研　究　期　報

No. 120

2024 年 6 月

四 国 電 力 株 式 会 社
四国電力送配電株式会社
株式会社四国総合研究所

研 究 期 報 １ ２ ０ 号　　目 次

共振器増強ラマン分光法によるガス分析技術の開発 1

Development of gas analysis technology using cavity-enhanced Raman spectroscopy

ＧＸの加速化に向けた炉内アンモニア火炎可視化技術の開発に関する基礎検討 7

Fundamental study on development of ammonia flame visualization technology in furnace for acceleration of GX

真空式下水道真空弁遠隔監視システムの開発について 14

Development of a remote monitoring system for vacuum sewer systems

超音波による原子炉配管水位高精度測定技術に関する研究 21

Research on high-precision measurement of reactor piping water level using ultrasonic waves

収穫後のメロンの品質に及ぼす近赤外光照射の影響 27

Effect of near infrared light exposure after harvest on appearance in Melon

研究期報№120

共振器増強ラマン分光法によるガス分析技術の開発

目　　的

小型で応答の速い微量ガス分析装置の実現を目指し，高フィネスのファブリ・ペロー型外部共振器を用いて半導体レーザを増幅する共振器内ラマン分光法に関する研究開発を行った。

主な成果

青紫色（中心波長 416 nm）領域で発光する AR（Anti-Reflection：反射防止）コート付きレーザダイオードと，一対の高反射ミラーからなるファブリ・ペロー型外部共振器を組み合わせた外部共振器型半導体レーザを構築し，注入電流 60　mA での動作時に共振器内部に 30～50　W 程度の強力な定在波を生成可能であることを実証した。この共振器内定在波のパワーは，ラマン分光法によって ppm オーダの微量混合ガスを実時間測定するのに十分な水準に達しており，標準ガスを用いた検証実験によってガス分析能力を確かめた。開発した光源は，これまでにない小型・高感度・高速応答を実現するラマン分光方式のガス分析計として実用化できる可能性があり，社会実装に向けた取り組みを継続していく予定である。

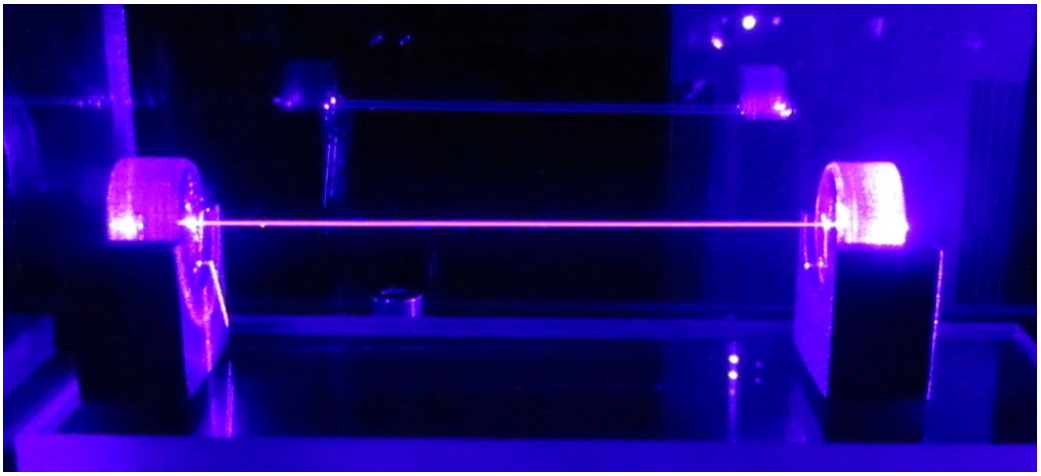


図 1　外部共振器の内部で増幅された半導体レーザ

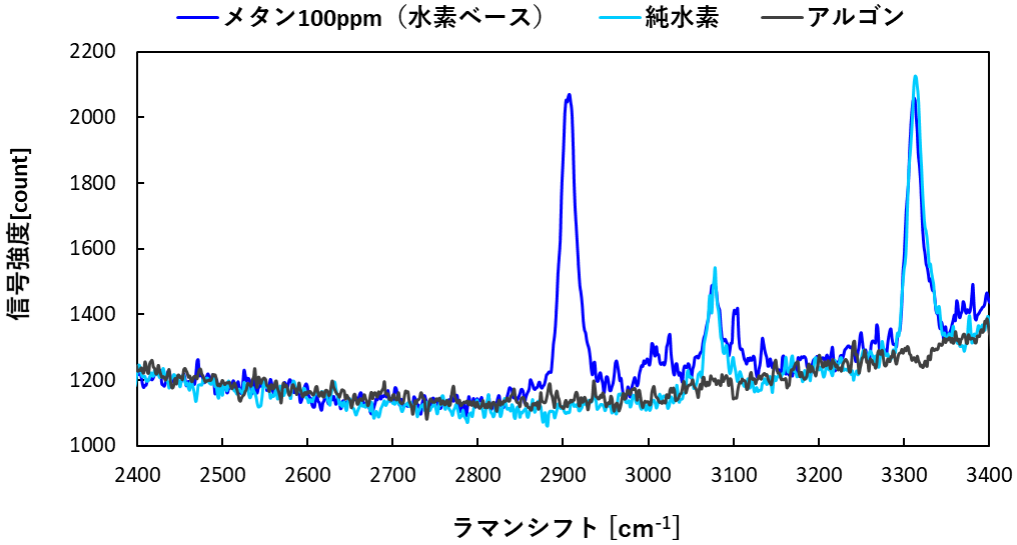


図 2　開発した光源を用いたガス分析事例（水素ガス中のメタン 100 ppm の測定）

研究担当者	市川祐嗣，横井清人，大井信彦，朝日一平 （株式会社四国総合研究所　電子アグリ技術部）
キーワード	半導体レーザ，LD，ガス分析，水素，メタン，アンモニア， 混合ガス分析，多成分分析，リアルタイム，微量分析，小型，オンライン， プロセスガス分析，ラマン分光，外部共振器，増幅，青色
問い合わせ先	株式会社四国総合研究所　経営企画部 TEL　087-843-8111（代表）　E-mail　jigyo_kanri@ssken.co.jp https://www.ssken.co.jp/

［無断転載を禁ず］

研究期報№120

GXの加速化に向けた炉内アンモニア火炎可視化技術の開発に関する基礎検討

目　　的

現在，気候変動対策に有効なカーボンフリー燃料の一つとして注目されているアンモニアの社会実装に向け，多くの企業が既存燃料の燃焼炉からアンモニア専焼・混焼炉への転換に向けた取組みを活発化している中，特に高温炉内においてアンモニア火炎の観測が困難であるという課題が新たに浮上した。本稿では，この課題を解決するために，受動紫外・赤外分光法に基づく炉内アンモニア火炎可視化の実現性について基礎実験結果に基づき評価したので報告する。

主な成果

高温炉内環境におけるアンモニア火炎可視化について，阻害要因として，輻射や混焼燃料火炎の発光及び燃焼生成物による光吸収を仮定した場合，240～290nm 付近のアンモニア火炎の発光を選択的に捉えることで可視化が可能であるとの結論を得た。

図 1　アンモニア火炎発生装置外観

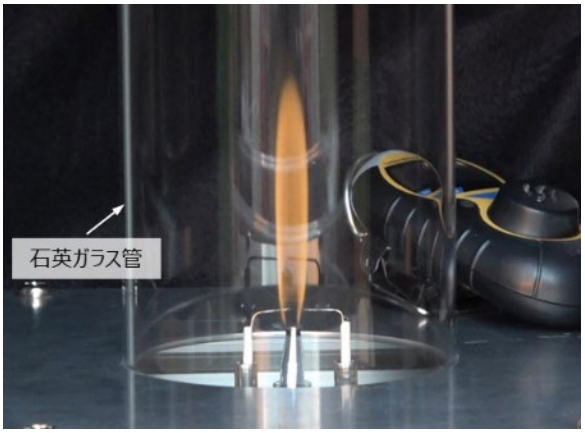


図 2　燃焼中のアンモニア火炎

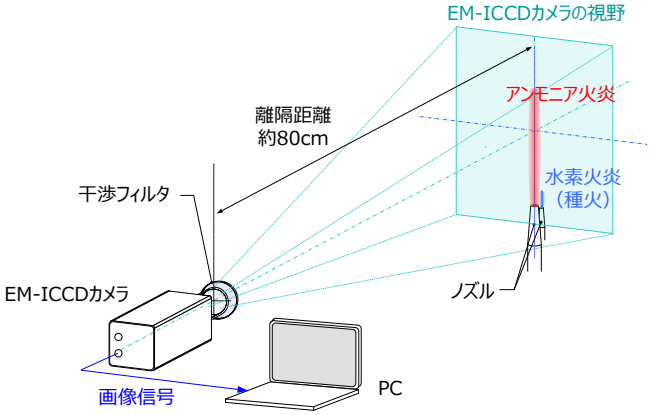
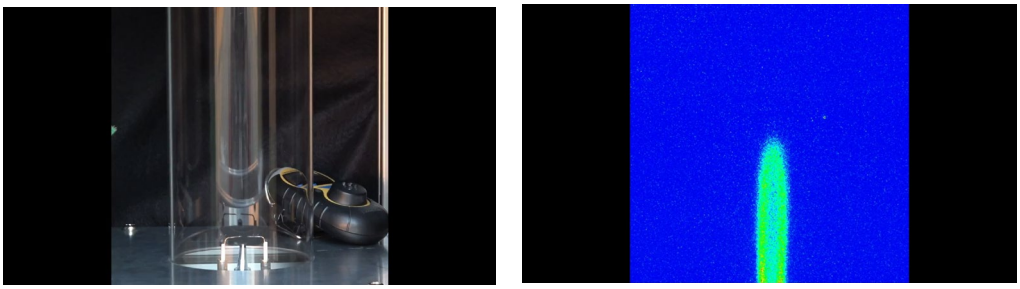


図 3　アンモニア火炎可視化実験装置構成



j

図 4　アンモニア火炎可視化事例（左：観測部可視画像，右：アンモニア火炎可視化画像）

研究担当者	横井 清人，杉本 幸代，市川 祐嗣，荻田 将一，大井 信彦，朝日 一平 （株式会社四国総合研究所　電子アグリ技術部）
キーワード	アンモニア燃焼炉，アンモニア火炎，可視化，受動紫外・赤外分光法
問い合わせ先	株式会社四国総合研究所　経営企画部 TEL　087-843-8111（代表）　E-mail　jigyo_kanri@ssken.co.jp https://www.ssken.co.jp/

［無断転載を禁ず］

研究期報№120

真空式下水道真空弁遠隔監視システムの開発について

目　　的

下水道設備は近代国家に不可欠の重要インフラであり，これまでに様々な方式の下水道システムが開発されている。中でも近年では，大規模な工事を必要とせず，我が国特有の起伏の多い地形にも適用可能な真空式下水道システムの導入が進んでいる。

真空式下水道システムでは，地域の隅々にまで張り巡らした真空母管に真空弁を装備した汚水受水桝が接続されており，受水桝に一定量の汚水が溜まると真空弁が開き受水桝内の汚水を真空母管内に吸い込む仕組みとなっている。

この真空弁の動作が不調になると，様々なトラブルを引き起こすため，その常時監視システムが不可欠となっている。

既存システムの老朽取り換えに際し，最新の IoT ならびに WEB 技術を活用することで，監視性能を大幅に強化し，ロバスト性にも優れた真空弁遠隔監視システムを開発した。

主な成果

1.　真空弁遠隔監視システムの開発

運用開始から 19 年になる真空式下水道システムに装備された，無線通信式真空弁遠隔監視ステムの老朽化取り換えに際して，当社の openATOMS 技術をベースに，従来にない新機能を盛り込んだ真空弁遠隔監視システムを開発した。

2.　真空弁遠隔監視システムの運用状況

システム設置から現在までの 3 カ月間の運用実績において，監視対象である設備側には緊急対応が必要な大きなトラブルは発生しておらず，監視システムも，全て設計時の期待通りに機能している。

また，監視システムにより日々蓄積されるデータから，これまで見過ごされていた機器の不調が順次明らかとなり，都度，適切な対応がなされた結果，システム運用開始後に度々発生していた異常通報は徐々に減ってきている。

図 1　真空弁遠隔監視システムの WEB トップ画面

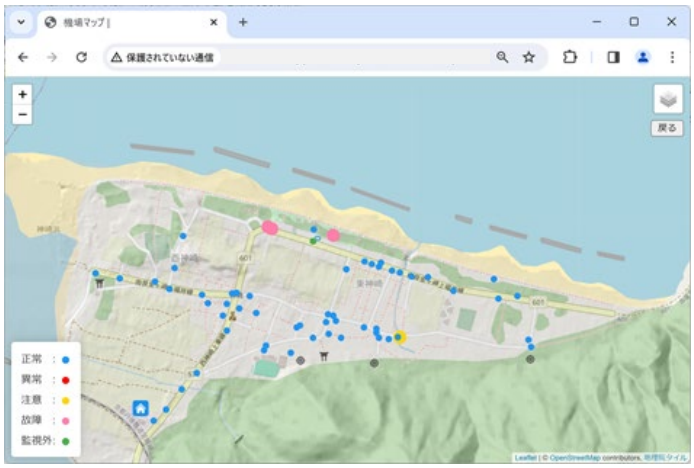


図 2　真空弁遠隔監視システムの WEB 機場マップ画面

研究担当者	中西　美一，細川　輝樹，仲田　誉 （株式会社四国総合研究所　電子アグリ技術部） 久米川　昌浩 （株式会社四国総合研究所　経営企画部）
キーワード	真空式下水道，真空弁，遠隔監視
問い合わせ先	株式会社四国総合研究所　経営企画部 TEL　087-843-8111（代表）　E-mail　jigyo_kanri@ssken.co.jp https://www.ssken.co.jp/

［無断転載を禁ず］

研究期報№120

超音波による原子炉配管水位高精度測定技術に関する研究

目　　的

四国総合研究所では、四国電力伊方発電所第 3 号機の原子炉配管内の水位測定を目的とした超音波式の「RCS ノズルセンタ超音波水位計」（以下、超音波水位計）を開発し、ミッドループ運転時の水位低下による炉心冷却機能喪失対策の強化に貢献している。本稿では、超音波水位計の水位測定精度の向上のため、新しい信号処理や水位評価手法を導入した成果について報告する。

主な成果

1.　高精度水位測定技術の検討

低水位における水位測定精度の向上方法について検討した。多重反射法は多重反射波の間隔から水位を求める方法であり、多数の多重反射波が検出できれば、最頻値を使用することで水位を誤検出する危険性を低減することが可能である。動的検量線は、バックグラウンド波形（超音波波形のバックグラウンドノイズ成分）を推定し、それを元に検量線を更新する方法であり、多重反射波の検出感度の向上に有用である。水位評価手法の最適化は、測定水位の時系列データから現在水位を予測・推定する方法であり、水位測定精度の向上に利用できる。

2.　高精度水位測定技術の検証

高精度水位測定技術（以下同技術）の検証のため、既設超音波水位計と同型の予備超音波水位計を元にした同技術の実証機を用意し、原子炉配管を模擬した実物大カットモデルを使った水位測定実験や、第 15 回定期検査（2019 年 12 月～2021 年 12 月）で採取した超音波信号データを使った実機水位測定の模擬実験を実施した結果、水位の誤検出頻度の低減に有効であることが確認できた。

また、第 16 回定期検査（2023 年 2 月～2023 年 5 月）において、既設超音波水位計で受信する超音波信号を分岐する方法により、既設超音波水位計と実証機で同時に水位測定を実施した結果、同技術が実機でも有効であることが確認できた。

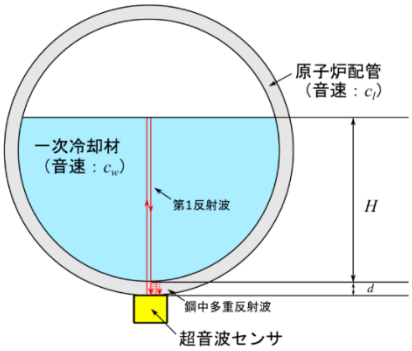


図 1　超音波センサ取付位置と超音波経路

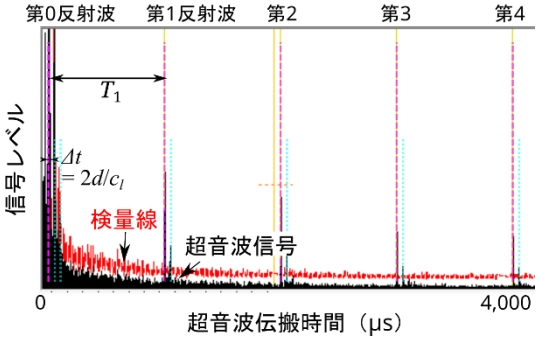


図 2　超音波信号の検出例（1 回反射法）

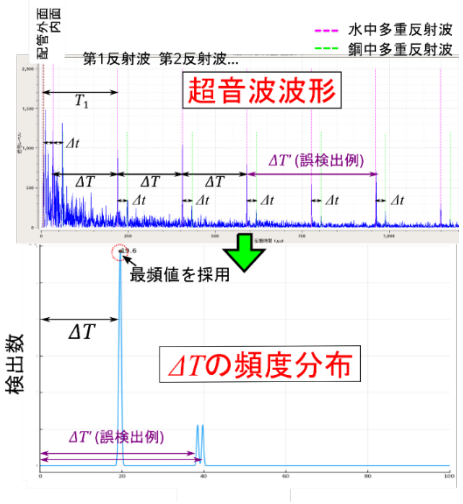


図 3　多重反射法の概要

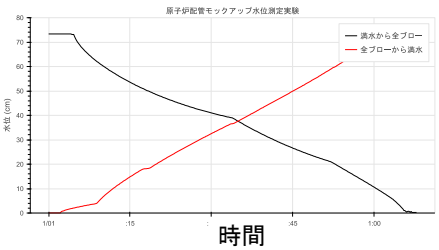


図 4　模擬原子炉配管の水位測定結果

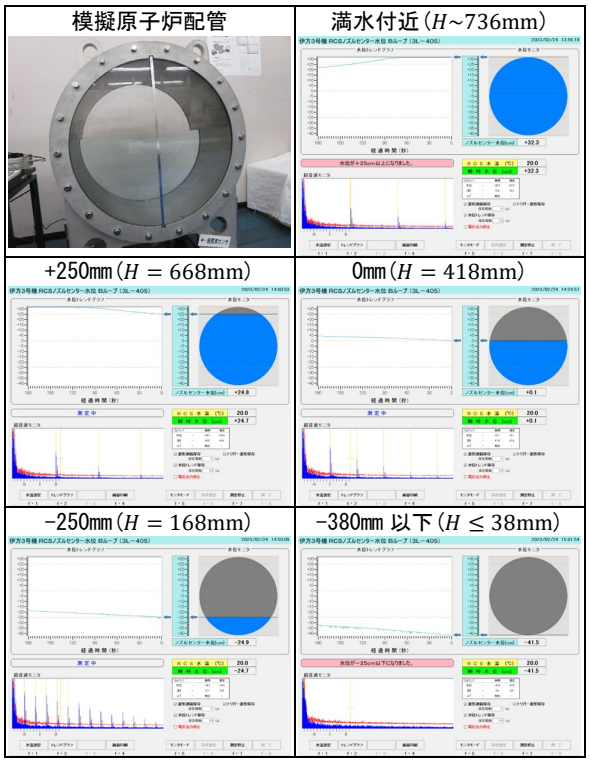


図 5　模擬原子炉配管と水位測定画面

研究担当者	岡部克也 （株式会社四国総合研究所　産業応用技術部）
キーワード	超音波測定，超音波水位計，PWR，RCS，定期事業者検査， ミッドループ運転，カルマンフィルタ，最適制御，ランダムウォーク， 1 回反射法，多重反射法
問い合わせ先	株式会社四国総合研究所　経営企画部 TEL　087-843-8111（代表）　E-mail　jigyo_kanri@ssken.co.jp https://www.ssken.co.jp/

