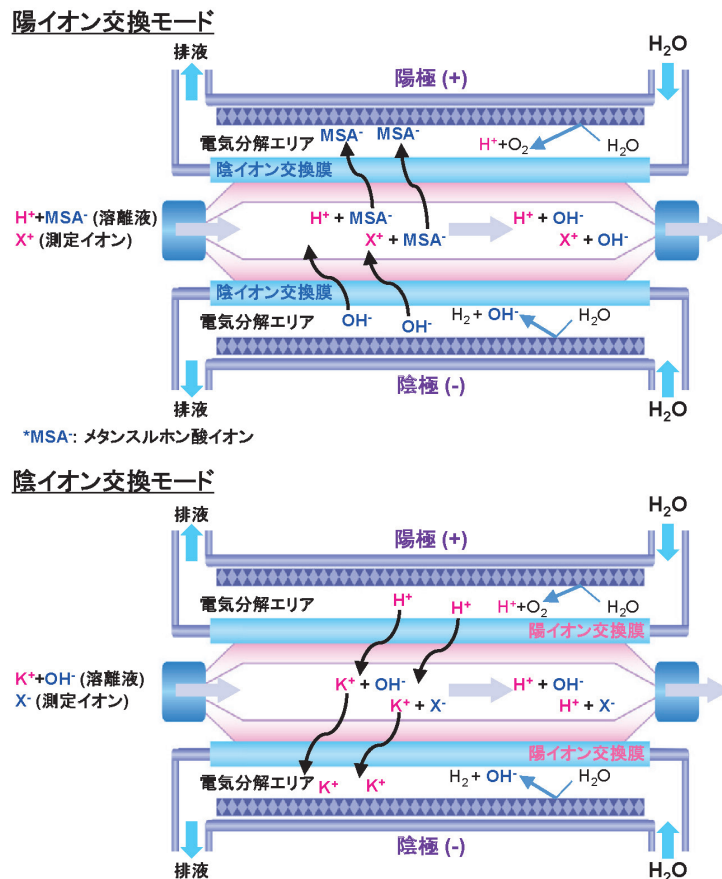


図2 電解再生サプレッサー（膜型）の動作原理の概要図

る水素イオンと交換されることで、流路内から除去される。酸性、あるいは塩基性の溶離液中に含まれる高濃度の不揮発性の塩由来のカウンターイオンと、水の電気分解で生成される水酸化物イオン、あるいは水素イオンが交換されるといった、いわゆる“脱塩処理”は、水が電気分解されている限り連続的に行われる。この“脱塩処理”により、電気伝導度検出器におけるバックグラウンドの低下と、S/N（シグナル/ノイズ）比が改善し、測定対象イオン種成分の高感度分析が可能となる。さらに、ICとMSを接続したIC-MSにおいて、安定したルーチン分析を実現している。

### 3 IC-MS に供するための試料調製法

IC-MS を用いて試料中のイオン種成分を網羅的に分析するためには、対象となるイオン種を保持しつつ、分析に干渉する夾雑成分（マトリクス）を効果的に除去することが必要不可欠である。特に、水溶性タンパク質および脂質は、IC-MS における主要な阻害要因である。水溶性タンパク質については、ヒト血液試料を用いた予備的検討において、除去が不十分な場合（BCA タンパク定量結果：＜ 0.1 mg/mL）には数回の試料導入でサプレッサーに不可逆的な損傷を生じ、装置の継続使用が困難となることが確認された。脂質についても十分に除去できていない場合には、カラム基材との疎水性相互作用によ

組織: 10 ~ 100 mg F.W. (1 ~ 10 mg D.W.)  
細胞, 微生物:  $1 \times 10^6 \sim 1 \times 10^7$  cells  
血漿/血清: 10 ~ 50  $\mu$ L  
尿: 50 ~ 200  $\mu$ L

- メタノール（内部標準物質を含む）を1 mL添加
  - 1分間ボルテックス
  - 5分間超音波破碎
  - 遠心分離 (15,000  $\times$  g, 5 min, 4  $^{\circ}$ C)
  - 上清を400  $\mu$ L回収
  - クロロホルムを400  $\mu$ L, 水を320  $\mu$ L添加  
メタノール/クロロホルム/水 (5/5/4)
  - 遠心分離 (15,000  $\times$  g, 5 min, 4  $^{\circ}$ C)
  - 上相を500  $\mu$ L回収
  - 遠心エバポレーターにより  
サンプル乾固
  - 水50  $\mu$ Lで再溶解
- IC-MS分析

