

研 究 期 報

No. 116

2022 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 總 合 研 究 所

研究期報 1 1 6 号 目次

通信線と障害物との離隔距離異常検知システムの開発..... 1

Development of a system to detect abnormal separation distances automatically among communication cables and surrounding obstacles

非常用ディーゼル発電機燃料弁冷却水系統管理の高度化に関する研究..... 7

Research on improving water control of fuel valve cooling water system in emergency diesel generator

コンクリート柱用鉄筋破断診断装置「新型CPチェッカー」の開発..... 14

The development of “Advanced CP Checker,” A Rebar Breakage Diagnostic Device for Concrete Poles

既設アナログカメラを活用したデジタルITVシステムの開発..... 22

Development of the Digital ITV System Utilizing Existing Analog Cameras

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）..... 31

Leakage hydrogen gas detection technology using coherent anti-Stokes Raman spectroscopy (the first report)

通信線と障害物との離隔距離異常検知システムの開発

目 的

電力会社では、電力系統を安定かつ効率的に運用するため、制御所と変電所や発電所等との間に架空通信ケーブル（通信線）を敷設・整備しており、定期的に保守員が直接目視による巡視点検を行い保安を確保している。

今回、通信線の巡視点検作業の効率化をねらいに、通信線と障害物との離隔距離異常を自動検知するシステムを開発したので報告する。

主な成果

1. システム概要

本システムは、MMS (Mobile Mapping System) やカメラで構成するセンサにより収集したデータを独自開発したソフトウェアで処理して、離隔距離異常の有無や異常個所を自動検知するものである。(図 1)

特に、3次元点群などの大容量データを効率的に処理するために、6つのステップに分けて分析・処理して電柱や通信線、障害物を認識して異常判定するのが特長である。(図 2)

2. フィールド試験による検証

国道沿いの通信線を対象に計測したデータの処理を行い、開発したシステムが有効に機能することを確認した。(図 3)

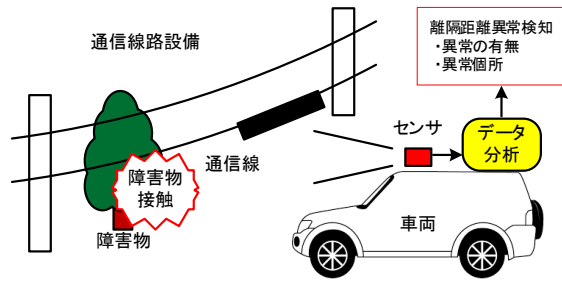


図1 通信線と障害物との離隔距離異常検知システム

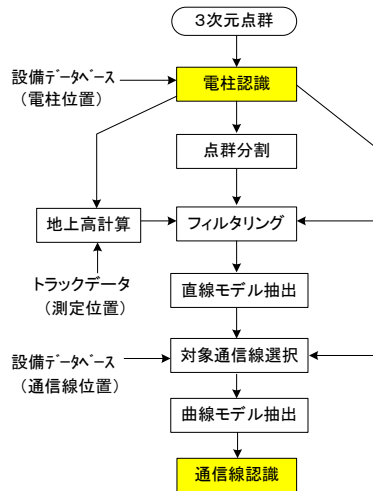
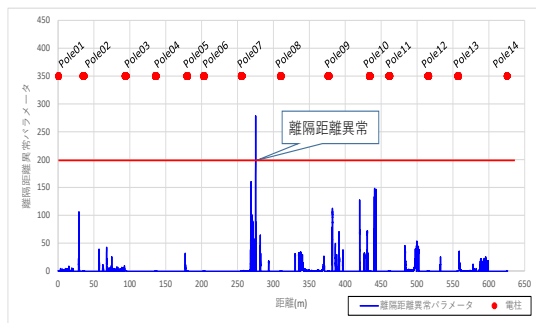
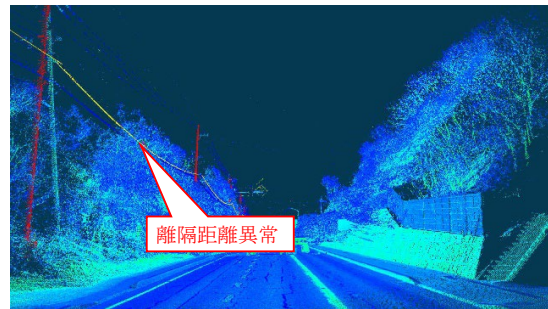


図2 物体認識の処理フロー



(離隔距離異常パラメータ)



(点群画像)

図3 離隔距離異常検知結果

研究担当者	阿部 素久, 松木 一隆 (株式会社四国総合研究所 電子アグリ技術部) 中山 博之 (四国電力送配電株式会社 通信システム部)
キーワード	通信線, 巡視点検, MMS, 3次元点群, 離隔距離
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@sken.co.jp https://www.sken.co.jp/

[無断転載を禁ず]

非常用ディーゼル発電機燃料弁冷却水系統管理の高度化 に関する研究

目 的

ディーゼル発電機は、一般的に燃料系統、潤滑油系統、冷却水系統等から構成され、冷却水系統に用いられる系統水には、不純物等による腐食を防止するため、純水処理の他、金属材料の種類や温度等の環境条件に応じて、溶存酸素の除去や腐食抑制剤が適用されている。

今回、検討の対象とした伊方発電所非常用ディーゼル発電機の燃料弁冷却水系統には純水処理が採用され、これまで腐食に起因するトラブル等は発生していないものの、一部の機器では部分的な腐食により定期的な部品取替が必要となっていたことから、腐食抑制方法の検討が望まれていた。

本研究では、ディーゼル発電機燃料弁冷却水系統の腐食抑制・防止について水質管理の面から検討し、設備の信頼性確保および点検頻度や部品取替のさらなる合理化を目的とした。

主な成果

1. 腐食原因の推定

燃料弁冷却水系統における燃料噴射弁のノズル弁座（低合金鋼）にて、ジャケットノズル（ステンレス鋼）との接触面で発生する腐食痕により部品取替となるケースが多かった。腐食原因を冷却水の水質分析等により検討した結果、微小なすきま部で生じる異種金属接触腐食やすきま腐食等の可能性が示唆された。

2. 腐食抑制方法に関する検討

腐食原因から有効と推察された種々の腐食抑制方法について、燃料噴射弁をはじめとする材料を対象に、試験片を用いたラボ試験を実施した結果、NO₂塩系不働態被膜型インヒビターを用いた方法（NO₂処理）が有効であることが確認された。また、NO₂塩系不働態被膜型インヒビターを対象として、銘柄の異なる薬剤およびNO₂濃度について腐食量の比較試験を実施した結果、当該系統に適した腐食抑制剤およびNO₂濃度を確認した。

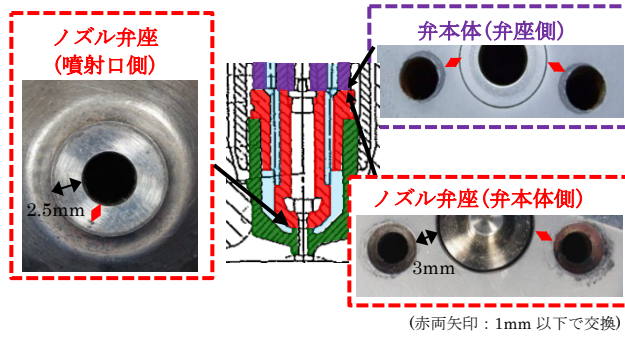


図1 燃料噴射弁の腐食状況

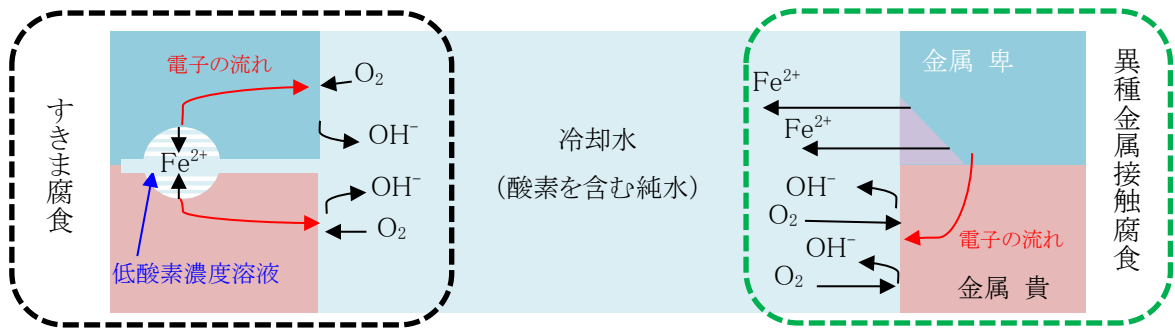


図2 推定された燃料噴射弁の腐食原因の概要

処理方法	接触面		接触面	
	S45C	SNM815	SNM815	SUS420J2
純水処理				
NO ₂ 処理				

図3 腐食試験後のテストピース外観 (一例)

研究担当者	石川裕史, 山本松平, 大鹿浩功 (株式会社四国総合研究所 化学バイオ技術部)
キーワード	ディーゼル発電機, 燃料弁冷却水, 燃料噴射弁, 異種金属接触腐食, 腐食抑制剤, 亜硝酸塩
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]

コンクリート柱用鉄筋破断診断装置「新型CPチェッカー」の開発

目 的

コンクリート柱の維持管理に広く活用されている当社製品「CPチェッカー」において、最新の磁気センサである TMR(トンネル磁気抵抗)センサを活用して、鉄筋破断箇所を 3 次元的にセンシングすることでより高度な鉄筋破断診断を実現する手法を考案し、その社会実装として「新型CPチェッカー」を開発する。

主な成果

1. TMR センサの活用

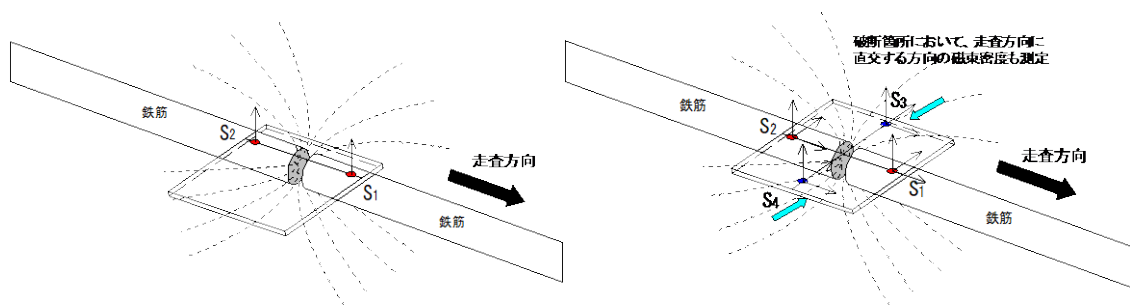
TMR センサの低消費電力の特徴をCPチェッカーのバッテリー持続時間に活かすことで、これまで単3電池4本で8時間の持続時間であったものを、単3電池2本で50時間以上に延ばすことができ、バッテリー寿命の延長と電池削減による軽量化が実現できた。

2. 3D(3次元)破断判定手法の考案

破断箇所から漏洩する磁束の計測において、これまで電柱内部から外側への1方向のみであったものを、3軸のTMRセンサ4個を活用して破断箇所を挟む側方も併せて立体的に漏洩磁束を測定することで、一方の磁極のみが存在する端部と両方の磁極が存在する破断部を判別できるようになり、破断判定性能が向上した。

3. コンクリート柱モックアップの作成

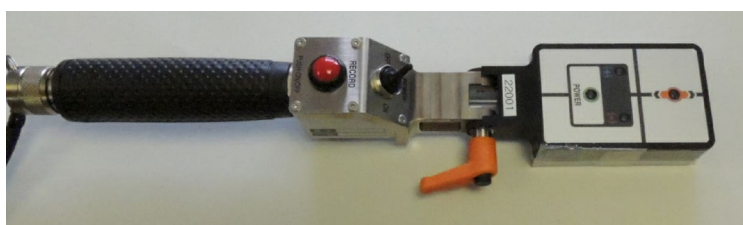
CPチェッカーの性能評価を行うにあたり、実際のコンクリート柱を忠実に模擬したモックアップを作成した。コンクリート中も空気中と同様な透磁率とみなせるため、内部の鉄筋位置やその模擬破断位置を確認しながら計測できる構造にすることで、3D破断診断手法の性能評価に大きく貢献した。



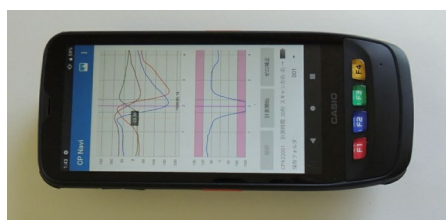
(a) 従来のCPチェッカー

(b) 新型CPチェッカー

図1 従来および新型CPチェッカーの破断箇所測定方法の比較



(a) センサユニット



(b) レコーダユニット



(c) 磁石ユニット

図2 新型CPチェッカーの外観

研究担当者	高岡哲也, 山地洋一郎, 平田和也 (株式会社四国総合研究所 産業応用技術部) 中西美一 (株式会社四国総合研究所 電子アグリ技術部) 内田徹, 三島敏裕 (株式会社四国総合研究所 経営企画部)
キーワード	CPチェッカー, コンクリート柱, 電柱, 鉄筋破断, 水素脆化, 漏洩磁束法, TMR センサ, MI センサ, 磁気センサ, 磁束密度
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]

既設アナログカメラを活用したデジタル ITV システムの開発

目 的

本研究では、従来型のアナログ方式の ITV システムをデジタル化するため、既設のアナログカメラや同軸ケーブルを最大限に活用し、デジタルカメラへの部分取替や増設が可能で、かつ同一システム上で両方式のカメラを運用できるデジタル ITV システムを開発する。

主な成果

1. 西条発電所向けデジタル ITV システムの設計

表 1 に示す基本設計仕様を実現するため、一般的なデジタルカメラ方式(AHD, HD-TVI, HD-CVI, HD-SDI, IP)について、カメラ画素数、映像伝送距離、他社機器との互換性、映像遅延、旋回式カメラ有無を比較した。その結果、同仕様を満たすためには HD-SDI 方式が最も有望であることが分かった。

2. 低周波同軸ケーブルを用いた HD-SDI 信号伝送試験

HD-SDI 方式は、高周波同軸ケーブルを使用することを前提としており、既設の低周波同軸ケーブルを使用する場合は減衰量が大きくなり、伝送可能距離の短縮が懸念される。

そこで、HD-SDI 信号伝送試験として、模擬ケーブルを使用したラボ試験や、実ケーブルを使用した現地試験を行った。それらの結果やケーブル劣化時の尤度を考慮し、低周波同軸ケーブルにおける減衰量が 62.5dB(距離換算 300m)以内であれば HD-SDI カメラを適用し、それ以上の場合は IP カメラを適用することとした。(図 1, 表 2)

3. 統合 ITV システムの製作

汎用デジタル方式をベースとし、低周波同軸ケーブルを活用してアナログカメラ・デジタルカメラを任意に選定可能な統合 ITV システムの設計を行い、基本仕様を全て満たしていることを確認した。なお同システムは、西条発電所新 1 号機運転開始時に、実運用を開始する予定である。(図 2)

表 1 基本設計仕様

1	新1号 ITV に2号 ITV を統合したシステムを構築する。
2	汎用デジタルカメラ方式を使用したシステムとする。
3	アナログカメラとデジタルカメラが混在する環境において、すべてのカメラを一樣に制御し、映像を一樣に監視できる。
4	カメラの取替や増設は、製造メーカーや機種種の制約なく、1台毎にアナログ、デジタルを任意に選定できる。
5	2号 ITV は、既設アナログカメラ毎に敷設されているケーブルを流用することで設備投資を抑制する。

表 2 HD-SDI 信号伝送試験結果(ラボ)

ケーブル長[m]		カメラ映像状態 (○:良好 ×不良)		ケーブル減衰量 (実測値) [dB]
3C2V (試験)	7C2V※ (現場)	EX-SDI 変換器 無	EX-SDI 変換器 有	
23.5	50	○	○	12.6
47	100	○	○	22.4
70.5	150	○	○	32.4
94	200	×	○	42.5
117.5	250	×	○	52.5
141	300	×	○	62.5
164.5	350	×	○	72.6
188	400	×	○	82.3
211.5	450	×	×	91.0
235	500	×	×	100

※ケーブル長(7C2V)は、ケーブル減衰量(カタログ値)から算出した推定値

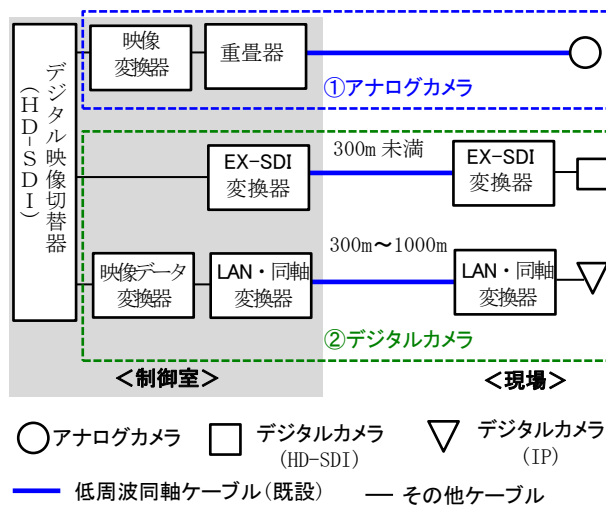
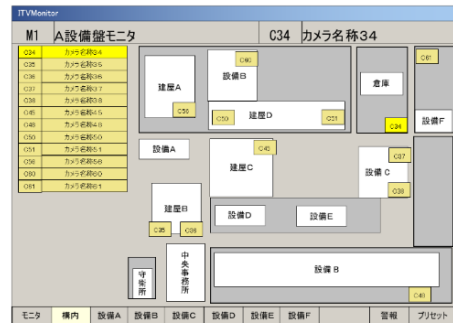


図 1 デジタル化時のカメラ構成



(a) ITV 制御装置



(b) ITV 操作ソフトウェア

図 2 統合 ITV システム

研究担当者	海稻隆成, 土田雅彦 (株式会社四国総合研究所 エネルギー技術部)
キーワード	ITV, 同軸ケーブル, 減衰率, アナログカメラ, HD-SDI カメラ, IP カメラ, デジタル化
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]

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)

目 的

CARS (Coherent Anti-Stokes Raman Spectroscopy: コヒーレントアンチストークスラマン分光法) を適用し, 水素のアンチストークス光を発生させて計測することにより, 計測箇所付近にレーザー誘起蛍光を発生する物体がある場合においても漏えい位置の探査を可能とする水素ガス検知技術を開発する。

主な成果

1. 可搬型装置を目指した光源の構築

ラマン効果を用いてガスを計測する場合, ラマン散乱光のうちレーザー波長より長波長に発生するストークス光を捉える手法が一般的であるが, 計測箇所の背後に近接して壁や配管等が存在する場合, それらにレーザー光が照射されることにより発生するレーザー誘起蛍光が強力な外乱光となり, 微量な漏えいの検知が困難となる。そこで, 本研究では, レーザー波長より短波長に発生するアンチストークス光を検知することでレーザー誘起蛍光の影響を回避して水素を検知する技術の開発を行った。

常温, 大気圧下で水素のアンチストークス光を得るため, CARS を適用したが, CARS ではレーザー波長とストークス波長の 2 種の光を同時に計測対象に入射する必要がある。

本研究では, 可搬型装置を目指し, レーザー光を二分岐し, 一方の光路にラマンセルを配置して発生させたストークス光と, もう一方の光路に入射したレーザー光をポンプ光として水素に照射し, アンチストークス光を発生させる二軸型光源を考案した。セル長 400 mm のラマンセルを適用し, 光源を構築した。

2. 光源の照射条件の最適化

構築した光源を用い, 条件を変化させてアンチストークス光計測試験を実施して照射条件を最適化し, ポンプ光とストークス光の強度比 $R(= I_S/I_P)$ を $0.140 \leq R \leq 0.173$ としたときに, アンチストークス光が最大となることを実験的に確認した。

