

研 究 期 報

No. 107

平成 29 年 12 月

四 国 電 力 株 式 会 社
株 式 会 社 四 国 総 合 研 究 所

研究期報 107号 目次

フライアッシュコンクリートの耐久性評価に関する研究.....	1
Study on Durability Evaluation of Concrete Using Fly Ash	
レーザーラマン分光法による小型光学式マルチガスセンサの開発.....	11
Development of a compact optical multi-gas sensor by laser Raman spectroscopy	
レーザー吸収分光方式による可搬型 NH ₃ 濃度測定装置の開発.....	19
Development of a Portable NH ₃ Analyzer Based on Laser Absorption Spectroscopy	
次世代 openATOMS (openATOMS FG) の開発について.....	29
Development of the openATOMS Future Generation	
水力発電所配電盤における耐電圧値引き下げに関する研究.....	35
Study of reduction in withstand voltage values of switchboards in hydroelectric power stations	

フライアッシュコンクリートの耐久性評価に関する研究

目 的

公共工事で幅広く使用されている高炉セメントを使用したコンクリートにFAを混和した場合の耐塩害性に関する定量的な評価事例は殆どないのが現状である。このため、高炉セメントを使用したコンクリートにFAを混和した場合の耐塩害性に関する優位性を実験的に確認することにより、港湾構造物等に使用される可能性が高くなり、FAの更なる有効利用拡大を図ることができる。

主な成果

1. コンクリート組織の緻密化

コンクリートのモルタル試料の細孔径分布から、材齢の経過とともに、ピークとなる細孔径は小径側にシフトし、コンクリート内部の組織が緻密になることが確認された。示差熱重量分析試験からは、FAを混和したコンクリートでは、FA無混和に比べて、FAによるポゾラン反応が起きており、材齢28日以降の長期強度が増進することが確認された。

2. 塩化物イオンの浸透抵抗性の評価

屋外暴露試験からは、高炉セメントを使用したコンクリートにFAを混和した場合、普通ポルトランドセメントを使用したものよりも塩化物イオンの浸透抵抗性が高くなり、Ⅱ種外割、Ⅳ種外割の配合では、FA無混和よりも塩化物イオンの浸透抵抗性が高くなることが確認された。

浸漬試験の結果得られた塩化物イオンの浸透抵抗性は、屋外暴露試験とほぼ同じ傾向になることを確認した。

3. FAコンクリートの耐久性評価

港湾構造物にFAコンクリートを適用する場合の耐久性評価を行った。耐久性評価からは、FA無混和に比べて、FAを混和した配合の方が耐塩害性が向上し、Ⅱ種内割、Ⅳ種外割、Ⅱ種外割となるにしたがい、耐塩害性が高くなることを確認した。

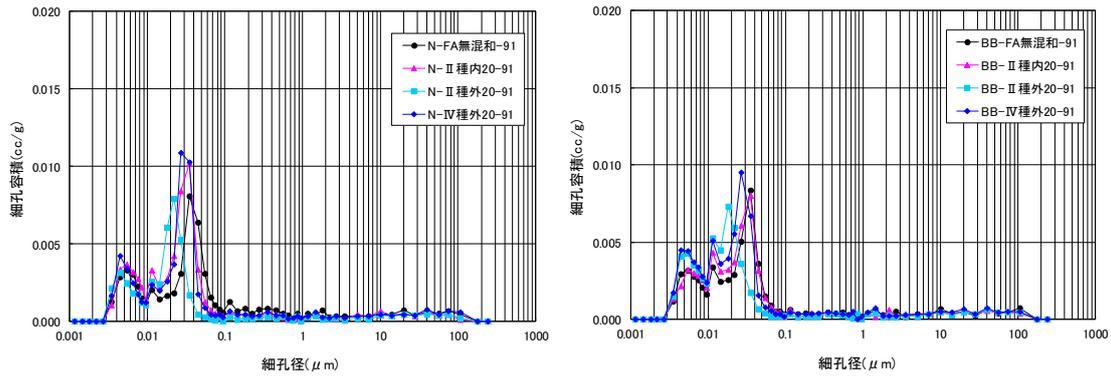


図-1 細孔径分布測定結果(材齢 91 日)

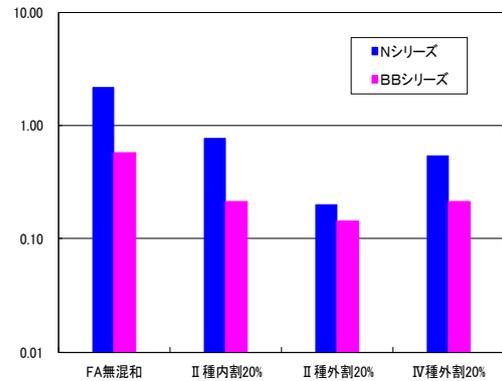
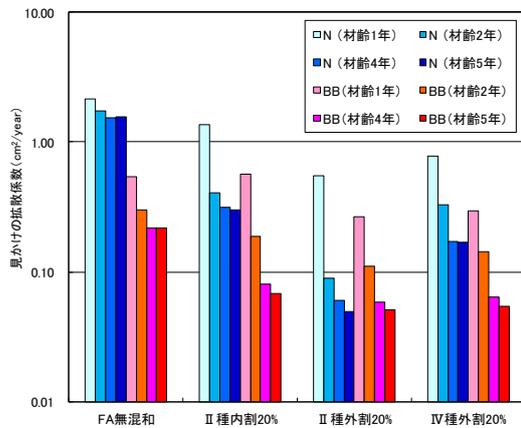


図-2 屋外暴露供試体の見かけの拡散係数 図-3 浸漬試験供試体の見かけの拡散係数

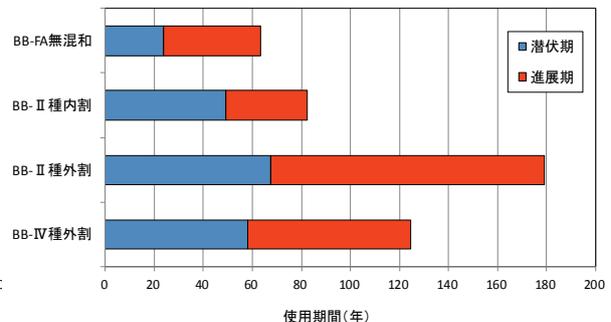
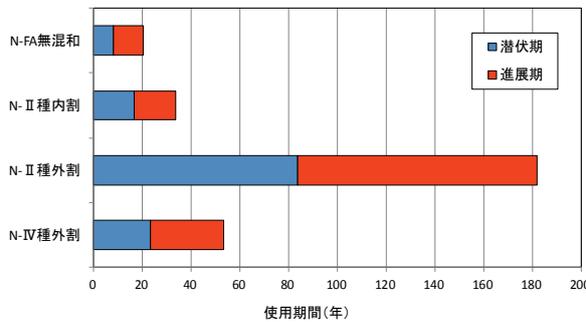


図-4 配合別の潜伏期・進展期の計算結果

研究担当者	馬越唯好 (株式会社四国総合研究所 土木技術部) 武田啓二, 楠瀬康公 (四国電力株式会社 土木建築部)
キーワード	フライアッシュ, 高炉セメント, 耐久性, 中性化抵抗性, 耐塩害性, 公共工事, コスト低減
問い合わせ先	株式会社四国総合研究所 企画部 TEL 087-843-8111 (代表) E-mail jigyo_kanri@ssken.co.jp http://www.ssken.co.jp/

[無断転載を禁ず]

レーザラマン分光法による小型光学式マルチガスセンサの開発

目 的

レーザを光源とし、ラマン効果を検出原理とする小型の光学式ガスセンサの開発。光ファイバによるレーザ光の伝送および検出対象ガスから発生するラマン散乱光の受信・検出を行う。また、狭隘部に設置可能な小型のガス検出部（センサチップ）を開発し、性能検証試験を行う。

主な成果

1. 光ファイバによるレーザ光送信およびラマン散乱光受信

本装置は、光ファイバによる励起光（レーザ）および検出対象となるラマン散乱光の伝送を行うことによって、多様な環境におけるガス濃度計測が可能な小型の光学式マルチガスセンサとして機能する。レーザの光ファイバへの結合光学系およびラマン散乱光を集光するための受光光学系について検討し、センサとしての機能を高めることのできる配置・構成を見出した。

2. マイクロマシン技術の適用によるセンサチップの開発

マイクロマシン技術を応用して小型の光学ベンチを製作し、計測対象空間へのレーザ光の照射および発生するラマン散乱光の集光を行う光学部品をコンパクトに集積配置したセンサチップ（ガス計測部）を開発した。

3. 性能検証試験

水素ガスおよびメタンガスを被検ガスとして性能検証試験を行い、水素ガスの場合には 1%、メタンガスの場合には 0.2%まで検出できることを確認した。また、信号強度と被検ガスの濃度の間には、良好な線形の相関があることが確認できた。

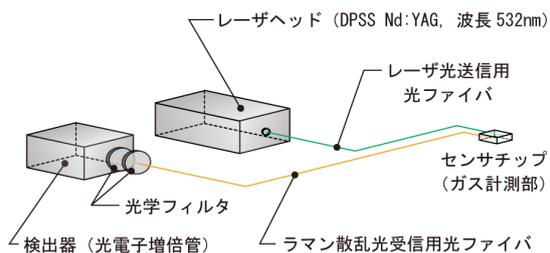


図 1 装置構成



図 2 センサチップ外観

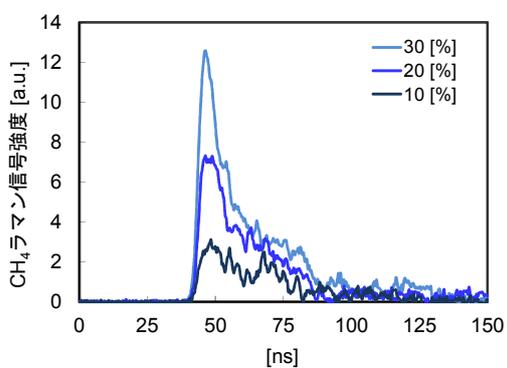


図 3 メタンガスによるラマン信号

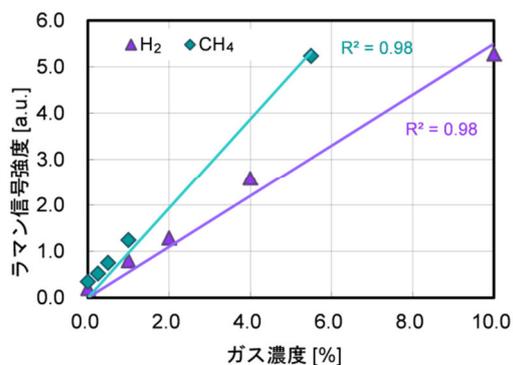


図 4 信号ピーク値とガス濃度の相関

研究担当者	市川祐嗣, 荻田将一, 星野礼香, 杉本幸代, 三木啓史, 朝日一平 (株式会社四国総合研究所 電子技術部)
キーワード	レーザラマン分光, ガスセンサ, マルチガス, 水素, メタン, 光ファイバ, DPSS, マイクロマシン技術, MEMS
問い合わせ先	株式会社四国総合研究所 企画部 TEL 087-843-8111 (代表) E-mail jigyo_kanri@ssken.co.jp http://www.ssken.co.jp/

[無断転載を禁ず]

レーザー吸収分光方式による可搬型 NH₃ 濃度測定装置の開発

目 的

原理的に保守が容易で小型軽量化にも適したレーザー吸収分光方式を採用し、排ガス中の NH₃ 濃度を精度よくリアルタイム測定でき、かつ操作性の高い可搬型の NH₃ 測定装置を開発する。実験室で基本的な測定性能を確認のうえ、石炭火力発電所の脱硝装置（各部の測定座）で実用性能を検証する。

主な成果

1. 試作装置の設計製作

石炭火力発電所での使用を前提に、耐煤塵性能や耐久性・操作性・保守性等を考慮し、現場で優位性の高いシングルパス・レーザー吸収分光方式の原理に基づく試作装置を設計製作した。課題の多い排ガス中の NH₃ サンプリングに関しては、セル一体型プローブや金属管嵌合接続方式等を考案し、煙道通路上の移動測定における実用性能の向上を図った。

2. 実験室での性能評価

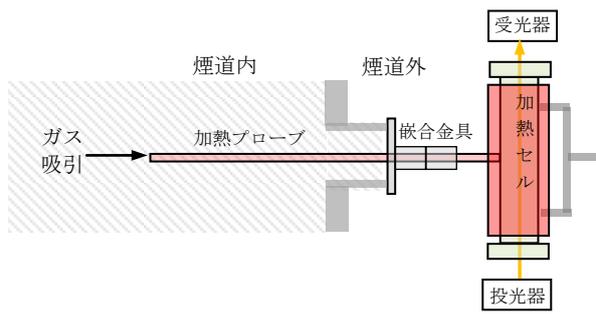
標準ガスを用いて濃度階段試験を実施した結果、測定値は供給ガス濃度に応じて安定推移し、0～100ppmの濃度範囲で良好な測定データが得られた。また、測定値と手分析値の比較試験では、手分析サンプル配管における吸脱着の影響により若干の差異は生じたが、両者に十分な相関性があることを確認した。

標準ガスを対象とした試作装置の測定精度は、現時点で±5%FS（0～10ppm）、±5%RS（10～100ppm）となっている。

3. 現場での性能評価

四国電力(株)橘湾発電所の脱硝出口において、試作装置による NH₃ 濃度測定試験を実施し、現場での総合的な性能評価を行った。

移動測定（全点分布測定）試験では、1点を10分以内で測定でき、AB両煙道（A側：20点、B側：20点）の計40点を400分（約7時間）で測定可能であることを確認した。また、手分析値や NH₃ 注入量との明確な相関性を示すデータも得られている。



(セル分離型・シングルパス・レーザー吸収分光方式)
図1 煙道での測定イメージ



図3 試作装置の外観

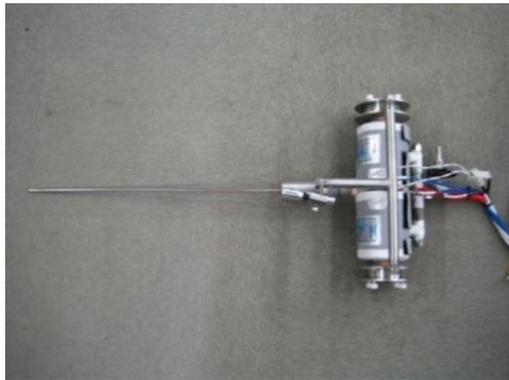


図2 セルー体型プローブの外観



図4 脱硝出口での移動測定試験状況

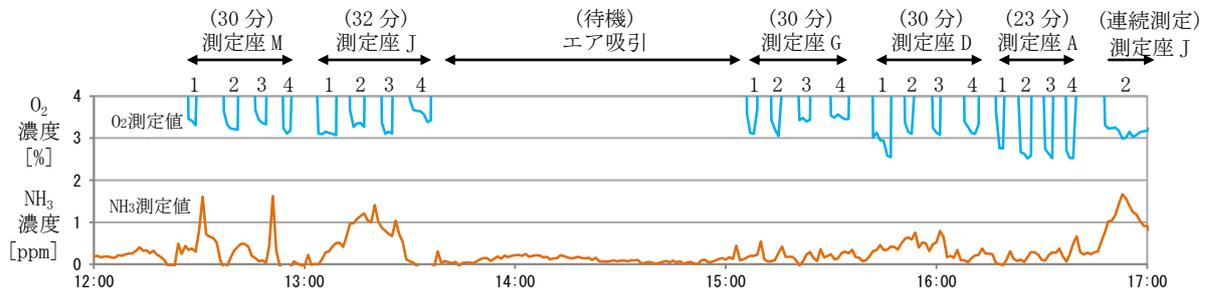


図5 脱硝出口での移動測定試験データ

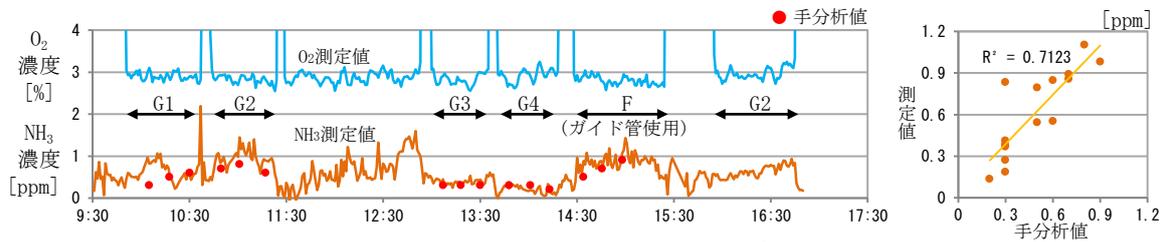


図6 脱硝出口での手分析比較試験データ

研究担当者	市川幸司, 海稲隆成 (株式会社四国総合研究所 エネルギー技術部)
キーワード	脱硝装置, NH ₃ 濃度, 排ガスサンプリング, セルー体型プローブ レーザー吸収分光方式, 可搬型測定装置
問い合わせ先	株式会社四国総合研究所 企画部 TEL 087-843-8111 (代表) E-mail jigyo_kanri@ssken.co.jp http://www.ssken.co.jp/

[無断転載を禁ず]

次世代 openATOMS(openATOMS_FG)の開発について

目 的

低消費電力の無線通信技術を利用した IoT システムは様々なモニタリングシステムへの活用が期待されているが、そのシステム構築にはマイコンや無線通信技術に関する深い知識が必要で、予想以上の時間と費用が掛かってしまうことが少なくない。この問題を軽減するために各種 IoT システムを構築する際に利用できる共通基盤技術として開発した openATOMS をベースに、データ処理性能と無線通信性能を大幅に強化した openATOMS_FG の開発を進めている。

主な成果

1. NICE32 の開発

従来の 8bitMCU を使用した NICE8 比べて、数十倍のデータ処理性能をもつ、32bitMCU を使用した NICE32、ならびに、その OS として S.OS_NICE32 を開発した。

2. 新しい無線通信技術への対応

openATOMS で利用できた唯一の無線通信ネットワーク技術である 2.4GHz_ZigBee に加えて、920MHz_MultiHop ならびに 920MHz_LoRa に対応しており、無線中継点での電力確保が難しい場合や、無線中継を行わず 10km を超える通信を行う必要がある用途にも適用可能となった。

3. 応用システムの開発

openATOMS_FG をベースに、いずれも従来の openATOMS では実現が不可能であった「水田環境モニタリングシステム」および「構造物振動多点同期モニタリングシステム」を開発した。

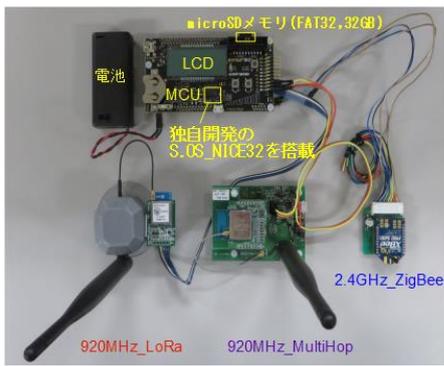


図 1. NICE32 試作機



図 2. NC(Network Computer)

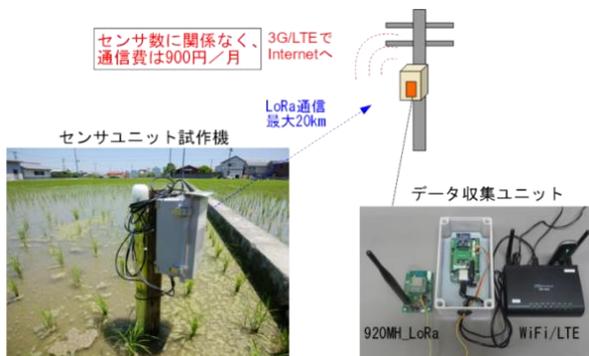


図 3. 水田環境モニタリングシステム

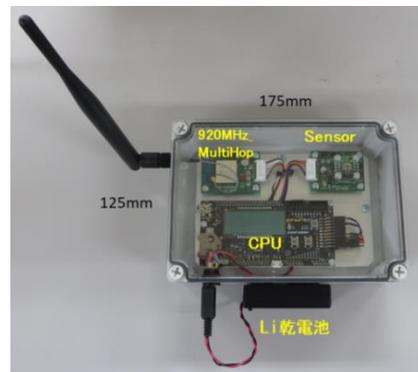


図 4. 構造物振動多点同期
モニタリングシステム

研究担当者	中西美一 (株)四国総合研究所 電子技術部
キーワード	IoT, インターネット, 無線通信, モニタリング
問い合わせ先	株式会社四国総合研究所 企画部 TEL 087-843-8111 (代表) E-mail jigyo_kanri@ssken.co.jp http://www.ssken.co.jp/

[無断転載を禁ず]

水力発電所配電盤における耐電圧値引き下げに関する研究

目 的

電力用設備における低圧回路の商用周波耐電圧値は、お客さまへの電力供給を担う設備の重要性を鑑みて、高水準の耐電圧値として 2kV が規定されている。

しかしながら、低圧制御回路へ侵入するサージレベルが低い 6kV 配電線連系の小水力発電所の場合、その値を 1.5kV 以下に抑制できれば、一般産業用の汎用機器を採用することが可能となり、配電盤のコスト低減が図れる。(図 1)

このため、小水力発電所の低圧制御回路に発生する異常電圧現象を整理、解析することにより、一般産業用耐電圧値の適用の可能性について評価した。

主な成果

1. 水力発電所における配電盤低圧回路への誘起電圧波形の観測

今回、約 14 ヶ月(平成 27 年 11 月～平成 29 年 1 月)に亘り観測を実施した。各発電所の半径 1km の範囲で 1～17 回の落雷が観測されたが、雷サージに起因すると思われる誘起電圧波形を記録することはできなかった。これは、発電所が連系している配電線は避雷器により耐雷対策が施されており、雷サージを抑制していたと推測される。

2. 雷サージ誘起電圧の解析 (EMTP 解析)

(1) 解析概要

前述の観測対象発電所について、その主回路や設備構成を模擬した EMTP (Electro Magnetic Transients Program) モデルを作成し、雷サージが低圧制御回路に侵入した際の最高誘起電圧値を解析により求めた。

(2) 解析結果

低圧制御回路の条件として、CVV-S ケーブルが両端接地されていれば誘起電圧を約 300V まで抑制できるという結果が得られた。(図 2)

なお、CVV-S ケーブルが片端接地の場合では、誘起電圧は 1.5kV を超える結果となった。

3. 雷サージ誘起電圧の測定 (発電所モデル)

(1) 測定概要

実際に対象発電所と同等のケーブル敷設状況や接地環境を模擬した発電所

モデルを作成し、試験装置から電流を入力することにより低圧制御回路に誘起される異常電圧の測定を行った。(図3)