［無断転載を禁ず］

研究期報№120

収穫後のメロンの品質に及ぼす近赤外光照射の影響

目　　的

近赤外光照射は、これまでの研究で収穫後の青果物の鮮度を維持する効果があることが分っている。そこで、青森県産のメロン「優香」「タカミ」を対象として近赤外光照射後輸送し果実品質へ及ぼす影響について調査した。

主な成果

収穫後の青森県産メロン「優香」「タカミ」の２品種を対象として照射後輸送し鮮度保持効果について検証した。その結果、近赤外光照射は、両品種において着荷時の果実硬度を高く維持し、水浸状化やカビの進行を抑制するなど輸送中の傷みを軽減する効果があることが分った他、貯蔵中の老化や果皮の黄化を抑制できることが明らかになった。「物流の 2024 年度問題」による輸送の遅れや停滞が懸念される中、今後この技術の活用は有効であると考えられた。

表１　メロンの外観に及ぼす近赤外光照射の効果

照射８日後	果皮の変色	へた周りの水浸状化
無照射	2.3	2.3
照射	1.3	0.8*

外観の傷みの程度を点数評価（0：なし、1：少程度、2：中程度、3：顕著）した。*は、無照射と比較して 5%水準で有意差あり（t 検定、n=3～4、品種：優香）

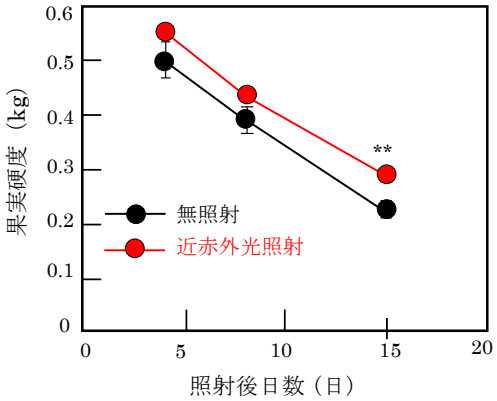


図１　果実硬度に及ぼす近赤外光照射の影響

**は、無照射に対し 1%水準で有意差あり。
縦棒は標準誤差（n=10～20、品種：タカミ）

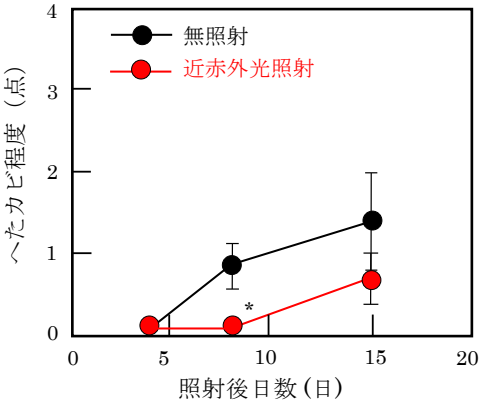
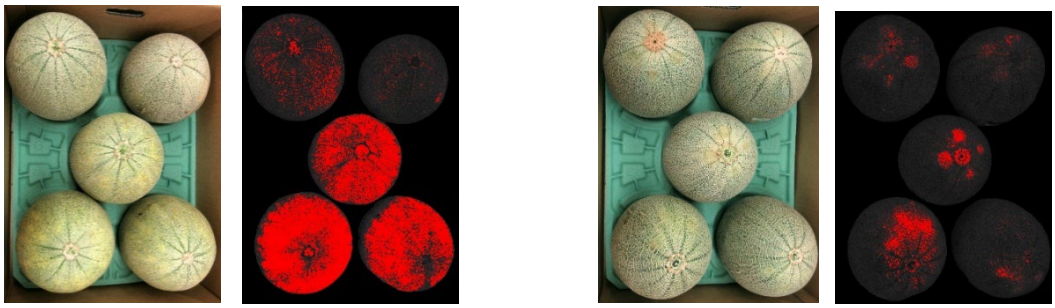


図２　へたの白カビに及ぼす近赤外光照射の影響

カビの発生は程度に応じて点数評価（0:なし、1:1/3 未満、2:1/3 以上 1/2 未満、3:1/2 以上全体未満、4:全体）した。*は、無照射に対し 5%水準で有意差あり。縦棒は標準誤差（n=10～20、品種：タカミ）



無照射　　近赤外光照射

図３　果皮の黄化に及ぼす近赤外光照射の影響（品種：タカミ）

画像解析ソフト「imageJ」により黄色を抽出した。
各写真の右側は黄変部の抽出画像

研究担当者	秦　亜矢子 （株式会社四国総合研究所　化学バイオ技術部）
キーワード	青果物、果物、鮮度保持，日持ち延長、輸送、近赤外光、照射、 メロン、カビ、果実硬度、糖度、電解質漏出割合、黄化
問い合わせ先	株式会社四国総合研究所　経営企画部 TEL　087-843-8111（代表）　E-mail　jigyo_kanri@ssken.co.jp https://www.ssken.co.jp/

［無断転載を禁ず］

四国電力, 四国電力送配電, 四国総合研究所
研究期報120（2024年6月）1－6

共振器増強ラマン分光法によるガス分析技術の開発

㈱四国総合研究所 電子アグリ技術部　市川 祐嗣
㈱四国総合研究所 電子アグリ技術部　横井 清人
㈱四国総合研究所 電子アグリ技術部　大井 信彦
㈱四国総合研究所 電子アグリ技術部　朝日 一平

キーワード：　半導体レーザ
共振器
ラマン分光
水素
混合ガス

Key Words：　Diode laser
Optical cavity
Raman spectroscopy
Hydrogen
Gas mixture

Development of gas analysis technology using cavity-enhanced Raman spectroscopy

Shikoku Research Institute, Inc., Electronics and Agricultural technology Department
Yuji Ichikawa, Kiyohito Yokoi, Nobuhiko Ooi, Ippei Asahi

Abstract

We constructed an external cavity semiconductor laser by combining an AR (Anti-Reflection) coated laser diode that emits light in the blue-violet (center wavelength: 416 nm) region and a Fabry-Perot external cavity consisting of a pair of high-reflection mirrors, and demonstrated that it is possible to generate a strong standing wave of approximately 30 to 50 W inside the cavity when operating with an injection current of 60 mA. The power of this standing wave inside the cavity has reached a level sufficient to measure minute amounts of gas mixtures on the order of ppm in real time using Raman spectroscopy, and the gas analysis ability was confirmed through verification experiments using standard gases. The developed light source has the potential to be put into practical use as a Raman spectroscopy gas analyzer that is unprecedentedly compact, highly sensitive, and has a fast response. We plan to continue working towards its practical application.

1. 序論

1.1 研究開発の背景と目的

有毒ガス，可燃性ガス等の検知やプロセスガス分析，環境測定など，ガス分析技術は，民生用，産業用から研究開発用途まで広範な分野で必要とされる技術である。近年では，燃料としての水素やアンモニアの利用を推進する動きが加速しており，これらのガスを含む多種多様なガスを対象とした分析技術の開発が今まで以上に求められるようになってきている。

水素ガスは毒性はないが，爆発濃度範囲が 4～75%と広く，着火エネルギが小さいため，火災等の事故を未然に防ぐために迅速な漏洩検知が求められる。また，アンモニアガスはエネルギキャリアとして注目されつつあり，燃料としての実用化に向けた研究開発がさかんに行われているが，人体に対する毒性が高く，検知技術に対するニーズは高い。

著者らはこれまで，レーザを光源とするラマン分光法によるガス分析技術の開発に取組んできた[1)-3)]。レーザラマン分光法は，水素やアンモニアを含む多くのガス種のリアルタイム検知・同定が可能な非破壊・非接触の測定法であり，応答速度の速さや遠隔計測への拡張性など，他のガス分析手法にはない長所がある。

一方，ラマン分光法で観測対象となるラマン散乱光は極めて微弱な光であるため，迅速な漏洩検知や微量成分の分析に必要とされる測定感度を，ガスを対象とした測定において実現することは容易ではない。

ラマン散乱の強度は励起レーザの強度に比例するため，高出力のレーザを使用すればガスの高感度分析も可能であるが，安全性の問題や装置が大型化してしまうといった問題が存在する。

本研究では，これらの課題を解決するため，半導体レーザを光共振器によって増幅し励起光源として利用する新たな高感度ガス分析技術の開発に取組んだ。

1.2 レーザラマン分光法によるガス分析

ラマン分光法は，分子をレーザ等の光で励起することで発生するラマンスペクトルを観測する分光計測法であり，分子の種類や構造に関する情報を得られるため，化学分析の場で広く用いられている分析法である。ラマンスペクトルは，分子による非弾性散乱であり，励起光と異なる特定の波長に観測されるスペクトルである[4),5)]。ラマン分光法は，固体・液体・気体のすべてに適用可能であるが，気体（ガス）の場合には分子密度が低いため，ラマンスペクトルの測定にはピーク強度の高いパルスレーザや光電子増倍管等の高感度検出器がよく用いられる。

レーザを用いたガス分析手法としては，一般的には主に赤外波長域のレーザを使った吸収分光法がよく知られており，微量成分の高感度測定も可能であるが，レーザ波長を測定対象ガスの吸収線に精密に合わせて測定するため，複数種のガスの同時計測は難しく，また，多成分分析を行うためには波長可変レーザの実装や複数の装置の併用が必要となる。

これに対し，レーザラマン分光法では，単一波長のレーザ光源による励起によって，同時に多成分の測定が可能である。大気成分のラマンスペクトル測定例を図 1 に示す。横軸はラマンシフトと呼ばれる値であり，励起レーザの波長を基準として，観測されるラマンスペクトルの波長領域でのずれ量を単位 cm^{-1} で表したものである。ラマンシフトは散乱体である分子に固有の値であり，励起光の波長によらず常に一定の値を取る。また，ラマンスペクトルの強度はガス濃度に比例するため，濃度計測も可能である。

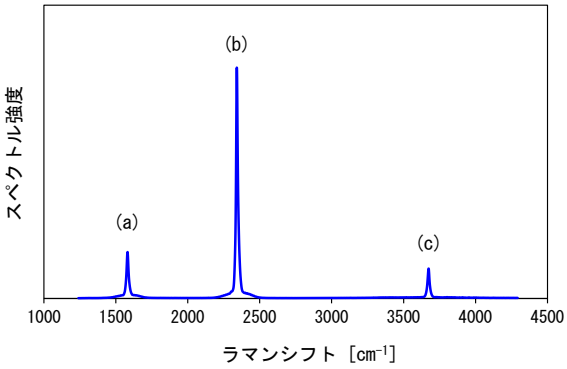


図 1　大気成分のラマンスペクトル
(a)酸素，(b)窒素，(c)水蒸気

分子のラマンスペクトルについては豊富な研究開発の蓄積とデータベースが存在するため，スペクトルの帰属により，成分が未知の混合ガス分析にも適用できる。しかしながら，ガスのラマン

スペクトルは前述のとおり一般的に極めて微弱なため，微量成分の測定には困難がある。レーザラマン分光法では，励起光源として使用するレーザ光の強度や安定性が測定精度を決定するため，高感度ガス分析を実現するためには，極めて品質の高いレーザ光源の開発が求められる。

1.3 共振器内分光法

本研究では，ガス測定感度を向上させるため，光共振器内部で増幅したレーザ光を励起光源として測定を行う共振器増強ラマン分光法に関する開発を行った。これはいわゆる共振器内分光法の一種である。

共振器内分光法は，これまで，主に赤外波長域でのガスの吸収分光測定における高感度化を目的とした開発が行われてきた。レーザを使った吸収分光測定では，ヘリオットセル等の多重反射セルを用いて光路長を増大し，測定感度を向上させる手法がよく行われているが，光共振器は，多重反射セルよりもさらに光路長の長いガスセルとして分光測定に利用することができる。例えば，赤外波長の半導体レーザを光源とする CRDS 分光法は，共振器を用いた吸収分光測定の代表的な手法であり，極微量成分を精度よく定量できるため，さかんに開発が行われている[6)]。

ラマン分光法は，吸収ではなく，分子による散乱光を観察する分光計測法であるが，共振器をガスセルとして使用することで，レーザ光とガス分子が相互作用する距離を長く取ることができ，測定の高感度化が期待できる。

2. 光源の開発

2.1 光源の構成と動作原理

(1) 一般的なレーザ共振器の構成

光は電磁波の一種であり，一般には様々な波長・位相の波が混在しているが，レーザ光は特定の波長かつ位相の揃った光波であるため，直進性や可干渉性など通常の光にはない性質を示す。

一般に，レーザ光を生成するレーザ装置の内部には，電流や光照射等の励起によって発光するレーザ媒質と，媒質を取り囲むように配置された共振器ミラーが組み込まれており，レーザ媒質から発生した光を共振器内部に閉じ込めて増幅し取り出すことによってレーザ光を生成している。したがって，共振器はレーザ装置に必須の構成要素であると言える。

一組の鏡を向かい合わせにした形の共振器をファブリ・ペロー型共振器と呼び，多くのレーザ装置に発振器として用いられている。半導体レーザでは，通常，1 mm に満たないサイズの半導体素子（レーザダイオード）の両端面が劈開によってミラーを形成しており，素子そのものがファブリ・ペロー型共振器となっている。注入した電流による発光が素子の中で閉じ込められ共振することによってレーザ光が生成され，外部に放射される。一般的なファブリ・ペロー型レーザ共振器の構成を図 2 に示す。

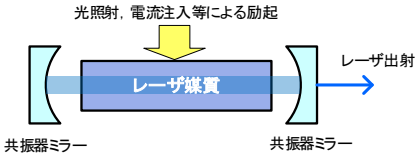


図 2　一般的なレーザ共振器の構成
（ファブリ・ペロー型）

(2) 開発したレーザ光源の構成

これに対し，本研究で開発を行ったレーザ光源は，出射端面に反射防止（Anti-Reflection: AR）コーティングを施し，素子単体でのレーザ発振が抑制されたレーザダイオードからの放射光を，外部に設置した共振器に入射させて発振させる，外部共振器型半導体レーザの一種である。開発したレーザ光源の光学配置を図 3 に示す。

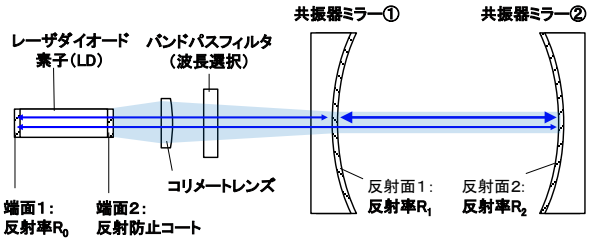


図 3　開発したレーザ光源の構成

レーザダイオードの端面 2 から放射された光はコリメートレンズで成形され，ファブリ・ペロー型の外部空洞共振器に結合される。端面 2 には反射防止コートが施されており，素子単体でのレーザ発振が抑制されている。共振器ミラー①の反射面 1 を透過した光が共振器内部で増幅され

るとともに，増幅された光が共振器から漏れ出してレーザダイオードに帰還し，光フィードバックとして作用する。CRDS 等の一般的な共振器内分光法では，レーザ素子と共振器の間にアイソレータを挿入し，半導体レーザ素子に共振器からの戻り光が帰還しないようにすることでレーザ波長を安定化させて測定を行うことが基本であるが，開発した光源では，共振器内部からの漏れ光をレーザダイオードに帰還させ，共振器の共振波長に受動的にロックさせて発振させることが特徴である。このとき，光学系全体は，レーザダイオードの裏側端面（端面 1），共振器ミラー①の反射面 1，共振器ミラー②の反射面 2 の 3 つの反射面からなる複合共振器を構成していると考えられる。光フィードバックによる受動ロックを作用させるためには，反射面 1 の反射率は反射面 2 の反射率よりもわずかに低く設定される必要がある。

この構成では，反射面 1 で反射して帰還する光と，共振器内部からの漏れ光が干渉するため，光フィードバックによる受動ロックが作用しないように思われるが，共振器とレーザ光の光軸を意図的にわずかにミスアライメントさせることで，干渉で強め合う成分のみをレーザダイオードの端面 2 に帰還させることが可能であり，これによって外部空洞共振器の内部に高強度の定在波を生成可能である。この現象は，1990 年代の終わり頃に米国の研究者によって初めて見出された現象であり [7]，その後，東海大学において研究開発が行われた [8] ことがあるが，これまでのところ，ガス分析技術として実用化された例はない。