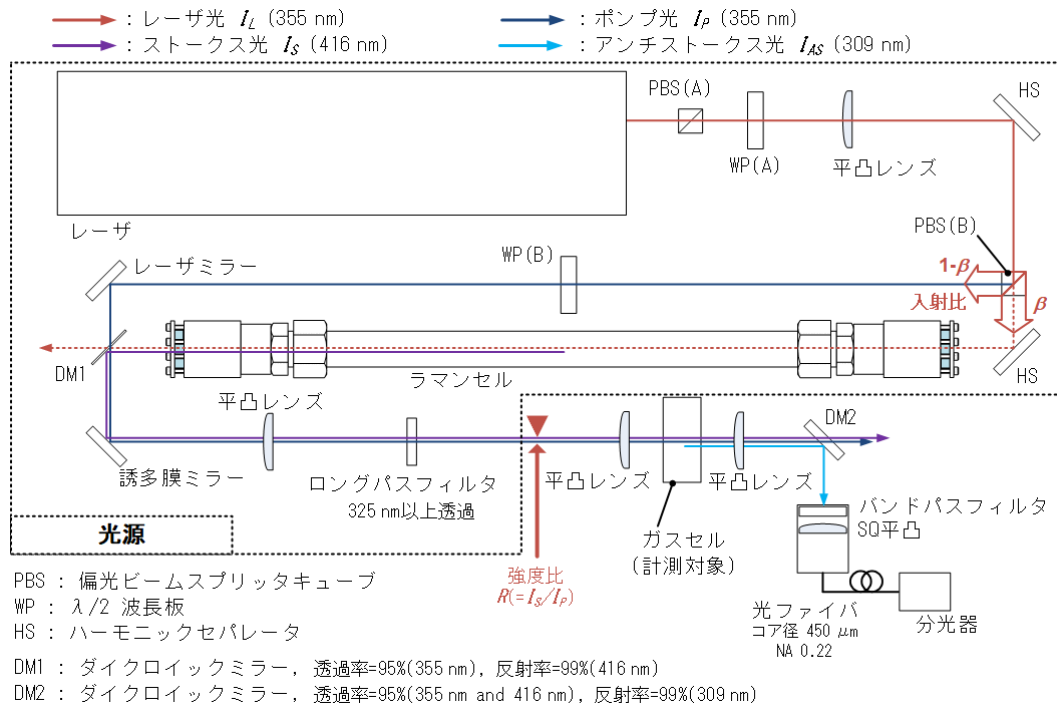


図1 光源の構成および最適化試験の配置

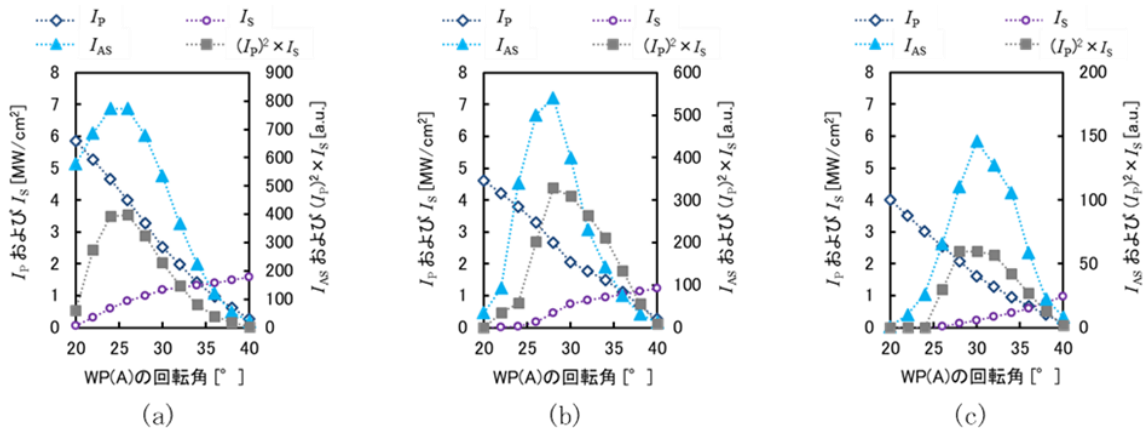


図2 光源の照射条件最適化試験結果の一例

レーザー光強度を(a)10.4 MW/cm², (b)8.32 MW/cm², (c)6.99 MW/cm²としたときの計測結果 (ラマンセル圧力: 0.7 MPa)

研究担当者	杉本幸代, 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	アンチストークス, レーザ, 水素, 漏えい検知器, コヒーレントアンチストークスラマン分光法
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]

通信線と障害物との離隔距離異常検知システムの開発

(株)四国総合研究所 電子アグリ技術部 阿部 素久
(株)四国総合研究所 電子アグリ技術部 松木 一隆
四国電力送配電(株) 通信システム部 中山 博之

キーワード : 通信線
巡視点検
MMS
3次元点群
離隔距離

Key Words : Communication cable
Patrolling operation
Mobile Mapping System
3D point cloud
Separation distance

Development of a system to detect abnormal separation distances automatically among communication cables and surrounding obstacles

Shikoku Research Institute, Inc., Electronics and Agricultural Technology Department

Motohisa Abe and Kazutaka Matsugi

Shikoku Electric Power Transmission & Distribution Company, Incorporated

Telecommunication Systems Department

Hiroyuki Nakayama

Abstract

We have developed a system that can detect abnormal conditions of separation distances among communication cables and surrounding obstacles to streamline patrolling operations on communication cables.

We have developed a prototype system that can detect abnormal conditions of separation distances among communication cables and surrounding obstacles automatically, and confirmed that system's availability through various experiments in the real field. That prototype system analyzes a group of 3D point data measured by MMS(3D-LiDAR) technology.

1. はじめに

電力会社では、電力系統を安定かつ効率的に運用するために、制御所と変電所や発電所等との間に架空通信ケーブル（以下、「通信線」という）を敷設・整備している。

これら広範囲にわたる通信線の保安を確保するために、定期的に保守員が現地を徒歩で移動しながら直接目視により巡視点検を行っている。

過去の巡視点検記録によると、異常事例として通信線と他のケーブルや樹木等（以下、「障害物」という）との接触が最も多く報告されている。

そこで、通信線の巡視点検の作業時間の短縮等をねらいに、通信線と障害物との離隔距離異常検知システムを開発したので報告する。

本システムは、車両で移動しながら通信線と障害物との離隔距離をセンサで計測して、異常の有無や異常個所を自動検知するものである。（図 1）

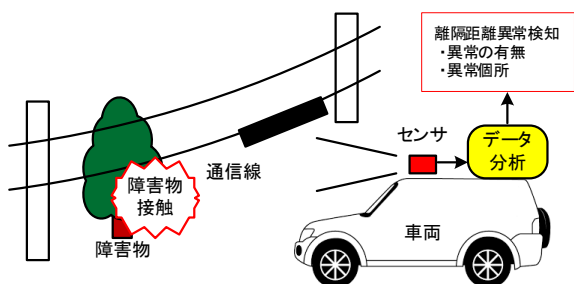


図 1 システムイメージ

2. システム構成

本システムは、図 2 のように、センサ部とデータ処理部で構成する。

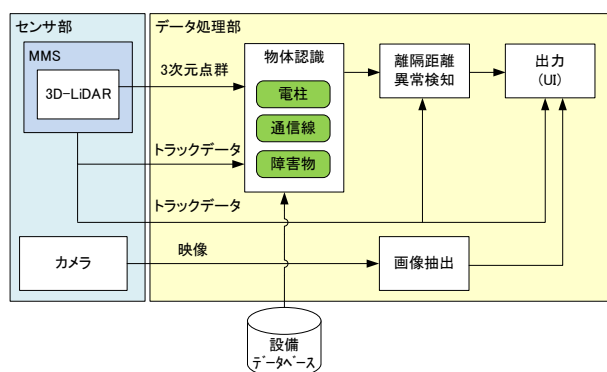


図 2 システム構成

センサ部には、離れた場所から通信線およびその周辺の物体の状態を安定して計測できる 3D-LiDAR (3-Dimensional Light Detection and Ranging) とカメラを使用する。

特に、車両で移動しながら計測するには、センサの自己位置と姿勢を正確に把握する必要があることから MMS (Mobile Mapping System) を採用した。

MMS (3D-LiDAR) により得られるデータは、物体表面の位置情報とレーザ反射率値からなる点の集合 (3次元点群) であり、カメラは、色情報がなく物体の形状を視認しにくい 3D-LiDAR の弱点を補うためのものである。

データ処理部には、計測した 3次元点群から通信線や障害物の位置や形状を求め、その位置関係から離隔距離異常を自動検知する独自開発のソフトウェアを搭載する。

設備データベースには、電柱の緯度・経度および電柱毎の通信線架設位置の各データを収容する。

3. データ処理

センサ部の MMS (3D-LiDAR) やカメラで収集したデータを独自開発したソフトウェアで処理して、離隔距離異常の有無や異常個所を自動検知する。

その主な処理内容は次の通りである。

3.1 物体認識

本システムでは、大容量データを効率的に処理するために、図 3 のように 6つのステップに分けて分析・処理して、電柱、通信線、障害物を認識する。

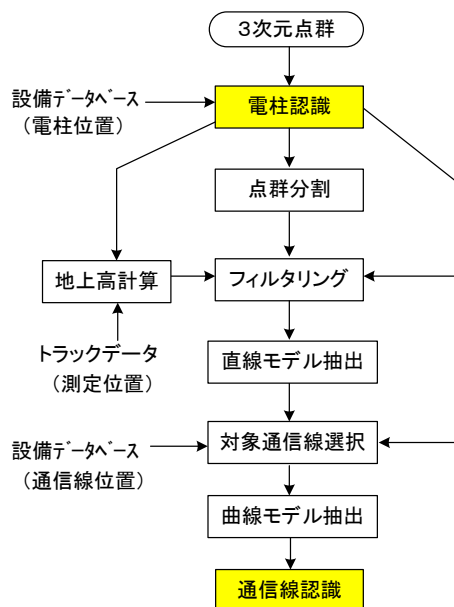


図 3 物体認識の処理フロー

(1) 電柱認識処理

MMS (3D-LiDAR) で計測した 3 次元点群の中から、通信線を架設している電柱を識別する。

設備データベースの電柱の緯度・経度を点群座標に変換し、その近傍の点群を走査して分布が最も円柱に近い点群を電柱点群と識別する。(図 4)

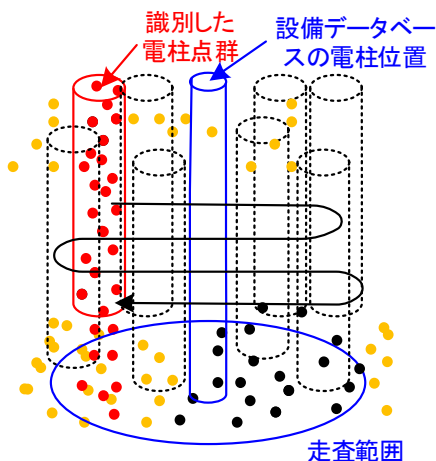


図 4 電柱認識方法の原理

(2) 点群分割処理

MMS (3D-LiDAR) で計測した 3 次元点群の中から効率的に通信線を認識するために、通信線点群が存在する可能性が高い点群の絞り込みを行う。

電柱間に敷設されている通信線はカテナリー曲線で近似できるが、計測した 3 次元点群から直接カテナリー曲線を導くことは容易ではない。

そこでまず、直線による折れ線近似を行うために電柱間の点群を小さな区間 (10~20m) に分割する。(図 5)

この点群分割を行うことで、通信線点群はほぼ直線状に分布する形になる。

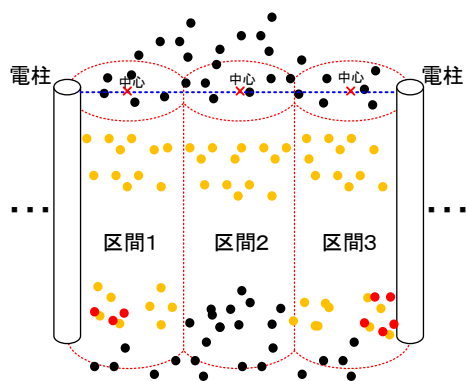


図 5 点群分割方法の原理

(3) フィルタリング処理

点群処理を短時間かつ高精度に行うために、電柱間の点群をさらに、「地上高」、「電柱間空間における平面との距離」、「反射率」の 3 つの指標を用いて通信線が存在する点群の絞り込みを行う。

特に、「電柱間空間における平面との距離」によるフィルタリングでは、図 6 のように電柱間空間における平面から一定距離だけ離れた点群を通信線点群ではないとして除外する。

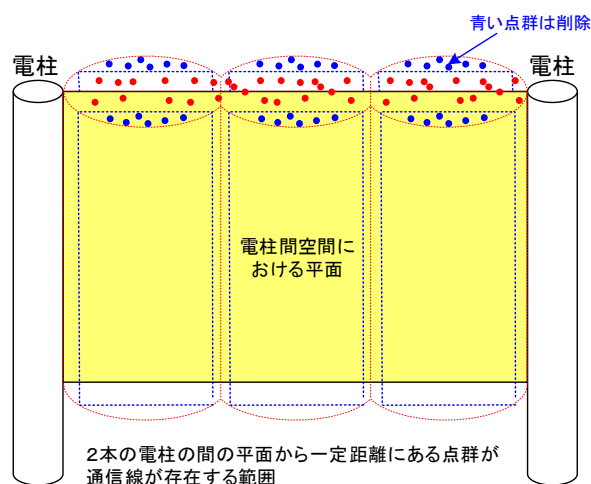


図 6 電柱間空間における平面との距離によるフィルタリングの原理

(4) 直線モデル抽出処理

点群分割処理およびフィルタリングをした点群領域から、RANSAC (RANDOM SAMPLE CONSENSUS: ロバスト推定アルゴリズム) を使って直線モデルを抽出する。

具体的には、ランダムに 2 点をサンプリングし、その 2 点を通る直線モデルに対し、その近傍に存在する点の数が最も多い直線モデルを最適なモデルとして抽出する。1 つの直線モデルを抽出すると、対象の点群領域から直線モデル近傍の点群を除去して、さらに別の直線モデルを抽出する。

この処理を繰り返すことにより、電柱間に存在する全ての直線モデルを抽出する。

なお、電柱間を結んだ直線方向から大きく外れる直線モデルは、支線や引き込み線であるため除外する。(図 7)

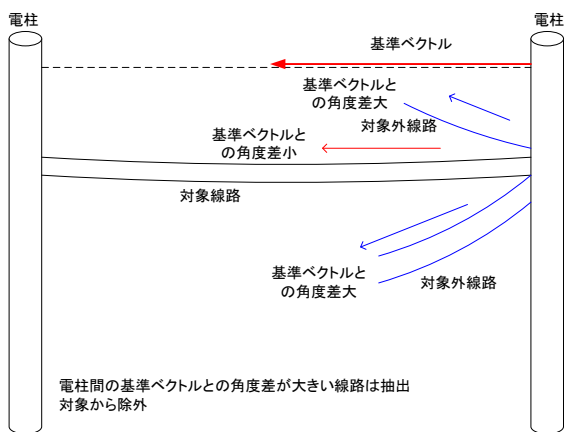


図7 方向による直線モデル抽出の原理

(5) 対象通信線選択処理

抽出した直線モデルの中から、設備データベースの通信線架設位置と「直線モデルの連続性」の2つの条件を使って、巡視点検対象の通信線モデルを選択する。

ここで「直線モデルの連続性」による選択とは、隣接する区間の直線モデルは連続であるという考えのもと、区間の境界で同じ位置に存在する直線モデルを選択するものである。

(6) 曲線モデル抽出処理

選択した区間毎の直線モデルから曲線モデル(2次曲線)を抽出する。

具体的には、直線モデルを合成した折れ線近似モデルを用いて2次曲線モデルの初期パラメータ(両端の座標および中心点の高さ)を設定し、このパラメータを微調整して、曲線モデルと直線モデルとの距離が最も小さくなる曲線モデルを抽出する。(図8)

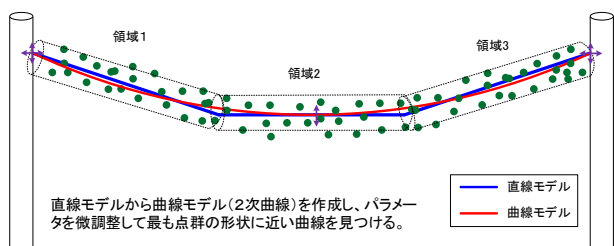


図8 曲線モデルの抽出の原理

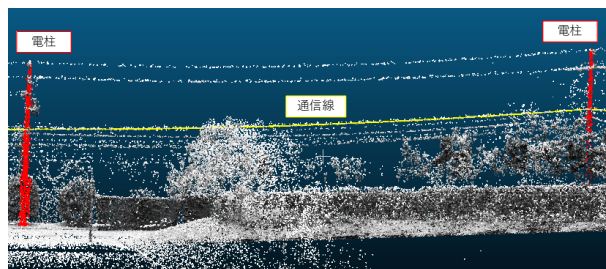


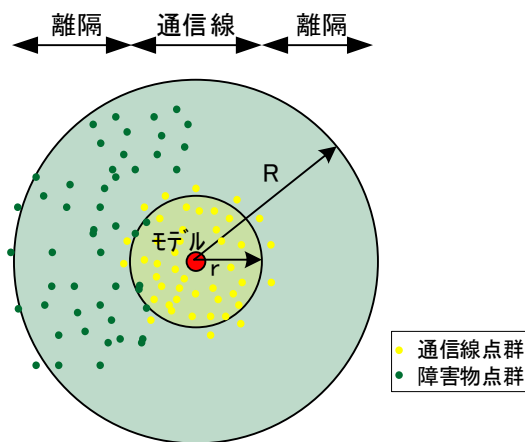
図9 物体認識処理の例

3.2 離隔距離異常検知

3次元点群のうちで、通信線近傍の電柱以外の点群を障害物とし、通信線モデルに接近または接触している障害物を自動判定する。

一般に、3D-LiDARによって得られる点群の分布には一定の広がりがあるので、一定の距離(半径r)の領域を通信線、その外側を離隔領域と定義し、それぞれの領域に含まれる点数の比(以下、「離隔距離異常パラメータ」という)により判定する。

(図10)



$$\text{離隔距離異常パラメータ} = \frac{\text{離隔領域の点数}}{\text{通信線領域の点数}}$$

図10 離隔距離異常パラメータ

抽出した通信線モデルに沿って、離隔距離異常パラメータを計算し、一定の値以上となる場合は離隔距離異常として検出させる。

特に、離隔距離異常と判定した場所については、カメラで撮影した画像および点群画像を個別に出力表示できる仕様にした。

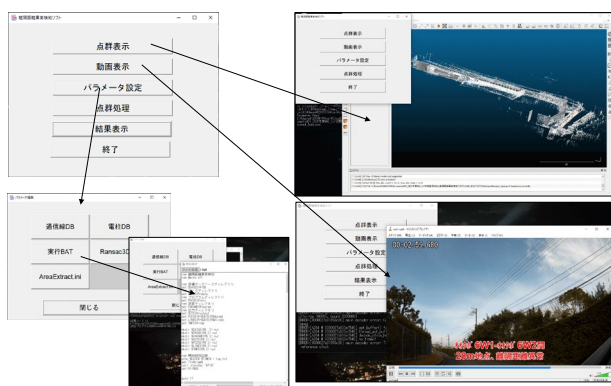


図 11 ユーザーインターフェース

4. フィールド試験による検証

国道沿いの通信線を対象に計測した 3 次元点群を本システムで処理した。

図 12 は計測した一部区間の離隔距離異常パラメータを図示したもので、横軸は線路距離、縦軸は各地点における離隔距離異常パラメータ値である。

Pole07 から Pole08 の間で、離隔距離異常パラメータ値が大きくなっているが、これは樹木が通信線に接触している個所である。

図 13 は離隔距離異常パラメータの異常閾値を 200 として処理した結果であり、樹木の接触状況を写真と点群画像で確認できるなど、開発したシステムの有効性を確認した。

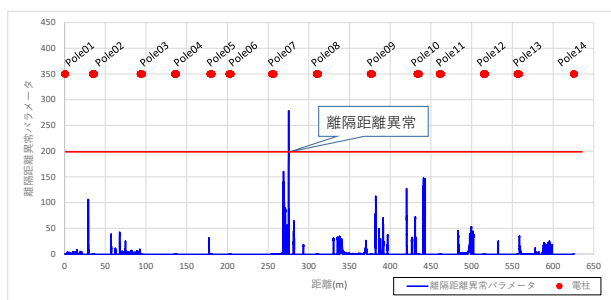


図 12 離隔距離異常パラメータの計算結果

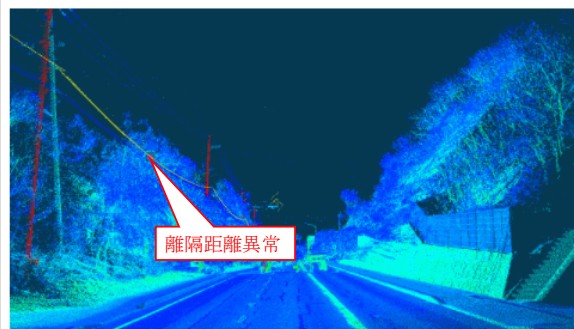
離隔距離異常点検結果

日付：YYYY/MM/DD
点検線路：XXXX光ケーブル
区間：Pole01-Pole14
距離：536.96m

Pole07 - Pole08 間
離隔距離異常:20.79m地点



離隔距離異常発生箇所 (写真)



離隔距離異常発生箇所 (点群)

図 13 離隔距離異常検知結果レポートの例

5. まとめ

通信線の巡視点検作業の効率化をねらいに、通信線と障害物の離隔距離異常検知システムを開発した。

MMS (3D-LiDAR) を用いて測定した 3 次元点群データから、通信線と障害物の離隔距離異常を自動検知するシステムを試作し、実フィールドで機能の有効性を確認した。

将来の実用化に向けて、

- ・ GPU 対応や高速アルゴリズムの適用等によるさらなる処理の高速化
 - ・ 低価格 MMS 等の採用による低コスト化
- などが今後の課題である。

【謝辞】

本研究は、四国電力送配電(株)通信システム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) 伊東敏：「自動運転のためのセンサシステム入門」，日刊工業新聞社，2019年9月
- 2) 榎本圭高 他：「モバイルマッピングシステムを用いた架空線路構造物点検支援システムの設計と評価」，電子情報通信学会論文誌 B, Vol.J100-B No.12，電子情報通信学会 通信ソサイエティマガジン，2017年12月
- 3) 和氣正樹 他：「MMS（モバイルマッピングシステム）を用いた3D設備管理技術」，電子情報通信学会 通信ソサイエティマガジン，2018年12巻1号

非常用ディーゼル発電機燃料弁冷却水系統管理の高度化に関する研究

株式会社四国総合研究所 化学バイオ技術部 石川 裕史
株式会社四国総合研究所 化学バイオ技術部 山本 松平
株式会社四国総合研究所 化学バイオ技術部 大鹿 浩功

キーワード： ディーゼル発電機
燃料弁冷却水
燃料噴射弁
異種金属接触腐食
腐食抑制剤
亜硝酸塩

Key Words : diesel generator
fuel valve cooling water
fuel injection valve
galvanic corrosion
corrosion inhibitor
nitrite

Research on improving water control of fuel valve cooling water system in emergency diesel generator

Shikoku Research Institute, Inc., Chemical Technology and Biotechnology Department
Hirofumi Ishikawa, Shohei Yamamoto, Hironori Oshika

Abstract

Pure water treatment is used for fuel valve cooling water system in emergency diesel generators in Ikata Nuclear Power Station. Although no troubles caused by corrosion have occurred so far, it has been necessary to replace parts due to partial corrosion in the fuel injection valve. Therefore, it has been desired to study a method for suppressing corrosion.