(2) 測定結果

試験装置から100~200Aの範囲で電流値を変えながら、制御ケーブルに発生する誘起電圧を複数点測定し、電流値と誘起電圧値が比例関係にあることを確認した。これをもとに、EMTP解析値と同じ2,500Aが入力された際の誘起電圧値を推定した結果、CVV-Sケーブルが両端接地されていれば、誘起電圧を約250Vまで抑制できることを確認した。(図4)

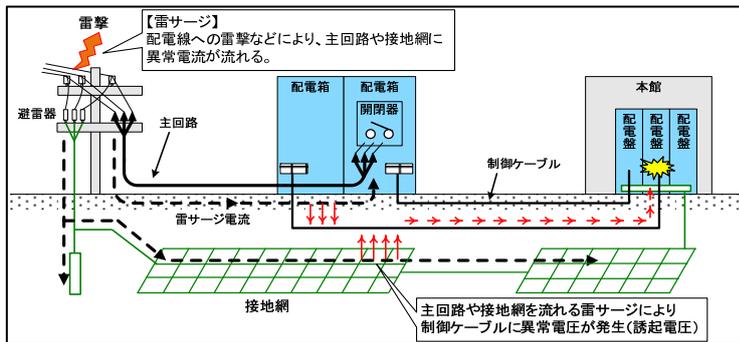


図1 低圧制御回路へのサージ侵入経路

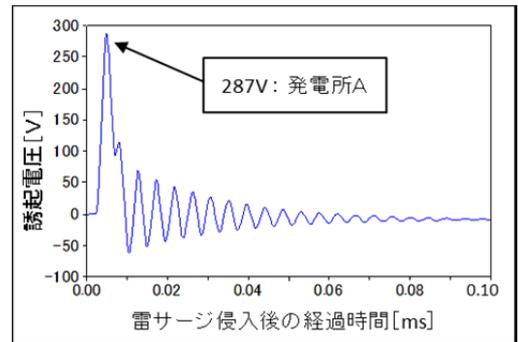


図2 EMTPモデル解析値

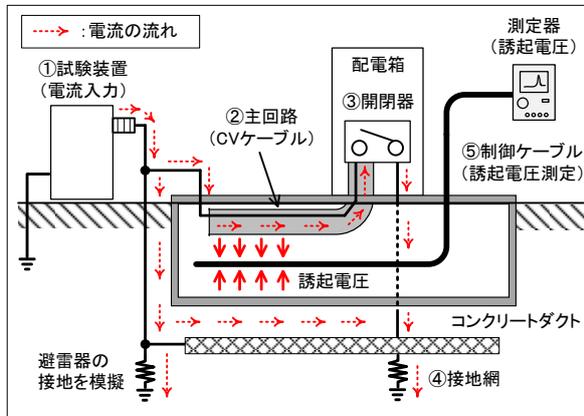


図3 発電所モデルの作成状況

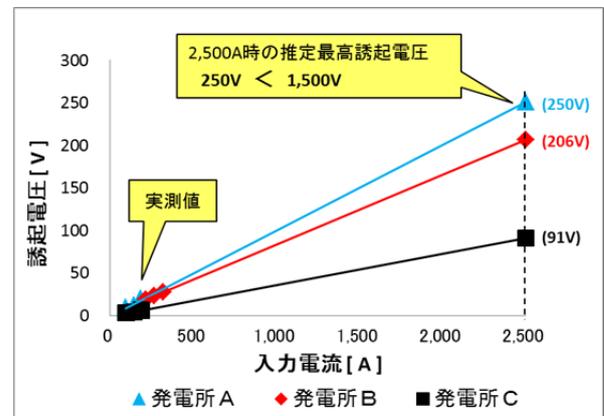


図4 発電所モデル試験結果
(CVV-Sケーブル両端接地)

研究担当者	寺尾武蔵 (四国電力株式会社 水力部) 藤村直人, 泉川雅弘 (株式会社四国総合研究所 電力技術部)
キーワード	雷サージ, 低圧制御回路, EMTP, 誘起電圧
問い合わせ先	株式会社四国総合研究所 企画部 TEL 087-843-8111 (代表) E-mail jigyo_kanri@ssken.co.jp http://www.ssken.co.jp/

[無断転載を禁ず]

フライアッシュコンクリートの耐久性評価に関する研究

(株)四国総合研究所 土木技術部 馬越 唯好
四国電力(株) 土木建築部 武田 啓二
四国電力(株) 土木建築部 楠瀬 康公

キーワード: フライアッシュ
高炉セメント
耐久性
中性化抵抗性
耐塩害性

Key Words : fly ash
blast-furnace cement
durability
resistance to carbonation
resistance for salt damage

Study on Durability Evaluation of Concrete Using Fly Ash

Shikoku Research Institute, Inc., Civil Engineering Department

Tadayoshi Bakoshi

Shikoku Electric Power Co., Inc., Civil & Architectural Engineering Department

Keiji Takeda, Yasutomo Kusunose

Abstract

Though it is known the resistance for salt damage of concrete using fly ash is higher than that of normal concrete without fly ash, the resistance for salt damage of concrete using blast-furnace cement which is broadly used in public works with fly ash almost never has quantitative evaluation case now. If it is confirmed the resistance for salt damage of concrete using blast-furnace cement with fly ash is higher, it increases the potential for using blast-furnace cement with fly ash in public works, such as harbor structures. And we can achieve to expand further effective utilization of fly ash.

In construction such as harbor structures, use of concrete using fly ash is expected to delay corrosion of internal rebar, to reduce the maintenance costs, and to contribute to reduction of life-cycle costs of structures.

In this study, we conducted the evaluation experiments, resistance to carbonation, penetration resistance of chloride ion, resistance to rebar corrosion of concrete using blast-furnace cement with fly ash, and considered the durability evaluation of the concrete.

1. はじめに

四国電力㈱では、石炭火力発電所からの副産物である石炭灰が年間約 30 万t発生しており、その約 1/2はセメント原料として利用されている。また、石炭火力発電所から排出される石炭灰の 9 割を占めるフライアッシュ(以下「FA」)を資材として有効利用する技術の開発が重要な課題となっている。

FAの有効利用技術として、瀬戸内海における海砂の採取禁止、天然の骨材資源の枯渇化や自然環境の保全の観点から、FAを細骨材の一部に代替使用したコンクリートの長期材齢強度、耐凍害性、水密性等について調査し¹⁾、実施工への適用性試験²⁾を実施した。また、強熱減量が高く、JIS規格に適合しないFAの増加対策として、未燃カーボン量の多いFAを使用したコンクリートの性状調査³⁾や道路擁壁工事の実構造物施工⁴⁾等を行ってきた。FAの更なる有効利用を目的として、粉体系の高流動コンクリートへの適用性⁵⁾について調査した。さらに最近では、トンネル工事におけるリバンドが少ない吹付けコンクリートや水中不分離性コンクリートへの適用⁶⁾などコストダウンを可能とする技術開発がある。

FAを混和したコンクリートは、通常のコンクリートに比べて耐塩害性が高いことは知られている⁷⁾が、公共工事で幅広く使用されている高炉セメントを使用したコンクリートにFAを混和した場合の耐塩害性に関する定量的な評価事例は殆どないのが現状である。このため、高炉セメントにFAを混和したコンクリートが、耐塩害性に優れていることを確認できれば、港湾構造物など公共工事で使用される可能性が高くなり、FAの更なる有効利用拡大を図ることができる。

また、港湾構造物等にFAコンクリートを使用することにより、内部にある鉄筋の腐食を遅らせ、その結果、維持管理費を低減することができ、構造物のライフサイクルコスト低減に寄与することが期待される。

本研究では、高炉セメントを使用したコンクリートにFAを混和した場合の中性化に対する抵抗性、塩化物イオンの浸透抵抗性および鉄筋腐食に対する抵抗性に関する試験を実施するとともに、コンクリートの耐久性評価について考察した結果について報告する。

2. コンクリートの配合と圧縮強度

2.1 使用材料および配合条件

本研究で使用した材料を表-1に示す。

セメントは、普通ポルトランドセメントおよび高炉セメントB種を使用し、FAは、四国電力㈱橋湾発電所産のJIS A 6201に適合するII種およびIV種を使用した。

配合条件は、粗骨材の最大寸法 20mm、水結合材比 55%とし、目標スランブおよび目標空気量は運搬時のロスを考慮して、9.0cm、5.0%に設定した。

FAの種類と置換率については、現場で一般に使用されているII種・IV種灰と10~20%のFA置換率を基に決定した。

以上を踏まえ、FA種別ごとに、セメント代替や細骨材代替の各種代替材として混和した効果を比較するため、FA無混和、II種内割置換(セメントの内割で、セメント置換)、II種外割置換(セメントの外割で、細骨材置換)、IV種外割置換とした。セメントの種類、FAの置換率によって設定したコンクリート配合を表-2に示す。

表-1 使用材料

材 料	種類・性質など
セメント	普通ポルトランドセメント(N) 密度:3.16g/cm ³ , プレーン値:3,210cm ² /g
	高炉セメントB種(BB) 密度:3.02g/cm ³ , プレーン値:3,780cm ² /g
フライアッシュ	JIS A 6201 II種フライアッシュ 密度:2.33g/cm ³ , プレーン値:4,150cm ² /g
	JIS A 6201 IV種フライアッシュ 密度:2.20g/cm ³ , プレーン値:1,750cm ² /g
細骨材	砕砂(石灰岩砕砂) 密度:2.68g/cm ³ , FM:2.80
粗骨材	碎石2005(石灰岩碎石) 密度:2.70g/cm ³ , FM:6.60
混和剤	AE減水剤 リグニンスルホン酸化合物とポリオール複合体
	AE剤 変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤

表-2 コンクリートの配合

配 合	セメント	FA II種		FA IV種		スランブ (cm)	W/(C+Fc) (%)	細骨材率 (%)	単 位 量 (kg/m ³)								
		内割	外割	内割	外割				セメント		水 W	細骨材 石灰岩砕砂	粗骨材 石灰岩碎石	AE減水剤			
									C	フライアッシュ 内割Fc 外割Fs							
N-FA無混和	N	0	0	0	0	9.0	55	44.0	273	0	0	150	847	1088	C×1.0%		
N-II種内割20		20	0					0	41.0	210	52	0	144	793		1153	
N-II種外割20		0	20					0	39.0	300	0	126	165	581		1145	
N-IV種外割20		0	0					20	39.0	309	0	118	170	575		1131	
BB-FA無混和	BB	0	0	0	0	9.0	55	43.0	269	0	0	148	828	1104		C×1.0%	
BB-II種内割20		20	0					0	40.0	206	52	0	142	775			1172
BB-II種外割20		0	20					0	38.0	296	0	123	163	566			1161
BB-IV種外割20		0	0					20	37.0	305	0	112	168	545			1166

2.2 圧縮強度発現

圧縮強度試験は JIS A 1132 および JIS A 1108 に準じて実施した。所定の材齢まで標準養生を行ったコンクリートの材齢 7 日, 28 日, 91 日における圧縮強度試験結果を図-1 に示す。

高炉セメントB種(BB), 普通ポルトランドセメント(N)とも, FA無混和に比べてⅡ種内割は, 圧縮強度が減少した。これはセメントの内割配合であり, 単位セメント量が減少するためと考えられた。

FA無混和に比べてⅡ種外割, Ⅳ種外割は, 圧縮強度が増加した。これは, 単位セメント量はほぼ同じであり, FA混和によるマイクロファイラー効果とポゾラン反応によるものと考えられた。また, Ⅳ種外割よりⅡ種外割の方が, 強度が増加する傾向が見られた。これはⅣ種に比べて, Ⅱ種の方がブレン比表面積が大きいことから, マイクロファイラー効果がより大きく働いたことによるものであると考えられた。

FAの同一混和条件では, 高炉セメントB種と普通ポルトランドセメントを比較すると, ほぼ同程度の強度発現が見られた。

3. コンクリート組織の緻密化

3.1 コンクリートの細孔構造

(1) 細孔径分布の測定

コンクリート組織の緻密化について定量的に把握するため, 水銀圧入式ポロシメータを用いて, コンクリート内部の細孔径分布の測定を実施した。

コンクリート試料は, 所定の材齢まで 20°C 水中養生を行った $\phi 10\text{cm} \times 20\text{cm}$ の円柱供試体を用いて, 5mm 以下に粉碎し, モルタル部分のみを取り出し, アセトンに数日間浸漬させ水和反応を止めた後, 4 日間の D-dry 乾燥を行い試料とした。

(2) 細孔径分布測定結果

材齢 7 日におけるモルタル試料の細孔径分布測定結果を図-2(a)に示す。

細孔径が $0.05 \mu\text{m}$ 以上の細孔容積を比較すると, Ⅱ種内割が最も大きく, 次にFA無混和, Ⅳ種外割, Ⅱ種外割の順に小さくなる傾向が見られた。

細孔容積が最大ピークとなる細孔径は, 普通ポルトランドセメントを用いた場合, 高炉セメントを用いた場合とも, $0.03 \mu\text{m} \sim 0.05 \mu\text{m}$ 程度となった。

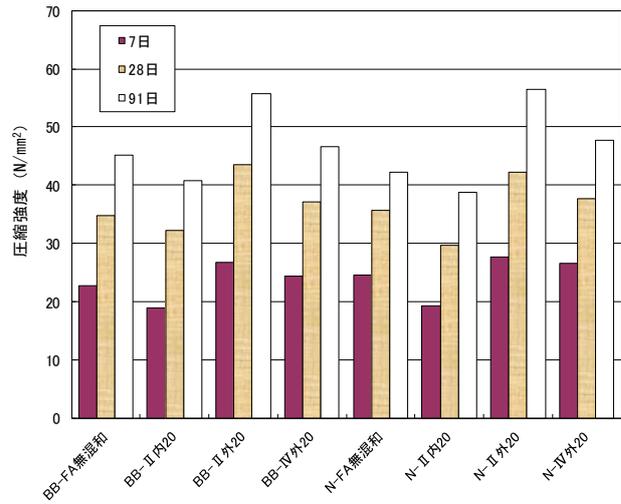


図-1 圧縮強度試験結果

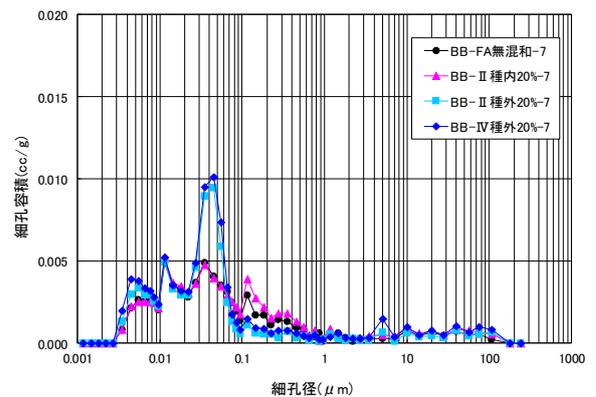
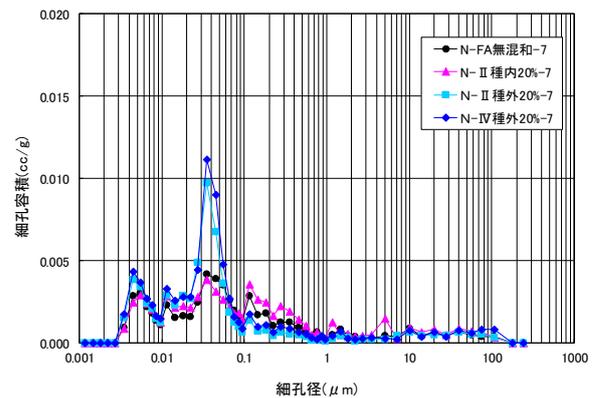


図-2(a) 細孔径分布測定結果(材齢 7 日)

材齢 91 日におけるモルタル試料の細孔径分布測定結果を図-2(b)に示す。

細孔径が $0.05\mu\text{m}$ 以上の細孔容積を比較すると、FA無混和が最も大きく、次にII種内割、IV種外割、II種外割の順に小さくなる傾向が見られた。

細孔容積が最大ピークとなる細孔径は、普通ポルトランドセメントを用いた場合は $0.02\mu\text{m}\sim 0.04\mu\text{m}$ となり、高炉セメントを用いた場合は $0.01\mu\text{m}\sim 0.04\mu\text{m}$ となった。ピークとなる細孔径は、FA無混和、II種内割、IV種外割、II種外割の順に小さくなった。

材齢の経過とともに、細孔容積がピークとなる細孔径は小径側にシフトしており、コンクリート内部の組織が緻密化することが確認された。

3.2 ポゾラン反応性の検討

(1) 示差熱重量分析試験の方法

ポゾラン反応の可能性について検討するため、示差熱重量分析試験装置を用いて、モルタル中の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の含有率を測定した。

コンクリート試料は、 5mm 以下に粉砕し、モルタル部分のみを取り出し、アセトンに数日間浸漬させ水和反応を止めた後、さらに $150\mu\text{m}$ 以下に微粉砕・ふるい分けし、 40°C 炉乾燥させたものを試料とした。

(2) 示差熱重量分析試験結果

材齢 7 日、28 日、91 日におけるモルタル試料を用いた示差熱重量分析試験から得られた TG-DTA 曲線を解析し、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含有率を算出した結果を図-3 に示す。

コンクリート中のセメントの水和反応の進行に伴い、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ は生成され増加する。

FA無混和の場合、水和反応の進行に伴い、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の含有率は材齢とともに増加する結果となった。

II種内割の場合、材齢 28 日、91 日における $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の含有率が材齢 7 日と変化しない結果となり、水和反応に伴う $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の生成量とポゾラン反応による $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の消費量とがほぼ同量になったためと考えられた。

IV種外割の場合、材齢 91 日以降ポゾラン反応による $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の消費量が増加するため、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の含有率が減少したと考えられた。

II種外割の場合、材齢 28 日以降ポゾラン反応による $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の消費量が増加するため、それ以降の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の含有率は減少したと考えられた。

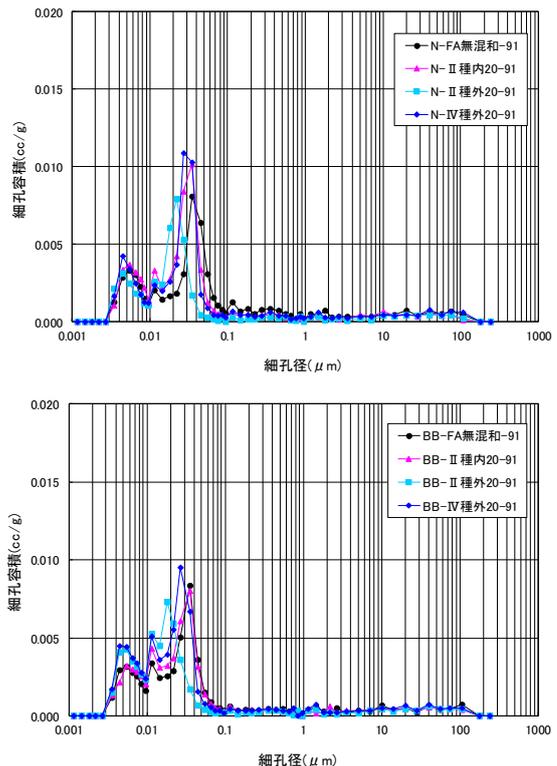


図-2(b) 細孔径分布測定結果(材齢 91 日)

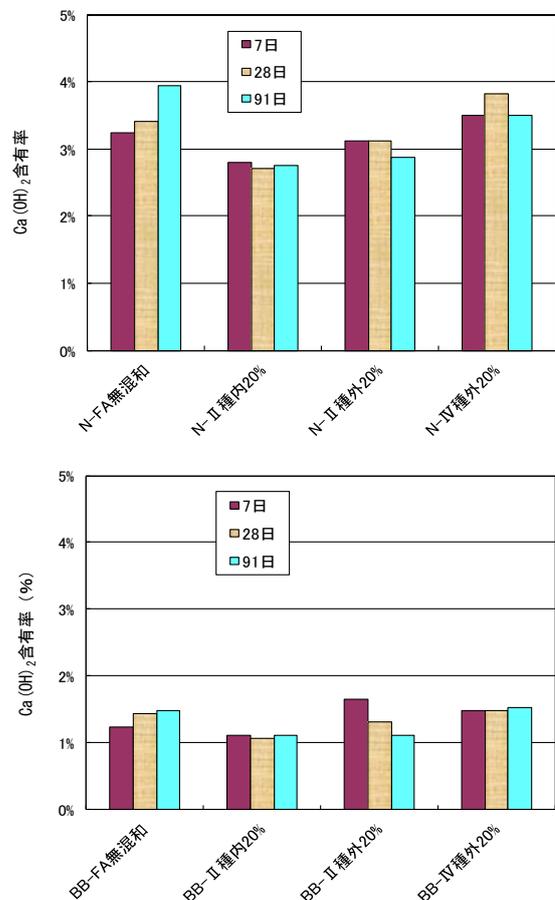


図-3 示差熱重量分析試験結果

したがって、FAを混和したコンクリートでは、FA無混和に比べて、FAによるポズラン反応が起きており、材齢28日以降の長期強度が増進したと考えられた。

4. 促進中性化試験

4.1 促進中性化試験の方法

中性化に対する抵抗性を確認するため、CO₂濃度5%の促進中性化試験⁸⁾を実施した。

コンクリート供試体は、断面が1辺10cmの正方形で、長さを40cmとした。供試体は型枠を脱型した後、材齢4週まで温度20±2℃の水中で養生を行った。材齢4週後、温度20±2℃、相対湿度60±5%の恒温恒湿室において、材齢13週まで養生した。中性化の促進条件は、温度20±2℃、相対湿度60±5%、CO₂濃度5±0.2%とした。

4.2 促進中性化試験結果

促進日数と中性化深さの関係を図-4に示す。

II種内割の場合、FA無混和より中性化深さは大きくなるものの、II種外割、IV種外割の場合には、FA無混和より中性化深さは小さくなり、中性化に対する抵抗性が高い傾向が見られた。

また、IV種外割よりもII種外割の方が、中性化深さは小さく、中性化に対する抵抗性が高い傾向が見られた。

高炉セメントに比べて普通ポルトランドセメントの方が、同じ材齢における中性化深さは小さく、中性化に対する抵抗性が高い傾向が見られた。これは、高炉セメントにはセメントの内割で高炉スラグが30～60%入っているため、セメント量が少ない上に、高炉スラグの水硬反応により水酸化カルシウムが消費されpHが低下する時期が早くなるためと考えられた。

高炉セメントを用いたコンクリートは、普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートよりも中性化抵抗性が低下するものの、FAを外割りで混和することにより、普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートと同程度の中性化抵抗性を確保できることが確認された。

5. 塩化物イオンの浸透抵抗性

5.1 屋外暴露試験

(1) 屋外暴露試験の方法

コンクリート構造物の耐久性の検討を行う際には、通常供試体を自然の海洋環境に置き、コンクリートの品質変化を調査する方法⁹⁾が行われる。

FAコンクリート構造物に対する耐塩害性の長期評価を行うため、実海域において、港湾構造物を模擬し、実構造物寸法に近い大型供試体を用いた屋外暴露試験を実施した。

平成24年1月、表-2に示す8配合のコンクリート供試体(150cm×100cm×50cm)を作製し、上面と底面の2面を除く、4面をエポキシ樹脂塗料で被覆した後、28日間気中養生を行った。写真-1に示すように、大型供試体を平成24年2月に火力発電所構内の護岸前面海域の干満帯部に設置し、屋外暴露試験を開始した。