この光源は，２枚の共振器ミラー，コリメートレンズ，半導体レーザ素子，のわずか４つの光学素子によって構成される極めてシンプルな光学系によって，共振器内部に高強度の定在波を生成可能であるため，ガスのラマン分光測定用光源として，非常に優れた光源であると言える。また，出射端面に反射防止コートの付いていない一般的なレーザダイオードから放射されたレーザ光を外部共振器に効率よく入射させるためには，共振器の共振波長と半導体レーザの発振波長を精密に一致させる必要があり，共振器ミラーの一方にピエゾ素子を取り付け，光強度をモニタリングしながら電気的にフィードバック制御を行うことで共振器の長さを精密に調整したり，半導体レーザの駆動電流を変調させてレーザ波長を微調整したりする必要がある。これに対し，この光源では，電気的なフィードバック制御等を行うことなく，光フィードバックによる波長の受動ロックのみによって安定的に強度の高い定在波を生成できるため，より簡便な構成の分析装置として実用化できる可能性があると考えている。

2.2 光学素子の選定

吸収分光法によるガス分析では，測定対象となるガスの吸収線に応じた波長のレーザを選定して使用する必要があるが，ラマン分光法では，励起波長に制約はない。ラマン散乱の強度は励起光の波長が短いほど強いため，なるべく波長の短いレーザを光源として利用すると測定感度向上に有利である。これまで行われてきた同様の原理に基づく研究開発では，赤色の可視半導体レーザが光源として使用されていたが，近年の技術開発の進展により，より波長の短い青色領域で発光するレーザダイオード素子が利用可能となり，共振器ミラーについても，同様に青色領域で高い反射率のものが調達可能となってきていることから，青色波長域で動作する装置を構成することとした。実験装置の構築に使用した共振器ミラーとレーザダイオード素子の外観を図 4 に示す。

図４　使用した共振器ミラーとレーザダイオード

レーザダイオードは日亜化学社製 NDVA416T（中心波長 416 nm，定格駆動電流 75 mA，定格最大出力 45 mW）を使用した。出射端面に反射防止コートの付いた外部共振器構築用の製品であり，φ5.6 mm の TO-Can パッケージ内に封止されている。共振器ミラーは，可能な限り反射率の高いものが望ましいため，米国の Five Nine Optics 社に製作を依頼し，波長 416 nm 付近での反射率が入射側のミラーでは 99.97%，終端側のミラーでは 99.999%となる高反射ミラーを調達した。ミラー外径はハーフインチ（12.7 mm），反射面と反対の

面には反射防止コートが施されている。

2.3 光源の構築と動作実証

これらの光学素子を使って検証実験系を構築し，外部共振器によるレーザ光の増幅を確認する検証実験を行った。レーザダイオードは温調制御付きのマウントに取り付け，コリメートレンズの位置を調整してレーザ光が外部共振器の空間モードに効率的に結合するようにアライメントを調整し，さらに光フィードバックが機能するように戻り光の状態を確認しながら慎重に光学系全体を調整することで，共振器内に高強度の定在波が生成できることを実証した。実験で発生させた共振器内定在波を図 5 に示す。共振器内部の明るい紫色の輝線は，増幅されたレーザ光による大気分子のレイリー散乱光（レーザ波長と同波長の散乱光）である。

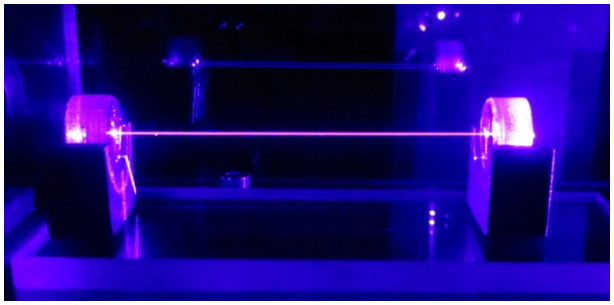


図 5　外部共振器内に生成された定在波

図 5 の実験において，終端側のミラー（反射率 99.999%，透過率 10 ppm）を透過して漏れ出すビームのパワーを測定したところ，0.3 mW 程度であったため，ミラーの透過率 10 ppm から計算すると，共振器内部での光パワーは 30 W 程度になっていると推定される。レーザダイオードの駆動電流は 60 mA，レーザダイオード単体での光出力は 30 mW 以下であるため，外部共振器と組み合わせることにより，1000 倍以上のパワーの定在波を生成可能であることを実証した。光フィードバックの調整を含めた光学系全体のアライメントを精密に調整する必要があるため，パワーが最大となる最適点を見出すことは容易ではないが，適切に調整することで，これまでに，最大で 100 W を超える共振器内光パワーが得られることを確認している。

3. ガス分析能力の検証

3.1 ガスセル型共振器の開発

共振器内部にガスを導入し，ラマン分光測定の基礎試験を行うため，共振器ミラーを内蔵したアライメント調整型のガスセルを製作した。製作したガスセル（共振動作時）の外観を図 6 に示す。

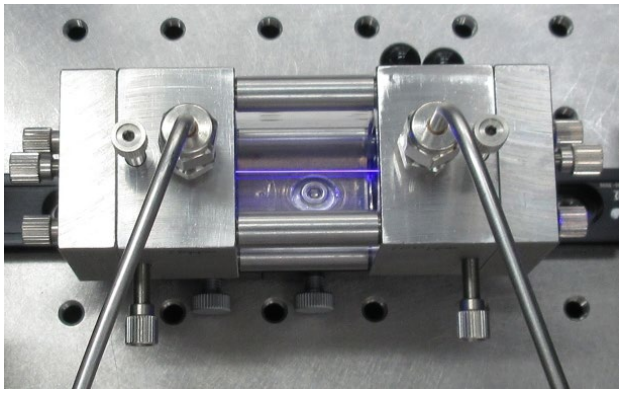


図 6　ガスセル型共振器

ガスセル両端の金属部分に共振器ミラーがそれぞれマウントされており，共振器の内側に測定ガスを導入できるようになっている。中央部分は石英ガラス製の窓となっており，光軸と直交する方向からラマンスペクトルを観測する。図 6 では，大気によるレイリー散乱が窓越しに目視できる。

3.2 ガス分析試験結果

開発した光源を使ったラマン分光測定でのガス分析能力を評価するため，標準ガスを上記のガスセルに導入し，検証試験を行った。水素ベースメタン 100 ppm の標準ガスを大気圧でセル内に充填し，観測窓からラマンスペクトルをマルチチャンネル分光器で測定した結果を，図 7 に示す。

比較のため，メタンを含まない純水素およびラマンスペクトルの発生しないアルゴンを充填した場合のスペクトルも示した。横軸のラマンシフト 2900 cm^{-1} 付近の大きなピークがメタン 100 ppm のラマンスペクトルであり，水素ガス中の微量成分を精度よく分析可能であることを検証できた。図 7 のスペクトル測定に要した計測時間は 1 分であり，短時間で微量混合ガスを分析可能な技術であることを実証した。この他，水素ガスそのものの測定についても，標準ガスを用いた試験により，1 分以内に 1 ppm 以下の分析が可能であることを確認している。

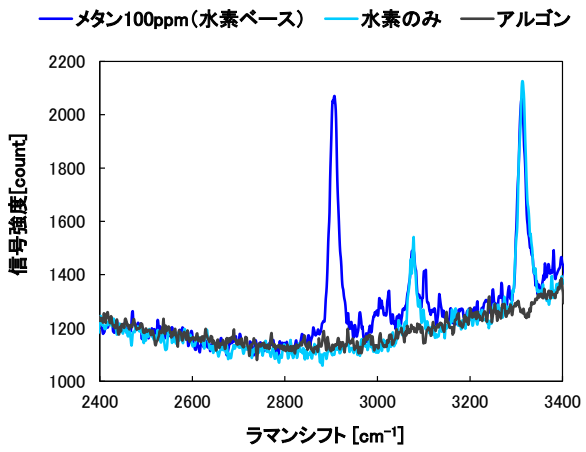


図 7　水素ベースメタン 100 ppm のラマンスペクトル測定結果

4. まとめ

青紫色（中心波長 416 nm）領域で発光する反射防止コート付きレーザダイオードと，一対の高反射ミラーからなるファブリ・ペロー型外部共振器を組み合わせた外部共振器型半導体レーザを構築し，注入電流 60 mA での動作時に共振器内部に 30～50 W 程度の強力な定在波を生成可能であることを実証した。この共振器内定在波のパワーは，ラマン分光法によって ppm オーダの微量混合ガスを実時間測定するのに十分な水準に達しており，標準ガスを用いた検証実験によってガス分析能力を確かめた。開発した光源は，これまでにない小型・高感度・高速応答を実現するラマン分光方式のガス分析計として実用化できる可能性があり，社会実装に向けた取り組みを継続していく予定である。

[謝辞]

この成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（ＮＥＤＯ）の委託業務（JPNP 18011）の結果得られたものです。

また，同委託業務における共同研究者として，数々の貴重な助言をいただきました東海大学の山口先生，千葉大学の椎名先生に，この場を借りて深く感謝申し上げます。

[参考文献]

1) 二宮英樹，朝日一平，杉本幸代，島本有造：「ラマン散乱効果を利用した水素ガス濃度遠隔計測技術の開発」，電気学会論文誌 C, Vol. 129, No. 7, pp. 1181-1185 (2009)
2) 朝日一平 他:「低出力レーザによる水素ガス濃度遠隔計測」, 電気学会論文誌 C, Vol. 130, No. 7, pp. 1145-1150 (2010)
3) 杉本幸代，朝日一平：「コヒーレントアンチストークスラマン散乱による漏えい水素ガス検知技術（第 1 報）」，四国電力，四国総合研究所 研究期報, No. 116, pp. 31-40 (2022)
4) 濱口宏夫, 岩田耕一 編著:「ラマン分光法」, 講談社 (2015)
5) Derek A. Long: “The Raman Effect”, John Wiley and Sons, pp. 3-152 (2002)
6) Gianluca Gagliardi, Hans-Peter Loock: “Cavity-Enhanced Spectroscopy and Sensing”, Springer (2014)
7) David A. King and Richard J. Pittaro: “Simple diode pumping of a power-buildup cavity”, Optics Letters, Vol. 23, No. 10, pp. 774- 776 (1998)
8) Sato et al.: “Simple Real Time Trace Nitrogen Dioxide Detector Based on Continuous-Wave Cavity Ringdown Spectroscopy Using Passively Locked External Cavity Diode Laser”, Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 47, No. 8R, pp. 6478 (2008)

四国電力, 四国電力送配電, 四国総合研究所
研究期報120（2024年6月）7－13

GXの加速化に向けた炉内アンモニア火炎可視化技術の開発に関する基礎検討

㈱四国総合研究所 電子アグリ技術部　横井 清人
㈱四国総合研究所 電子アグリ技術部　杉本 幸代
㈱四国総合研究所 電子アグリ技術部　市川 祐嗣
㈱四国総合研究所 電子アグリ技術部　荻田 将一
㈱四国総合研究所 電子アグリ技術部　大井 信彦
㈱四国総合研究所 電子アグリ技術部　朝日 一平

キーワード：　アンモニア燃焼炉
アンモニア火炎
可視化
受動紫外・赤外分光法

Key Words：　Ammonia combustion furnace
Ammonia flame
Visualization
Passive UV/IR spectroscopy

Fundamental study on development of ammonia flame visualization technology in furnace for acceleration of GX

Shikoku Research Institute, Inc., Electronics and Agricultural technology Department
Kiyohito Yokoi, Sachiyo Sugimoto, Yuji Ichikawa
Masakazu Ogita, Nobuhiko Ooi, Ippei Asahi

Abstract

Currently, many companies are actively working to convert existing fuel combustion furnaces into ammonia-only or co-firing furnaces in order to put ammonia, which is attracting attention as one of the carbon-free fuels that can be used to combat climate change, into practical use in society. In the process, a new issue has arisen: the difficulty of observing ammonia flames in high-temperature furnaces. To solve this issue, we evaluated the feasibility of visualizing ammonia flames in furnaces using the principle of passive ultraviolet and infrared spectroscopy based on the results of basic experiments. As a result, we concluded that ammonia flames can be visualized in high-temperature furnace environments by selectively capturing the emission of ammonia flames in the range of 240 to 290 nm, assuming that the factors inhibiting visualization are radiation, the emission of the co-firing fuel flame, and light absorption by combustion products.

1. 序論

アンモニアは，天然ガス，石油等の既存燃料や再生可能エネルギー等から製造することが可能であり，また，燃焼に伴う CO_2 の排出が無いことから，気候変動対策に有効なカーボンフリー燃料の一つとして注目されている。同じく注目されている水素と比較して，既存インフラでの利用が可能であることから，安価に製造・利用することができる点が特徴とされている[1]。我が国においても，第6次エネルギー基本計画にも明記される[2]など，グリーン成長戦略における重要分野の1つとして位置づけられており，主に専焼・混焼火力発電，同各種工業炉，船舶用燃料を中心に，技術開発や社会実装の加速化が進められている。

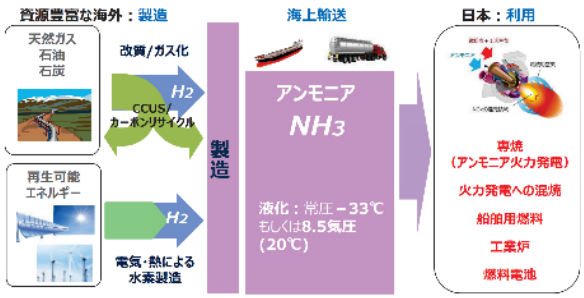


図1　燃料アンモニアの重要性[1]

このような社会情勢を背景として，現在，多くの企業が既存燃料のバーナや燃焼炉からアンモニアバーナやアンモニア専焼・混焼炉への転換に向けた取組みを活発化している中，アンモニアの燃焼に係る課題が明らかになっている。例えば，アンモニアは，メタン等の炭化水素系燃料と比較して燃焼性が低く，着火及び保炎が難しい。また，燃焼生成物として大気汚染の原因物質である NO_X が発生する[3]。したがって，安定的かつ NO_X 生成が抑制できる燃焼方法を見出す必要があるが，その解決に向けた技術開発の中で，特に炉内においてアンモニア火炎の観測が困難であるという問題が新たに浮上した。

したがって，ここでは光学的計測技術を応用することにより，高温炉内におけるアンモニア火炎可視化を実現するための基礎検討を行ったので，基礎実験結果及び実験データに基づく実現の見通し等について述べる。

2. 原理

著者らはこれまでに，水素を燃料とした際に生じる人の目に見えない火炎を可視化する技術を確立し，一部社会実装に至っている[4), 5)]。

本技術は，受動紫外・赤外分光法を原理として動作するものであり，目に見えない発光体を対象として，可視波長域外の対象の自発光から可視化に適した波長域を選択し，特殊なカメラを用いて同波長域の発光を画像化した後に，背景画像と重ね合わせることで，モニター上で対象を可視化するものである。

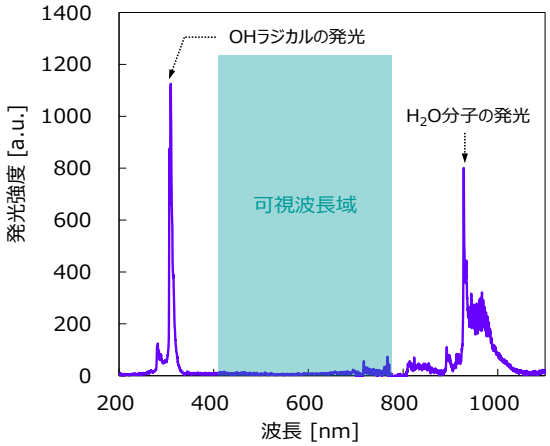


図2　水素火炎の発光スペクトル事例

原理の説明のために，図2に水素火炎の発光スペクトル事例を示す。水素火炎の場合，燃焼反応の過程において人の目に感度がある可視波長域に顕著な発光が生じない。したがって水素火炎は不可視である。一方で，紫外波長域や近赤外波長域において，燃焼生成物である OH ラジカルや H_2O 分子の発光が生じており，受動紫外・赤外分光法では，これらの発光を選択的に捉え，必要に応じて画像処理を加えた上で，可視画像上に重畳し，可視化を行っている。

後に述べるとおり，アンモニア火炎はその燃焼過程において可視波長域に発光を示し，環境条件によっては視認することが十分可能である。本件において，アンモニア火炎が観測できないとされているのは，炉内等の高温環境下においてであり，黒体輻射による周辺の物質の強い発光がアンモニア火炎の発光のコントラストを大幅に低下させ，この点が主な要因となって観測を困難にしているものと推定される。

したがって，アンモニア火炎の可視化にあたっては，水素火炎の可視化とは異なる概念，アプローチが必要となる。

3. 原理検証

3.1 アンモニア火炎発生装置の製作

アンモニア火炎を発生させるために図 3 の装置を作製した。アンモニアガスと酸素ガスを予混合容器内に導入し，その後ノズルから放出した混合ガスに点火することでアンモニア火炎を形成する。

図 3　アンモニア火炎発生装置外観

図 4 はノズル部の拡大図で，アンモニアへの点火と燃焼を持続するために，水素火炎を種火として利用した。初めに水素用ノズルから水素ガス（100%）を放出させ，小型誘電コイルを用いて遠隔より火花放電によって水素を燃焼させた。この時，水素ガスの放出量は 0.2L/min，火炎高約 8mm である。その後，アンモニア用ノズルからアンモニア（100%）と酸素（100%）の混合ガスを放出し，アンモニアを燃焼させた（図 5）。