We examined the corrosion control of fuel valve cooling water system in emergency diesel generators. As a result, it was suggested that the nitrite corrosion inhibitor can suppress the corrosion on the contact surface of the fuel injection valve.

1. はじめに

ディーゼル発電機（以下、D/G という）は、一般的に燃料系統、潤滑油系統、冷却水系統等から構成され、冷却水系統に用いられる系統水には、不純物等による腐食を防止するため、純水処理の他、金属材料の種類や温度等の環境条件に応じて、溶存酸素の除去や腐食抑制剤が適用されている。

今回、検討の対象とした伊方発電所非常用 D/G の燃料弁冷却水系統には純水処理が採用され、これまで腐食に起因するトラブル等は発生していないものの、一部の機器では部分的な腐食により定期的な部品取替が必要となっていたことから、腐食抑制方法の検討が望まれていた。

本研究では、D/G 燃料弁冷却水系統の腐食抑制・防止について水質管理の面から、設備の信頼性確保および点検頻度や部品取替のさらなる合理化を目的に検討した結果について報告する。

2. 腐食状況調査

2.1 燃料弁冷却水系統の概要

図-1 に、D/G 燃料弁冷却水系統の概略図を示す。当該系統は、タンク、ポンプ、冷却器等から構成され、冷却水は、D/G 機関内で燃料噴射弁を冷却する。また、燃料弁冷却水タンクが大気開放となっているが、冷却器（二次冷却器）を有する等、密閉系統に近い構造となっている。なお、D/G の冷却水温度は停止時で約 25℃であるが、1 回/月の運転時は約 40℃である。

表-1 に当該系統に使用される主要構成材料、図-2 に燃料噴射弁の概要図を示す。主配管には、亜鉛メッキ鋼、冷却器の胴側には炭素鋼が使用され、

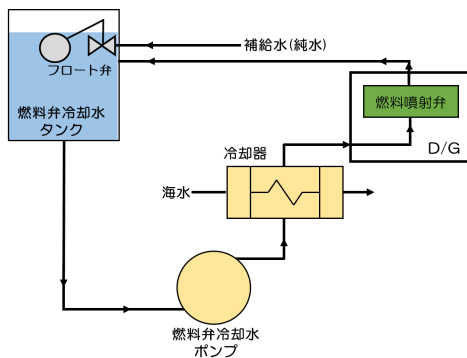


図-1 D/G 燃料弁冷却水系統の概略図

燃料噴射弁は弁本体（炭素鋼）、ノズル弁座（低合金鋼）、ジャケットノズル（ステンレス鋼）が金属接触しており、特にノズル弁座では、ジャケットノズルとの接触面における腐食痕の発生により部品取替が必要となるケースが多く見られた。

表-1 系統機器に用いられる主要構成材料

装置・機器		材料	
主要構成材料	配管	主配管	亜鉛メッキ鋼
		枝管	銅
	冷却器	胴	炭素鋼
		伝熱管	チタン
その他 (ポンプ、タンク等)		銅合金、炭素鋼等	
燃料噴射弁	弁本体	炭素鋼 (S45C)	
	ノズル弁座	低合金鋼 (SNCM815)	
	ジャケットノズル	ステンレス鋼 (SUS420J2)	
	ノズル	ステンレス鋼 (SUS420J2)	

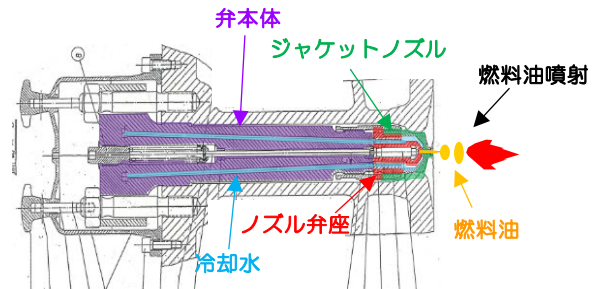


図-2 燃料噴射弁の概要図

2.2 腐食原因の推定

燃料噴射弁の腐食状況を図-3 に示す。燃料噴射弁の押棒穴と冷却水流路の距離は、弁本体側で約 3mm、噴射口側で約 2.5mm である。各部材のうち、使用に伴って流路近傍で生じる腐食痕と押棒穴までの距離が 1mm 以下となったものは、部品交換の対象となる。

推定された燃料噴射弁の腐食原因の概要を図-4 に示す。金属接触面の冷却水流路近傍では、わずかに減肉している箇所が一部確認されたが、同箇所からは Cl や SO₄ 等の腐食因子は検出されなかった。また、冷却水（純水）中には、溶存酸素を含むことから、各材料間で有意な電位差が生じる場合の異種金属接触腐食や微小なすきま部で生じる酸素濃淡電池腐食（すきま腐食）の可能性が示唆された。

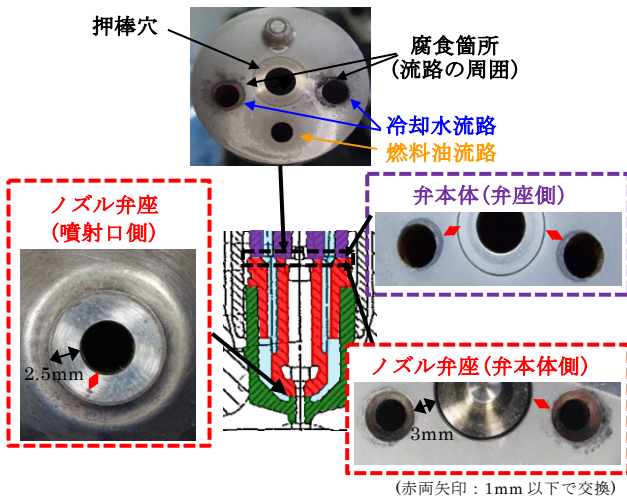


図-3 燃料噴射弁の腐食状況

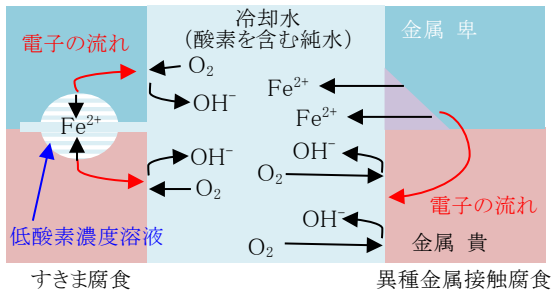


図-4 推定された燃料噴射弁の腐食原因の概要

3 腐食抑制方法の検討

3.1 腐食抑制方法の選定

推定された燃料噴射弁の腐食対策として、選定した腐食抑制方法を表-2 に示す。溶存酸素の除去や材料間の電位差低減等が期待される種々のインヒビター等を用いた処理方法について試験片を用いたラボ試験を行った。また、燃料噴射弁以外の材料の腐食へ及ぼす影響についても確認した。

表-2 選定した腐食抑制方法

処理方法	処理内容	備考
①純水処理	純水使用	現状処理方法
②アルカリ処理	NaOH を添加	定期的に pH8.5~9.5 に調整
③Mo 処理	メーカー推奨薬品濃度 (3000ppm) で添加	Mo 酸塩系不働態被膜型インヒビター
④NO ₂ 処理	メーカー推奨薬品濃度 (5000ppm) で添加	NO ₂ 塩系不働態被膜型インヒビター
⑤N ₂ H ₄ 処理	N ₂ H ₄ を添加	定期的に pH8.5~9.5 に調整
⑥低 DO 処理	脱気処理後に連続 N ₂ 曝気	DO0.5ppm 以下を目標に調整

3.2 腐食抑制方法の比較試験

(1) 試験材料

表-3 に、試験片の主な化学組成を示す。試験材料には、当該系統の主要構成材料である亜鉛メッキ鋼 (SS400 に溶融亜鉛メッキ処理)、炭素鋼 (STPT370)、リン青銅铸件 (CAC502C) および燃料噴射弁に用いられている炭素鋼 (S45C)、低合金鋼 (SNCM815)、ステンレス鋼 (SUS420J2) の試験片を選定した。

なお、燃料噴射弁に用いられている 3 種の試験片は、燃料噴射弁を模擬しそれぞれ S45C と SNCM815、SNCM815 と SUS420J2 を面接触 (上下の孔をインシュロックで固定) したものを使用した。

表-3 試験片の主な化学組成 (Weight %)

材料	STPT 370	CAC 502C	S45C	SNCM 815	SUS 420J2
寸法	50mm×100mm (φ4mm 孔×1)	50mm×100mm (φ4mm 孔×2 上下, φ5mm 孔×1 中央)			
C	0.22	-	0.44	0.14	0.31
Si	0.21	0.00	0.24	0.27	0.42
Mn	0.68	-	0.66	0.44	0.42
P	0.02	0.21	0.01	0.01	0.02
S	0.01	-	0.02	0.02	0.01
Cu	-	Bal.	0.15	0.03	-
Cr	-	-	0.12	0.84	13.1
Ni	-	0.14	0.07	4.18	0.22
Mo	-	-	-	0.17	-
Fe	Bal.	0.01	Bal.	Bal.	Bal.
Sn	-	9.39	-	-	-
Pb	-	0.00	-	-	-
Zn	-	0.15	-	-	-
Al	-	0.00	-	-	-
Sb	-	0.00	-	-	-
規格	JISG 3456	JISH 5121	JISG 4051	JISG 4053	JISG 4303

(2) 試験方法

試験の状況を図-5 に示す。40℃の各試験液を満たしたアクリル樹脂製の試験容器に各試験片を浸漬し、浸漬開始から約 1 ヶ月後における脱酸化被膜処理後の腐食量 (亜鉛メッキ鋼については水側への溶出量) および試験後の試験片外観を比較した。

また、実機において腐食が懸念されている燃料噴射弁については、試験後における試験片の接触

面を回転式自動研磨機で 30 秒研磨 (#4000) し、腐食痕の測定を行った。測定は、研磨後の接触面を撮影した画像を、画像処理ソフト (ImageJ) を用いて色調差を白黒の 2 極分化し、試験片中央孔 (ϕ 5mm) 周囲の黒色部を腐食痕面積とした。

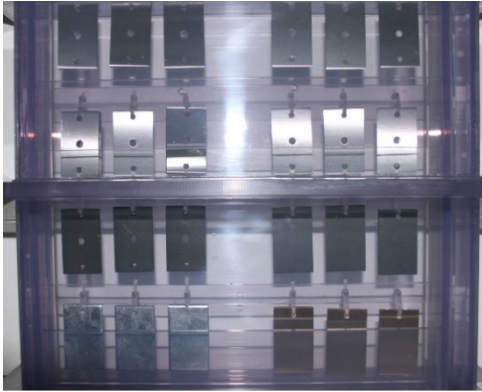


図-5 試験状況 (一例)

(3) 試験結果

(a) 腐食量測定

各試験片の腐食量の測定結果を図-6 に示す。

現状の処理である①純水処理に対して、②アルカリ処理では、亜鉛メッキ鋼を除いて腐食量が増加し、③Mo 処理についても S45C における SNCM815 との接触面や亜鉛メッキ鋼で腐食量が増加した。

一方、⑤ N_2H_4 処理、⑥低 DO 処理は SUS420J2 を除いて腐食量が低下しており、④ NO_2 処理についても、特に腐食が懸念されていた燃料噴射弁の材料については、腐食量が低下した。

(b) 試験片外観観察

試験後に回収した燃料噴射弁の試験片外観観察結果を図-7 に示す。

試験片の外観を観察した結果、①純水処理に対して、腐食量の低下が見られた⑤ N_2H_4 処理および⑥低 DO 処理は、S45C と SNCM815 の接触面において全体に腐食痕が見られた。また、SNCM815 と SUS420J2 の接触面では腐食痕は小さかったが、⑥低 DO 処理の方が腐食痕は軽微であり、燃料噴射弁以外の材料についても腐食の進行が抑制できていた。

一方、④ NO_2 処理では、亜鉛メッキ鋼においてメッキ腐食による腐食痕が見られたが、その他の材料では外観的な腐食は確認されず、接触浸漬した。

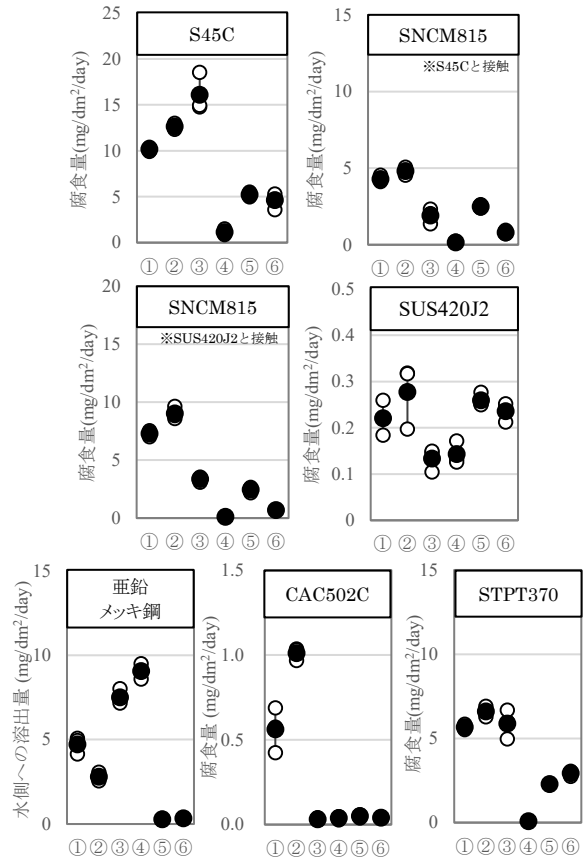


図-6 各処理における腐食量の比較

(○ : 各測定値、● : 平均値)

処理方法	接触面		接触面	
	S45C	SNCM815	SNCM815	SUS420J2
① 純水処理				
④ NO_2 処理				
⑤ N_2H_4 処理				
⑥ 低 DO 処理				

図-7 各処理における試験片外観の比較 (一例)

燃料噴射弁の材料についても全ての組み合わせで腐食痕はほとんど生じなかった。

(c) 腐食痕面積測定

面接触させた各燃料噴射弁試験片における腐食痕面積の測定結果を図-8、接触面における腐食痕の状況を図-9に示す。

接触浸漬時のテストピース中央孔(φ5mm)周囲の腐食痕面積を比較した結果、④NO₂処理により各材料間の接触面で生じる腐食を顕著に抑制できることを確認した。また、⑥低DO処理も接触面の腐食を低減できる傾向が見られたが、SNCM815におけるS45Cとの組み合わせでは純水処理と同程度の腐食痕面積であった。

これらの試験結果から、燃料噴射弁の接触面で生じている腐食抑制方法については、④NO₂処理が最も腐食抑制効果の大きい方法であると考えられた。

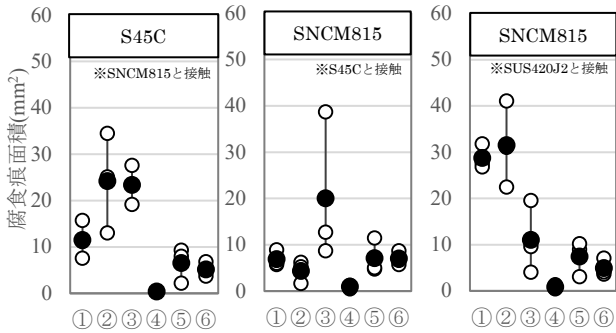


図-8 腐食痕面積の測定結果

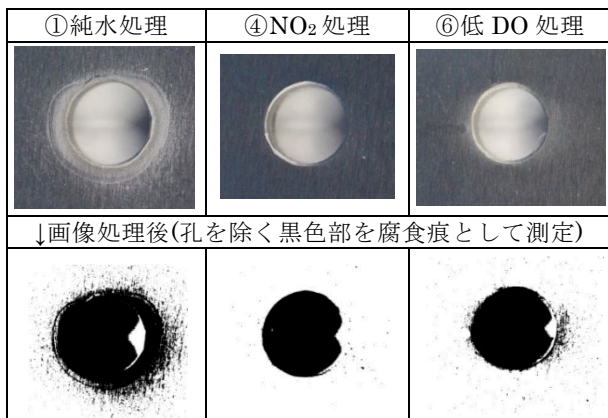


図-9 SNCM815 (SUS420J2 と接触) の腐食痕の状況 (一例)

3.3 腐食抑制剤の選定

3.2 (3)の試験結果から、燃料噴射弁への腐食抑制効果が大きいと考えられた NO₂ 塩系不動態被膜

型インヒビターを対象に、銘柄の異なる薬剤を用いて腐食量の比較試験を行った。また、NO₂処理にて懸念された亜鉛メッキ鋼の腐食抑制を考慮し、適切な NO₂濃度等についても合わせて検討した。

(1) 試験材料

燃料噴射弁の材料については、炭素鋼 (S45C)、低合金鋼 (SNCM815) およびステンレス鋼 (SUS420J2) の3種を面接触 (上下の孔をインシュロックで固定) したものを使用した。また、腐食抑制条件の検討のために亜鉛メッキ鋼 (SS400 に溶融亜鉛メッキ処理) を使用した。

(2) 試験方法

試験に用いた NO₂ 系薬剤を表-4に示す。各 NO₂ 系薬剤を添加し、NO₂ 濃度を調整した各試験液に、燃料噴射弁の面接触した試験片を浸漬させ、約1ヶ月後における脱酸化被膜処理後の腐食量および試験片外観を比較した。なお、試験温度は、加速的な試験条件として70℃にて行った。

また、燃料噴射弁の材料にて腐食抑制効果が認められた薬剤銘柄については、亜鉛メッキ鋼への腐食抑制効果の検討のため、NO₂濃度および水温を調整して、腐食量 (水側への溶出量) の測定を行った。

表-4 試験に用いた NO₂ 系薬剤

NO ₂ 系薬剤銘柄	製品 A	製品 B	製品 C
推奨 NO ₂ 濃度 (ppm)	1200~1500	150~300	250~450
備考	3.2の試験で使用	-	pH調整にNaOHが必要

(3) 試験結果

(a) 腐食量測定

燃料噴射弁の材料における純水処理に対する腐食量を図-10に示す。

面接触させた燃料噴射弁構成材料では、純水処理と比較して薬剤銘柄に関わらず NO₂濃度 150ppm以上で腐食を抑制できることを確認した。また、製品 A では、SNCM815 および SUS420J2 において NO₂濃度 300ppm と比較して NO₂濃度 500~700ppmの方が腐食量を低減できる傾向が見られた。

一方、製品 B および製品 C では、メーカー推奨濃度である NO₂ 濃度 300ppm において、純水処理と比較して各材料ともに腐食量は少なかった。

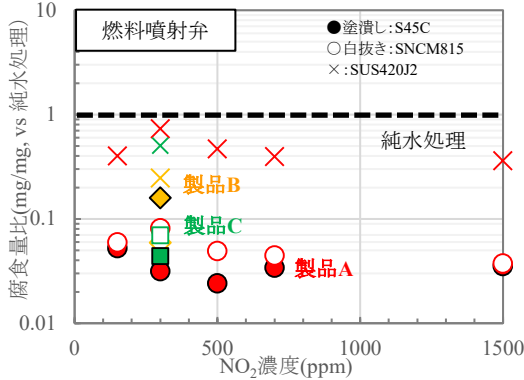


図-10 NO₂系薬剤を用いた各材料の腐食量比 (対純水処理)