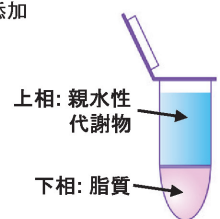


図3 各種生体試料を対象としたサンプル調製ワークフロー

り保持され、カラム圧力の上昇を引き起こすことが観察された。これらの知見から、生体試料を対象とするIC-MSにおいては、効率的な除タンパクと除脂質がサンプル調製に求められる要件であると考えられる。この要件を満たすため、筆者らは各種生体試料に適用可能な試料調製法を確立した（図3）。当該試料調製法は、まず

メタノールを用いた抽出により測定対象イオン種の抽出と同時に除タンパクを行う。続いて、抽出液に水およびクロロホルムを添加し、最終的にメタノール/クロロホルム/水の比率を5/5/4に調整することで相分離を生じさせ、脂質をクロロホルム相に除去する。本法により、試料中のイオン種成分をタンパク質および脂質から分離して抽出・粗精製することができ、高い再現性をもって安定的な分析が可能となる。

#### 4 メタボロミクス研究における IC-MS

IC-MS は、分析対象（陽イオン、陰イオン）に応じて陽イオン交換モードと陰イオン交換モードを使い分ける必要があることから、一度の分析で両イオン種を同時に測定することを目的とした場合、他の分析手法と比べてスループットの点で不向きである。しかしながら、IC-MS は異性体の識別に優れ、高感度分析が可能であることから、異性体関係にある代謝物や生体内にごく微量しか存在しない代謝物を詳細に解析できるという利点を有する<sup>12)13)</sup>。この特徴は、代謝物の網羅分析に資する分析手法としての可能性を示している。ここでは、これら IC-MS の特性を踏まえ、メタボロミクス研究（各種生物の生体内に含まれるさまざまな代謝物の網羅的な解析）における IC-MS の適用事例について紹介する。

##### 4.1 陽/陰イオン交換モードを併用したイオン性代謝物の網羅分析

生命活動を担う主幹代謝経路上の中間代謝物の多くは、高極性のイオン性代謝物（陽イオン、陰イオン、両性イオン）であり、これら代謝物を正確に分析することは、生命システムの理解に大きく貢献しうる。筆者らはこれまでに IC の分離条件、および MS の分析条件の最適化を検討してきた。陽イオン性代謝物分析には、溶離液にメタンスルホン酸、分離カラムには陽イオン交換カラム（Dionex IonPac CS19-4  $\mu\text{m}$ ）を使用し、陰イオン性代謝物の分析には、溶離液に水酸化カリウム、分離カラムには陰イオン交換カラム（Dionex IonPac AS11-HC-4  $\mu\text{m}$ ）を使用した。また、測定対象代謝物の分離・溶出には、各溶離液のグラジエント溶出条件下（10～100 mM）で実施した。IC および MS の詳細な分析条件については表 1 に示す。

構築した分析条件により、600 種類の親水性代謝物標準品（陽イオン性代謝物、陰イオン性代謝物、あるいは両性イオンの性質を有する代謝物）を分析した結果、359 種類の代謝物について分離・分析が達成された。一方で、ポリフェノールなどの疎水性の高い代謝物（ $\text{Log}P > 2$ ; ChemAxon を用いた予測値）は測定できなかった（イオン交換樹脂に強く保持されてしまい、カラムから溶出されないと推定される）。また、糖類、糖アルコール類については、検出はされたものの、異性体分離が不

