

EICA

Journal of EICA

環境システム計測制御学会

The Society of Environmental Instrumentation, Control and Automation

●特集 環境モニタリング分野で活躍する大気・ガス計測技術

特集によせて

大気中温室効果気体の計測および観測手法の進展

光化学オキシダント問題の現状と計測技術

鉄を含んだ大気エアロゾルのモニタリングと数値モデルの学際的研究

健康リスク低減に貢献するエアロゾル粒子の化学成分の測定とデータ解析

環境大気モニタリングで活躍する自動計測機器

●令和7年度EICA総会

開催挨拶

令和7年度EICA総会・講演会報告

「令和6年度論文賞」報告

令和6年度論文賞：受賞者の声

●連載 自治体環境職種エキスパートの目

——次世代を担うエキスパートの芽

●エッセイ 大切にしているもの三題

2025
Vol.30 No.1

The logo for EICA, featuring the letters 'EICA' in a bold, green, sans-serif font. The letters are partially enclosed by a blue and green swoosh that curves around them, suggesting a globe or a dynamic path.

次の時代に、新しい風を吹き込んでいきます。



時代はいま、新しい息吹を求めて、大きく動きはじめています。

今日を生きる人々がいつも元気でいられるように、

明日を生きる人々がいつもいきいきとしていられるように。

日立グループは、人に、社会に、次の時代に新しい風を吹き込み、

豊かな暮らしとよりよい社会の実現をめざします。

HITACHI

日立の樹オンライン www.hitachinoki.net

株式会社 日立製作所 〒100-8280 東京都千代田区丸の内一丁目6番6号 電話(03)3258-1111(大代)

METAWATER メタウォーター株式会社

川を守りたい。

透き通った川は、魚が生き生きと泳いでいるのがよく見える。
水面に映る木々の緑もきれいだね。

メタウォーターは
私たちが使った水をきれいに
処理して戻すことで川と自然を
守り続けます。

続ける。続けるために。

水・環境インフラのトータルソリューションカンパニー
<https://www.metawater.co.jp/>





いのちの水を守る

私たちは、東京都水道局とともに
東京の水道事業を最前線で支え、
安全でおいしい水を皆さまにお届けし、
国内外の水道事業運営に貢献します。

東京水道グループ



東京都水道局が出資する会社です



東京水道株式会社



新卒採用情報
(マイナビ2026)



キャリア活用
中途採用情報



サステナブルな 水の未来をひらく

MEIDEN
Quality connecting the next



Water Circulation City

株式会社 明電舎

明電舎 水インフラ





未来のために、水と対話しよう。

日々、水の声に耳を澄ましているのは、あなただけではありません。

今この瞬間にも世界中に、環境汚染や水不足といった、

水に関わる課題と向き合う仲間がいます。

HORIBAもそのひとり。

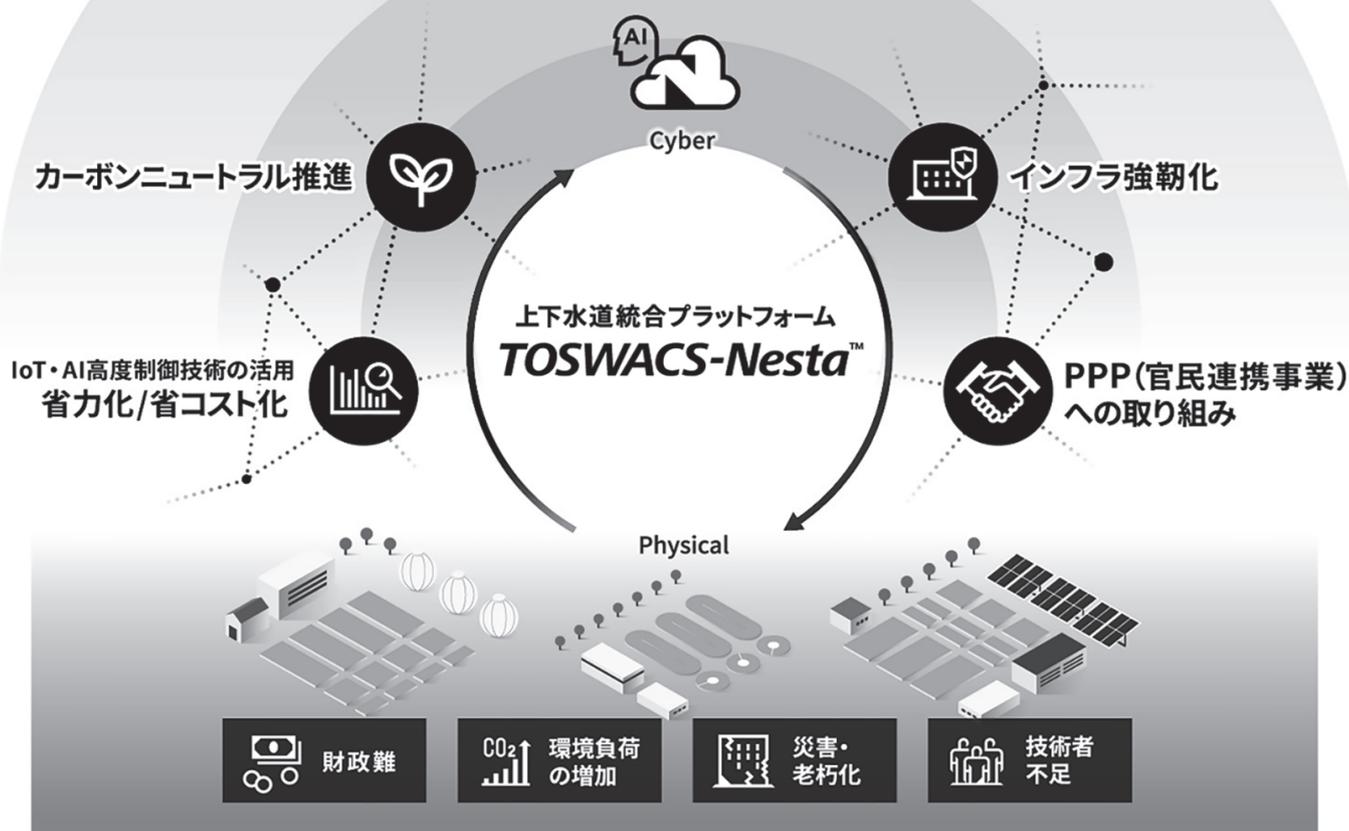
世界中のあらゆる水質を守り、水・液体計測を通じてすべての人々に豊かさを届けます。



<http://www.horiba-adt.jp>

TOSHIBA

ともに創る、水の未来 上下水道インフラの持続的発展



東芝グループは、お客様とともに水の未来を見据え、
様々な社会課題の解決に貢献します。

これまで培ってきた水処理・監視制御やIoT・AIの技術と
確かな信頼を礎にお客様とともに新たな価値を創出し、
上下水道インフラの持続的な発展を実現してまいります。

お客様から学び、お客様とともに歩み続けること、
それが、これからも変わらない「東芝グループ」の想いです。

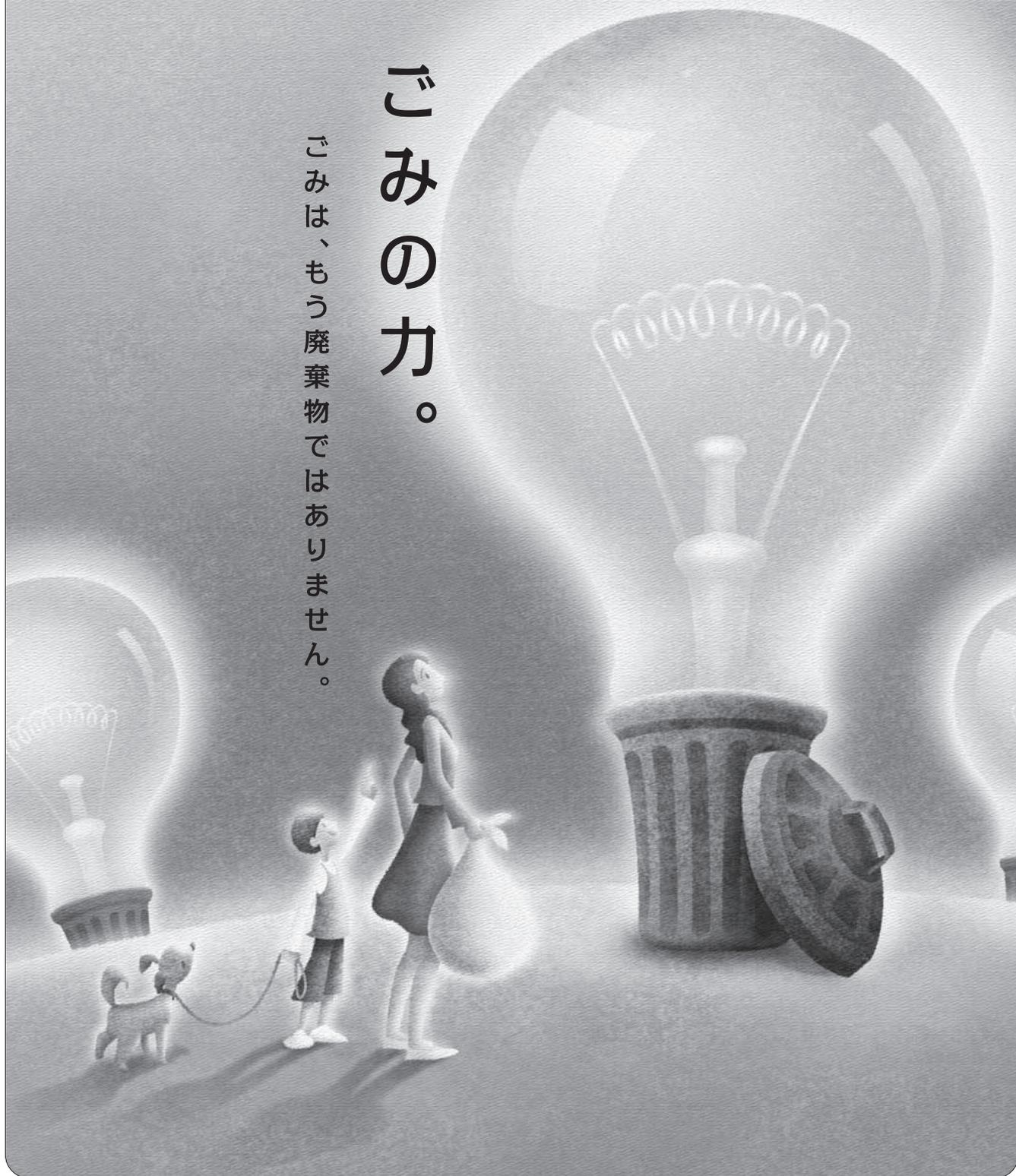
株式会社 東芝 社会システム事業部

〒212-8585 神奈川県川崎市幸区堀川町72番地34 TEL:044-576-6629
URL: <https://www.global.toshiba/jp/products-solutions/social/water-environmental.html>

TAKUMA

ごみの力。

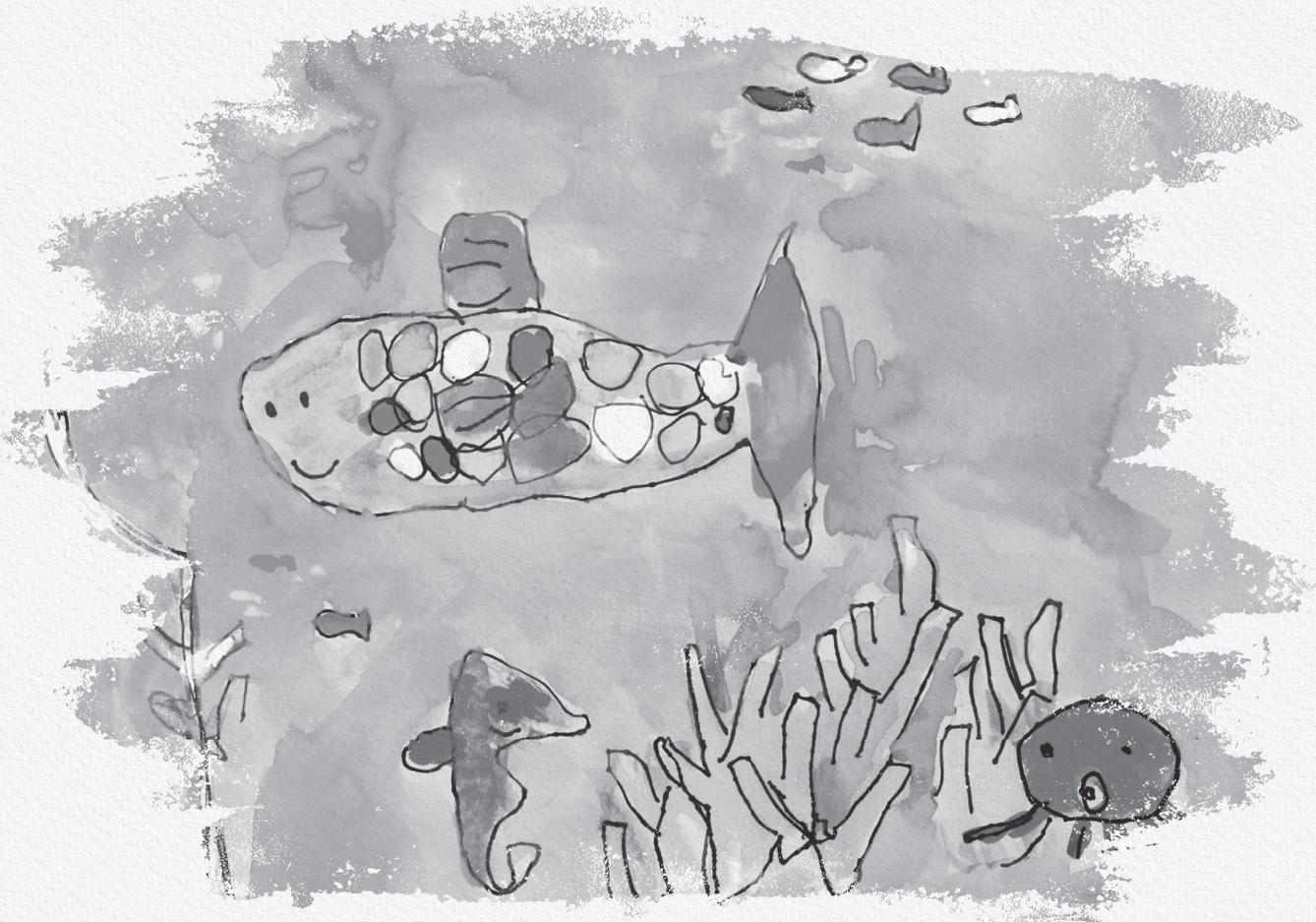
ごみは、もう廃棄物ではありません。



株式会社 タクマ

本 社／兵庫県尼崎市金楽寺町2丁目2番33号 電話(06)6483-2609
東京支社／東京都港区芝浦3丁目9番1号 電話(03)5730-9200
支 店／北海道、東北、中部、九州 事務所／大阪 工場／播磨

www.takuma.co.jp



ずっと、ずっと、水が彩る未来へ。

「水」の総合力で、
持続可能な社会へ。
私たち水ingは、
水インフラの分野で
長年培ってきた経験と
技術を活かし、
SDGsの
目標達成をめざして
潤いのある未来を
描いていきます。

水ing
Swing Corporation

SUSTAINABLE DEVELOPMENT GOALS | 6 11 12 13

水ingは持続可能な開発目標（SDGs）を支援しています

水ing AM **水ing エンジニアリング**

水ing 株式会社 〒105-0021 東京都港区東新橋 1-9-2 汐留住友ビル 27 階 tel.03-4346-0600 <https://www.swing-w.com>

会 告

■第37回 環境システム計測制御学会 (EICA) 研究発表会参加募集について

当学会では次の通りに、第37回環境システム計測制御学会 (EICA) 研究発表会を岡山大学 創立五十周年記念館 (岡山市) で開催致します。本年8月下旬よりホームページにて、研究発表会のプログラムの公開、参加募集を開始いたします。皆様のご参加を心よりお待ちしております。

【第37回 EICA 研究発表会 概要】

会期：令和7年11月12日(水)・13日(木)

会場：岡山大学 創立五十周年記念館 (〒700-8530 岡山県岡山市北区津島中1丁目1番1号)

(1日目) 研究発表会：基調講演・特別講演・論文発表・ポスター発表・交流会

(2日目) 見学会：岡山市および倉敷市で調整中

【参加費】

●第1日目 研究発表会

区 分	会 員	非 会 員
一 般	11,000	13,000
官公庁・教育機関	6,000	8,000
学 生	3,000	

※ 参加費に交流会費、見学会費は含まれません。交流会は自由参加ですが、事前登録が必要です。

※ 論文発表者には論文掲載料 (査読付論文 15,000 円/編, 一般論文 10,000 円/編) を、別途請求致します。

●第2日目 見学会：10,000 円 (移動費等を含む)

【参加申込方法】 受付開始：8月下旬頃

当学会ホームページに「第37回 EICA 研究発表会参加募集」のバナーを作成します。そちらからお申込みください。

お申込みの受付完了後に、事務局より参加証とご請求書 (参加費と見学会費) をお送りいたしますので、事前のご入金と、参加証の当日のご持参をお願いいたします。

【奨励賞の表彰】

研究発表会では、研究者の一層の研鑽を願い、表彰制度を設けています。

査読付論文、一般発表の中から優秀かつ将来性のある論文を当学会選考委員会にて選出し、表彰されます。

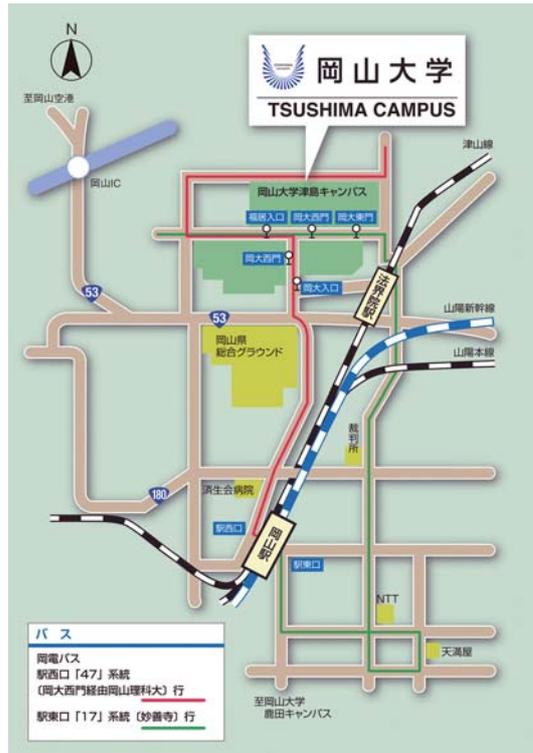
【参加申込み等 お問い合わせ先】

環境システム計測制御学会事務局：担当 国島・酒本

〒573-1116 大阪府枚方市船橋本町1-775 (株)Atalacia 内

TEL：072-807-3890 FAX：072-807-3898 E-mail：info@eica.jp

【会場アクセス】 研究発表会会場：岡山大学 創立五十周年記念館



津島キャンパス



住所：〒700-8530 岡山県岡山市北区津島中1丁目1番1号

<https://www.okayama-u.ac.jp/tp/profile/50kinenkan02.html>

交通のご案内

- ▶ 岡山駅運動公園口（西口）バスターミナル 22 番乗り場から【47】系統「岡山理科大学」行きに乗車「岡大西門」で下車



Vol. 30 No. 1
2025年 7月

The Society of
Environmental Instrumentation,
Control and Automation

Journal of EICA

環境システム計測制御学会誌 目次

●会 告

第37回 環境システム計測制御学会（EICA）研究発表会参加募集について

●特 集 環境モニタリング分野で活躍する大気・ガス計測技術

特集によせて	(株)堀場アドバンステクノ	川口 佳彦	1
大気中温室効果気体の計測および観測手法の進展	(国研)国立環境研究所	奈良 英樹	2
光化学オキシダント問題の現状と計測技術	大阪公立大学	定永 靖宗	7
鉄を含んだ大気エアロゾルのモニタリングと 数値モデルの学際的研究	(国研)海洋研究開発機構	伊藤 彰記	13
健康リスク低減に貢献するエアロゾル粒子の 化学成分の測定とデータ解析	(国研)国立環境研究所 環境リスク・健康領域	藤谷 雄二	17
環境大気モニタリングで活躍する自動計測機器	東亜ディーケーケー(株)	加賀健一郎	22

●令和7年度総会

開催挨拶	EICA 会長 京都大学大学院工学研究科	高岡 昌輝	26
令和7年度 EICA 総会・講演会報告	EICA 事務局長 立命館大学理工学部	佐藤 圭輔	27
「令和6年度論文賞」報告	環境システム計測制御学会 選考委員会委員長 メタウォーター(株)	田子 靖章	30

編集：学会誌「EICA」編集委員会
学会誌の論文全文を下記URLで閲覧することができます。(会員無料/非会員1論文1,000円)
URL: <http://eica.jp>

●令和6年度 論文賞：受賞者の声	三菱電機(株)	林 佳史	32
	国土技術政策総合研究所	山下 洋正	32
●連載 自治体環境職種エキスパートの目 ——次世代を担うエキスパートの芽	京都市上下水道局 技術監理室 水質管理センター	外川 弘典	33
●エッセイ 大切にしているもの三題	EICA 名誉会員 月島 JFE アクアソリューション(株)	小浜 一好	35
●会 則			37
●投稿規程			41
●細 則			43
●編集後記			巻末



Vol. 30 No. 1
2025 July

The Society of Environmental Instrumentation, Control and Automation

Journal of EICA

CONTENTS

Announcement : The 37th Conference

Special Feature : Atmosphere and Gas Measurement Technology for the Environmental Monitoring Field

Preface for Special Feature	Yoshihiko KAWAGUCHI	1
Progress in Methods for Measurement and Observation of Atmospheric Greenhouse Gases	Hideki NARA	2
Current Situation of the Photochemical Oxidant Issue and the Measurement Techniques	Yasuhiro SADANAGA	7
Interdisciplinary Research on Monitoring and Numerical Modeling of Atmospheric Iron-containing Aerosols	Akinori ITO	13
Measurement and Data Analysis of the Chemical Composition of Aerosol Particles for Health Risk Reduction	Yuji FUJITANI	17
Automatic Monitoring System for Air Monitoring	Kenichiro KAGA	22

Annual Meeting

Opening Greeting Report	Masaki TAKAOKA	26
2025 Annual Meeting	Keisuke SATO	27
Comments on Prize-winning Papers	Yasuaki TAGO	30

Editing : "Journal of EICA" editing committee
A member of the society can read full papers in the journal at the following:
URL : <http://eica.jp>

Message from the Winner (Ronbun Sho Prize) Yoshifumi HAYASHI 32
..... Hiromasa YAMASHITA 32

Serial Lecture : Remark of Technical Expert Belonging to Environment Public Utility..... Hironori TOGAWA 33
— From a Viewpoint of Next Generation

Essay : Three Principles I Live By..... Kazuyoshi KOHAMA 35

Regulations..... 37

Regulations of Contributor..... 41

Detailed Regulations 43

Editor's Note

環境モニタリング分野で活躍する大気・ガス計測技術

川口佳彦

Yoshihiko Kawaguchi

㈱堀場アドバンスドテクノ

学会誌 EICA 第 29 巻第 1 号では、「環境・プロセスモニタリングで活躍する計測技術〈水編〉」と題して、水に関わる分野を対象に、各研究領域の動向や計測技術の活用事例、データ活用についてご紹介しました。本特集では、大気環境汚染や地球科学の各研究分野を対象に、各研究領域の動向から、そこで活躍する計測技術、データ活用についてご紹介いたします。また、産業活動においても様々なガスを地球上に放出します。これらのガスの計測監視は、産業活動の効率化だけでなく地球環境保全の観点においても非常に重要です。そこで産業分野で活躍する計測技術の基礎原理についてもご紹介いたします。