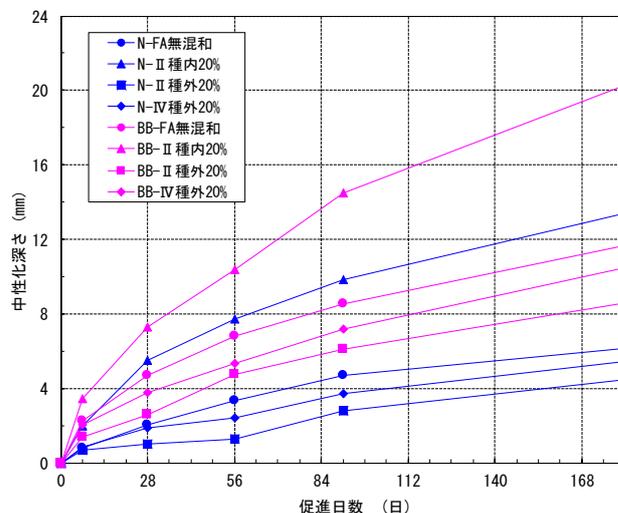


図-4 促進日数と中性化深さの関係



写真-1 屋外暴露試験状況(干満帯)

(2) 屋外暴露試験結果

屋外暴露試験に供したコンクリート供試体からコア（φ10cm×50cm）を採取して、深さ方向の塩化物イオン濃度の測定を行った。その際、塩化物イオン濃度がより高くなると考えられる底面側のコアを用いた。

屋外暴露供試体のコンクリート表面からの距離と全塩化物イオン量の関係から、見かけの拡散係数を回帰分析により求めた。屋外暴露試験の配合ごとの見かけの拡散係数を図-5 に示す。

高炉セメントを使用したコンクリートにFAを混和した場合の見かけの拡散係数は、普通ポルトランドセメントを使用したものよりも小さく、塩化物イオンの浸透抵抗性が高くなることが確認された。

II種外割、IV種外割の配合では、見かけの拡散係数はFA無混和よりも小さく、II種外割、IV種外割は塩化物イオンの浸透抵抗性が高くなることが確認された。

IV種外割よりも、II種外割の方が見かけの拡散係数が小さい傾向が見られた。これはII種の方がブレン比表面積が大きいことから、組織が緻密になるためであると考えられた。

FA無混和に比べて、II種外割、IV種外割の方が見かけの拡散係数が小さく、II種外割、IV種外割は塩化物イオンの浸透抵抗性が高くなることが確認された。

浸漬試験の見かけの拡散係数は、屋外暴露試験の結果とほぼ同じ傾向になることを確認した。

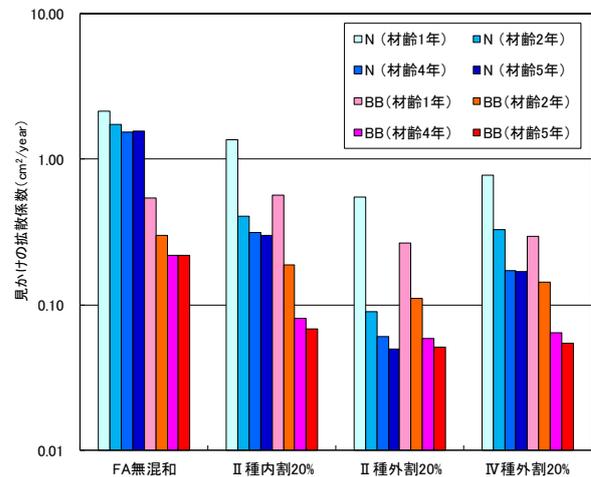


図-5 屋外暴露供試体の見かけの拡散係数

5.2 浸漬試験

(1) 浸漬試験の方法

室内で実施できる耐塩害性の促進試験として、塩水への浸漬試験を実施した。浸漬試験では、直径10cm、高さ15cmの円柱供試体を作製し、前処理として、以下の処理を行った。

- ・12時間乾燥させた後、打込み側の1面を残し、他の1面・円周面をエポキシ樹脂で被覆。
- ・被覆したエポキシ樹脂が硬化するまで4日間放置した後、温度20℃の水中で24時間以上保存。

供試体を温度20±2℃、濃度10%の塩化ナトリウム水溶液中に完全に浸漬する。浸漬試験の実施状況を図-6 に示す。

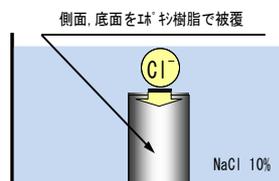


図-6 浸漬試験の実施状況

(2) 浸漬試験結果

浸漬試験の結果得られた深さ方向の塩化物イオン濃度の分布から、塩化物イオンの見かけの拡散係数を求め、図-7 に示す。

高炉セメントを使用したコンクリートにFAを混和した場合の見かけの拡散係数は、普通ポルトランドセメントを使用したものよりも小さく、塩化物イオンの浸透抵抗性が高くなることが確認された。

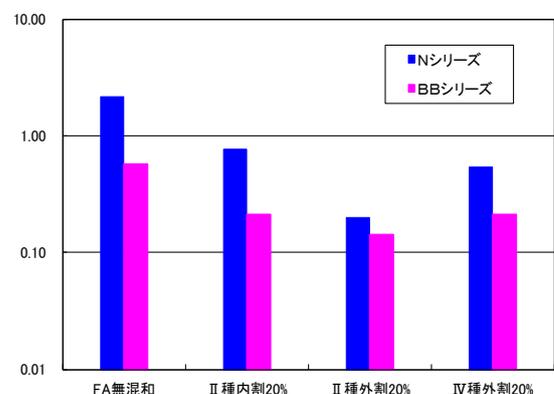


図-7 浸漬試験供試体の見かけの拡散係数

6. 鉄筋腐食に関する検討

6.1 塩害による構造物の劣化過程

塩害によるコンクリート構造物中の鋼材腐食の劣化過程を図-8に示す。構造物の使用期間により、潜伏期、進展期、加速期、劣化期に分けられる。

潜伏期には塩分の浸入・蓄積が進み、鋼材が腐食を開始し、進展期における内部ひび割れの進展により、コンクリート表面での腐食ひび割れ発生に至る。

通常のコンクリートに比べて、鋼材の腐食開始時期やコンクリート表面の腐食ひび割れ発生時期がより遅くなることによって、耐塩害性に優れていると定量的に評価することができる。

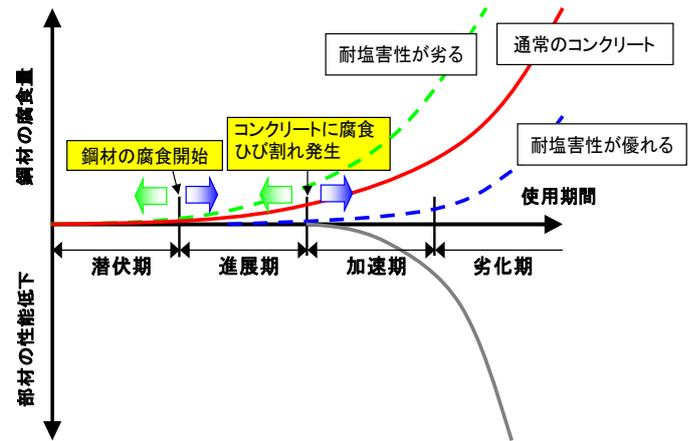


図-8 塩害による鋼材腐食の劣化過程

6.2 自然電位の連続計測

従来のコンクリート標準示方書(2007年)によれば、コンクリート中の鉄筋腐食開始時の塩化物イオン濃度を 1.2kg/m^3 とみなしてよいとされてきた。¹⁰⁾

しかし、鋼材の腐食状態と鋼材位置における塩化物イオン濃度から腐食発生限界塩化物イオン濃度が求まる場合は、その値を用いることを原則とする¹¹⁾ことから、実験により腐食発生時における塩化物イオン濃度を求めることとした。

塩化物添加量を 0.6kg/m^3 、 0kg/m^3 とした供試体を作製し、図-9に示すように、上面と底面以外の側面4面をエポキシ系樹脂で被覆し、塩化ナトリウム10%水溶液に浸漬して、6個の供試体の自然電位を連続計測した。

自然電位が急激に低下した時点、腐食開始と判定し、同時にコンクリート供試体を割裂し、かぶり面側の内部の鉄筋が腐食を開始していることを確認した。腐食発生状況の観察から、鉄筋のリブの部分に腐食が見られた。これは、リブの凹凸によってコンクリートと鉄筋の付着面に空隙ができやすいためと考えられた。

6.3 腐食発生限界塩化物イオン濃度の算定

自然電位が低下した供試体について、浸透深さ方向の塩化物量を分析し、浸漬期間から腐食発生時の塩化物イオン濃度を算出した。

各供試体について、深さごとの塩化物イオン濃度分布から、見かけの拡散係数を求めた。

見かけの拡散係数および表面塩化物イオン濃度を用いて、自然電位が低下した浸漬日数におけるかぶり位置での塩化物イオン濃度を、次の Fick の拡散方程式の解の式により計算した。

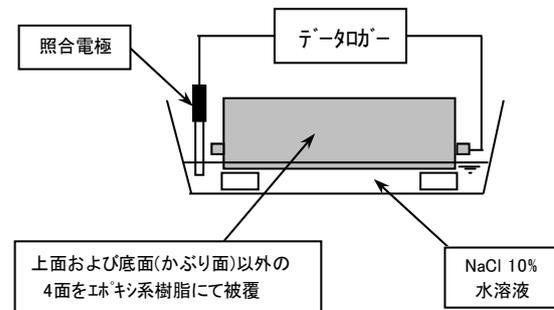


図-9 自然電位の連続計測方法

Fick の拡散方程式の解の式

$$C(X, t) = C' + (C_0 - C') \cdot \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{X}{2\sqrt{Dct}} \right) \right\}$$

[D_c : 見かけの拡散係数, C_0 : 表面塩化物イオン濃度, C' : 初期塩化物イオン濃度, X : かぶり, t : 供用期間]

Fick の拡散方程式の解を用いて算定した腐食発生限界塩化物イオン濃度を表-3に示す。

Fick の拡散方程式の解により計算した腐食発生限界塩化物イオン濃度を統計処理して求めた平均区間推定(信頼度 95%)の値は、塩化物添加量 0kg/m^3 の配合で 1.79kg/m^3 であり、塩化物添加量 0.6kg/m^3 の配合で 1.90kg/m^3 となった。

コンクリート標準示方書(2013年)¹¹⁾に準拠して、普通ポルトランドセメントを用いた場合で、水セメント比 55% の時の腐食発生限界塩化物イオン濃度は、 1.75kg/m^3 となり、ほぼ同程度の値となることを確認した。

表-3 腐食発生限界塩化物イオン濃度の算定

配合	塩化物添加量 (kg/m ³)	供試体番号	自然電位低下時の浸漬日数(t) (日)	鉄筋かぶり (cm) X	見かけの拡散係数D _e (cm ² /年)	表面塩化物イオン濃度C ₀ (kg/m ³)	初期塩化物イオン濃度C' (kg/m ³)	腐食発生限界塩化物イオン濃度(kg/m ³)		
								Fick式	平均区間推定	示方書
N-FA 無混和	0.0	5	223	2.83	3.368	12.09	0	1.97	1.79	1.75
		6	264	2.89	3.945	10.47	0	2.37		
		2	273	3.16	3.261	12.97	0	1.98		
		4	283	2.95	3.318	10.48	0	2.03		
		1	290	3.15	3.545	11.61	0	2.14		
		3	428	3.11	3.176	12.76	0	3.25		
	0.6	1	211	3.08	2.640	16.12	0.48	1.70	1.90	
		6	240	3.00	3.096	12.63	0.48	2.15		
		5	254	2.91	2.631	14.51	0.48	2.28		
		2	267	3.04	3.021	15.27	0.48	2.68		
		4	278	3.06	2.741	13.73	0.48	2.26		
		3	331	3.11	3.024	13.68	0.48	2.92		
N-II種 内割	0.6	1	725	2.53	0.506	16.77	0.48	1.70	—	1.67
N-IV種 外割	0.6	3	747	2.88	0.506	29.46	0.48	1.80	—	—
		2	923	2.96	0.473	22.86	0.48	1.73		
		6	1162	2.91	0.469	25.43	0.48	2.78		
		5	1339	2.97	0.455	25.63	0.48	3.10		
BB-FA 無混和	0.6	5	1190	2.95	0.407	23.34	0.48	2.09	—	1.67

6.4 腐食開始後の鉄筋の腐食速度

鉄筋が腐食を開始した後の腐食速度について検討するため、腐食発生限界塩化物イオン濃度を越えた内在塩分量を含んだコンクリート供試体を作製し、腐食速度を求めた。

内在塩分量を 3kg/m³、5kg/m³とした供試体を 6 個作製し、材齢 28 日まで封かん養生した後、分極抵抗法により腐食速度(質量損失速度)を測定した。

屋外暴露した供試体の各材齢における配合ごとに腐食速度を測定した結果を図-10 に示す。

高炉セメントの方が普通ポルトランドセメントに比べて、0.4~0.8 倍程度に腐食速度は減少する傾向が見られ、II 種外割、IV 種外割の腐食速度は、FA 無混和の場合の 0.2~0.6 倍、0.3~0.6 倍程度に減少する傾向が見られた。内在塩分量 5kg/m³の方が 3kg/m³に比べて 1.5~14 倍程度腐食速度は増加する傾向が見られた。屋外暴露した供試体の腐食速度は、配合ごとにほぼ一定値に収束する傾向が見られた。

環境条件の違いで比較すると、屋外暴露の方が、室内気中養生に比べて、腐食速度は増加する傾向が見られたが、これは屋外暴露の場合には、降水に伴う水の供給による影響が現れたためと考えられた。

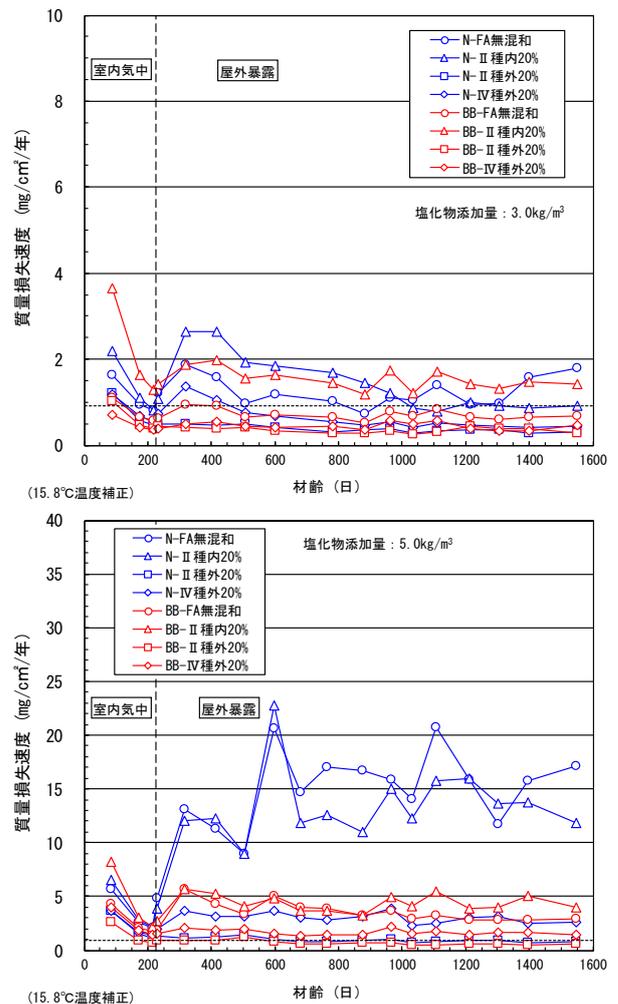


図-10 腐食開始後の鉄筋の腐食速度

6.5 腐食ひび割れ発生時の鉄筋腐食量

コンクリート表面に腐食ひび割れが発生した時の鉄筋の腐食量を求めるため、促進腐食環境下で、供試体に腐食ひび割れを発生させ、その時点の鉄筋の腐食量を求めた。内在塩分量を $5\text{kg}/\text{m}^3$ とし養生期間 1 カ月の供試体を作製し、促進腐食試験を実施した。環境条件は、温度 70°C 、相対湿度 90% の高温高湿環境下で、コンクリート表面に腐食ひび割れが発生するまで実施した。

腐食ひび割れ発生時の鉄筋腐食量を算定した結果の一例を表-4 に示す。

表-4 腐食ひび割れ発生時の鉄筋腐食量

配合		腐食ひび割れ発生時の鉄筋腐食量 (mg/cm^2)
N	FA無混和	68.1
	II種内割	62.1
	II種外割	48.9
	IV種外割	50.1
BB	FA無混和	46.1
	II種内割	44.7
	II種外割	51.8
	IV種外割	54.8

7. 耐久性評価に関する検討

港湾構造物にFAコンクリートを使用する場合の鉄筋のかぶりを最小 5cm とした。

塩化物イオンの見かけの拡散係数および腐食発生限界塩化物イオン濃度から、鉄筋の腐食が開始するまでの期間(潜伏期の期間)を算出し、腐食開始後の腐食速度および腐食ひび割れ発生時の鉄筋腐食量から、腐食ひび割れ発生までの期間(進展期の期間)を算出した。配合別の潜伏期・進展期の計算結果を図-11 に示す。

潜伏期・進展期の期間はII種外割が最も長く、次にIV種外割、II種内割、FA無混和の順に短くなる傾向が見られた。

したがって、普通ポルトランドセメントを用いた場合、高炉セメントを用いた場合も、FA無混和に比べて、FAを混和した場合の方が耐塩害性が向上し、II種内割、IV種外割、II種外割となるにしたいがい、耐塩害性が高くなることを確認された。

8. ライフサイクルコストの試算

港湾構造物の例として、RCケーソン式岸壁を対象としてライフサイクルコストの検討を行った。

RCケーソン式岸壁の建設工事費は、国土交通省における工事实績を参考にしている土木学会四国支部の「四国版フライアッシュを結合材として用いたコンクリートの配合設計・施工指針」¹²⁾の工事費を参考に、170,000 千円/函と設定した。

FAコンクリートを使用する際は、生コン発注先のプラントにおいてFAの貯蔵サイロ等の準備がなく、材料費が高価となる場合について検討した。

コンクリート構造物の耐久性評価に関する検討結果から、普通コンクリート(FA無混和)、FAコンクリートは、配合によって耐用年数が異なることが分かった。

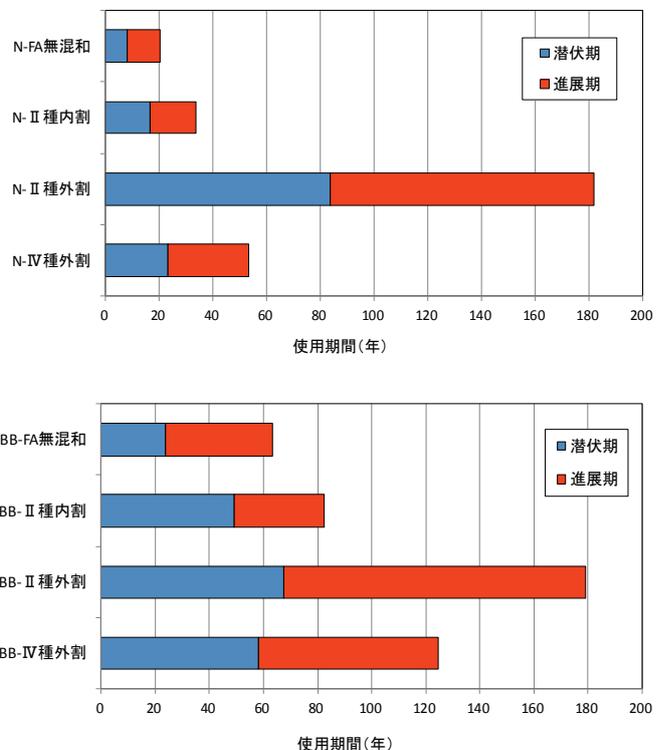


図-11 配合別の潜伏期・進展期の計算結果

両者のライフサイクルコストを比較するには、耐用年数が異なるため、建設工事費で直接比較することはできず、現在価値の年経費で比較することとした。

建設工事費の単年あたりのLCC(ライフサイクルコスト)を図-12に示す。FAコンクリートは初期コストが高額となるが、供用終了までの期間が長いことから、単年度あたりのライフサイクルコストで比較すると、普通コンクリートよりも安価となることを確認された。

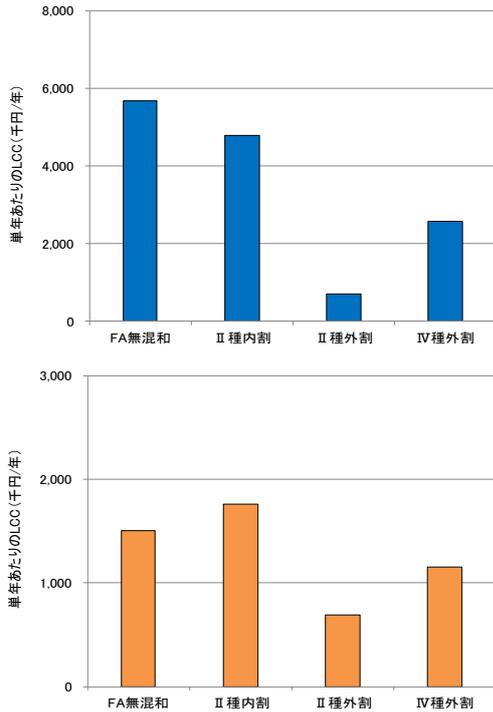


図-12 単年あたりのライフサイクルコストの試算結果

9. まとめ

高炉セメントを使用したコンクリートにFAを混和した場合のコンクリートに関する試験・耐久性について考察した結果得られた知見は、以下のとおりである。

- 細孔径分布から、材齢の経過とともに、ピークとなる細孔径は小径側にシフトし、コンクリート内部の組織が緻密になることが確認された。
示差熱重量分析からは、FAを混和したコンクリートでは、FA無混和に比べて、FAによるボゾラン反応が起きており、材齢28日以上の長期強度が増進した。
- 促進中性化試験からは、高炉セメントを用いたコンクリートは、普通ポルトランドセメントを用いたものよりも中性化抵抗性が低下するものの、FAを外割りで混和することにより、普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートと同程度の中性化抵抗性を確保できる。
- 屋外暴露試験からは、高炉セメントを使用したコンクリートにFAを混和した場合、普通ポルトランドセメントを使用したものよりも塩化物イオンの浸透抵抗性が高くなり、II種外割、IV種外割の配合では、FA無混和よりも塩化物イオンの浸透抵抗性が高くなる。
- 耐久性評価からは、FA無混和に比べて、FAを混和した配合の方が耐塩害性が向上し、II種内割、IV種外割、II種外割となるにしたがい、耐塩害性が高くなることが分かった。