(b) 試験片外観観察

脱酸化被膜処理後の試験片の外観観察結果を図-11 に示す。

製品 A について、NO₂ 濃度 150ppm では S45C と SNCM815 間および SNCM815 と SUS420J2 間において腐食痕が確認されたが、NO₂ 濃度 300~700ppm では、燃料噴射弁に用いられる各材料について、接触面で生じる腐食を顕著に抑制できることを確認した。

一方、製品 B および製品 C では製品 A と比較して、特に S45C と SNCM815 の接触面が顕著に腐食していた。これは、製品 B および製品 C ともに腐食量は製品 A と大きな差が見られないことから、材料間の電位差にともない局所的な異種金属接触腐食が生じている可能性が示唆された。

以上の結果から、燃料噴射弁の接触面における腐食抑制方法は、製品 A を使用して、NO₂ 濃度 500ppm 程度で管理する方法が特に優れている結果となった。

(c) 亜鉛メッキ鋼に及ぼす NO₂ 濃度と水温の影響

燃料噴射弁の接触面において腐食抑制効果が確認された製品 A を用いて、亜鉛メッキ鋼の腐食に及ぼす NO₂ 濃度と水温の影響について試験した結果を図-12 に示す。

試験した結果、NO₂ 濃度の上昇とともに、亜鉛メッキ鋼における腐食量の上昇が見られた。また、水

温については、より低い水温の方が腐食量を抑制できると考えられ、実機における水温を考慮した場合、運転時 (40℃) はおよそ 1 回/月であり、停止時 (25℃) の方が長期間となることから、NO₂ 濃度 500ppm 程度とすることで腐食量を現状の純水処理と同等以下に抑制できると考えられる。

処理方法 (NO ₂ 濃度)	接触面		接触面	
	S45C	SNCM815	SNCM815	SUS420J2
純水処理 (0ppm)				
NO ₂ 処理 製品 A (150ppm)				
NO ₂ 処理 製品 A (300ppm)				
NO ₂ 処理 製品 A (500ppm)				
NO ₂ 処理 製品 A (700ppm)				
NO ₂ 処理 製品 B (300ppm)				
NO ₂ 処理 製品 C (300ppm)				

図-11 各処理における試験片外観の比較 (一例)

以上の結果から、燃料噴射弁の接触面および亜鉛メッキ鋼に対する腐食抑制方法として、製品 A を用いて NO₂ 濃度 500ppm 程度で管理する方法が最も適していると考えられる。

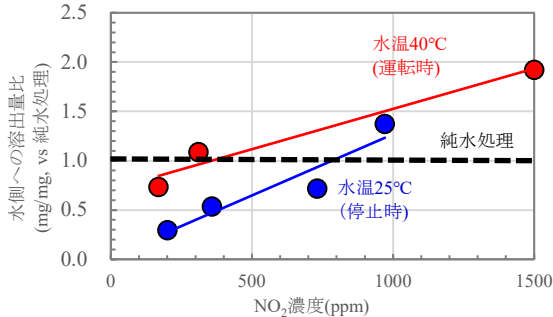


図-12 亜鉛メッキに及ぼす NO₂ 濃度と水温の影響 (対純水処理)

4. まとめ

燃料噴射弁の接触面で発生していた腐食原因は、異種金属接触腐食である可能性が示唆された。これらの腐食抑制方法を検討した結果、NO₂ 塩系不働態被膜型インヒビターである製品 A を用いて、燃料噴射弁の接触面の腐食抑制できることが示唆された。また、NO₂ 塩系不働態被膜型インヒビターを使用することで腐食が懸念された亜鉛メッキ鋼については、NO₂ 濃度を 500ppm 程度で管理することで、腐食量を現状の純水処理と同等以下に抑制できることを確認した。今後、実機適用に向けた試運用および評価をおこなう予定である。

【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) 荒牧國次：「腐食抑制剤の作用」, 材料と環境, 56 (2007)
- 2) 堀正：「ベンゾトリアゾールの性状と用途および使用方法」, 防食技術
- 3) 原信義：「金属腐食の基礎概念」, Journal of the Vacuum Society of Japan, Vol.44, No.10 (2001)
- 4) 迫田章人ら：「亜鉛めっきの耐食性と腐食生成物との関係」, 表面技術, Vol.40 (1989)

- 5) 松川安樹ら：「水道水中における亜鉛の腐食挙動に及ぼすアニオンの影響」, 材料と環境 Vol.57 (2008)
- 6) 山手利博：「建築設備配管系における異種金属接触腐食と対策」, 竹中技術研究報告 No.64 (2008)

コンクリート柱用鉄筋破断診断装置「新型CPチェッカー」の開発

(株)四国総合研究所 産業応用技術部	高岡 哲也
(株)四国総合研究所 産業応用技術部	山地 洋一郎
(株)四国総合研究所 産業応用技術部	平田 和也
(株)四国総合研究所 電子アグリ技術部	中西 美一
(株)四国総合研究所 経営企画部	内田 徹
(株)四国総合研究所 経営企画部	三島 敏裕

キーワード： CPチェッカー
漏洩磁束法
鉄筋破断
コンクリート柱
TMR センサー

Key Words : CP Checker
Magnetic Flux Leakage
rebar breakage
concrete poles
TMR sensor

The development of “Advanced CP Checker,” A Rebar Breakage Diagnostic Device for Concrete Poles

Shikoku Research Institute, Inc., Industry Application Technology Department

Tetsuya Takaoka, Yoichiro Yamaji, Kazunari Hirata

Shikoku Research Institute, Inc., Electronics and Agricultural Technology Department

Yoshikazu Nakanishi

Shikoku Research Institute, Inc., Corporate Planning Department

Toru Uchida, Toshihiro Mishima

Abstract

Concrete poles, which are important infrastructure equipment for achieving a stable power supply, are installed on the assumption that they will be used for a long period. Also, deterioration over time occurs during that time, causing surface peeling, cracking, etc., too. Therefore, the electric power company that manages the concrete poles regularly inspect these poles by visual inspection and tapping to confirm their soundness.

The strength of the concrete pole is closely related to the condition of the rebars. If the condition of rebars being broken or corroded can be confirmed in advance, the concrete pole will be able to rebuild at an earlier stage than when the deterioration can be visually confirmed from the surface. If it is possible to find such rebar breakage, the risk of breaking concrete poles will be suppressed.

In response to such demands, in 2004, we developed a rebar breakage diagnostic device "CP Checker", a device that can non-destructively confirm the rebar breakage in concrete poles and has sold more than 500 products so far. Recently, electronic devices, such as sensors, have undergone remarkable evolution. Since these devices can be expected to make a significant contribution to the diagnosis of rebar breakage, we have developed the "Advanced CP checker" that uses the latest magnetic sensors.

1. はじめに

電力安定供給の実現において重要なインフラ設備である電柱は、コンクリート製のものが主体となっている。コンクリート柱は長期の利用を前提として設置されているが、その間に経年劣化が生じ、表面の剥離、ひび割れ、接合面の割れなどが発生することが知られている。電力会社など電柱を管理するインフラ事業者においては、コンクリート柱に対して目視や打音などにより定期的に点検を実施して健全性を確認している。

コンクリート柱の強度は鉄筋の状態と密接に関係している。鉄筋が破断、腐食しているなどの状態が予め確認できれば、表面から目視で確認できる状態に至るよりも早い段階でコンクリート柱の建て替えなどを判断することができるため、折損などの発生リスクを抑えることができる。

このような要求を受け、当社では 2004 年に鉄筋破断診断装置「CPチェッカー」という、コンクリート柱の鉄筋破断を非破壊で確認できる装置を開発し、これまで 500 台以上の製品を販売している。

販売開始から 18 年経過した現在、センサ等の電子部品はめざましい進化を遂げており、鉄筋破断診断への活用においても大きな貢献が期待できる。今回、最新の磁気センサを活用した「新型CPチェッカー」を開発したため、その概要について報告する。

2. コンクリート柱製造工程と鉄筋破断のメカニズム

コンクリート柱の製造工程を以下に、製造工程概念図を図 1 に示す^{1, 2)}。

- ① 主鉄筋と螺旋筋とを溶接あるいは手編みにより組み立てる。
- ② 組み立てた鉄筋を 2 分割された型枠内に配置する。
- ③ 主鉄筋に所定の緊張力（プレストレス）を与えた状態でコンクリートを型枠内に入れ、電柱を周方向に回転させながらコンクリートを注入し、遠心力によって締め固める（遠心成形）。
- ④ 遠心成形後、蒸気養生して型枠を外し、検査工程を経て完成となる。

上記工程③の遠心成形時には、型枠の合わせ目から僅かな水分が出るが、完成後はこれが通り道

となり水分が浸入しやすくなること、経年劣化によるコンクリートのひび割れ箇所からも水分が浸入しやすくなることなど、外部からの雨水の浸入による腐食が懸念される。更に、そのような状況下において、製造時に主鉄筋に与えたプレストレスや電柱のたわみなどによる応力が発生することにより、水素脆化が原因となる遅れ破壊によって鉄筋破断が発生する可能性もある^{2, 3)}。

コンクリートを研り、鉄筋を目視で確認した結果に関して、当社で調査した範囲では、鉄筋破断はコンクリートのひび割れ箇所や型枠の合わせ目跡付近に集中して発生する傾向が確認されている。一方、コンクリートのひび割れがあっても鉄筋破断が発生していない事例も多く確認されており、ひび割れ確認を中心とした目視点検だけでなくコンクリート柱内部の鉄筋の状態も確認できれば、無駄に建て替える割合を減らすことができるため、現場からは鉄筋の状態を確認する手法が求められていた⁴⁾。

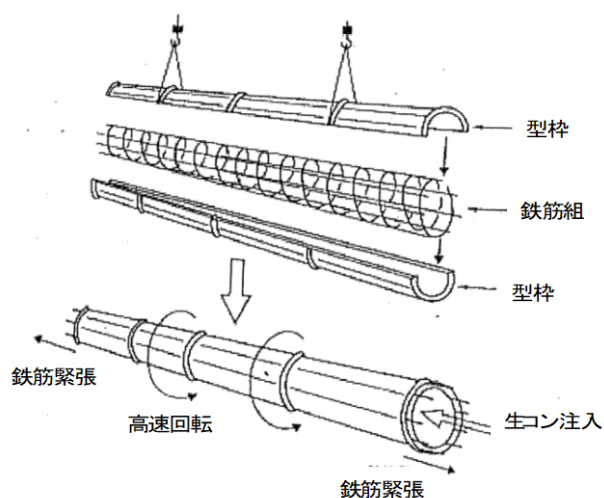


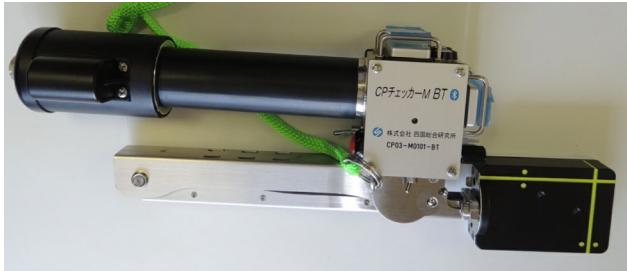
図 1 コンクリート柱の製造工程概念図¹⁾

3. CPチェッカーによる鉄筋破断診断

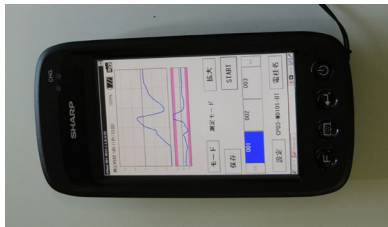
3.1 CPチェッカー

このようなニーズに基づき、2003 年頃から当社では CP チェッカーの開発に着手した。CP チェッカーの外観を図 2 に示す。CP チェッカーは本体であるセンサユニット、測定波形のグラフ表示と記録を行うレコーダユニット、コンクリート柱の鉄筋を磁化させるための磁石ユニットの 3 ユニットで構成される。CP チェッカーではコンクリート柱の鉄筋を磁石ユニットで磁化させた

後、磁化範囲をセンサユニットで走査させて破断箇所の有無を診断する。破断の可能性が高い箇所付近でセンサを走査させた場合には、CPチェッカーがLEDランプとブザー音で破断ありを警告する。



(a) センサユニット



(b) レコーダユニット



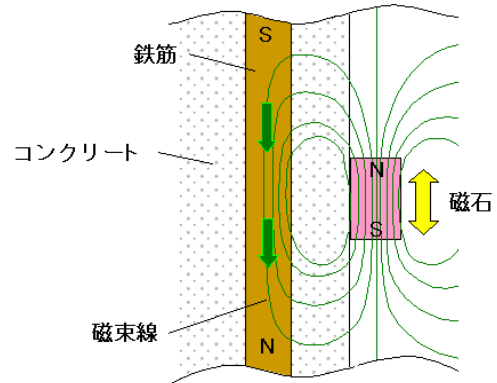
(c) 磁石ユニット

図2 CPチェッカーの外観

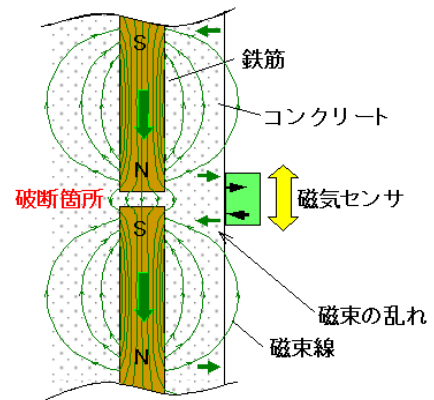
3.2 漏洩磁束法

CPチェッカーによる鉄筋破断診断では、コンクリート表面から永久磁石で内部の鉄筋を磁化するステップ1と、破断箇所における磁束の乱れを磁気センサで検出して破断箇所を特定するステップ2の2ステップで破断診断を行う。各ステップにおける主鉄筋および磁石、磁気センサ周辺の磁束線を図3に示す。ステップ1で鉄筋を磁化すると、破断がある箇所ではそこで鉄筋が不連続な端部となるため、そこにN/Sの磁極が発生する。ステップ2では、この磁極から漏れ出る磁束を磁気センサで検出し、その局所的な変化を捉えて破断の有無を判定する。この手法は、破断部分から漏れ出る磁束を測定して破断箇所を特定する方法であり、漏洩磁束法と呼ばれる⁵⁾。

コンクリート柱内部では主鉄筋はコンクリートで固められているが、空気中もコンクリート中も透磁率はほぼ同じとして扱える。そのため、漏洩磁束法ではコンクリートを使わずにモックアップを構築することが可能である。



(a) STEP1 磁石で鉄筋を磁化



(b) STEP2 センサで磁束の乱れを検出

図3 鉄筋周辺の磁束密度分布例

3.3 破断点検出

CPチェッカーにおける鉄筋の破断点検出では、2個の磁気センサを用いる。2個の磁気センサを同じ直線上に一定間隔をおいて配置し、検査対象となる主鉄筋の直上を2個の磁気センサが同じ直線上を移動するよう走査する。破断のない鉄筋上を走査する場合は、図4(a)に示すような磁束線が発生し、端部を除く区間では概ね線形的に滑らかに変化する。

仮に、主鉄筋に破断箇所があった場合、破断箇所には図4(b)に示すような磁束線が発生しており、コンクリート柱の軸中心から表面に向かう方向、即ち図4にて上向きの方向の磁束を測定す

ると、破断箇所付近の短い区間に N/S 極が発生することで磁束密度の極大／極小値が発生し、S 字曲線の特徴を示す。

図 4 (b) に赤色で示す磁束密度波形では、極大・極小値の中間位置を破断点とすると、破断点は磁束密度波形を微分した波形において、傾きが最大となる箇所で見出される。波形の微分は、数値計算では微小区間の差分を求めることに相当するが、これにヒントを得て、CPチェッカーでは2個のセンサ測定値の差分を求め、その絶対値が一定値以上大きく変化する箇所を破断点の候補として検出する⁵⁾。

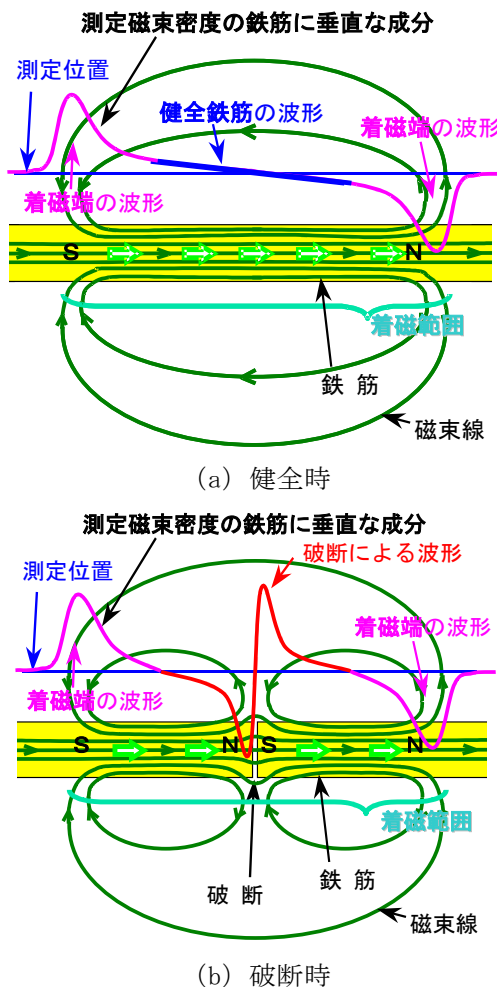


図 4 健全および破断時の磁束密度分布

4. 新型センサによる鉄筋破断診断の性能向上

CPチェッカー開発時は、当時最新のセンサであり、小型、高感度のMI（磁気インピーダンス）センサを用いていたが、現在はより小型で高感度、低消費電力などの特徴をもった高性能なセンサ

が登場しており、このようなセンサを活用した高性能な鉄筋破断診断を行うため、CPチェッカーの性能向上について検討した。

4.1 新型センサの活用

新型CPチェッカーでは、TMR（トンネル磁気抵抗）センサという最新の磁気センサを活用した。TMRセンサの仕様を表1に示す。

表 1 TMRセンサの仕様例

項目	内容
種別	磁気抵抗
軸	3軸 (X, Y, Z)
センシング範囲	感度：10nT/LSB レンジ：±1.2mT
デジタル出力	18ビット
供給電圧	1.7V～1.98V
供給電流	2.5mA
電流消費	0.5μA (電源断時) 0.03mA～0.20mA (測定モードによる)
動作温度	-30℃～85℃
パッケージ	11-pin LGA
サイズ	1.6mm×1.6mm×0.58mm

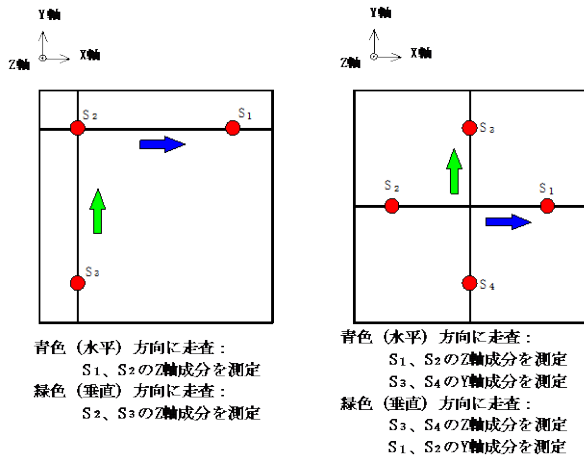
TMRセンサは絶縁体を2層の強磁性体で挟んだ磁気トンネル接合で構成され、外部磁界の方向に対して鋭敏に電気抵抗が変化するトンネル磁気抵抗効果を利用したセンサである。その特徴としては、小型、低消費電力、広い測定レンジなどが挙げられるが、従来のMIセンサは単軸型であるのに対して、今回のTMRセンサは3軸型であるという点も大きな特徴の一つである。

図5に従来および新型CPチェッカーにおけるセンサの配置を示す。従来のCPチェッカーでは、Z軸方向のみの単軸のMIセンサ3個を配置し、走査方向と同じ方向に配置したセンサ2個で測定する。これに対して、新型CPチェッカーでは、3軸のTMRセンサ4個を配置し、走査方向と同じ方向に配置したセンサ2個で従来のCPチェッカーと同じZ軸方向の測定を行い、それに直交する方向に配置したセンサ2個でY軸方向の測定を行う。新型CPチェッカーでは、走査方向に直交する方向に配置した2個のセンサにより、破断箇所から漏洩する磁束線を走査方向から見た両側面からも測定することができる。