(国研)国立環境研究所の奈良英樹先生には、「大気中温室効果気体の計測および観測手法の進展」と題して、地球規模の大きな課題である気候変動に影響を与える温暖効果気体の計測技術の動向についてご紹介いただきます。特に本分野において重要な役割を果たしている赤外レーザー吸収分光法について、これまでの技術変遷から大気モニタリングへの応用、移動観測プラットフォームに搭載した計測機器を用いた研究事例についても解説いただきます。

大阪公立大学の定永靖宗先生には、「光化学オキシダント問題の現状と計測技術」と題して、光化学オキシダントの主成分であるオゾンの基本的な生成メカニズムや、オゾン前駆物質の測定技術とその課題についてご紹介いただきます。また定永先生らの研究グルー

プが開発したオゾン生成速度と生成レジームを直接評価可能なシステムについても解説いただきます。

(国研)海洋研究開発機構の伊藤彰記先生には、「鉄を含んだ大気エアロゾルのモニタリングと数値モデルの学際的研究」と題して、エアロゾルの挙動解明に、計測技術を用いたモニタリングと数値シミュレーションがどのように貢献しているかについてご紹介いただきます。また、伊藤先生らの研究によって、大気汚染物質の濃度変化に対する個別発生源の寄与推定が可能となった例をご紹介いただくとともに、今後の技術発展への期待についても解説いただきます。

(国研)国立環境研究所の藤谷雄二先生には、「健康リスク低減に貢献するエアロゾル粒子の化学成分の測定とデータ解析」と題して、エアロゾル粒子の基本特性から人の健康リスクに関する研究動向についてご紹介いただきます。また、エアロゾルの毒性評価に重要な含有化学物質の分析技術とその活用事例について、最新の研究動向を例に解説いただき、エアロゾルの分析の重要性と良好な空気質の維持に向けた方策、今後の展望についても解説いただきます。

東亜ディーケーケー(株)の加賀健一郎氏には、「環境大気モニタリングで活躍する東亜ディーケーケー製品」と題して、大気モニタリングに関する我が国の法律や情報開示の状況、モニタリング対象物質毎の測定方法とその原理や装置構造について解説いただきます。

〈特集〉

大気中温室効果気体の計測および観測手法の進展

奈良 英 樹

国立研究開発法人 国立環境研究所
(〒 305-8506 茨城県つくば市小野川 16-2 E-mail: nara.hideki@nies.go.jp)

概 要

地球の将来気候をより正確に予測するためには、地球温暖化の要因の一つとして考えられており、人間活動の拡大を背景に年々増加し続けている大気中の温室効果気体の全球規模での分布や排出量を正確に把握する必要がある。近年では赤外レーザー吸収分光法の技術が大きく発展したことで、様々な新しい知見が得られるようになった。本稿では大気中の温室効果気体の主要分析機器として台頭するようになった赤外レーザー吸収分光法について触れ、実際に移動観測プラットフォームにおける赤外レーザー吸収分光分析計を用いた観測例を紹介する。

キーワード：温室効果気体、赤外レーザー吸収分光法、移動体観測

原稿受付 2025.5.7

EICA: 30(1) 2-6

1. はじめに

地球の大気を構成している主成分は窒素、酸素、そしてアルゴンであることは広く知られており、これらが乾燥大気の99.9%を占める。しかし、残り1%に満たない構成比率は数多くの微量気体で構成されており、それらは相互に影響し合うことで地球の気候システムに影響を与えている。気候変動に関する政府間パネル(Intergovernmental Panel on Climate Change: IPCC)による第6次報告書では、人間活動の影響が大気、海洋及び陸域を温暖化させてきたことには疑う余地がないと明記された¹⁾。このような気候変動の要因の一つとして、産業革命以後の人間活動による二酸化炭素(CO₂)を始めとする温室効果気体(Greenhouse Gas: GHG)の急激な放出量の増加が挙げられる。このため、地球の将来の気候を予測、あるいはGHGの排出量の削減対策を設定・評価するために、各種GHGの全球分布や発生・消滅量(全球収支)の正確な推定が必要とされている。

2. 温室効果気体の観測と計測手法

2.1 温室効果気体の観測研究の動向

今日ではGHGの地球規模での時間的・空間的変動を明らかにするために、先進国のみならず、世界の様々な地点においてGHGの観測が行われている。例えば、米国海洋大気庁(National Oceanic and Atmospheric Administration: NOAA)は世界規模での観測を実施している研究機関の一つである。NOAAは大気中GHGの観測方法の一つとして、世界中の大気を

ガラス製のフラスコに捕集して実験室に輸送後分析を行う、フラスコサンプリングネットワークを1968年から展開している²⁾。このネットワークでは、南極や北極域、ハワイのマウナ・ロアなどといった、遠隔の極地や離島そして山岳帯等、人間活動の直接的な影響を避けることが可能で、かつ採取した試料大気が地域もしくは領域規模での空間代表性を有するような地点に観測所が設けられており、全球を広くカバーする規模を持つ。NOAA以外でも世界の多数の研究機関において様々な方法によってGHG観測が実施されており、我が国でも東北大学、国立環境研究所、気象庁、国立極地研究所、産業技術総合研究所等がGHGの系統的な観測を実施している。

世界の研究機関で大気観測が行われるようになった一方で、得られた観測結果を統一的に用いた解析の実施を促進することを一つの目的として、世界気象機関(World Meteorological Organization: WMO)が主導する全球大気監視(Global Atmosphere Watch: GAW)プログラムが1989年に開始されている。このGAWプログラムでは、GHG計測の基準の調整や計測精度およびデータの不確かさに関するガイドラインが制定される等³⁾、観測データの品質管理に取り組むことで、世界規模での異なる基準に基づいた観測データを相互に高い水準で比較することが可能となった。これにより、豊富な観測データを裏付けとして、数値モデルによるシミュレーションや人工衛星による宇宙からの観測結果を統合的に解析することで、地球規模や領域規模でのGHGの3次元的な分布のみならず、大型の発生源の分布や排出量等について新たな知見が得られるようになった。このように、地球規模あるい

は領域規模での GHG の分布や発生源に関する理解が深まる一方で、最近では GHG の全球分布と収支をより精緻に推定するために、地域規模での発生源、特に人間活動による GHG の発生源の集合体である都市域からの GHG の排出量を推定するための観測が重要視されるようになってきている。

2.2 温室効果気体の計測方法の動向

今日では世界の各地において、様々な機関によって GHG 観測が実施されるようになったのは上述のとおりである。しかしながら、それぞれの観測地点で GHG の挙動を正確に捉えるためには、長期に渡って継続的に観測することが求められ、このためには様々な課題を解決する必要があった。例えば、人が常駐しない遠隔地に位置する観測所では観測装置のメンテナンスのために頻繁に往來することが困難であるため、観測システムには安定性および耐久性が求められるとともに、長期的な維持管理に要するコストと労力を削減することも主要課題の一つとなっていた。

このような背景のもと、エレクトロニクスの発展もあり、近赤外レーザー吸収分光法による気体分子の計測の研究が盛んに行われるようになった。近赤外レーザー吸収分光法はその名称からもわかるように、近赤外域波長のレーザー光が測定対象とする気体分子により吸収されることで生じる強度変化を濃度に換算する方法であり、この分析方法自体は古くから利用されてきた方法である⁴⁾。一般に、分光分析計は分析システムのサイズが大きく重量もあり、振動に弱いので可搬性は極めて低いものであった。また、温度・湿度の変化や不純物に大きく分析が影響を受けることもあり、実験室環境での使用と試料大気の十分な前処理が前提とされていた。ところが、2000年代後半ごろに、近赤外レーザー吸収分光法を採用した波長スキャン型キャビティリングダウン分光分析計 (Wavelength-scanned cavity ring-down spectrometer: WS-CRDS) が開発された⁵⁾。この WS-CRDS は、GHG の観測に実用十分な性能を有している分光分析計の一つであり、従来分光分析計の欠点が解決されたものであった。例えば、主要な GHG である CO₂ とメタン (CH₄) には非分散型赤外分光計 (Non-dispersive infrared: NDIR) と水素炎イオン化検出器付きガスクロマトグラフ (Gas chromatography-flame ionization detector: GC-FID) がそれぞれ主要計測装置として用いられてきた。これに対し、WS-CRDS はこれらの従来主要装置と比較して①小型かつ軽量で可搬性に優れている、②高度な技術不要で従来法に匹敵あるいはそれ以上の精度と時間分解能で主要 GHG である CO₂ と CH₄ の同時計測が可能である、③長期安定性と耐久性に優れ、危険なガスや物質を計測に必要としない、等

の多くのアドバンテージを持っていた。

このような近赤外レーザー吸収分光分析計の導入は、観測所の維持管理のための長期運用コストと労力の削減に貢献するだけでなく、その分析能の高さから GHG の主要な分析機器として用いられるようになり、GHG の観測を実施している研究機関に急速に普及することになった。

3. レーザー吸収分光法の発展

3.1 近赤外レーザー吸収分光分析計の普及

WS-CRDS に代表される、観測に実用的な近赤外レーザー吸収分光法を採用した分光計 (InfraRed Laser Absorption Spectrometer: IRLAS) の普及をさらに加速させた理由の一つとして、移動体を用いた観測が挙げられる。IRLAS が開発される以前にも、旅客機や船舶等の大型の移動体に装置を搭載して GHG 観測を実施した観測報告例はあったが、その数は限られたものであった。このような報告例では、計測に用いる装置 (NDIR) が比較的小型・軽量であった CO₂ にほとんど限られたものであり、主要計測装置を GC-FID とする CH₄ についてはサイズと重量、そして水素ガス使用に対する安全性の問題があり、移動体での CH₄ の観測は容易ではなかった。それでも上記の CO₂ の観測報告例が示したように、移動体を用いた観測では、領域あるいは半球規模での広域に及ぶ GHG の分布を比較的低コストで観測することができるため、移動体を用いた観測の重要性は高まっていた。

例えば、WS-CRDS の開発後、WS-CRDS を小型の航空機を用いた GHG の観測キャンペーンに導入し、機上で CO₂ と CH₄ の連続観測を実施した報告がなされた⁶⁾。観測は当時の先行研究において、CH₄ の大規模な発生源となっていることが示唆されていたアマゾン盆地で行われた。機上では WS-CRDS だけでなく、NDIR による CO₂ の計測も実施されており、相互に計測結果を比較することで、WS-CRDS は NDIR の計測結果とよく一致することが示された。また、CH₄ の連続観測からも、アマゾン盆地が確かに CH₄ の大規模な発生源となっていることが確認され、数値モデル解析により、その規模が従来研究の結果に整合する結果も得られた。これらの結果は、WS-CRDS は移動体においても優れた分析能力を発揮できること、そして移動体を用いた連続観測が発生源の理解を深めるために非常に有効な手段となることを実際の観測から示したものとなった。

この観測報告例を皮切りに、移動体に IRLAS を搭載して観測を実施した報告例が増えることで、GHG の分布や発生源についてのより詳細かつ新しい知見が得られるようになった^{7,8)}。また、IRLAS の普及を背

景に、英国国立物理学研究所 (National Physical Laboratory: NPL) 等の国家計量機関により、レーザー吸収分光法の特성에応じた GHG の標準ガスが開発されている⁹⁾。WMO の GAW プログラムにおける中央校正施設を担っている NOAA でも、NDIR と GC-FID を用いていた CO₂ と CH₄ の標準ガスの校正システムを、後述する中赤外レーザー吸収分光分析計 (mid-IRLAS) を含む、複数の赤外レーザー吸収分光分析計を用いたシステムに切り替えている¹⁰⁾。このように、今日では IRLAS が GHG 観測における新たな分析方法として従来手法に取って変わる分析方法となった。

3.2 赤外レーザー吸収分光分析計の多様化

GHG の観測研究分野において IRLAS が台頭した後、2010 年代以後にはレーザー吸収分光法に関する技術が向上し、さらには近赤外域よりも分子によるより強い吸収帯が存在する、中赤外域の波長を持つレーザーを光源に採用した mid-IRLAS が観測に用いる分光分析計としてより一般的になった。これにより、従来よりも分光分析計の感度が向上し、CO₂ や CH₄ よりも濃度が低く、それまでに計測できなかった大気中微量気体も分析できるようになっただけでなく、分光分析計の小型化や、より単体での分析能力の高度化を図ったモデルが登場する等、分光分析計の多様化が進んだ。

小型化したレーザー吸収分光分析計には片手で持てるアタッシュケース型や、リュックサック型、あるいはノート PC サイズの超小型で軽量なものがある¹¹⁾。これらはベンチトップ型の分光分析計に対して、分析計の安定性や測定精度を下げた制御系をより簡易なものにすることで小型・軽量化を果たしたものである。このような分析計では低電力化が進むことで、バッテリーを搭載して電源がなくても観測でき、さらにはドローンやマルチコプターに搭載できる小型のものまで開発された。この結果、徒歩はもちろん、小回りが可能な移動体による GHG の観測が比較的容易になり、小規模および地域規模の発生源での GHG 等の水平および鉛直分布について観測ができるようになった。

この一方で、分光分析計単体での分析性能をより向上させた例として、ユーザーのニーズに合わせて選択した気体分子を最大 10 成分まで同時計測が可能な、量子カスケードレーザーを光源とする mid-IRLAS がある¹²⁾。具体的には、代表的な GHG である CO₂ のみならず、CH₄、亜酸化窒素 (N₂O)、対流圏オゾン (O₃)、一酸化炭素 (CO)、窒素酸化物 (NO および NO₂)、二酸化硫黄 (SO₂)、そしてアンモニア (NH₃) といった地球温暖化と大気汚染の双方に影響を与える物質である短寿命気候汚染物質 (SLCF: Short-Lived Climate Forcer) 等が選択可能である。このような分光分析計はスペースが限られた観測現場において多成分の観

測を実施する場合には非常に効率が良く、実際にドイツにおける飛行船を用いた観測キャンペーンに導入された。この観測キャンペーンは、ケルン、メンヘングラートバッハ、デュッセルドルフそしてアーヘンといった都市部等で行われ、上記の GHG や SLCF の分布が観測されている。

このように、赤外レーザー吸収分光法に関する技術が向上し、分光分析計の多様化が進むことで、観測目的に応じて適切な分光分析計を選ぶことで、実施できる観測の幅を広げることができるようになった。

4. 移動観測プラットフォームへの適用

国立環境研究所では近年の都市域における GHG 観測の重要性を鑑み、我が国における都市域に存在する GHG 発生源についてより詳細に理解するため、日本の本州関東から九州まで太平洋および瀬戸内海の沿岸域を定期的に航行する、貨物船舶「日侖丸」(株式会社オーシャンリンク保有) を用いた大気中 GHG および SLCF の観測を実施している (Fig. 1)。そして 2025 年の 1 月に、CH₄ の観測の強化のために、新たに大気中の CH₄ とエタン (C₂H₆) の同時連続計測ができる小型の mid-IRLAS を搭載して観測を開始した。ここではその観測について端的に紹介する。

観測のターゲットとしている CH₄ の発生源は多岐に渡るが、主に化石燃料起源と生物起源に分類される。この一方で、C₂H₆ は主に化石燃料起源であり、生物起源からの強い放出がない。つまり、CH₄ と C₂H₆ の同時計測を行い、これらのガス成分が同時に顕著な濃度増加を示すような場合には、CH₄ の濃度増大の原因が化石燃料起源からの放出であると判断することができる。ところが、C₂H₆ は汚染都市大気における典型的な濃度が CH₄ の約 1000 分の 1 程度であり、短時間で大きく変動する可能性のある C₂H₆ の濃度の挙動を

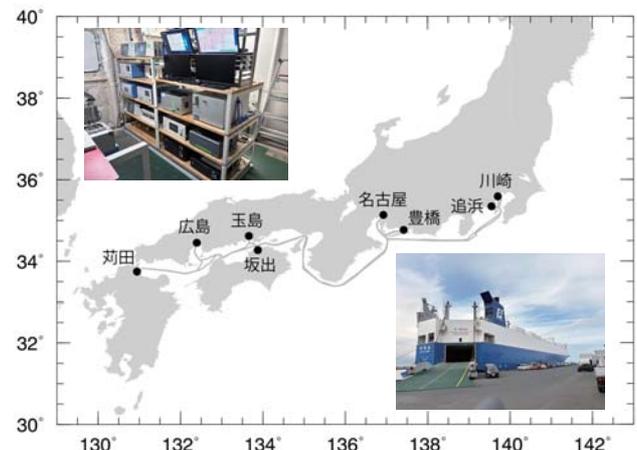


Fig. 1 Typical shipping route of the car carrier vessel 'Nichiymaru' (bottom right: overall view of Nichiyu-maru; top left: atmospheric observation room)

正確に捉えるためには、既存のIRLASでは感度不足である。加えて、スペースに限りがあり、既設観測装置によって占められている観測室において、新規に装置を設置するためには、装置のサイズが強く制限される。これらのことを考慮すると、ベンチトップ型の装置に対して安定性と精度が劣っていても、小型かつ感度の高いmid-IRLASが目的に対し現実的かつ最適な選択となる。

船上でのCH₄およびC₂H₆の連続観測で得られた結果をFig. 2に示す。図では船舶が静岡沖方面から名古屋港に入港し、その後豊橋港に向けて航行している際に取得したデータを示す。観測結果からは船舶が名古屋港周辺と名古屋港から豊橋港に向けた航行時の知多半島および三河湾内の渥美半島周辺でCH₄およびC₂H₆の双方が同時に高濃度を示していることがわかる。この高濃度ピーク観測時のCH₄およびC₂H₆の相関は非常に強く(R>0.9)、これらが近郊の同じ発生源から放出されたことを示唆している。一般に、臨海部には製油所や石油・ガスターミナル、そして火力発電所などが設置されているため、観測された高濃度ピークは、これらの化石燃料起源からのCH₄の漏洩・排出を捉えた結果であると考えられる。このようにCH₄だけでなくC₂H₆の同時計測を実施することで、その発生源について制限を与えることが可能となる。また、得られる観測結果を蓄積し、より詳細に解析することで、個別発生源からのCH₄の排出量推定ができるようになると期待できる。

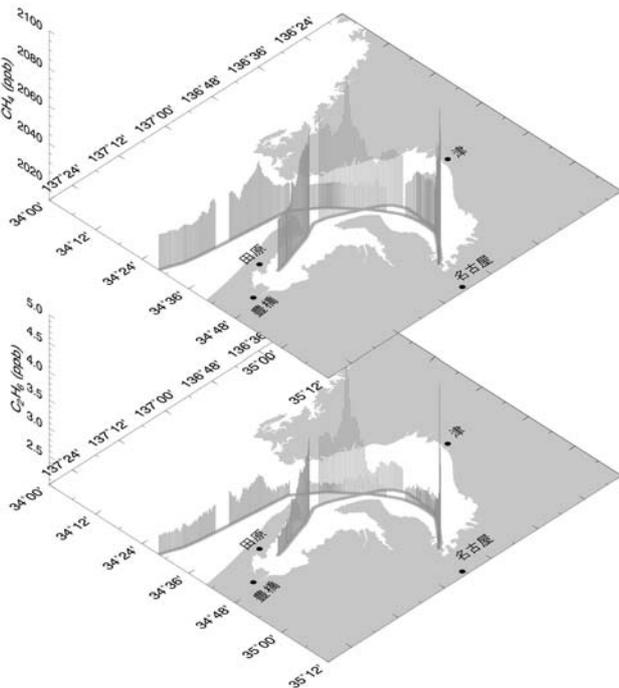


Fig. 2 Distribution of CH₄ (top) and C₂H₆ (bottom) measured along the shipping route using a small mid-infrared laser absorption spectrometer on board the car carrier vessel 'Nichiyo-maru'. One-minute mean mole fractions of CH₄ and C₂H₆ are shown by the height of the bars.

5. おわりに

本稿ではGHGの観測研究および計測手法についての最近の動向について概説し、貨物船舶に赤外レーザー吸収分光分析計を搭載して実施している観測の内容を紹介した。今日では、目的に応じて最適な赤外レーザー吸収分光分析計を観測に用いて観測を実施することで、より詳細な知見が得られるようになった。最近ではGHGのみでなく、有害大気汚染物質についても赤外レーザー吸収分光法を採用した分光分析計が開発されるようになってきており、環境計測分野における適用例はさらに広がりつつある。今後も分光分析計の小型・軽量化、そして高精度化が進むと共に、自動車、船舶、そして航空機だけでなく、小型の移動体となるドローンなど、発展が著しい新しい分野の技術と組み合わせることで、GHGの観測のみならず、広く大気微量成分の計測において赤外レーザー吸収分光法が活躍することが期待される。

参考文献

- 1) IPCC: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 35–115, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647 (2023)
- 2) W. D. Komhyr, R. H. Gammon, T. B. Harris, L. S. Waterman, T. J. Conway, W. R. Taylor and K. W. Thoning: Global atmospheric CO₂ distribution and variations from 1968–1982 NOAA/GMCC flask sample data, *J. Geophys. Res.*, 90(D3), 5567–5596 (1985)
- 3) WMO: 20th WMO/IAEA Meeting on Carbon Dioxide, Other Greenhouse Gases and Related Tracers Measurement Techniques (GGMT-2019), available at: <https://library.wmo.int/records/item/57135-20th-wmo-iaea-meeting-on-carbon-dioxide-other-greenhouse-gases-and-related-measurement-techniques-ggmt-2019> (last access: May 7, 2025), (2019)
- 4) A. O’Keefe and D. A. G. Deacon: Cavity ring-down optical spectrometer for absorption measurements using pulsed laser sources, *Rev. Sci. Instr.* 59, 2544 (1988)
- 5) E. Crosson: A cavity ring-down analyzer for measuring atmospheric levels of methane, carbon dioxide, and water vapor, *Appl. Phys. B*, 92, 40–408 (2008)
- 6) H. Chen, J. Winderlich, C. Gerbig, A. Hofer, C. W. Rella, E. R. Crosson, A. D. Van Pelt, J. Steinbach, O. Kolle, V. Beck, B. C. Daube, E. W. Gottlieb, V. Y. Chow, G. W. Santoni and S. C. Wofsy: High-accuracy continuous airborne measurements of greenhouse gases (CO₂ and CH₄) using the cavity ring-down spectroscopy (CRDS) technique, *Atmos. Meas. Tech.*, 3, 375–386, <https://doi.org/10.5194/amt-3-375-2010> (last access: May 7, 2025), (2010)
- 7) H. Nara, H. Tanimoto, Y. Tohjima, H. Mukai, Y. Nojiri and T. Machida: Emissions of methane from offshore oil and gas platforms in Southeast Asia, *Sci. Rep.*, 4, 6503, <https://doi.org/10.1038/srep06503> (last access: May 7, 2025), (2014)

- 8) C. Rella, J. Hoffnagle, Y. He and S. Tajima: Local- and regional-scale measurements of CH₄, δ¹³CH₄, and C₂H₆ in the Uintah Basin using a mobile stable isotope analyzer, *Atmos. Meas. Tech.*, 8, 4539–4559, doi: 10.5194/amt-8-4539-2015 (2015)
- 9) P. Brewer, R. Brown, M. Miller, M. Miñarro, A. Murugan, M. Milton and G. Rhoderick: Preparation and validation of fully synthetic standard gas mixtures with atmospheric isotopic composition for global CO₂ and CH₄ monitoring, *Anal. Chem.*, 86, 1887–1893, doi: 10.1021/ac403982m. (2014)
- 10) P. Tans, A. Crotwell and K. W. Thoning: Abundances of isotopologues and calibration of CO₂ greenhouse gas measurements, *Atmos. Meas. Tech.*, 10, 2669–2685, <https://doi.org/10.5194/amt-10-2669-2017> (last access: May 7, 2025), (2017)
- 11) 奈良英樹：大気中温室効果ガス計測の新展開, *環境儀*, Vol. 87 (2023)
- 12) R. Tillmann, G. I. Gkatzelis, F. Rohrer, B. Winter, C. Wesolek, T. Schuldt, A. C. Lange, P. Franke, E. Friese, M. Decker, R. Wegener, M. Hundt, O. Aseev and A. Kiendler-Scharr: Air quality observations onboard commercial and targeted Zeppelin flights in Germany — a platform for high-resolution trace-gas and aerosol measurements within the planetary boundary layer, *Atmos. Meas. Tech.*, 15, 3827–3842, <https://doi.org/10.5194/amt-15-3827-2022> (last access: May 7, 2025), (2022)