表 1 IC-MS 分析条件

##### IC 分析条件（陽イオン交換モード）

装置： ICS-5000+ HPIC System (Thermo Fisher Scientific)  
 流速： 0.3 mL/min  
 カラム： Dionex IonPac CS17-4  $\mu\text{m}$ , 2 × 250 mm (Thermo Fisher Scientific)  
 ガードカラム： Dionex IonPac CG17-4  $\mu\text{m}$ , 2 × 50 mm (Thermo Fisher Scientific)  
 カラムオープン温度： 30 °C  
 インジェクションボリューム： 5 mL  
 サプレッサー： CERS 500e (2 mm)  
 サプレッサー供給電流： 88 mA  
 メイクアップ溶液： 1 mM ギ酸 in メタノール  
 メイクアップ溶液流量： 0.1 mL/min  
 溶離液： メタンスルホン酸溶液  
 溶離液グラジエント条件：

Time (min)	MSA (mM)
0.0	10
24.0	100
27.0	100
27.1	10
35.0	10

##### IC 分析条件（陰イオン交換モード）

装置： ICS-5000+ HPIC System (Thermo Fisher Scientific)  
 流速： 0.3 mL/min  
 カラム： Dionex IonPac AS11-HC-4  $\mu\text{m}$ , 2 × 250 mm (Thermo Fisher Scientific)  
 ガードカラム： Dionex IonPac AG11-HC-4  $\mu\text{m}$ , 2 × 50 mm (Thermo Fisher Scientific)  
 カラムオープン温度： 30 °C  
 インジェクションボリューム： 5 mL  
 サプレッサー： AERS 500e (2 mm)  
 サプレッサー供給電流： 75 mA  
 メイクアップ溶液： 1 mM 酢酸アンモニウム in メタノール  
 メイクアップ溶液流量： 0.1 mL/min  
 溶離液： 水酸化カリウム溶液  
 溶離液グラジエント条件：

Time (min)	KOH (mM)
0.0	10
24.0	100
27.0	100
27.1	10
35.0	10

##### MS 分析条件

装置： Q Exactive Orbitrap 質量分析計 (Thermo Fisher Scientific)

Polarity	陽イオン分析モード	陰イオン分析モード
シースガス流量	50 arb	50 arb
オグジュアリーガス流量	10 arb	10 arb
スプレー電圧	4.0 kV	−3.0 kV
キャピラリー温度	250 °C	250 °C
S レンズレベル	60	60
ヒーター温度	400 °C	400 °C

極性	陽イオン分析モード	陰イオン分析モード
フルスキャンモード		
分解能	70000	70000
AGC target	$3 \times 10^6$	$3 \times 10^6$
Maximum IT	200 ms	200 ms
スキャンレンジ	70～1050	70～1050



十分であった。解糖系、ペントースリン酸経路、TCA 回路、核酸代謝、そしてアミノ酸代謝などの主幹代謝経路上の代謝物中間体のうち、主要なものを図 4a に示す。また、359 種類の代謝物について、各化合物クラスの内訳とその詳細を図 4b、表 2 にまとめた。これら代謝物の中には、ヌクレオチドや糖リン酸など、IP-MS、HILIC-MS では検出が困難であった代謝物が含まれていた。これらは高極性の陰イオン性代謝物であり、その構造中にリン酸基を有することから強い金属配位性を示す。そのため、従来の分析手法では、ステンレス製配管やバルブなど接液部における金属吸着が生じやすく、ピークテーリングに伴う感度低下と再現性の悪化が生じる可能性が指摘された。一方で IC-MS を用いた場合、

これらの代謝物に対しても良好なピーク形状を維持した状態で分離・分析が可能であり、再現性の高い測定が可能であった（図 5）。これは、ヌクレオチドや糖リン酸が IC における「イオン交換体と測定対象イオン種との相互作用」に基づく分離特性に適していること、さらに IC 装置の接液部が PEEK 樹脂などの非金属材料で構成されていることにより、金属吸着が抑制されているためであると考えられる。

本分析システムは、解糖系、ペントースリン酸経路、クエン酸回路、核酸代謝などの主幹代謝経路中間体を包括的かつ高感度で測定可能であり、保持時間およびピークエリアの再現性がきわめて高い実用的な分析手法であることが示された。