なお、従来のCPチェッカーにおいては、セン

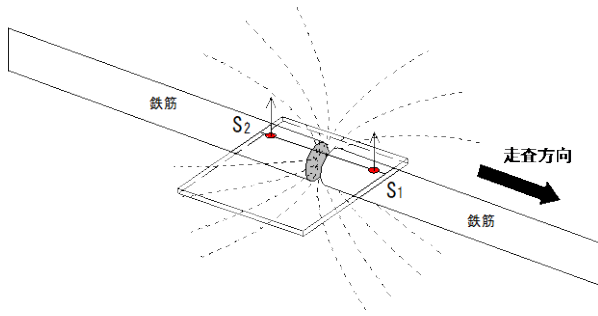


(a) センサヘッド部分

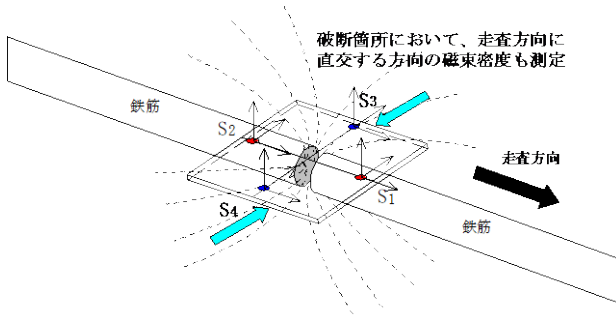


(b) 従来のCPチェッカー (c) 新型CPチェッカー

図5 センサヘッド部分のセンサ配置



(a) 従来のCPチェッカーによる測定例



(b) 新型CPチェッカーによる測定例

図6 従来および新型CPチェッカーの破断箇所測定方法の比較

サ S₁, S₂ の中点を破断箇所として推定し、新型CPチェッカーにおいては、センサ S₁~S₄ の中点を破断箇所として推定する。図6に従来のCPチェッカーと新型CPチェッカーにおける測定方法の比較を図示する。

新型CPチェッカーの S₁, S₂ については、従来のCPチェッカーの S₁, S₂ と同じデータを測定しており、新型CPチェッカーの測定結果は、従来のCPチェッカーの測定結果と互換性を有している。

4.2 3D(3次元)破断判定手法

新型CPチェッカーでは、前述の4個のセンサでの測定値を用いて下記のように破断判定を行う。

【3D破断判定手法】

以下の2段階のスクリーニングにより、立体的に破断箇所を検出する。

① 1次スクリーニング

図5(c)のセンサ S₁, S₂ について Z 軸方向の磁束密度の差分の絶対値が、設定閾値以上となった場合に、その位置を破断判定候補とする。閾値に以上なった点(開始点: t_s)と閾値以下に戻った点(終了点: t_e)を求める。

② 2次スクリーニング

1次スクリーニングの開始点と終了点における図5(c)のセンサ S₃, S₄ の Y 軸方向の磁束密度を求める。これらの値が、下記の式(1)から(3)を満足すれば、測定結果を破断であると判断する。

$$|S_{3y}(t_s) - S_{3y}(t_e)| > A \quad (1)$$

$$|S_{4y}(t_s) - S_{4y}(t_e)| > B \quad (2)$$

$$(S_{3y}(t_s) - S_{3y}(t_e)) \cdot (S_{4y}(t_s) - S_{4y}(t_e)) < 0 \quad (3)$$

ここで $S_{3y}(t_s)$, $S_{3y}(t_e)$ は、①の開始点 t_s および終了点 t_e のセンサ S₃ の Y 軸方向の磁束密度測定値であり、同様に $S_{4y}(t_s)$, $S_{4y}(t_e)$ は、センサ S₄ の Y 軸方向の磁束密度測定値である。また、A および B は変化に対する閾値である。

破断点はセンサが破断箇所を走査して通過した後のタイミングで判定されるため、推定される破断点は1次スクリーニングで抽出した t_s と t_e の

中点としている。

破断を示す波形例を図7に示す。これは、新型CPチェッカーのレコーダユニット画面に表示されるグラフである。上側のグラフはS1、S2のZ軸方向の磁束密度を青と赤、S3、S4のY成分の磁束密度を緑と茶で表したもので、縦軸に磁束密度(μT)、横軸に測定時間(秒)をとったものである。下側のグラフは、S1、S2のZ軸方向の磁束密度の差分値を表示しており、この値が閾値を超える開始/終了点の点線を上側のグラフと共有している。上側のグラフで2次スクリーニングを行い、破断と判定される場合は、上下のグラフで桃色の破断推定位置の線を共有する。図7のような典型的な破断を示す例では、S3およびS4の波形が交差する形で表される。

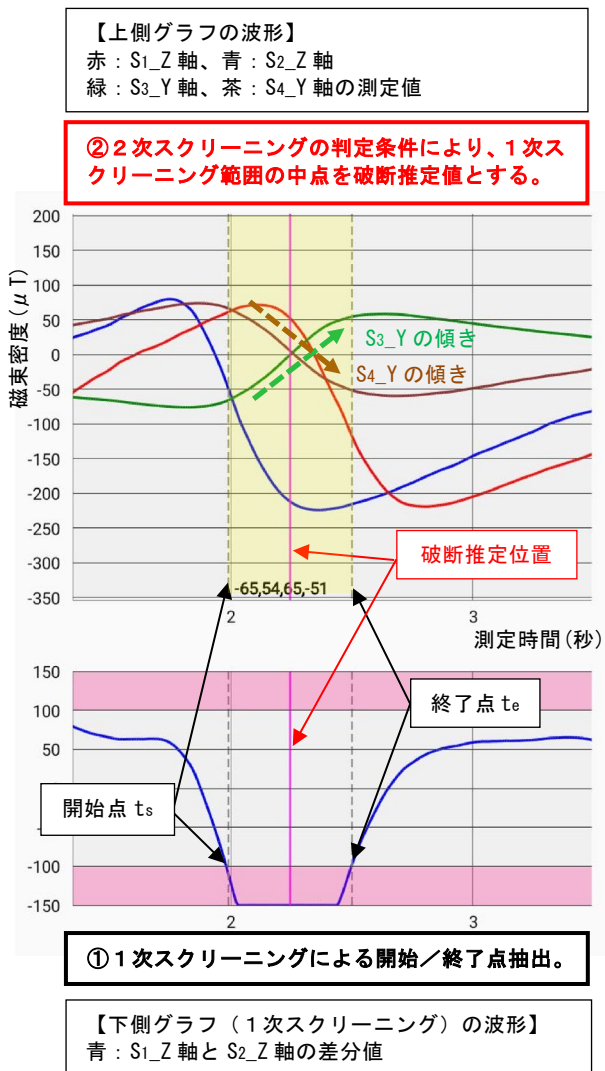


図7 破断を示す波形例

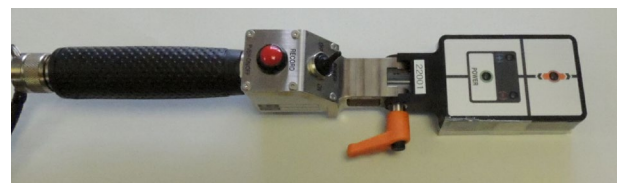
5. 新型CPチェッカーの性能評価

5.1 新型CPチェッカーの試作

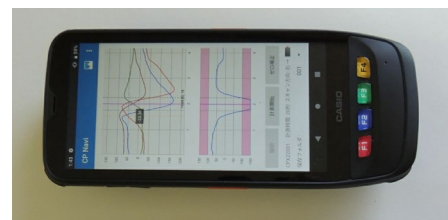
図8に新型CPチェッカーの外観を示す。従来と同様に新型CPチェッカーにおいても、センサユニット、レコーダユニット、磁石ユニットの3ユニットでの構成とした。

センサユニットに関しては、現場での聞き取り調査を実施して筐体の大幅な見直しを行い、使用頻度の少ない機構部分を簡素化することで、従来よりも小型、軽量化を図った。中でもTMRセンサの特徴である低消費電力を活かすことにより、CPチェッカーのバッテリー持続時間を、これまで単3乾電池4本で8時間であったものを、単3乾電池2本で50時間以上に延長することができ、電池本数の削減により軽量化にも貢献した。

また、レコーダユニットにおいてもAndroidOSへの変更や、BLE (Bluetooth Low Energy) への対応、3D破断判定手法による判定結果表示などの機能アップが行われている。



(a) センサユニット



(b) レコーダユニット



(c) 磁石ユニット

図8 新型CPチェッカーの外観

5.2 コンクリート柱モックアップの作成

CPチェッカーの性能評価を行うにあたり、実際のコンクリート柱を忠実に模擬したモックアップを作成した。前述のように、コンクリート中も空気中も透磁率はほぼ同じとみなせるため、モックアップの鉄筋は空間中に配置し、内部の鉄筋や破断の位置を確認しながら測定が行えるような構造とした。模擬破断は鉄筋を切断して0～5mm程度のギャップで模擬した。モックアップの外観を図9に示す。



図9 コンクリート柱モックアップの外観

5.3 測定例

測定例として、モックアップを用いて螺旋筋の直下にある主鉄筋が破断している場合と、主鉄筋の直上にある螺旋筋が破断している場合について測定を行った。

(1) 螺旋筋直下の主鉄筋が破断している場合

螺旋筋の直下に主鉄筋の破断がある場合の測定例として、測定結果と該当部分の写真を図10に示す。

螺旋筋直下の破断ということで、主鉄筋の破断部分から漏洩する磁束が上側の螺旋筋に遮られて測定値が低下する可能性が懸念されたが、特に大きな影響はなく、主鉄筋の破断が検出できていることを確認した。

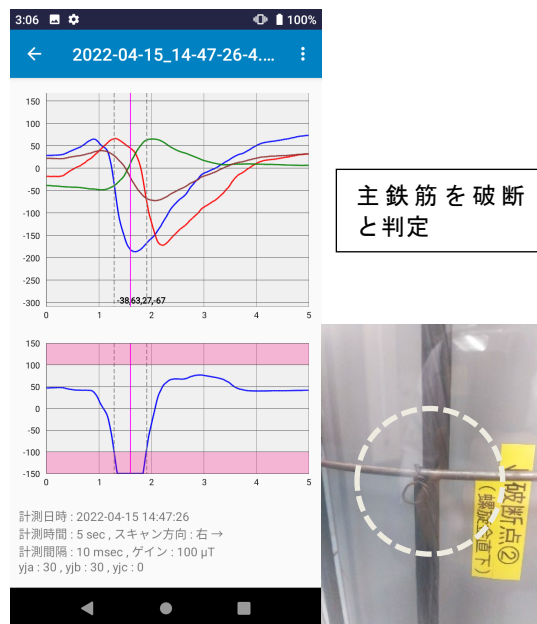


図10 螺旋筋直下の主鉄筋模擬破断の測定例

(2) 主鉄筋直上の螺旋筋が破断している場合

主鉄筋には破断が無く、主鉄筋と交差する箇所螺旋筋のみが破断している場合の測定例として測定結果と該当部分の写真を図11に示す。

主鉄筋上を走査しているため、主鉄筋と螺旋筋が交差する部分は磁束密度が局所的に変化するため、部分的に1次スクリーニングで検出されているが、S3、S4のY軸方向の磁束密度の変化が小さいため2次スクリーニングでは破断として検出されないことを確認した。

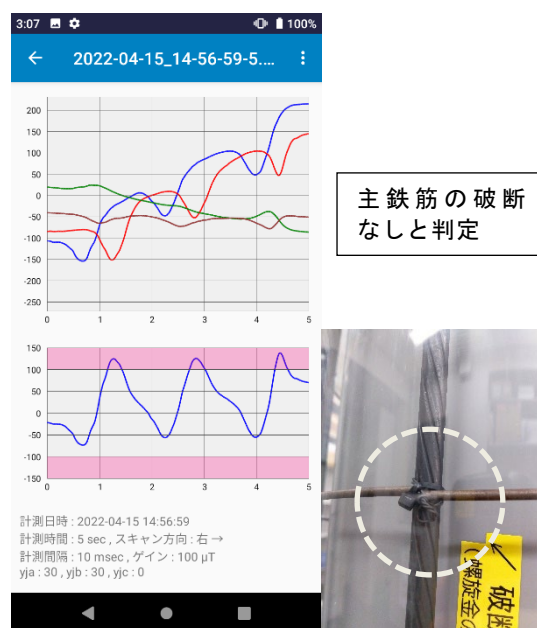


図11 主鉄筋直上の螺旋筋模擬破断の測定例

6. まとめ

当社が 2004 年から販売を開始した鉄筋破断診断機「CPチェッカー」において、最新型の磁気センサである TMR センサを活用し、高性能な鉄筋破断診断を実現した「新型CPチェッカー」を開発した。実際のコンクリート柱を忠実に再現したモックアップを作成して各種模擬破断の測定結果について性能評価を行った結果、従来のCPチェッカーよりも詳細に破断診断できることを確認した。

今後、製品の量産化を進めて行き、現在のCPチェッカーの後継機種として販売する予定である。

【参考文献】

- 1) ㈱四国総合研究所：「コンクリート柱用鉄筋破断非破壊診断装置 CPチェッカーM BT」, CPチェッカーM BT取扱説明資料(2022)
- 2) 大日コンクリート工業㈱：「コンクリートポール点検手引書」, 大日コンクリート工業(2017)
- 3) 上庄拓哉ら：「コンクリート電柱内鉄筋の水素脆化予測技術」, NTT 技術ジャーナル 2021.4 (2021)
- 4) 四国電力㈱：「旧規格電柱の折損事故とその対策について(電柱の点検等の実施に係る国からの指示について)」, 四国電力プレスリリース(平成 18 年 12 月 8 日)(2006)
- 5) ㈱四国総合研究所：「CPチェッカーM BT簡易操作説明資料」, CPチェッカーM BT製品資料(2019)
- 6) 上田洋、工藤輝大、佐々木孝彦「コンクリート電柱の劣化診断と維持管理」, 鉄道総研報告, 第 18 巻, 第 10 号, pp.3-8 (2004)

既設アナログカメラを活用したデジタルITVシステムの開発

(株)四国総合研究所 エネルギー技術部
(株)四国総合研究所 エネルギー技術部
(現：四国計測工業(株) 西条事業所)

海稻 隆成
土田 雅彦

キーワード： 工業用テレビシステム
同軸ケーブル
減衰率
アナログカメラ
HD-SDI カメラ
IP カメラ

Key Words : ITV system
Coaxial cable
Attenuation rate
Analog camera
HD-SDI camera
IP camera

Development of the Digital ITV System Utilizing Existing Analog Cameras

Shikoku Research Institute, Inc., Energy Engineering Department
Takashige Kaine and Masahiko Tsuchida

Abstract

We have developed a new digital ITV system that can operate both digital and analog cameras on the digital system including existing analog cameras and existing low-frequency coaxial cables.

Conventional ITV system is based on an analog system in many cases and it is not compatible with digital cameras. It is very difficult to operate digital cameras on a conventional ITV system and replacement of the entire analog system is usually required in order to introduce new digital cameras.

In this paper, we describe the method of digitized analog ITV system, the result of HD-SDI signal transmission tests in low-frequency coaxial cables, and the outline of the digital ITV system operated in a thermal power plant.

1. はじめに

火力発電所では、複数のカメラやその制御装置、映像切替器やモニタ等の機器を組合わせたシステム(Industrial Television System 以下、ITV システム)を設置し、中央制御室等から現場各所を遠隔監視している。

ITV システムは、通常の監視はもとより現場異常時の監視が遠隔ででき、運転員の省力化にもつながるため重要性が高まっており、高画質・高機能なデジタルカメラによる監視機能の強化が求められている。

従来型であるアナログ方式の ITV システムは、デジタル方式との互換性がないため、これまでは同一システム上で両方式のカメラを運用することは困難であった。デジタルカメラを新たに導入するためには、アナログ方式の ITV システム全体をデジタル方式に更新することが一般的であるが、更新費用が高額となるため、ユーザの大半は、アナログ方式を使い続けているのが実情であった。

本稿では、既設アナログシステムを最大限に活用し、デジタルカメラへの部分取替や増設が可能で、かつ同一システム上で両方式のカメラを運用できるデジタル ITV システムを開発したので報告する。

2. 統合 ITV システム開発の背景

四国電力(株)西条発電所では、1号機のリプレース工事に伴い新設する中央制御室(以下、新中央制御室)に、現行の主要設備用の制御室Ⅰと、周辺設備用の制御室Ⅱを統合し、新1号機と現行2号機の運転監視を行う計画である。

新中央制御室においてカメラを一様に制御・監視する計画のため、新1号機用 ITV システム(以下、新1号 ITV:デジタル方式)と現行2号機用 ITV システム(以下、2号 ITV:アナログ方式)を統合した ITV システム(以下、統合 ITV)による現場監視が必要となった。

統合 ITV の開発にあたり、基本設計仕様を次項のように定め、将来的に完全デジタル化への移行も可能なシステムとして開発した。

3. 統合 ITV システムの設計

3.1 基本設計仕様

基本設計仕様を以下に定め、最適なハードウエ

アの選定や各種試験、ならびに ITV 制御装置のソフトウェア製作等を行った。

＜基本設計仕様＞

- ① 新1号 ITV に2号 ITV を統合したシステムを構築する。
- ② 汎用デジタルカメラ方式を使用したシステムとする。
- ③ アナログカメラとデジタルカメラが混在する環境において、すべてのカメラを一様に制御し、映像を一様に監視できる。
- ④ カメラの取替や増設は、製造メーカーや機種種の制約なく、1台毎にアナログ、デジタルを任意に選定できる。
- ⑤ 2号 ITV は、既設アナログカメラ毎に敷設されているケーブルを流用することで設備投資を抑制する。

3.2 2号 ITV システム概略

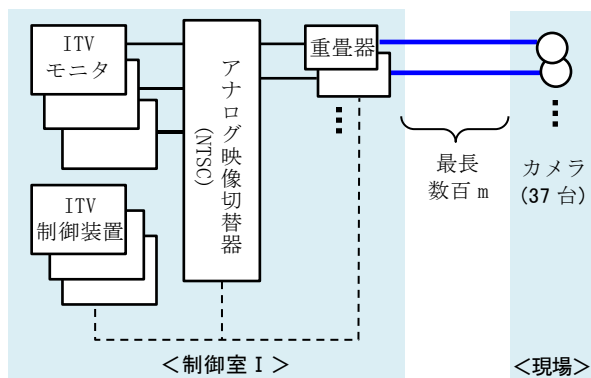
2号 ITV のシステム概略を図1に示す。2号機では、制御室Ⅰと制御室Ⅱにそれぞれ独立した ITV システムが導入されている。現場各所に設置されたアナログカメラは、重畳器を介してアナログ映像切替器と低周波同軸ケーブルで接続されている。

ITV 制御装置は、ITV モニタに出力するカメラ映像の選択や、カメラ操作に用いる制御信号(パン・チルト・ズームを制御する信号:以下、カメラ制御信号)を送信している。

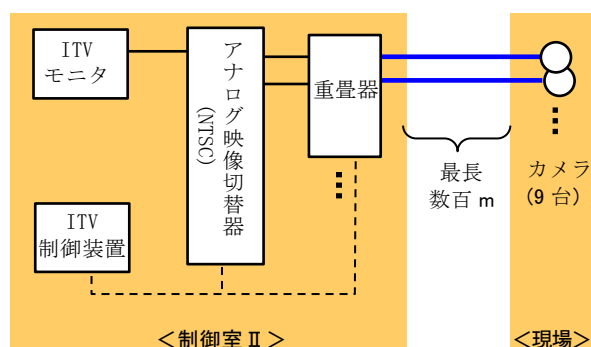
カメラ毎に敷設されている既設同軸ケーブルは最長で数百メートルあり、再敷設する場合は工事費が高額となるため、可能な限り流用することを計画している。しかし、既設同軸ケーブルはアナログカメラ用の低周波同軸ケーブル※1であるため、高周波のデジタル信号を送信する場合は減衰が大きくなり、伝送距離が短くなることが想定される。

そこで低周波同軸ケーブルにおけるデジタルカメラ適用の可否を評価するため、デジタルカメラ方式の比較検討を行った。

※1 高周波同軸ケーブルと区別するため、アナログカメラ用同軸ケーブルを低周波同軸ケーブルと記載



(a) 2号 ITV(主要設備)



(b) 2号 ITV(周辺設備)

図1 2号 ITV システム概略

3.3 デジタルカメラ方式の比較検討

(1) 比較項目の選定

デジタルカメラ方式の選定にあたり、以下の項目について比較した。

(a) カメラ画素数

デジタルモニタの一般的な画素数は 200 万画素(解像度 1980×1080)であるため、鮮明な画像を表示するためには、カメラも同画素数が必要となる。

アナログカメラ映像(36万画素)をデジタルモニタに表示した場合、約 6 倍の拡大となり、映像の不鮮明さが顕著となる。また将来的に、画像処理による異常検知等の機能を付加する場合も高画素数の映像が望ましい。

(b) 映像伝送距離

低周波同軸ケーブルを使用するためには、カメラ映像信号が現場適用に支障のない距離(300m程度)を伝送することが必要である。

(c) 互換性

同じ方式のカメラを使用した場合においても、メーカーや機種を問わず映像の送受信が保証されていないければ、ITV モニタに映像が表示できな

い可能性がある。

(d) 映像遅延

映像遅延には、撮影した映像をカメラ内部で信号処理する時間(カメラ内部信号処理遅延)と、ITV モニタで映像を表示中に別のカメラに切替えた場合に、その映像がモニタに表示され始めるまでの時間(モニタ映像切替遅延)がある。アナログカメラに慣れている場合、0.5 秒以上の遅延があれば、映像遅延として認識される場合が多い。

