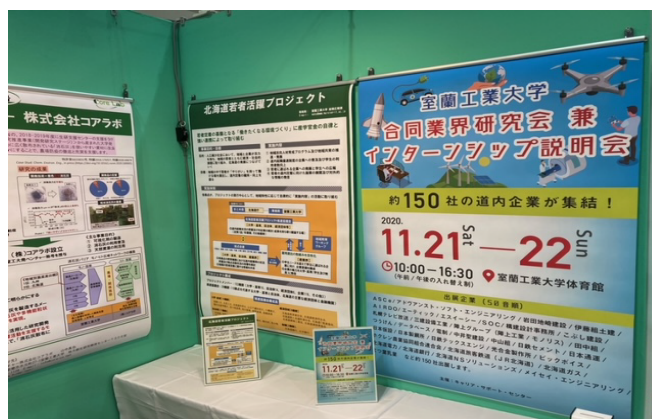


室蘭工業大学

地方創生研究開発センター

研究報告

No. 32



2022



*Center for Cooperative Research
and
Development
Muroran Institute of Technology*

— 目 次 —

【令和2年度 プレ共同研究成果】

- (1) 有機ハイドライドの水素化および脱水素化反応のモニター材料の開発・・・・・・・・・・ 1
馬渡 康輝、北内 千裕、有川 英一
- (2) 室蘭イタンキ浜鳴り砂検出アプリケーションの精度検証・・・・・・・・・・ 6
西山 幹泰、阿部 大輔、三好 琉聖、鈴木 元樹、塩谷 浩之、馬場 俊光
- (3) 機器整備のためのロール回転速度非接触計測に関する技術課題分析・・・・・・・・ 8
相津 佳永、湯浅 友典、田中 敬人、谷口 敦史、池田 隼輔、三浦 隆治
- (4) 大型構造物の異材溶接部に関する超音波検査手法の検討・・・・・・・・・・ 11
長船 康裕、高田 紳吾

【表紙写真】

上：第32回フロンティア技術検討会 2020/11/13（金）

下：第34回北海道ビジネス EXPO 2020/11/5（木）～6（金）

有機ハイドライドの水素化および脱水素化反応の モニター材料の開発

馬渡 康輝*1, 北内 千裕*2, 有川 英一*2

1 はじめに

液体有機ハイドライド (LOHC) は、主に以下の理由から、水素の貯蔵・運搬キャリアとして期待されている。

- 1, 常温常圧で液体であるため、ハンドリングが容易
- 2, 既存の石油流通インフラの使用可能
- 3, 水素貯蔵・輸送のリスクを低減

現在もっとも有望な LOHC は、メチルシクロヘキサン(MCH)である (図1)。MCH は3分子の水素 (H_2) を貯蔵した化学構造を有しており、脱水素化反応を経てトルエン(TOL)に変換される過程で3分子の H_2 を放出する。反対に、TOL に3分子の H_2 を付加すると MCH に変換され、再び水素を貯蔵する。

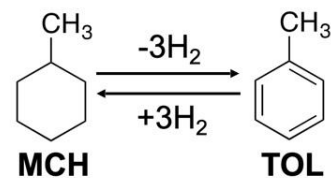


図1 LOHC の水素吸脱着反応

MCH-TOL の LOHC は、必要に応じてこの H_2 の吸脱着反応を行うことで、 H_2 を貯蔵し放出する。吸脱着反応の途中では、MCH と TOL がある割合で混合した状況になる。この混合比は、LOHC 中に貯蔵されている水素量と等価にみなすことができる。従来、両物質の混合比は、ガスクロマトグラフィー装置 (GC) を用いて測定される。現在、この分析は、水素吸脱着反応およびその装置開発において欠かせないが、装置の設置スペースや分析に要する時間が迅速な研究開発の障害となりうる。このため、GC を用いることなく、迅速に頻度よく混合比を知る方法の開発が期待さ