今回の実験結果より、高炉セメントを使用したコンクリートにFAを混和した場合、コンクリートの耐塩害性がさらに改善できることが明らかになった。

以上のことから、港湾構造物にFAコンクリートを使用することにより、鉄筋の腐食を遅らせ、その結果、トータルの維持管理費を低減することができ、構造物のライフサイクルコスト低減に貢献することが期待される。

【参考文献】

- 1)馬越唯好, 河野清, 山地功二, 川崎真治: 非JIS灰を細骨材の一部に代替したコンクリートの耐久性, コンクリート工学年次論文集, Vol.19, No.1, pp349-354, 1997
- 2)馬越唯好, 濱崎修: 非JIS灰を細骨材の一部に代替したコンクリートの性質, コンクリート工学年次論文集, Vol.20, No.2, pp133-138, 1998
- 3)馬越唯好, 大内泰志, 村上俊夫: 強熱減量の異なるフライアッシュを多量に使用したコンクリートの性状, セメント・コンクリート論文集, Vol.52, pp314-319, 1998
- 4)馬越唯好, 橋本親典, 山地功二: III種フライアッシュを多量に用いたコンクリートの実構造物施工, コンクリート工学年次論文集, Vol.21, No.2, pp139-144, 1999
- 5)馬越唯好, 富加見徳治, 武田啓二: フライアッシュを多量使用した高流動コンクリートの基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.2, pp865-870, 2000
- 6)日本コンクリート工学会四国支部: フライアッシュコンクリートの耐久性評価研究委員会報告, pp169-174, 2013
- 7)土木学会, 循環型社会に適合したフライアッシュコンクリートの最新利用技術, コンクリートライブラリー132, pp129-136, 2009
- 8)下岡直哉, 馬越唯好, 上田隆雄, 宮田啓志: フライアッシュコンクリートの塩害および中性化に対する評価について, 平成25年度土木学会四国支部技術研究発表会, 第V部門, pp303-304, 2013
- 9)竹田宣典ほか: 種々の海洋環境条件におけるコンクリートの塩分浸透と鉄筋腐食に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.599, pp91-104, 1998.8
- 10)土木学会: コンクリート標準示方書[維持管理編], pp114-115, 2007
- 11)土木学会: コンクリート標準示方書[維持管理編], pp173-176, 2013
- 12)土木学会四国支部: 四国版フライアッシュを結合材として用いたコンクリートの配合設計・施工指針, pp139-143, 2016

レーザラマン分光法による小型光学式マルチガスセンサの開発

(株)四国総合研究所 電子技術部 市川 祐嗣
(株)四国総合研究所 電子技術部 荻田 将一
(株)四国総合研究所 電子技術部 星野 礼香
(株)四国総合研究所 電子技術部 杉本 幸代
(株)四国総合研究所 電子技術部 三木 啓史
(株)四国総合研究所 電子技術部 朝日 一平

キーワード : レーザラマン分光
マルチガスセンサ
光ファイバ
マイクロマシン技術

Key Words : Laser Raman Spectroscopy
Multi-gas Sensor
Optical Fiber
Micromachining Technique

Development of a compact optical multi-gas sensor by laser Raman spectroscopy

Shikoku Research Institute, Inc., Electronics Technology Department

Yuji Ichikawa, Masakazu Ogita, Ayako Hoshino, Sachiyo Sugimoto, Hirofumi Miki, Ippei Asahi

Abstract

A compact optical multi-gas sensor was developed using laser Raman spectroscopy. Its light source is a DPSS laser and its detector is a photomultiplier tube (side-on type). It has a micro sensing part called sensor chip. The sensor chip is connected to the light source and detector with optical fibers. Laser beam propagates through a transmission fiber and be emitted from the sensor chip to the air. The sensor chip collects Raman scattering light of target gas and transmit it to the detector through receiving fibers. To make the sensor chip compact, we applied micromachining techniques to make a micro optical bench (MOB) which can arrange small optics with high accuracy. A performance test was implemented and the result was that the sensor could detect 1% H₂ gas and 0.2% CH₄ gas.

1. はじめに

ガスセンサとは、ガスに感応してその存在を検知したり、ガス濃度を電気信号などに変換して出力したりする素子もしくは装置のことである。一般家庭におけるガス漏れ警報器から自動車エンジンの制御に至るまで広く使用されており、現代社会において無くてはならない技術となっている。検出対象となるガスは、都市ガスのような可燃性ガスから自動車・発電所の排ガス、産業用の特殊ガスまで多岐にわたり、それぞれのガスに応じた検出方式が必要となっている。現在主流となっている検出方法は、接触燃焼式、半導体式など、対象ガスの化学反応を利用したいわゆる化学センサであるが、使用条件が限定される場合が多く、ガスの選択性にも課題がある¹⁾²⁾。

著者らは、これらの背景を踏まえ、化学反応式のガスセンサに代わるものとして、光学的計測原理に基づいたガスセンサの開発に取り組んできた。光学式ガスセンサは、応答速度が速い、複数種のガスに対応できる、防爆構造が取りやすい等の長所があるものの、検出感度や装置の小型化などに課題があり、化学反応式と比較して普及が進んでいない。本研究では、波長 532nm の DPSS レーザを光源として使用し、検出対象のガスから発生するラマン散乱光を捉えることで計測を行う小型の光学式ガスセンサ（以下、本装置）の開発を行ったので、報告する。

2. 計測原理

2.1 ラマン効果

本装置は、光と物質の相互作用により生じるラマン効果を計測の原理とする。ラマン効果は、インドの物理学者 C. V. Raman によって 1928 年に発見された光学現象の一種であり、物質に光を入射させると、ラマン散乱光と呼ばれる入射光と異なった波長の光が発生する現象である。図 1 に Raman らが行った実験の概要を示す³⁾。レンズを用いて太陽光を絞り込み、試料に入射させると、試料中の太陽光の光路がはっきりと目視できた。次に、紫青色を透過して緑黄色を吸収する紫青フィルタと、緑黄色を透過して紫青色を吸収する緑黄フィルタの 2 つのフィルタを用意し、2 枚のフィルタを重ねて太陽光と試料の間に置くと、太陽光は 2 枚のフィルタによって完全に吸収され、試

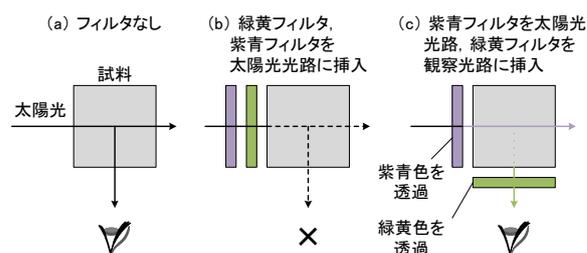


図 1 C. V. Raman らによる原理検証実験

料中の光路は見えなくなった。ところが、緑黄フィルタを試料と観察者の間に移動すると、再び太陽光の光路が目視できるようになった。これは、試料に入射した紫青色の光によってより波長の長い緑黄色の光が新たに発生したためである。このような現象が起こるのは、光を構成する光子と試料分子との間でエネルギーのやり取りが起るためである。ラマン散乱が起こる際には、入射光光子のもつエネルギーの一部が分子の内部エネルギーに変化し、光子のエネルギーがその分低下する。光のエネルギーと波長との間には、 $E = hc/\lambda$ で表される関係があるため、光子のエネルギーが低下すると、光の波長は長波長側にシフトすることになる。発生するラマン散乱光の強度は入射光の強度と比較して極めて弱く、また、試料が気体の場合にはさらに弱い。このため、ラマン散乱光の検出には、光電子増倍管等の高感度の光検出器が用いられる⁴⁾。

2.2 ガス種の同定・濃度計測

ガスを構成する分子の内部エネルギーは、連続的な値を取るのではなく、分子の種類によって決まった特定の値のみを取る（エネルギーの量子化）。これに対応して、ラマン効果によって発生するラマン散乱光も、ガス分子の種類によって決まる特定の波長となる。入射光の波長に対してラマン散乱光の波長がどの程度変化するかを示す値をラマンシフトといい、分子固有の値であるため、発生するラマン散乱光の波長を調べることで存在するガスの種類を同定することが可能である。表 1 に主なガスのラマンシフトおよび入射波長 532nm の場合のラマン散乱光の波長を示す。

発生するラマン散乱光の強度は、入射光と相互作用する分子の数に比例するため、同一の圧力の

下では、ガスの濃度に比例する。したがって、事前に検量線となるデータを取得しておくことで、ガス濃度を算出することができる。また、大気中での計測であれば、大気の約 8 割を占める窒素ガスによるラマン信号をリファレンスとして、対象ガスの濃度を計算できる⁵⁾⁶⁾⁷⁾。

このようにしてガス濃度の計測を行うためには、本装置によって検出されたラマン散乱光による信号の強度と、検出対象空間に存在するガスの濃度との間に線形の相関関係が成り立たねばならない。したがって、信号強度の線形性は本装置のガスセンサとしての性能を評価するにあたっての重要な指標の一つであり、線形性が高いほど正確な計測が可能であるといえる。

表 1 主なガスのラマンシフトおよびラマン散乱波長（ストークス光，入射波長 532nm）

	ラマンシフト [cm ⁻¹]	ラマン散乱波長 [nm]
水素	4160	683.2
メタン	3017	633.7
窒素	2331	607.3
酸素	1556	580.0
二酸化炭素	1285	571.0

3. 装置構成

3.1 概要

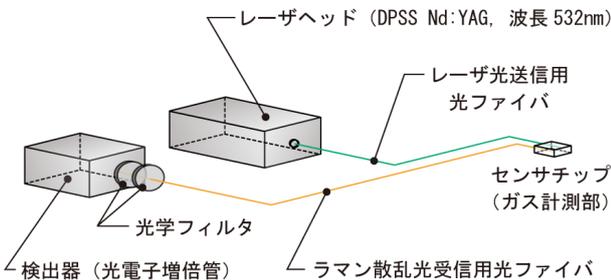


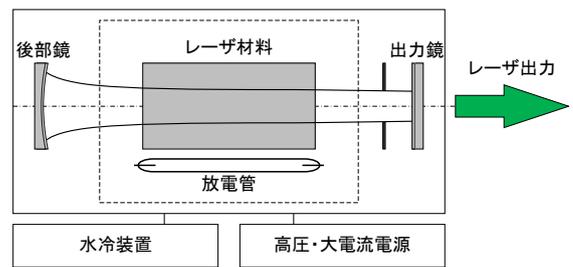
図 2 装置構成

本装置は、励起光源であるレーザ発振器，検出器である光電子増倍管，ガス計測を行う箇所に設置して使用するガス計測部（以下，センサチップ）

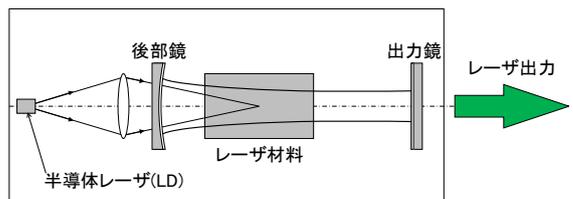
およびそれらを接続して光の送受信を行う光ファイバにより構成される。レーザヘッドから発振したレーザ光は送信用ファイバに導入され、センサチップ先端から計測対象となる空間に放射される。発生したラマン散乱光をセンサチップ内の受光光学系により集光し、受信用ファイバで検出器まで伝送する。配管や機器の内部等の狭隙部におけるガス濃度の計測を可能とするため、センサチップの小型化を目指して開発を行った。また、センサチップは光学部品および固定用の部材のみで構成されるため、回路等の電気系を一切含まず、可燃性ガスの検知が必要な場合にも防爆エリア内に設置することができる。

3.2 レーザ光源

励起光源として、DPSS / Nd:YAG レーザ（Spectra Physics 社製 Explorer）を使用した。発振波長は 532nm，パルスエネルギー 200μJ，パルス幅 3ns (FWHM)，繰り返し周波数 1kHz である。DPSS とは Diode Pumped Solid State の略で、半導体レーザによって励起された固体レーザの意である。従来のフラッシュランプ励起の固体レーザと比較して、小型，長寿命，高効率，高いビーム品質といった特徴をもつ。図 3 にフラッシュランプ励起固体レーザと DPSS レーザの基本構成の比較を示す。



(a) フラッシュランプ励起固体レーザ



(b) DPSS レーザ

図 3 レーザの基本構成の比較

従来のフラッシュランプ励起固体レーザーは、放電管を点灯・発光させるために高圧・大電流の電源を必要とし、放電管やレーザー媒質の冷却が必須であるため、レーザーヘッドおよびその周辺装置が大型化してしまう。また、ランプ光は発散光であり、効率よく集光してレーザー媒質を励起することが難しい。加えて、放電管の発光スペクトルは広範囲にわたり、レーザー媒質の励起に必要な波長の光のみを選択的に発生させることはできない。これらのことから、フラッシュランプ励起の固体レーザーでは、エネルギー効率を高めることが難しかった。

一方、DPSS レーザでは、フラッシュランプの代わりに半導体レーザー (Laser Diode, 以下 LD) によってレーザー媒質の励起を行う。1980 年代後半頃より LD の高出力化・長寿命化が実現されたことによって実用化が進んだ。LD はフラッシュランプと比較してスペクトル幅が数 nm と極めて狭く、また集光が容易であるため、レーザー媒質の吸収係数が高い波長域において、レーザー発振する空間領域のみを選択的に励起することができる。放電管励起 Nd:YAG レーザの場合、17%程度の吸収効率にとどまっていたのに対し、LD 励起の場合には、容易に 90%以上の吸収効率を得られる。これによりエネルギー効率が飛躍的に向上し、レーザーの高出力化の際に問題となっていた発熱が抑制され、小型・高効率化、高安定動作が可能となった。LD 励起による DPSS レーザの実現により、固体レーザーの可能性が大きく広がったといえる⁸⁾。

3.3 光ファイバによるレーザー光の伝送

一般に、光学式的气体センサは、レーザー発振器や光検出器、光学部品やその固定具など、多数の部品からなる大型の装置であることが多く、設置できる場所が限られていた。

そこで、ガスの計測地点に必要な要素だけをまとめて集積配置したセンサチップを製作し、装置本体と光ファイバで接続して励起用レーザー光の送信およびラマン散乱光の受信を行う構成とすることで、計測地点の選択において高い自由度をもたせることを可能にした。一般的な光ファイバの構造を図 4 に示す。屈折率の異なるコアとクラッドの境界面での全反射により、低損失で光を伝送することができる。光ファイバを延設すること

で、装置本体から離れた地点や機器内部等の狭隘部においてもガス濃度の計測が可能である。

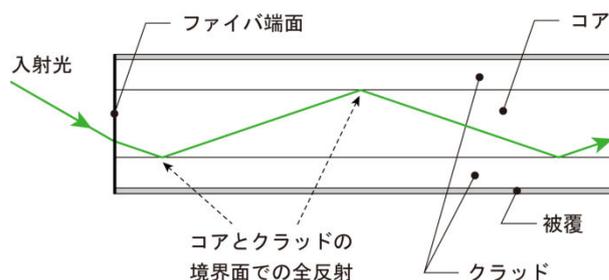


図 4 光ファイバの構造

励起光であるレーザー光をセンサチップまで伝送する際、最も大きく損失が生じるのは、レーザー本体から自由空間中に発振されたレーザー光が、光ファイバの端面からファイバ内部に入射（結合）する部分である。発生するラマン散乱光の強度は励起光のエネルギーに比例するため、センサとしての感度を高めるには結合効率を高くする必要がある。そのため、図 5 に示すような結合試験を行い、効率を高めるための条件について検討した。

レーザーをファイバに入射させるには、カップリングレンズによってレーザーのビーム径をファイバのコア径以下に絞る必要がある。コア径の大きなマルチモードファイバを使用すれば、レーザー光のファイバへの結合は容易であるが、センサチップ側で出射する際にビームの広がり角が大きくなり、迷光等の悪影響が出やすくなる。反対にコア径を小さくしすぎると、レーザーのエネルギー密度が高くなり、ファイバ端面の損傷が起きやすくなる。本装置のレーザーパルスエネルギーは $200\mu\text{J}$ であり、石英ファイバ端面の損傷閾値を 26 J/cm^2 とする⁹⁾¹⁰⁾と、ファイバのコア径がおおよそ $20\mu\text{m}$ 以上では、端面の石英に損傷は起こらないと考えられる。しかし実際には、ファイバへの結合試験中に端面の損傷がたびたび起こった。これは、ファイバのコネクタもしくはフェルルールとファイバ素線を接着しているエポキシ接着剤の損傷が主な原因ではないかと考えられる。本装置で使用するレーザーは、比較的エネルギーが高く、強く集光するとエポキシが焼けて蒸発し、残留物が端面に付着するため、そこから損傷が生じるものと考えられる。ここでは、損傷を防ぎつつ、迷光等の影響

を最小限に抑えるため、使用するファイバのコア径を $200\mu\text{m}$ とした。レンズとファイバ端面の距離を調整し、端面でのレーザのエネルギー密度を最適化することにより、損傷のリスクが減り、8割程度の効率で結合することができるようになった。

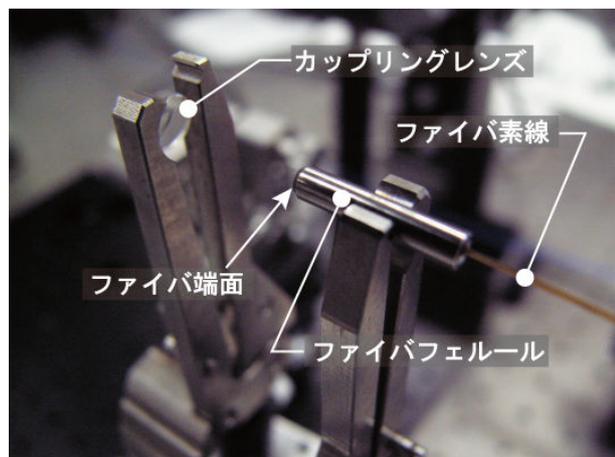
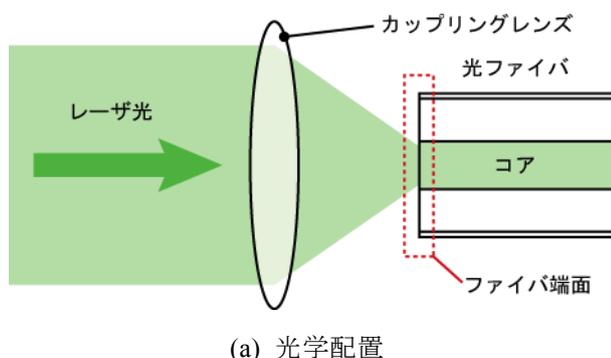


図5 レーザの光ファイバへの結合

3.4 センサチップ

本装置では、観測箇所にセンサチップを配置し、光ファイバにより伝送されたレーザ光をセンサチップ前方の空間に照射する。これに伴い、対象となるガス分子により生じたラマン散乱光を集光するとともに、受信用光ファイバに結合し、検出器まで伝送する。

センサチップは小型であるほど、本装置の用途は拡大する。一方で、ラマン散乱光は極めて微弱であるため、一般的には感度を確保するために比較的大口径の集光レンズが用いられる。このよう

に、従来の概念では、ラマン分光計測にあたり光送受信光学系の小型化と、感度の確保は二律背反の関係にあり、実用上、小型化は困難であると考えられてきた。

そこで、著者らは、送受信光学系の集積化による小型化とラマン散乱光の高い集光性能の両立の可能性について検討を行い、ラマン散乱光の励起光源と集光光学系を可能な限り接近させることにより、小口径のレンズによっても大きな受光立体角を確保することができ、得られるラマン散乱光強度を高めることができることを見出した。図6にセンサチップの送受信光学系配置を示す。

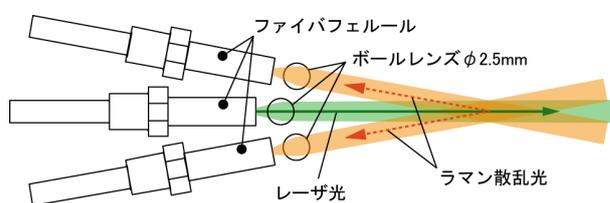


図6 センサチップの光学系配置

図6に示すとおり、送信光ファイバから照射されたレーザ光をマイクロレンズ(Edmund社製BK7ボールレンズ、 $\phi 2.5\text{mm}$)によりコリメートし、観測空間へ照射した。ラマン散乱光は、レーザ光軸に垂直な断面において、電場の振動方向に対し直角方向に強く放射される指向性を有するが、光ファイバ伝送されたレーザ光は、偏光が崩れるため、本装置ではレーザ光軸の周囲全方位に一樣に放射される。ここでは、そのうち後方散乱と呼ばれる、レーザ光の進行方向に対し反対の方向に放射されるラマン散乱光を取得する形式とした。これにより、センサチップ前方へ光の放射を行う端子とラマン散乱光を集光する端子を同一方向に向けて集積することが可能となり、小型化できるとともに取回しが簡便となる。

また、集光光学系の配置は、受光感度向上のため、2チャンネルの受光系を設けるとともに受信光ファイバの視野が長距離にわたってレーザビームと交差する無限共役比デザインを採用した。

これらの光学系は、光学部品としては極めて小型となるマイクロレンズや光ファイバフェルールにより構築され、配置を精度良く実現する必要がある。また、一般に光学系の高精度配置は光学

ステージ等の高精度アライメント機構により実現されるものであるが、これらの機構の使用はセンサチップの大型化につながる。

そのため著者らは、小型光学部品をアライメントフリーで高精度配置することができる小型光学ベンチ (Micro Optical Bench, 以下 MOB) を新たに開発した。MOB の製作にあたっては、マイクロマシン技術を適用することにより、小型化および高精度化を実現した。開発した MOB に光学部品を配置したセンサチップの外観を図 7 に示す。

センサチップの MOB は、ガラス基板上にそれぞれの光学部品を高精度配置・固定するための厚膜樹脂構造体をフォトリソグラフィにより形成した構造となっている。マイクロマシン技術における樹脂構造形成の一般的な寸法オーダは数十～数百 μm であるが、これを小型光学部品への適用が可能な数 mm オーダまで引き上げることで、本装置の MOB の製作が可能となる。このため、従来のフォトリソグラフィにおけるプロセスに基づき、寸法精度を確保しつつ、厚膜の樹脂構造を形成することができるプロセス技術を開発し、MOB の製作に適用した。