(e) 旋回式カメラ

カメラの撮影範囲によっては、水平方向に対し仰角・俯角両方向の撮影が必要となる。ドーム型カメラは、構造上カメラの背面が撮影できず撮影範囲が限られるため、設置個所の状況により設置台数を増やす必要性があり、旋回式カメラの有無が重要となる場合がある。

(2) デジタルカメラ方式の選定

監視用途として一般的なデジタルカメラ方式(AHD, HD-TVI, HD-CVI, HD-SDI, IP)の仕様をそれぞれ比較した。(表 1)

(a) AHD, HD-TVI, HD-CVI 方式

低周波同軸ケーブルの使用を前提に開発されたカメラで、高画質のカメラ映像を約 500m 伝送することができる。しかしこれらのカメラは、同じカメラ方式であってもメーカーが異なれば互換性が保証されておらず、映像が映らない可能性がある。

このため、これらの方式の統合 ITV への適用は見送ることとした。

(b) HD-SDI 方式

SMPTE 292M(Society of Motion Picture and Television Engineers: 米国映画テレビ技術者協会)で規定された放送用標準規格で、SMPTE 170Mで規定されたアナログ放送規格(NTSC)の後継規格であり、高周波同軸ケーブルを使用して 100m の映像伝送が可能である。HD-SDI 信号の周波数は 1.485GHz と高く、低周波同軸ケーブルを使用した場合は伝送可能距離がさらに短くなるが、ケーブル両端に EX-SDI(Extended Serial Digital Interface)変換器を接続することで、約 300m まで延長できる可能性がある。(図 2)

同規格を満たしている機器は、メーカーが異な

る場合にも互換性が保証されている。映像遅延は、目視では判別できない程度であるため、本稿では遅延なしとしている。また旋回式カメラの機種もあり、その通信コマンドが公開されている場合が多い。

以上から、HD-SDI 方式は伝送可能距離の制約を満たす場合には、統合 ITV への適用に最も有望な方式であると考えられる。

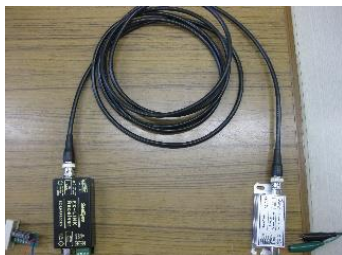


図 2 EX-SDI 変換器

(c) IP 方式

撮影した映像をインターネットプロトコルに準拠したデータ形式に変換し、伝送する方式である。低周波同軸ケーブルにそのまま接続しての伝送はできないが、LAN-同軸変換器を付加することで、1000m 程度までは問題なく動画が送信できる。

IP 方式は、撮影した映像を H. 264 等の方式で圧縮処理する時間と、カメラ切替時に通信を確立する時間により遅延が発生する。前者は 1 秒程度であるが、原理上短縮することは困難である。後者は数秒程度あるが、映像データ変換器を付加し通信状態を常時確立させておくことで、遅延を解消できると考えられる。

また映像データ変換器は、IP 映像の HD-SDI 映像信号への変換・常時出力、さらに ITV モニタにカメラ映像だけを表示させるための画像処理

表 1 デジタルカメラ仕様比較

方式	画素数	映像 伝送距離 ※1	互換性	映像遅延※2		旋回式 カメラ	評価
				カメラ内部 信号処理	モニタ 映像切替		
AHD (Analog High Definition)	200 万	約 500m	×	無	無	△	適用困難
HD-TVI (High Definition Transport Video Interface)							
HD-CVI (High Definition Composite Video Interface)							
HD-SDI (High Definition Serial Digital Interface)	200 万	100m 未満 (EX-SDI 変換器無)	○	無	無	○	適用可 (ケーブル長 300m 未満： HD-SDI 300m 以上： IP)
		約 300m (EX-SDI 変換器有)					
IP (Internet Protocol)	200 万	1000m※3 (LAN 同軸 変換器有)	○	約 1 秒	数秒 →無※4	○	
参考 NTSC (National Television Standards Committee)	36 万	約 500m	○	無	無	○	— (アナログカメラ)

○：対応可 △：通常の方法では対応困難 ×：対応不可

当社調べ：インターネットや聞き取り等で主要な機器を調査したため、市販カメラ全ての調査は未実施

※1 低周波同軸ケーブルを使用した場合の想定距離

※2 目視で確認できない程度の遅延は無と記載

※3 映像伝送に支障のない通信速度を確保できると想定した距離を記載

※4 映像データ変換器使用時

機能(ブラウザ上に表示される操作画面と映像画面から、映像画面のみを抽出・拡大)を有したソフトウェアをインストールしている。(図3)

以上から、IP方式は統合ITVへの適用は可能であり、映像伝送距離が長いこと適用範囲も広がるが、付加機器数が多くなることと若干の遅延が発生するため、優位性はHD-SDI方式にあると考えられる。

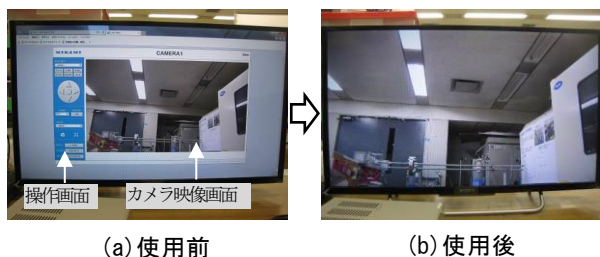


図3 映像データ変換器使用前/後の映像比較

4. 低周波同軸ケーブルを用いた HD-SDI 信号伝送試験

HD-SDI方式は統合ITVへの適用が最も有望であるが、伝送可能距離に限られるため、HD-SDI方式の適用範囲を明らかにする試験を行った。

HD-SDI方式は、(一社)電波産業会「1125/60方式HDTV信号のビット直列インターフェース規格」において、同軸ケーブルの減衰量が、HD-SDI信号の1/2クロック周波数742.5MHzにおいて20dB以下であれば、映像伝送が保障されるよう規定されている。この減衰量は、高周波同軸ケーブル(5CFB)の距離に換算すると約100mであるが、低周波同軸ケーブルを使用する場合は減衰量がより大きくなるため、信号伝送試験により減衰量と映像伝送可否の関係性を評価した。

4.1 ラボ試験

(1) 試験方法および妥当性確認

既設低周波同軸ケーブルの減衰量を市販の測定機器(ネットワークアナライザ)を用いて測定する場合、ケーブルを閉回路にしなければならないが、既設低周波同軸ケーブルは両端が相当距離離れているため閉回路の作成は困難である。

そこで、信号発生装置(RFジェネレータ)と信号強度測定装置(スペクトラムアナライザ)をそれぞれにより減衰量を測定することとした。

試験概要、使用した装置は図4の通りである。RFジェネレータより742.5MHz、10dBmの信号を出力し、接続する同軸ケーブルの本数を増やしながらか減衰測定を行った。測定の結果、信号強度はケーブル本数に比例して減少し、その減少量を同軸ケーブル減衰量とすると、測定値と理論値はほぼ一致し、本試験方法が妥当であることが確認できた。(図5)

なお試験用に製作した同軸ケーブルは、関西通信電線(株)製3C2V、ケーブル長:23.5m、減衰量:396dB/km(770MHz)であり、コネクタを含めた1本当たりの減衰量は9.9dB/本(770MHz)で、現場に敷設している低周波同軸ケーブル(7C2V)50mと同程度である。

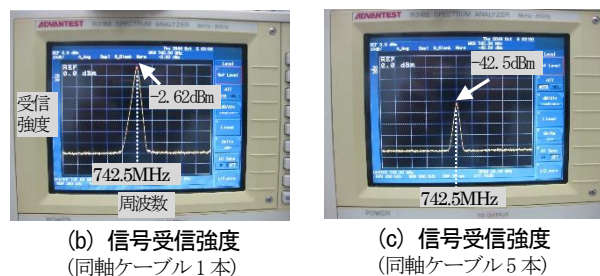
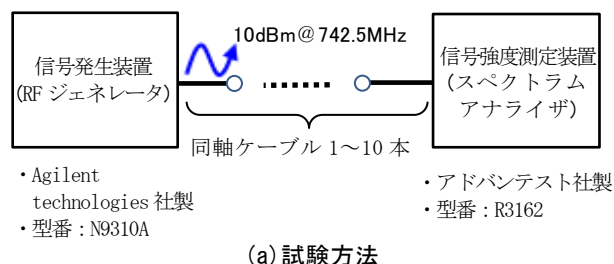


図4 低周波同軸ケーブルの減衰量測定試験

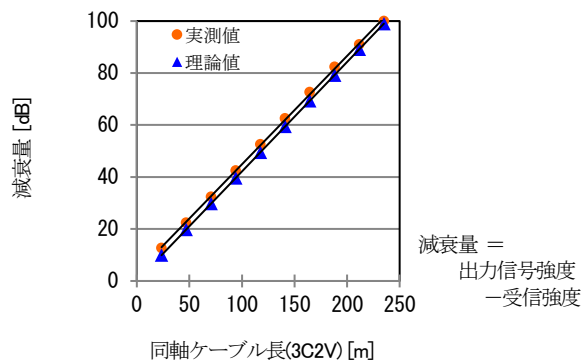


図5 低周波同軸ケーブル減衰量測定試験結果

(2) HD-SDI 信号伝送試験

HD-SDI 信号の低周波同軸ケーブルにおける伝送距離を測定するため、同軸ケーブルの接続本数を増やしなが、HD-SDI カメラ映像をモニタ表示し、その状態を確認した。

EX-SDI 変換器を接続しない場合は、ケーブル減衰量 32.4dB(現場敷設ケーブル長 150m 相当)まで映像が映ることを確認できたが、現場では十分な距離ではなく、伝送距離の延長が必要である。

EX-SDI 変換器を付加した場合は、ケーブル減衰量 82.3dB(現場敷設ケーブル長 400m 相当)まで映像が映ることを確認できた。同変換器を付加することにより伝送距離が 2 倍以上延長できることを確認できた。(図 6, 表 2)



図 6 HD-SDI 信号伝送試験状況(ラボ)

表 2 HD-SDI 信号伝送試験結果(ラボ)

ケーブル長[m]		カメラ映像状態 (○:良好 ×不良)		ケーブル減衰量 (実測値) [dB]
3C2V (試験用)	7C2V※ (現場)	EX-SDI 変換器 無	EX-SDI 変換器 有	
23.5	50	○	○	12.6
47	100	○	○	22.4
70.5	150	○	○	32.4
94	200	×	○	42.5
117.5	250	×	○	52.5
141	300	×	○	62.5
164.5	350	×	○	72.6
188	400	×	○	82.3
211.5	450	×	×	91.0
235	500	×	×	100

※現場ケーブル長は、7C2V ケーブルの減衰量から算出した推定値

4.2 現地試験

現場敷設している低周波同軸ケーブル 4 本を選定して両端を解線し、現場カメラ側に信号発生器を、制御室側に信号強度測定装置を接続して、ケーブル減衰量を測定した。またあわせて、HD-SDI カメラ、IP カメラを接続した場合の映像伝送状態や

カメラ制御状態も確認した。なおカメラ接続時には、それぞれ変換器を付加している。(図 7)

表 3 に試験結果を示す。ケーブル減衰量 81dB(地点 C)までは、HD-SDI カメラ、IP カメラの映像状態、カメラ制御状態とも良好であった。減衰量が 88dB である地点 D では、HD-SDI カメラ映像は映らず制御もできなかったが、IP カメラは映像・制御とも良好であった。前述のラボ試験においても、ケーブル減衰量 82.3dB の場合は良好で、91dB ではカメラ映像が映らなかったことより、ほぼ同様の試験結果となった。(表 3)

これらの試験結果や、同軸ケーブルの経年劣化等による減衰量増加を考量し(尤度 20dB 程度)、統合 ITV ではケーブル減衰量が 62.5dB(距離換算 300m)以内であれば HD-SDI カメラを適用し、それ以上において IP カメラを適用することとした。



(a) 試験状況(現場カメラ側)



(b) 試験状況(制御室側)

図 7 HD-SDI 信号伝送試験状況(現地)

表 3 HD-SDI 信号伝送試験結果(現地)

試験 個所	ケーブル 減衰量 [dB]	HD-SDI カメラ ※1		IP カメラ ※2	
		映像	制御	映像	制御
地点 A	48	○	○	○	○
地点 B	58	○	○	○	○
地点 C	81	○	○	○	○
地点 D	88	×	×	○	○

○:良好 ×:不良

※1 ミカミ製 PTC-113-HDSDI ※2 ミカミ製 PTC-113-HDIP

5. 低周波同軸ケーブルを活用したデジタル化時のカメラ構成

低周波同軸ケーブルを流用したまま既設アナログカメラを HD-SDI カメラや IP カメラに取替える場合は、既存のアナログ映像切替器 (NTSC 方式) をデジタル映像切替器 (HD-SDI 方式) に取替え、変換器を付加することで取替可能となる。なお、カメラの取替は任意のカメラ 1 台単位でできるほか、取替時に再度アナログカメラを選定することもできる。それぞれの方法を以下に記載する。

5.1 既設アナログカメラ活用方法

映像変換器を用いて NTSC 信号を HD-SDI 信号に変換し、デジタル映像切替器に入力することで、既設のアナログカメラと低周波同軸ケーブルを活用することができる。なお、カメラ制御信号を映像信号に重畳し、同軸ケーブルで伝送する重畳器は既設流用が可能である。(図 8-①)

5.2 デジタルカメラへの取替方法

既設同軸ケーブル長が 300m 未満の場合は HD-SDI カメラを、それ以上の場合は IP カメラを選定し、各変換器 (EX-SDI 変換器 / LAN・同軸変換器) を付加することで、低周波同軸ケーブルを活用したデジタルカメラへの取替が可能である。

各変換器は、カメラ制御信号の重畳機能も有しているため、重畳器の設置は不要である。また IP カメラは、前述の映像データ変換器の付加が追加が必要となる。(図 8-②)

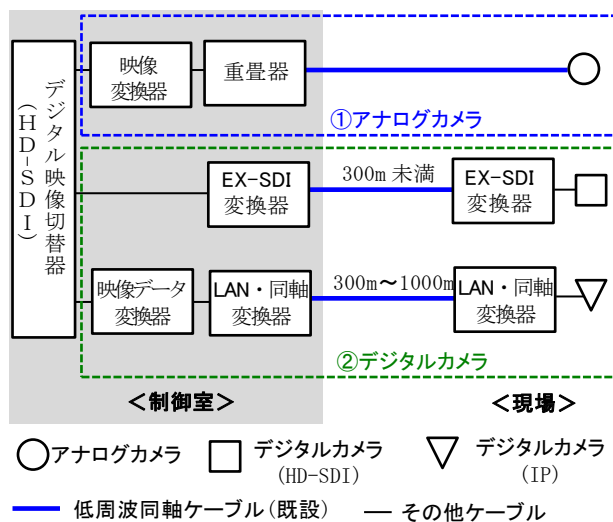


図 8 デジタル化時のカメラ構成

6. 統合 ITV システム製作

6.1 ハードウェア

統合 ITV の外観を図 9 に、概略を図 10 に示す。カメラ 58 台のうち、流用している 2 号 ITV 用アナログカメラ (計 36 台) は、将来的に HD-SDI カメラへの置換も可能である。(表 4) 全ての ITV モニタ (12 台) に任意のカメラ映像を出力することができ、操作 PC (5 台) それぞれから映像切替やカメラ操作が可能である。

操作 PC のカメラ操作信号は、制御 PC に送信され、それらに対応するカメラ毎の制御信号に変換した後、カメラへと送信している。また制御 PC は予備機を 1 台有しており、制御 PC1 にトラブルが発生した場合は、自動で制御 PC2 に制御が移行する。

なお、概略図には、現在のシステム構成 (既設機器・新設機器) に加え、将来的なデジタルカメラへの取替・増設時の機器構成も記載している。



(a) モニタ



(b) ITV 制御装置

図 9 統合 ITV システム外観 (工場試験時)

表 4 カメラ設置台数 [台]

カメラ設置箇所	アナログカメラ		HD-SDIカメラ	
	固定	旋回	固定	旋回
新 1 号 ITV	0	0	11	0
2 号 ITV (主要設備)	19	8	10	1
2 号 ITV (周辺設備)	2	7	0	0

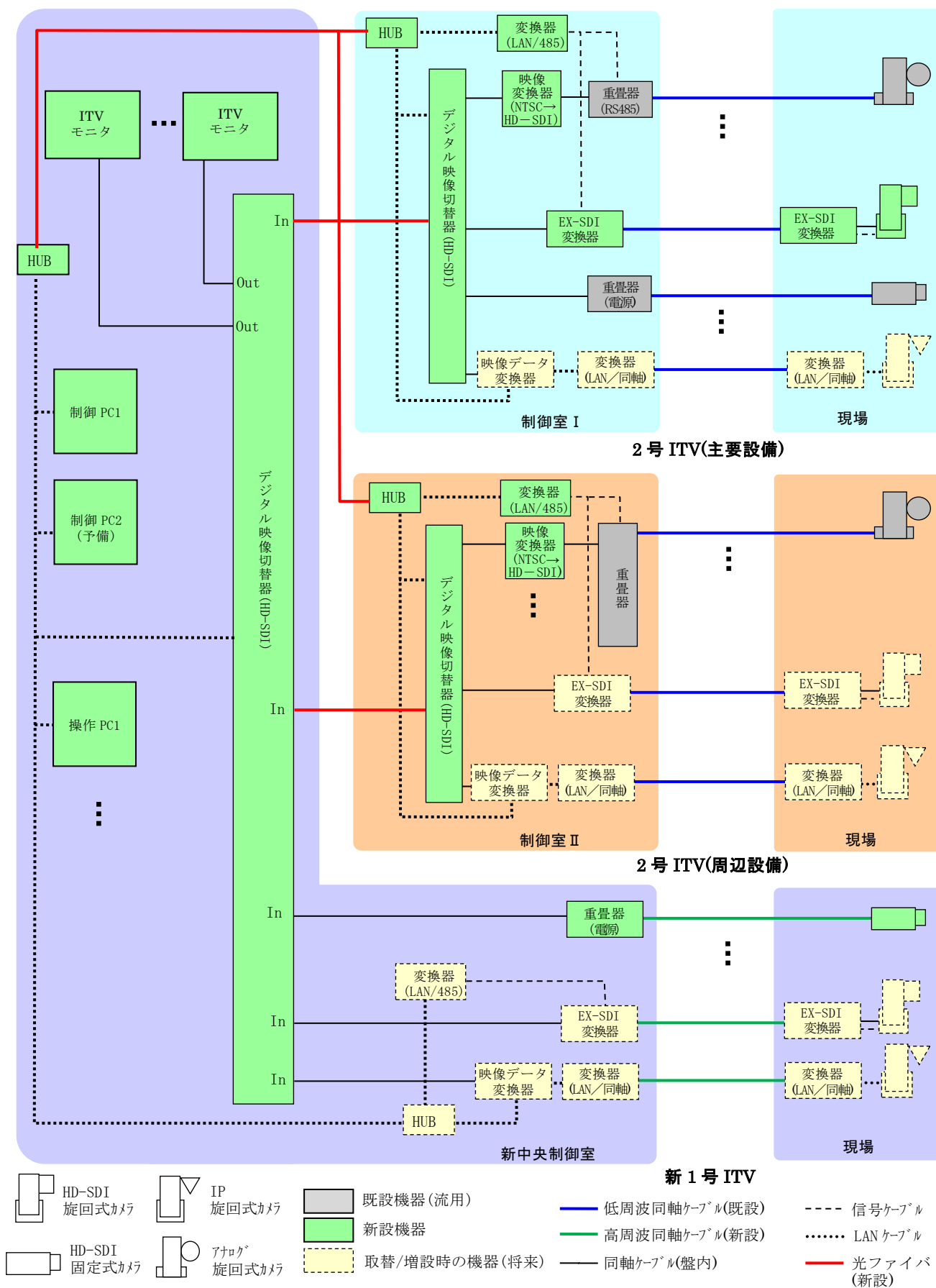
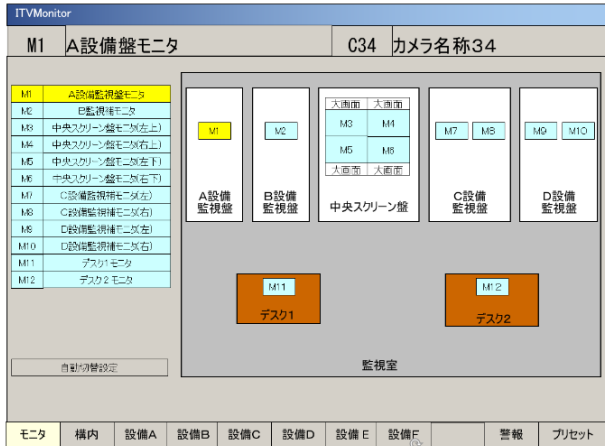