*1: しくみ解明系領域 物質化学ユニット

*2: 株式会社フレイン・エナジー

れる。

導電性高分子の代表であるポリアセチレンを置換基で修飾した分子構造を持つポリ一置換アセチレン (PSA) は、その高分子主鎖がらせん構造をとることが知られている。そのらせん構造の制御に基づく特異的な物性が見いだされていることから、基礎および応用の両面で盛んに検討されている。当研究室では、PSA のらせん構造をばねとみなし、合成、構造解析、特異的な物性評価に注力してきた。その中で、固体状態および溶液中それぞれについて、伸縮の程度を制御する方法をいくつか見出してきた。^{1,5} その中で、PSA の置換基に特定の芳香族を用いると、その PSA の固体状態における色彩は、合成時に用いた溶媒に依存して異なることを見出した。^{1,2,4} 視覚的に顕著な差が見られた黄色と赤色の PSA を選択し、固体中での分子構造を比較した結果、黄色の場合は伸びたらせん (らせんピッチが大きい) であり、赤色の場合は縮んだらせん (らせんピッチが小さい) であることがわかった。さらに、特定の黄色の PSA について、MCH に接触させても色彩に変化はないが、TOL に接触させると速やかに赤色に変化することも明らかになった。この色彩変化は TOL と接触することでらせんピッチが小さくなったことを意味する。このように化学結合を変化させ

ることなく、連続する π 共役系分子間の炭素-炭素結合角の微小な変化によって色彩が変化させられる分子は限られる。さらにこのことは、PSA が接触した分子の違いを認識し色彩を変化させる材料として機能することを示している。本研究の着想は、この分子認識性能を LOHC 中の MCH-TOL の混合比を精度良く可視化する材料に展開できるのではないかと考えに基づく。

本研究では、LOHC による水素貯蔵・供給技術の性能向上を加速するために、オンサイトで反応進行の程度をモニターする材料を開発することを目的とした。その実現に必要な、比較的大きな 10 g スケール (従来の 50 倍相当) で PSA を合成する方法の確立、および LOHC 中の MCH-TOL の混合比に応じてどの程度の精度で応答できるかについて、検討した。

2 実験方法

2.1 モノマー合成

本研究では 2 種の一置換芳香族アセチレンモノマーを用いて重合反応を行った。2-エチニルナフタレン (2EN) と 2-エチニルフルオレン (2EF) は既報に従い、2-ブロモナフタレンおよび 2-ヨードフルオレンと

トリメチルシリルアセチレンとの菌頭カップリング反応、引き続きトリメチルシリル基の脱保護反応を経て合成した。

2.2 ポリマー合成反応

一置換アセチレンモノマーおよび Rh 錯体のエタノール溶液をそれぞれ調製し、助触媒のトリエチルアミンを触媒溶液に添加した。均一に溶解した二液を室温下で混合し激しく攪拌した。反応は混合直後に開始し、数十秒経過後に黄色の固体が析出した。30 分後に反応液を大過剰のメタノール (MeOH) へ添加して反応終了とした。ガラスフィルターを用いた吸引ろ過で生成したポリマー (P2EN および P2EF) を回収し、40 °C で一昼夜減圧乾燥した (図 2)。

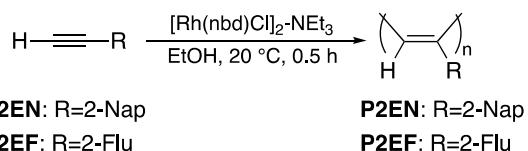


図 2 ポリ一置換アセチレン (PSA) の合成反応

2.3 LOHC の接触による色彩変化試験

上記の方法で得られた PSA は黄色であり、粉体が凝集しブロック状で得られた。この PSA を加圧すると、主鎖の炭素-炭素二重結合がシス体からトランス体に異性化することが知られている。このため、このブロック状の PSA は、小さいスパチュラを用いて可

能な限り力を加えないように砕いた。室温下、大気中でこの破片に LOHC を直接接触させた。

3 実験結果と考察

3.1 PSA 合成の 50 倍スケールアップ

従来の PSA 合成では、PSA が約 200 mg 得られるスケールで実施してきた。本検討では、一度の反応で PSA を 10 g 得るスケールで反応が可能か検討した。本重合反応は開始反応が非常に早いため、強攪拌下で 2 液混合しなければならない。加えて、発熱反応であるため、反応溶液の濃度は高くすることなく、反応試薬の仕込量はいずれも従来の 50 倍とした。これに伴い、反応容器は従来の 25 mL から 1000 mL に変更した (図 3)。反応開始時の様子は、スケールアップに伴う差は観察されなかった。一方、モノマー溶液を添加した 2 分後 (図 3 の B) にフラスコの外壁に触れると、触れる程度に発熱していた。この発熱は、従来のスケールでは感じられなかったことから、スケールアップによる反応熱の放熱効率を改善する必要がある。しかし、生成した PSA は、小スケール反応で生成したポリマーと色彩の差は無かった。さらなるスケールアップ合成を実施する場合は、放熱効率が良い反応器