〈特集〉

光化学オキシダント問題の現状と計測技術

定 永 靖 宗

大阪公立大学 大学院工学研究科
(〒599-8531 大阪府堺市中区学園町1-1 E-mail: sadanaga@omu.ac.jp)

概 要

光化学オキシダント問題は国内で初めて認識されてから半世紀以上経った現在でも未解決の環境問題である。本稿ではまず、光化学オキシダントの主成分であるオゾンの基本的な生成メカニズムについて概説する。次に、オゾンの前駆物質である窒素酸化物と揮発性有機化合物の主要な測定技術を紹介するとともに、オゾンと前駆物質の関係性を議論する面からの、これらの測定法の問題点について述べる。最後に、オゾンの生成過程や消失過程をより直接的に評価するための新奇的なアプローチである、実大気での反応速度の直接測定技術について紹介する。

キーワード：光化学オキシダント，窒素酸化物，揮発性有機化合物，HO_xサイクル

原稿受付 2025.5.7

EICA: 30(1) 7-12

1. はじめに

大気中の光化学オキシダント(Ox)が高濃度となる、いわゆる光化学スモッグが我が国で初めて認識されたのは半世紀以上前の1970年である。対流圏大気中においてOxは太陽光紫外線の存在下、窒素酸化物(NO_x=NO+NO₂)と揮発性有機化合物(VOCs: Volatile Organic Compounds)を前駆物質とした光化学反応により生成することが知られている。そのため、国内ではこれらの排出規制が行われており、実際にNO_xやVOCsの濃度は着実に減少している¹⁾。しかしながら、Ox濃度については減少しておらず、実際、2022年度における国内でのOxの環境基準達成率は、一般環境大気測定局で0.1%、自動車排出ガス測定局で0%と極めて低い結果となっている¹⁾。このように、Ox問題は国内で認識されてから半世紀経つ現在でも解決されていない、いわゆる「古くて新しい環境問題」である。

本稿ではまず、対流圏での基本的なOx生成反応機構および、Oxと前駆物質の非線形的関係性を示すオゾン生成レジームについて概説する。その後Oxの前駆物質であるNO_xやVOCsの主要な測定技術とそれらの問題点について解説し、最後にOx研究の新奇的なアプローチである、実大気での反応速度の直接計測技術について紹介する。なお、近年ではOxの測定法として、紫外線吸収法が主に採用されており、2022年度ではOx濃度を測定している大気汚染常時監視測定局(常監局)の99.4%において使用されている²⁾。紫外線吸収法ではOxのうちのオゾン濃度が測定されることから、本稿では以後、Ox=オゾンとして扱うこ

ととする。

2. 対流圏でのオゾン生成メカニズム

2.1 HO_xサイクル

OH, HO₂, RO₂(Rはアルキル基等有機骨格)ラジカルの総称をHO_xラジカルと呼ぶ。大気中での化学反応は、主としてHO_xラジカルを連鎖担体とした“HO_xサイクル”と呼ばれる連鎖反応により進行する。基本的なHO_xサイクルの化学反応系をFig. 1に示す。HO_xサイクルによって大気中の多くの物質が酸化され、それに伴い様々な物質が二次生成するが、本稿ではオゾン生成の基本的な反応機構について説明する。

まず、OHラジカルがVOCを酸化し、RO₂ラジカルを生成する。例として、VOCがアルカン(RH)である場合は、式(1)、(2)に示すように、OHラジカル

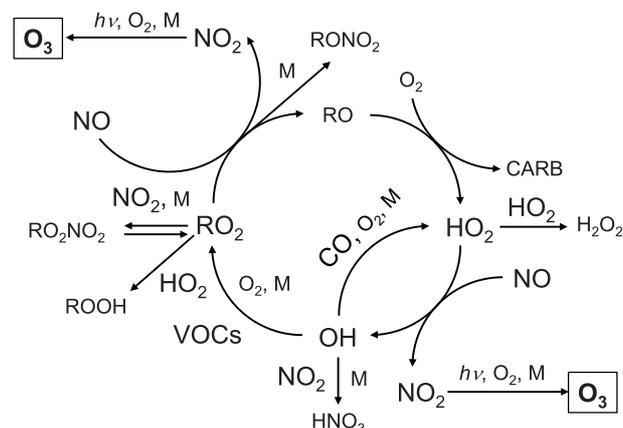


Fig. 1 Fundamental photochemical ozone production mechanism (HO_x cycle) in the troposphere.

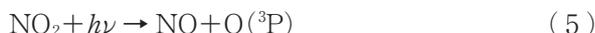
によるアルカンの水素引き抜き反応を経てRO₂ラジカルが生成する。



ここで、Mは反応の第三体を示し、大気中では主にN₂やO₂である。生成したRO₂ラジカルは大気中のNOをNO₂に酸化する。同時に生成したROラジカルは、対流圏では速やかにO₂と反応し、HO₂ラジカルとカルボニル化合物(CARB)を生成する。



NO₂は式(5)、(6)に示すように、太陽光の紫外線(hν)により分解し、オゾンを生産する。

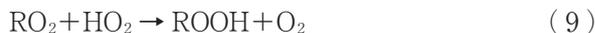


一方、HO₂ラジカルはRO₂ラジカル同様、大気中のNOをNO₂に酸化する。また、この反応によりOHラジカルを再生する。

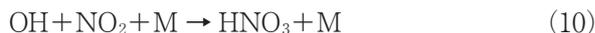


以上に示す連鎖反応によりオゾンが生成する。これらの中で鍵となる反応は式(1)、(3)、(7)である。まず、式(1)でVOCsが酸化され、RO₂ラジカルを生成する。生成したRO₂(もしくはHO₂)は式(3)、(7)によりNOをNO₂に酸化し、その後式(5)、(6)によりオゾンを生産する。すなわち、これら一連の反応でNO_xやVOCsは前駆物質としてオゾンの生成に大きく関わっていることがわかる。

HO_xサイクルの主要な停止反応は大気の汚染度によって異なる。NO_x濃度の低い清浄大気においては、過酸化ラジカル(HO₂、RO₂)同士の反応が主要な停止反応となる。



一方、NO_x濃度の高い汚染大気においては、OHラジカルとNO₂の反応が主要な停止反応である。



式(10)ではNO₂がHO_xサイクルを停止させることから、NO_x濃度が高い場合においてはNO_xがオゾン生成を減速させるはたらきをもつこともある。

2.2 オゾン生成レジーム

オゾンと前駆物質の関係性を表す指標として、オゾン生成レジームと呼ばれる2つの領域がある。具体的

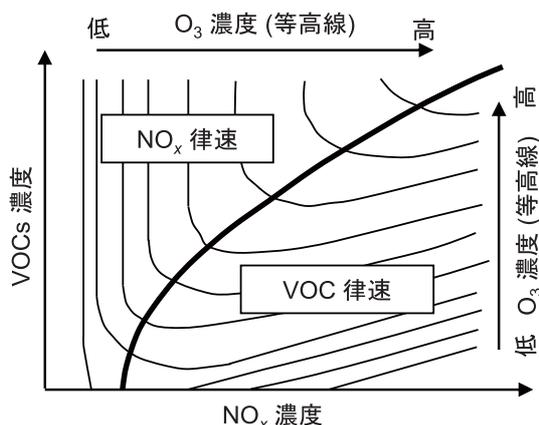


Fig. 2 Schematic diagram showing the relationship among ozone and its precursors (NO_x and VOCs) concentrations (based on ref. 3).

には、オゾン濃度がNO_x濃度の増減に対して敏感に応答する領域(NO_x律速)、VOCs濃度の増減に敏感に応答する領域(VOC律速)である³⁾。

オゾンとその前駆物質との関係を示した模式図をFig. 2に示す。Fig. 2において、オゾン濃度はグラフ内の等高線で示してあり、グラフの右上にある等高線ほどオゾン濃度が高い。グラフ内の等高線から、大気質がNO_x律速の場合、NO_xの削減がオゾン削減につながるが、VOCsを削減してもオゾン濃度は減少しない。大気質がVOC律速の場合、VOCsの削減がオゾン濃度の低下につながる一方、NO_xを削減すると逆にオゾン濃度が上昇する。このように、オゾンとその前駆物質の関係性は非線形的である。そのためオゾン削減するには、単に前駆物質の排出量を削減すれば良いわけではなく、オゾンと前駆物質の定量的な関係性を精査する必要があると現在では認識されている。

3. オゾン前駆物質の測定原理とその問題点

オゾン前駆物質のうちNO_xはNO₂に環境基準が設定されていることから、国内の多くの地点に位置する常監局において、常時監視測定が行われている。VOCsについては一部の物質を除き環境基準は設定されていないが、Oxの原因物質であるため、VOCsのうち非メタン炭化水素(NMHCs: Non-Methane HydroCarbons)の濃度について、多くの常監局において測定が実施されている。本節では、これらの物質の濃度測定法のうち、主要なものを紹介するとともに、オゾンと前駆物質濃度の関係性を議論する面からの、これらの測定法の問題点について述べる。

3.1 NO_x

NO_x濃度測定については、現在ザルツマン法とオゾン化学発光法(CL法)が公定法として定められている。近年ではCL法が主に採用されており、2022

年度ではNO_x濃度を測定している常監局の97.3%において使用されているので²⁾、本稿ではCL法について述べる。

CL法で直接測定しているのはNO濃度である。大気中のNOを高濃度のオゾンと反応させることで、電子励起状態のNO₂が生成し、それが基底状態に戻るときに発せられる蛍光の強度を測定することでNO濃度を定量する。NO₂濃度については“コンバータ”と呼ばれる還元触媒を用いてNO₂をNOに還元した後、オゾン化学発光法でNO濃度を定量することにより測定している。しかしながら、CL法で通常使用されているコンバータは、硝酸やPANs (PeroxyAcyl Nitrates) などNO_xの酸化生成物の一部もNOに還元し、NO_x濃度を過大評価することが知られている⁴⁾。以前筆者らはNO_xの酸化生成物の干渉をほとんど受けない光解離変換器 (PLC) を開発し、“コンバータ”の代わりにPLCをCL法と組み合わせることで (PLC-CLD)、NO₂やNO_x濃度を正確に測定することを可能にした⁵⁾。その後大阪府堺市において公定法とPLC-CLD法によるNO_x濃度測定相互比較を行ったところ、得られた測定値は公定法がPLC-CLD法よりも平均して約30%過大評価する結果であった⁶⁾。同時に、オゾン濃度が高いときほど公定法がより大きく過大評価する傾向が見られた⁶⁾。このように、現行の常監局で測定されているNO₂、NO_x濃度は正確な濃度を反映しておらず、実際より高いNO₂、NO_x濃度値が提供されている。現在の状況は、環境基準達成率の視点で見れば (より厳しい値を出すことになるため) 大きな問題ではない。しかしながら、オゾンと前駆物質の定量的な関係性を精査するには正確なNO_x濃度を知ることが重要であり、また、近年ではOxに関する研究において、NO₂濃度が計算式に含まれるポテンシャルオゾン (PO=O₃+NO₂) を用いた議論が行われることが多くなっている⁷⁾。Oxの問題解決のためには、現状の公定法を見直し、正確なNO_x窒素酸化物濃度を提供することが重要な要素の一つであると考えられる。

3.2 VOCs (NMHCs)

NMHCs濃度の測定としては主に、水素炎イオン化検出器 (FID) により行われている。FIDではC-H結合をもつ炭素原子がイオン化された電流を検出するため、炭化水素に対しては高い測定感度をもつ。FIDではメタンも検出されるが、多くの測定装置では、予めガスクロマトグラフィーによりメタンとNMHCsを分離し、メタンとNMHCsを同時に測定している。また、FIDでの炭化水素の感度はおおそ炭素数に比例するため、本法で測定されるNMHCs濃度はppmC (parts per million on a carbon basis) と炭素原

子1個のメタン分子に換算した値で表されている。

FIDは炭化水素類の測定には優れている一方、ヘテロ原子 (酸素、窒素、硫黄など) を含む有機化合物については、炭化水素類と比べて測定感度が著しく低くなることが知られている⁸⁾。ヘテロ原子を含む有機化合物の中でも、含酸素揮発性有機化合物 (OVOCs: Oxygenated Volatile Organic Compounds)、特にアルデヒド類はOHラジカルとの反応性が高く、最大オゾン生成能 (MIR: Maximum Incremental Reactivity) も高い⁹⁾。そのため、アルデヒド類は近年光化学オゾン生成にかかわる主要なVOCsと考えられているが、FIDでは感度よく検出できず、特にホルムアルデヒドに関してはFIDはほとんど感度をもたない。Oxの問題解決に向けた議論を深めるためには、現状のNMHCsの測定では不十分であり、FIDでの感度が低いヘテロ原子を含む有機化合物の中でも、特にアルデヒド類のようなOHラジカルとの反応速度定数やMIRの高いVOCsの測定も実施し、これらの知見を深めることが重要であると考えられる。

またVOCsは非常に多くの種類があり、OHラジカルとの反応性も種類によって大きく異なる。ヘテロ原子を含む有機化合物の寄与は別にしてNMHCsのみ考えても、NMHCsの構成成分の内訳が変われば、仮にNMHCs全体として同じ濃度であったとしても、OHラジカルとの反応性や、オゾン生成能は大きく異なりうる。光化学オゾン生成におけるVOCsの影響を精密に評価するには、大気中に存在する個々のVOCsの濃度やOHラジカルとの反応速度定数を網羅的に把握することが理想的ではあるが、VOCsの種類の多さから現実的には極めて困難である。このような状況下、VOCsのOHラジカル反応性の把握については、近年別の面からのアプローチにより、現実的に可能となってきた。次節ではまず、その別の面からのアプローチについて紹介する。

4. 実大気での反応速度の直接計測技術

Oxに限らず、大気汚染物質の動態解明に関する観測研究では、これまではほとんどの場合、濃度の測定が行われている。濃度測定が重要なのは疑いの余地はないが、濃度は生成 (もしくは発生) と消失のバランスからなる定常値であり、そこから生成過程や消失過程の議論へ進めることは容易ではない。本節では、生成過程や消失過程をより直接的に評価するため、近年確立されたOx研究の新奇なアプローチである、実大気での反応速度の直接計測技術について紹介する。

4.1 OHラジカル反応性測定

OHラジカル反応性 (OH反応性) とは、OHラジ

カルの大気化学反応による減衰寿命の逆数として定義される。OH ラジカルはオゾン生成だけでなく、大気中での光化学反応系の中心を担う化学種であることから、以前より OH ラジカルの反応動態に関する研究の重要性は認識されており、20 世紀末においては OH ラジカルの濃度計測も可能となった¹⁰⁾。21 世紀になり、OH ラジカルの濃度に加えて OH 反応性を直接測定できる手法が確立され、OH ラジカルの反応動態はもとより、光化学オゾン生成についても新たな知見が得られている。

OH 反応性はレーザーポンプ・プローブ法により測定することができる。紙面の都合上装置の詳細は既報¹¹⁾に譲るが、基本的にはレーザー閃光光分解法を大気計測に応用したものである。大気を反応管内に導入し、反応管の軸方向に、低繰り返し周波数 (0.5~2 Hz) の紫外 (波長 266 nm) パルスレーザー (ポンプレーザー) を照射し、式 (11), (12) の反応により OH ラジカルを人為的に生成させる。



一方、OH ラジカル濃度については、高繰り返し数 (10 kHz) の紫外 (波長 308 nm) パルスレーザー (プローブレーザー) を用いたレーザー誘起蛍光法 (LIF 法) により測定する。ポンプレーザーにより生成した OH ラジカルは反応管内で大気中の微量成分と反応し、濃度が減衰する。その減衰過程を LIF 法により時間分解測定する。OH ラジカル濃度が反応する微量成分と比べて十分に小さい場合、OH ラジカル濃度は反応管内で式 (13) のように擬一次的に減衰する。

$$[\text{OH}] = [\text{OH}]_0 \exp(-k_{\text{OH}}t) \quad (13)$$

ここで、 $[\text{OH}]_0$ はポンプレーザー照射直後 ($t=0$) の OH ラジカル濃度、 k_{OH} は OH ラジカルの擬一次減衰速度定数を示す。測定した OH ラジカル濃度の減衰過程を式 (13) に当てはめ k_{OH} を決定することで、OH 反応性を求めることができる。

レーザーポンプ・プローブ法を用いた観測により直接得られた OH 反応性 ($k_{\text{OH,obs}}$) と、同時観測した NO_x , O_3 , CO , SO_2 , VOCs 濃度を用いて計算により求められた OH 反応性 ($k_{\text{OH,calc}}$) との比較がこれまで何度も実施されている¹²⁻¹⁵⁾。多くの場合 $k_{\text{OH,obs}}$ は $k_{\text{OH,calc}}$ に比べて数割程度大きい結果が得られている。この結果は、従来の濃度観測では把握できていない未知の OH ラジカルの反応相手が存在することを意味している。未知の反応相手については、OVOCs など大気中で二次生成する物質が有力視されているが、現在でも完全には特定できていない。しかしながら、仮にこれらの多くが VOCs であった場合、これまで主流で

あった $k_{\text{OH,calc}}$ を用いた議論では、OH ラジカルから RO_2 ラジカルへ変換される速度が過小評価されていることを意味する。 HO_x サイクルの観点から見れば、連鎖反応の連鎖長を過小評価することにつながり、このことはすなわち、光化学オゾン生成についても過小評価してしまう可能性があることを意味している。このように、OH ラジカルの反応性を直接計測することで、濃度観測だけでは決してわからなかった新たな知見が得られている。

4.2 オゾン生成速度と生成レジームの直接評価

これまで述べてきた通り、オゾンの光化学生成過程は複雑であり、未知の前駆物質や反応機構も存在すると考えられる。それに加えて、対流圏でのオゾンは長い場合では数週間程度の大気寿命をもつため¹⁶⁾、風による輸送などの影響も受け得る。すなわち、対流圏オゾンの濃度変化は化学的な要因と気象学的な要因が入り混じっており、極めて複雑である。このような状況下、筆者らはこれまで、化学的な要因のみを直接的に評価できるようにすることを目指し、オゾンの光化学生成速度を直接測定する装置を開発してきた¹⁷⁾。

一方、**Fig. 2** に示すオゾン生成レジームのように、オゾンとその前駆物質との関係性は非線形的であり、効果的なオゾンの削減に向けては NO_x , VOCs を戦略的に削減することが重要である。しかしながら、**Fig. 2** に示す関係性は定性的なものであり、また、オゾン生成レジームが NO_x 律速、VOC 律速と単純に二つの領域に分けられる保証もない。筆者らは、オゾンとその前駆物質との関係性を直接的に把握できるようにするために、オゾン生成速度測定装置を応用して、オゾン生成レジームを直接評価できるシステムについても作成した¹⁸⁾。

開発したオゾン生成速度および生成レジーム測定装置を **Fig. 3** に示す。大気を反応容器と参照容器に導

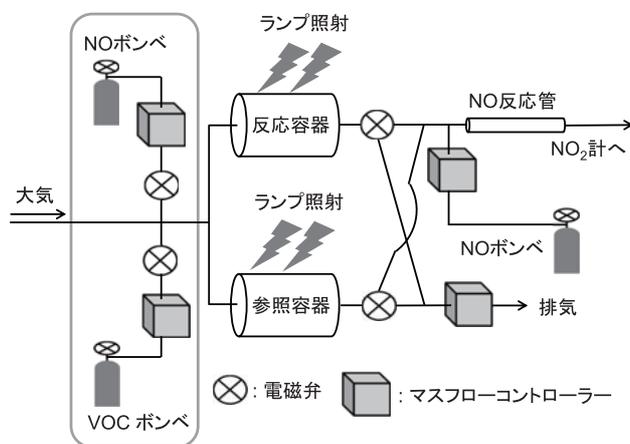


Fig. 3 Schematic diagram of the system for measuring photochemical ozone production rate and ozone production regime. The area framed in gray is for ozone production regime measurements.