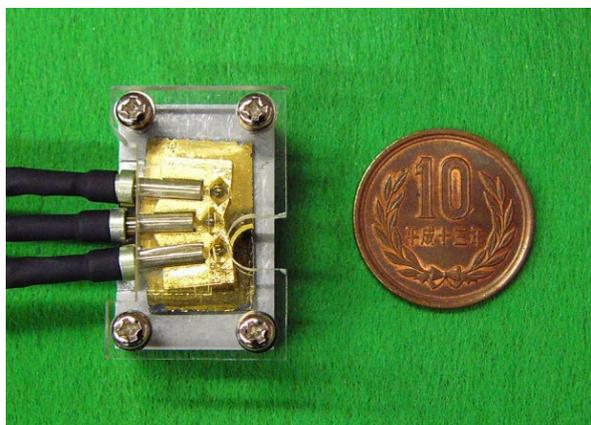


図 7 MOB により小型光学部品が集積配置されたセンサチップ外観

3.5 検出部

(1) 光電子増倍管

ラマン散乱光は極めて微弱な光であり、精度良く検出するためには高感度の光検出器が必要となる。現在一般的に使用されている光検出器の中で最も感度が高いのは、光電子増倍管 (Photo Multiplier Tube, PMT) である。

一般に、光を検出して数値化・データ化を行うためには、光電効果によって光のエネルギーを電流・電圧といった電気信号に変換し、処理する必要がある。光電効果とは、物質に光を照射した際に物質の表面から電子が放出される現象のことであり、この原理を利用した光検出器に光電管がある。光電子増倍管は、この光電管を応用したものであり、図 8 に示すような構造をもつ。

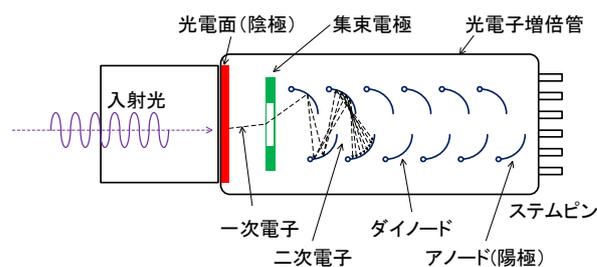


図 8 光電子増倍管の構造

陰極と陽極の間に 1000V 程度の高い電圧をかけ、陰極から放出された電子を増幅させて取り出すことで、光電面に入射する光を高い感度で検出することができる。光電子増倍管には大きく分けてヘッドオン型とサイドオン型の 2 つのタイプがあるが、本装置では、検出感度のより高いサイドオン型の光電子増倍管 (浜松ホトニクス社製 R3896) を使用した。

(2) 光学フィルタ

ラマン散乱光を検出するには、レーザ光や他の散乱光・蛍光等から波長選択によって分離する必要がある。波長分離の方法には、回折格子・プリズムにより分光する方法と、光学フィルタにより波長選択を行う方法があるが、本装置では、光学フィルタによって波長選択を行った後、光電子増倍管に光を入射させる構成とした (図 9)。

受信ファイバによって伝送された光には、対象ガスによって生じたラマン散乱光以外にも、レーザ光と同波長の散乱光であるレイリー散乱光、レーザの反射等により受光系に混入した迷光、レーザの照射によって発生する蛍光等が含まれている。受信ファイバから出射した光は、コリメートレンズによって平行光とした後、まずロングパスエッジフィルタ (レーザ光透過率 0.0001%以下、ラマン散乱光透過率 95%以上) によってレーザ波

長とそれよりも短い波長成分が除かれる。その後、対象ガスのラマン散乱波長に合致した透過特性をもつバンドパスフィルタによってさらに波長選択され、光電子増倍管の光電面に入射する。バンドパスフィルタを対象ガスに応じて切り替えることにより、様々なガスに対応することのできるマルチガスセンサとして使用できる。

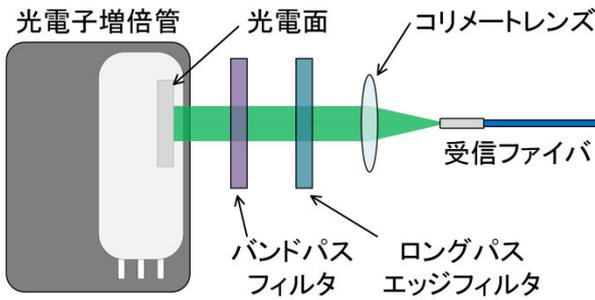


図9 受信光学系の構成

4. 性能検証試験

製作した小型ガスセンサを用いて、ガス濃度計測試験を行った。対象ガスとして、 CH_4 （メタン）および H_2 （水素）を使用した。試験では、ガスセルにセンサチップを挿入し、フロート式流量計で N_2 （窒素）ガスとの流量比を調整することによって濃度制御を行った。

被検ガスとして CH_4 を使用した場合に発生するラマン散乱光の波長は、励起波長 532nm に対して 634nm、 H_2 の場合には 683nm となる。これらの波長は、大気中の窒素（607nm）および酸素（580nm）のラマン散乱波長から十分離れているため、バンドパスフィルタによって波長分離でき、大気中での計測が可能である。

ラマン散乱光信号はレーザー光のパルス発振と同期してオシロスコープ（Tektronix DPO7104）で取得し、512回の平均化処理を行った。 CH_4 ガスからのラマン散乱光信号の測定結果例を図10に、 H_2 および CH_4 ガスからのラマン散乱光信号ピーク値とガス濃度の相関を図11に示す。

図10のラマン散乱光信号の時間波形は、レーザーのパルス幅が 3ns（FWHM）であるのに対して 12ns（FWHM）程度の幅をもっているが、これは、検出器である光電子増倍管の特性によるものである。光電面（陰極）から飛び出した電子が増幅されて陽極に到達するまでの時間を電子走行時

間と呼び、これには時間的なばらつきがあるため、走行時間が長いと実際の信号のパルス幅よりも広がって検出される。また、信号の上昇（5.5ns）と下降（3.6ns）にも一定の時間を要する。本装置で使用したサイドオン型の光電子増倍管は、高い感度を有する反面、構造的に電子走行時間が長くなり、パルス幅が実際よりも広くなるという特徴がある。

図11の信号ピーク値とガス濃度の間には、良好な線形の相関関係があることが見て取れる。本センサの検出下限は、 H_2 ガスでは 1%、 CH_4 ガスでは 0.2%であった。 H_2 ガスに関しては、爆発下限濃度である 4%の1/4にあたる 1%のガスを検出することができているが、実用に際してはさらにその 1/10にあたる 0.1%を検知する必要がある。受信光ファイバのコア径や受光レンズの径を拡大することによって信号強度の増加が見込めるため、今後、改良により高感度化することが可能であると考えられる。

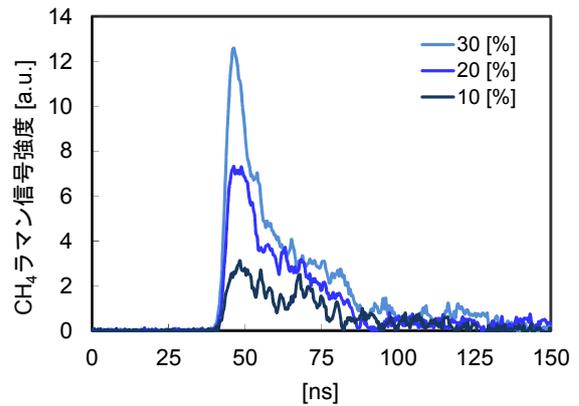


図10 CH_4 ラマン信号（時間波形）

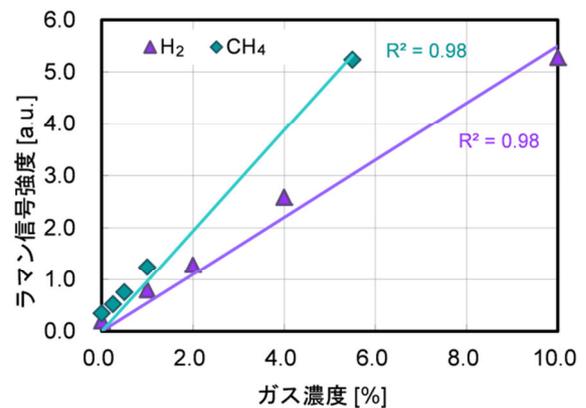


図11 ラマン信号ピーク値とガス濃度の相関

5. まとめ

DPSS / Nd:YAG レーザ（発振波長 532nm, パルスエネルギー 200 μ J, 繰り返し周波数 1kHz）を励起光源とし、ラマン効果を検出原理とする小型の光学式ガスセンサの開発を行った。

ファイバ伝送式とすることで装置の適用範囲が広がった。また、マイクロマシン技術により、狭隘部に設置して計測することのできる小型のセンサチップ（MOB）を製作した。

性能検証試験の結果、H₂ ガスの場合には 1%、CH₄ ガスの場合には 0.2%まで検出可能であり、信号強度の線形性も良好であることを確認した。

今後は、現場での適用を視野に、光源・検出器・信号処理装置等を一体化した可搬型装置本体の製作や、光学配置の検討による検出感度の向上に取り組んでいく予定である。

【謝辞】

本研究開発の一部は、平成 22, 23 年度経済産業省地域イノベーション創出研究開発事業の一環として行われたものであり、関係者各位に深く感謝致します。

【参考文献】

- 1) 三浦則雄：「化学レポート：現状と将来 ディビジョン 10, 分析化学, 1-4-6 ガスセンサー」, 日本化学会 (2008)
- 2) 小林哲彦：「水素および可燃性ガスセンサ技術」, 水素エネルギーシステム, Vol.19, No.1, pp.496-51, (1994)
- 3) 濱口宏夫, 岩田耕一 編著：「ラマン分光法」, 講談社 (2015)
- 4) Derek A. Long: “The Raman Effect”, John Wiley and Sons, pp.3-152 (2002)
- 5) R. M. Measures: “Laser Remote Sensing”, John Wiley and Sons, New York, p.108 (1984)
- 6) 朝日一平 他：「低出力レーザー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)
- 7) 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)
- 8) レーザー学会編：「レーザーハンドブック」, オーム社, pp.311-319 (2005)
- 9) B. C. Stuart, M. D. Feit, A. M. Rubenchik, B. W. Shore, M. D. Perry: “Laser-Induced Damage in Dielectrics with Nanosecond to Subpicosecond Pulses”, Phys. Rev. Lett. 74 (1995)
- 10) B. C. Stuart, M. D. Feit, A. M. Rubenchik, B. W. Shore, M. D. Perry: “Nanosecond to femtosecond laser-induced breakdown in dielectrics”, Phys. Rev. B53 (1996)

レーザー吸収分光方式による可搬型 NH₃ 濃度測定装置の開発

(株)四国総合研究所 エネルギー技術部 市川 幸司
(株)四国総合研究所 エネルギー技術部 海稻 隆成

キーワード : 脱硝装置
NH₃ 濃度
排ガスサンプリング
セル一体型プローブ
レーザー吸収分光方式
可搬型測定装置

Key Words : Denitration equipment
Ammonia concentration
Exhaust gas sampling
Cell integrated probe
Laser absorption spectroscopy
Portable analyzer

Development of a Portable NH₃ Analyzer Based on Laser Absorption Spectroscopy

Shikoku Research Institute, Inc., Energy Engineering Department

Koji Ichikawa, Takashige Kaine

Abstract

We developed a portable analyzer based on laser absorption spectroscopy using a transmission type gas sensor, in order to measure NH₃ concentration efficiently and precisely in a gas duct of a coal-fired power plant.

In general, NH₃ concentration is one of the most important criteria to confirm denitration efficiency of a catalyst and a dispersed state of NH₃ in the duct. NH₃ is a most adsorptive and desorptive substance contained in exhaust gas of boiler. Accordingly, it is very difficult to sample and analyze NH₃. It had been sampled regularly at an outlet of denitration equipment and measured by manual analysis at a chemical laboratory. However, it is time consuming work by chemical specialists, and is intermittent measuring.

In this paper, we describe the portable analyzer with a cell integrated probe and a position adjusting mechanism of projector/receiver. The analyzer can realize to sample the exhaust gas stably and to measure NH₃ concentration in real time at many measuring points while moving along a passage on the duct.

1. はじめに

石炭火力発電所では、ボイラ排ガス処理系統の主要設備である脱硝装置の運用管理のため、煙道内の排ガスを対象に NH₃ (アンモニア) の濃度分布測定を定期的実施している。この分布測定は手間のかかる長時間作業となっており、また手分析による間欠測定であるため、従来からリアルタイムに濃度を測定できる測定装置の開発が望まれていた。

そこで当所では、手分析作業の代替用として、保守が容易で小型軽量化にも適したレーザー吸収分光方式を採用し、排ガス中の NH₃ 濃度を精度よくリアルタイムに測定でき、かつ操作性の高い可搬型の NH₃ 濃度測定装置を開発し、様々な観点から実用性能を検証している。実験室で試作装置の基本性能を確認のうえ、脱硝装置の各部(上部・中間部・出口)で NH₃ 濃度測定試験を開始し、脱硝出口では既に良好な結果が得られている。

本稿では、開発の背景、試作装置の測定方式と基本仕様について説明した後、実験室および脱硝出口での試験結果を示し、本装置の実用性能に関する考察と今後の装置活用に向けた展望を述べる。

2. 開発の背景

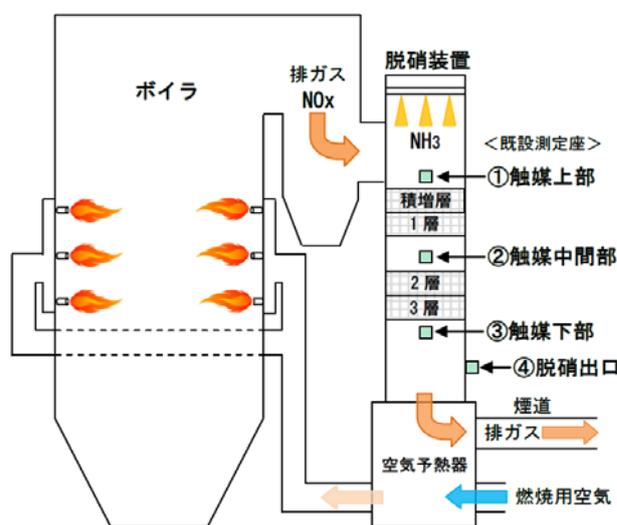
石炭火力発電所のボイラ排ガス中に含まれる NO_x(窒素酸化物)は、煙道の排ガス処理設備を経由して煙突から大気中に排出される。この代表的な大気汚染物質である NO_x の排出量を低減するため、ボイラの直後には脱硝装置が設置されている。脱硝装置では、排ガス中に NO_x 還元剤として NH₃ を注入し、そのガスが高温の触媒層を通過する際に、NO_x と NH₃ が選択的に反応して無害な N₂(窒素)と H₂O(水蒸気)に変換される。この方法による NO_x 低減は SCR(選択触媒還元)と呼ばれ、発電プラントにおける最も標準的な脱硝方式である。脱硝装置と NH₃ 測定座の状況を図 1 に示す。

脱硝装置が所期の性能を発揮するためには、運転状況に応じて過不足なく NH₃ 注入量を制御し、かつ触媒層に対して NH₃ を均等に分散注入しなければならない。ここで、NH₃ の過剰注入や脱硝触媒の性能低下が生じると、脱硝装置の出口におけるリーク(未反応)NH₃濃度が上昇し、この NH₃ が排ガス中の三酸化硫黄(SO₃)と反応して酸性硫酸(NH₄HSO₄)が生成される。粘着性の高い酸性硫酸は、排ガス中の煤塵とともに後流の空気予熱器(AH)熱交換エレ

メントに付着して閉塞を引き起こし、プラントの安定運転を阻害する要因となっている。1)2)

従って、石炭火力発電所における脱硝装置の適切な運用と性能維持は不可欠であり、そのためには NH₃ の注入量および注入バランスを把握しておく必要がある。その具体的な手段として、脱硝出口(煙道内)の NH₃ 濃度分布測定は非常に重要な作業であり、発電所では煙道(通路上)を移動しながら、脱硝出口の各測定座を対象に、短時間で簡単に NH₃ 濃度を測定できる装置へのニーズが高い。

また、高価な触媒の取替周期延長や部分取替によるコスト低減に向けて、脱硝各部(上部・中間部・出口)での NH₃ 濃度測定に基づく触媒性能評価への装置活用も期待されている。



(a)脱硝各部における測定座の配置

測定座周辺



NH₃ 測定座



(b)脱硝上部の状況(上図(a)の①)

測定座周辺(煙道通路)



NH₃ 測定座



(c)脱硝出口の状況(上図(a)の④)

図 1 脱硝装置と NH₃ 測定座

2.1 NH₃濃度測定方式の比較

ボイラ排ガスを対象とした代表的な NH₃ 濃度測定手法として、一般に NO_x 変換方式(間接測定)とレーザー吸収分光方式(直接測定)が知られている。

前者は従来から日本国内での使用実績が豊富な技術であるが、処理が複雑で保守面に課題がある。後者は欧米を中心に実用化が進んでいる新しい技術で、応答が速く点検保守が容易なことから、海外では急速に普及しつつあり、将来的には国内でも普及する可能性が高い。

(1) NO_x 変換方式

高温触媒を用いてサンプル排ガス中の NH₃ と NO_x を反応させ、それに伴う NO_x の濃度変化を化学発光式または非分散型赤外吸収式の NO_x 計で測定し、間接的に NH₃ 濃度を求める方法である。

図 2 に示すとおり、触媒を通過した排ガスと通過していない排ガスについて、それぞれ NO_x 濃度を測定し、両者の差分から等価的に NH₃ 濃度を算出する。NO_x に変換した時点でサンプリングは容易になるが、差分に伴う誤差(計器差・系統差)が避けられない。同方式による NH₃ 分析計は、従来から発電所で使用されてきたが、低濃度域では十分な性能を発揮できていないのが実情である。

また、サンプル排ガス中の煤塵や水分を除去して NO_x 計内部の汚損を防止するため、大型の前処理装置が設置されており、保守点検が課題となっている。

(2) レーザ吸収分光方式

NH₃ を直接測定する方法である。近赤外領域における NH₃ 固有の光吸収特性(波長 1.5 μm・2.0 μm・2.2 μm)に着目した分光測定が一般的であり、広く普及している通信用 LD(半導体レーザー)を活用できることから、1.5 μm 帯を対象とした測定方式(センサ)が主流となっている。

透過型(シングルパス式)・反射型(デュアルパス式)・多重反射型(マルチパス式)の 3 種類があり、基本的に、透過型は煙道に対向設置して、反射型は煙道に直接挿入して、多重反射型は煙道から排ガスをサンプリングして測定する用途に適している。

2.2 レーザ吸収分光方式の優位性

上述の状況を踏まえ、現場での耐久性・操作性・保守性、また小型軽量化の必要性等も勘案すると、レーザー吸収分光方式の優位性が高い。

ここでは、それぞれ特徴のある 3 種類のレーザー吸収

分光方式について、可搬型装置の開発と実機適用を念頭におき、以下のとおり具体的な比較検討を加える。

(1) 透過型(シングルパス式)

投光器から照射されたレーザー光を受光器で直接受光する方式であり、図 3(a) に示すとおり通常は非サンプリング(煙道対向設置)測定に適用される。この方式では、煙道の両側にガイド管を取付けて実質的な光路長を短縮し、煤塵による受光レベルの低下を抑制する必要がある。同方式による常設型装置に関しては、他社の先駆的な取組みがあり、実機での有効性を示す試験結果が報告されている。3)

一方、可搬型装置の開発を念頭において、この透過型を図 3(b) のようにサンプリング測定に適用すると、その原理上、セル分離(排ガス流入経路と光学系の分離)が可能である。投光部と受光部の間にセル(両端ガラス)を配置し、セル内に排ガスを吸引する方法、すなわち「セル分離型・シングルパス・レーザー吸収分光方式」を採用すれば、従来からサンプリング測定において常に問題となってきた排ガス流入による汚損の影響を大幅に軽減できる。また、セル両端ガラスの内面が汚損された場合でも、セル分離型であればガラスの取外しが可能な構造とすることができ、清掃等の対応も容易となる。

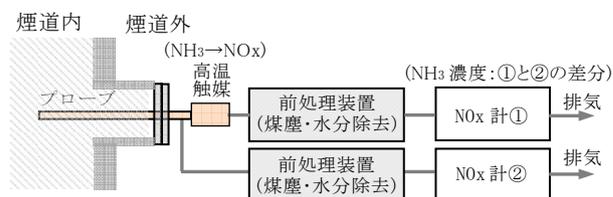
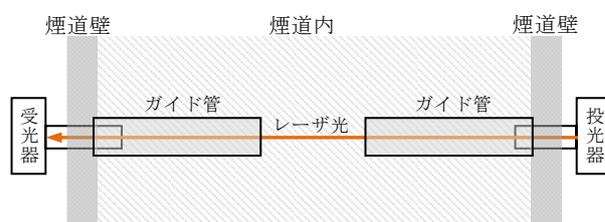
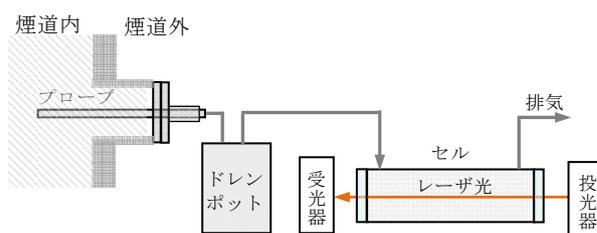


図 2 NO_x 変換方式による NH₃ 濃度測定の基本構成



(a)非サンプリング方式(煙道壁に対向設置)



(b)サンプリング方式(煙道外に設置・排ガス吸引)

図 3 透過型(シングルパス式)の現場適用イメージ

但し、一光路(シングルパス)におけるレーザー光の光量変化を測定するので、セル長(光路長)によって検出感度が制約され、低濃度域で十分な測定性能を得られない可能性がある。

(2) 反射型(デュアルパス式)

投光器から照射されたレーザー光をミラーで1回だけ反射して受光器で検出する方式であり、図4に示すとおり通常は非サンプリング(煙道直接挿入)測定に適用される。

反射型に関しては、以前の研究で代表点の傾向監視用として常設型 NH₃ 測定装置を別途開発し、H22年から四国電力(株)橋本発電所の脱硝出口で実運用中である。排ガス温度が低下した場合にプローブ(セラミックフィルタ)への NH₃ 吸着等によって測定誤差が生じるが、プラント定常運転時(排ガス温度 350℃以上)における稼働状況は良好である。煙道内の排ガスが同フィルタを浸透通過してプローブ内(光路長上)に達し、測定値に反映されるまでに90秒ほど時間遅れはあるが、実用上の支障はない。4)

また同装置は、定期的な自動ゼロ校正機能によってドリフトを抑制し、長期間に亘って測定精度を維持できる。ゼロ校正前後の測定値に若干の差異が生じる場合はあるが、ほぼメンテナンスフリーで長期連続稼働できていることから、実機でのレーザー吸収分光方式および反射型の有効性を示す一例であると言える。但し、同装置のプローブは堅牢かつ大型の重量物であり、移動測定には不向きである。

一方、サンプリングによる複数点の移動測定・リアルタイム測定を前提とした可搬型装置の開発において、反射型の測定方式を適用すると、後述の多重反射型と同様、排ガス流入に伴うミラー汚損が避けられないため実用的ではない。

(3) 多重反射型(マルチパス式)