を用いる必要がある。

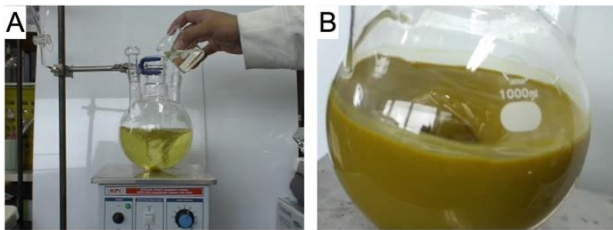


図3 PSA合成のスケールアップ実験 (A: 触媒溶液にモノマー溶液を添加開始時、B: モノマー溶液添加終了後から2分経過)

3.2 混合比を変えた LOHC と PSA の接触

LOHC 中の MCH-TOL 比を 10%毎に変えた 1:1 溶液に対し、P2EN と P2EF の小片を接触させ、その際の色変化を観察した (図4)。両ポリマーともに、20から30%程度混合比が変わると色彩の変化が明確であった。特に、P2EN が混合比に対してより応答良く色彩変化した。このことは、PSA の置換基の分子構造の差が影響していると考えられる。

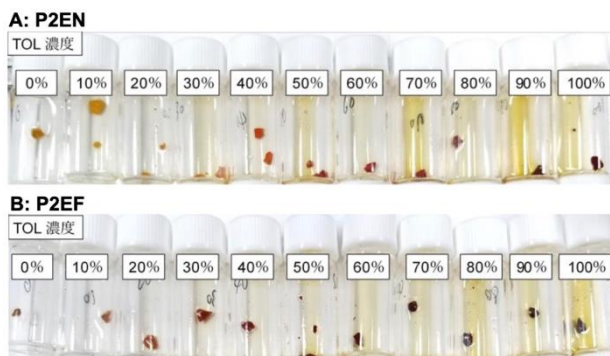
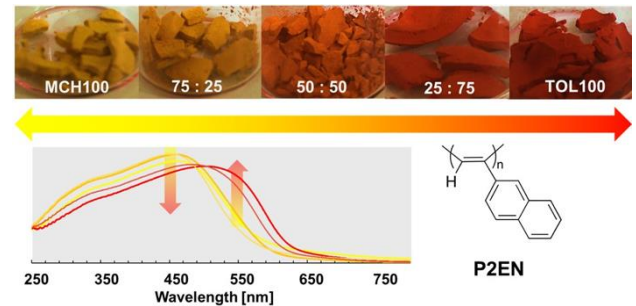


図4 混合比を段階的に変えた LOHC と接触した PSA の色彩変化に関する置換基の影響

3.3 色彩が変化した PSA の拡散反射スペクトル

P2EN の色彩変化を詳細に検討するために、拡散反射スペクトルを測定した (図5)。その結果、この色彩変化は、450 nm と 550 nm の吸収帯の強度比が変化



することに起因することがわかった。両吸収帯はそれぞれ伸びたらせん和縮んだらせんに対応する。すなわち、吸収スペクトルの短波長成分は伸びたらせん、長波長成分は縮んだらせんに対応した。これらのピッチが異なる2種のらせんの割合が段階的に変わること、色彩が変化したことがわかった。

図5 MCH-TOL 比を変えた LOHC に接触した P2EN の色彩変化とそれらの拡散反射スペクトル

4 おわりに

本研究では、PSA のスケールアップ合成および混合比を変えた LOHC へ接触した際の色変化の程度について検討した。その結果、今回用いた PSA で

は、いずれも大まかな混合比を目視で識別できることが明らかになった。また、その色彩変化の程度は、PSA が有する置換基の影響を受けることが示唆された。今後の課題として、混合比の差が小さい場合に明確な色彩変化を示す PSA の開発が必要であり、その検討を進めている。

文献

- ¹Motoshige, A., et. al., *J. Polym. Sci. Part A: Polym. Chem.* **2012**, *50*, 3008.
- ²Mawatari, Y., et. al., *Polymer* **2014**, *55*, 2356.
- ³Tabata, M., et. al., *Polym. Rev.* **2017**, *57*, 65.
- ⁴Mawatari, Y., et. al., *Polymers* **2019**, *11*, 94.
- ⁵Mawatari, Y., et. al., *Macromolecules* **2021**, *54*, 7400.