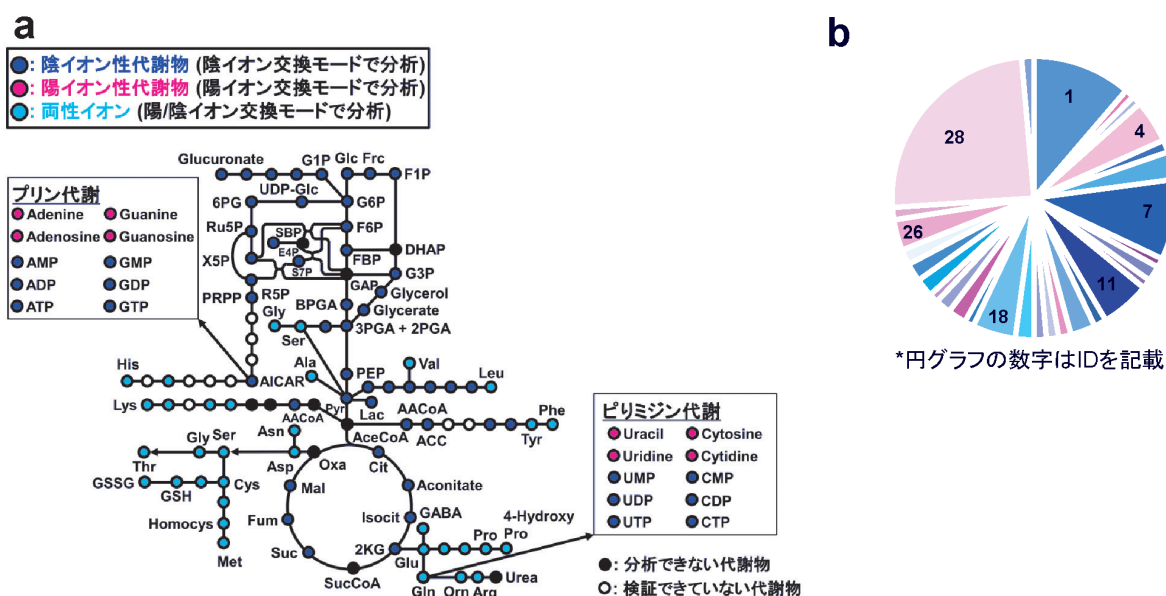


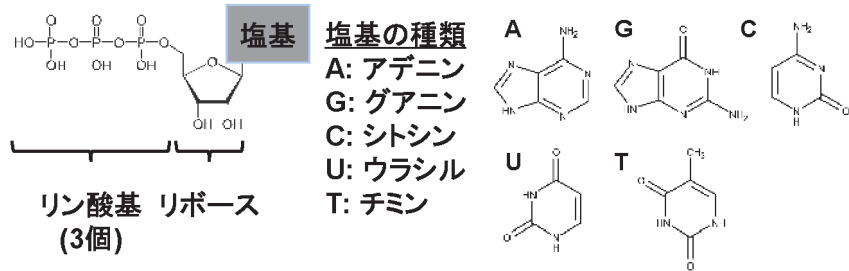
図 4 陽/陰イオン交換モード併用によって分析できる代謝物；化合物クラスの内訳

表 2 化合物クラスの内訳

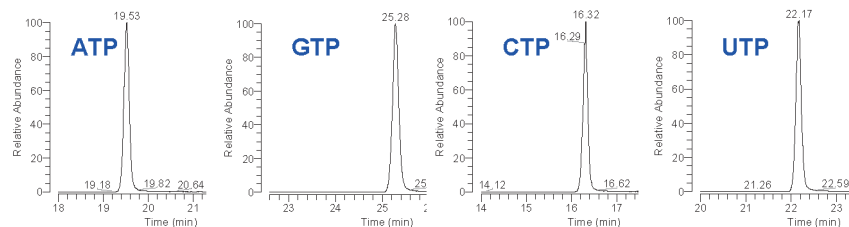
ID	化合物クラス <sup>a</sup>	化合物 (%)	ID	化合物クラス <sup>a</sup>	化合物 (%)
1	Amino acids, peptides, and analogues	11	16	Purine deoxyribonucleotides	1
2	Aminosaccharides	1	17	Purine nucleotide sugars	2
3	Benzamides	1	18	Purine ribonucleotides	5
4	Benzoic acids and derivatives	5	19	Pyridinecarboxylic acids and derivatives	1
5	Cyclic alcohols and derivatives	1	20	Pyrimidine 2'-deoxyribonucleosides	2
6	Dicarboxylic acids and derivatives	3	21	Pyrimidine deoxyribonucleotides	2
7	Fatty acids and conjugates	9	22	Pyrimidine nucleotide sugars	1
8	Gamma-keto acids and derivatives	1	23	Pyrimidine ribonucleotides	2
9	Glycosyl compounds	2	24	Pyrimidines and pyrimidine derivatives	2
10	Hydroxycinnamic acids and derivatives	1	25	Short-chain keto acids and derivatives	2
11	Monosaccharides	6	26	Sugar acids and derivatives	4
12	Phenols and derivatives	1	27	Sugar alcohols	1
13	Phenylacetic acid derivatives	3	28	The others	25
14	Phenylpropanoic acids	1	29	Tricarboxylic acids and derivatives	1
15	Phosphate esters	1			