図5(a)に示すとおり、投光器から照射されたレーザー光をミラーで繰返し反射して受光器で検出する方式であり、光路長を最も長く確保でき高感度であるため、低濃度域の NH₃ 測定に適している。

多重反射型に関しては、事前に現場試験を行ったが、排ガスが多重反射セルに直接流入するため、煤塵の多い石炭火力プラントでは特に内部ミラーの汚損が問題となる。一体化されたセルとミラーが200℃以上に加熱された状態となっており、ミラーが汚損されても簡単に取外すことができないため、保守面にも大きな課題があり実用的ではない。

2.3 可搬型装置開発における課題と透過型の採用

現場でのサンプリング機能を必要とする可搬型の装置開発においては、上述のとおり排ガス流入経路と光学系をガラスで分離することにより、光学系の汚損を防止して測定性能を維持でき、かつ保守も容易なことから透過型が最も実用的であると考えられる。

また、光学系の汚損と並んで課題となるのは、排ガスのサンプリング方法である。NH₃は吸脱着性が高く、しかも排ガス中には煤塵や水分も含まれているため、煙道内からガス状の NH₃ を安定的にサンプリングすることは非常に難しい。また、煙道における多数の測定座を対象に、NH₃ の移動測定を効率的に短時間で実施するためには、プローブの着脱やセルの位置調整が容易で、しかも現場での繰返し操作に耐える強度と気密性を確保することも不可欠である。

これらの課題を解決するため、図6に示す加熱プローブと加熱セルの一体化や嵌合接続によるプローブ着脱方式のほか、セル位置を自在に調整できるスライドレール方式等の採用について検討し、試行錯誤を重ねながら装置開発を進めた。

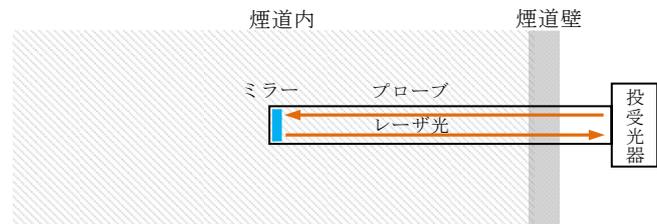


図4 反射型(デュアルパス式)の現場適用イメージ

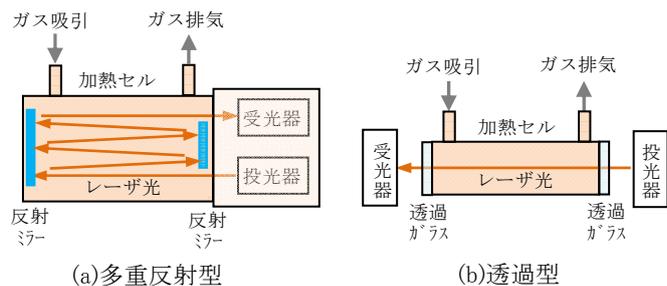


図5 多重反射型と透過型の原理比較

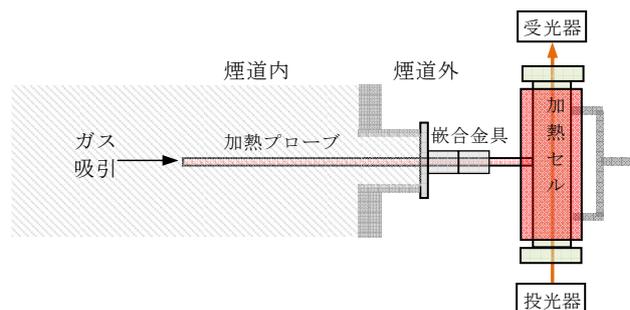


図6 加熱プローブ・セルの一体化と嵌合接続の考案

3. 試作装置の設計製作

上述の比較検討結果を踏まえ、最も実用性が高いと考えられる透過型(シングルパス式)を採用し、「セル分離型・シングルパス・レーザー吸収分光方式」の試作装置を設計製作した。

3.1 測定方式

試作装置は、排ガスをサンプリングして加熱セルに導き、レーザー光を照射して NH₃ 固有の波長における吸光量を計測し、その値に圧力・温度補正を加えて濃度を算出している。基本構成を図 7 に、NH₃ の吸収スペクトルを図 8 に示す。

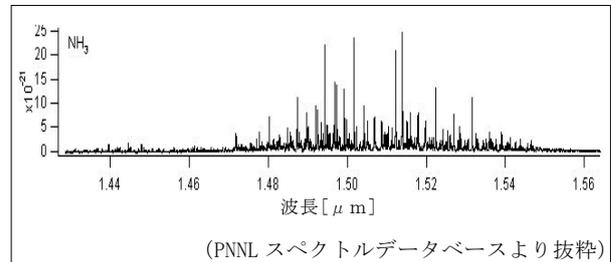
一般に、物質(分子)の固有状態(エネルギー準位)は不連続の値をとり、各状態間の準位差と等しいエネルギーをもつ光が照射されると、分子は光を吸収して励起され、エネルギーの低い準位(基底状態)からエネルギーの高い準位(励起状態)に遷移する。この過程において、個々の物質は種類ごとに異なった光吸収特性を示すことが知られている。吸収分光法は、この特性(吸収スペクトル)を調べることにより物質を特定する手法である。

ここで、ランベルト・ベールの法則によると、気体中における吸光量は分子数(濃度)と光路長(セル長)に比例する。またボイル・シャルルの法則によると、一定体積の気体中に存在する分子数は、圧力と比例関係に、温度と反比例関係にあり、それらの関係は

気体の状態方程式として記述される。更に、アボガドロの法則によると、その分子数は気体の種類に依存しない。

これらの基本原理を踏まえ、レーザー吸収分光方式によって排ガス中の NH₃ 濃度を測定する場合、NH₃ の吸収波長と同波長のレーザー光を照射して吸光量を計測し、ランベルト・ベールの法則に基づいて濃度に換算する。その値に対して、状態方程式に準じた圧力補正と温度補正を行えば、セル内の NH₃ 濃度を正確に算出できる。

なお、ランベルト・ベールの法則は NH₃ 手分析(吸光光度法による比色分析)の基本原理でもある。



ランベルト・ベールの法則

$$\text{吸光度} = -\log(I/I_0) = \epsilon c L$$

ϵ : 吸光係数

c : 濃度

L : 光路長(セル長)

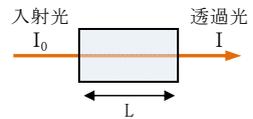


図 8 NH₃ の吸収スペクトルと測定の基本原理

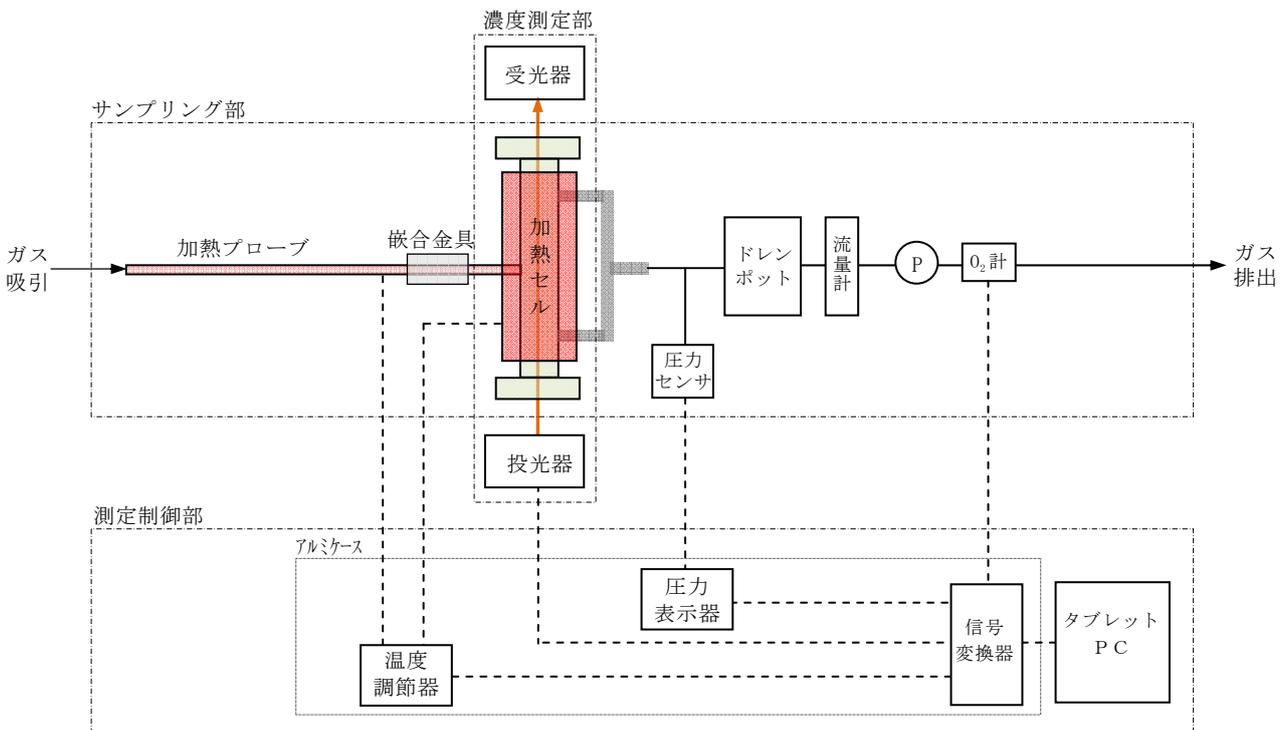


図 7 試作装置の基本構成

3.2 装置仕様

試作装置は、サンプリング部・濃度測定部・測定制御部から構成され、煙道通路を移動しながら、各測定座で容易にプローブの抜き差しを行い、リアルタイムに NH₃ 濃度を測定できる仕様となっている。装置の外観を図 9 に、測定画面を図 10 に示す。

(1) サンプリング部

サンプリング部に関しては、上述のセル一体型プローブや金属管嵌合接続方式等を考案し、煙道通路の移動測定におけるプローブ抜き差しの時間短縮を図ったほか、O₂ 計により気密性(エアリーク)を常時確認できる仕様となっている。

現場での操作性向上を図るため、測定性能への影響を十分に確認しながら、セル長は350mmまで、プローブ長は600mmまで短縮した。セルはマントルヒータで、プローブはフレキシヒータで所定の温度まで加熱している。

なお、材質はセルおよびプローブともにSUS304である。一般にSUS316の方が耐腐食性は高いが、NH₃ のサンプリングには適していないことが報告されている。5)

(2) 濃度測定部(投受光部)

濃度測定部は、セル内に吸引されたガスに対して投光器からレーザー光を照射し、受光器で透過光(吸光量)を計測する。この吸光量から圧力・温度補正前の NH₃ 濃度を算出してタブレット PC に送信する。

投光器と受光器の間にセルを配置し、投受光器がセル両端の特殊ガラスによって完全に分離されているため、排ガス流入による光学系(投受光器側)の汚損は生じない。但し、セル両端のガラス内面は、排ガス流入に伴う経時的な汚損が避けられないため、現場で簡単に取外し清掃できるよう、ガラスの着脱が容易な構造となっている。

また、各測定座の位置に合わせてセル位置を自在に調整できるよう、スライドレール式移動機構による水平位置調整およびアルミジャッキによる高さ調整の機能を備えている。

(3) 測定制御部

測定制御部については、温度調節器と圧力表示器をアルミケースに収納し、信号変換器経由で同ケースとタブレット PC を USB ケーブル 1 本で接続する構成となっている。

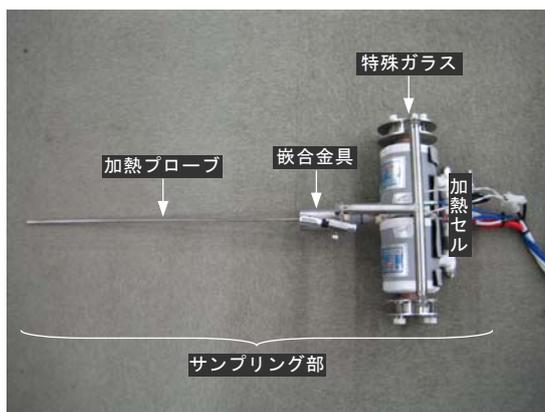
タブレット PC は、投受光器・温度調節器・圧力表示器にコマンドを送信してデータを取得し、各種の演

算制御・補正処理および画面表示処理を実行する。

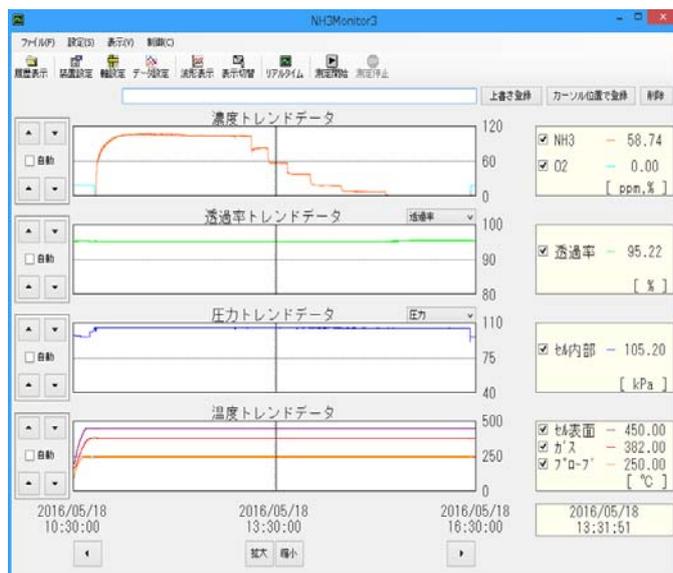
これにより、セルの圧力と温度に応じた NH₃ 濃度補正を行い、濃度(リアルタイム・ヒストリカル)トレンドグラフやスペクトル波形を表示し、測定精度の確保ならびに視認性・操作性の向上を図っている。



(a)試作装置全体



(b)セル一体型プローブ
図 9 試作装置の外観



(濃度階段試験時の表示例)

図 10 タブレット PC の測定画面

4. 試作装置の性能評価

実験室および現場(脱硝出口)で試作装置の性能評価試験を行い、以下のとおり良好な測定結果が得られている。なお、装置の基本仕様を表 1 に示す。

4.1 実験室での測定試験

実験室では、実機を模擬した測定座とガイド管を製作し、そのガイド管にセル一体型プローブを装着して試験を行った。標準ガス(NH₃・N₂)は、流量調整器(マスフローコントローラ)経由でガイド管の先端から供給した。

低濃度域と高濃度域において測定試験を行い、下記のとおり、所期の目標精度を達成できている。試験システムを図 11 に、試験状況を図 12 に示す。

(1) 低濃度域の測定性能評価

低濃度域に関しては、5ppm から 1ppm ずつ濃度を下げていく階段試験を行った。その結果、図 13 に示すとおり、測定値は供給ガス濃度に対して±0.5ppm の範囲内で安定推移し、目標精度を十分満足するデータが得られた。この濃度域では吸脱着の影響が顕著となるため誤差を生じやすいが、サンプル流量など試験条件を最適化することで精度よく測定できている。

(2) 高濃度域の測定性能評価

高濃度域に関しては、100ppm から 20ppm ずつ濃度を下げていく階段試験を行った。その結果、図 14 に示すとおり、測定値は供給ガス濃度に対して±5.0%の範囲内に収まっており、低濃度域と同様に目標精度を十分満足するデータが得られた。

なお、実験室における測定値と手分析値との比較試験結果については割愛するが、低濃度域・高濃度域において両者の高い相関性を確認できている。

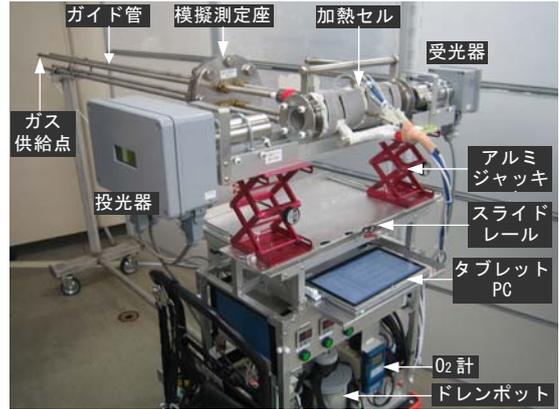


図 12 実験室での試験状況

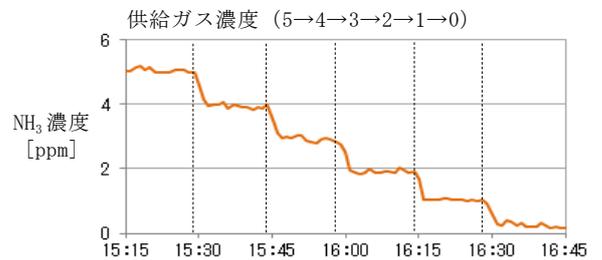


図 13 低濃度域の試験データ

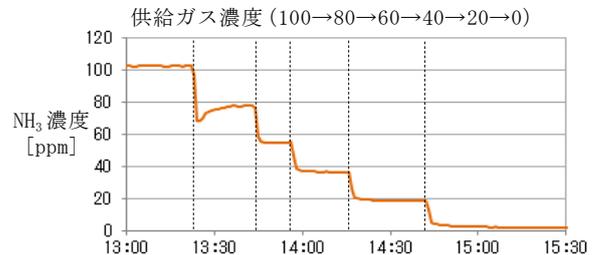


図 14 高濃度域の試験データ

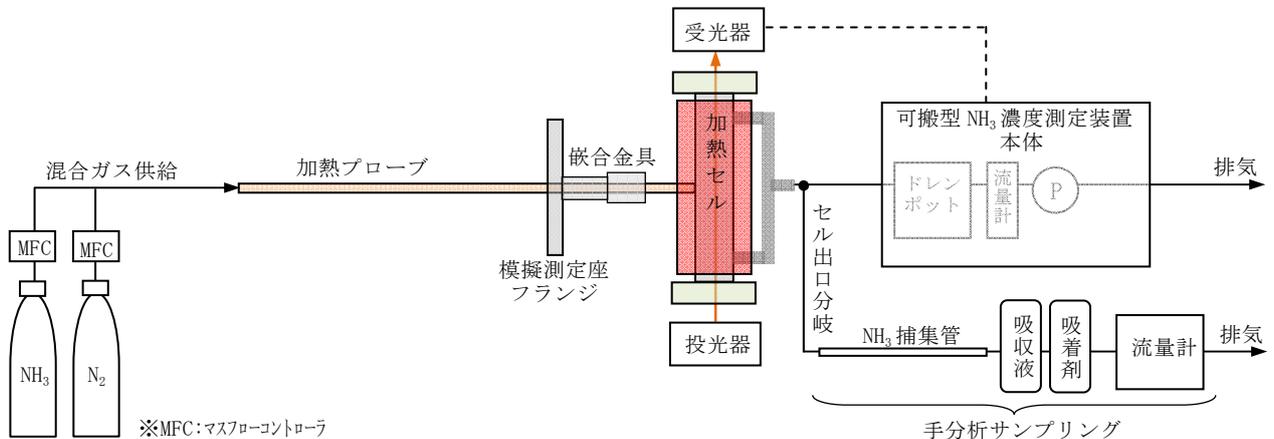


図 11 標準ガスによる試験システムブロック図

4.2 脱硝出口での測定試験

四国電力(株)橋湾発電所の脱硝出口で、試作装置による NH₃ 測定試験を実施し、現場での実用性能を検証した。

脱硝出口の測定座(フランジ)は、A・B 各煙道に 5 個ずつ配置されている。各測定座のサンプリング用ガイド管(外管:SUS、内管:アルミ)は 4 本であることから、両煙道における移動測定の対象は計 40 点となる。既設測定座の状況を図 15 に、移動測定のイメージを図 16 に、また試験状況を図 17 に示す。

試作装置による移動測定試験を実施した結果、図 18 に示すとおり装置移動やプローブ抜き差し時間も含め、1 個所あたり 10 分以内で測定可能であり、現場での操作性に関する所期の目標を達成できた。

また、測定値とセル出口分岐サンプリングによる手分析値との比較試験では、図 19 に示すとおり測定値が 1.5ppm 未満、手分析値が 1ppm 未満で推移し、両者の相関性も確認できた。更に図 20 の連続測定試験では、NH₃ 注入量との連動性を示唆する測定値が得られている。



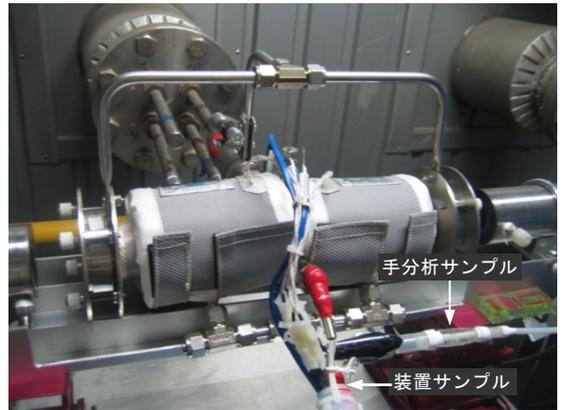
図 15 脱硝出口の既設測定座

表 1 試作装置の基本仕様

測定原理	シングルパス・レーザー吸収分光方式
サンプリング方式	セル一体型プローブ (加熱吸引)
測定濃度	0~100ppm (測定下限:0.5ppm)
測定精度	±5.0 % FS (0~10ppm) ±5.0 % RS (10~100ppm)
更新周期	1.0 秒
移動測定時間	10 分以内/点