室蘭イタンキ浜鳴り砂検出アプリケーションの精度検証

西山幹泰^{*1}, 阿部大輔^{*2}, 三好琉聖^{*2}, 鈴木元樹^{*3}, 塩谷浩之^{*3}, 馬場俊光^{*4}

1:室工大院, 2:室工大工, 3:室工大しくみ解明系, 4:北海道 NS ソリューションズ

1 はじめに

室蘭市のイタンキ浜は鳴り砂海岸と呼ばれている。人が砂地を歩いた際の摩擦により特徴的な高音を出す砂を鳴り砂と呼ぶ。イタンキ浜は全国で30か所以上の鳴り砂海岸の一つに数えられ、地域の自然として市民で構成されたボランティア団体による保護清掃維持活動や大学の公開講座も行われている⁽¹⁾。

イタンキ浜の砂には石英の結晶が多く含まれ、それらの摩擦が鳴る要因と言われている。砂構成物はX線構造解析などによって明らかにされる。我々は図1に示す画像判定に基づく砂構成物の抽出によって、簡易に鳴り砂を分析可能なアプリケーション開発について紹介する。

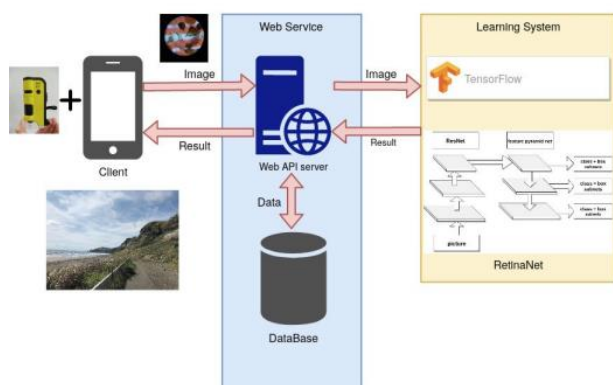


図1：鳴り砂アプリケーションの全体構成

1 鳴り砂アプリケーション

2.1. 物体検出に基づく砂粒検出

物体検出は画像中から物体の位置と所属するクラスを検出するタスクである。これまでに、鳴り砂アプリケーションでは物体検出手法の1つであるRetinaNetを用いて砂粒の検出と分類を同時に行ってきた⁽²⁾。砂粒抽出の基本手法であるRetinaNetだけではなく、本稿では、最近提案されている物体検出手法のYOLOv5やM2Detを適用して精度の比較を行った^{(3),(4),(5)}。

2.2 実証実験

スマートフォンにハンディ顕微鏡を組み合わせ撮影した画像20枚を学習に用いた。物体検出モデルの学習は画像サイズが416×416ピクセルで背景が無地である砂画像を用いた。学習率を0.0001とし、学習回数は試行実験から100回と設定した。学習データの正解ラベル付けは手動で設定した。画像中の砂粒を石英、半石英、およびその他の計3つのクラスに分類することとして、3クラス分類問題として砂粒判定機能を構築した。鳴り砂の構成物を図2に示す。



図2：鳴り砂の主な構成物

学習していない砂粒で構成された砂画像5枚を用いて、物体検出モデルの評価実験を行った。提案手法の有効性を定量的に確認するために、各手法の比較に用いる評価指標は物体検出の評価に適用されるIoUとmean Average Precision (mAP)を用いた。IoUとは正解

領域と予測領域の積集合の画像面積を、正解領域と予測領域の和集合の画像面積で割った数値であり、最小値は0、最大値は1である。mAPとはPrecision-Recall曲線の面積の平均値で最小値が0最大値1となる。mAPの算出において予測した領域が正解となる閾値は実験的にIoUが0.4以上とした。各手法のIoUとmAPの結果を表1に示す。

表 1:各種法のIoUとmAPの値

| 物体検出手法 | IoU | mAP |
|-----------|-------------|-------------|
| Retinanet | 0.83 | 0.87 |
| YOLOv5 | 0.86 | 0.62 |
| M2Det | 0.50 | 0.11 |

IoUの値よりYOLOv5とRetinaNetの精度が80%以上となっており、M2Detよりも砂粒を高精度に検出が可能であることが示された。各手法で得られた分類の様子として、砂粒の検出結果を図3～5に示す。