入する。反応容器は石英製、参照容器は外壁にUVカットフィルムを施したパイレックス製である。両容器に人工太陽光ランプからの光を常時照射する。反応容器内では光化学反応によりオゾンが生成する一方、参照容器内では光化学反応は起こらない。両容器で測定されたオゾン濃度（紙面の都合上詳細は割愛するが、実際にはPO濃度）の差分が反応容器内での正味のオゾン生成量となる。これを反応容器での大気の滞留時間で除することにより、オゾン生成速度 ($P(O_3)$) が求まる。

オゾン生成レジームの測定には化学摂動法を用いる。具体的には、大気導入口からNOもしくはVOC（本装置ではプロパン）を一定時間間隔で摂動的に添加し、添加後の $P(O_3)$ の増減を調べることで、オゾン生成レジームを求める。例えばNOを添加すると $P(O_3)$ が増加し、VOCを添加しても $P(O_3)$ がほとんど変化しない場合は、この大気質は NO_x 律速であり、 NO_x の削減がオゾン削減により効果的であることを示す。

紙面の都合上、本装置を用いた観測事例については割愛するが、様々な場所での観測事例を積み重ねることで、オゾンと前駆物質の化学的な関係性を詳細に解明することを目指している。

5. おわりに

本稿ではまず、 O_x の主要成分であるオゾンの基本的な生成メカニズムについて概説した。対流圏オゾンの前駆物質は NO_x と VOCs であり、これらの動態をできるだけ正確に把握することが、 O_x 問題を解決するための必要条件であると考えられる。しかしながら、現在のこれらの主要な濃度測定法には問題点があり、オゾン前駆物質の動態を正確に把握することは困難である。 NO_x については3.1節で述べた通り、公定法では NO_2 濃度を過大評価することが知られているが、近年ではPLC-CLD法や、キャビティ減衰位相シフト分光法¹⁹⁾など、 NO_2 濃度を正確にかつ連続的に測定する装置が開発されている。今後は現状の公定法から、これらの正確な NO_x 濃度測定装置にシフトしていくことが望まれる。一方のVOCsについては非常に多くの種類があり、これらの動態を網羅的に把握することが理想的ではあるが現実的ではない。近年ではこれまでもっばら行われてきた定常濃度の観測ではなく、反応速度を直接観測するという新奇なアプローチでVOCsの総合的な評価やオゾン生成メカニズム、オゾンの生成速度についても実測から直接的に評価できるようになった。今後はこのような反応速度の実大気計測が広がることにより、オゾンだけでなく、大気中における反応性微量成分の動態把握に関する研究が

大きく前進することを期待したい。

参考文献

- 1) 環境省：令和4年度 大気汚染物質（有害大気汚染物質等を除く）に係る常時監視測定結果（2024）, <https://www.env.go.jp/content/000230544.pdf>（閲覧日 2025. 4. 23）
- 2) 国立環境研究所：大気汚染常時監視データ（2024）, <https://tenbou.nies.go.jp/download/>（閲覧日 2025. 4. 23）
- 3) S. Sillman, J. A. Logan and S. C. Wofsy: The sensitivity of ozone to nitrogen oxides and hydrocarbons in regional ozone episodes, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 95, No. D2, pp. 1837–1851 (1990)
- 4) F. C. Fehsenfeld, R. R. Dickerson, G. Hübler, W. T. Luke, L. J. Nunnermacker, E. J. Williams, J. M. Roberts, J. G. Calvert, C. M. Curran, A. C. Delany, C. S. Eubank, D. W. Fahey, A. Fried, B. W. Gandrud, A. O. Langford, P. C. Murphy, R. B. Norton, K. E. Pickering and B. A. Ridley: A ground-based intercomparison of NO , NO_x and NO_3 measurement techniques, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 92, No. D12, pp. 14710–14722 (1987)
- 5) Y. Sadanaga, Y. Fukumori, T. Kobashi, M. Nagata, N. Takenaka and H. Bandow: Development of a selective light-emitting diode photolytic NO_2 converter for continuously measuring NO_2 in the atmosphere, *Analytical Chemistry*, Vol. 82, No. 22, pp. 9234–9239 (2010)
- 6) 定永靖宗, 上野友行, 佐藤啓市：都市域における公定法と高精度窒素酸化物測定装置の相互比較連続観測, *大気環境学会誌*, Vol. 52, No. 2, pp. 81–88 (2017)
- 7) 環境省：光化学オキシダント調査検討会報告書～光化学オキシダントの解析と対策へ向けた指標の提言～（2014）, <https://www.env.go.jp/press/17956.html>（閲覧日 2025. 4. 23）
- 8) C. S. Spanjers, C. A. Beach, A. J. Jones and P. J. Dauenhauer: Increasing flame ionization detector (FID) sensitivity using post-column oxidation–methanation, *Analytical Methods*, Vol. 9, pp. 1928–1934 (2017)
- 9) W. P. L. Carter: Updated maximum incremental reactivity scale and hydrocarbon bin reactivities for regulatory applications, *California Air Resources Board Contract*, 07–339 (2010)
- 10) D. R. Crosley: The measurement of OH and HO_2 in the atmosphere, *Journal of the Atmospheric Sciences*, Vol. 52, No. 19, pp. 3299–3314 (1995)
- 11) Y. Sadanaga, A. Yoshino, K. Watanabe, A. Yoshioka, Y. Wakazono, Y. Kanaya and Y. Kajii: Development of a Measurement System of OH reactivity in the Atmosphere by Using a Laser-Induced Pump and Probe Technique, *Review of Scientific Instruments*, Vol. 75, No. 8, pp. 2648–2655 (2004)
- 12) Y. Sadanaga, A. Yoshino, S. Kato and Y. Kajii: Measurements of OH reactivity and photochemical ozone production in the urban atmosphere, *Environmental Science and Technology*, Vol. 39, No. 22, pp. 8847–8852 (2005)
- 13) A. Yoshino, Y. Sadanaga, K. Watanabe, S. Kato, Y. Miyakawa, J. Matsumoto and Y. Kajii: Measurement of total OH reactivity by laser-induced pump and probe technique — Comprehensive observations in the urban atmosphere of Tokyo —, *Atmospheric Environment*, Vol. 40, No. 40, pp. 7869–7881 (2006)
- 14) Y. Nakashima, S. Kato, J. Greenberg, P. Harley, T. Karl, A. Turnipseed, E. Apel, A. Guenther, J. Smith and Y. Kajii: Total OH reactivity measurements in ambient air in a southern Rocky mountain ponderosa pine forest during BEACHON-SRM08 summer campaign, *Atmospheric Environment*, Vol. 85,

- pp. 1–8 (2014)
- 15) S. Ramasamy, Y. Nagai, N. Takeuchi, S. Yamasaki, K. Shoji, A. Ida, C. Jones, H. Tsurumaru, Y. Suzuki, A. Yoshino, K. Shimada, Y. Nakashima, S. Kato, S. Hatakeyama, K. Matsuda and Y. Kajii: Comprehensive measurements of atmospheric OH reactivity and trace species within a suburban forest near Tokyo during AQUAS-TAMA campaign, *Atmospheric Environment*, Vol. 184, pp. 166–176 (2018)
- 16) P. S. Monks, A. T. Archibald, A. Colette, O. Cooper, M. Coyle, R. Derwent, D. Fowler, C. Granier, K. S. Law, G. E. Mills, D. S. Stevenson, O. Tarasova, V. Thouret, E. von Schneidmesser, R. Sommariva, O. Wild and M. L. Williams: Tropospheric ozone and its precursors from the urban to the global scale from air quality to short-lived climate forcer, *Atmospheric Chemistry and Physics*, Vol. 15, No. 15, pp. 8889–8973 (2015)
- 17) Y. Sadanaga, S. Kawasaki, Y. Tanaka, Y. Kajii and H. Bandow: New system for measuring the photochemical ozone production rate in the atmosphere, *Environmental Science and Technology*, Vol. 51, No. 5, pp. 2871–2878 (2017)
- 18) Y. Morino, Y. Sadanaga, K. Sato, Y. Sakamoto, T. Muraoka, K. Miyatake, J. Li and Y. Kajii: Direct evaluation of the ozone production regime in smog chamber experiments, *Atmospheric Environment*, Vol. 309, Art. No. 119889 (2023)
- 19) P. L. Keabian, S. C. Herndon and A. Freedman: Detection of Nitrogen Dioxide by Cavity Attenuated Phase Shift Spectroscopy, *Analytical Chemistry*, Vol. 77, No. 2, pp. 724–728 (2005)

〈特集〉

鉄を含んだ大気エアロゾルのモニタリングと数値モデルの学際的研究

伊藤 彰 記

国立研究開発法人 海洋研究開発機構 横浜研究所
(〒236-0001 神奈川県横浜市金沢区昭和町3173-25 E-mail: akinorii@jamstec.go.jp)

概要

大気中に浮遊する微小粒子（エアロゾル）は、生態系や気候へ様々な影響を及ぼす。それらのうちで、鉄を含んだエアロゾルを対象としたモニタリング観測と数値シミュレーションを組み合わせた研究を中心に解説する。数値モデル予測の正確さは、モニタリング測定データによって、裏付けられる。従って、測定値の正確さは数値シミュレーションを活用したエアロゾルの自然環境への影響評価にとって重要となる。そうして得られた知見は、持続可能な社会の実現に向けた政策の科学的な提案の基盤となる。

キーワード：人為起源エアロゾル、鉱物ダスト、大気汚染、大気化学輸送モデル

原稿受付 2025.5.15

EICA: 30(1) 13-16

1. はじめに

授業中に窓の外を眺めていた15歳の頃を思い出す。あの頃の自分は、将来、世界を牽引する科学者としての姿を夢見ていた。気になるものを考えると時間の流れを忘れる性分である筆者は、自分の興味を抱かせる事柄やその解釈が頭に浮かぶと、より深層を探求したいという好奇心に有無を言わず駆り立てられた。その都度、授業の進行とはかけ離れ、空想の世界へと考えを巡らしていた。現実には、窓の外を眺めても、大気中に浮遊する小さな粒子（エアロゾル）を一粒ごとに目で捉えることができない。それでも、頭の中でその大気中でのふるまいを思い浮かべ、夢想到に耽る。その想像力を科学的な知見に結び付けて、観測、実験および理論計算を基に、エアロゾルの大気中でのふるまいを数式化した自然の理の機械言語による記述が、大気エアロゾルモデルとなる¹⁾。

大気エアロゾルモデルは、大気観測で得られる測定データが不確実性の範囲内で真値であると仮定して、高度化される。そのように自然現象を観測し、数値シミュレーションでその現象を定量的に理解する。そうすることによって得られた知見に基づき、エアロゾルの生態系や気候への影響を将来予測する。そのように予測された将来に備える政策提案は、大気汚染物質による自然環境破壊を防ぐための持続可能な社会の実現へ貢献する。

本稿では、筆者の研究と近年の動向を踏まえ、モニタリング観測と数値シミュレーションが大気中でのエアロゾルのふるまいの理解にどのように貢献するかについて、これまでの研究を総括し、包括的な研究を展

望する。ここでは、高時間分解能の測定データが数値モデル開発に果たす役割について記述する。特に、筆者らが開発した大気エアロゾル化学輸送モデル（以降、モデル）を²⁾、福江島大気環境観測施設（以降、福江島）³⁾および国設五島酸性雨測定所（以降、五島）⁴⁾におけるモニタリング観測で得られたPM_{2.5}時系列データを用いて検証する。ここでPM_{2.5}は、直径2.5 μm以下の大気中微小粒子を表し、吸い込むと肺の奥深くまで入り込み、呼吸器系へ影響を与える。特に、水溶性鉄は生体組織を傷つける活性酸素を生成する反応に関与するため、金属の種類及びその化学形態を推定することが重要となる。

2. モニタリング観測と数値シミュレーション

2.1 筆者のモニタリングと数値モデル研究との関わり

筆者のモニタリング観測研究との関わりは、人為的な温室効果気体濃度の増加が地球温暖化へ関与している科学的な事実が、マウナロアにおける長期間のモニタリング観測結果を基に、明らかにされたことに起因する^{5,6)}。そのような状況で、名古屋大学大学院工学研究科応用化学専攻博士課程では都市域を対象として、温室効果気体濃度をモニタリング観測し、その結果を統計的に解析した⁷⁾。その当時所属していた研究室では、ICP-MS（誘導結合プラズマ質量分析法）を用いて、エアロゾルや海水中の微量金属を測定する研究が主流であった。その時期にそれらの研究を横目で見ている経験が、エアロゾル中の微量金属観測データと数値モデルの統合的な研究の礎となった。その中で、都市およびその郊外域での長寿命気体の長期的な観測は、

名古屋市など行政で実施されるようになり、データ解析が筆者の研究の軸となっていった。その解析手法として数値シミュレーションに興味を持ち、ミシガン大学工学部大気・海洋・宇宙研究科 (Department of Atmospheric, Oceanic and Space Sciences) で、交換留学生として大気化学輸送モデルを用いた逆推定モデル開発に携わった。博士課程修了後、ミシガン大学で発生量データ作成⁸⁾と大気化学輸送モデル開発⁹⁾に携わった経験がエアロゾル鉄の数値モデル開発の基盤となった。そのような経緯で、海洋研究開発機構 (JAMSTEC) において、林野火災発生源¹⁰⁾から排出される大気汚染物質の影響を解析する数値モデル研究¹¹⁾を継続した。その後、新たな研究テーマとして、大気と海洋表層との相互作用に関する地球システムモデル研究に携わり¹²⁾、その一環としてエアロゾル鉄数値モデルを開発することになった¹³⁾。

2.2 エアロゾル発生量の逆推定

海洋への鉄供給を予測する数値モデルを検証する際に、主に船舶による洋上観測データが用いられる¹⁴⁾。通常、エアロゾル中の微量元素濃度測定には、ICP-MS が用いられる。そのためには、測定に必要な質量のエアロゾルをフィルター上に捕集する必要があり、外洋上では数日程度の捕集期間を必要とする。一方、エアロゾル鉄は主に陸上で大気中へ排出されるため、陸域での観測も発生源を理解する上で必要となる。陸上での利点としては、常時モニタリング観測が可能なことである。

モニタリング観測データは、数値モデルによる予測データとの誤差が不確実性の範囲において最小になる最適解を求めるようにエアロゾル発生量を制約するために用いられる¹⁵⁾。その手法を逆推定モデルと呼び、観測データにおける主要な時空間変動が主に単一の発生源と関連付けられる際には、エアロゾル鉄発生量を制約し、データを解析する上で有効な手法となる¹⁶⁾。

2.3 発生源別寄与率の推定

長崎県西方沖の五島列島に属する福江島に設置された PM_{2.5} 自動成分分析装置による 4 時間間隔の観測データを用いて、数値モデルの予測性能を評価した (Fig. 1, 2)。なお、測定所は異なる場所に設置されているが、数値モデルで扱う同じグリッド内に位置する。東アジアにおける大気汚染物質の発生地域の風下に位置する福江島では、春季においてエアロゾル鉄の主要な発生源が、主に自然起源 (鉱物ダスト) と人為起源に分類される。鉱物ダストの指標として、天然鉱物の格子構造の骨格となるケイ素 (Si) を用い、人為起源の指標として、産業過程から排出されるエアロゾルに含まれる鉛 (Pb) と銅 (Cu) を用いた。鉄と同様に、

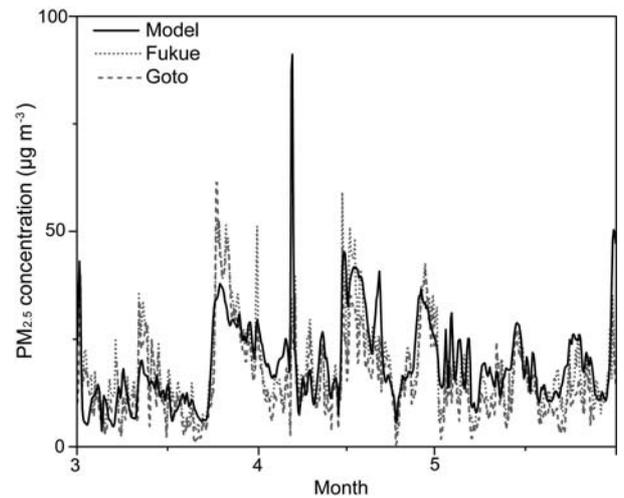


Fig. 1 Comparisons of PM_{2.5} concentrations ($\mu\text{g m}^{-3}$) from the model simulation²⁾ with monitoring data at Fukue³⁾ and Goto⁴⁾.

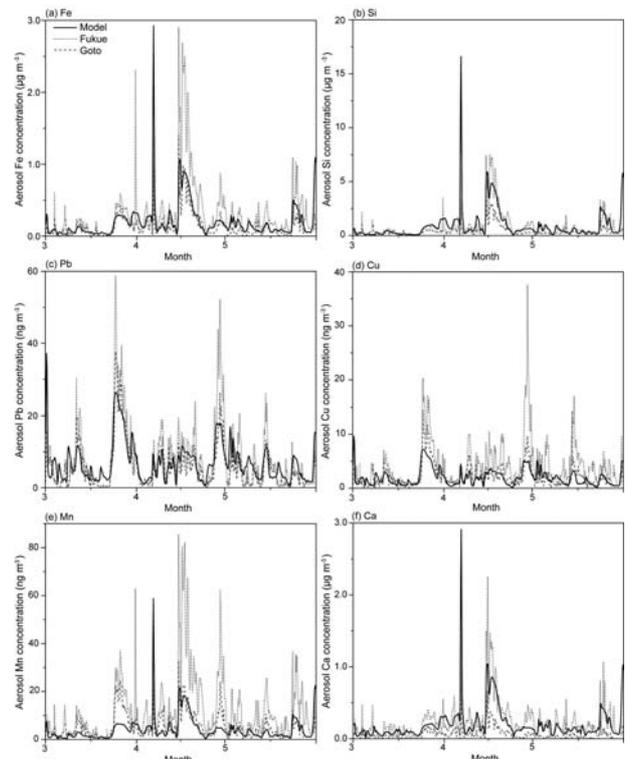


Fig. 2 Comparisons of aerosol (a) Fe ($\mu\text{g m}^{-3}$), (b) Si ($\mu\text{g m}^{-3}$), (c) Pb (ng m^{-3}), (d) Cu (ng m^{-3}), (e) Mn (ng m^{-3}), and (f) Ca ($\mu\text{g m}^{-3}$) in PM_{2.5} from the model simulation²⁾ with monitoring data at Fukue³⁾ and Goto⁴⁾.

カルシウム (Ca) やマンガン (Mn) も、自然起源や人為起源など異なる発生源からの影響を受ける。

Fig. 1 で示したように、数値モデルは、PM_{2.5} 質量濃度の観測データの時間変動を良く再現した (モデル $17 \mu\text{g m}^{-3}$, 福江 $16 \mu\text{g m}^{-3}$, 五島 $13 \mu\text{g m}^{-3}$)。カッコ内はそれぞれの中央値を示す。しかし、異なる発生源から同じ空気塊で風下へと運ばれる間に、それらが十分混合した大気における PM_{2.5} 濃度の時系列データでは、個別発生量に対する制約条件が弱い。そのため、それぞれの発生源ごとに指標となるエアロゾル濃度を

制約条件として用いることがより有効となる。

Fig. 2 で示した結果から、微小粒子中における自然起源および人為起源エアロゾルの数値モデル予測の正確さは、それぞれの指標となるケイ素（モデル $0.48 \mu\text{g m}^{-3}$ 、福江 $0.48 \mu\text{g m}^{-3}$ 、五島 $0.25 \mu\text{g m}^{-3}$ ）および鉛（モデル 5.7 ng m^{-3} 、福江 6.2 ng m^{-3} 、五島 4.5 ng m^{-3} ）と銅（モデル 1.6 ng m^{-3} 、福江 3.2 ng m^{-3} 、五島 1.5 ng m^{-3} ）の観測データによって、裏付けられた。結果として、自然起源や人為起源など異なる発生源からの影響を受ける鉄（モデル $0.12 \mu\text{g m}^{-3}$ 、福江 $0.18 \mu\text{g m}^{-3}$ 、五島 $0.08 \mu\text{g m}^{-3}$ ）、カルシウム（モデル $0.13 \mu\text{g m}^{-3}$ 、福江 $0.17 \mu\text{g m}^{-3}$ 、五島 $0.05 \mu\text{g m}^{-3}$ ）、マンガン（モデル 2.5 ng m^{-3} 、福江 8.0 ng m^{-3} 、五島 3.1 ng m^{-3} ）のモデル推定値も測定データとよく一致し、数値モデルの正確さが確認された。これら元素は、人為起源エアロゾルの指標となる鉛や銅と比較して、自然起源の指標となるケイ素と高い正の相関関係を示した。この結果から、春季において鉄、カルシウムおよびマンガンの高濃度をもたらす主要因として黄砂の飛来が考えられる。また、鉛や銅の高濃度時に、これらのうちでは特にマンガン濃度の上昇が見られる。さらに、データを解析することで、PM_{2.5}中の人為起源の寄与率は、鉄（モデル $22 \pm 17\%$ 、福江 $17 \pm 11\%$ ）よりマンガン（モデル $42 \pm 23\%$ 、福江 $44 \pm 20\%$ ）が高いと推定された^{2,3)}。このように、モニタリング観測と数値モデルを組み合わせて、高濃度の原因となる個別発生源の寄与を推定することは大気汚染物質の排出量削減にとって有効な対策の提案へとつながる。

エアロゾル鉄への主要な発生源は自然起源と推定された。しかし、自然起源鉄に比べて人為起源鉄は鉄溶解率が高いため、モデル計算によると、東アジアにおけるPM_{2.5}中の水溶性鉄濃度へ60%以上も寄与し、主要な発生源であることが示唆された²⁾。この結果は、より正確に人為起源鉄の生態系への影響を評価するために、水溶性鉄濃度を測定することが重要であることを示す。

3. おわりに

筆者が博士課程の時期に携わった温室効果気体濃度のモニタリング研究では、測定方法が確立され、行政による二酸化炭素濃度データの品質管理が徹底されていた。そのため、観測データを数値モデルへ適用する研究に移行した。その後の研究者人生にとって、名古屋大学とミシガン大学間での交換留学制度を通して、より自由にのびのびとした発想で数値シミュレーション手法を学べた経験は貴重であった。

福江島に設置されたPM_{2.5}自動成分分析装置によるエアロゾル中の微量金属濃度測定データを数値モデル

の検証に用いた。数値モデルは、大気汚染物質の濃度のみでなく、大気汚染物質の有効な規制対策へとつながる発生源寄与率の推定まで測定データを良く再現するように高度化されてきた^{1,2)}。今後も、行政が管理するPM_{2.5}自動成分分析装置による測定データの品質管理が徹底されることを期待する。

海洋研究科学委員会（SCOR: Scientific Committee on Oceanic Research）は、海洋研究の分野で国際的な科学活動を促進するために活動する。SCOR 第167作業部会（RUSTED: <https://scor-int.org/group/reducing-uncertainty-in-soluble-aerosol-trace-element-deposition-rusted>）では、エアロゾルにより供給される水溶性鉄予測の不確実性を低減する取り組みが行われる¹⁷⁾。生態系への影響という観点からは、鉄が水溶性か不溶性かによって生物に利用可能かどうか左右される。直感的な理解として常人であれば、砂を口に入れても、それに含まれる不溶性のミネラルでは体内に十分に摂取されない。生物の進化を考えると植物プランクトンの場合、不溶性の鉄を溶かしてから生体内に摂取する生物は、海水中に溶存した鉄を素早く摂取できる種に比べて成長速度が遅く、生物種として卓越するには不利と考えられる。従って、エアロゾル鉄溶解率の標準測定法確立は生態系への影響を予測する数値モデルの高度化にとって必須課題である。それに関連して、2025年7月に米国で、鉄の大気海洋相互作用に関するワークショップ（Iron at the Air-sea Interaction Workshop）が開催される。なお、大気海洋相互作用に関する研究（SOLAS: Surface Ocean-Lower Atmosphere Study）に関連したイベント情報は日本 SOLAS (<https://www.solas.jp/>) や国際 SOLAS (<https://www.solas-int.org/>) のホームページより入手できる。それらの活動を通して確立された金属溶解率の標準測定法は、微小粒子状物質の測定手法および項目として、SCORの下、提案される。その手法を基に、エアロゾル中の水溶性金属濃度を定量可能な自動成分分析装置の開発を期待する。

海洋環境保護の科学的側面に関する専門家会合（GESAMP）は、国連が組織する科学者による合同専門家会合である。人間活動が海洋に与える影響を、国や国際機関とは独立した立場から科学的に評価し、政策の立案に資する助言を提示することを目的とする。GESAMP 第38作業部会 (<http://www.gesamp.org/work/groups/38>) では、海洋への大気降下物の沈着量をより正確に算出する研究に関して取り組む。そのワークショップが2025年4月にギリシャで開催された（Research priorities for improving global chemical flux estimates of atmospheric deposition to the ocean）。沈着量をより正確に算出し、エアロゾルの生態系や気候への影響を評価するためには、観測と数値シミュ

レーションを融合した学際的研究が重要となる。経済発展が環境問題よりも優先される地域では、大気汚染物質の排出量の規制値が厳密に守られない。そのため、市内では黒煙をまき散らしながら走る車を見かける。電力需要が安定しない地域では、自家発電が頻繁に利用され、それら発電機から黒煙が大気中へと排出される。そのうち鉄を含んだエアロゾルは栄養塩を植物プランクトンへ供給することで、食物連鎖を通じて漁獲量増加へ関与する。しかし、鉄を含んだエアロゾルは発生源付近で生活する住民には健康被害をもたらす。そのため、鉄を含んだエアロゾルとその環境への影響を定量的に理解することは、沿岸地域の住民にとっては食糧問題の観点から、発生源付近の住民にとっては健康被害の観点から重要となる。そうして得られた知見は、持続可能な社会の実現に向け、GESAMPの下、政策の立案に資する助言が提示される。従って、PM_{2.5}自動成分分析装置による連続観測は、発展途上国のような食糧不足および大気汚染が深刻な地域で重要性が増す。しかし、その価格の高さがモニタリング観測実施の壁となる。そこで、比較的安価なエアロゾル微量元素モニタリング装置の開発を期待する。

最後に、モニタリング観測と数値シミュレーションはどちらも自然現象の科学的な理解を深化させる上で重要な役割を果たす。本稿が、両者間での交流を促進させるような教育および研究の発展の一助となれば幸いである。

謝 辞

本研究は、文部科学省気候変動予測先端研究プログラム JPMXD0722681344 の助成を受けた。数値モデル計算には、地球シミュレータ (ES4) を使用した。図に示したデータは、以下のウェブサイトから入手した <https://doi.org/10.5281/zenodo.8385331> と https://www.env.go.jp/air/osen/pm_resultmonitoring/post_25.html (閲覧日 2025. 5. 15)。