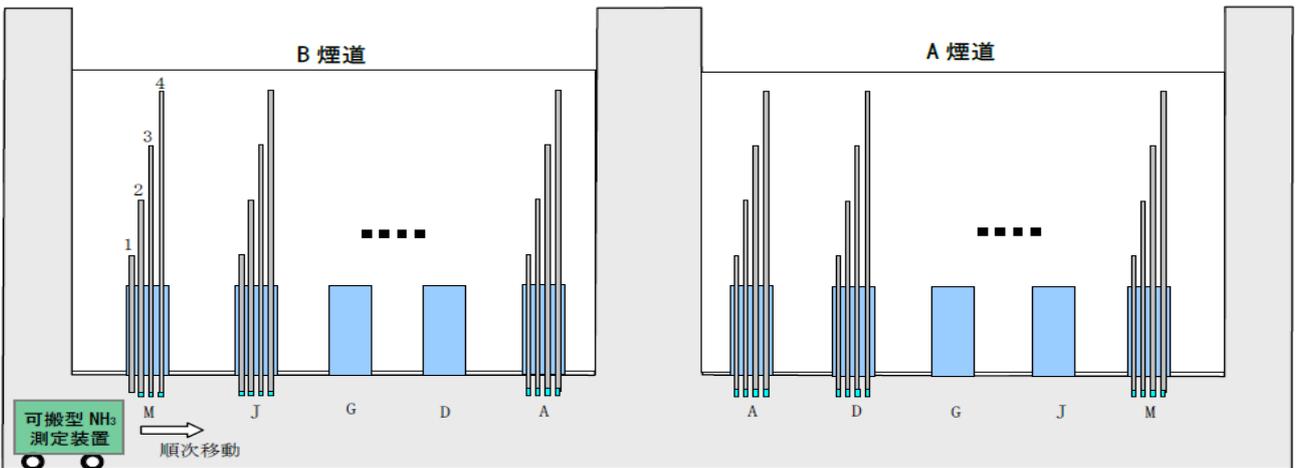


(a)移動測定試験状況



(b)セル一体型プローブの装着状況

図 17 脱硝出口での試験状況



※図中 1~4 は長短 4 種類の既設ガイド管(SUS 外管・アルミ内管、先端フィルタ付)。同管内にセル一体型プローブを順次挿入して移動測定実施。

図 16 脱硝出口における移動測定のイメージ

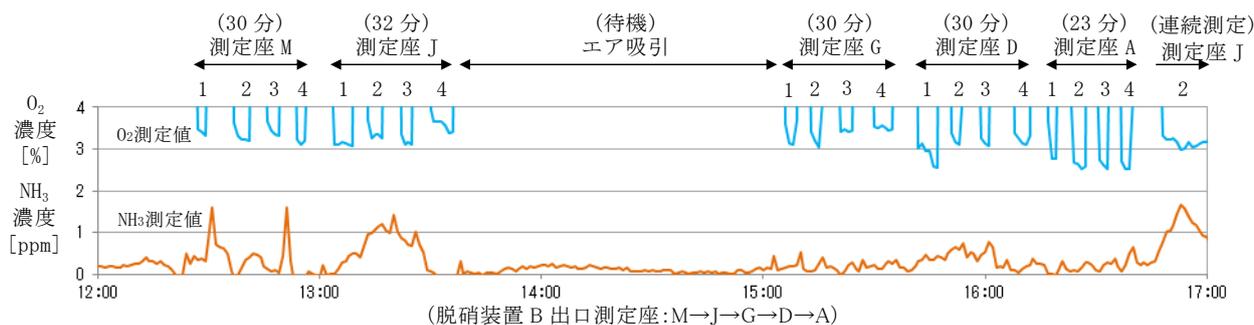


図 18 脱硝出口における移動測定試験データ

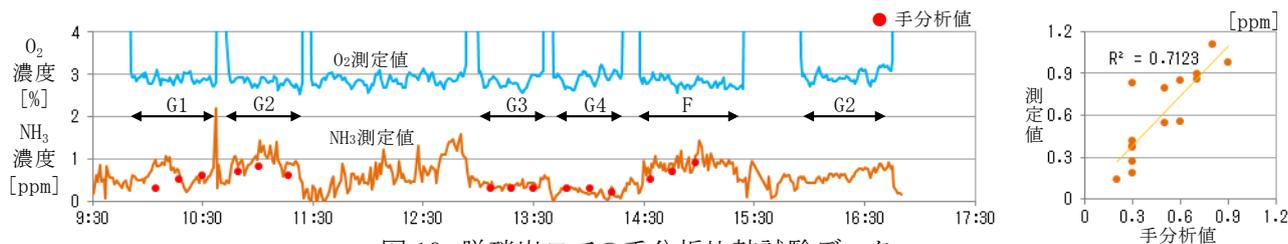


図 19 脱硝出口での手分析比較試験データ

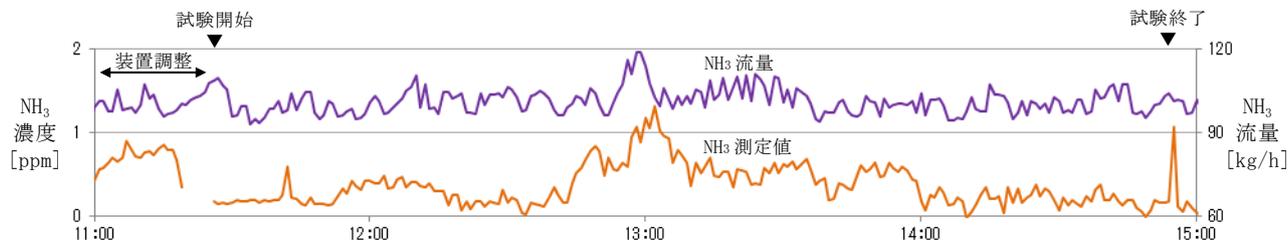


図 20 脱硝出口での連続測定試験データ

5. 考察と展望

実験室および現場における各種試験結果を踏まえ、試作装置の実用性能について考察し、今後の装置活用に関する可能性と展望を以下に述べる。

5.1 脱硝出口での手分析代替用としての評価

(1) 測定性能について

脱硝出口における手分析値と測定値には高い相関性があり、絶対値も同レベルで推移していることから、試作装置の測定性能は良好であると言える。これは本装置の測定値をセル出口分岐サンプリングによる手分析値と比較した場合の評価である。本稿では割愛したが、セルの前段すなわちセル入口分岐サンプリングによる比較試験も行い、ほぼ同等の結果が得られている。場所・時刻およびサンプルガスの同一性という観点から、セル出口分岐サンプリングの方が妥当性は高いと考えられる。

試作装置(レーザー吸収分光方式)は原理上、ガスとして存在するNH₃濃度の測定を前提としており、レーザー透過率の極端な低下がない範囲(透過率60%以上)において、基本的に測定値は煤塵の有無に影響されない。これは排ガス中のNH₃ガス濃度の把

握という観点からは大きなメリットである。

一方、JIS準拠の手分析(吸光光度法・イオンクロマトグラフ法)では、煤塵に付着したNH₃や酸性硫酸も含めたトータルのNH₃が分析対象となり、煤塵の有無が分析結果に反映される。従って、ガス状のNH₃だけを対象とした手分析を行う場合は、サンプリング時に円筒濾紙等を用いて、できる限り微細な煤塵まで除去する必要がある。

(2) 操作性・保守性等について

移動測定(全点分布測定)において、1点を10分以内で測定でき、A・B両煙道(A側:20点、B側:20点)の計40点を400分(約7時間)で測定可能であることから、所期の機能を発揮できていると言える。

開発当初は、加熱状態のプロブとセルを接続・分離する作業等に手間がかかり、安全性・気密性・耐久性が課題となっていたが、セル一体型プロブの採用によって解消できている。また、プロブの煙道壁貫通部(測定座内と測定座外のプロブ連結部)は通常のネジ込み式ではなく、金属嵌合・耐熱融着テープ方式を採用したことで、プロブの着脱操作も非常に容易となっている。

既設ガイド管の先端には SUS フィルタ (2 μ m メッシュ) が常時装着されているが、同フィルタを通過する微細な煤塵やガイド管内に残留した煤塵等は除去できず、装置側に流入する。しかし、煤塵の存在下でも原理的にロバスト性の高いセル分離型・シングルパス・レーザー吸収分光方式の長所を活かし、装置側 (サンプル加熱ライン) にはフィルタを一切使用せず測定が可能である。このように特別な前処理が不要で、加熱ラインにおけるフィルタ着脱作業も生じないことは、保守面における大きなメリットである。

5.2 脱硝各部での装置活用に向けて

現在、触媒層ごとの脱硝性能の実態を把握するため、試作装置を活用して脱硝上部・中間部においても測定試験を開始し、NH₃ 濃度の長期的な変化傾向について調査中である。

また、NH₃ 注入バランス調整への装置活用の可能性という観点からは、必ずしも脱硝出口での NH₃ 濃度分布測定に限定することなく、脱硝中間部や脱硝上部での濃度分布測定の可能性・有効性についても調査検討が必要であると思われる。

これに関しては、脱硝各部における NH₃ 濃度の高低 (測定の難易度)、測定座の仕様 (煙道外への突出長)、煙道通路の状況 (作業空間) 等も勘案しながら、従来よりも濃度分布測定作業が容易で、かつ NH₃ 注入量 (注入弁の開度調整) との関連性を確認しやすい方法を見出し、その妥当性を検証していきたい。

なお、脱硝各部 (上部・中間部・出口の 3 フロア) での測定作業を考えると、装置の更なる小型化が望ましい。今回の試作装置は、最も一般的な近赤外域の吸収特性を利用しているが、NH₃ の吸収が格段に強い近紫外域に着目した装置開発についても検討中である。今のところ干渉成分の影響や紫外光源の性能など課題は多いが、検出感度を維持しつつ、セルの短縮や投受光器の小型化が可能な方式として、将来的に有望と考えられる。6) 7)

6. まとめ

レーザー吸収分光技術の活用やセル一体型プローブの考案等により、多数の測定座を対象に排ガス中の NH₃ 濃度を効率的に移動測定できる装置を開発し、その実用性能を検証した。

実運用に向け、今後も橘湾発電所の脱硝出口で引続き測定試験を実施してデータを蓄積し、手分析

の代替用として完成度の高い装置に仕上げる予定である。

また、脱硝各部の NH₃ 測定値に基づく触媒層ごとの性能評価の可能性について検討するほか、NH₃ 濃度分布に応じた短時間でタイムリーな NH₃ 注入量調整およびバランス調整への適用可能性についても調査し、脱硝装置の運用効率化に向けて本装置の有効活用を図っていきたい。

【謝辞】

本研究は、四国電力(株)火力部からの委託を受け実施した。装置開発および現場試験にご協力いただいた関係各位に深く感謝の意を表する。

末筆ながら、具体的な試作装置の開発に際して、ソフト・ハード両面で絶大なる協力をいただいたマイクロ電子(株)の門脇渉氏と(株)ブレインズの小野実氏に、様々な条件での手分析試験を鋭意実施していただいた四電ビジネス(株)の前田博史氏に、またレーザー式ガス分析計に関する最新情報等を適宜提供いただいた西華産業(株)および中外テクノス(株)の関係各位に、この場を借りて心からお礼申し上げたい。

【参考文献】

- 1) 金森、三池、伊藤、一之瀬:「石炭火力発電所の排煙系閉塞対策」, 火力原子力発電, Vol.65, pp40-44(2014)
- 2) 久次米、島尾:「橘湾発電所空気予熱器の運転中水洗装置における実運用試験結果について」, 火力原子力発電, Vol.66, pp124-128(2014)
- 3) 馬目、田鹿、近藤、田上、杉山、土橋:「石炭焚きボイラ空気予熱器閉塞抑制のための脱硝出口リークアンモニア連続監視」, 火力原子力発電, Vol.68, pp431-436(2016)
- 4) 山地:「四国電力における技術革新の歩み」, 電気評論, Vol.98, pp170-172(2013)
- 5) 毛利、本多、島崎、浜島:「石炭火力排煙脱硝における未反応アンモニア分析計の検討」火力原子力発電, Vol.35, pp57-65(1981)
- 6) 福地、二宮:「高濃度 SO₂ 含有ガス中における微量 NH₃ の紫外吸収分光測定」電気学会論文誌 A, Vol.131, No.7, pp540-546(2011)
- 7) 朝日、杉本、星野、二宮ほか:「紫外吸収分光法を用いた高温ガス計測装置の開発」四国電力・四国総研研究期報, Vol.102, pp19-27(2015)

次世代 openATOMS (openATOMS_FG) の開発について

(株)四国総合研究所 電子技術部 中西 美一

キーワード: IoT
インターネット
無線通信
モニタリング

Key Words: IoT
Internet
Wireless communication
Monitoring

Development of the openATOMS Future Generation

Shikoku Research Institute, Inc., Electronics Technology Department

Yoshikazu Nakanishi

Abstract

IoT has been one of key words of recent technology trend that can contribute to make society more convenient and safety. On the other hand, it is not so easy to develop and utilize IoT systems in the real world. IoT is a complex assembly of various types of technologies including microcomputers and radio communication devices. Application system engineers don't have enough time to study each individual technology that is composing IoT systems, because of they are always busy to understand problems in the real world and make up practical resolutions to resolve those difficult problems. They obviously need well designed and easy to use common platform technology that can be used in IoT system development.

The openATOMS_FG was designed as common platform technology to develop and operate various IoT systems in the real world. In this article, basic components of the openATOMS_FG and two practical application systems based on the openATOMS_FG are described.

1. はじめに

インターネットは1960年に発明されたとされるが、その実用性が一般に認識されたのは1993年のNCSA Mosaicという革新的なWebブラウザの誕生により、ITの専門家ではない極普通の人々とのインターフェースを獲得して以降であると思われる。元来インターネットはコンピュータ間の通信ネットワークとして設計されたものであるが、この25年の間に人と人を繋ぐネットワークに進化したと言えるのではないかと個人的には思っている。

そしてこれからは身の回りの全ての物がインターネットに繋がるIoT(Internet of Things)の時代と騒がれている。Thingsとは物質という意味ではなく、小さなコンピュータを内蔵した物体のことであるので本来の目的に戻っただけのことであるが、57年前との大きな違いは、現在の我が国では殆ど全ての人々がインターネットに繋がっていて、当時は現在の日本円に換算して数千万円もしたコンピュータがワンコイン(500円程度)になったことであろう。

IoTは正確にはInternet of Tiny computersのことである。ちっぽけであっても立派なコンピュータであるので、そう簡単にはインターネットに繋がらない。厄介なのはTiny computerはワンコインなのでインターネットに繋ぐために多くの時間とお金を掛けられないことである。

当社では、IoT 応用システムが普及するためには様々な用途の実用システム構築に利用でき、その開発と運用コストを劇的に低減できる共通基盤技術が必要であると考え、2007年頃からopenATOMSの開発を行ってきた。幸いにもopenATOMSはささやかな成功を収め、当社のいくつかの製品で利用されているが、当初の設計から10年が経過し、現在の社会に散在する様々な課題に挑戦するには少々力不足を感じるようになってきた。

openATOMSでは前述のTiny computerのことをNICE(Networked Intelligent Cell)と呼んでいるが、2007年の技術では十分なintelligenceを与えることができなかった。(明らかに名前負けしていた。)さらに、Networkedの部分にもこの10年間でいくつかの技術革新があったため、このintelligenceとnetworking機能の大幅な強化を目指して、2016年から次世代openATOMS(openATOMS_FG)の開発を進めている。本稿ではその概要を報告する。

2. NICE32の開発

openATOMSではNICEとして8bitコアのMCU(Micro Controller Unit)を使用している。(以降、8bitMCUのNICEをNICE8とする。)NICE8のRAM容量は4KBしかなく、NICE8上で十分なデータ処理ができないことが大きな課題であった。

新しく開発したNICE32では32bitMCUを使用している。RAM容量が従来の4KBから256KBへと64倍となり、またデータ処理速度も数十倍になったため、従来は上位のコンピュータで行っていた計測データ処理の大部分をNICE32上で行えるようになった。これにより、データ処理のリアルタイム性が向上すると共に、消費電力の大きい無線データ通信を大幅に削減できることとなり、NICE32の消費電力はNICE8の1/3程度に低減され、用途によっては単三型のLi乾電池×2本で10年以上連続動作させることができるようになった。

このメモリ容量とデータ処理速度の大きさにより、例えば、振動加速度データを収集しながらリアルタイムにFFT演算処理を行うという芸当も可能となっている。通信速度の遅い無線通信ネットワークでは振動加速度データのような大量のデータ送信が難しく、可能な限りNICE32上でデータ処理を行い、無線送信するデータ量を減らす必要がある。これは頭脳明晰で仕事のできる部下は上司への報告も最小限で済むのと同じ理屈である？

最新の32bitMCUはその価格からは想像できないほど高性能で、データ処理速度の向上とメモリ容量の増強に加えて外部デバイスインターフェースも充実しており、様々なセンサやアクチュエータをUART、SPI、I2C、ADC、DAC等の標準化されたインターフェースで接続できるようになっている。

NICE32用のOSとしては、NICE8用に独自開発したS.OS_NICE8と同様に、低消費電力化のために常時はCPUコア(システムクロック)を停止しておいて、必要時のみCPUコアを起動する方式の独自OS(S.OS_NICE32)を開発して使用している。システムクロックの停止とは車のアイドリングストップのようなもので、消費電流はアイドリング時の1/1000以下の1 μ A程度となるため、電池電源で数年間動作させる必要があるNICE32には不可欠の機能である。最新のMCUではシステムクロックの起動時間が1 μ sec程度と短くなっており、システムクロックを停止していても緊急を要する外部イベント入力に対応できるが、

システムクロックの起動・停止は非常に繊細な動作でこの機能の実装は相当に大変な作業である。この部分の設計をしていると「この場合はこうなって…、その場合はああなって…」と自然と独り言が多くなり、同僚からは変なおじさんと思われているに違いない。

また、NICE32 では前述の外部デバイスインターフェースを介して様々なセンサやアクチュエータを接続する必要があり、そのためのデバイスドライバソフトウェアの開発は結構大変な作業となる。このデバイスドライバを S.OS_NICE32 の一部として提供することで実用アプリケーションシステムの開発効率は飛躍的に向上するが、世の中に存在する優れたデバイスを継続的に調査し、そのデバイスドライバを開発し続けるというのも骨の折れる仕事である。優れたデバイスの99%は日本語以外の言語を喋る研究者や技術者によって開発されており、彼ら彼女らの共通言語は英語である。1つのデバイスのデバイスドライバを開発するために、時には数百ページの英文ドキュメントを隅々まで読まなければならないことを想像して頂ければこの仕事の過酷さを少しは理解して貰えるだろう。

近年では、Tickless OS と呼ばれる CPU コアを停止できる汎用 OS の開発も進んでいるため、将来的には汎用 OS の採用を予定しているが、汎用の Tickless OS ではデバイスドライバの構造が複雑になりその開発に多大な時間と労力が必要となるため、現時点での採用は時期尚早と判断したというのは言い訳で、OS の開発は純粋に楽しいのである。

3. 新しい無線通信技術への対応

openATOMS で使用できる無線通信ネットワーク技術は 2.4GHz_ZigBee のみであった。優れた技術であり、現在でも十分に活躍しているが、以下のような課題があり openATOMS の利用拡大の制限となっていた。

- ① 2.4GHz の電波は直進性が強く、障害物による通信障害を受けやすい。
- ② 電波出力が 10mW 以下に制限されていて、屋外での見通し通信距離が最大 500m 程度と短い。
- ③ 既に 2.4GHz 帯を利用している機器が広く普及しており、電波障害を受ける可能性が高い。
- ④ ZigBee では無線中継ノードの低消費電力化が考慮されておらず、中継ノードの電源確保が難しい。

無線通信ネットワークの応用が進むにつれ、上記の課題を何とか解決しようということになり登場したのが、2.4GHz に比べて電波の曲がり良く、空中での減衰も少ないため、障害物の多い環境下でも安定した長距離通信性能が期待できる 920MHz 帯の電波の利用と、高精度の時刻同期技術により無線中継ノードを含む全ての無線通信デバイスを間欠動作とすることで、無線通信ネットワーク全体の消費電力を大幅に低減可能とした 920MHz_MultiHop 技術である。

さらには、通信速度を極端に下げ通信距離を極端に延ばすという逆転の発想で生まれた技術が 920MHz_LoRa 等の LPWA(Low Power Wide Area の略)技術である。河川の上流で鉄砲水が発生したという情報を 10km 下流の民家に知らせるには 1BPS(手旗信号程度)の通信速度で十分である。下流の民家の住人は数百 MBPS の通信速度を持つスマホで世界の裏側の情報を動画で見ることができているが、1BPS の IoT が無ければ 10 分後に自宅が濁流に飲み込まれることを知ることができないという事実からこの 1BPS の価値を容易に理解することができるであろう。

920MHz 帯を利用する無線通信デバイスには、特別な手続きをせずに使用できる電波出力が 20mW 以下のタイプ(特定小電力無線局)と地方総合通信局への申請と電波使用料(500 円/年程度)の納付が必要な 250mW 出力タイプ(簡易無線局)があり、電波出力が 10mW 以下に制限されている 2.4GHz 帯に比べて通信距離を確保し易いというのも大きな利点である。250mW は 20mW の 12.5 倍であるが、通信可能距離はその $\sqrt{\quad}$ になり 3.5 倍程度となる。

openATOMS_FG では、これまで利用していた 2.4GHz_ZigBee に加えて、920MHz_MultiHop および 920MHz_LoRa を利用可能とした。無線通信技術の選択肢が増え、従来の 2.4GHz_ZigBee では適用が難しかった無線中継点での電力確保が難しい場合や、無線中継を行わず 10km を超える通信を行う必要がある用途にも適用可能となっている。

NICE32 と無線通信デバイスは UART で接続されるため、ハードウェア的には簡単に交換可能であるが、通信プロトコルは製品毎に異なるため、各通信デバイス毎にデバイスドライバの開発が必要である。S.OS_NICE32 では各通信デバイスのプロトコルの違いをこのデバイスドライバが吸収し、無線データ通信のための共通 API をアプリケーションソフトウェアに提供しており、アプリケーションシステムの開発者

は無線通信方式の違いを殆ど意識せずすむようになっている。実用システムの構築では、その要求仕様に応じて適切な無線通信技術を選択あるいは組み合わせる必要があるが、共通 API がないと使用する無線通信技術に合わせてアプリケーションソフトウェアを作り直さなければならない。

3.1 2.4GHz_ZigBee の特徴

2.4GHz_ZigBee は無線通信ネットワークが一般に普及するきっかけとなった技術である。先行する多くの技術をバランス良く組み合わせると共に、それらの特許問題を解決したことにより多くの無線通信デバイスメーカーの参入を促した結果デバイスも安価になり、当社でもコスト制限の厳しい農業用の環境モニタリングシステム等で使用している。

一方、ZigBee には通信信頼性と消費電力の点で課題もあり、同じ 2.4GHz 帯を使用しながらもそれらの課題の解決を目指した新しい技術もいくつか提案されている。

3.2 920MHz_MultiHop の特徴

屋外での 1 ホップの通信距離が電波出力 20mW のタイプで最大 1,000m 程度あり、30 ホップ程度までのマルチホップ機能により自動的に無線通信経路が構築される。また、無線通信ネットワーク全体を間欠動作させることにより、無線中継ノードを含めて無線通信デバイスを低消費電力動作させることができるため、電源確保の困難な場合でも大規模な無線通信ネットワークを構築し易いという特徴を持つ。連続動作時の通信速度は 100KBPS と比較的高速であるが、低消費電力化の為に間欠動作とした場合は通信速度が低下する。

3.3 920MHz_LoRa の特徴

通信速度を下げ、受信感度を上げるという戦略で電波出力が 20mW のタイプで屋外での見通し通信距離を最大 5km 程度確保できる。無線通信デバイスのレベルではマルチホップ通信機能は搭載されていないため、1つの親局に対して複数の子局が直接通信するスター型ネットワークとなる。実用的な通信速度は 1KBPS 程度と低く、大量のデータ送信には適さない。

920MHz_LoRa の使用で注意すべきことは、1つのノードの無線データ送信回数と 1 送信当たりの時間を可能な限り小さくすることである。教室での情報伝達に例えるなら、920MHz_MultiHop が隣通しの早口

ヒソヒソ話で情報を伝達するのに対し、920MHz_LoRa は大声でゆっくり叫ぶようなものである。ヒソヒソ話は複数の経路を同時に実行できるが、皆が大声で叫ぶと簡単に学級崩壊してしまう。