分類精度については、mAPからRetinaNetによる検出がYOLOv5により優位となった。YOLOv5では半石英の検出精度が低いことが明らかとなった。また、M2Detの場合では、mAPはIoUが低いことが影響しており、mAPの算出対象となる矩形領域が少ないことが原因の一つとなっている。以上の定量評価によりRetinaNetが最も砂粒を高精度に検出可能なモデルであることが示された。

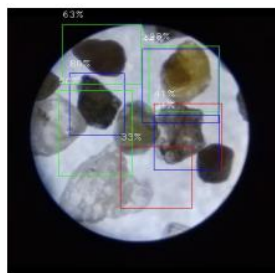


図 3 : M2Det による検出結果

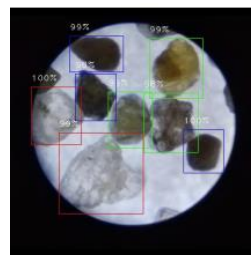


図 4 : RetinaNet による検出結果

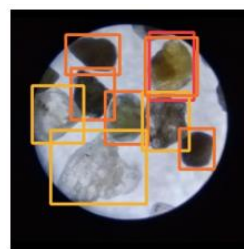


図 5: YOLOv5 による検出結果

3 まとめ

本稿では、鳴り砂の拡大画像からNNによって砂粒を分類するシステムについて紹介した。鳴り砂の物体検出により砂粒の検出と同時に分類を行うICTツールを構築した。分類性能検証として最近提案された新手法による比較定量評価から、RetinaNetを用いた検出手法が安定した手法であり、鳴り砂アプリケーション砂判別に適していることが示された。

文献

- (1) 室蘭イタンキ浜の鳴り砂を科学する, 平成 31 年度室蘭工業大学公開講座実施要項, 平成 31 年.
- (2) 西山他, 鳴り砂アプリケーション, 情報処理北海道シンポジウム 2020 予稿, 2020.
- (3) T. Lin, P. Goyal, R. Girshick, K. He, and P. Dollr, "Focal loss for dense object detection," in Proc. IEEE Conf. ICCV, pp. 2980--2988, 2017.
- (4) J. Redmon, S. Divvala, R. Girshick, and A. Farhadi, "You only look once: Unified, real-time object detection," in Proc. IEEE Conf. CVPR, pp. 740--788, 2016.
- (5) Q. Zhao, T. Sheng, Y. Wang, Z. Tang, Y. Chen, L. Cai, and H. Ling, "M2det: A single-shot object detector based on multi-level feature pyramid network," in Proc. AAAI Conf. Artificial Intelligence, pp. 9259--9266, 2019.

機器整備のためのロール回転速度非接触計測 に関する技術課題分析

相津佳永*1, 湯浅友典*1, 田中敬人*2, 谷口敦史*3, 池田隼輔*3, 三浦隆治*3

1 はじめに

ものづくりの生産現場においては、安定操業且つ高品位な製品を製造するため、非接触で速度計測するニーズが国内外の多用な生産現場で高まっている。例えば、鉄鋼、製材業界など様々な生産現場における搬送ラインの整備の際に、搬送用ロールの回転速度を非接触計測する必要がある。現状のレーザードップラー法や小型タコメーター等は現場の設置環境や対象物の材質などの条件に適合しないことが多い。今、現場利用に適したハンディタイプの小型かつロバストで安価な光学式非接触速度計を開発することが急務である。

本プレ共同研究では、小型・ハンディタイプのロバストで安価な光学式非接触速度計の開発を目指して、既知の光学計測方式の検討、基礎実験光学系の構成と信号観察実験を行い、速度計を開発する際の主な技術課題を抽出することを目的とした。最適な計測手法の選定と具体的な機器の開発を目指す研究に進展させることを目的とする。



図1 生産現場（日鉄テックスエンジ株式会社）
<https://www.tex.nipponsteel.com/business/mechanical/>

*1：もの創造系領域ロボティクスユニット

*2：機械航空創造系学科

*3：日鉄テックスエンジ株式会社

2 技術課題の背景

ものづくりの工場における生産ラインでは、材料の搬送に複数の搬送ロールを使用しており、モーター動力を各ロールに伝えることでロール上の材料が搬送される構造になっている。安定操業には各ロールの回転速度を計測・調整・確認することが必要であるが、(a)作業者の安全上、ロールへ接触して計測することは禁止(b)ロールの直径は正確にはロールごとに異なるため、個別に計測パラメータの調整が必要(c)各ロールの速度バラつきを抑制し、全体最適化が必要である。これが不十分な場合には各ロールに速度差が発生し、その結果、搬送材の破損・落下等の問題を引き起こす危険がある。信頼できる確実な速度計測手段がないため、満足な計測が行えず調整に苦労している。