参 考 文 献

- 1) A. Ito: Aerosol iron deposition to marine ecosystems in the Anthropocene—from the perspective of global modeling studies, *Earozoru Kenkyu*, vol. 39 (2), pp. 98–110 (2024)
- 2) A. Ito and T. Miyakawa: Aerosol iron from metal production as a secondary source of bioaccessible iron, *Environ. Sci. Technol.*, Vol. 57, pp. 4091–4100 (2023)
- 3) T. Miyakawa, A. Ito, C. Zhu, A. Shimizu, E. Matsumoto, Y. Mizuno and Y. Kanaya: Trace elements in PM_{2.5} aerosols in East Asian outflow in the spring of 2018: Emission, transport, and source apportionment, *Atmos. Chem. Phys.*, Vol. 23, pp. 14609–14626 (2023)
- 4) 環境省：微小粒子状物質 (PM_{2.5}) 成分自動測定結果ホームページ
https://www.env.go.jp/air/osen/pm_resultmonitoring/post_25.html (閲覧日 2025. 5. 15)
- 5) C. D. Keeling: The concentration and isotopic abundances of carbon dioxide in the atmosphere, *Tellus*, vol. 12, pp. 200–203 (1960)
- 6) 独立行政法人国立環境研究所，地球環境研究センター編著『地球温暖化の事典』丸善出版 (2014)
- 7) A. Ito, S. Yamada, T. Higuchi, Y. Ishikawa, Y. Nagata, K. Chiba and H. Haraguchi: Recent decline of atmospheric concentration and emission of methane in Nagoya metropolitan area, *Bull. Chem. Soc. Jpn.*, vol. 75, pp. 2385–2391 (2002)
- 8) A. Ito and J. E. Penner: Historical emissions of carbonaceous aerosols from biomass and fossil fuel burning for the period 1870–2000, *Global Biogeochem. Cycles*, vol. 19, pp. GB2028 (2005)
- 9) A. Ito, S. Sillman and J. E. Penner: Global chemical transport model study of ozone response to changes in chemical kinetics and biogenic volatile organic compounds emissions due to increasing temperatures: Sensitivities to isoprene nitrate chemistry and grid resolution, *J. Geophys. Res.*, vol. 114 (D9), pp. D09301 (2009)
- 10) A. Ito, A. Ito and H. Akimoto: Seasonal and interannual variations in CO and BC emissions from open biomass burning in Southern Africa during 1998–2005, *Global Biogeochem. Cycles*, vol. 21, pp. GB2011 (2007)
- 11) A. Ito, K. Sudo, H. Akimoto, S. Sillman and J. E. Penner: Global modeling analysis of tropospheric ozone and its radiative forcing from biomass burning emissions in the twentieth century, *J. Geophys. Res.*, vol. 112, pp. D24307 (2007)
- 12) A. Ito and M. Kawamiya: Potential impact of ocean ecosystem changes due to global warming on marine organic carbon aerosols, *Global Biogeochem. Cycles*, vol. 24, pp. GB1012 (2010)
- 13) A. Ito and Y. Feng: Role of dust alkalinity in acid mobilization of iron. *Atmos. Chem. Phys.* vol. 10, pp. 9237–9250 (2010)
- 14) A. Ito, S. Myriokefalitakis, M. Kanakidou, N. M. Mahowald, R. A. Scanza, D. S. Hamilton, A. R. Baker, T. Jickells, M. Sarin, S. Bikkina, Y. Gao, R. U. Shelley, C. S. Buck, W. M. Landing, A. R. Bowie, M. M. G. Perron, C. Guieu, N. Meskhidze, M. S. Johnson, Y. Feng, J. F. Kok, A. Nenes and R. A. Duce: Pyrogenic iron: the missing link to high iron solubility in aerosols, *Sci. Adv.*, vol. 5, pp. eaau7671 (2019)
- 15) J. F. Kok, A. A. Adebisi, S. Albani, Y. Balkanski, R. Checa-Garcia, M. Chin, P. R. Colarco, D. S. Hamilton, Y. Huang, A. Ito, M. Klose, D. M. Leung, L. Li, N. M. Mahowald, R. L. Miller, V. Obiso, C. Pérez García-Pando, A. Rocha-Lima, J. S. Wan and C. A. Whicker: Improved representation of the global dust cycle using observational constraints on dust properties and abundance. *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 21 (10), pp. 8127–8167 (2020)
- 16) A. Ito, M. M. G. Perron, B. C. Proemse, M. Strzelec, M. Gault-Ringold, P. W. Boyd and A. R. Bowie: Evaluation of aerosol iron solubility over Australian coastal regions based on inverse modeling: implications of bushfires on bioaccessible iron concentrations in the Southern Hemisphere, *Prog. Earth Planet. Sci.*, vol. 7, pp. 42 (2020)
- 17) R. Shelley, M. M. G. Perron, D. S. Hamilton and A. Ito: The open ocean, aerosols, and every other breath you take, *Eos*, vol. 105 (2024)

〈特集〉

健康リスク低減に貢献するエアロゾル粒子の化学成分の測定とデータ解析

藤谷 雄二

国立研究開発法人 国立環境研究所 環境リスク・健康領域
(〒305-8506 茨城県つくば市小野川16-2 E-mail: fujitani.yuji@nies.go.jp)

概要

エアロゾル粒子は微小ながら健康と気候に影響を及ぼす存在である。その化学成分や物理特性は、健康影響の大きさを決める要因であり、健康リスクの評価や低減対策には、化学成分等を測定して把握することが重要である。本稿では、エアロゾル粒子の基本特性、化学成分の測定手法や測定する意義について述べる。さらに、健康影響の一側面として注目される酸化ストレス誘導と化学成分等との関連を定量的に明らかにした研究を概説する。最後に、健康リスク評価に必要な今後の課題を論じ、良好な空気質の維持に向けた方策を述べる。

キーワード：粒子状物質、都市大気、エアロゾル質量分析計、発生源寄与評価、酸化ストレス誘導

原稿受付 2025.4.22

EICA: 30(1) 17-21

1. エアロゾル粒子とは

1.1 エアロゾル粒子の特性と環境・健康への影響

気体中に浮遊する微小な液体または固体の粒子と周囲の気体の混合体をエアロゾル (aerosol) と言い、そのうち粒子をエアロゾル粒子と表現する。エアロゾル粒子の性状は、粒径や化学成分、形状など様々な要素の組み合わせで決まるため複雑である。粒径に関しては、分子やイオンとほぼ等しい1 nm程度から花粉のように100 μm 程度に達するものまで、約5桁にわたる範囲が研究対象となる¹⁾。エアロゾル粒子の主要な化学成分は Fig. 1 に示すように、硫酸イオンなどの水溶性成分、有機物、元素状炭素 (測定方法によってはブラックカーボンと呼ぶ)、鉄などの金属成分がある。エアロゾル粒子は太陽放射を散乱・吸収することや、雲の核となって雲の増減に関与することにより、気候に影響を及ぼす²⁾。一方で粒子の直径が2.5 μm 以下のPM_{2.5}などの粒径が小さな粒子はヒトの呼吸器に沈着しやすく、体内に取り込まれやすいため、ヒトの

健康にも影響する。その影響は、呼吸器系をはじめとして、心臓血管系、代謝系、脳神経系、生殖系にも広がり、発がんや死亡の要因ともなりうる。PM_{2.5}などの吸入曝露と、これらの健康影響との関係については、“causal”あるいは“likely causal”と評価される科学的知見が蓄積されている³⁾。

エアロゾル粒子の起源としては人為起源と自然起源に大別され、傾向としてはPM_{2.5}などの小さな粒子は人為起源で発生しやすい。起源や粒子種としては、工場、森林火災や野焼き、自動車などの燃焼発生源、自動車等のブレーキやタイヤ磨耗粉じん、花粉や後述する二次粒子の前駆ガスを放出する植物由来、黄砂などの鉱物粒子、海洋由来の海塩粒子、ウイルスや細菌などのバイオ粒子、マイクロ/ナノプラスチック粒子などがある。これらの粒子は、発生源から直接粒子として発生する一次粒子と、大気中で光化学反応等により前駆ガスから生成する二次粒子に分類される。さらには近年では、有機物粒子に関して、気温などの環境条件により粒子とガスの間を行き来する半揮発性性状を持つ凝縮性粒子の存在が注目されている⁴⁾。また、有機物粒子は大気中で漂う間に酸化反応を受け、エージングと呼ばれる過程を経て化学成分が変化し続けているという認識が広がっている⁵⁾。これらの多様なエアロゾル粒子種は、時空間的に変動しつつ、重層的に存在している。そのため Fig. 1 に示した組成はあくまで一例に過ぎない。

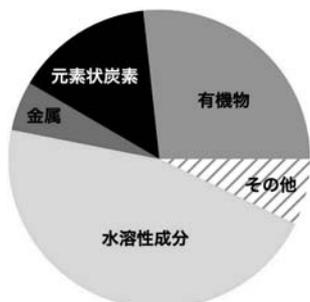


Fig. 1 Average chemical composition of major species in PM_{2.5} in Tsukuba, Japan (January 2017).

1.2 エアロゾル粒子の化学成分を測定する意義

日本の環境基本法は人の健康を保護する上で維持されることが望ましい基準を定めているが、それに基づ

く大気環境中のPM_{2.5}の環境基準は、年間平均値で15 $\mu\text{g m}^{-3}$ 以下となっており、単位空気量あたりの質量濃度で規定されている。質量濃度に基づく考え方は、米国における疫学研究の結果の影響を大きく受けている。この研究ではPM_{2.5}濃度が高い地域ほど死亡率が高いことが報告されている⁶⁾。国内では2009年にPM_{2.5}の環境基準が告示されたが、その濃度レベルは、自動車排気ガス等の発生源対策の強化によって大幅に改善され、近年は全国にある大気常時監視局での環境基準の達成率はほぼ100%である。なお、世界保健機関の提言である年間平均値の5 $\mu\text{g m}^{-3}$ ⁷⁾の達成にはまだ難しい状況である。

化学成分は粒子質量を構成する物質であるが、化学成分によって毒性の大きさに違いがあることは容易に想像できる。よって、より効果的な健康の保護という観点では、化学成分に着目して毒性の強い化学成分を見出し、その濃度を削減する必要がある。質量濃度として過去に比べて低減された現在は、より精緻に化学成分を測定し、把握していく必要があると思われる。

同時に化学成分を把握することは、発生源別に特徴的な成分が存在するため、指標成分として発生源を特定することに役立つ。例えば重油燃焼に由来するエアロゾル粒子の指標物質としてはバナジウムやニッケル、バイオマス燃焼に由来するものにはセルロースの熱分解生成物であるレボグルコサンなどがある。エアロゾル粒子の起源や特定の粒子がどのような行為で発生するのか、が明らかになれば低減対策につなげることができる。

発生源の寄与率を定量的に推定する方法は大気輸送モデル等を用いるフォワードモデルと観測データに基づくレセプターモデルがある⁸⁾。後者はケミカルマスバランス法とpositive matrix factorization (PMF)法に大別される。ケミカルマスバランス法は発生源別に固有な化学組成データと、レセプターサイト(観測点)における化学組成データから推定する。推定に当たっては、予め観測点に影響を及ぼしていると思われる発生源の目星を付ける必要がある。また、発生源から観測点に輸送される間での化学組成は維持されるという前提があるため、近年認識されてきたエージングによる、大気中の化学成分の変化が大きい場合には、推定結果が正確でないことがある。PMF法は、エアロゾル粒子の質量濃度や化学成分濃度の時系列データを一種の因子分析を行い複数の因子に分解する。因子と発生源が紐付けば、その地点に影響を及ぼしている発生源の寄与を明らかにすることができる。複数の化学成分について多くの時系列データが必要になるため、後述するフィルタ試料でのPMF法の実施には労力を要する。また、因子と発生源の関係を紐付ける作業が必要になり、因子濃度の日内や季節変動などの時系列

パターンや、因子の化学組成等から考察することになる。

1.3 エアロゾル粒子の化学成分の測定法

エアロゾル粒子は一般的には捕集フィルタにろ過捕集して量を蓄積した上で炭素分析計、イオンクロマトグラフ、GC-MS、ICP-MSなどの分析計によって分析される。大気中濃度や捕集流量にもよるが、分析感度を上回るためには半日程度以上の捕集時間が必要となる。一方、大気の事象は捕集時間のスケールに比べて短時間で起きることがあり、時間的に平均化されたデータでは事象を詳細に解析することが難しい場合がある。一方で、その場でエアロゾル粒子の化学成分を連続的に計測できる装置の開発も進んでいる⁹⁾。テープ式ろ紙で捕集面を順送りにし、分析計やセンサと組み合わせることで、捕集から成分分析までを自動化した装置がある。また、エアロゾルを導入し、ガス交換器を用いて空気をアルゴンに置換した上でエアロゾル粒子を誘導結合プラズマに導入し、質量分析計と組み合わせる装置も開発されている。

エアロゾル質量分析計(Aerosol mass spectrometer: AMS)は空気中のエアロゾル粒子を真空中に導入し、質量分析により成分濃度を測定する装置である。様々な機種、オプション品が市販されているが、そのうち筆者が使用しているSP(soot particle)-AMSについて紹介する¹⁰⁾。SP-AMSは、主に、空気力学レンズによる真空内での粒子線生成、粒子の移動度による空力学径測定、イオン化部、および高分解能飛行時間型質量分析計による粒子組成分析に区別される。イオン化部では600度に加熱されたタングステンヒータおよび波長1,064 nmのNd:YAG連続発振型レーザーによる二種類の蒸発器、あるいは片方の蒸発器でエアロゾル粒子を蒸発させ、蒸発成分を電子衝撃法でイオン化させる。そのうち質量分析計で質量スペクトルが測定される。電子衝撃イオン化法を用いた質量分析では、対象となる分子はフラグメント化され、その断片が質量スペクトル上に小さな質量数として現れる。しかしながら、測定後のデータ解析を通じて、それらのフラグメントイオンをもとに元の成分が再構成され、ブラックカーボン、有機物、硫酸などのエアロゾル粒子の主要成分が時系列データとして得られる。最高10 Hz程度の時間分解能で連続的に測定することが可能である。また空力学径測定データと合わせて解析することにより、化学成分別の粒径分布(粒径50 nm程度から1,000 nmの範囲)も得ることができる。

2. 発生源寄与評価と毒性の関係

2.1 AMS で取得した有機物データの PMF 解析

筆者らは近年、様々な環境において SP-AMS でデータを取得し、主に有機物を対象に PMF 法による発生源寄与評価を行ってきた¹¹⁻¹⁴⁾。AMS は化学成分の時系列データを容易に取得することができるので PMF 法による発生源寄与評価との親和性が高い。

一方で、エアロゾル粒子中の有機物の分子は無数に存在し、現状で最高の化学成分分解能を持つ GC-MS-MS を用いても、エアロゾル粒子中の有機物全量の約 30% 程度しか物質を特定することができない¹⁵⁾。しかし、AMS データに PMF 法を適用することで、個々の有機分子を特定することはできないものの、有機物全量をいくつかのサブクラス（例えば自動車排気由来、野焼き由来、二次生成由来など）に分離し、それぞれの濃度として全量に割り当てることが可能である。この方法により、発生源ごとの寄与を定量化できるため、発生源対策の優先順位を検討する上で有用である。

加えて、健康リスクの低減という観点では、有機物のサブクラス濃度と毒性の関係を評価することで、未特定成分を含む有機物であっても、高い毒性を示す成分群の発生源を特定することが可能となり、毒性の高いエアロゾル成分の管理や規制につながる。本稿では、金属成分や有機物のサブクラスなどの異なる粒子種が、酸化ストレスをどの程度誘導するのかを評価した研究について紹介する^{11,14)}。

2.2 酸化ストレスと、その評価法

粒子の毒性には様々なエンドポイントがあるが、筆者は肺胞上皮細胞に対する酸化ストレスに着目している。呼吸器系における酸化ストレスは、最終的には喘息や慢性閉塞性肺疾患の悪化と関連している³⁾。細胞は酸化的損傷を防ぐために、非酵素的および酵素的抗酸化物質を利用するが、その中でも抗酸化酵素の一つであるヘムオキシゲナーゼ-1 (HO-1) は、酸化ストレス応答の初期段階で発現が誘導される¹⁶⁾。このため、HO-1 の誘導は生体における酸化ストレスの指標とされている¹⁷⁾。細胞内での HO-1 の発現量は化学成分およびその用量に依存するため、細胞レベルでの生物学的反応と化学成分の関係を評価することは、個体レベルでの毒性の理解や、健康リスク評価に役立てることができる。

2.3 粒子種と酸化ストレス誘導能の関係

観測は 2 カ所（つくば 2017 年 1 月、7-8 月、福岡 2018 年 1-2 月、5 月）で行った。SP-AMS によるエアロゾル粒子の連続測定とともに PM_{2.5} 試料を捕集し、

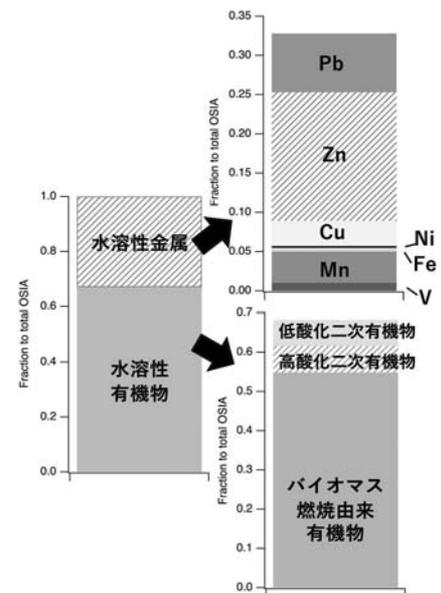


Fig. 2 Contribution of each chemical component to air-volume-based oxidative stress induction ability (OSIA) in water-soluble PM_{2.5} samples.

金属成分等の化学分析、HO-1 試験を実施した。さらに、SP-AMS データに対して PMF 解析を行い、有機物のサブクラスの寄与評価を行った。また、水溶性金属等の試薬を用いた HO-1 試験も行った。これらの結果を総合したところ、PM_{2.5} 試料の水抽出物における各粒子種の酸化ストレス誘導能 (Oxidative stress induction ability: OSIA) への寄与 (全試料の平均値) は Fig. 2 となった。全体の約 7 割が、有機物の影響によるものとされ、そのうち、野焼きや森林火災などのバイオマス燃焼由来有機物が多くを占めており、二次生成有機物も寄与していた。一方金属は Pb, Zn, Cu, Mn の影響が大きかった。これらの金属の発生源の定量的な評価は行っていないが、国内の PM_{2.5} の排出量推計¹⁸⁾ から推察すると、廃棄物焼却 (Pb, Zn) や鉄鋼業 (Pb, Cu, Mn) の影響があったと推察される。また、観測地点を通過した空気塊の由来を追跡する後退流跡線解析の結果から、国外からの越境汚染の影響も考えられた。

Fig. 2 に示した寄与は、各化学成分の単位空気量当たりの OSIA の値に対する寄与を求めたものである。この OSIA の値は、各化学成分の大気中濃度と、その化学成分量当たりの OSIA の積で算出される。よって、各化学成分の単位空気量当たりの OSIA の値を化学成分の大気中濃度で割ると、化学成分量当たりの OSIA が求まる。そのようにして求めた各成分の化学成分量当たりの OSIA を比較すると、Pb が最も高い値であり、ついで Cu, Mn であった。バイオマス燃焼由来有機物の大気中濃度は金属成分と比べて一桁程度高いため、化学成分量当たりの数値としては低い結果となった。

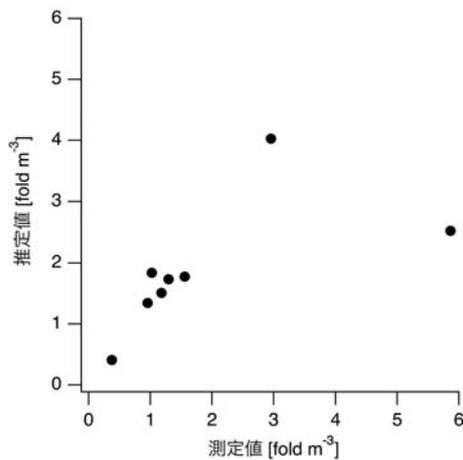


Fig. 3 Comparison of predicted and measured oxidative stress induction ability (OSIA) for water soluble PM_{2.5} samples in Tsukuba, October 2015.

各化学成分の大気中濃度が分かりさえすれば、この化学成分量当たりの OSIA を使って単位空気量当たりの OSIA を評価することができる。そこで求めた化学成分量当たりの OSIA の普遍性を確認するために、つくばで採取された他の季節の試料、特に稲わらなどの田畑における農業残渣の燃焼によるバイオマス燃焼が盛んな秋季の PM_{2.5} 試料について評価した¹⁴⁾。試料を HO-1 試験した結果 (測定値) と、各化学成分濃度と化学成分量当たりの OSIA を掛け合わせて積算した結果 (推定値) を比較した (Fig. 3)。その結果、一点だけ例外があるものの、他は測定値と推定値がおおむね一致する結果となった。

このことから過去の観測や大気質モデリングから得られた金属成分や有機物のサブクラスの濃度データを用いて、エアロゾル粒子の化学成分への曝露によって誘導される酸化ストレスを遡及的に推定できる可能性があることを示している。

2.4 今後の課題

今後はつくば以外の国内試料、また国外の試料にも展開し、化学成分量当たりの OSIA が普遍的な値なのか、さらなる検証が必要である。また、特定の成分の組み合わせによる相乗効果や抑制効果も考えられるのでその検証も必要である。その上で、化学成分情報を用いた OSIA の推定と、大気質モデルによるその時空間的な分布の予測を組み合わせ、健康リスクを評価していく必要がある。

一方で、PM_{2.5} に関する疫学研究の評価対象は、従来の質量濃度から、個別の化学成分濃度や発生源別濃度へと移っている。また、健康影響の評価も、死亡率にとどまらず、呼吸器疾患や循環器疾患による救急搬送数などへと展開されている。OSIA は細胞を用いた初期反応を評価しているに過ぎず、多面的な影響指標の一側面を捉えているに過ぎない。よって、疫学研究

で評価される最終的なエンドポイントとの比較を通じて、細胞レベルの初期反応と、実際の健康影響との関連性を検証することが重要である。この知見は、細胞試験によるリスク評価の妥当性を高め、新たな影響指標の開発や健康リスク評価の精度向上につながる可能性があり、今後の研究の重要な方向性となる。

今回のケーススタディにおいては、野焼きが盛んな時期には、単位空気量あたりの OSIA 値が他の季節に比べて高くなっており、これにより、呼吸によって取り込まれるバイオマス燃焼由来有機物の酸化ストレス誘導能への影響が大きいことが示唆された。現在、日本では法律により廃棄物の屋外焼却は禁止されているが、農業残渣の焼却は例外として認められる場合がある。また森林火災は日本国内も含めて世界中で頻発しているが、ひとたび発生すると、国境を越えるほどの大規模なエアロゾル粒子の発生量となる場合がある。バイオマス燃焼の管理は、良好な大気質を維持し、公衆衛生を守るために重要である。

3. おわりに

本稿では、エアロゾル粒子の基本的な解説と酸化ストレス評価に関する研究を紹介した。紙面の都合もあり、全体的に概要にとどまる内容となったが、各テーマについてより詳細な理解を深めたい読者は、参考文献をご参照いただきたい。