4. NICE32 試作機と NC(Network Computer)

図 1 に NICE32 の試作機を示す。2.4GHz_ZigBee、920MHz_MultiHop、920MHz_LoRa の 3 種類の無線通信デバイスから 2 つまで接続でき、同時に通信ができるようにしており、異なる無線通信方式間のゲートウェイとしても機能する。また FAT32 形式の microSD メモリ(最大 32GB)を搭載可能としており、初期設定ファイルデータの読み込みや大量の計測データの保存も可能である。

openATOMS_FG 応用システムの多くは低消費電力であることを要求するため、低消費電力動作に定評のある 32bitMCU を選定するとともに、接続するセンサおよび無線通信デバイスの電源をきめ細かく制御することで低消費電力動作を実現している。

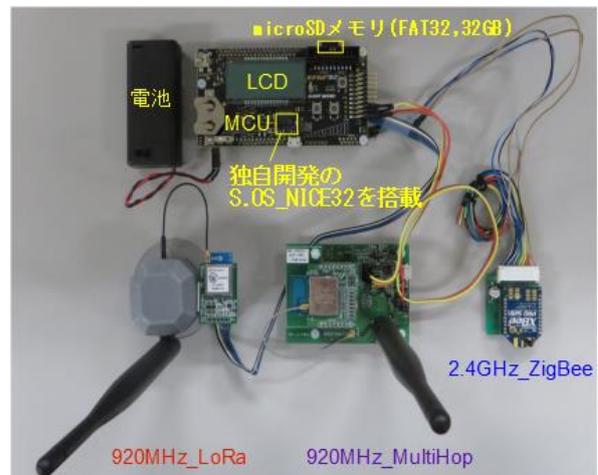


図 1. NICE32 試作機

図 2 に NC(Network Computer)を示す。NC には前述の 3 種類の無線通信デバイスから 1 つを選択して UART インターフェースで接続する。NC には無線通信ネットワークとインターネットを接続するゲートウェイ機能と、NICE 群から収集したデータを蓄積・解析する一種のクラウドサーバ機能が搭載されており、後者の機能を利用する場合はより直感的に理解し易い「データ収集ユニット」という名称で呼んでいる。

近年ではインターネット通信コストも低く、レンタルクラウドサーバも手軽に利用できるため、インターネット上のクラウドサーバにデータを蓄積するシステ

ムが多いが、大地震の発生時等には高い確率でインターネット接続は長時間停止するため、アプリケーションによっては現場設置のクラウドサーバが必要である。openATOMS では設計当初からローカルのクラウドサーバとインターネット上のより強力なクラウドサーバを組み合わせることで利用できるようにしている。これは openATOMS の想定適用分野に当初から自然災害モニタリングが含まれていたためである。



図2. NC(Network Computer)

5. 応用システムの開発

openATOMS_FG は既に十分に実用的なレベルに仕上がっており、現在 openATOMS_FG をベースに様々な実用システムの検討・試作を進めている。以下に試作した「水田環境モニタリングシステム」および「構造物振動多点同期モニタリングシステム」について紹介する。

5.1 水田環境モニタリングシステム

図3に水田環境モニタリングシステムを示す。無線通信デバイスとして 920MHz_LoRa を使用し、センサデバイスとして水位センサならびに水温センサを搭載している。センサユニットの消費電力は小さく、単三型の Li 乾電池×2本で5年以上動作する設計となっている。

なぜ水田環境モニタリングかと言うと、個々の監視ポイントの情報量とその監視頻度は少ないが、大きな通信距離が必要という要求が 920MHz_LoRa の実用性評価に適しているからである。最も重要な情報は水位である。計測範囲は 0~200mm 程度で計測分解能は 1mm で十分なのでデータ長は 8bit であり、計測間隔は 1時間以上で良いため、1計測点当たりに必要な無線通信速度は 0.002BPS 程度という計算となる。

広大なエリアの水位を電池電源の簡単なセンサユニットを設置するだけで遠隔監視できるのである。聡明

な本稿の読者であれば、このシステムが水田の水位に留まらず、道路の冠水状況監視や河川の水位監視にも利用できることは容易に想像できるであろう。

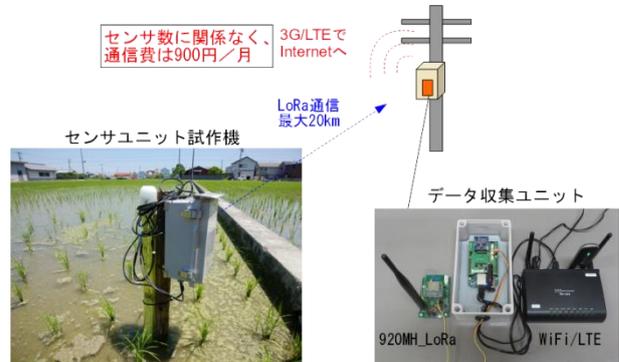


図3. 水田環境モニタリングシステム

5.2 構造物振動多点同期モニタリングシステム

図4に構造物振動多点同期モニタリングシステムのセンサユニットを示す。無線通信デバイスとして 920MHz_MultiHop を使用し、センサデバイスとして高精度の加速度センサを搭載している。最大 200Hz(変更可能)でサンプリングした 3 軸の加速度波形データを内蔵の NICE32 でリアルタイムに分析できる。

本システムは当社の建築技術の研究者からの依頼で開発したものである。原理は簡単で、ビル等の構造物内の複数個所の 3 軸加速度を ±5msec 程度の時刻同期誤差で高精度に計測できれば、その 2 重時間積分値から各計測点の基準点からの移動距離を時々刻々と計算でき、地震による振動が構造物へ与えるダメージの診断に役立つとのことである。

原理は簡単であるが、分散配置された多数のセンサユニットの内部時計の誤差を ±5msec 以内に維持しつつ、いつ発生するか分からない地震による振動を常時監視し、いざという時には複数個所で同時に収集した大量の 3 軸加速度波形データを通信速度の遅い 920MHz_MultiHop 無線通信でデータ収集ユニットへ確実に回収するという結構凄い機能を、安価に、そしてたったの 6 か月で開発しろという注文であった。

驚くことに、本システムのプロトタイプは 2 か月程度で出来上がったのである。必要な機能の大部分は openATOMS_FG に用意されており、2 か月という時間の大半は、時刻同期機能の実現と大量の加速度波形の効率的な無線伝送メカニズムの開発の費やすこととなったが、本開発により、openATOMS_FG には高精度の時刻同期メカニズムと低速の無線通信ネットワー

クによる大量データ送信メカニズムという新たな機能が追加されることとなった。当社では openATOMS_FG の開発と並行して、その応用システムを積極的に開発している。理由は簡単で基盤技術に搭載する各種機能の開発には、それを必要とする実用システムへの理解が不可欠だからである。

報 No.90,pp24-34(2008.6)

2)中西美一：「オンデマンド・モニタリングシステム技術の開発」,平成 22 年電気学会 C 部門大会講演論文集

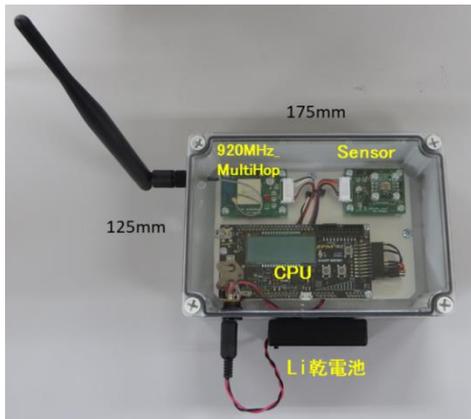


図 4. 構造物振動多点同期モニタリングシステム (センサユニット)試作機

6. まとめ

openATOMS_FG の開発概要とその応用システムの一例を紹介した。IoT とは Internet of Tiny computers であるという独自の解釈に異論を唱える専門家も多いと思うが、Things がインターネットに繋がるという誇大表現が IoT の本質の理解を妨げているようにも思われる。遠い将来には Tiny computer に搭載された AI によりそれがまるで生物のように振る舞い、勝手にインターネットに繋がるようになるかもしれないが、それまでは、真に実用的な IoT システムを構築・運用するためには openATOMS_FG のような優れた共通基盤技術と、社会に散在する課題を理解しその解決に取り組む熱意に溢れた研究者や技術者の弛まぬ努力が必要であると記して本報告のまとめとしたい。

7. 謝辞

本研究の一部は、四国電力(株)事業企画部殿ならびに土木建築部殿より委託を受け実施したものである。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)中西美一：「オンデマンド・モニタリングシステム技術(ATOMS)の開発」,四国電力,四国総合研究所 研究期

水力発電所配電盤における耐電圧値引き下げに関する研究

四国電力(株) 水力部 寺尾 武蔵
(株)四国総合研究所 電力技術部 藤村 直人
(株)四国総合研究所 電力技術部 泉川 雅弘
(現: 四国電力(株)考査室)

キーワード: 雷サージ
低圧制御回路
EMTP
誘起電圧

Key Words: lightning surge
low voltage control circuits
Electro Magnetic Transients Program
induced voltage

Study of reduction in withstand voltage values of switchboards in hydroelectric power stations

Shikoku Electric Power Co., Inc., Hydro Power Plant Department

Takezou Terao

Shikoku Research Institute, Inc., Electric Power Department

Naoto Fujimura, Masahiro Izumikawa

Abstract

The commercial frequency withstand voltage value of low voltage circuits in power equipment is specified to be 2kV. This is a high value, taking into consideration the importance of the equipment responsible for supplying electricity to customers.

However, in the case of small hydroelectric power plants with 6 kV distribution line interconnected systems, where the surge level in low voltage control circuits is low, general purpose equipment suitable for general industries can be used. This results in cost reduction if the withstand voltage value of switchboards can be suppressed to 1.5 kV or less.

Thus, we have evaluated the possibility of using the withstand voltage values that are normally in use in general industries in small hydroelectric power plants by studying and analyzing abnormal voltage phenomena occurring in low voltage control circuits of small hydroelectric power plants.

1. はじめに

電力用設備における低圧回路の商用周波耐電圧値は、お客さまへの電力供給を担う設備の重要性を鑑みて、JEM「電力用保護継電器一般編」(1963年)により、高水準の耐電圧値として2kVが規定されており、当社では、小水力発電設備も含めた全ての電力用設備に2kVが適用されている。

しかしながら、低圧制御回路へ侵入するサージレベルが低い6kV配電線連系の小水力発電所の場合、その値を1.5kV以下に抑制できれば、一般産業用の汎用機器を採用することが可能となり、配電盤のコスト低減が図れる。(図1)

このため、小水力発電所の低圧制御回路に発生する異常電圧現象を整理、解析することにより、一般産業用耐電圧値の適用の可能性について評価した。

2. 評価内容と結果

2.1 一般産業用機器の故障要因調査

(1) 調査概要

配電盤製造メーカを対象に、一般産業用機器の故障件数とその要因について聞き取り調査を行った。

(2) 調査結果

配電盤製造メーカの把握する配電盤故障件数は、過去5年間で280件であり、うち雷サージに起因するものは7件(全体の2.5%)との回答を得た。(図2)

本データは顧客よりメーカへ通知のあった件数であるが、雷サージに起因する故障の割合は少なく、一般産業用配電盤の異常電圧に対する故障リスクは極めて低い、という見解であった。

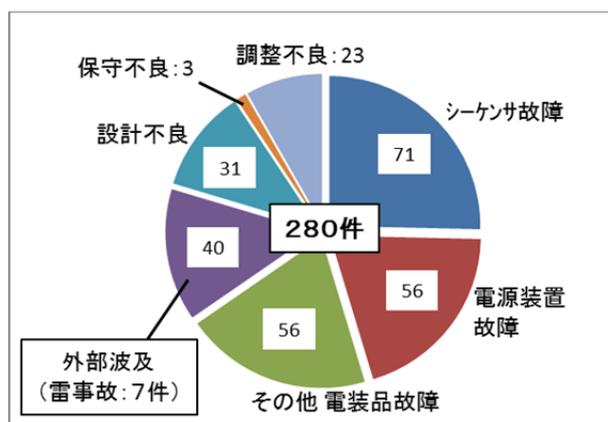


図2 一般産業用配電盤の故障要因

2.2 水力発電所における配電盤低圧回路への誘起電圧波形の観測

(1) 観測概要

運転中の小水力発電所において、雷サージ等による配電盤低圧回路に使用されている制御ケーブルの余り芯(配電盤側)に波形記録装置を接続し、誘起電圧波形の観測を行った。

(2) 観測対象発電所

一般的に低圧制御回路の誘起電圧が高くなる主な要因は、

- ・要因1: 接地抵抗が比較的高い
- ・要因2: 放電電流が配電柱の避雷器よりも接地網に流入する割合が高い
- ・要因3: 配電箱と配電盤が離れており、接地網が分割され、接地抵抗差が大きい

上記3項である。要因1は、各発電所の接地抵抗値が技

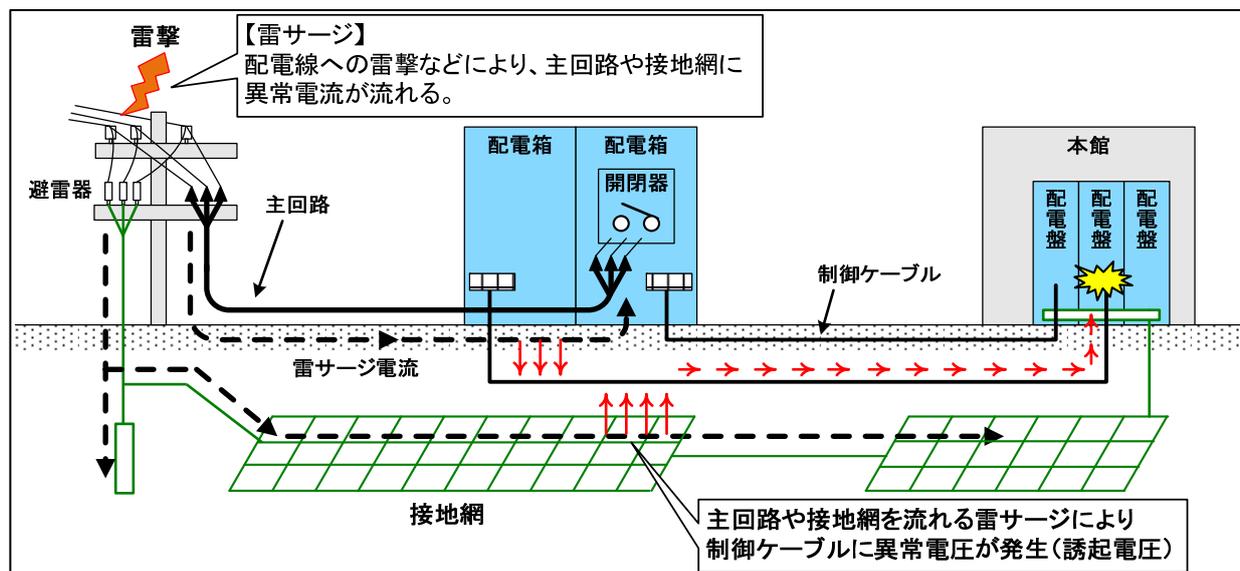


図1 低圧制御回路へのサージ侵入経路

術基準値(A種接地工事:10Ω)を満たす範囲では大差が無い対象外とし、要因2に該当する発電所(発電所Aとする)と要因3に該当する発電所(発電所Bとする)、および上記要因に該当しない発電所(発電所Cとする)の合計3ヶ所を対象とした。

(3) 観測結果

今回、約14ヶ月(平成27年11月～平成29年1月)に亘り観測を実施した。各発電所の半径1kmの範囲で1～17回の落雷が観測されたが、雷サージに起因すると思われる誘起電圧波形を記録することはできなかった。これは、発電所が連系している配電線は避雷器により耐雷対策が施されており、雷サージを抑制していたと推測される。

2.3 雷サージ誘起電圧の解析(EMTP解析)

(1) 解析概要

前述の観測対象発電所について、その主回路や設備構成を模擬したEMTP(Electro Magnetic Transients Program)モデルを作成し、雷サージが低圧制御回路に侵入した際の最高誘起電圧値を解析により求めた。

モデル作成の手法および各定数の設定は、低圧回路サージの実証試験によりシミュレーションモデルの定数を定めた「保護制御システムのサージ対策技術」(電気協同研究 第57巻 第3号)や、「発電所及び地中送電線の耐雷設計ガイド(2011年改訂版)」(電力中央研究所報告:H06)に基づき作成した。

また、侵入が想定される雷サージ電流は、一般的な配電線用避雷器の公称放電電流である2,500Aとした。

(2) 解析結果

低圧制御回路の条件として、CVV-Sケーブルが両端接地されていれば誘起電圧を約300Vまで抑制できるという結果が得られた。(図3)

なお、CVV-Sケーブルが片端接地の場合では、誘起電圧は1.5kVを超える結果となった。

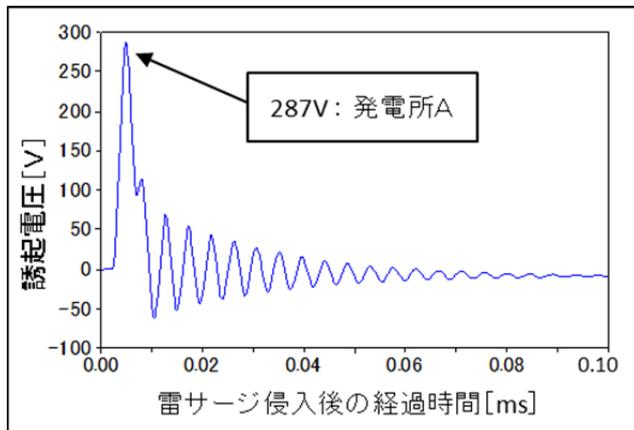


図3 EMTPモデル解析値

2.4 雷サージ誘起電圧の測定(発電所モデル)

(1) 測定概要

実際に対象発電所と同等のケーブル敷設状況や接地環境を模擬した発電所モデルを作成し、試験装置から電流を入力することにより低圧制御回路に誘起される異常電圧の測定を行った。

発電所モデルにおける雷サージ印加点は、発電所引込配電柱とし、試験装置から主回路(CVケーブル)および開閉器を介して接地網へ流れる回路構成とした。そのCVケーブルや接地網の付近に低圧制御回路(制御ケーブル)を配置し、主回路に試験電流が流れた時に誘起される電圧値を実測した。(図4)

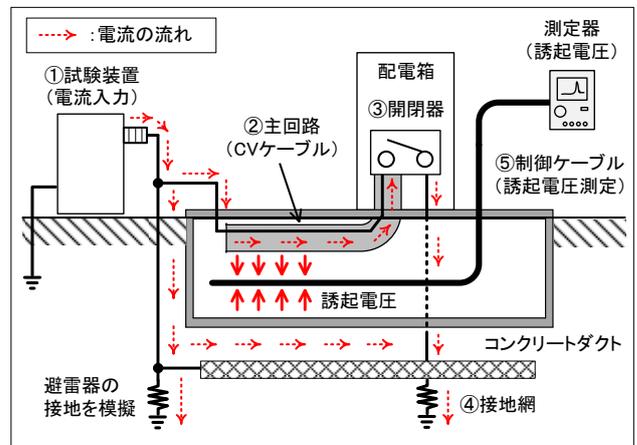


図4 発電所モデルの作成状況

(2) 測定結果

試験装置から100～200Aの範囲で電流値を変えながら、制御ケーブルに発生する誘起電圧を複数点測定し、電流値と誘起電圧値が比例関係にあることを確認した。これをもとに、EMTP解析値と同じ2,500Aが入力された際の誘起電圧値を推定した結果、CVV-Sケーブルが両端接地されていれば、誘起電圧を約250Vまで抑制できることを確認した。(図5)

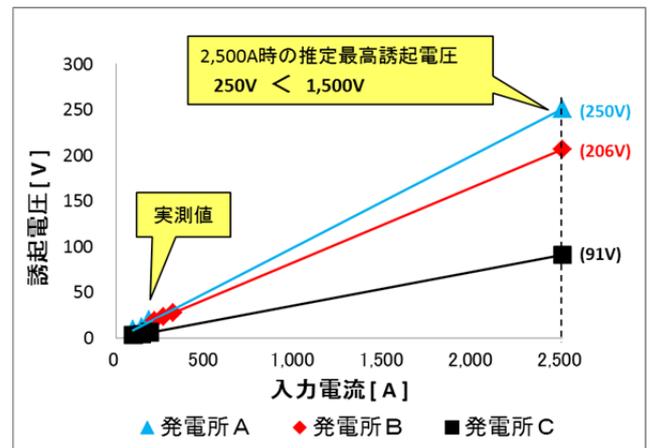


図5 発電所モデル試験結果 (CVV-Sケーブル両端接地)

また、CVV-S ケーブル(片端接地)の場合は発電所A およびBの誘起電圧が 1.5kV を超えることを確認した。(図6)

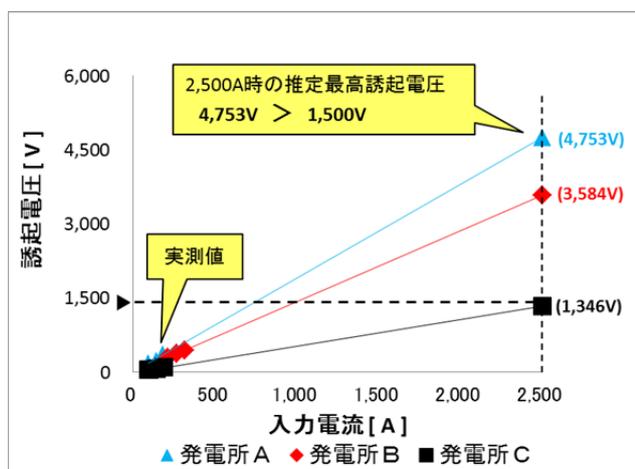


図6 発電所モデル試験結果 (CVV-S ケーブル片端接地)

更に、この実測結果と EMTF 解析結果は、ほぼ同等の値となったことから、今回作成したEMTFモデルの信頼性も確認できた。(表1)

表1 誘起電圧測定結果の比較

	発電所 A		発電所 B		発電所 C	
	モデル	EMTF	モデル	EMTF	モデル	EMTF
誘起電圧	250V (▲83%)	287V (▲81%)	206V (▲86%)	198V (▲87%)	91V (▲94%)	92V (▲94%)

() : 1.5kVに対する比率

3. まとめ

今回の研究結果より、一般産業用配電盤への雷サージに起因する故障事例は極めて少なく、また 6kV 配電線連系の小水力発電所においては、配電線の耐雷対策などによって雷サージが侵入する可能性も低い。更に、雷サージが侵入したとしても、低圧制御回路に使用する CVV-S ケーブルが両端接地されていれば、誘起電圧を 1.5kV 未満へ抑制できるため、一般産業用配電盤を採用することは可能であることが分かった。

今後は、研究対象外であった小水力発電所についても、EMTF解析で確認し、制御ケーブルを両端接地することで、一般産業用配電盤の採用を進め、コスト低減に努める。