3 目標性能と検討する手法

3.1 目標性能

3.1.1 ロール回転速度

一般にロール回転速度（搬送材の搬送速度）は、数100～数1000rpm程度であり、最初の目標性能を1000 rpmと設定する。

3.1.2 計測精度

ロール回転速度の計測精度は、既存手法での精度が数%程度の誤差に入っていることを参考にし、最初の目安として、誤差±1%を目標とする。

3.1.3 ロール径

ロール径については、様々なサイズがあるが、中・大型製品向けとして使われることの多い150~500 mmを目標とする。なお、口径が小さく曲率が大きい場合、それだけ計測時の難易度が高くなる可能性がある。

3.1.4 ロール材質

計測対象となるロールの種類は様々である。一般に製造工程では、上流工程から下流工程に至るプロセスで最終製品に近づくにつれ搬送時のキズ等を避けるため、スチール等の金属製ロールの割合が減少し、ウレタンやゴムロールの割合が増加する。金属製ロールは表面粗さをパラメータとして表現可能である。一方、ウレタンやゴムは組成、表面状態、色が様々にありターゲットを決めにくい。よって最初に想定するロール材質は金属とする。また、表面粗さは粗さ標準片を利用し、算術平均粗さ Ra 値で0.3~10.0 μm とする。

3.1.5 環境条件

計測時の環境条件として、場内の明るさ、粉塵、温度等が影響する可能性がある。明るさは場内照明と建築構造に依存した太陽光の入射がある。粉塵はない状況を想定する。温度は常温を仮定する。光計測は周辺環境光の影響に最も注意を払う必要があると考える。

3.1.6 ロールと速度計の間隔・姿勢

ロールを計測する際の速度計との間隔は、市販の非接触式回転計と利用現場の意見を参考に、200~300 mmを初期目標とする。また、速度計は、ロールの回転軸に対して垂直な方向から光照射・検出する配置で用いる。

3.2 計測手法

計測手法として、今回はスペckルパターンを空間フィルター法で検出する方法を取り上げた。

・スペckル

光学的な表面粗さを持つ拡散物体にレーザー光を照射すると、その反射光・透過光は物体面の微細な凹凸によりランダムに散乱された散乱光となる。観察面上ではその拡散光同士が、ある点では互いに強め合い、ある点では互いに弱めあう干渉を起こす。このような拡散光の干渉により、図2の中に示すような不規則な明暗の斑点状の様子が観察される。この模様をスペckルパターン、また個々の明暗の斑点をスペckルという。レーザー光の照明形態に依存するが、通常、対象物の移動に対応してスペckルパターンも移動する

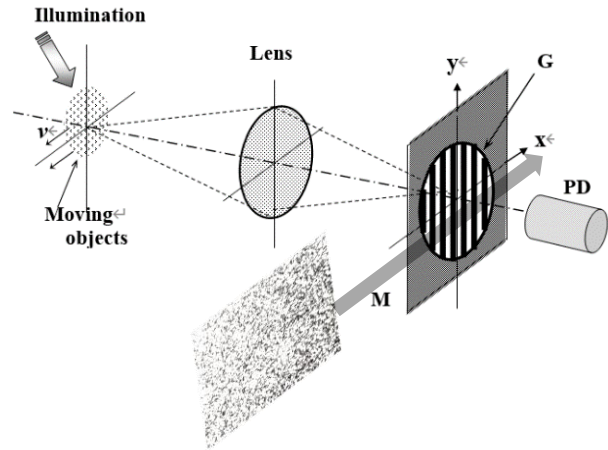


図2 空間フィルター法とスペckルパターン

性質が知られており、速度検出に利用できる。

・空間フィルター法

図2に格子状空間フィルターを用いた速度測定の実験原理図を示す。速度 v で移動する対象面の散乱光をレンズで集光し、対象表面像を一定間隔 p で並んだ複数のスリット列からなる透過型格子 G 面上に結像する。コヒーレント光の場合、この像はスペckル状（像面スペckル）になり、このパターンの移動に伴い、格子を透過した光を検出すると、格子の周期的な透過率分布に従い、速度 v に比例した周波数 f_G で振動する周期信号が得られる。 f_G を測定すれば、

$$v = pf_G / M$$

により速度 v が算出される。ここで、 M は光学系の結像倍率である。図2で格子 G に重ねて設置するマスク M は物体面の測定領域断面を規定し、一方、奥行き方向は照明領域と結像光学系の焦点深度で決定される。