a 化合物クラスは Human Metabolome Database の “Sub Class” 情報に基づいて分類 (<https://www.hmdb.ca/>)

\* 化合物数が 4 個未満の化合物クラスについては “The others” に統合 (統合前は 72 種類の化合物クラスが存在)



### STD



### HeLa細胞抽出液

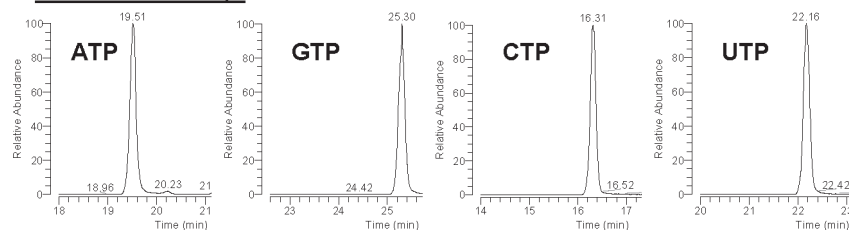
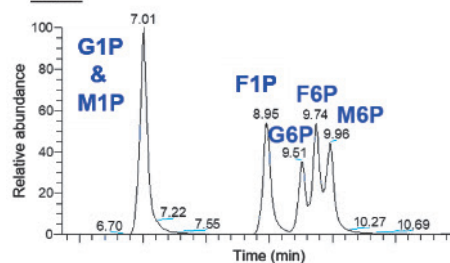
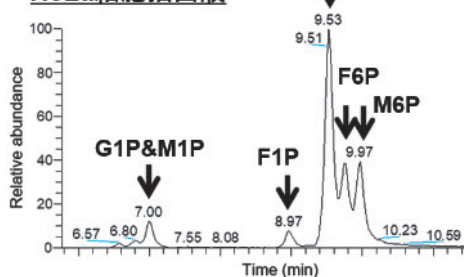


図5 スクレオチドの分析事例

### STD



### HeLa細胞抽出液



### G1P: グルコースーリン酸

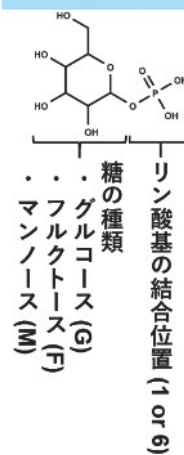


図6 ヘキソースモノリン酸における異性体分離分析事例

## 4.2 IC-MS が有する高い異性体識別能と高感度分析

生体内には多数の構造異性体および立体異性体が存在し、それぞれ特異的な機能を有していることが知られている。しかしながら、これらの異性体はMSのみでは識別が困難であるため、クロマトグラフィーによる分離が不可欠である。例えば、主幹代謝経路上の中間代謝物で

あるヘキソースーリン酸は、糖の種類（グルコース、フルクトース、マンノース）およびリン酸基の結合位置の違いにより複数の構造異性体が存在する。IC-MSを用いることで、標準品のみならず細胞抽出サンプルにおいても、これら構造異性体を高い再現性で分離・分析できることが明らかとなった（図6）。