計測中のアンモニア火炎の失火を防ぐため，ノズル（火炎口）の周りに直径 90mm，厚み 2.5mm，高さ 300mm の石英ガラス管で覆いをした。

本装置では火炎を発生させ，また腐食性と毒性のあるガスも扱うため，安全にも配慮して設計した。

火炎口からガスボンベに向けての逆火を防ぐために水素，酸素，アンモニアのそれぞれのガス管には逆火防止器（乾式）を火炎口側とボンベ側に設置した。

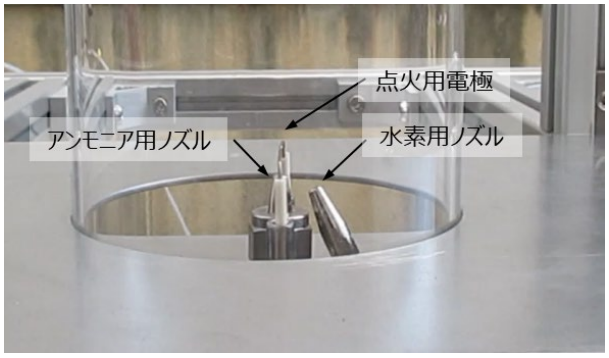


図 4　ノズル部拡大図

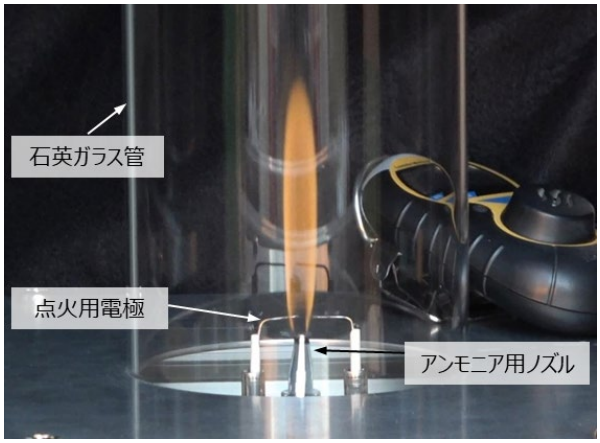


図 5　燃焼中のアンモニア火炎

アンモニアは腐食性が非常に高い物質であるため，液化アンモニアのガスボンベとガス放出口までの供給経路の材料には耐腐食性のあるテフロンチューブとスウェージロックのステンレスチューブ，低リーク・耐食性フローメータ，ステンレスノズル及びステンレス製のガスセルを用いた。アンモニアのガス管は窒素ボンベにも分岐接続され，計測後は窒素ガスでアンモニアガスをパージできるようにした。

また，アンモニアは人体にとって有毒なガスでもあるため，外部への漏洩を防ぐ目的のために石英ガラス管の上部を排気ダクトに接続し，石英ガラス管から吸気されたガスは塩酸を用いた中和排気系に送られ，未燃焼アンモニアガスは無毒化される設計となっている。

3.2 アンモニア火炎可視化実験

(1) アンモニア火炎発光スペクトル計測

前節に示した火炎発生装置を用いて，アンモニア火炎可視化実験を行った。

可視化実験に先立ち，炉内アンモニア火炎可視化において最適な観測波長を検討するために，アンモニア火炎の発光スペクトルの計測を行った。集光したアンモニア火炎の発光を光ファイバに結合し，分光器へ導入した。使用した分光器は，波長域ごとにそれぞれ，Ocearn Optics 社製 Qe65Pro（紫外～可視域：200～580nm），HR4000（近赤外域：700～1100nm），NIRQuest（近赤外域：1100～1700nm）である。得られた各波長域の発光スペクトルを図 6(a)～(d)に示す。前節に述べたように，本火炎発生装置では水素火炎を種火としてアンモニア火炎を生成している。したがって，それぞれのグラフは燃料のアンモニア転換前後，すなわち水素火炎のみの場合とアンモニア火炎発生後の場合を比較する形で示している。

図 6(a)に示す紫外～可視域のスペクトルを見ると，350nm 以下の紫外域と 400nm 以上の可視域の発光が確認できる。紫外域の発光は幾つかのピークを示しており，これらは OH ラジカルや NH ラジカルといった，アンモニアの燃焼過程で生じる中間体による発光である。400nm 付近から長波長側に生じるブロードなベースラインに複数のピークを有するスペクトルは，燃焼過程で生じる NH_2 アンモニアの α バンド由来の発光[6]に，高温状態の H_2O による発光が重畳した結果として観測されるスペクトルであり[7]，これらの発光が主要因となって，アンモニア火炎は図 5 に示したような橙色の発光として人の目で捉えることができる。図 6(c)(d)に示した近赤外域の発光は，いずれも主に H_2O 由来のスペクトルである。

(2) アンモニア火炎可視化実験

前述のアンモニア火炎の実測データに基づき，炉内アンモニア火炎の可視化に適した波長域を選定した。高温環境下における火炎の可視化において，明らかな阻害要因として考えられるのは，高温状態となった周囲の物体からの熱放射に伴う発光である。黒体輻射，すなわち温度によって物体の放射する光の色が変化する現象は，一般的に高温になるほど発光領域が短波長側にシフトする。可視波長域への干渉は概ね 600℃程度から生じ，1500℃程度では約 300nm まで発光の始点がシフトする。また，他の燃料との混焼を行う場合は，アンモニア以外の燃料由来の発光も考慮する必要がある。

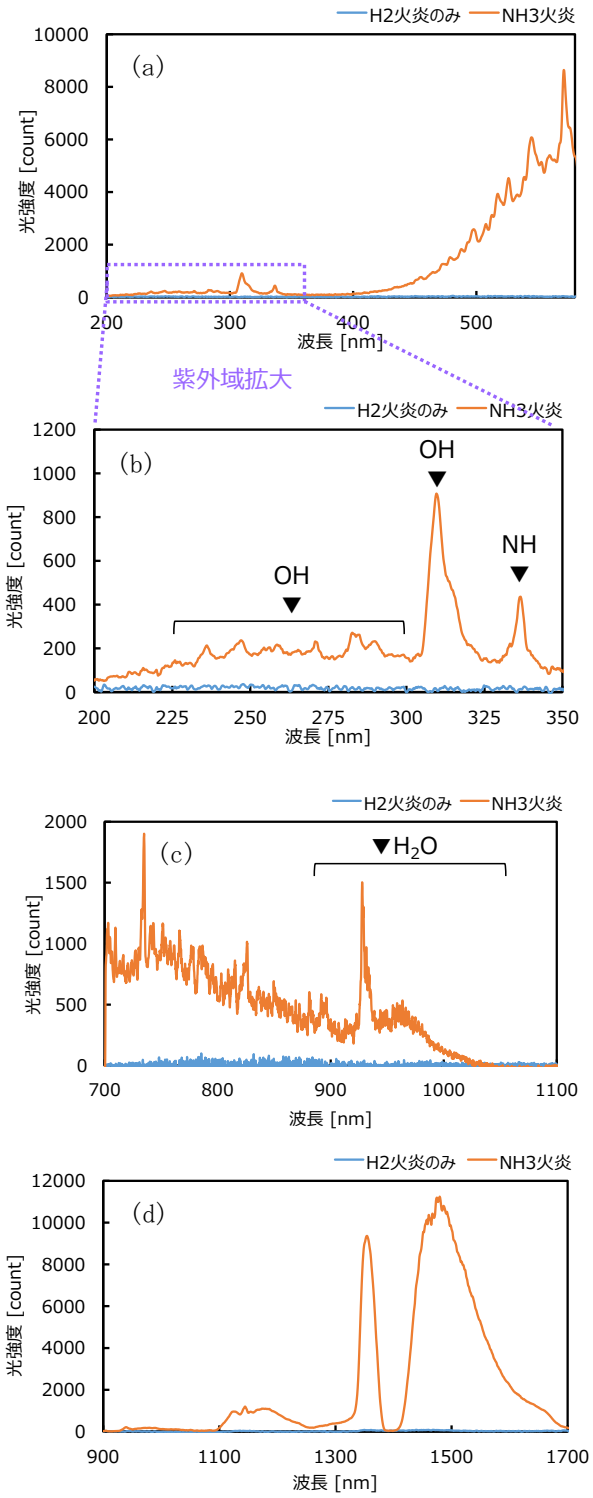


図 6　アンモニア火炎の発光スペクトル
(a)　紫外～可視域：200～580nm
(b)　紫外領域拡大
(c)　近赤外域：700～1100nm
(d)　近赤外域：1100～1700nm

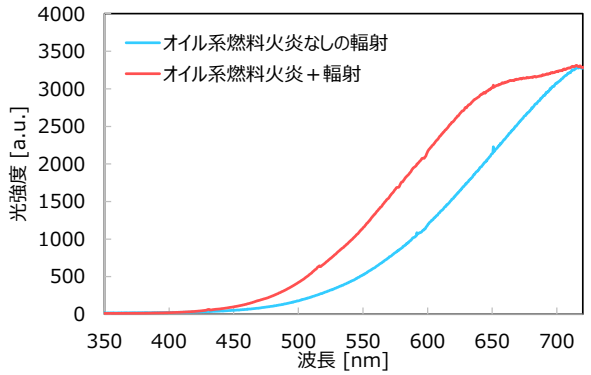


図 7　オイル系燃料燃焼炉内の背景光スペクトル事例

図 7 は，オイル系燃料を使用する炉内の背景光スペクトル計測結果事例である。このように，他の燃料由来の火炎の有無にかかわらず，いずれの場合も概ね 400nm 付近から長波長側に向けて，ブロードな発光が生じることがわかる。これらの発光は，燃料あるいは高温になった物体の総量が多ければ多いほど強く生じ，図 6(a)に示した，同じ波長域に生じるアンモニア火炎由来の可視領域の発光のコントラストを著しく低下させるものと考えられる。したがって，高温炉内の条件下においては，図 6(b)に示した紫外域の発光を用いてアンモニア火炎を可視化する手法が妥当であると言える。

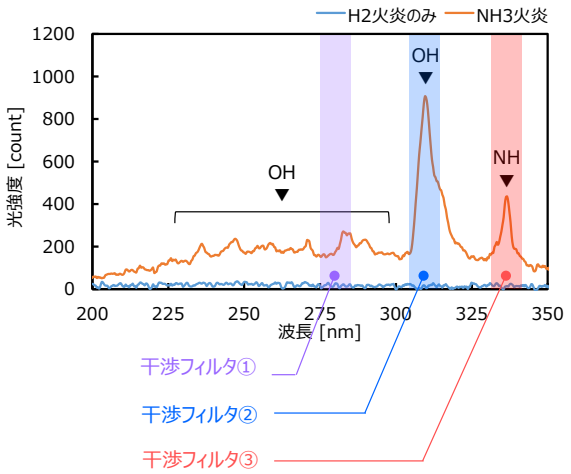


図 8　紫外域におけるアンモニア火炎の発光スペクトルと使用する干渉フィルタの透過波長域

図 8 は図 6(b)に示したアンモニア火炎の紫外域の発光スペクトルに，可視化に使用する干渉フィルタの透過波長域を図示したものである。それぞれ，

干渉フィルタ①：中心波長 280nm，半値全幅 10nm
干渉フィルタ②：中心波長 310nm，半値全幅 10nm
干渉フィルタ③：中心波長 337nm，半値全幅 10nm

である。一般的には，発光の強度が強い波長域を用いるが，輻射の影響は短波長ほど受けにくいことから，ここではこれら 3 つの波長域において可視化実験を行い，比較することとした。

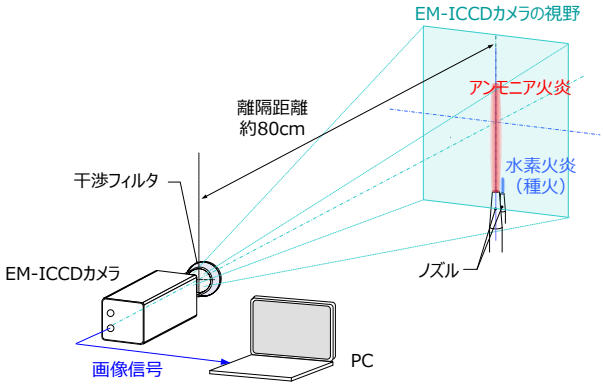


図 9　アンモニア火炎可視化実験装置構成

図 9 にアンモニア火炎可視化実験装置構成を示す。アンモニア火炎の画像は，電子増幅機能が付加されたイメージインテンシファイア付 CCD カメラ（EM-ICCD カメラ）を用いて撮像した。カメラレンズは紫外光を透過するものを使用し，同カメラレンズの前段に干渉フィルタ①～③を順に配置し，それぞれの条件で火炎画像を取得した。可視化実験の結果を図 10 に示す。

図 10 の各画像に示すように，3 種の干渉フィルタいずれを用いても，アンモニア火炎の可視化が可能であった。本実験は常温環境下で実施したが，輻射や混焼燃料火炎の影響のみに注目した場合，特に干渉フィルタ①を使用することで概ね 1500℃程度まではアンモニア火炎の可視化が可能であると推察される。また，火炎画像のコントラストも干渉フィルタ①を使用した場合が最も良好であった。これは我々の活動環境下における背景光が短波長ほど少なくなることに起因しているものと考えられる。

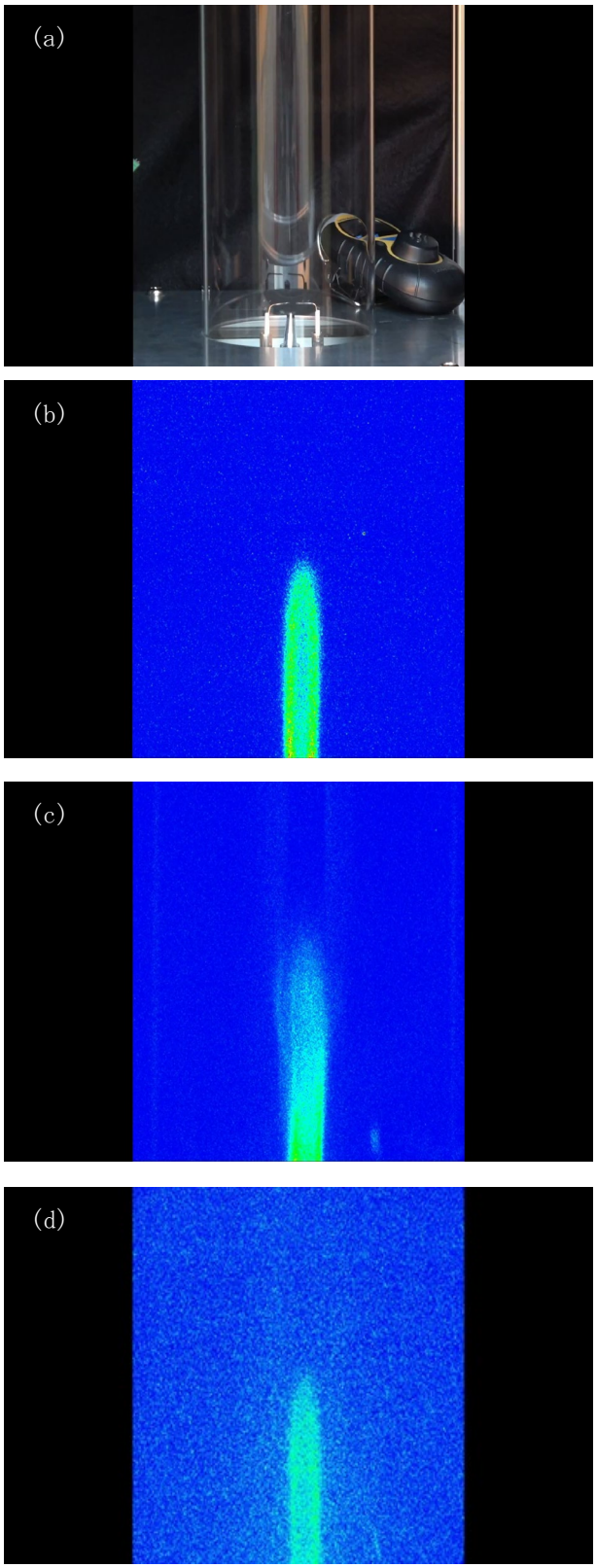


図 10　アンモニア火炎可視化実験結果事例
(a)　可視画像
(b)　干渉フィルタ①：中心波長 280nm
(c)　干渉フィルタ②：中心波長 310nm
(d)　干渉フィルタ③：中心波長 337nm

(3) アンモニア燃焼生成物の影響に関する考察

アンモニア火炎の可視化においては，その阻害要因として，アンモニアの燃焼に伴い生成される物質による光吸収の影響も考慮する必要があると考えられる。図 11 に示すように特に，NO_X（ここでは NO_2，N_2O，NO）は，紫外域において比較的強い光吸収を示すことが知られており [8]，生成される NO_X の量次第では，アンモニア火炎の発光が吸収され，大幅に減衰する，あるいは撮像素子まで到達しない可能性がある。ここでは一例として，最も影響が大きいと考えられる NO_2 について，アンモニア火炎可視化への影響を机上検討により評価した。

図 12 は，アンモニア火炎と撮像素子の間に 100cm の空間が存在し，同空間に NO_2 が存在する場合の光の透過率について，その波長依存性及び NO_2 濃度依存性を示すものである。

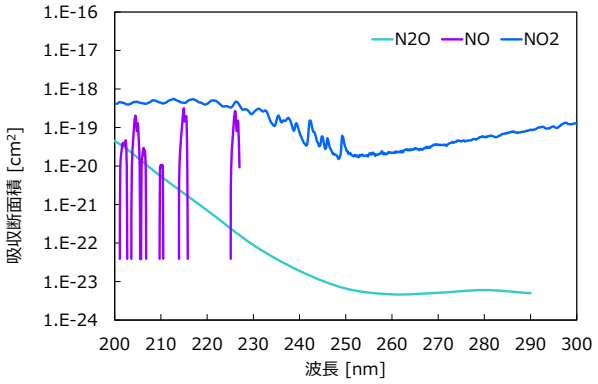


図 11　NO_X 主要成分の吸収断面積事例 [8]
（波長 200～300nm）

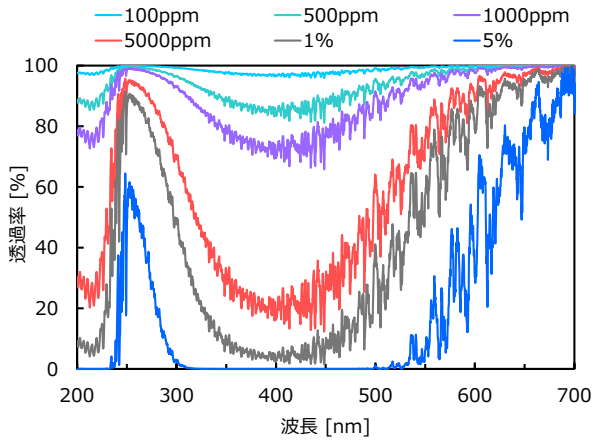


図 12　紫外～可視波長域における光の透過率の NO_2 濃度依存性

図 12 に示すように，NO_2 濃度が 100ppm 程度であれば大きな影響はないと言えるが，数千 ppm レベルになると可視波長域及び深紫外波長域において光の透過率が 20%程度まで低下することが分かる。これをクリアする方法としては，図 13 に示す波長域を用いる手法が考えられる。