参考文献

- 1) 日本エアロゾル学会 HP, https://www.jaast.jp/new/about_aerosol.html (閲覧日 2025.4.21)
- 2) IPCC: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 35–115, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647 (2023)
- 3) U. S. EPA: Integrated Science Assessment (ISA) for Particulate Matter (Final Report, Dec 2019). U. S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, EPA/600/R-19/188 (2019)
- 4) Y. Fujitani, K. Sato, K. Tanabe, K. Takahashi, J. Hoshi, X. Wang, J. C. Chow and J. G. Watson: Volatility Distribution of Organic Compounds in Sewage Incineration Emissions, *Environ Sci Technol*, Vol. 54, No. 22, pp. 14235–14245 (2020)
- 5) A. L. Robinson, N. M. Donahue, M. K. Shrivastava, E. A. Weitkamp, A. M. Sage, A. P. Grieshop, T. E. Lane, J. R. Pierce and S. N. Pandis: Rethinking organic aerosols: semivolatile emissions and photochemical aging, *Science*, Vol. 315, No. 5816, pp. 1259–1262 (2007)
- 6) D. W. Dockery, C. A. Pope, X. P. Xu, J. D. Spengler, J. H. Ware, M. E. Fay, B. G. Ferris and F. E. Speizer: An Association between Air-Pollution and Mortality in 6 United-States Cities, *New England Journal of Medicine*, Vol. 329, No. 24, pp. 1753–1759 (1993)

- 7) World Health, Organization: WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide, Geneva, Switzerland, xxi, 273 p. 9789240034228 (electronic version) (2021)
- 8) 飯島明宏：-大気モデル - 第5講 レセプターモデル -, 大気環境学会誌, Vol. 46, No. 4, pp. A53-A60 (2011)
- 9) 竹川暢之, 高見昭憲：4. エアロゾル成分分析の概要, エアロゾル研究, Vol. 32, No. 2, pp. 118-124 (2017)
- 10) 藤谷雄二, 疋田利秀, 下野彰夫：Soot Particle-AMSによるブラックカーボン測定のパフォーマンス評価, エアロゾル研究, Vol. 32, No. 1, pp. 20-28 (2017)
- 11) Y. Fujitani, A. Furuyama, M. Hayashi, H. Hagino and M. Kajino: Assessing oxidative stress induction ability and oxidative potential of PM_{2.5} in cities in eastern and western Japan, *Chemosphere*, Vol. 324, pp. 138308 (2023)
- 12) Y. Fujitani, A. Ikegami, K. Morikawa, J. Kumoi, T. Yano, A. Watanabe, A. Shiono, C. Watanabe, N. Teramae, G. Ichihara and S. Ichihara: Quantitative assessment of nano-plastic aerosol particles emitted during machining of carbon fiber reinforced plastic, *J Hazard Mater*, Vol. 467, pp. 133679 (2024)
- 13) Y. Fujitani, K. Takahashi, K. Saitoh, A. Fushimi, S. Hasegawa, Y. Kondo, K. Tanabe, A. Takami and S. Kobayashi: Contribution of industrial and traffic emissions to ultrafine, fine, coarse particles in the vicinity of industrial areas in Japan, *Environmental Advances*, Vol. 5 (2021)
- 14) Y. Fujitani, A. Furuyama, S. Hirano, A. Fushimi, K. Saitoh, A. Yoshino, K. Sato and A. Takami: Oxidative Stress Induction Ability of Particles Emitting from Agricultural Open Burning in Japan, *Global Environmental Research*, Vol. 27, No. 1, pp. 27-35 (2023)
- 15) M. Hallquist, J. C. Wenger, U. Baltensperger, Y. Rudich, D. Simpson, M. Claeys, J. Dommen, N. M. Donahue, C. George, A. H. Goldstein, J. F. Hamilton, H. Herrmann, T. Hoffmann, Y. Iinuma, M. Jang, M. E. Jenkin, J. L. Jimenez, A. Kiendler-Scharr, W. Maenhaut, G. McFiggans, T. F. Mentel, A. Monod, A. S. H. Prevot, J. H. Seinfeld, J. D. Surratt, R. Szmigielski and J. Wildt: The formation, properties and impact of secondary organic aerosol: current and emerging issues, *Atmospheric Chemistry and Physics*, Vol. 9, No. 14, pp. 5155-5236 (2009)
- 16) B. Hellack, C. Nickel, C. Albrecht, T. A. J. Kuhlbusch, S. Boland, A. Baeza-Squiban, W. Wohlleben and R. P. F. Schins: Analytical methods to assess the oxidative potential of nanoparticles: a review, *Environmental Science: Nano*, Vol. 4, No. 10, pp. 1920-1934 (2017)
- 17) N. Li, C. Sioutas, A. Cho, D. Schmitz, C. Misra, J. Sempf, M. Y. Wang, T. Oberley, J. Froines and A. Nel: Ultrafine particulate pollutants induce oxidative stress and mitochondrial damage, *Environmental Health Perspectives*, Vol. 111, No. 4, pp. 455-460 (2003)
- 18) M. Kajino, H. Hagino, Y. Fujitani, T. Morikawa, T. Fukui, K. Onishi, T. Okuda, T. Kajikawa and Y. Igarashi: Modeling transition metals in East Asia and Japan and its emission sources, *GeoHealth*, Vol. 4, No. 9, pp. e2020GH000259 (2020)

〈特集〉

環境大気モニタリングで活躍する自動計測機器

加賀 健一郎

東亜ディーケーケー(株)

(〒305-8506 埼玉県狭山市北入曾 613 E-mail: k-kaga@toadkk.co.jp)

概要

当社は、1960年代から環境大気モニタリングに向けた計測器を開発してきた。1962年には、厚生省の大気汚染自動測定器開発計画に参加し、1963年12月に日本で初めてザルツマン法を自動化した窒素酸化物自動測定器を完成させた。また1970年には東京都からの依頼により、国産初のオキシダント自動測定器を完成させた。現在も、日本をはじめ海外へ大気汚染自動測定器を販売し、世界中で環境大気モニタリングに貢献している。本稿では日本の環境大気モニタリングについて、その歴史・法規制と測定技術について紹介する。

キーワード：計測技術，大気，モニタリング

原稿受付 2025.4.28

EICA: 30(1) 22-25

1. はじめに

日本の公害問題は、1890年代の足尾銅山鉍毒から始まり、1950年代には四大公害病が発生した。大気汚染問題は、高度経済成長期（1955～1973年頃）に、産業の大規模化、高度化に伴い、硫黄酸化物やばいじん、窒素酸化物による大気汚染が深刻な問題となった。

そのような中、全国各地で発生した大気汚染などに対応するため、国よりも先に地方自治体が公害防止に関する条例を制定した（1949年に東京都が公害防止条例、1950年に大阪府が事業場公害防止条例、1951年に神奈川県が事業場公害防止条例等）。

国においては、1962年に煤煙規制法、1967年に公害対策基本法、1968年に大気汚染防止法を制定した。1970年の公害国会を経て、1971年には環境庁が発足し、公害対策が進められてきた。その後、複雑化・地球規模化する環境問題に対応するため、1993年に公

害対策基本法は廃止され、新たに環境基本法が制定された。

2. 環境大気モニタリング

環境基本法の第三節環境基準第十六条には、「政府は、大気の汚染、水質の汚濁、土壌の汚染及び騒音に係る環境上の条件について、それぞれ、人の健康を保護し、及び生活環境を保全する上で維持されることが望ましい基準を定めるものとする。」とある。実際の環境基準は、環境省の告示により、対象となる物質、環境上の条件、測定方法が定められている（Table 1）。

環境大気モニタリングは、大気汚染防止法第二十二條で、「都道府県知事は、大気の汚染の状況を常時監視しなければならない。」「都道府県知事は、前項の常時監視の結果を環境大臣に報告しなければならない。」と定められている。環境大気モニタリングの

Table 1 environmental standards¹⁻³⁾

物質	環境上の条件	測定方法
二酸化硫黄 (SO ₂)	1時間の1日平均値が0.04 ppm以下であり、かつ、1時間値が0.1 ppm以下であること。	溶液導電率法又は紫外線蛍光法
一酸化炭素 (CO)	1時間の1日平均値が10 ppm以下であり、かつ、1時間値の8時間平均値が20 ppm以下であること。	非分散型赤外分析法
浮遊粒子状物質 (SPM)	1時間値の1日平均値が0.10 mg/m ³ 以下であり、かつ、1時間値が0.20 mg/m ³ 以下であること。	濾過捕集による重量濃度測定方法又はこの方法によって測定された重量濃度と直線的な関係を有する量が得られる光散乱法、圧電天秤法若しくはβ線吸収法
光化学オキシダント (Ox)	1時間値が0.06 ppm以下であること。	中性ヨウ化カリウム溶液を用いる吸光光度法若しくは電量法、紫外線吸収法又はエチレンを用いる化学発光法
二酸化窒素 (NO ₂)	1時間の1日平均値が0.04 ppmから0.06 ppmまでのゾーン内またはそれ以下であること。	ザルツマン試薬を用いる吸光光度法又はO ₃ を用いる吸光光度法
微小粒子状物質 (PM _{2.5})	1年平均値が15 μg/m ³ 以下であり、かつ、1日平均値が35 μg/m ³ 以下であること。	濾過捕集による質量濃度測定方法又はこの方法によって測手された質量濃度と等価な値が得られると認められる自動測定機

結果は、緊急時対応や環境基準の適否判断の資料として利用される。また、大気環境モニタリングの速報値は、環境省の「そらまめくん」や自治体HPで公開されている。

3. 測定局

環境大気モニタリングでは、大気汚染自動測定器を設置する無人の局舎を測定局と呼んでいる。測定局はその目的により2種類に大別される。ひとつは、一定地域における大気汚染状況の継続的把握を目的とする一般環境大気測定局（一般局）、もうひとつは、自動車排出ガスに起因する大気汚染監視を目的とする自動車排出ガス測定局（自排局）である。

測定局数の目安⁴⁾は、人口75,000人に1つ、若しくは可住地面積25km²に1つのどちらか数の少ない方を都道府県ごとの基本的な測定局数とする。この基本的な測定局数に、環境濃度レベルに対応した調整、測定項目の特性に対応した調整を行って決定する。

環境省が公開した「令和3年度大気汚染物質（有害大気汚染物質等を除く）に係る常時監視測定結果」⁵⁾を見ると約1,800局の測定局がある。二酸化窒素が1,582局（一般局1,210局、自排局372局）、浮遊粒子状物質1,629局（一般局1,265局、自排局364局）、光化学オキシダント1,180局（一般局1,148局、自排局32局）、二酸化硫黄946局（一般局902局、自排局44局）、一酸化炭素276局（一般局57局、自排局219

局）、微小粒子状物質1,118局（一般局877局、自排局241局）となっている。

測定局では、大気汚染自動計測器の他に、温湿度計や風向風速計などの気象測器が稼働している。これらの計測器は、無人の測定局で連続測定を行っている。測定データは、テレメーターシステムによって子局（測定局）から親局（中央監視局）へ送られる。

環境基準による評価においては、1日平均値に関しては1日20時間以上測定時間を有する「有効測定日」が対象となる。また、環境基準の長期的評価には、二酸化硫黄、一酸化炭素、浮遊粒子状物質及び二酸化窒素については年間測定時間が6,000時間以上の測定が行われた「有効測定局」であること、微小粒子状物質についても年間250日以上有効測定日があることが必要とされている。

これらの測定局以外にも、測定器を自動車に設置して短期間の臨時測定局として使用する移動測定局がある。



Fig. 1 Monitoring station outside



Fig. 2 Monitoring station inside



Fig. 3 Monitoring vehicle

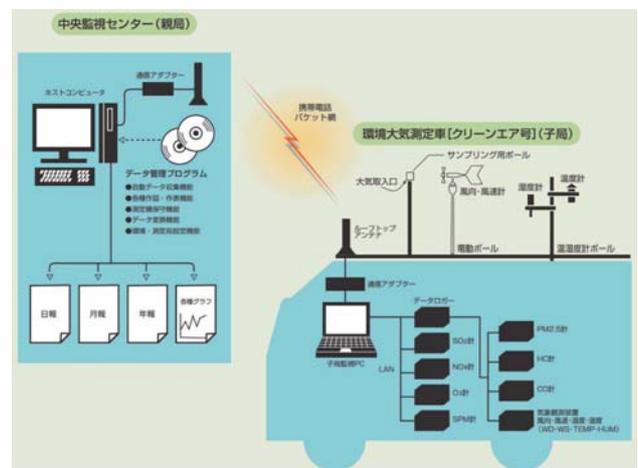


Fig. 4 Monitoring vehicle system

4. 大気汚染自動測定器

4.1 窒素酸化物測定器

当社の窒素酸化物測定器の開発は、1962年に厚生省の大気汚染自動測定器開発計画に参加し、厚生省環境衛生局国立衛生研究所（当時）と柳沢三郎慶応大学教授の指導の下、湿式分析法であるザルツマン法の自動化に着手したことから始まった。完成した装置は国立衛生研究所に納入され、都内三ヶ所（甲州街道～環状7号線の大原交差点、中仙道の板橋清掃事務所、都庁第二庁倉前）で窒素酸化物のモニタリングが開始された。

日本では、長らく湿式法の窒素酸化物測定器が用いられてきたが、1996年に乾式（化学発光法）の測定器の使用が認められた。乾式法が導入されると、吸収液を用いない簡便さなどから、化学発光法への切替わりが進み、現在ではほとんどの測定器が化学発光法となっている。

化学発光法の窒素酸化物測定器の測定原理は、次の通りとなる。一酸化窒素（NO）がオゾン（O₃）と反応して二酸化窒素（NO₂）を生成する過程で生じる化学発光の強度がNO濃度と比例関係にあることを利用しNO濃度を求める。一方、NO₂はO₃との反応で化学発光しない。このため、試料をコンバーターでNOに還元したのちNO_x（NO+NO₂）濃度として求め、先に求めたNO濃度を差し引いてNO₂濃度を求める。反応に必要なO₃は、空気を無声放電することで発生させる。コンバーターは、モリブデン（Mo）系触媒を使用している。測定フローはFig. 5に示す通りとなっている。

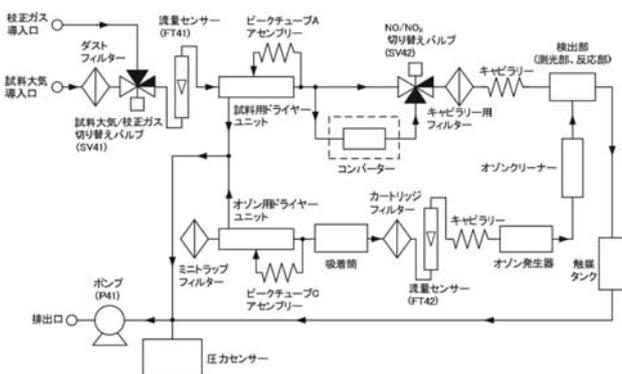


Fig. 5 NO_x Analyzer Measurement system diagram

4.2 オゾン測定器

当社のオゾン測定器は、1970年には東京都からの依頼により、国産初のオキシダント自動測定器を完成させたことから始まった。

窒素酸化物測定器と同様に、1996年に乾式法として紫外線吸収法のオゾン測定器が導入されるまでは、

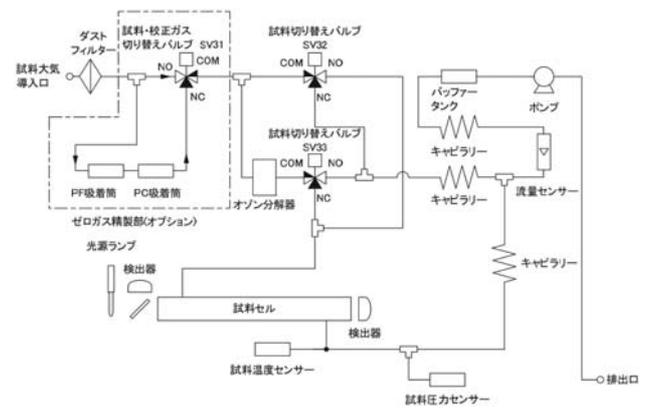


Fig. 6 O₃ Analyzer Measurement system diagram

湿式の中性ヨウ化カリウム溶液を用いる吸光光度法が広く使用されていたが、現在では紫外線吸収法のオゾン測定器での測定が一般的となっている。

紫外線吸収法のオゾン測定器の測定原理は、次の通りとなる。オゾン（O₃）は254 nm付近の紫外線に極大の吸収帯を持っている。O₃濃度は、ランベルトベールの法則に基づき、気体の状態方程式を適用することにより求める。紫外線の光源には、低圧水銀ランプを使用している。オゾン分解器はマンガン（Mn）系触媒を使用している。測定フローはFig. 6に示す通りとなっている。

4.3 微小粒子状物質測定器

微小粒子状物質（PM_{2.5}）は、2009年に環境基準が定められた最も新しいモニタリング項目である。PM_{2.5}の測定方法は、Table 1にある通り「濾過捕集による質量濃度測定方法又はこの方法によって測定された質量濃度と等価な値が得られると認められる自動測定機による方法」となっている。このため環境省では、標準測定法である「濾過捕集による質量濃度測定方法」と自動測定器の並行運転の測定結果から等価性を有する測定器を公表している。この並行試験は、都



Fig. 7 PM_{2.5} Analyzer

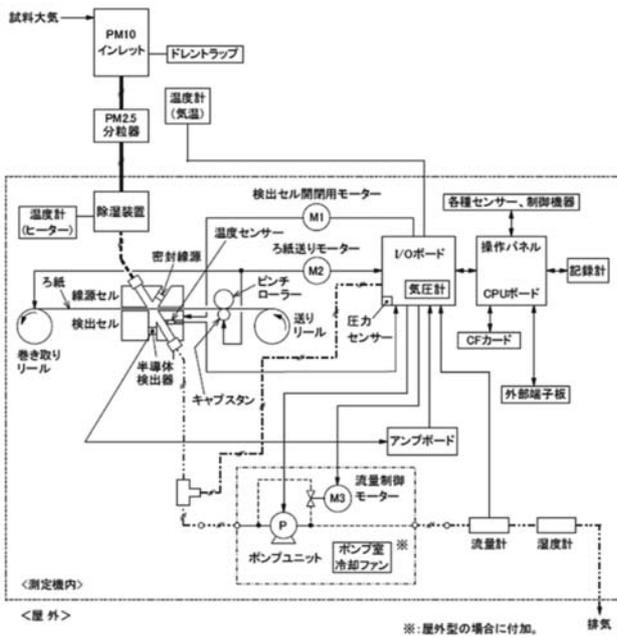


Fig. 8 PM_{2.5} Analyzer Measurement system diagram

市部，非都市部で夏季及び冬季に実施する。等価性を有すると評価されたのは9機種ある。測定原理はβ線吸収法が8機種，β線吸収法+光散乱法が1機種となっている。

当社は，1981年から浮遊粒子状物質（SPM）測定器でβ線吸収法を採用したことから始まり，現在では，等価性を有するPM_{2.5}測定器となっている。

β線吸収法の微小粒子状物質測定器測定原理は，次

の通りである。まず，大気中の粒子は分流器を用いて粗大な粒子を除去して，PM_{2.5}をろ紙へ捕集する。捕集したPM_{2.5}をβ線吸収法で測定することで濃度を求める。β線吸収法とは，物質に低エネルギーのβ線を照射した場合，β線の減衰量が物質の質量に比例することを利用した測定方法である。Fig. 8の通り線源セルと検出セルでろ紙を挟み，PM_{2.5}を捕集するための流路を設ける。その流れと直交するように，β線源と半導体検出器をろ紙を挟んで配置する。PM_{2.5}の捕集は1時間行う。この時，捕集前と捕集後の透過β線強度の変化量から濃度を求める。β線源は，密封線源（¹⁴C）を使用している。

参考文献

- 1) 環境庁告示 25 号： <https://www.env.go.jp/kijun/taiki1.html> (閲覧日 2025. 4. 10)
- 2) 環境庁告示 38 号： <https://www.env.go.jp/kijun/taiki2.html> (閲覧日 2025. 4. 10)
- 3) 環境省告示 33 号： <https://www.env.go.jp/kijun/taiki4.html> (閲覧日 2025. 4. 10)
- 4) 大気汚染防止法第 22 条の規定に基づく大気の汚染の状況の常時監視に関する事務の処理基準： https://www.env.go.jp/air/osen/law22_kijun.html (閲覧日 2025. 4. 10)
- 5) 令和 3 年度大気汚染物質（有害大気汚染物質等を除く）に係る常時監視測定結果： <https://www.env.go.jp/content/000139516.pdf> (閲覧日 2025. 4. 10)

〈令和7年度 総会〉

開 催 挨 拶

環境システム計測制御学会 会長 高 岡 昌 輝
京都大学大学院工学研究科 教授
都市環境工学専攻



皆様、こんにちは。

本日は環境システム計測制御学会の総会にお集まりいただき、誠にありがとうございます。現在、当学会の会長を務めております京都大学の高岡昌輝でございます。総会の開催にあたり、会長として一言皆様にご挨拶を申し上げます。まず、この総会が開催されるにあたり、多くの方々のご尽力とご支援があったことに深く感謝申し上げます。

昨年の総会をきゅりあんで開催して以降、様々な活動をしてまいりました。10月には京都で研究発表会を行い、多くの方にお集まりいただき、石川県珠洲市の副市長の金田様に能登半島地震に関する状況を特別講演でお話いただいたのは記憶に新しいところです。また、国際的には、IWA、国際水協会のICAの会議を2029年に日本に誘致すべく、特別なチームを作っており、学会誌は電子化され、それに伴いホームページの改訂なども現在準備しております。これらは現在の活動の一端であり、本日の総会では、昨年度の事業報告及び決算、本年度の事業計画及び予算、役員案等をご審議いただきます。学会をより良くしていくためにも忌憚のないご意見を賜りたいと思います。

よろしく願いいたします。

総会後は、2件の講演を予定しております。1つ目は環境省から清水俊貴様に「PFASに関する環境省の取組」と題してご講演をいただきます。現在、様々な分野で広範に問題となっておりますPFASについては、皆様に関心も非常に高いことと思います。貴重なお話が拝聴できるものと思います。

2つ目は(国研)国立環境研究所の仁科一哉様に「窒素循環の適正化に向けた統合的窒素管理手法の展望」と題して、ご講演いただきます。プラネタリーバウンダリーですでに許容範囲を超えている喫緊の問題です。本日は、国際的な動向にも詳しい仁科様から興味深い話を拝聴できるものと期待しております。

本日の総会及び講演会が、皆様にとって有益なものとなりますよう、心よりお祈り申し上げます。ありがとうございました。

〈総会報告〉

令和7年度 EICA 総会・講演会報告

EICA 事務局長 佐藤 圭輔 (立命館大学 理工学部)

令和7年度 EICA 総会と論文賞・功績賞表彰式、講演会を開催しましたのでその概要を報告します。

【総会と表彰式の開催概要】

開催日：令和7年5月19日（月）13：00～14：20

会場：品川区立総合区民会館「きゅりあん」6階
大会議室

総会：

第1号議案	令和6年度事業報告
第2号議案	令和6年度決算案及び監査報告
第3号議案	令和7年度事業計画案
第4号議案	令和7年度予算案
第5号議案	令和7年度役員案

選考委員会報告：論文賞および功績賞の選考結果について

表彰式：論文賞

1. 開会の辞と会長挨拶

総会に先立ち、司会の山内進氏（総務委員，(株)堀場アドバンステクノ）から開会の辞があり，出席46名，委任状提出会員81名，合計127名で，会員総数248名の5分の1である50名以上となり，会則第13条により，本総会が有効に成立されたことが報告されました。続いて会長の高岡昌輝先生（京都大学大学院工学研究科）から挨拶がありました。

【高岡昌輝会長による開会の挨拶】



高岡昌輝 会長（京都大学大学院 工学研究科）

2. 議長，議事録署名人の選出

議事の審議に入るに当たり，岡本誠一郎氏（副会長，クリアウォーター OSAKA(株)）を議長に選出し，続いて会則14条により議事録署名者として平林和也氏（安川オートメーション・ドライブ(株)），田子靖章氏（幹事長，メタウォーター(株)）が選任されました。

3. 議案審議

(1) 第1号議案 令和6年度事業報告

議長の指名により，各委員会および事務局代表者から令和6年度事業報告が行われました。

総務委員会：中村昌文氏

(総務委員長，(株)日吉)