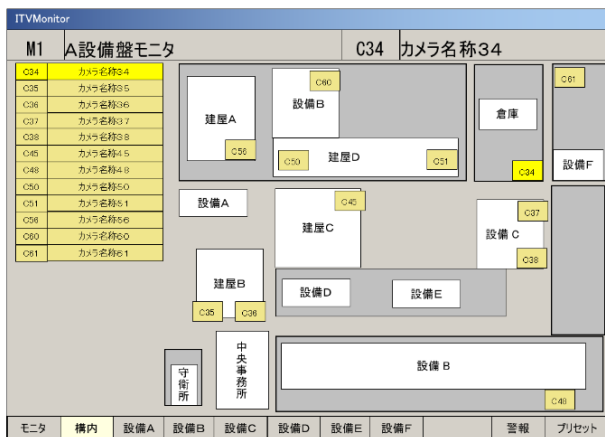
図 10 統合 ITV システム構成概略図

6.2 ソフトウェア

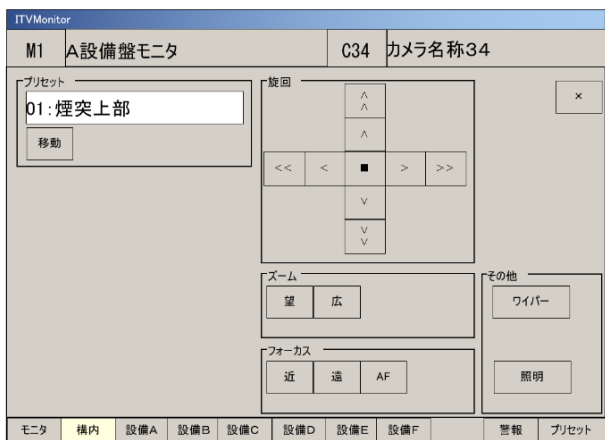
製作したソフトウェアは、ITV 操作ソフトウェア(操作 PC 用)と、ITV 制御ソフトウェア(制御 PC 用)に分かれている。ITV 操作ソフトウェアの主要画面イメージを図 11 に示す。



(a) ITV モニタ 選択画面



(b) カメラ 選択画面



(c) カメラ 操作画面

図 11 統合 ITV ソフトウェア主要画面

ITV モニタ選択画面(図 11-(a))より、カメラ映像を出力したい ITV モニタを選択した後に、構内カメラ配置図が表示されたカメラ選択画面(図 11-(b))にてカメラを選択する。選択すると、デジタル映像切替器が制御され、その映像が所定の ITV モニタに表示される。

選択したカメラが旋回式カメラの場合、自動でカメラ操作画面に切替り、所定のカメラ操作ができる。このカメラ操作画面はカメラ機種によらず同様であるため、ユーザはカメラ種別の違いを意識することなくカメラ操作が可能である。

(図 11-(c))

またプリセット機能も有しており、所定の場所を事前に登録することで、その場所を選択すると、カメラの自動旋回が可能である。

7. まとめ

汎用デジタル方式をベースとし、低周波同軸ケーブルを活用してアナログカメラ・デジタルカメラが任意に適用可能な統合 ITV システムの設計を行い、基本仕様を全て満たしていることを確認した。

統合 ITV システムは、西条発電所新 1 号機運転開始時に、実運用を開始する予定である。

【謝辞】

本研究は、四国電力(株)火力部殿からの委託を受けて実施したもので、発電所をはじめご協力いただいた関係各位に深謝する。

【参考文献】

- 1) 土田雅彦, 海稻隆成: “既設アナログカメラなどを活用したプラント監視カメラシステムのデジタル化”, *Electrical Review*, Vol.107, No.4, pp.46-50 (2022)
- 2) (一社)電波産業会「1125/60方式HDTV信号のビット直列インターフェース規格」

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)

(株)四国総合研究所 電子アグリ技術部 杉本 幸代
(株)四国総合研究所 電子アグリ技術部 朝日 一平

キーワード : アンチストークス
レーザ
水素
漏えい検知器
コヒーレントアンチストークス
ラマン分光法

Key Words : Anti-Stokes
Laser
Hydrogen
Leak detector
CARS

Leakage hydrogen gas detection technology using coherent anti-Stokes Raman spectroscopy (the first report)

Shikoku Research Institute, Inc., Electronics and Agricultural technology Department
Sachiyo Sugimoto, Ippei Asahi

Abstract

Hydrogen is expected as a next-generation clean energy to replace a fossil energy. To expand its use in daily life, its safety must be ensured. This paper reports about the development of leakage hydrogen gas detection technology using coherent anti-Stokes Raman spectroscopy (CARS). For that purpose, the light source configuration was devised in which the laser beam (355 nm) is split into two optical paths and a Raman cell filled hydrogen gas is arranged on the one side. For efficiently generating anti-Stokes light of target hydrogen gas, irradiation conditions between pump light (355 nm)(I_P) and Stokes light (416 nm)(I_S) from the Raman cell were investigated. As a result, it was found that when the irradiation ratio $R(=I_S/I_P)$ was $0.140 \leq R \leq 0.173$, the generation efficiency of the anti-Stokes light was high. When the irradiation ratio R is adjusted within the above range, the high generation efficiency of the anti-Stokes light can be maintained even if the laser light intensity and hydrogen gas pressure to the Raman cell are changed. This study proposes a prospect for a concrete optimization method for the light source condition of the optical hydrogen gas leak detector using CARS.

1. 序論

水素は使用に際しCO₂を排出せず、エネルギーキャリアとして再生可能エネルギー等を貯蔵、運搬、利用することができる特性を持つ。兼ねてよりクリーンエネルギーとして注目されていたが¹⁾、2020年10月に「2050年カーボンニュートラル宣言」がなされたことにより、水素への期待が更に高まっている。水素の普及には、水素を取り扱う様々な場面において安全が担保されていることが必須であり、我々は、水素関連施設の安全運用に資する技術として、水素ガス遠隔計測装置^{2),3)}や水素火炎可視化装置⁴⁾をこれまでに開発してきた。

水素ガス遠隔計測装置はレーザ照射により発生する水素のラマン散乱光(レーザ波長と異なる波長に散乱する非常に微弱な光)をエコーとして捉えるライダ(LIDAR:Light Detection and Ranging, 光検出と測距)^{5),6)}である。ライダは近年、自動車の周辺監視や運転アシストなどに適用され、ライダという言葉が耳にする機会が多くなった。この場合のライダは障害物などの固体標的(ハードターゲット)が計測対象のライダであり、「LiDAR」と表記されることが多い⁷⁾。一方、気象・環境計測用のライダは「Lidar」や「LIDAR」と表記される場合が多く、微粒子やガスなど(ソフトターゲット)を計測対象とする⁸⁾⁻¹³⁾。これらは同じライダと呼ばれる装置であるが、用途が大きく異なるため、それぞれ異なる方向性で発展を遂げてきた¹⁴⁾。ソフトターゲットを計測対象とするライダはパルス動作させたレーザを光源として適用し、計測対象物質から生じる後方散乱光をライダエコーとして捉え、捉えた光の強度や偏光解消度、周波数等を解析することにより、気体の密度、分子種、風向風速、粒子の粒径分布や形状等を明らかにする。また、レーザ光の出射とライダエコー受信の時間差から計測対象物質までの距離が得られる。

水素ガス遠隔計測装置は離れた場所から水素の存在する位置とその濃度を知ることができる優れた装置であるが、ラマン散乱光のうちレーザ波長より長波長に発生するストークス光を捉えるため、計測箇所の背後に近接して壁や配管等が存在する場合、それらにレーザ光が照射されることにより発生するレーザ誘起蛍光が強力な外乱光となり、微量な漏えいの検知が困難となる。

そこで、本研究では、ラマン散乱光のうちレー

ザ波長より短波長に発生するアンチストークス光を捉え、計測箇所に近接してレーザ誘起蛍光を発生する物体がある場合においても漏えい位置の探査を可能とする水素ガス検知技術を開発した。

目標検知濃度については一般的な水素検知器の警報設定値である濃度500 ppmとし、目標計測時間については水素センサの応答速度¹⁵⁾⁻¹⁷⁾以下を目指し1 sとした。

本稿では、水素のアンチストークス光を発生させるための光源の開発について述べる。可搬型装置を目指して光源の構成を検討し、アンチストークス光の発生効率の高い照射条件を見出した。

2. 計測原理

ラマン散乱は、分子の電子・振動・回転状態に対応するエネルギー準位間の遷移によって観測される光の非弾性散乱である。図1にラマン効果の概念を示す。

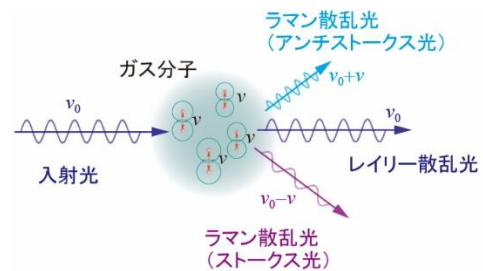


図1 ラマン効果の概念

ラマン散乱光の散乱強度は、入射光と同一の波長に散乱する弾性散乱であるレイリー散乱光に対し 10^{-3} と極めて小さく、ガスを計測する場合、十分な散乱光強度を得るため、通常レーザ光を励起光源として用いる。ガスにレーザ光を照射すると、ガス分子とレーザ光の相互作用により、レーザ光と異なる波長にラマン散乱光が発生し、そのうちレーザ波長に対し長波長の散乱光をストークス光、短波長の散乱光をアンチストークス光と呼ぶ。

本研究では、水素のラマン散乱光のうちアンチストークス光を計測対象とする。前述したとおり、ストークス光を計測する場合、レーザ誘起蛍光が外乱となるが、アンチストークス光を検知することにより、レーザ誘起蛍光の影響を回避して水素を検知することが可能となる。

常温、大気圧下において、アンチストークス光

の強度はストークス光に対し非常に弱い。観測されるストークス光とアンチストークス光の強度比は、物質の電子が基底状態にある確率と励起状態にある確率の比と同一であると近似でき¹⁸⁾,

$$\frac{I_{AS}}{I_S} = \exp\left(-\frac{h\nu_R}{kT}\right) \quad (1)$$

で表される。ここで I_{AS} はアンチストークス光強度、 I_S はストークス光強度、 h はプランク定数、 k はボルツマン定数、 T は絶対温度、 ν_R はラマンシフトである。

(1)式より、常温(300 K 付近)において水素(ラマンシフト 4160 cm^{-1} ¹⁹⁾)のアンチストークス光はストークス光に対しおおよそ 2.2×10^{-9} の強度となるため、単にレーザー光を照射することで水素のアンチストークス光を検出することは困難である。

そこで本研究では、常温、大気圧下においてアンチストークス光を検出可能とするため、CARS (Coherent Anti-Stokes Raman Spectroscopy: コヒーレントアンチストークスラマン分光法)²⁰⁾⁻²²⁾を適用した。図2にCARSのエネルギー準位図を示す。

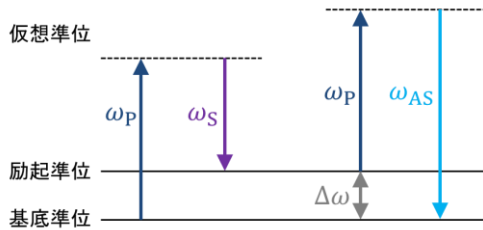


図2 CARSのエネルギー準位図

CARSはコヒーレントラマン効果の一つであり、角周波数 ω_p のポンプ光と、角周波数 ω_s のストークス光を重ねて物質に入射したとき、これらの周波数差 $\Delta\omega = \omega_p - \omega_s$ により物質のラマン活性振動が共鳴的に励起され、位相の揃った非線形分極が光路に沿って生じ、この分極と入射光とが相互作用して周波数 $\omega_{AS} = \omega_p + (\omega_p - \omega_s) = 2\omega_p - \omega_s$ のアンチストークス光がコヒーレントな光束として生じる現象である。本研究では、ポンプ光としてNd:YAGレーザーの第3高調波(波長355 nm)を用いたため、ストークス波長は416 nm、アンチストークス波長は309 nmとなる。

CARSにおいては、ポンプ光、ストークス光、ア

ンチストークス光の波数ベクトル k_p, k_s, k_{AS} が、

$$2k_p = k_s + k_{AS} \quad (2)$$

で表される位相整合条件を満たす必要があり、アンチストークス光は $2k_p - k_s$ の方向に指向性を持って散乱される。(2)式を満たす最も容易な配置は、すべての波数ベクトルが同一線上にあるCollinear CARSの配置(図3)であり、本研究ではこの配置を適用した。



図3 Collinear CARSの配置

CARSにより発生するアンチストークス光の強度 P_{AS} は、

$$P_{AS} = \left(\frac{2}{\lambda_p}\right)^2 \left(\frac{4\pi^2\omega_{AS}}{c^2}\right)^2 |3\chi^{(3)}|^2 P_p^2 P_s \quad (3)$$

で表される。ここで、 P_p はポンプ光強度、 P_s はストークス光強度、 λ_p はポンプ光波長、 ω_{AS} はアンチストークス光角周波数、 c は光速、 $\chi^{(3)}$ は3次の非線形感受率である。

(3)式より、アンチストークス光強度はポンプ光強度の2乗に比例し、ストークス光強度に比例する。また、 $\chi^{(3)}$ は分子密度 N に比例するため、 P_{AS} は分子密度、即ちガス濃度の2乗に比例する。

3. 装置構成

Nd:YAGレーザーの第3高調波(波長355 nm)をポンプ光として用い、CARSにより水素を計測するためには、何らかの方法でストークス波長(416 nm)の光を発生させ、ポンプ光と同時に同軸で計測箇所照射する必要がある。

水素のストークス光を得る方法は、BBO (Beta-Barium Borate, β -BaB₂O₄) 結晶と2枚のミラーにより構成される光パラメトリック発振器(Optical Parametric Oscillator, OPO)を用いる²³⁾、または高圧で水素を充填したラマンセルを用いる²⁴⁾、のいずれかが考えられる。前者は、BBO結晶へ入射するレーザー光の角度により波長を制御するため、精密に入射角度を調整し、その状態を保持する必要がある。加えて、結晶の温度が波長の安定性に大きく影響するため、結晶の温度を最適化して保

持する必要がある、水素関連施設等の現場で使用する可搬型装置に適用する場合、振動や周囲環境の温度変動により波長にずれが生じる可能性がある。一方、ラマンセルは、レーザ光軸上に配置することで、容易に水素のストークス光を得ることができるため、本研究では、ラマンセルをストークス光源として用いることとした。

ラマンセルをストークス光源として用いる場合、レーザ光をラマンセルに入射させ、ラマンセルにおいて発生したストークス光と、変換されずに通過したレーザ光をポンプ光として利用する方法が最も簡単な構成である²⁵⁾。しかしながら、この構成において、ラマンセルに入射するレーザ光の強度を増加させるとストークス光の強度は増加させられるが、ポンプ光(変換されずに通過するレーザ光)の強度を増加させることは困難である²⁶⁾。前述したとおり、(3)式より、アンチストークス光強度はポンプ光強度の2乗に比例するため、ポンプ光強度を増加させることが感度の大幅な向上に繋がるが、この構成ではレーザ出力を上げることによる大幅な感度向上の実現は困難である。

これを解決するため、ポンプ光とストークス光それぞれに対し1台のレーザ装置を用いれば、それらの強度が独立制御可能となるが、レーザ装置は高価であるため、低コスト化の観点から、1台のレーザ装置からポンプ光とストークス光を得て、かつ前述の課題を解決する手段として、レーザ光を二分岐し、一方の光路にラマンセルを配置し、それぞれの光路に入射するレーザ光の比率を制御可能な光源を考案し、本研究に適用することとした。図4に光源の構成および最適化試験の配置を、表1に光源および検知器の仕様を示す。

光源としてQスイッチNd:YAGレーザの第3高調波(波長355nm,パルスエネルギー30mJmax,繰返し周波数20Hz,パルス幅5.5ns)を用いた。

強度 I_L のレーザ光を、偏光ビームスプリッタキューブ(PBS(B))により二分岐させた。 $\lambda/2$ 波長板(WP(A))をPBS(B)の前に配置し、WP(A)を回転させることでそれぞれの光路へのレーザ光の入射比を変化させることができる。WP(A)の回転角度に対する2つの光路間に入射比を図5に示す。

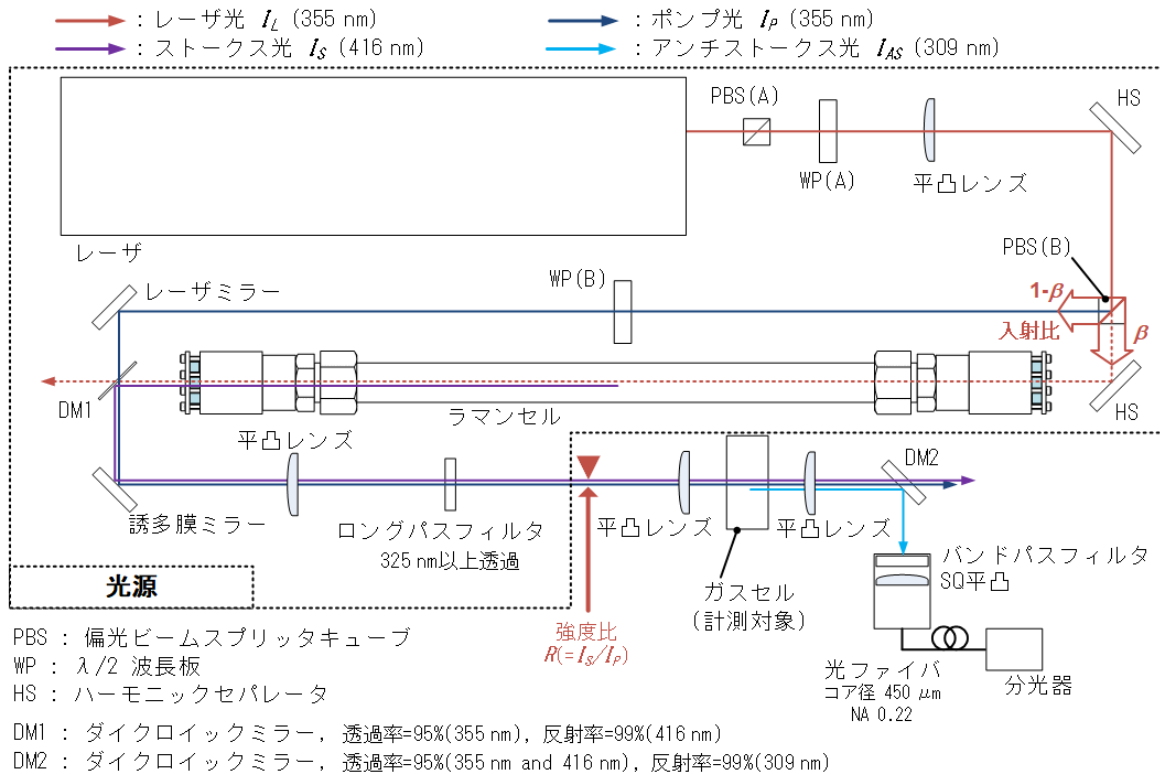


図4 光源の構成および最適化試験の配置

表1 光源および検知器の仕様

装置	仕様
レーザー	
型式 / メーカー	Ultra100 / Quantel
方式	Q-switched Nd:YAG (フラッシュランプ励起)
波長	355 nm
パルスエネルギー	30 mJ 最大
パルス幅	5.5 ns
繰返し周波数	20 Hz
ラマンセル	
充填ガス	100%水素
光路長	400 mm
内径	12 mm
分光器	
型式 / メーカー	QE65Pro / Ocean Optics
波長範囲	200~590 nm ブレーズ波長 300 nm
グレーティング	600 lines/mm
スリット幅	25 μ m
波長分解能	0.99 nm
受光光学素子	
ダイクロイックミラー (DM2)	透過率 (355 nm, 416 nm) 95% 反射率 (309 nm) 99%
バンドパスフィルタ	中心波長 310 nm, 半値全幅 10 nm, 透過率 16%

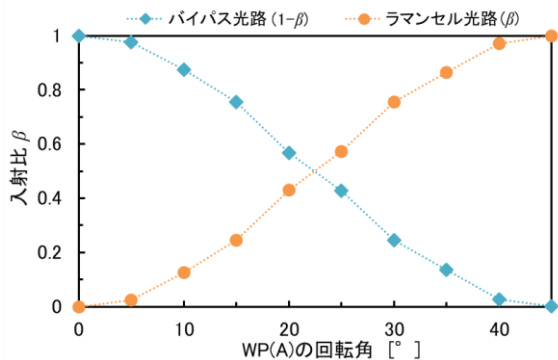


図5 ラマンセル光路とバイパス光路の入射比のWP(A)の回転角度依存性

P 偏光はラマンセルを配置した光路に入射され、ラマンセルを通過することで、ストークス光 (416 nm) に変換される。ラマンセルを用いた波長変換の実施例を見ると、それらの多くは光路長 1 m を超えるセルを用いているが、本研究では可搬性を考慮して、セル長 400 mm のラマンセルを用いた。一方、S 偏光はバイパス光路に入射され、ポンプ光として利用した。計測対象の水素に照射する際の偏光方向をストークス光と一致させるために、バイパス光路に $\lambda/2$ 波長板 (WP(B)) を配置し、S 偏光を P 偏光に調整した。