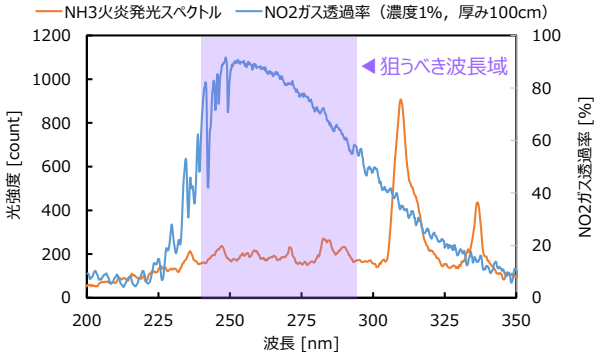


図 13　NO_2 の吸収の影響が強い場合のアンモニア火炎可視化に適した観測波長域

図 13 は図 6(b)に示したアンモニア火炎の紫外域の発光スペクトルに NO_2 ガス透過率の波長依存性を重ねたものである。NO_2 の吸収の影響は 300nm 以下の領域において弱まり，240nm 付近から再度強まる傾向にある。したがって，図 13 の紫色で示した概ね 240～290nm における発光を用いて可視化を行う，すなわち図 10 における(b)の条件を採用することで，高濃度 NO_2 が存在する環境下においてもアンモニア火炎を可視化することが可能であると考えられる。

このような検討は，各種条件下で生成されるアンモニア火炎の個別の燃焼生成物，特に高濃度になる可能性がある物質について，実施する必要がある。

4. 結論

高温炉内環境におけるアンモニア火炎可視化について，基礎実験に基づく実現可能性評価を行った。阻害要因として，輻射や混焼燃料火炎の発光及び燃焼生成物による光吸収を仮定した場合，240～290nm 付近のアンモニア火炎の発光を選択的に捉えることで可視化が可能であるとの結論を得た。

今後は，実環境での実証試験を行い，アンモニア混焼・専焼炉の開発過程や，実際に稼働しているアンモニア燃焼炉内の火炎モニタリング等の用途での応用展開を目指す予定である。

[参考文献]

1) 資源エネルギー庁:「我が国の燃料アンモニア導入・拡大について」，2022 年 12 月，https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/green_innovation/energy_structure/pdf/012_04_00.pdf
2) 経済産業省：「エネルギー基本計画」，令和 3 年 10 月，https://www.meti.go.jp/press/2021/10/20211022005/20211022005-1.pdf
3) 仁木洋一:「ディーゼル機関によるアンモニア/軽油混焼技術」，㈱エヌ・ティー・エス グリーンアンモニア合成・利用の新展開，pp.79-91 (2023)
4) 朝日一平，杉本幸代，星野礼香：「受動紫外・赤外リモートセンシングによる水素火炎可視化」，日本燃焼学会誌，Vol61，No.195，pp.37-42（2019）
5) 荻田将一，田中武海：「受動赤外分光による水素火炎可視化ウェアラブルデバイスの開発」，四国電力，四国電力送配電，四国総合研究所研究期報 118，pp.11-19（2023）
6) R. W. B. Pearse, A. G. Gaydon, ”THE IDENTIFICATION OF MOLECULAR SPECTRA”, Jhon Wiley & Sons, New York, pp.232-235 (1976)
7) 小林秀昭，早川晃弘：「カーボンフリーアンモニア燃焼」，日本燃焼学会誌，Vol.58，No.183，pp.41-48（2016）
8) Keller-Rudek, H., Moortgat, G. K., Sander, R., and Sörensen, R.: The MPI-Mainz UV/VIS spectral atlas of gaseous molecules of atmospheric interest, Earth Syst. Sci. Data, 5, 365–373, (2013), DOI: 10.5194/essd-5-365-2013

四国電力, 四国電力送配電, 四国総合研究所
研究期報120（2024年6月）14－20

真空式下水道真空弁遠隔監視システムの開発について

㈱四国総合研究所 電子アグリ技術部　中西 美一
㈱四国総合研究所 電子アグリ技術部　細川 輝樹
㈱四国総合研究所 電子アグリ技術部　仲田 誉
㈱四国総合研究所 経営企画部　久米川 昌浩

キーワード：　真空式下水道
真空弁
遠隔監視

Key Words：　Vacuum Sewer System
Vacuum Valve
Remote Monitoring

Development of a remote monitoring system for vacuum sewer systems

Shikoku Research Institute, Inc., Electronics and Agri-Technology Department
Yoshikazu Nakanishi, Teruki Hosokawa, Homare Nakata
Shikoku Research Institute, Inc., Corporate Planning Department
Masahiro Kumegawa

Abstract

Vacuum sewer system is a suitable option to areas where traditional gravity sewer systems are difficult to install.

They specifically work well in areas with subsurface difficulties. (For example：high groundwater tables, sandy and unstable soils or undulating subsurface)

With a vacuum sewer system, vacuum pumps maintain continuous vacuum pressure on the system. In addition, there are vacuum valves located at each sewage input point that seals the system. When these valves are activated, differential pressure propels the wastewater through the piping to the vacuum station.

Vacuum valves' smooth working is essential to keep vacuum sewer systems stable; therefore, we have developed a sophisticated vacuum valve remote monitoring system utilizing modern IoT technology.

It especially equips sensitive microphones to catch subtle air leakage from vacuum valves that could not be detected conventional monitoring methods.

1. はじめに

下水道設備は近代国家に不可欠の重要インフラであり，これまでに様々な方式の下水道システムが開発されている。中でも近年では，大規模な工事を必要とせず，我が国特有の起伏の多い地形にも適用可能な真空式下水道システムの導入が進んでいる。[1)] (2020 年度末で 344 システム [2)])

真空式下水道システムでは，地域の隅々にまで張り巡らした真空母管に真空弁を装備した汚水受水桝が接続されており，受水桝に一定量の汚水が溜まると真空弁が開き受水桝内の汚水を真空母管内に吸い込む仕組みとなっている。

この真空弁の動作が不調になると，受水桝に接続された住宅からの排水が困難になったり，受水桝から汚水が溢れたり，真空母管全体の真空圧が低下しシステム全体の動作が不安定になるというトラブルを引き起こすため，その常時監視システムが不可欠となっている。

本稿では,運用開始から 19 年になる真空式下水道システムに装備された，無線通信式真空弁遠隔監視ステムの老朽化取り換えに際して，当社の openATOMS 技術をベースに開発した，従来にない新機能を盛り込んだ真空弁遠隔監視システム(以下，本システムと記す)について報告する。

2. 主な要求仕様

発注元の自治体から提示された主な要求仕様を以下に示す。

(1)真空弁異常検知および動作データ収集機能

・海岸地区に設置されている 60 機の真空弁の動作状況，異常高水位の発生状況，真空漏れの発生状況を常時監視し，異常検知時には直ちに浄化センター内に設置した中央監視装置へ通知可能であること。

・1 日の真空弁動作回数，動作時間，異常検知回数を計測し，日報データとして中央監視装置へ通知可能であること。

・真空弁監視装置のサイズは 350×63×33mm 以下とし，既設の監視装置収容ケース内に設置可能であること。

・真空弁監視装置は，装置内に内蔵する乾電池で 1 年間以上動作可能であること。

・真空弁監視装置は，気温：-20～60℃，湿度：0～100%の環境下で 10 年間以上連続動作可能な設計であること。

・停電時にも 24 時間以上全ての機能を維持可能であること。

(2)異常検知時メール通報機能

・中央監視装置から，異常の検知および復帰を電子メールにてスマートフォン等に通知可能であること。

・インターネットに接続された PC，スマートフォン等の WEB ブラウザを中央監視装置に接続し，異常通報先，異常通報条件を容易に設定可能であること。

(3)WEB 画面による異常監視機能

・インターネットに接続された PC，スマートフォン等の WEB ブラウザを中央監視装置に接続し，異常状態のリアルタイム監視が可能であること。

・大規模地震発生時など，インターネット，LTE 回線などの広域通信網が機能停止した場合でも，中央監視装置に PC，スマートフォン等の WEB ブラウザを WiFi 接続することで,異常状態のリアルタイム監視が可能であること。

(4)WEB 画面による蓄積データ分析機能

・インターネットに接続された PC，スマートフォン等の WEB ブラウザを中央監視装置に接続し，異常通報および日報蓄積データの分析が可能であること。

・蓄積データの保存期間は 20 年以上であること。

3. システム構成

本システムは，各受水桝の空気取り入れ管(図 1)に取り付けた樹脂ケース内に収容し，真空弁監視装置として機能するセンサユニット(SU,図 1)×60 台，浄化センター内に設置し中央監視装置として機能するエッジクラウドユニット(ECU,図 3)×1 台，ならびにセンサユニット群とエッジクラウドユニットを双方向にデータ連係する無線通信ネットワーク(RWN)で構成されており,エッジクラウドユニットは LTE ルータを介してインターネットに接続されている。

3.1 センサユニット(SU)

従来システムでセンサユニット(以下 SU と記す)に入力されていた情報は真空弁の開閉状態信号および異常高水位検知信号のみであり，その監視項目は真空弁の所定時間を超える連続開放の検

知・通報，および異常高水位の検知・通報のみであったが，システム更新に際し，発注元の自治体より真空弁の動作回数，動作時間の計測・通報機能に加え，真空弁不完全閉止に伴う真空漏れの検知・通報機能の実現という課題提示があり，本工事の元請けのM計器様(以下，M計器と記す)と協力してその実現手法を試行錯誤した結果，発注元の自治体からのご要望の大部分を実現することに成功している。

SU のハードウェアおよびソフトウェアは全て当社で独自に開発したものである。近年では IoT 用途向けに Arduino*1 や Leafony*2 のような汎用ハードウェアが販売されているが，それらの汎用ハードウェアを利用して実用システムを構築することには限界があり，社会に散在する様々な課題の解決に挑戦するためには，最先端のセンサやマイコンを自在に組み合わせるハードウェア設計技術，ならびに独自 OS を開発できるレベルのソフトウェア技術が不可欠である。

図 1　空気取り入れ管(左)と SU（右）

・受水桝に隣接して設置されている空気取り入れ管に樹脂ケースが取り付けられており，樹脂ケース内に SU を収容している。
・SU は，上から無線通信アンテナ，電子回路基板，電池，信号接続端子台で構成されている。

(1)低消費電力化について

受水桝には商用電源は整備されておらず，また，住宅や樹木の影になる場所が多く，太陽電池による電源確保も困難であるため，SU は内蔵乾電池で 1 年以上動作させなければならない。

本システム開発のベース技術として使用した openATOMS は IoT システム基盤技術であり，ハードウェア，ソフトウェアの両面で低消費電力化を得意としているため，新たに開発した以下の 2 つの機能を追加搭載しているにも拘わらず，電池寿命は従来システムの 1 年程度から 3 年以上へと大きく延長することに成功している。

(2)真空弁動作回数・動作時間計測について

先行メーカを含め，本課題を実現可能と回答したのは当社だけであったとのことであるが，当社は極低消費電力で動作するパルス計測技術(特許第 7397459 号)を保有しており，本課題については本特許技術の応用により比較的容易に実現することができた。

真空弁の 1 日積算動作回数に加えて，1 日積算動作時間，1 日最大動作時間を日報データとして収集できるようにしており，それらのデータから重篤な障害に至る前の，異物の噛み込みなどによる僅かな動作不調もある程度検知可能であることが明らかとなりつつある。

(3)真空漏れ検知について

本課題については，自治体から提供された「真空漏れが発生すると，受水桝からシューシューと音が聞こえる。」という情報を頼りに，空気取り入れ管内に高感度の小型マイク(図 2)を設置し，真空弁の動作後に音量測定を行い，その計測値で真空漏れの有無を判定するという方法を考案するとともに，M計器と協力して試作機による現地試験を繰り返しながら，試行錯誤の末に実用的なハードウェアおよびソフトウェアの開発に成功した。

後日の調査で，音量測定で真空漏れを検知するというアイデア自体は他の専門メーカにより特許出願されていたものの，審査請求されなかったことが判明した。審査請求されなかった理由は定かではないが，当社も直面し最終的には解決した様々な技術的困難が実用化を断念させたものと推察される。

音量測定時にはマイクの消費電流に加えてマイコンの動作電流が大きくなるため，音量測定のタイミング・時間・回数を最適化し，消費電力を低減している。

また，真空漏れ音以外にも，汚水の流入音や通行車両音，降雨音などの環境音があり，真空漏れ音とそれ以外のノイズを識別する工夫を行う必要があった。

音量測定による真空漏れ検知手法については，一応実用レベルには達しているものの，まだまだ改良の余地があり，より高精度な検知手法の検討を行っている。

図 2　高感度小型マイク

・高湿度環境中に設置されるため，アクリル樹脂製のカプセルに密封しているが，全面のアクリル薄板が振動板として機能し，周囲音をマイクへ高効率に伝達する設計となっている。

3.2 エッジクラウドユニット(ECU)

IoT 用途では集中型クラウドサービスの提供保証期間よりシステム寿命が長いことが多く，殆どのシステムがオンプレミスで構築されており，本システムおいても，現場設置型の小型 Linux コンピュータであるエッジクラウドユニット(以下，ECU と記す)に「データ受信」「データ蓄積」「データ解析」「データ参照」などの通常のクラウド機能を全て搭載している。

ECU には固定グローバル IP アドレスを付与した LTE ルータが搭載されており，ECU に搭載されている WEB アプリにインターネットあるいはローカル WiFi 経由で PC，スマホなどの WEB ブラウザからアクセスすることで全ての機能を利用できる。

ECU では様々なソフトウェアが動作しているが，その全てをソフトウェアマネージメントシステムを介して遠隔保守可能な設計としており，動作状況の確認，不具合修正，ならびに機能向上のためのソフトウェアアップデートは基本動作を停止することなく遠隔実施することができる。

SU から収集したデータは XML 形式で保存されている。XML 形式にはデータがその説明情報であるキーを持つため，異なるデータ構造が混在した場合でも柔軟なデータ処理が可能であることや，システム間のデータ交換も容易であるという利点があり，ECU でもこの利点を最大限に生かしたデータ処理システムを実装している。

一方，IoT データの保存形式としては XML 形式は冗長であることから，近年では XML の利点を残したまま構造が簡素化された JSON 形式でデータ交換，ならびにデータ蓄積する方式が標準となっており，openATOMS においても順次 JSON 形式でのデータ蓄積・交換への移行を進めている。

図 3　ECU

・ECU は、左から LTE ルータ，CPU，LoRa 無線通信モジュールで構成されている。
・無線通信モジュールは屋外の高所に設置し，10m の通信ケーブルで屋内に設置した CPU へ接続している。

3.3 高性能クラウドユニット(VCU)

1 台の ECU に 100 台程度の SU を無線接続可能な設計となっており，また，SU の数が 100 を超え

る場合は，ECU の増設で容易に規模拡大可能であるが，複数台の ECU を IP ネットワーク上で連係する方式では，それらを統合して仮想的に 1 台の ECU として扱うことはできないため，必要に応じて IoT 用途専用に設計した高性能クラウドユニット(以下，VCU と記す)を運用可能な設計としている。（本システムでは不使用）

ECU には，SU から無線受信したデータを内部ストレージに XML 形式で保存すると共に VCU へ MQTT プロトコルにて JSON 形式で送信する機能が搭載されており，数万台規模の SU を VCU で一元管理することも可能である。

VCU では JSON データを蓄積・処理することが多いため MongoDB[*3] を使用しており，大量の IoT データを安全に保管し，柔軟かつ高速な検索処理を可能としている。

IoT システムにおいて，集中型クラウドサービスの利用を妨げる要因として，前述のサービス期間の保証が得られないという問題があるが，VCU ではクラウドサービスを利用するのではなく，クラウドサービスを実行するクラウドサービス実行環境サービスを利用する。openATOMS では個々の IoT システム向けに構築した VCU パッケージを提供し，ユーザは ST クラウド[*4]，AWS[*5]，さくらのクラウド[*6]，などの好みのクラウドサービス実行環境サービス上で VCU パッケージを動作させることで，独自の集中型クラウドサービスを運用することができる。

小規模な監視システムを ECU ベースで構築し，複数の ECU を VCU で統合する設計の利点には，規模拡大の容易さに加えて，堅牢性の高さがある。VCU の運用はインターネットや LTE 回線に依存しており，その機能停止中は運用できないが，ECU 単位の監視システムはそれらに依存せず運用可能となっている。また ECU の消費電力は 10W 程度と小さく停電時のバッテリバックアップも容易である。

3.4 無線通信ネットワーク(RWN)

本システムの無線データ通信量はシステム全体で 12KB/日程度と非常に少ないため，無線通信技術として 3 ホップまでの無線中継機能を搭載した LoRa 技術を使用している。従来システムでは，400MHz 帯の特定省電力無線技術が使用されており，エリア内に無線中継設備を 4 カ所設置していたため，既存設備を流用して LoRa 無線中継装置を設置した。電源は既設の AC 電源と乾電池を利用した独自設計の無停電電源装置(バックアップ時間：100 時間)を組み合わせて構成しているが，無線中継装置の消費電力は 0.1W 程度と小さいため，商用電源が確保できない場合は名刺サイズの太陽電池と Li 蓄電池の組み合わせでも運用可能である。

LoRa 技術は従来技術に比べて無線通信性能が高く，無線中継装置を設置することなく ECU は全ての SU との無線通信が可能であったが，無線中継装置の運用開始後は 2～3 台の SU が 1 ホップの無線中継通信へ自動的に移行したことを確認している。

本システムの無線通信は各 SU から開始され，それには異常検知送信と 1 日分の計測データを加工して送信する日報通信の 2 種類がある。異常検知送信の頻度は非常に少なく，その送信タイミングには特別な調整は不要で，万一複数の SU からの送信タイミングが重なっても，LoRa 通信の CSMA および再送メカニズムが有効に機能し，通信不良は発生しない。

一方，日報送信では全 SU からのデータ送信が一斉に開始されるため，LoRa の基本機能だけでは対応できず，何らかの調整をしなければ，通信衝突による欠測が多発してしまう。

本システムでは，日報送信を毎日 00:00～01:00 の間に，各 SU からのデータ送信タイミングを 60 秒ずつずらすことで，通信衝突そのものが発生しない設計とし，これを実現するために，SU の内部時計は無線通信による時刻同期メカニズムにより日本標準時の±5 秒以内に維持している。