IC-MS は、優れた分離性能を示すとともに、高感度な代謝物分析が可能である。例えば、ヒト培養細胞から cAMP などの微量な二次情報伝達物質の検出が可能である。また、主幹代謝経路上の中間代謝物である糖、有機酸、糖リン酸、ヌクレオチドなどの陰イオン性代謝物を対象に、HILIC-MS と IC-MS との感度比較を行ったところ、ほとんどの代謝物において IC-MS が HILIC-MS に比べて約 100 倍の検出感度を示すことが明らかとなった<sup>13)</sup>。これらの知見は、IC-MS は高感度かつ高分離能を有することを示しており、高極性イオン性代謝物の網羅的解析における有用性を示唆している。

## 5 おわりに

サブレッサー技術の革新により、IC と MS を接続した IC-MS が実用化されて以来、IC-MS は無機イオン分析にとどまらず、生物由来のイオン性化合物の解析にも幅広く活用されるようになってきた。現在の主要な応用分野は、環境研究や法医学であるが、近年は医薬品化学、食品化学、臨床科学、細胞生物学、メタボロミクスへの展開も進んできている。IC-MS はシステムの安定性、保持時間の再現性、感度、さらには異性体識別において優れた特性を示し、他のクロマトグラフ-質量分析計の代替的あるいは補完的な分析計としての地位を確立している。特に、生体試料のような複雑なマトリクス中の高極性のイオン性化合物を解析対象とする場合、IC-MS の適用可能性は極めて高い。今後、さらなる技術開発の進展とともに、より多くの研究者が IC-MS を利用し、当該手法が次世代の分析化学におけるキラーテクノロジーとして発展していくことを期待する。

## 文 献

- 1) H. Small, T. S. Stevens, W. C. Bauman : *Anal. Chem.*, **47**, 1801 (1975).
- 2) R. C. Simpson, C. C. Fenselau, M. R. Hardy, R. R. Townsend, Y. C. Lee, R. J. Cotter : *Anal. Chem.*, **62**, 248 (1990).
- 3) J. J. Conboy, J. D. Henion, M. W. Martin, J. A. Zweigenbaum : *Anal. Chem.*, **62**, 800 (1990).
- 4) J. B. Ngere, K. H. Ebrahimi, R. Williams, E. Pires, J. Walsby-Tickle, J. S. O. McGullagh : *Anal. Chem.*, **95**, 152 (2023).
- 5) R. Mizuno, H. Hojo, M. Takahashi, S. Kashio, S. Enya, M. Nakao, R. Konishi, M. Yoda, A. Harata, J. Hamanishi, H. Kawamoto, M. Mandai, Y. Suzuki, M. Miura, T. Bamba, Y. Izumi, S. Kawawoka : *Nat. Commun.*, **13**, 3346 (2022).
- 6) JIS K 0127, イオンクロマトグラフィー通則 (2013).
- 7) H. G. Gika, G. A. Theodoridis, R. S. Plumb, I. D. J. Wilson : *Pharm. Biomed. Anal.*, **87**, 12 (2014).
- 8) 吉村和恵, 鈴木隆弘, 関口陽子 : 表面技術, **63**, 495 (2012).
- 9) 森 勝伸 : ぶんせき (*Bunseki*), **2023**, 216.
- 10) J. S. Fritz : *J. Chromatogr. A*, **1085**, 8 (2005).
- 11) Y. Sekiguchi, N. Mitsuhashi, T. Kokaji, H. Miyakoda, T. Mimura : *J. Chromatogr. A*, **1085**, 131 (2005).
- 12) A. Hirayama, S. Tabata, R. Kudo, M. Hasebe, K. Suzuki, M. Tomita, T. Soga : *J. Chromatogr. A*, **1619**, 460914 (2020).
- 13) J. Wang, T. T. Christison, K. Misuno, L. Lopez, A. F. Huhmer, Y. Huang, S. Hu : *Anal. Chem.*, **86**, 5116 (2014).



高橋 政友 (TAKAHASHI Masatomo)

九州大学生体防御医学研究所メタボロミクス分野 (〒812-8582 福岡県福岡市東区馬出 3-1-1)。大阪大学大学院工学研究科。博士 (工学)。《現在の研究テーマ》質量分析を基盤とした次世代メタボロミクス解析技術の開発と応用。《趣味》読書、音楽。  
E-mail : m-takahashi@bioreg.kyushu-u.ac.jp