企画委員会：田所秀之氏

(企画委員長，(株)日立製作所)

編集委員会：西村文武氏

(編集委員長，京都大学)

特別事業：佐藤圭輔氏

(事務局長，立命館大学)

最初に各代表者より，令和6年度に実施した定例事業に加えて，EICA誌の電子化，投稿論文のJ-STAGE掲載，ICA連携強化/国際学会派遣推薦事業に関する説明があり，議長より第1号議案についての質疑・承認可否が諮られ，満場異議なく，原案通りに承認されました。

(2) 第2号議案 令和6年度決算案及び監査報告

議長の指名により，佐藤圭輔氏（事務局長，立命館大学）から令和6年度の決算内容の説明がありました。続いて，上田修氏（監事，三菱電機(株)），橋本征二氏（監事，立命館大学）による会計監査の結果について，決算内容が妥当かつ適正であった旨の代理報告（代理人：事務局長）がなされました。その後，議長より第2号議案についての質疑・承認可否が諮られ，満場異議なく，原案通りに承認されました。

(3) 第3号議案 令和7年度事業計画案

議長の指名により，各委員会および事務局代表者から令和7年度活動計画案の説明がありました。

総務委員会：中村昌文氏

企画委員会：田所秀之氏

編集委員会：西村文武氏

特別事業：佐藤圭輔氏

各代表者より、本年度の定例事業に加えて、EICA ホームページの大規模更新、EICA 誌の電子化運用開始、ICA 連携強化/国際学会派遣推薦事業に関する説明があり、その後に、議長より第3号議案についての質疑・承認可否が諮られ、満場異議なく、原案通りに承認されました。

(4) 第4号議案 令和7年度予算案

議長の指名により、佐藤圭輔氏（事務局長、立命館大学）から令和7年度予算案の説明がありました。その後に、議長より第4号議案についての質疑・承認可否が諮られ、満場異議なく、原案通りに承認されました。

(5) 第5号議案 令和7年度役員案

議長の指名により、佐藤圭輔氏（事務局長、立命館大学）から評議員37名（資料修正1件あり）と幹事2名の選任案について説明されました。その後に、議長より第5号議案についての質疑・承認可否が諮られ、満場異議なく、原案通りに承認されました。その後、総会を一時中断し、令和7年度第2回評議員会および運営幹事会にて新たな役員、運営幹事および委員案について審議・承認され、その結果が総会にて報告されました。

最後にすべての審議事項について満場異議なく、原案通りに承認され、議長から令和7年度総会が終了したことが宣言されました。総会にご出席いただきました皆様、ありがとうございました。

4. 総会資料修正に関するお詫び

総会終了後のタイミングで、第4号議案の資料中に一部誤植（収入予算の繰越金額に誤り）が見つかりました。その内容について、5月23日付の全会員向けメールおよびHP新着情報にて通知いたしました。本件に関わって皆様には大変なご不安やご心配をおかけしましたこと、また、再確認のお手間をおかけしましたことに深くお詫び申し上げます。誠に申し訳ございませんでした。EICAでは今後の資料確認体制を強化・徹底し、このようなミスが二度と発生しないように十分留意致します。

5. 選考委員会報告と表彰式

田子靖章氏（選考委員長（幹事長）、メタウォーター（株））より令和6年度論文賞の選考結果について報告がありました。引き続き、会長より、受賞者への賞状、副賞の授与が行われました。受賞された皆様、誠におめでとうございます。

続けて20年以上に渡ってEICAにご貢献いただいた石川隆章様（元EICA幹事長、元（株）日建技術コンサルタント）に感謝状の贈呈を行うことが報告されました。

〈論文賞〉（2編）

『機械学習による下水二次処理水中の全窒素濃度推定技術の開発』

林 佳史¹⁾、吉田 航¹⁾、植田怜央¹⁾、今村英二¹⁾、木本 勲¹⁾、霜田健太²⁾

1) 三菱電機（株）先端技術総合研究所

2) 三菱電機（株）神戸製作所

『特定酵素基質培地を用いた下水試料の大腸菌測定法の性能確認方法に関する考察』

山下洋正¹⁾、諏訪 守²⁾、松橋 学³⁾、重村浩之³⁾

1) 土木研究所 流域水環境研究グループ 水質チーム

現 国土技術政策総合研究所 上下水道研究部

2) 土木研究所 流域水環境研究グループ 水質チーム

3) 国土技術政策総合研究所 上下水道研究部 下水処理研究室

【論文賞の表彰式】



林 佳史氏（三菱電機（株））



山下洋正氏（土木研究所、現 国土技術政策総合研究所）

【講演会の開催概要】

1. 講演①

「PFASに関する環境省の取組」と題して、環境省水・大気環境局の清水俊貴氏にご講演いただきました。ご講演では、近年話題になっている有機フッ素化合物に関する国際動向や我が国の検出状況、法令対応に関する最新情報をご紹介いただきました。特に水道水のPFOSおよびPFOAについては「水道水質基準」への、公共用水域・地下水のそれらについては環境汚染対策のための「指針値（暫定）」から「指針値」へのそれぞれ格上げを実施予定とのことで、それら施行に向けて手続きが進んでいることをお話しされました。一方で、環境動態に関わる科学的知見を充実させることの必要性や健康リスク低減に向けた今後の取組についても言及され、本学会の取組にも期待しているとのことでした。

【令和7年度 EICA 講演会「PFASに関する環境省の取組」】



清水俊貴氏（環境省 水・大気環境局 環境管理課 有機フッ素化合物対策室 主査）

2. 講演②

「窒素循環の適正化に向けた統合的窒素管理手法の展望」と題して、(国研)国立環境研究所の仁科一哉氏にご講演いただきました。ご講演では、地球規模で課題となっている窒素循環フローについて、国際動向や我が国の取組をご紹介いただきました。特に不活性窒素や一酸化二窒素、あるいはアンモニアなど反応性窒素を含む「廃棄窒素 (Waste Nitrogen)」への対応が重要であり、脱炭素や資源循環といった環境政策と連携した取組の検討が進んでいることをお話しされました。また、排出源として重要な農業セクターの対策では2050年までに窒素使用量3割減が目標とされており、そういった効果を統合評価するためにも排出インベントリの作成やロジックモデルの構築が重要とのことでした。

【令和7年度 EICA 講演会「窒素循環の適正化に向けた統合的窒素管理手法の展望」】



仁科一哉氏（(国研)国立環境研究所 地球システム領域 物質循環モデリング・解析研究室 主任研究員）

〈令和7年度 総会〉

「令和6年度論文賞」報告

環境システム計測制御学会 選考委員会委員長

田子靖章

(EICA 幹事長/メタウォーター(株))

当学会では、令和7年4月4日(金)に選考委員会を開催し、「令和6年度論文賞」受賞論文および「功績賞」の選考を行いました。

論文賞について

令和6年度論文賞については、学会誌「EICA」第29巻(令和6年度発行)に投稿された6編の査読論文およびノートを対象としました。選考基準は以下の3点です。

1. 環境システム計測制御にふさわしい範疇であること。
2. 論文として完成度が高いものであること。
3. 環境システム計測制御分野において、学術・技術の進歩発展に顕著な功績があったもの、または将来の貢献が期待できるものであること。

これらの基準に基づき、選考委員会で慎重に審議した結果、次の2編の論文が選出されました。両論文は、令和7年度総会において表彰され、副賞と記念品が贈呈されました。

1. 『機械学習による下水二次処理水中の全窒素濃度推定技術の開発』

三菱電機(株) 林 佳史 様 ほか5名様

本論文は、下水処理における莫大な電力消費(全国の年間電力消費量の約0.8%)の削減と高価なT-N計の代替という明確な課題に対し、推定T-N濃度に基づく曝気量制御を行ったものです。実機プラントでの詳細な実験設定、滞留時間遅れの補正、異常値の除外、相関分析による説明変数選定など、堅牢なモデル構築に向けたデータ前処理の工夫が随所に見られます。目標精度を具体的に設定し、曝気量削減率などの算出方法も実用性を意識しており、論文全体の信頼性を高めています。また、本研究は機械学習により二次処理水T-N濃度(推定精度)を平均絶対誤差0.9 mg/Lという高精度で推定可能であることを実証しました。さらに、良好な精度を維持したモデルの頑健性に加えて、安定した運用が可能であることを明確に示しました。これは実システムへの適用可能性と実用性を実証した成果であり、将来的には、高価なT-N計の導入コストを抑えつつ、下水処理場の省エネルギー化と高度水処理の普及に大きく貢献することが期待されます。

以上の理由から、本論文は論文賞の評価基準を十分に満たしており、選考委員会一同、受賞を決定いたしました。

2. 『特定酵素基質培地を用いた下水試料の大腸菌測定法の性能確認方法に関する考察』

土木研究所(現 国土技術政策総合研究所) 山下洋正 様 ほか3名様

本論文は、2025年4月1日に施行された下水放流水質基準における衛生指標の「大腸菌群数」から「大腸菌数」への変更という重要な社会要請に対し、特定酵素基質培地を用いた下水試料の大腸菌測定法の性能確認方法について、学術的知見と実務的観点を両立させ深く考察した点で極めて高く評価できます。論文として、ポアソン分布などの統計理論に基づく厳密な精度評価に加え、複数の市販培地や希釈水を用いた実測データでその妥当性を検証しており、完成度が非常に高いと言えます。さらに、測定回数と精度、測定の難易度やコスト面まで多角的に分析し、公定法として現実的な導入可能性を含めて詳細に論じています。これは、環境システム計測制御分野における微生物測定の信頼性向上に顕著な学術・技術的功績であり、新たな公定法の確立に直接貢献するものです。将来にわたり、水質管理の合理化と高度化を促進し、公衆衛生の保護に資する大きな貢献が期待されるため、本論文は論文賞に相応しいと判断いたしました。

令和6年度論文賞 全体講評

今回の論文賞選考対象論文は、いずれも環境システムの計測・制御というテーマにふさわしく、当該学術・技術の進歩発展に顕著な功績があり、その研究内容が当学会の活動主旨に相応しいものであることから選考されました。今後も、環境システムの計測・制御領域のさらなる発展に向けて、特に若手技術者からの論文投稿を期待し、当学会活動の活性化にもつながるよう取り組んでまいります。

感謝状の贈呈について

当学会では功績賞として、会長、副会長その他4年以上の経験者の中から対象者を選考委員会が選定しています。

令和6年度は功績賞の該当者はいませんでしたが、当学会の役員として幹事長や副幹事長などを担当され、また人材育成プログラムである未来プロジェクトを精力的に推進いただいた元株式会社明電舎、元株式会社日建技術コンサルタントの石川隆章様に対し、感謝状を贈呈いたしましたことをご報告申し上げます。

〈受賞者の声〉

令和6年度論文賞

三菱電機株式会社 先端技術総合研究所 林 佳 史

この度、論文賞を受賞することができ、大変光栄に思います。今回の受賞は、機械学習を用いた水質推定技術と、それを活用した最適運転制御技術を実下水処理プラントで検証し、その独創性と有効性が認められた結果であり、非常に嬉しく思います。

開発を進めるうえで苦労も多かったですが、社内の関係者はもちろんのこと、実証実験にご協力いただいた関係者の方々のおかげで、このような成果を得ることができました。深く感謝申し上げます。

現在、私はAIやIoT技術を活用した水処理プラントの運転制御システム、および革新的な水処理システムの開発に従事しており、ソフトウェアとハードウェアの両側面からエネルギー消費の削減や運転コストの低減を目指しています。

今後も今回の受賞のように良い成果を上げ、学会発表や論文投稿に繋げていきたいと思っています。また、将来的には、地球規模での水資源不足やカーボンニュートラルの達成に向けて、世界の一步先を行く“サプライズ、インパクト”のある水処理技術、そしてこれらを融合し駆動させる先進デジタル技術を開発し、持続可能で安心・安全な循環型社会の実現に貢献していきたいと思っています。



国土技術政策総合研究所 上下水道研究部 山下 洋 正
(研究実施当時：土木研究所流域水環境研究グループ水質チーム)

この度は、環境システム計測制御学会（EICA）の令和6年度論文賞にご選出いただき誠にありがとうございます。大変栄誉ある賞をいただき、心より光栄に存じます。貴重なご指摘をいただいた査読者の皆様、審査員の皆様、学会関係者の皆様に、深く御礼申し上げます。

本研究は、下水道法の放流水の水質基準等において、衛生指標項目が大腸菌群数から大腸菌数に変更されることに対応して、特定酵素基質培地を用いた混積平板法による大腸菌の測定方法の精度確認方法について、回収率および繰り返し精度試験の実測定データに理論的検討を加え、公定法として求められる性能の観点より考察したものです。共著者の土木研究所流域水環境研究グループ水質チーム、国土技術政策総合研究所上下水道研究部下水処理研究室の各位が、国土交通省「国における下水道技術検討タスクフォース」の連携テーマ「処理水の安全性向上検討」の活動の一環として実施しました。メンバーとして、著者らに加え、国土交通省水管理・国土保全局下水道部流域管理官付（研究実施当時。現在は国土交通省大臣官房参事官（上下水道技術）付）の担当各位にも研究成果の行政への反映等において貢献いただきました。自治体の下水道管理者にも試料提供にご協力いただきました。心より御礼申し上げます。

今後も、上下水道行政の重要な技術事項について、優れた研究成果を達成して社会に貢献していけるよう、今回の受賞を励みに、関係者一同、より一層精進して参ります。



連載

EICA

自治体環境職種エキスパートの目 ——次世代を担うエキスパートの芽

京都市上下水道局
技術監理室 水質管理センター

外川 弘典
Hironori Togawa



職歴

2015年 京都市上下水道局 入局
下水道部施設課
2020年 技術監理室 水質管理センター 水質第1課
2022年 同センター 水質第2課
2023年 国土交通省 国土技術政策総合研究所へ派遣
2025年 技術監理室 水質管理センター 水質第2課へ帰任

1. 自己紹介

私は、2015年に京都市上下水道局へ化学職として入局しました。入局してまず初めに下水道部施設課へ配属され、事業場排水の水質を規制する業務に従事しました。その後、技術監理室水質管理センターへ異動となり、水質第1課では水道の水質管理に関する業務に従事し、現在は、水質第2課で下水道の水質管理に関する業務をしています。また、水質第2課在任中には国土交通省国土技術政策総合研究所へ交流研究員として派遣され、下水道分野におけるカーボンニュートラルに向けた技術に関する研究などに携わりました。

2. 京都市上下水道局の紹介

京都市は、琵琶湖淀川水系の中流域に位置しており、上下水道事業では、安全・安心な水道水の安定的な供給と下水処理によって市内約140万人の衛生的で快適な生活を支えることはもとより、淀川下流域都市で暮らす約1,100万人の水道水源の保全や閉鎖性水域である大阪湾の富栄養化の防止など流域全体の水環境を守ることが求められています。

水道事業は、1890年に第1琵琶湖疏水が完成し、1912年に第2琵琶湖疏水及び日本最初の急速ろ過方式を採用した蹴上浄水場が完成し給水を開始したことで幕を開けました。その後、京都市の発展に伴い増大する水需要に対応するために浄水場を整備し、市街地域の蹴上浄水場、松ヶ崎浄水場及び新山科浄水場と山間地域の18浄水場から市内各所へ水道水を供給しています。給水区域のほとんどを占める市街地域では、現在でも琵琶湖を水源とし、琵琶湖疏水を通じて市街地域の3浄水場へ原水を供給しています。そのような琵琶湖疏水は、2020年に日本遺産に認定され、琵琶湖疏水の歴史の偉業と美しい景観を楽しめる「びわ湖疏水船」が運航しています。

公共下水道事業は、1930年に事業を開始し、1934年に本市最初の下水処理場となる吉祥院処理場（現；

鳥羽水環境保全センター吉祥院支所）の運転を開始、さらに、1939年に鳥羽処理場（現；鳥羽水環境保全センター）の運転を開始しました。その後、処理区域の拡大に伴い、現在では鳥羽水環境保全センター、鳥羽水環境保全センター吉祥院支所、伏見水環境保全センター、石田水環境保全センター及び京北浄化センターの5処理場を整備し市内の下水を処理しています。前述のとおり、琵琶湖淀川水系の中流域に位置する京都市では、流域の環境保全のために窒素・リンの除去を目的に高度処理を取り入れており、標準活性汚泥法のほかAO法、A₂O法及びブステップ流入式多段硝化脱窒法を導入しています。また、一部の水環境保全センターではオゾン処理施設を導入し市内の伝統産業である染色工場からの排水に起因する色度除去にも努めています。ちなみに鳥羽水環境保全センターは西日本最大の下水処理場であり、その敷地面積は約460,000m²と東京ディズニーランドとほとんど同じ広さです。

また、鳥羽水環境保全センター及び蹴上浄水場では場内にそれぞれ藤とつつじが植えられています。春には市民の皆様にご満開の花を御覧いただくとともに、水道事業・公共下水道事業に関心を持っていただくための下水処理施設・浄水処理施設の見学や水質実験、デジタルクイズスタンプラリー等のイベントも実施する一般公開事業を開催しています。



Photo.1 一般公開での水質実験の様子

3. 業務内容の紹介

水質規制業務では、工場・事業場から排出される下水を道路上のマンホールや事業場内の廃水処理施設から採水し、水質が法令で定める排水基準を満たしていることを監視しています。また、指導のため事業場への立入りを行い、廃水処理施設が適正に運転されていることや当局への下水道法上の届出内容に変更がないことを確認したり、事業場からの各種届出の事務処理を行ったりしています。

業種や事業場の操業内容によって、発生する排水の水質や水量は異なりその処理方法も変わり、浄水場や下水処理場ではなじみのない水処理技術もあります。また、排水基準超過の原因も事業場ごとの事情に応じて様々です。これまで50年以上にわたって、本市では職員の技術と経験をもとに監視と指導を行ってきま

した。一方で、技術継承や業務の効率化を図っていくためには、過去の排水基準超過事例と原因及び改善策のデータベース化などが必要になると考えています。

水道の水質管理業務では、水源から給水栓までの各工程で、基礎的な水質を把握するための手分析の試験、浄水処理に影響を与えるプランクトン等を調査する生物試験や高度な機器を用いて極めて微量な物質を測定する試験など、多岐にわたる試験を行っているほか、水質監視装置の維持管理も行っています。直接人の口へ入る水道水の安全を確認するという責任感も伴います。

前述のとおり市街地域の水道水源は琵琶湖であることから、水質は比較的安定していますが、夏の高水温期には植物プランクトン（藍藻類）由来の異臭（かび臭）が発生することがあります。かび臭発生時には凝集処理の強化による沈殿除去と粉末活性炭による吸着除去を行います。効果的なかび臭対策を行うために、取水口の毎日の水質試験や琵琶湖に出航し、湖上9地点の定点観測などを実施していますが、発生予測は難しく対応に苦慮しています。また、山間地域は、広い地域に18の浄水場と給水区域が点在します。水質試験に人手と時間を要するため、給水の遠隔監視システムの導入などを行ってきました。引き続き、業務の効率化に向けた検討が必要になると考えています。

下水道の水質管理業務では、日々変化する水環境保全センターへの流入下水に対応するため、各処理工程の状況を水質試験によって確認しながらより良い処理水質を確保するとともに、河川への放流水が法令で定められた水質基準を満たしているかを水質検査により確認しています。

安定した処理水質となるよう努めていますが、ふとした拍子に処理水質が急激に悪化することもあります。そのような時は、下水処理の要である活性汚泥と呼ばれる微生物の状態や処理水質などについて水環境保全センターと情報共有を行い、運転条件を調整して試行錯誤するとともに原因把握や対処方法について経験を重ねています。近年では、職員自らで機械学習モデルを開発し、処理水質と曝気風量（水処理に係るエネルギー）の二軸管理に向けた検討などに取り組んでおり、有効活用に繋がることを期待しております。

国土交通省国土技術政策総合研究所では、下水道分野における温室効果ガス排出量削減に関する調査や新技術の開発及び実用化に関する実証研究等について学ばせていただきました。温室効果ガス排出量削減に関する調査では、下水処理工程から発生する一酸化二窒素（ N_2O ）の発生状況の実態調査を行い学会発表や論

文にまとめる機会をいただきました。新技術に関する実証事業では、企業の持つ最新技術を全国にある実証フィールドで見ることができました。

より良い水質、省エネ等を目指して、国が将来の下水道分野をどのように発展させようとしているのか、その最先端の動向を間近で学ぶことができ、また幅広い分野の方々とお知り合いになれたなど非常に貴重な経験をさせていただきました。



Photo. 2 水質試験の様子とBOD自動測定装置



Photo. 3 学会発表

4. 今後の展望

本市の水道事業は1912年の給水開始から110年、公共下水道事業は1930年の事業開始から90年を超え、これまで長きにわたり、安全で安心な水道水の安定的な供給や水環境の保全に努めてきました。一方で、近年は節水型社会の定着や人口減少により水需要が減少するとともに、管路や施設の老朽化が更に進むなど、上下水道事業を取り巻く経営環境は厳しいものとなっています。また、地球温暖化対策の視点からは、創エネルギー・省エネルギーによる脱炭素社会の実現や資源の有効利用による循環型まちづくりへの貢献が期待されています。

この先も持続可能な上下水道事業を目指して、水質の向上、コストの削減及びカーボンニュートラルの3つの目標を達成する効率的な浄水処理、下水処理の実現に貢献できるよう、これまでの知見を活かした学び続けていくように努めたいと考えています。



大切にしているもの三題

Three Principles I Live By

小 浜 一 好
Kazuyoshi Kohama

EICA 名誉会員

月島 JFE アクアソリューション(株)

1. 其れ恕(じょ)か

半世紀以上昔の高校時代、漢文の授業で「論語」について学んだ際、印象深かったのが、表題の言葉である。論語は孔子とその高弟の言行を、孔子の死後に弟子が記録した書物であり、儒教の入門書として日本でも広く普及した。その中で、弟子の子貢が孔子に「一言にして以て終身これを行うべき者ありや。」との問いに孔子が「其れ恕(じょ)か。己の欲せざる所は、人に施すこと勿れ。」と答えた。意味は「生涯にわたって実践できる一つの言葉はありますか？」に「それは恕であろう。自分がされたくないことを他人にしてはならない。」と答えたということである。恕とは聞き慣れない言葉かもしれないが、一言でいうと他者への思いやり、ということである。

学んだ当時は生意気盛りであったせいも、何と甘いことを言っているのか、それで済むなら苦労はいらない、くらいの受け止め方であった。時代は東西冷戦真っ只中でベトナム戦争の末期、国内では学生運動が盛り上がり、高校入試の際も機動隊に守られて実施された記憶がある。そのような混沌の社会状況の中で、ある意味センチメンタルな言葉は受け入れ難かった。それが、歳月を経て、恕の意味を深く受け止めている。恕は単なる思いやりというだけではなく許す、という意味を内包しているという。それも何でも許すということではなく、論語で説かれている「仁・義・礼・知・信」の五常の心——すなわち「相手の心を察しているか(仁)」、「正義に則っているか(義)」、「秩序を乱さないか(礼)」、「正しい知識に基づいているか(知)」、「信頼関係が成り立っているか(信)」を自らの心に問い、その上で、恕を為すとのことだそう。恕は単なる心構えではなく、人として生きる哲学だということである。これまでの人生の信条の一つにしてきた。

若い読者にはピンとこないかもしれない。しかし、言葉は生き方のバックボーンになる。自分の心に沁みる先人たちの言葉を感性豊かに受け止めてほしいものである。もう一つ好きな言葉は「人間万事塞翁が馬」。特にピンチに陥った時、励まされる言葉である。

2. 安全第一

横浜市で下水道施設の建設や維持管理を担っていた時、危機管理は常に気にかけてきた。特にマネジメントをする立場になってからは組織の中でこの意識を常に持ってもらうよう図ってきた。