3.5 システム操作 WEB アプリ

ECU，VCU のどちらを使用する場合でも WEB アプリの構築スタイルは統一されており，JavaScript を駆使して構成した画面と ECU または VCU のデータ管理バックエンドが WEBAPI で動的にデータ通信する，操作性とリアルタイム性に優れた GUI を実現している。

WEBAPI では複雑なデータ処理メカニズムの構築が難しいため，アプリケーション毎に専用のデータ処理プロセッサ(ソフトウェア)を実装して ECU，VCU 上で動作させることが多い。

特に ECU では XML データを低速の microSD メモ

リに蓄積していることから，WEBAPI で要求される日報データや月報データをオンデマンドで生成すると WEB アプリの応答速度が著しく低下するため，データ処理プロセッサで定期的に参照用のデータを生成することで，高性能クラウドに劣らない軽快な操作性を実現している。

WEB アプリの機能の一部として搭載している現在状態マトリクス(図 4)，機場マップ(図 5)，日報トレンドグラフ(図 6)は，その直観的かつシンプルな設計と遅延の無い軽快な動作が発注元の自治体からも高く評価されている。

図 4　現在状態マトリクス画面

・全 60 機場の状態が一目で確認できるように工夫している。
・マトリクス表中の状態表示マークをマウスクリックすると，詳細なデータが下表に表示される。

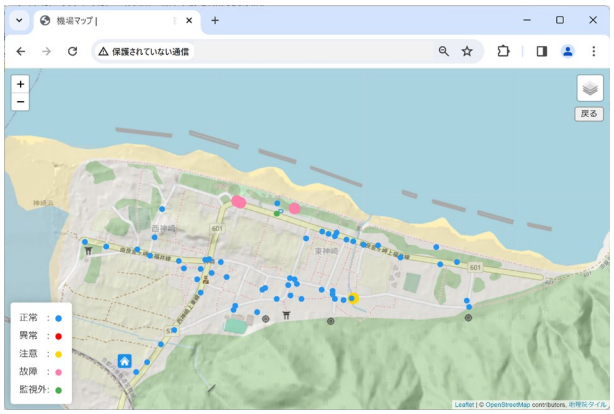


図 5　機場マップ画面

・地図上に状態表示することで，異常個所の発見が容易となっている。
・地図上の状態表示マークをマウスクリックすると，図 6 のトレンドグラフが表示される。

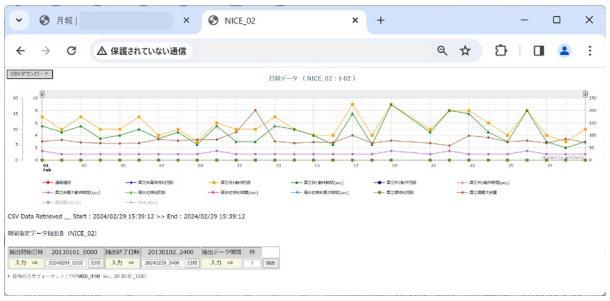


図 6　トレンドグラフ画面

・全データ蓄積期間(最長 20 年間)のデータを期間指定してトレンドグラフ表示し，CSV データとしてもダウンロードできる。

4.　システム運用実績と効果

システム設置から現在までの 3 カ月間の運用実績では，稀に日報通信が不良となり日報データが欠測となる問題を除くと，全て設計時の期待通りに機能している。(日報通信不良の原因については，現在調査中。)

これまでの所，監視対象である設備側には緊急対応が必要な大きなトラブルは発生していないものの，ECU に日々蓄積されるデータから，これまで見過ごされていた機器の不調が順次明らかとなり，都度，適切な対応がなされた結果，システム運用開始後に度々発生していた異常通報は徐々に減ってきている。

今後，AI 技術などの活用により，日々の収集データから重篤なトラブルに至る前の変調を自動検知できるようになれば，維持管理コストの低減にも繋がるものと期待される。

監視対象エリアは夏季の海水浴シーズンに汚水量が急増し，さまざまなトラブルの発生頻度が高くなるとのことで，これから本システムの実力が試されることになるが，本システムがトラブルの早期発見に役立ち，ひいてはトラブルの発生自体を未然に防ぐ強力な武器となれば幸いである。

［謝辞］

本システム開発の貴重な機会を頂いた自治体様，本システム更新工事の元請けとして，最大限の努力を行って頂いたM計器様，ならびに当社内関係各位に心より感謝し，本報告のまとめと致します。

［参考文献］

1）真空式下水道システム(機械設備・電気設備)修繕・更新の手引き，一般社団法人日本産業機会工業会真空式下水道システム委員会，2016.7

2）真空式下水道システム委員会「都道府県別全国採用実績 2020 年度実績」

＊1 Arduino

オープンソースハードウェアとして開発・普及しているマイコンボード。

ハードウェアだけでなく優れた統合開発環境(Arduino IDE)も無償利用可能である。

＊2 Leafony

小型・低消費電力を特長とするオープンソースのマイコンおよび周辺デバイスボード。

開発環境は Aruduino IDE などを使用する。

＊3 MongoDB

MongoDB Inc.が開発･配布しているドキュメントデータベース。IoT システムで扱われる JSON 形式のデータを高速かつ柔軟に蓄積・検索できる。

＊4 ST クラウド

株式会社 ST ネットが提供しているクラウドサーバーサービス。

＊5 AWS

Amazon Web Serivce, Inc.が提供しているクラウドサーバ―サービス。

＊6 さくらのクラウド

さくらインターネット株式会社が提供しているクラウドサーバ―サービス。

四国電力, 四国電力送配電, 四国総合研究所
研究期報120（2024年6月）21－26

超音波による原子炉配管水位高精度測定技術に関する研究

㈱四国総合研究所　産業応用技術部　岡部　克也

キーワード：　超音波測定
超音波水位計
加圧水型原子炉
原子炉一次冷却材系統
定期検査／定期事業者検査
カルマンフィルタ

Key Words：　Ultrasonic Measurement
Ultrasonic Water Level Gauge
Pressurized Water Reactor (PWR)
Reactor Coolant System (RCS)
Periodic Licensee's Inspection
Kalman Filter

Research on high-precision measurement of reactor piping water level using ultrasonic waves

Shikoku Research Institute, Inc., Industry Application Technology Department
Katsuya Okabe

Abstract

During periodic licensee's inspections of PWR plants, there is a period during which the reactor primary coolant is operated with the water level lowered to near the center of the reactor piping while the fuel is loaded (mid-loop operation). Shikoku Research Institute has developed an ultrasonic type "RCS nozzle center ultrasonic water level gauge" (hereinafter referred to as "ultrasonic water level gauge") to measure the water level in the reactor piping of Shikoku Electric Power's Ikata Unit 3, contributing to strengthening measures against loss of reactor core cooling function due to water level lowering during mid-loop operation.

Compared to conventional differential pressure and water column type water level gauges, ultrasonic water level gauges have advantages such as low influence of external pressure and high accuracy, etc. However, when the water level is low (less than 40 mm from the bottom of the reactor piping), the water level cannot be measured due to the influence of background noise peculiar to ultrasonic waves or a drop in ultrasonic signals caused by water surface shaking, etc. In such cases, the water level cannot be measured or an erroneous water level may be detected.

This paper reports on the results of introducing new signal processing and water level evaluation methods to improve the water level measurement accuracy of ultrasonic water level meters.

1. はじめに

PWR プラントの定期検査においては、燃料が装荷された状態で原子炉一次冷却材（RCS）の水位を原子炉配管中心付近まで下げて運転する期間がある（ミッドループ運転）。四国総合研究所では、四国電力伊方発電所第 3 号機の原子炉配管内の水位測定を目的とした超音波式の「RCS ノズルセンタ超音波水位計」（以下、超音波水位計）を開発し、従来の差圧式や水柱式の水位計に加え、水位の監視を 3 重化することで、ミッドループ運転時の水位低下による炉心冷却機能喪失対策の強化に貢献している。

超音波水位計は差圧式や水柱式の水位計と比較すると、外圧の影響が小さく高精度である等の利点がある一方、水位が低い（原子炉配管底部から 40mm 未満）場合には、超音波特有のバックグラウンドノイズの影響や水面の揺れによる超音波信号の低下等により、水位が測定できないことや、誤った水位を検出することがある。

本稿では、超音波水位計の水位測定精度の向上のため、新しい信号処理や水位評価手法を導入した成果について報告する。

2. 既設超音波水位計の水位測定技術

超音波水位計は、超音波パルスの伝搬時間が超音波経路の長さに比例するという性質を利用し、水面で反射される超音波経路の長さから水位の高さを求めるものである。図 1 は超音波水位計の超音波センサ取付位置と超音波経路を示したものである。超音波センサは原子炉配管の底面に固定されており、超音波センサから送信された超音波パルスは、原子炉配管材料（ステンレス鋳鋼）および一次冷却材（水）を伝搬し、水面からの反射により往復して戻ってくることで検出される。

図 2 は超音波水位計の超音波信号の検出例である。この信号には明瞭なピークが複数あり、等間隔に並んでいる。原点付近のもっとも大きなピークは、超音波センサから送信された超音波が直後に配管内面で反射されることで生じるもので、水位に関係なく常に同じ位置に存在する（第 0 反射波）。次のピークは、水面で反射して戻ってきた超音波信号である（第 1 反射波）。次のピーク以降（第 2 反射波、第 3 反射波、...）も、水面で反射した超音波がさらに配管内面で反射することにより、同じ経路を何度も往復することで生じるものである（多重反射波）。ここで、第n反射波の超音波伝搬時間をT_n $(n = 0,1,2,\ldots)$とすると、水位の高さH（原子炉配管底部を$H = 0$とする）によって以下のように表される。

$$T_n = \frac{2d}{c_l} + \frac{2nH}{c_w} \qquad (1)$$

ここで、c_lは鋼中（原子炉配管材料）の超音波伝搬速度、c_wは水中（一次冷却材）の超音波伝搬速度、dは原子炉配管の厚さである。

既設超音波水位計は、第 1 反射波T_1から水位を測定する（1 回反射法）。(1)式から水位の高さHは次式で与えられる。

$$H = \frac{c_w}{2}(T_1 - \Delta t) \qquad (2)$$

ここで$\Delta t = \frac{2d}{c_l}$は、超音波が 1 往復する間で原子炉配管材料を通過するのに要する時間である。

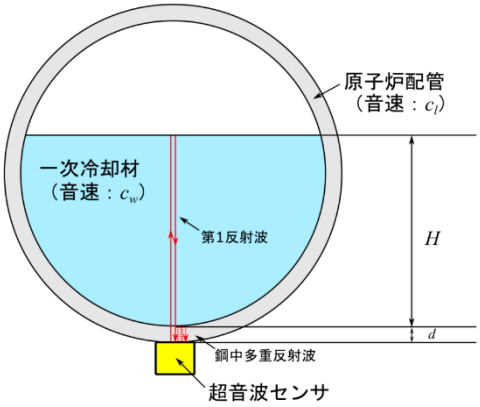


図 1　超音波センサ取付位置と超音波経路

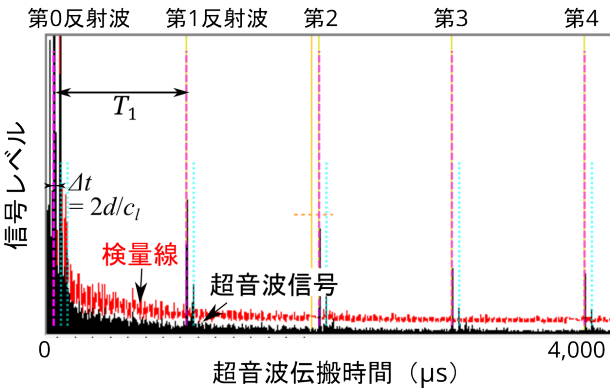


図 2　超音波信号の検出例（1 回反射法）

超音波信号のバックグラウンドノイズの大半は、ステンレス鋳鋼や超音波センサ内部で発生しており、一次冷却材の有無とはほとんど無関係である。超音波水位計ではしきい値となる検量線（図 2 の赤線）を設定し、検量線を超えない超音波波形をバックグラウンドノイズとして扱っている。検量線は、満水のときに取り込んだ超音波波形を元に作成されており、通常定期検査の都度更新している。

超音波水位計の基本仕様を表 1 に示す。超音波水位計では、ノズルセンタと呼ばれる原子炉配管の中心より50mm上方を基準とし、測定範囲内±250mm（$168\text{mm} \leq H \leq 668\text{mm}$)の水位が中央制御室に送られる。ただし、信頼性は低下するが、水位が原子炉配管内($0\text{mm} \leq H \leq 736\text{mm}$)であれば、測定範囲外であっても超音波水位計内部において水位測定が行われている。なお、原子炉配管と接する超音波センサや接触媒質には、300℃を超える運転中の原子炉配管温度に耐えられない高感度・高精度のものを使用しているため、超音波水位計は定期検査時専用の水位計である。

表 1　超音波水位計の基本仕様

基準水位	ノズルセンタ（$H^{※} = 418\text{mm}$）	
測定範囲	$\pm 250\text{mm}$（$168\text{mm} \leq H \leq 668\text{mm}$）	
表示範囲(下限)	-418mm（$H = 0\text{mm}$）	底部水位
表示範囲(上限)	$+318\text{mm}$（$H = 736\text{mm}$）	満水水位
測定精度	±1%F.S.	
超音波センサ	周波数 1MHz 使用可能温度 最大60℃	
系統	2 系統（B ループ、C ループ）	

※ H: 原子炉配管底部から水面までの高さ

3. 水位誤検出の要因

既設超音波水位計では、水位が-380mm（$H = 38\text{mm}$)以下に下がると、実水位より高い水位を測定することがある。この水位自体は測定範囲外であるが、誤検出した水位が-250mmを超えて測定範囲に入る場合もあるため、誤差を抑えるとともに誤検出頻度を低減するような対策が必要とされる。

水位を誤検出する要因を突き止めるため、-380mm以下に水位が下がったときの超音波信号の変化を追跡したところ、図 3 に示すように、多重反射を 5～6 回繰り返した後にピークが高くなる場合があることが分かった。このとき、第 1 反射波が検量線を超えていないにもかかわらず、第 5 反射波や第 6 反射波が検量線を超えた結果、実水位より高い水位を測定したと考えられる。

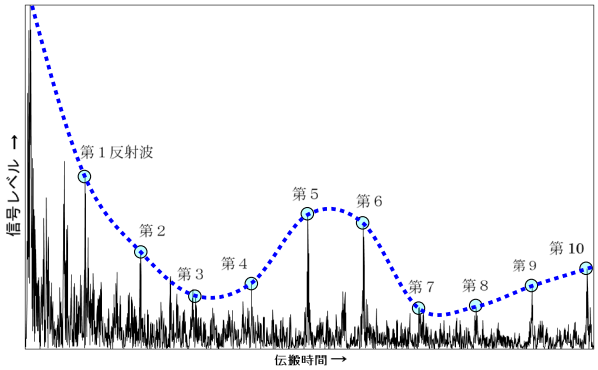


図 3　水位−380mm以下の超音波信号例

4. 高精度水位測定技術の検討

低水位における水位測定精度の向上のため、次の 3 つの方法を検討した。

- (多重反射法) 多重反射波を利用する。
- (動的検量線) 検量線を可能な限り低く設定し、多重反射波の検出感度を上げる。
- (水位評価手法の最適化) 至近の水位変化から現在の水位を予測し、水位の推定に利用する。

以下に、それぞれの方法について説明する。

4.1 多重反射法

多重反射法は、多重反射波の間隔$\Delta T = T_{n+1} - T_n$から水位を求める方法である (図 4)。(1)式によると多重反射波の間隔は全て同じであり、水位の高さは次式で表される。

$$H = \frac{c_w}{2}\Delta T \qquad (3)$$

$n = 1$の場合、$T_0 = \Delta t$とすれば(3)式は(2)式と同じになる。この関係によって、1 回反射法を多重反射法に統合することが可能となる。

検出できない多重反射波が存在すると、測定水位の高さが実水位の 2 倍以上になる恐れがあるが、多数の多重反射波が検出できれば、最頻値を使用することでその危険性を低減することが可能である。

図 4 の超音波波形をよく観察すると、水面から

の多重反射波（水中多重反射波）のすぐ後にもピークが存在することが分かる。これは原子炉配管材料の中で発生した多重反射によるものであり（鋼中多重反射波（図 1 参照））、このピークが検出されることによりΔTが過小評価される恐れがある。鋼中多重反射波の間隔は、水位によらず常に$\Delta t = \frac{2d}{c_l}$であり、原子炉配管に使われるステンレス鋳鋼では、水に比べて超音波の減衰が著しいため、2～3 回往復するとほぼ消滅する。この特徴を利用して、以下のようなしきい値を設ける。

a. しきい値の位置は、直前に検出した多重反射波位置のΔt後方とする。Δtの誤差を考慮して、しきい値は幅を持たせる（$\pm 4\mu s$程度）。

b. しきい値の高さは、直前に検出した多重反射波の 0.7 倍とする。

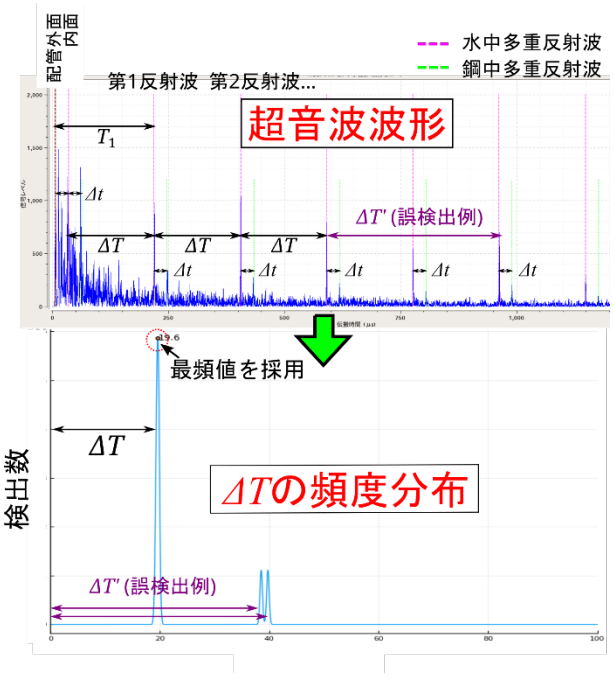


図 4　多重反射法の概要

4.2 動的検量線

検量線を下げることで多重反射波の検出感度は向上するが、バックグラウンドノイズを誤検出する可能性も高くなる。また、バックグラウンドノイズや多重反射波のピークは常時変動するため、最適な検量線は時間とともに変化すると考えられる。