ポンプ光およびストークス光はダイクロイック

ミラー (DM1) により合波し、光路を一致させ、誘多膜ミラーにより反射し、ラマン分光用ロングパスフィルタ (325 nm 以上透過) を通過させて計測対象の水素に照射した。ラマンセルにおいては、計測に不要な高次のストークス光やアンチストークス光も発生するため、高次のストークス光は誘多膜ミラーにより分離し、アンチストークス光はロングパスフィルタにより遮断した。

計測対象の水素を充填したガスセルにポンプ光とストークス光を同時に照射し、ガスセルの後段に配置したダイクロイックミラー (DM2) によりアンチストークス光をポンプ光とストークス光から分離した。アンチストークス光は CCD 小型分光器 (計測対象波長 200~590 nm, 波長分解能 0.99 nm) により計測した。分光器への入射光学系には、集光レンズとして直径 20 mm ϕ , 焦点距離 40 mm の凸レンズ、外乱光を抑制するためバンドパスフィルタ (中心波長 310 nm), コア径 450 μ m の光ファイバを用いた。

構築した光源を用い、図 4 に示した ▼ の位置における強度比 $R(= I_S/I_P)$ の最適条件を検討し、各条件において最大のアンチストークスを得るため、試験を実施した。

4. 試験結果

図4に示した装置構成において、WP(A)の回転角度を変化させ、ポンプ光強度 I_P 、ストークス光強度 I_S 、アンチストークス光強度 I_{AS} を計測した。計測は以下の条件について実施した。

- (1) レーザ光強度 I_L を 10.4 MW/cm², 8.32 MW/cm², 6.99 MW/cm² と変化 (パルスエネルギーはそれぞれ 5.5 mJ, 4.4 mJ, 3.7 mJ), ラマンセルへの水素充填圧力は 0.7 MPa
- (2) ラマンセルへの水素充填圧力を 0.7 MPa, 0.6 MPa, 0.5 MPa と変化, レーザ光強度 I_L は 10.4 MW/cm²

ポンプ光およびストークス光の強度は、パワーセンサ(Ophir社製, 10A-P, 波長範囲 0.15~8 μm,

有効口径 16 mm φ) により計測し、アンチストークス光強度 I_{AS} は前述したとおり CCD 小型分光器により計測した。

I_L , I_P , I_S の評価は、図4の▼位置での光束径 3.5 mm を適用して実施した。また、ポンプ光を計測する場合には、中心波長 355 nm, 半値全幅 10 nm, 355 nm における透過率 30% のバンドパスフィルタを、ストークス光を計測する場合には、中心波長 415 nm, 半値全幅 10 nm, 416 nm における透過率 45% のバンドパスフィルタを、パワーセンサの前に配置して計測を実施し、光強度をフィルタの透過率を考慮して評価した。条件(1)の結果を図6に、条件(2)の結果を図7に示す。

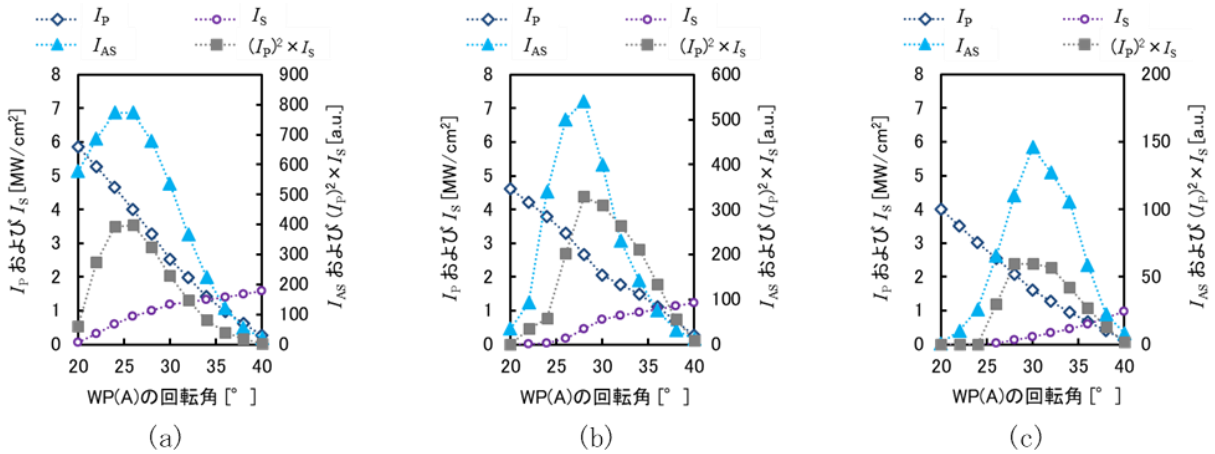


図6 I_L を(a)10.4 MW/cm², (b)8.32 MW/cm², (c)6.99 MW/cm²としたときの計測結果
(ラマンセル水素充填圧力: 0.7 MPa)

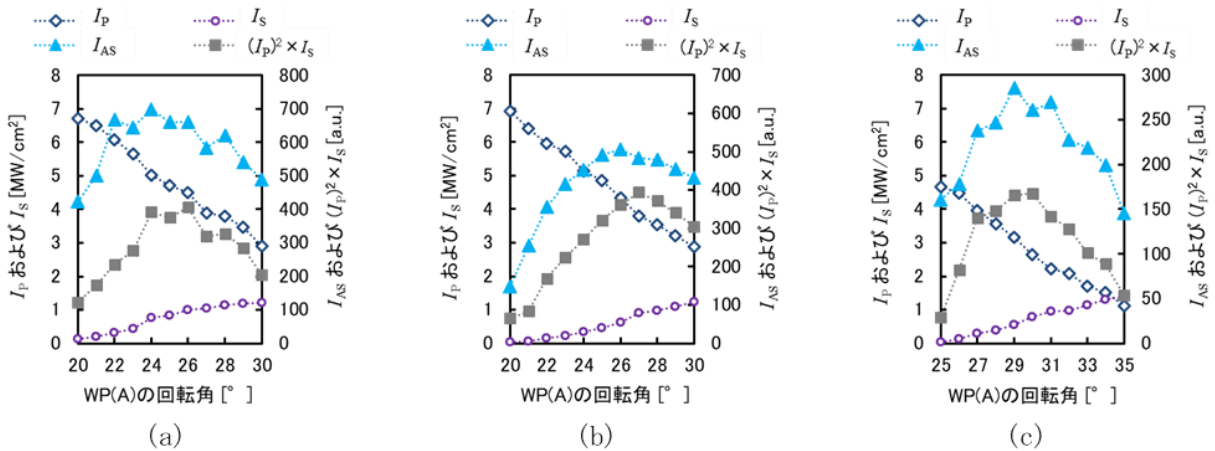


図7 ラマンセル水素充填圧力を(a)0.7 MPa, (b)0.6 MPa, (c)0.5 MPaとしたときの計測結果
(I_L : 10.4 MW/cm²)

図6, 図7の両者について, WP(A)の回転角度が増加すると, I_p は減少し, I_s は増加し, WP(A)の回転角の最適値は, 試験条件に応じて変化した。

図6に示すとおり, レーザ光強度 I_L が小さくなると, アンチストークス光を効率よく発生させるために, WP(A)の回転角を大きくし, ラマンセルへのレーザ光の照射強度を上げる必要がある。

また, 図7に示すとおり, ラマンセルへの水素充填圧力が低下すると, アンチストークス光を効率よく発生させるために, WP(A)の回転角を大きくし, ラマンセルへのレーザ光の照射強度を上げる必要がある。

(3)式より, アンチストークス光は $(I_p)^2$ と I_s に比例することを示したが, 図6および図7において, $(I_p)^2 \times I_s$ と I_{AS} のWP(A)の回転角度依存性は酷似しており, 試験結果と理論が一致することが確認された。

いずれの場合も, WP(A)の回転角度が過度に大きく, バイパス光路のポンプ光強度が減少し過ぎると, アンチストークス光が著しく低下した。また, WP(A)の回転角度が過度に小さく, ラマンセル光路のストークス光が減少し過ぎる場合も同様に, アンチストークス光が著しく減少した。

表2 I_{AS} が最大となるときの強度比 $R(=I_s/I_p)$ (I_L : 10.4 MW/cm², 8.32 MW/cm², 6.99 MW/cm²)

レーザ光強度 (I_L) [MW/cm ²]	ポンプ光強度 (I_p) [MW/cm ²]	ストークス光強度 (I_s) [MW/cm ²]	強度比 $R(=I_s/I_p)$
10.4	4.37	0.736	0.168
8.32	2.67	0.462	0.170
6.99	1.62	0.229	0.140

表3 I_{AS} が最大となるときの強度比 $R(=I_s/I_p)$ (ラマンセル水素充填圧力: 0.7 MPa, 0.6 MPa, 0.5 MPa)

ラマンセル水素充填圧力 [MPa]	ポンプ光強度 (I_p) [MW/cm ²]	ストークス光強度 (I_s) [MW/cm ²]	強度比 $R(=I_s/I_p)$
0.7	5.03	0.776	0.154
0.6	4.35	0.639	0.148
0.5	3.17	0.548	0.173

表2 および表3に, 各条件においてアンチストークス光 I_{AS} が最大となる場合の $R(=I_s/I_p)$ を整理した。表2は条件(1), 表3は条件(2)に対する結果である。

表2 および表3に示すとおり, $0.140 \leq R \leq 0.173$ の範囲で, アンチストークス光の発生効率が最適化された。

ここで, ラマンセルにおける照射光のストークス光への変換効率を α とし, α とラマンセル経路への I_L の入射比 β を各条件について整理した。表4は条件(1), 表5は条件(2)に対する結果である。

表4 I_{AS} が最大となる場合の α および β (I_L : 10.4 MW/cm², 8.32 MW/cm², 6.99 MW/cm²)

レーザ光強度 (I_L) [MW/cm ²]	ラマンセルへの入射光強度 ($I_L - I_p$) [MW/cm ²]	変換効率 α	入射比 β
10.4	6.02	0.122	0.578
8.32	5.64	0.080	0.680
6.99	5.38	0.042	0.769

表5 I_{AS} が最大となる場合の α および β (ラマンセル水素充填圧力: 0.7 MPa, 0.6 MPa, 0.5 MPa)

ラマンセル水素充填圧力 [MPa]	ラマンセルへの入射光強度 ($I_L - I_p$) [MW/cm ²]	変換効率 α	入射比 β
0.7	5.37	0.144	0.516
0.6	6.04	0.106	0.581
0.5	7.21	0.075	0.694

(3)式に, $I_p = (1 - \beta)I_L$ および $I_s = \alpha\beta I_L$ を代入すると,

$$I_{AS} = C\alpha\beta(1 - \beta)^2 I_L^3 \quad (4)$$

が得られる。ここで, C は定数である。同様に強度比 $R = I_s/I_p$ は,

$$R = \frac{\alpha\beta}{1 - \beta} \quad (5)$$

として表される。(4)式に基づき, 変換効率 $\alpha = 0.05, 0.1, 0.15$ とし, I_{AS} の β 依存性を算出し

た。計算結果は図8に示すとおりであり、 $\beta=0.33$ のときに I_{AS} が最大となった。

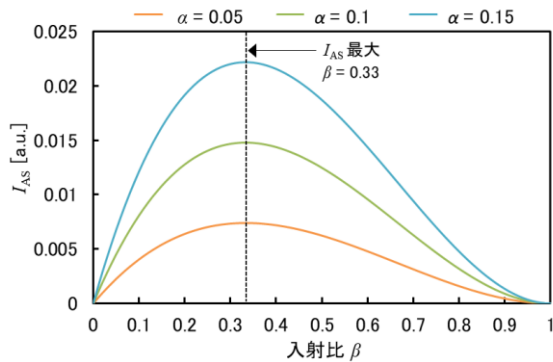


図8 β の変化に対する I_{AS} の計算結果 ($\alpha=0.05, 0.1, 0.15$)

次に、(5)式に基づき、変換効率 $\alpha=0.05, 0.1, 0.15$ の場合の強度比 $R = I_S/I_P$ の β 依存性を確認した。計算結果と試験結果を図9に示す。

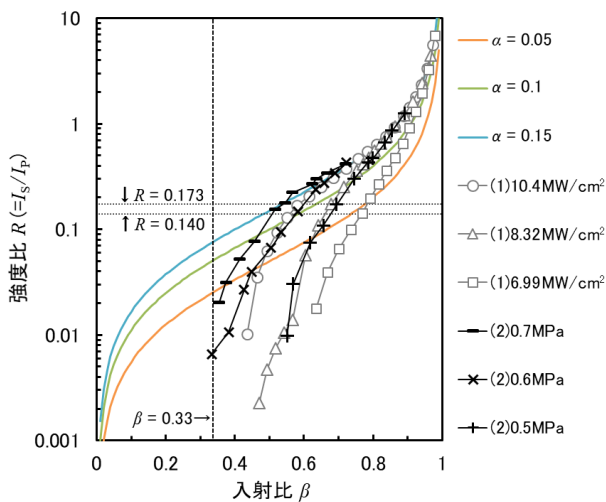


図9 試験結果の β 依存性および β の変化に対する強度比 $R (= I_S/I_P)$ の計算結果 ($\alpha=0.05, 0.1, 0.15$)

図9に示すとおり、試験において得られた強度比 $R (= I_S/I_P)$ は $0.001 \sim 10$ の範囲内で大きく変化した。しかし、 I_{AS} は $0.140 \leq R \leq 0.173$ の非常に狭い範囲で最大となった。

図8に示した計算結果では $\beta=0.33$ のときに I_{AS} が最大となるが、試験において最大となったのは、 $0.516 \leq \beta \leq 0.769$ のときであった。

試験において、ラマンセルでの変換効率が、 β によらず一定の値を維持していれば、理論による

得られる計算結果に沿う試験結果が得られると推測されるが、試験では、 β が小さくなるとラマンセルでの変換効率が著しく低下し、試験結果と計算結果の乖離が確認された。試験結果は、 I_L の強度が大きいほど、またはラマンセルへの水素充填圧力が高いほど、 I_{AS} が理論的な最大条件 ($\beta=0.33$) に近づくことを示している。

本試験の目的は、可搬型装置を目指し効率良くアンチストークス光を生成するため、実用的な設定の下で光源の入射条件を最適化することであり、理論式には含まれていない物理的制約が存在する。これらは、例えば、ラマンセルの長さ、ラマンセルにレーザー光を照射するために凸レンズの焦点距離、ラマンセルの圧力範囲、レーザー光の強度範囲などである。これらの条件が変化すると、ラマンセルにおける変換効率は変化するが、装置の現場適用を目指して適用した設定では、強度比 $R = I_S/I_P$ を $0.140 \leq R \leq 0.173$ の狭い範囲に固定して、最大の I_{AS} を得られることが明らかとなった。

5. 結論

本研究では、CARS を適用して水素のアンチストークス光を発生させて計測することにより、計測箇所へ近接してレーザー誘起蛍光を発生する物体がある場合においても漏えい位置の探査を可能とする水素ガス検知技術を開発した。

可搬型装置を目指し、レーザー光を二分岐し、一方の光路にラマンセルを配置して発生させたストークス光と、もう一方の光路に入射したレーザー光をポンプ光として水素に照射し、アンチストークス光を発生させる二軸型光源を考案した。セル長 400 mm のラマンセルを適用し、光源を構築した。

構築した光源により、照射条件を最適化し、ポンプ光とストークス光の強度比 $R (= I_S/I_P)$ を $0.140 \leq R \leq 0.173$ としたときに、アンチストークス光が最大となることを実験的に確認した。

次報では、微量漏えい水素の検知を目指し、最適化した光源を適用して開発した水素ガスリークディテクタの構成及び水素計測試験について報告する。

【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（JPNP13002）の結果得られたものです。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) 川合弘敏：「水素エネルギー技術」, 電気学会論文誌 D, Vol.135, No.5, p.6 (2015)
- 2) 朝日一平, 二宮英樹, 杉本幸代：「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)
- 3) 荻田将一, 杉本幸代, 朝日一平, 椎名達雄：「昼間屋外計測可能なマルチガスラマン LIDAR の開発」, 第 38 回レーザーセンシングシンポジウム予稿集, レーザーセンシング学会, pp.64-65 (2020)
- 4) 三木啓史, 星野礼香, 荻田将一, 市川祐嗣, 杉本幸代, 朝日一平：「画像伝送手法による水素火炎の可視化技術」, 四国電力, 四国総合研究所 研究期報, No.108, pp.1-6 (2018)
- 5) T. Fujii and T. Fukuchi eds. : “Laser remote sensing”, CRC Press, Florida (2005)
- 6) C. Weitkamp ed. : “Lidar”, Springer, New York (2004)
- 7) 大前学：「自動車の自動運転における LiDAR の活用」, 計測と制御, 第 59 巻, 第 5 号, pp.311-315 (2020)
- 8) 清水厚：「LIDAR ネットワークによる対流圏エアロゾルの広域観測」, 電気学会誌, Vol.136, No.8, pp.530-533 (2016)
- 9) 岩井宏徳, 石井昌憲, 水谷耕平：「ドップラー LIDAR による風計測と気象予測への応用」, 電気学会誌, Vol.136, No.8, pp.534-537 (2016)
- 10) 江尻省, 中村卓司：「共鳴散乱 LIDAR による超高層大気の観測」, 電気学会誌, Vol.136, No.8, pp.538-541 (2016)
- 11) 篠野雅彦：「イメージング蛍光 LIDAR による海底サンゴの観測」, 電気学会誌, Vol.136, No.8, pp.542-545 (2016)
- 12) 福地哲生, 名雪琢弥, 藤井隆, 根本孝七, 竹内延夫：「大気中 O₃・NO₂ 濃度の DIAL 計測における測定誤差評価」, 電気学会論文誌 C, Vol.124, No.5, pp.1100-1105 (2004)
- 13) 福地哲生, 名雪琢弥, 藤井隆, 根本孝七：「ラマン散乱とミー散乱を併用したレーザーレーダを用いた大気観測」, 電気学会論文誌 C, Vol.123, No.10, pp.1714-1720 (2003)
- 14) 椎名達雄：「LiDAR と Lidar 研究・技術の攻勢と融合」, 計測と制御, 第 59 巻, 第 5 号, pp.297-299 (2020)
- 15) 鈴木健吾：「各種ガスセンサと水素検知・警報システム」, 日本燃焼学会誌, Vol.61, No.195, pp.30-36 (2019)
- 16) 北口久雄：「水素用ガスセンサの現状と課題」, 水素エネルギーシステム, Vol.30, No.2, pp.35-40 (2005)
- 17) G.B. Pour and L.F. Aval : “Monitoring of hydrogen concentration using capacitive nanosensor in a 1% H₂-N₂ mixture”, Micro & Nano Letters, Vol.13, Issue 2, pp.149-153 (2018)
- 18) 濱口宏夫, 平川暁子：「ラマン分光法」, 学会出版センター, 東京, p18 (1988)
- 19) R.M. Measures : “Laser remote sensing”, John Wiley and Sons, New York, p.108 (1984)
- 20) M.D. Levenson, 狩野覚：「非線形レーザー一分光学」, 第 1 刷, オーム社, 東京, pp.159-212 (1988)
- 21) J.W. Nibler : “Coherent anti-Stokes Raman scattering of gases”, in “Non-linear Raman spectroscopy and its chemical applications”, W. Kiefer and D.A. Long, eds., Springer Netherlands: Heidelberg, Germany, pp.261-280 (1982)
- 22) J.P. Taran : “Coherent anti-Stokes Raman scattering”, in “Non-linear Raman spectroscopy and its chemical applications”, W. Kiefer and D.A. Long, eds., Springer Netherlands: Heidelberg, Germany, pp.281-323 (1982)
- 23) 福地哲生, 二宮英樹：「反ストークスラマン散乱を用いた水素ガスの漏洩検知」, 電気学会論文誌 C, Vol.128, No.7, pp.1191-1196 (2008)
- 24) J.C. White : “Stimulated Raman scattering”, in “Tunable lasers”, L.F. Mollenauer and

J.C. White, eds., Springer-Verlag, Berlin, pp.115-120 (1987)

- 25) 杉本幸代, 福地哲生, 二宮英樹: 「反ストークスラマン散乱を用いた水素ガスの漏洩検知」, 電気学会論文誌 C, Vol.134, No.12, pp.1869-1874 (2014)
- 26) L.D. Schoulepnikoff: “High-power single-pass Raman cells in the ultraviolet: numerical and experimental study, with applications in the differential absorption lidar measurement of tropospheric ozone”, EPFL, Lausanne (1997)

最後に執筆者、編集ならびに審査にあ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116号 (無断転載を禁ず)

編集兼発行人 塚本正敏
株式会社四国総合研究所

発行 株式会社四国総合研究所
〒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