危機が発生した場合、初期対応を間違えると大変な問題に拡大することがある。私自身、下水道事業で起きた数々の災害や事故など危機管理を思う度、今でも忸怩たる思いを抱く。2025年1月に発生した埼玉県八潮市の下水道に起因する道路陥没事故は今も続く危機であり、被災者の救出が進められているが、上下水道インフラの老朽化問題が大きな社会的課題となっている。事故の詳細な分析はこれからであるが、安全はどんな事業でも最優先のものであることは論を待たない。

昨今、買収問題で揺れる米国の U.S. スチール社であるが、今では当たり前の「安全第一」という言葉が初めて提唱された歴史ある会社でもある。今から100年と少し前、当時、アメリカの鉄鋼業界は不景気に見舞われており生産量や品質の向上が優先され、安全が二の次に考えられていた。すなわち優先順位が「生産第一・品質第二・安全第三」。しかも生産設備は老朽化し、作業に不慣れた移民労働者が多かったため、労働災害が多発していた状況にあったという。

そのような状況の中で1906年、U.S. スチール社の会長 E.H. ゲーリーが経営の基本方針を「安全第一(Safety First)・品質第二・生産第三」として作業の安全を最優先したところ、労働災害は勿論減ったが、それと同時に製品の生産量や品質も向上したとのこと。そのため、瞬く間に産業界全体に広まったそうである。その後10年も経たないうちに「安全第一」は国民的なスローガンである、と言われるまでになり、その安全運動は工場内ばかりでなく学校、家庭、さらに社会全体へも影響した。これほど短期間に普及した要因の一つにリーダーたちの存在があげられている。彼らは一般的に「セイフティ・メン(Safety Men)」と呼ばれる企業の安全管理者たちで、「全国安全協議会」という強力な専門家団体を設立し、組織的な防災活動の

普及に精力的に取り組んだ。このようにリーダーたちの問題意識と行動力が大きな成果をもたらしたといえる。理念と実行組織、この両輪が回って大きな成果が出たことになる。

初めて日本に「安全第一」が紹介されたのは1914年のこと。当時は「安全専一」と訳され足尾銅山で使われたが、その5年後には「安全第一協会」が設立されるなど、アメリカと同じように日本中に広がっていき、今日に繋がった。

私が経験した下水処理場での事故の中に、1名が亡くなり1名が重傷という重大事故があった。水処理設備の更新工事で深層の反応タンクの覆蓋の上で作業していた方が覆蓋と共に落下した事故であった。損害賠償を求められる裁判になったが、今でもいろいろな意味で忘れられない出来事であった。安全第一、私にとって大切ではあるが、苦くもある言葉である。

3. 人材育成

危機管理と共に心がけていたのが人材育成である。事業を継続するために最も大切なものは人材育成であることは間違いない。よく人材を人財と記す場合もあるが、まさに的を射ている。

武田信玄は知らぬ人がいない戦国大名の雄だが、その軍師といわれるのが山本勘助。築城術や陣立て、天文学などの軍略に優れ、武田家を戦国有数の大名に押し上げたといわれている。勘助は軍事的才能だけではなく、むしろ甲斐の分国法の制定や信玄堤に代表される治山治水など内政面に大きく貢献したともいわれている。1561年、上杉謙信との川中島の合戦がその最期であった。

甲斐武田といえば武田節を愛唱歌にしている方が私の世代には少なからずいる。信玄の名言とされる「人は石垣、人は城」のあとに、「情けは味方、仇は敵」と心の琴線に触れるようなフレーズが続く。物事を成すには、まず人、そしてその意識である。

以前、2007年問題があったのをご存じの方は少ないと思う。2007年問題とは、いわゆる団塊世代の大量退職に伴って高度成長期の日本の経済や社会を支えてきたマンパワーが失われ、大きな影響が出てくるこ

とが予想された。

実際に上下水道事業に携わる官でも民でも学においても退職に見合うだけの人員を確保するのは困難な状況で、短期的には人材という点では質量共に低下すると考えられていた。これまで、上下水道をわが町に、という国民の大きな期待に応えるべく建設を急ピッチで進めてきた中で技術力や使命感、経験やノウハウといったものを培ってきた世代が第一線を去っていく中で、新たな世代が新たな一步を踏み出す時が迫っていると考えられる。その後、官と民の役割分担やパートナーシップ、施設設備の維持管理、更新などを踏まえた技術力の向上、厳しい経営状況の中で様々なコスト低減、地球温暖化対策や資源の有効利用など新たな課題への対応、等様々な課題が顕在化し、その対応の中で技術力を高めてきた。今後も基本は同じだが、何せ官にも民にも人が足りない、が切実な状況である。

それでは、どうしたらよいか。まずは現行人員の中でそれぞれのパフォーマンスを上げていかなければならない。チーム力の向上とよくいうが、一人一人の能力を向上していかないと始まらないのである。OJT、Off-JTを通じた人材育成が不可欠である。そして、各事業体だけではなく事業体間を越えて、あるいは上下水道、廃棄物事業等の垣根を越えて、事業者全体で行っていくなど考え方が必要になると思う。今後、官から民へ、ではなく官も民も、水道も下水道も環境も、と複合的な事業展開が進むことも選択肢になるのではないかと。

山本勘助は出自がはっきりせず、身分も高くなかったとされるが、人材育成にもその才能を発揮した。身分にかかわらず信玄に重用された背景から、「能力による登用」を重視し、「自ら積極的に軍略や兵法を家中に伝える」とともに、「小部隊による実戦訓練の積み重ね」を行った。「合戦後には反省会」も開いたといわれている。また、信玄の参謀として「戦い以外にも内政や外交にも優れた人材を配する」適材適所に長け、合戦巧者だけでなく支配巧者もバランスよく育てたとのこと。まさに現代の人材育成の要諦にも繋がるものであると思う。

環境システム計測制御学会会則

第1章 総則

第1条 (名称)

本会は環境システム計測制御学会（英文名 The Society of Environmental Instrumentation, Control and Automation 略称はEICA（エイカ））と称する。

第2条 (目的)

本会は環境問題の諸分野における計測・制御・システム化に関する研究や技術の進歩発達を図り、応用的技術の普及を通じて環境問題の解決に寄与することを目的とする。

第3条 (事業)

本会は前条の目的を達成するために、次の事業を行う。

- (1) 調査、研究の実施及び技術交換、並びに研究発表会、講演会、研修会、見学会等の開催
- (2) 会誌及び図書等の発行
- (3) 国内、外の関係学術団体、関係諸団体との協力及び連携
- (4) 国際水協会 International Water Association の Instrumentation, Control and Automation Specialist Group と協調して行う事業
- (5) 功績の表彰
- (6) その他、本会の目的を達成するために必要な事業

第2章 会員

第4条 (会員の構成)

1. 会員は本会の目的に賛同し、本会の維持と発展に協力する入会を認められた個人又は団体で会員は次の通りとする。

- (1) 個人会員 本会に関連する分野に従事する者、又は相当の学識経験を有する者。
- (2) シニア会員 5年間以上個人会員を継続し、かつ満65歳以上であって、会員種別の変更の申請を提出した者。
- (3) 賛助会員 本会の事業を援助する法人又は個人。
- (4) 学生会員 本会に関連する分野に関心のある学生又は、これに準ずる者。
- (5) 公益会員 本会に関連する分野の官公庁、公益団体の関連業務を直接担当する部門。
- (6) 名誉会員 本会に特別貢献、功労のあった者で運営幹事会で推薦され総会で承認された個人。

2. 賛助会員、公益会員が団体又は法人である場合は、代表者1名を定め届け出するものとする。

3. 個人会員を本会の正会員とする。

第5条 (入会)

会員になろうとする個人または団体等は、会員の入退会に関する規程に従って承認を受けなければならない。

第6条 (退会、除名、資格の喪失)

1. 退会 退会しようとする個人会員、シニア会員、賛助会員、学生会員、公益会員、名誉会員は、会員の入退会に関する規程に従い退会届を会長に提出しなければならない。

2. 除名 本会の名誉を著しく傷つけ、又は、本会の目的に重大に違反する行為のあった個人または団体等は、総会の議決を得て、会長がこれを除名することが出来る。

3. 資格の喪失 会員は次の事由によって会員資格を喪失する。

- (1) 前各項に該当する個人または団体等
- (2) 会費を2年以上滞納した個人または団体等
- (3) 死亡又は団体あるいは法人である会員が解散したとき

第7条 (入会金及び会費)

会員は、総会の議決を経て定める入会金、及び年会費を前納しなければならない。入会金及び年会費は会費に関する規程で定める。既納の入会金、会費は如何なる理由があっても返還しない。

第8条 (会員の権利)

本会の会員は、下記の権利を有する。

- (1) 本会が刊行する会誌等の配布を受けられる。
- (2) 本会が主催する行事に優先参加できる。
- (3) 通信ネットワークを通じた本会の情報サービスを受けられる。
- (4) 事務局で行う各種サービスを受けられる。
- (5) 賛助会員、公益会員は、評議員1名を推薦することができる。

第3章 組織

第9条 (役員)

1. 本会には、次の役員を置く。

- (1) 評議員50名以内；うち会長1名、副会長若干名、事務局長1名、運営幹事を含む。
- (2) 監事 2名

2. 役員は、会員の中から総会で選任する。

3. 会長は、評議員の互選により選出する。副会長以下の役員は評議員の中から会長が指名し、評議員会の議決を経て選任する。

4. 役員任期は2年とし、再任を妨げない。

第10条 (役員及び組織の役割)

1. 会長は、本会を代表して会務を総括する。副会長は会長を補佐し、会長に不都合のあるときは、会長職務を代行する。

2. 評議員会は、毎年1回会長が招集し、総会原案及び規程の改廃等の運営幹事会提案などの重要事項を審議する。

3. 運営幹事会は会長、副会長、各委員会の委員長、副委員長及び事務局長、事務局次長と、評議員の中から会長が委嘱した若干名とを加えて構成し、互選により幹事長、副幹事長を選任する。運営幹事会は幹事長が招集し、議長となって、評議員会に提出する総会原案を審議すると共に、規程改廃の検討、内規改廃を審議する。また、委員会活動を指揮し、会の日常事案を審議、執行すると共に、事務局を指揮して会務の運営により派生する議事録、会計報告書等を管理する。

4. 監事は、会務を監査し、評議員会、総会で、その結果を報告する。

第11条 (委員会活動)

1. 会の事業を円滑に進めるために総務委員会、企画委員会及び編集委員会を置く。

2. 各委員長は原則として評議員の中から選任するものとし、運営幹事会の議決を経て、幹事長が委嘱する。各副委員長及び委員は、各委員長の推薦により運営幹事会で選任する。

3. 各委員会は別に定める委員会規程に従い活動をする。

第4章 総会及び会議

第12条 (総会及び評議員会)

1. 総会は、本会の最高議決機関である。

2. 定時総会は、毎年1回会長がこれを召集し、事業報告、決算、事業計画、予算、評議員・運営幹事・監事及び名誉会員の選任、会則及び会費に関する規程の改廃の等の承認、決定を行う。

3. 臨時総会は、会長が必要と認めた場合、及び評議員会が議決した場合に会長が召集し開催する。

第13条 (定足数と議決)

1. 総会は会員の5分の1以上、各会議は構成員の5分の1以上の出席がなければ成立しない。但し、あらかじめ委任状を提出した者、及び他の出席者を代理者と定め委任した者は、出席者とみなす。

2. この会則を変更するとき、及び本会を解散するときは、総会において出席者の4分の3以上の同意を受けなければならない。

3. 総会を含む各会議の議決は、2項に定める特別な事案を除き、出席者の過半数による。

第14条 (議事録)
各会議は議事録を作成し、議長または出席代表者が署名捺印の上、事務局がこれを保存する。

第5章 資産及び会計

第15条 (資産)
本会の資産は次の通りとし、評議員会の議決を経て会長が管理する。

- (1) 入会金
- (2) 会費
- (3) 事業に伴う収入
- (4) 資産から生じる収入
- (5) 寄付金
- (6) その他

第16条 (経費の支弁)
本会の事業遂行に必要な経費は、前条の収入をもってまかなう。

第17条 (事業年度)
本会の運営年度は、4月1日に始まり、翌年3月31日に終る。

第18条 (予算及び決算)
本会の収支予算は、事業計画書に合わせて会長が作成し、評議員会での審議承認を経た後、総会の議決を経て定める。
収支決算は、事業年度終了後、速やかに事業報告に合わせて会長が作成し、監事の監査承認並びに、評議員会の審議承認を経たのち、総会の承認を受けなければならない。

第6章 事務局

第19条 (事務局)
1. 本会の事業を円滑に遂行するため事務局を置く。
2. 事務局には事務局長、事務局次長、ほかの職員を置く。
3. 事務局は別に定める内規に従い活動する。

附則 (実施の月日)

1. 平成8年5月22日 施行
2. 平成9年5月15日 一部改正
3. 平成11年5月14日 一部改正
4. 平成12年5月19日 一部改正
5. 平成15年5月12日 一部改正
6. 平成20年5月19日 一部改正
7. 平成21年5月22日 改定
8. 平成28年5月30日 改定

会費に関する規程

(目的)

第 1 条 本規程は本学会会則第 2 章第 4 条及び第 7 条に基づく、会員の会費に関して必要な事項を定めることを目的とする。

(会費)

第 2 条 会則第 5 条により本会会員となった者もしくは団体は、会則第 7 条に従い、下記に定める所定の会費を、本会の定める所定の方法にて納めなければならない。一旦納入された会費はいかなる理由があっても、返還しない。

(1)	個人会員	入会金	不要	年会費	5,000 円	または永久会費 20,000 円 (原則として 2 口以上) 但し、学会誌は電子配布のみ
(2)	シニア会員			年会費	5,000 円	
(3)	賛助会員	入会金	100,000 円	年会費	1 口 100,000 円	
(4)	学生会員	入会金	不要	年会費	不要	
(5)	公益会員	入会金	不要	年会費	1 口 30,000 円	
(6)	名誉会員	入会金	不要	年会費	不要	

(納入方法)

第 3 条 入会金は、会員となった初年度のみ納入を必要とする。年会費は、毎年度ごとに本会事務局からの通知に従い、本会指定の方法により翌年度分を遅滞なく前納しなくてはならない。

(会費の変更)

第 4 条 会費の変更は、評議員会の発議により、総会の承認を得て、本規程の変更にて行う。

(附則)

(実施の月日)

1. 平成 12 年 5 月 19 日 評議員会決定
2. 平成 19 年 5 月 17 日 総会一部改正
3. 平成 21 年 5 月 22 日 改定
4. 平成 28 年 5 月 30 日 改定

投 稿 規 程

平成 8 年 7 月 3 日制定
平成 10 年 5 月 14 日一部改定
平成 15 年 5 月 12 日一部改定
平成 20 年 5 月 16 日一部改訂
平成 29 年 5 月 29 日一部改訂
令和 5 年 4 月 27 日一部改訂

1. 投稿資格

投稿は本会会員に限る。但し、会員以外の共著者を含むことは差し支えない。

2. 投稿原稿

2. 1 種類

1) 論文, 2) ノート, 3) その他 とする。投稿原稿は未発表のものであること。

2. 2 言語

日本語, 英語のいずれかとする。

2. 3 作成

投稿原稿は、投稿規程および執筆要領に従って作成する。

2. 4 受付および受理年月日

投稿原稿が本学会に到着した日を受付の年月日とし、編集委員会が掲載可と認めた日を受理の年月日として明記する。なお、次項で定める 3) その他の投稿原稿については、受付および受理年月日は原則として明記しない。

3. 投稿原稿の内容および形式

3. 1 論文 (Originals)

環境システムの計測・制御およびそれに関係のある有意義な新事実や新技術を含むもので、原則として図表や写真を含めて、本誌刷上り 8 頁以内とする。

3. 2 ノート (Notes)

完結していない研究結果であってもよいが、環境システムの計測・制御およびそれに関係のある有意義な新事実や新技術を含むもので、原則として図表や写真を含めて、本誌刷上り 6 頁以内とする。

3. 3 その他

環境システムの計測・制御に関する分野での多くの研究成果を要約し、その進歩を論説した総説 (Reviews), 環境システムの計測・制御およびそれに関係のある有用な理論, 技術, トピックスなどを平易かつ簡潔に解説した解説 (Topics), 環境システムの計測・制御の分野に関する法律や基準, 有用なデータ (統計的歴史的資料を含める) および調査資料などを客観的かつ簡潔に要約した資料 (Technical notes), 本誌に掲載された論文あるいはノートの内容に関する討議, 本学会主催の講演会等の講演内容など, 環境システムの計測・制御に関連して編集委員会が必要と認めたもので、原則として図表や写真を含めて、本誌刷上り 10 頁程度もしくはそれ以下とする。

4. 投稿原稿の審査・変更・再提出・掲載

4. 1 採否

1) 論文, 2) ノートは、査読要領に従って審査され、その採否を編集委員会が決定する。3) その他の投稿原稿は、その採否を編集委員会が決定する。

4. 2 変更

編集委員会は著者に対し、投稿原稿の種類（2. 1を参照）の変更を求めることがある。

4. 3 再提出

修正・加筆等を求められた原稿は速やかに再提出しなければならない。特別の理由もなく修正・加筆等の依頼の日から2週間以内に再提出されない場合には、投稿の意志がないものとして処理することがある。

4. 4 掲載

審査を経て、掲載可と認められた原稿は、原則として受付年月日の順に掲載するが、編集の都合上前後することがある。

5. 手続

5. 1 投稿

「投稿申込みフォーム」に所定事項を記入し、投稿原稿とともに本会事務局宛に送付する。

5. 2 最終原稿の提出

審査を経て、掲載可と認められた時点で早急に、最終の投稿原稿を本会事務局宛に送付する。

5. 3 校正

校正は初校のみを著者にて行う。

6. 投稿原稿の著作権

投稿原稿の著作権は、本学会に最終原稿が投稿された時点から原則として本学会に帰属する。

7. 別刷について

別刷料金は別途定める。

8. その他

細則及び執筆要領は別途定める。

学会誌掲載の投稿・寄稿等の利用に関する細則

令和5年4月27日施行

序 文

本細則は、平成29年5月29日に改訂された「投稿規程」の定めによって学会誌に掲載された投稿・寄稿等の利用について、以下に制定する。

1. 対象範囲

本細則で対象とするものは、「投稿規程」第2条1項の「種類」で定められているものとする。

2. データの利用

2. 1 学会誌に掲載された投稿・寄稿等の全部または一部（電子データを含む）を他の出版物に転載し、翻訳し、或はその他の利用をしようとする場合は、当学会の承認を得、かつその投稿・寄稿等が学会誌に掲載されたものであることを明記（出所明示）しなければならない。ただし、著作権法で認められた軽微な引用等については、当学会の承認を必要としない。
2. 2 著者は、学会誌に掲載された自身の投稿・寄稿等（電子データを含む）の全部または一部を、内容を改変することなく著者自身で利用する場合には、当学会に連絡し、出所明示をすれば利用できる。ただし、会誌発行日から1ヶ年を経過した投稿・寄稿等の全部を著者本人あるいは所属機関等のホームページにて公開する場合については、当学会への連絡を必要としない。

3. 一般公開

当学会の「投稿規程」で定められた種類の投稿・寄稿等は、学術文化の進展と社会の発展に寄与するため、一定期間後に当学会ホームページにて一般公開する。

3. 1 有償公開

一般公開までの一定期間を有償公開期間とし、期間は会誌発行日から1ヶ年未満とする。有償期間の対価は別途定める。

3. 2 一般公開

有償期間1ヶ年を経過したものは、逐次一般公開とする。但し、その利用に関しては、本細則2条に従うものとする。

編集委員会

協賛広告会社一覧 (50音順)

委員長

西村 文武 京都大学大学院 工学研究科 附属流域圏総合環境質研究センター 教授

副委員長

尾崎 正明 (株)G&U 技術研究センター 所長

川口 佳彦 (株)堀場アドバンスドテクノ 開発本部 ウォーターソリューションズ開発部部長

編集委員

芦澤 謙司 横浜市下水道川局 栄水再生センター 課長

蛭江 美孝 (財)国立環境研究所 資源循環領域 廃棄物処理処分技術研究室 主幹研究員

遠藤 潔 川崎市上下水道局 水管理センター [施設第2] 課長補佐

大下 和徹 京都大学大学院 工学研究科 都市環境工学専攻 准教授

金谷 新志郎 月島JFE アクアソリューション(株) 技術本部技術企画センター技術企画室 室長

佐藤 圭輔 立命館大学 理工学部 環境都市工学科 准教授

佐野 泰久 (株)タクマ エンジニアリング統轄本部 設計センター 電気計装部 部長

隋 鵬哲 watering エンジニアリング(株) 企画開発本部 基盤技術研究センター

鈴木 祐麻 鹿島建設(株) 技術研究所 地球環境・バイオグループ

原田 英典 京都大学大学院 アジア・アフリカ地域研究研究科 准教授

二見 啓太 東京都下水道局 施設管理部 施設保全課 保安管理担当課長

村田 直樹 メタウォーター(株) R&D センター 水道技術開発部 担当部長

安永 望 三菱電機(株) 神戸製作所 サステナブルソリューションプロジェクトグループ 主任

山下 洋正 国土技術政策総合研究所 上下水道研究部

山野 井一郎 (株)日立製作所 インフラ制御システム事業部 グループリーダ主任技師

吉田 綾子 東京農業大学 農芸化学科 土壌肥料学研究室 客員研究員

渡邊 圭 (株)神鋼環境ソリューション 技術開発センター 基盤技術室

アドバイザー

井手 慎司 滋賀県立大学 理事長・学長
EICA 名誉会員

圓佛 伊智朗 (株)日立製作所 日立研究所 環境・エネルギーイノベーションセンター
シニア研究員

田中 宏明 信州大学 工学部 特任教授
EICA 名誉会員 京都大学名誉教授

橋本 征二 立命館大学 理工学部 環境都市工学科 教授

樋口 能士 立命館大学 理工学部 環境都市工学科 教授

松井 三郎 (株)松井三郎環境設計事務所
EICA 名誉会員 京都大学名誉教授

水ing(株)

(株)タクマ

東京水道(株)

東芝インフラシステムズ(株)

(株)日立製作所

(株)堀場アドバンスドテクノ

(株)明電舎

メタウォーター(株)

本紙のご講読ならびに入会のご案内

- ・ご入会/ご講読は当学会までお申込み下さい。
- ・ご入会(年会費 5,000 円)頂くと本会発行の学会誌をご講読頂けます。
- ・本会ホームページ (<http://eica.jp>) からお申込み下さい。

環境システム計測制御学会誌 第30巻 第1号 Journal of EICA Vol. 30 No. 1

価格：5,000 円 (送料込)

発行日：2025 年 7 月 15 日
編集/出版：学会誌「EICA」編集委員会
発行所：環境システム計測制御学会

学会事務局
〒573-1116 大阪府枚方市船橋本町 1-775
株式会社 Atalacia 内
TEL: 072-807-3890 FAX: 072-807-3898
E-mail: info@eica.jp URL: http://eica.jp

編集事務局
〒601-8316 京都市南区吉祥院池ノ内町 10
明文舎印刷株式会社内
TEL: 075-681-2741 FAX: 075-681-2742
E-mail: edit@eica.jp

印刷：明文舎印刷株式会社
〒601-8316 京都市南区吉祥院池ノ内町 10
TEL: 075-681-2741 FAX: 075-681-2742
E-mail: meibun@nike.eonet.ne.jp

編集後記

本特集記事を通して、我々は常に無意識に呼吸をし、大気中に存在する様々な物質を取り込んでいることを再認識しました。温室効果気体も人為由来エアロゾルも、元々は我々の社会活動が生み出したものであり、改めて環境問題の重要性を認識するきっかけとなりました。計測技術が可視化と定量化に重要な役割を果たしており、本学会の重要性を再認識できました。

(川口)