そこで、バックグラウンド波形（超音波波形のバックグラウンドノイズ成分）を推定し、それを元に検量線を更新する方法（動的検量線）を検討した。動的検量線の更新手順は以下の通りである（図 5）。

a. 一定サイクルで超音波水位計に取り込まれる超音波波形を時系列データとして扱う。時系列データは「時刻」パラメータ$1,2,\ldots,t$のように時系列順にラベリングする。

b. 時刻$t-1$のバックグラウンド波形と時刻tの超音波波形をカルマンフィルタにより合成し、時刻tのバックグラウンド波形とする。最初（時刻 0）のバックグラウンド波形は、満水のときに取り込んだ超音波波形を元に作成しておく（既設超音波水位計と同様）。ここで、カルマンフィルタは観測値の尤もらしさ（バックグラウンドらしさ）が合成結果に反映されるように設計されているため、第 1 反射波以降の多重反射波（バックグラウンドでない波形）は合成結果からほぼ排除される。

c. バックグラウンド波形のβ倍に標準偏差のγ倍を加算したものを時刻tの動的検量線とする（標準偏差は過去 100 個分の超音波波形の平均に対する偏差として導出）。ここで、定数β、γは過去の定期検査において採取した超音波信号を元に最適化した結果、$\beta = 1.2$、$\gamma = 3$とした。

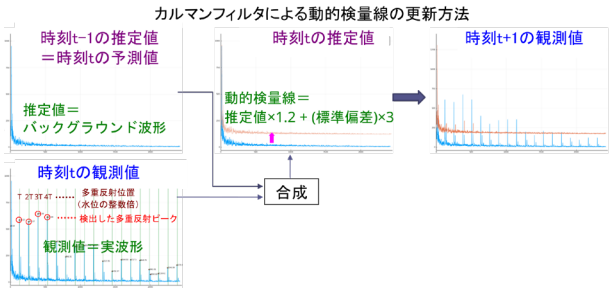


図 5　動的検量線の更新方法

b のカルマンフィルタとは、刻々と変化する量 A の観測値から、A の変化を予測するとともに、観測値と予測値を合成することで、観測値よりも高精度な推定を可能とするデータ処理方法である。代表的な適用例としてカーナビの現在位置推定技術やロケットの位置制御技術などがある。カルマンフィルタは、予測・推定に必要な情報を状態変数（ベクトル量とその共分散行列のセット）として

保持しており、以下の 4 つのプロセスを 1 サイクルとして繰り返し実行することにより随時更新される。

観測：一定サイクルで変量 A の観測値を取得。

予測：前回の推定値から現在値を予測（開始時は前回データが無いため別途初期値が必要）。予測は予め仮定した時間変化モデルに従って遂行される。

合成：観測値と予測値を入力としてカルマンフィルタの状態変数を更新。

推定：カルマンフィルタにより変量 A の現在値を推定。

ここでは、変量 A はバックグラウンド波形、観測値は超音波波形であり、時間変化モデルはランダムウォークを仮定する。ランダムウォーク（別名酔歩）はブラウン運動の数学モデルである。

4.3 水位評価手法の最適化

原子炉水位の変化は概ね滑らかであるため、水位に対してカルマンフィルタを適用することにより、測定水位の時系列データから現在水位の予測・推定が可能である。また、多重反射波を検出する際に、予測水位から大きく外れた超音波信号を誤検出として扱うことで、水位の誤検出頻度を低減することが可能である。

図 6 にカルマンフィルタによる水位予測・推定手順を示す。ここでは、変量 A は水位、観測値は多重反射法によって検出した水位（観測水位）である。時間変化モデルには図 7 のように水位の変化速度が一定比率α（減速係数）で低下するようなモデルを利用する。このモデルは、長期間水位が検出できなかった場合に、予測水位が最後に検出した水位から大きく乖離することを防止するのに有用である。減速係数は、過去の定期検査の水位データを元に最適化した結果、$\alpha = 0.7$とした。

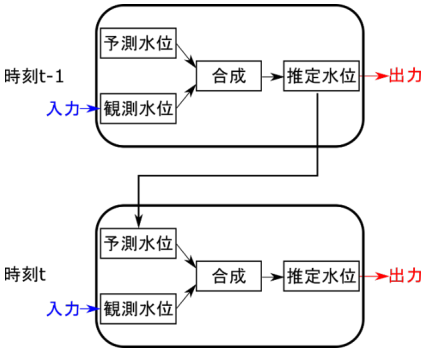
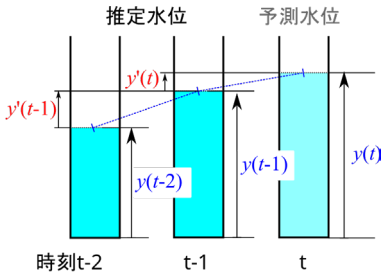


図 6　水位予測・推定手順



$y(t) = y(t\text{-}1) + y'(t)$
$y'(t) = \alpha\, y'(t\text{-}1)$ $(0 \leqq \alpha \leqq 1)$

(α: 減速係数)

図 7　水位予測・推定の時間変化モデル

5. 高精度水位測定技術の検証

5.1 模擬原子炉配管と過去データによる検証実験

高精度水位測定技術（以下同技術）の検証のため、既設超音波水位計と同型の予備超音波水位計を元にした同技術の実証機を用意し、原子炉配管を模擬した実物大カットモデルを使って、全ブロー（H = 0mm）から満水（H = 736mm）まで注水または満水から全ブローまで排水したときの水位を測定した。測定結果を図 8、図 9 に示す。いずれの場合も測定値のばらつきは見られず、満水から全ブロー（全ブローから満水）まで正確に水位が測定できていることが確認できた。

次に、第 15 回定期検査（2019 年 12 月～2021 年 12 月）で採取した過去の超音波信号データを使って実機における水位測定を模擬し、定期検査時の水位測定結果と比較した。その結果、−380mm以下に水位が下がったときの測定水位の変動が大幅に少なくなっており、同技術が水位の誤検出頻度の低減に有効であることが確認できた。

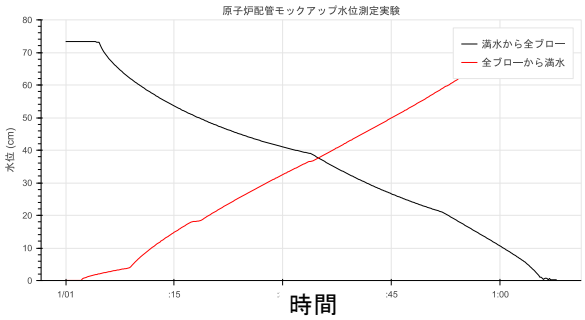


図 8　模擬原子炉配管の水位測定結果

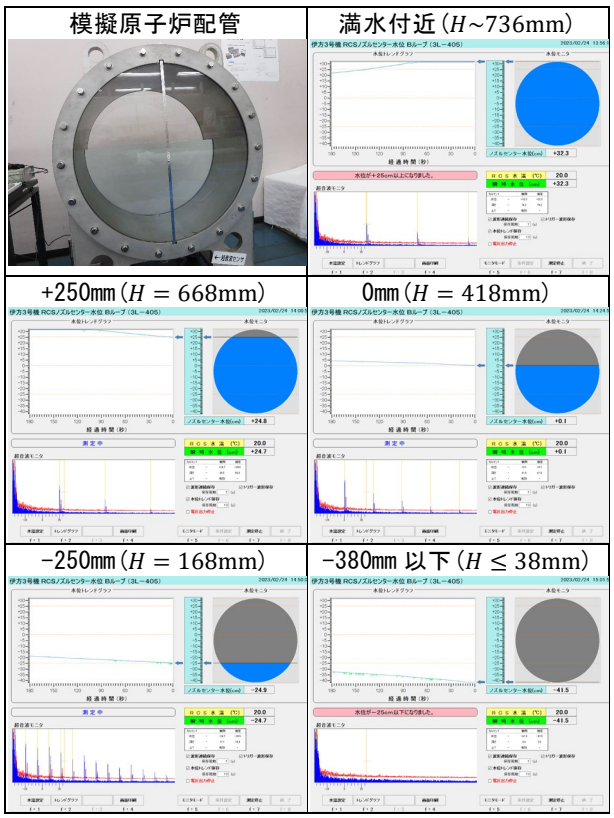


図 9　模擬原子炉配管と水位測定画面

5.2　第 16 回定期検査での検証実験

同技術の実機適用性の検証のため、第 16 回定期検査（2023 年 2 月～2023 年 5 月）において、既設超音波水位計で受信する超音波信号を分岐する方法により、既設超音波水位計と実証機で同時に水位測定を実施した。その結果、既設超音波水位計と比較して実証機の−380mm以下の誤検出がほとんど無くなっており、同技術が実機でも有効であることが確認できた。また、満水付近においてバックグラウンドノイズの変動が原因とみられる測定水位の変動が既設超音波水位計のみで発生しており、実証機において、低水位に限らず動的検量線が有効に働いたことが確認できた。

6. まとめ

本稿では、伊方発電所第 3 号機の RCS ノズルセンタ超音波水位計の高精度水位測定技術に関する研究成果を紹介した。同技術は、水位が−380mm以下に下がったときの誤検出頻度を低減し、バックグラウンドノイズの変動によらず安定した水位測定が可能となる効果などが期待できる。

今後、同技術の実機適用に向け、超音波水位計のソフトウェアの更新が計画されている。

[謝辞]

本研究は、四国電力㈱原子力本部殿より委託を受け実施したもので、ご協力いただいた関係各位に深く感謝いたします。

[参考文献]

1)　（一社）日本非破壊検査協会編：「超音波探傷試験Ⅱ」，（一社）日本非破壊検査協会，p.4-42.

2)　P.J. ブロックウェル，R.A. デービス：「入門時系列解析と予測」，　逸見功訳，シーエーピー出版，p.257-313.

四国電力, 四国電力送配電, 四国総合研究所
研究期報120（2024年6月）27－34

収穫後のメロンの品質に及ぼす近赤外光照射の影響

㈱四国総合研究所 化学バイオ技術部　　秦　亜矢子
㈱四国総合研究所 化学バイオ技術部　　垣渕　和正

キーワード：　青果物
鮮度保持
近赤外光
照射
メロン
カビ

Key Words：　Fruits and vegetables
Freshness retention
Near infrared light
Irradiation
Melon
Mold

Effect of near infrared light exposure after harvest on appearance in Melon

Shikoku Research Institute, Inc., Chemical Technology and Biotechnology Department
Ayako Hada, Kazumasa Kakibuchi

Abstract

The freshness preservation effect of irradiating and transporting two varieties of melons, "Yuka" and "Takami," produced in Aomori Prefecture, after harvest, was verified. The results showed that near-infrared light irradiation was effective in reducing damage during transportation by maintaining high fruit hardness at the time of arrival and inhibiting the progression of waterlogging and mold in both varieties, as well as inhibiting aging and yellowing of the rind during storage. The use of this technology is expected to be effective in the future, as there are concerns about delays and stagnation in transportation due to the “2024 logistics problem”.

1. はじめに

これまでの研究で、850nm を中心波長とする近赤外光は収穫後の青果物に短時間照射することで、その後のしおれや腐敗、変色を防ぐことが分っており[1)2)3)4)]、この技術を「iR フレッシュ®」と名付けた。主に全国のミカンの選果場での導入が進んでおり[5)6)7)]、トマト[8)9)]、イチゴ[10)]、ブドウ[11)]、ナス[12)]、ショウガ、キュウリなど様々な青果物において収穫後の青果物の鮮度を維持する効果があることを確認し、選果場や集出荷場、植物工場など栽培施設での導入が進んでいる。近赤外光照射の効果の１つに輸送中の衝撃による果実の傷みを軽減するものがある。「物流の 2024 年度問題[注 1)]」では、物流業界が大きく変わることで輸送の遅れが生じるため、冷蔵やフィルム包装などの既存の技術に加え鮮度をより長く維持できる技術の導入が望まれる。特に大消費地から遠いところで収穫される青果物は輸送に時間がかかる。高級果実では輸送中の傷みがクレームとなると同時にブランド価値を著しく低下させる。

「メロン」は高級果実として知られており、静岡県の「クラウンメロン」や茨城県の「アールスメロン」がトップブランドを誇っている。青森県つがる市および五所川原市では、メロンの特産化に力を入れており、地元の農業関係者からのブランド力強化のために iR フレッシュ®の効果を評価したいとのニーズが、四国電力㈱再生可能エネルギー部様を通して寄せられた。そこで、青森県産のメロン「優香」と「タカミ」について近赤外光照射し、輸送後の果実品質へ及ぼす影響について調査した。

注 1) トラックドライバーの時間外労働時間の上限が年間 960 時間に制限されることにより「ものが運べなくなる」「物が作れなくなる」といった諸問題が発生すること。

2. 材料および方法

青森県内で栽培された「優香」と「タカミ」の 2 品種を使用した。「優香」は、熟すと表皮が緑色から黄色に変わり芳醇で優しい香りが魅力的な品種であり、糖度など一定の基準を満たしたものは「アムさんメロン」と呼ばれ高値で取引されている。一方、「タカミ」は甘みの強い果汁を多く含み黄緑色のきれいな果肉と香りも良い品種として知られている。特に青森県産のタカミメロンは出荷が 6 月～8 月と流通期間が長く、静岡県や茨城県等の主力産地のメロンが品薄となる 8 月の盆需要に重宝されている。前者は完熟状態で後者は完熟前に収穫される。近赤外光照射は、「優香」は 6 月 7 日に「タカミ」は 7 月 24 日に行った。「優香」は選別作業場で、「タカミ」は JA の選果ラインで糖度および熟度を測定した後に、ハンディタイプの小型照射装置（照射面のサイズ：縦 8.5cm、横 13.2cm）を用いて果実の上部に 300W/m^2 で 1 秒間照射した。照射後、段ボール箱で梱包し、「優香」は宅配便で㈱四国総合研究所（高松市）まで冷蔵輸送した。「タカミ」は専用便で大阪中央卸売市場へ常温輸送し、その後は自家用車で㈱四国総合研究所（高松市）まで搬送した（写真 1）。保管は 25℃に温度調節した室内にて行った。調査項目は、「優香」は糖度、酸度、果実硬度、果皮の変色、へた周りの水浸状化を調査し、「タカミ」は糖度、酸度、果実硬度、へたの変色、へたの白カビ、電解質漏出割合、果皮の黄化およびカビを調査し、着荷日と数日ごとに照射 2 週間後まで行った。

写真 1　小型照射装置

2.1 糖度、酸度、果実硬度

メロン果実は果頂部から花痕部までを縦に 4 等分し対角線上の果肉を搾汁したものを使用した。糖度はデジタル糖度計（PR101α、㈱アタゴ）を使用して可溶性固形分（Brix）を測定し、酸度はクエン酸濃度として求めた。果実硬度はへた部より縦に輪切りにしたメロンの赤道部の果皮と種子部

の中心部を直径 1cm の円錐形のプランジャーを用いて果実硬度計（KM-1、㈱藤原製作所）を使用して 1 個体当たり 2 カ所を測定した。

2.2 外観調査

「優香」の果皮の変色、へた周りの水浸状化は、程度に応じて点数評価（0：なし、1：少程度、2：中程度、3：顕著）した。「タカミ」のへたの変色、へたの白カビ、果皮のカビ発生は程度に応じて点数評価(0:なし、1:1/3 未満、2:1/3 以上 1/2 未満、3:1/2 以上全体未満、4:全体）した。

2.3 電解質漏出割合

メロン果実の電解質漏出割合[注 2)]の測定は前澤・秋元の方法[13)]に準じて行った。すなわち、果実の赤道部の果肉を 15mm の厚さに輪切りにし中心部の果肉組織を 10mmφのコルクボーラーでくり抜き、蒸留水 20ml 中に浸漬した。20℃で 3 時間静置後、果実片の入った溶液の電気伝導度を簡易型 EC メーター（EC-33B、㈱堀場製作所）を用いて測定し、A 値とした。次に,ブレンダーで 1 分間粉砕してその溶液の電気伝導度を B 値とし、(A/B)×100 を電解質漏出割合とした。実験には 5 果実供試し平均値を算出した。

注 2) 細胞壁や細胞膜から漏れ出した細胞内部の電解質の割合。老化や傷害を受けると電解質の漏出が多くなる。イチゴの損傷程度やキュウリの低温障害による損傷程度を示す値として用いられている[13)]

2.4 果皮の黄化率の測定

メロン果皮の黄化は画像解析により行った。熟度は低いほど果皮の黄化が進むため、初期熟度[注 3)]は 34～35 程度の熟度の低い個体を使用し、画像解析ソフト「Image J」を使用して黄色を抽出した。

注 3) 数値が小さいほど未熟な果実を示す。

3. 結果及び考察

3.1 優香

着荷時のメロン果実の様子を写真 2 に示した。青果物輸送中の振動や衝撃による損傷はイチゴやモモ、リンゴなどについて調べられている[14)]。これまでの調査で、イチゴを四国地域から関東方面に輸送した場合、平均 15G の衝撃が 8 回程度かかることが分っている[10)]。着荷時の果実硬度および内部品質を調査した結果、照射した果実は無照射と比べて果実硬度を維持しており花痕部の果肉のつぶれや果肉の水浸状化を抑制していることが分った（写真 3)。「優香」は完熟収穫されるため果肉が柔らかく、追熟して食べごろを迎えるメロンと比べて黄化が進みやすい。また、過熟になると果皮の変色が進行する他、へた落ちしてその部分が黒く変色し、その後へた部の周辺が水浸状化しカビが発生する。照射は着荷直後の果実硬度を高く維持した（図 1)。果実が柔らかく傷みやすいイチゴやモモの試験でも同様に輸送前に近赤外光照射することで果実硬度を維持でき、その後の傷みを軽減する効果があることが分っている[15)]ことから完熟メロンでも同様の効果があると考えられた。照射 8 日後における外観調査ではへた部のカビの発生には差はなかったものの、近赤外光照射は果皮の変色をやや抑制し、へた部周辺の水浸状化を顕著に抑制した（表 1、写真 4)。へた部分の水浸状化は放置するとカビが発生する。なお、近赤外光照射は、温州ミカンを対象とした遺伝子解析においてフェニルアラニンアンモニアリアーゼ(PAL)やキチナーゼ 感染特異的タンパク質（PR タンパク質）遺伝子などの病害抵抗性遺伝子の発現量が増加し果皮のカビ発生が抑制されることが分かっており[16)17)]、病原菌を使用した接種試験による共腐れの試験では、接種部の水浸状化の進行は無照射と比較して遅く、カビの胞子の発生も遅れることが確認されている。これらのことから、メロンにおいても同様の現象が起こっている可能性が高いと考えられた。一方、近赤外光照射は、果汁の糖度およびクエン酸濃度には影響を及ぼさなかった。

無照射　　近赤外光照射

写真 2　着荷時のメロンの様子（優香）

無照射

近赤外光照射

写真 3　水浸状化に及ぼす近赤外光照射の影響
（青色の円は水浸状化の様子、優香）

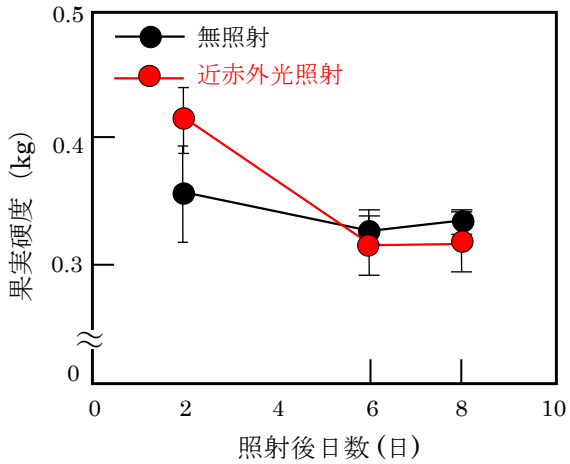


図 1　果実硬度に及ぼす近赤外光照射の影響
赤道部を果実硬度計で 2 か所測定した。
縦棒は標準誤差（n=3～4）

表 1　外観に及ぼす近赤外光照射の影響

照射 8 日後	果皮の変色	へた周りの水浸状化
無照射	2.3	2.3
照射	1.3	0.8*

*は、無照射と比較して 5%水準で有意差あり（t 検定、n=3～4）

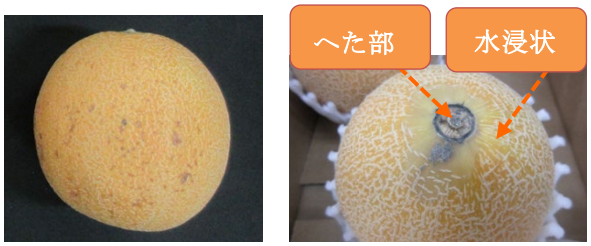


写真 4　果皮が変色した個体（左）およびへた周りが水浸状化した個体（右）

3.2　タカミ

着荷時の果実の様子を写真 5 に示した。着荷時の状態から「優香」と同様に輸送中の振動によりメロンが回転したことが窺えた。果実硬度は、近赤外光を照射した果実で高く、着荷時から照射 15 日後まで硬度を高く維持した（図 2）。「タカミ」は果実に貼付してある識別番号から選果時の糖度や熟度が追跡できるため、個体ごとの糖度差を算出した。その結果、無照射の果実は糖度が急激に低下したのに対して、近赤外光を照射した果実は照射 8 日後においても糖度を高く維持していた（図 3）。酸度には照射の有無による差はみられなかった。近赤外光照射による収穫後の糖度の維持はモモやミカンでも確認されている[15]。へた部の変色およびカビの点数評価では、照射したメロン果実は無照射と比較してへた部の変色が少なく、白カビの発生も抑制された（図 4、図 5、写真 6）。果肉の電解質漏出量を測定した結果、照射したメロンは漏出割合が少なく無照射と比較して傷みや老化が少ないことが分った（図 6）。照射 8 日後の果実の上面と下面の黄化割合を画像解析した結果、無照射では上面が 10.7%であり下面が 42.8%と下面の黄化の進行が速いことが分った。これに対し、近赤外光を照射した果実は、上面が 0.6%と下面が 5.0%であり、全体では無照射のメロンに対し果皮の黄化を 18.6%抑制した（写真 7、図 7）。選果時に熟度が高かった果実について照射 15 日後の様子を写真 8 に示した。無照射のメロンは照射 8 日後より果実全体に白カビが発生し始め、15 日後には顕著に表れたが、照射したメロンは白カビの発生はほとんどなかった（図 8）。

写真５　着荷時のメロンの様子（タカミ）

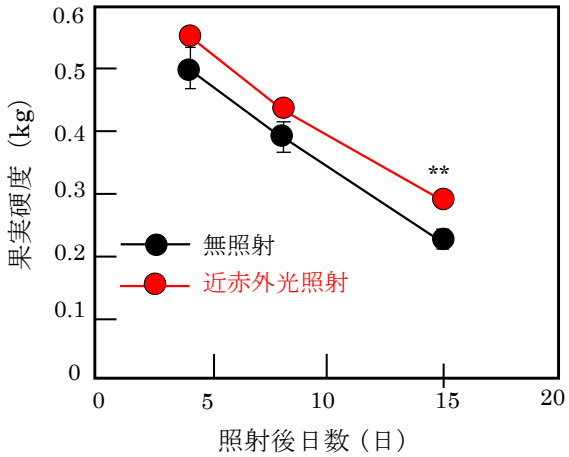


図２　果実硬度に及ぼす近赤外光照射の影響
**は、無照射に対し 1%水準で有意差あり。縦棒は標準誤差（n=10～20）

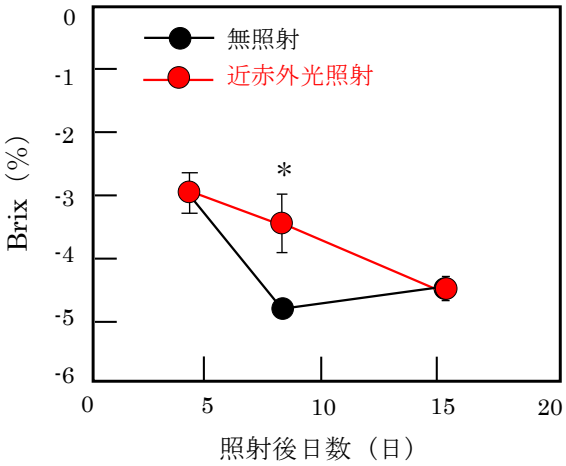


図３　果実糖度に及ぼす近赤外光照射の影響
*は、無照射に対し 5%水準で有意差あり。縦棒は標準誤差（n=4～9）

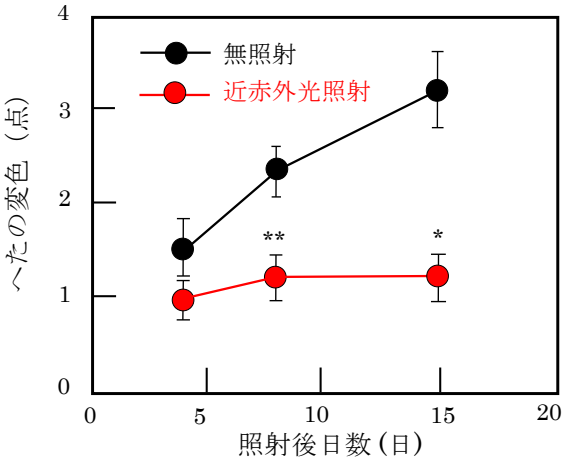


図４　へたの変色に及ぼす近赤外光照射の影響
**、*は、無照射に対し 1%と 5%水準で有意差あり。縦棒は標準誤差（n=10～20）

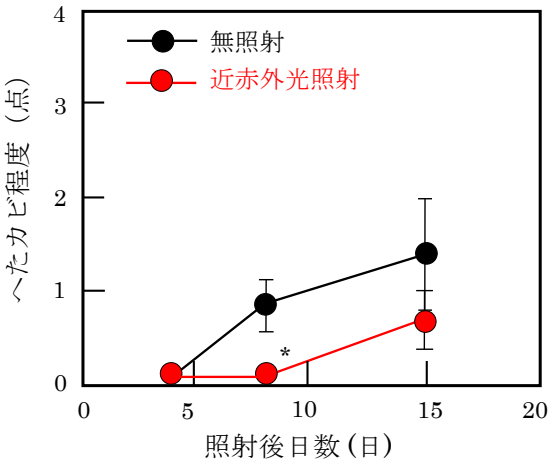


図５　へたの白カビに及ぼす近赤外光照射の影響
*は、無照射に対し 5%水準で有意差あり。縦棒は標準誤差（n=10～20）

写真６　へたが変色した個体（左）およびへた部に白カビがはえた個体（右）

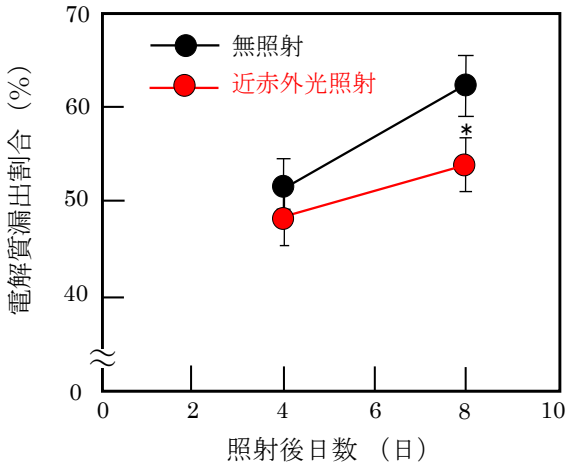
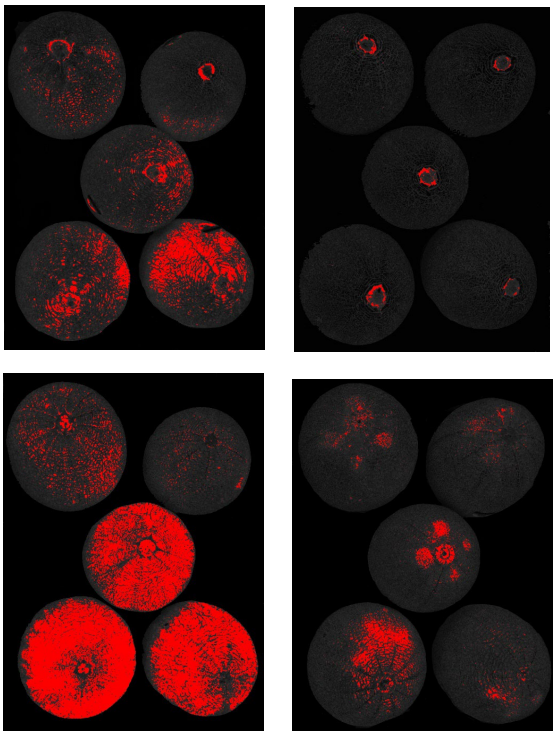


図 6　電解質漏出割合に及ぼす近赤外光照射の影響

*は、無照射に対し 5%水準で有意差あり。縦棒は標準誤差（n=5）



無照射　　近赤外光照射

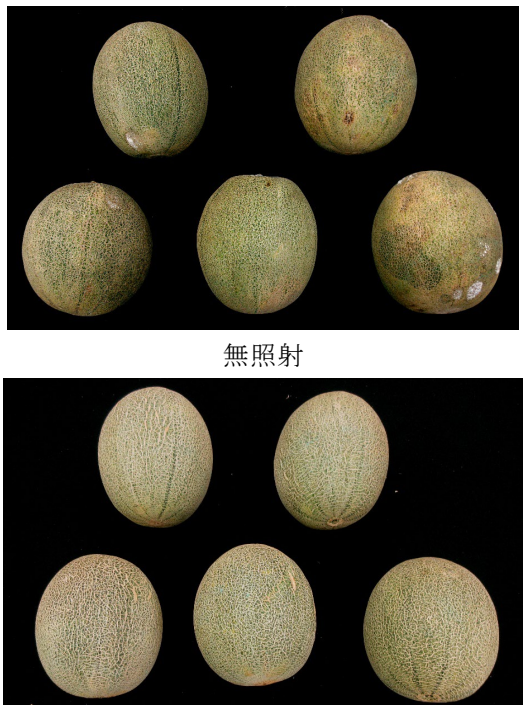
図 7　果皮の黄化に及ぼす近赤外光照射の影響

画像解析ソフト「imageJ」により黄色を抽出した。

無照射　　近赤外光照射

写真 7　果皮の黄化に及ぼす近赤外光照射の影響

（初期熟度：無照射：34.4、照射、：35.1）



無照射

近赤外光照射

写真 8　果皮のカビの発生に及ぼす近赤外光照射の影響

（照射 15 日後、初期熟度：50 台のメロンを使用）

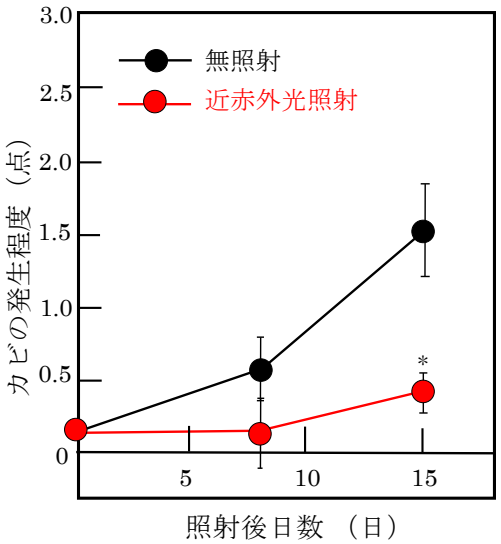


図 8　果皮のカビ発生に及ぼす近赤外光照射の影響

*は、無照射に対し 5%水準で有意差あり。縦棒は標準誤差（n=10～15）

4. まとめ

近赤外光照射を利用した鮮度保持技術「iR フレッシュ®」は、これまでに様々な青果物においてしおれやカビ・腐敗などの抑制効果があることが分っている他、輸送中の衝撃による傷みの軽減効果があることが分っている。本研究では、収穫後の青森県産メロン「優香」「タカミ」の 2 品種について照射後輸送し鮮度保持効果について検証した。その結果、輸送中の傷みを軽減する効果があることが分った他、貯蔵中の老化や果皮の黄化を抑制できることが明らかになった。「物流の 2024 年度問題」による輸送の遅れや停滞が懸念される中、今後この技術の活用は有効であると考えられる。なお、青森県の JA ごしょつがる様ではこの試験結果を受け、2024 年 7 月に選果ラインに鮮度保持用近赤外光照射装置（商品名「Fkeep®」三井金属計測機工㈱製）を導入する予定である。

[謝辞]

本研究は、四国電力㈱新規事業部様より委託を受け実施した。また、青森県での農業関係者との調整および照射や輸送試験では四国電力㈱再生可能エネルギー部様にご尽力頂いた。ご協力いただいた関係各位に深く感謝いたします。

[参考文献]

1）Hada-Kozuki, A.et.al.「Effect of postharvest short-term radiation of near infrared light on transpiration of lettuce leaf」Postharvest Biol. Technol.108:78-85 (2015)
2）髙附（秦）亜矢子ら：「近赤外光照射が収穫後のレタスの蒸散に及ぼす影響」, 園学研,11（別 2），305（2012）
3）髙附（秦）亜矢子ら：「収穫後の近赤外光照射が数種野菜の蒸散、気孔開閉および活性酸素生成に及ぼす影響」, 園学研,15（別 2），305（2016）
4）Hada A. “iR Fresh TM”, a technology for maintaining freshness of fruits and vegetables after harvest by irradiating with Near-Infrared Light. OPTICS & PHOTONICS International Congress(OPIC).Invited.(2024)
5）農業技術体系，果樹編，370（5）27
6）垣渕和正ら:「数種柑橘類果実の収穫後における腐敗果発生と果皮色に及ぼす近赤外光照射の影響」日本生物環境工学会,40-41（2017）
7）垣渕和正ら:「選果時の近赤外光照射がウンシュウミカンの果実品質に及ぼす影響」園学研,17（別 2），338（2018）
8）印南亨哉．:「近赤外光処理による鮮度保持技術「iR フレッシュ」，ホクレン「アグリポート」vol.28,（2020）
9）Hada A.et.al. The 4th Asian Horticultural Congress(AHC). Effect of near-infrared light irradiation on growth and fruit quality of cherry tomatoes under cultivation. (2023).
10）秦亜矢子ら：「収穫後の近赤外光照射がイチゴの果実品質に及ぼす影響」，園学研,20（別 2），203（2021）
11）山陽新聞．「ピオーネの鮮度保持　JA 晴れの国岡山　新見 2 選果場」．（2023）
12）高知県農業技術センターニュース「収穫後の近赤外光照射がナス果実の品質に及ぼす影響」第 84 号（2016）
13）前澤重禮・秋元浩一：「キュウリ果実の電気伝導度と低温障害の関係」, 農業施設 27 巻 3 号，12，149-154（1996）
14）多々良，泉ら：「輸送過程で発生する振動がイ

チゴの輸送過程で発生する振動がイチゴの呼吸速度および品質に及ぼす影響」日食保存誌，25，1，15-20（1999）
15）秦亜矢子ら：「近赤外光照射がモモ‘清水白桃’の果実品質およびホモプシス腐敗病に及ぼす影響」，園学研, 23（別 1），210（2024）
16）秦亜矢子ら：「近赤外光照射がレタス幼苗の PAL と抗酸化活性に及ぼす影響」，園学研,18（別 1），192（2018）
17）秦亜矢子ら：「近赤外光照射がウンシュウミカンの PAL と抗酸化活性に及ぼす影響」，園学研,18（別 2），279（2019）

最後に執筆者、編集ならびに審査にあたられた方々のご協力に対して厚くお礼申し上げます。

研 究 期 報　第 120 号　（無断転載を禁ず）

編集兼発行人　塚　本　正　敏
㈱四国総合研究所

発　　行　㈱四国総合研究所
〒761-0192
香川県高松市屋島西町 2109 番地 8
ＴＥＬ（087）843－8111
E-mail　jigyo_kanri@ssken.co.jp