4 基礎実験

4.1 実験測定系と信号

基礎実験のための光学系を図3に、写真を図4に示す。レーザー光を紙製ロール状表面に照射し、反射光をレンズ $L2$ で光検出器に集光させ、光検出器前の像面に0.5 mmピッチの格子を置くことを基本配置とした。光検出器で得られた電気信号は、アンプにより増幅し、フィルターを介してノイズをある程度抑制した上でオシロスコープにて観測する。今回は、2 mmピッチの手製格子を S_1 、または0.5 mmピッチのレプリカ格子を S_2 に置くことで、回折領域内のスペckルパターンの移動検出可能性を最初に調べた。

典型的な空間フィルター法における周期信号の観測はまだ実現できていない。これは、格子のピッチとスペckルパターン内のスペckルグレイン（空間強度分布における空間相関長に相当）の大きさが適切な関係に設定できていないためと考えられる。

5 現状での課題

- 1) 格子のピッチとスペckルパターンの強度空間相関長の最適な比率を探索することが必要である。
- 2) レーザー光源のパワー増大が必要である。また、照射径は、スペckルのボイリング現象(スペckルが移動せず点滅のみを繰り返す現象)を避けるため、有限領域で光波面曲率が寄与する条件が必要である。ビームの集光・発散による波面曲率と、計測対象ロールの曲率の最適条件を見出す必要がある。
- 3) 対象物の表面性状に依存してスペckルコントラストの高低が左右される。実際のロール表面サンプルを導入し、コントラストを調べる必要がある。
- 4) 現在の光センサーの受光径が 1mm 程度であり、今後径を広げて格子通過後の周期信号を効率よく検出する光センサーの最適化を行う必要がある。
- 5) 信号スペクトルを計測し、周期信号の帯域を確認するとともに、周波数フィルターの帯域を適切に設定し、雑音を極力除去することが必要である。

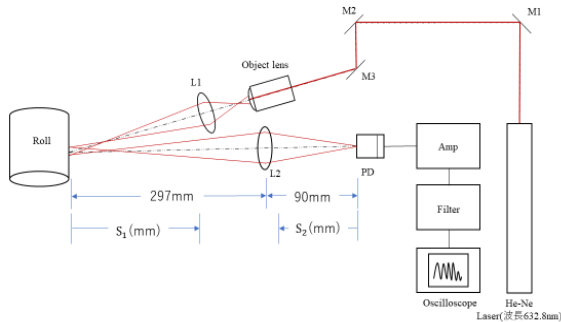


図3 基礎実験光学系

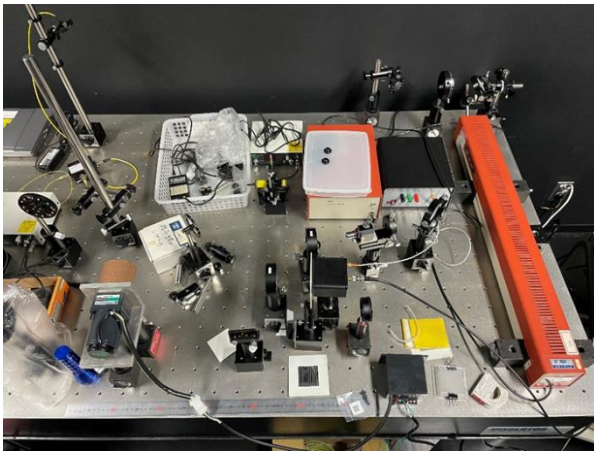


図4 光学定盤に構成した基礎実験光学系

4.2 検出信号の例

図5に、 S_1 、 S_2 位置でのそれぞれの信号例を示す。波形内に周期的な信号と思われる成分が確認できるが、 $S_2 = 3\text{ mm}$ の位置では明確な信号が検出できなかった。位置を変更させた際の誤設定の可能性がある。

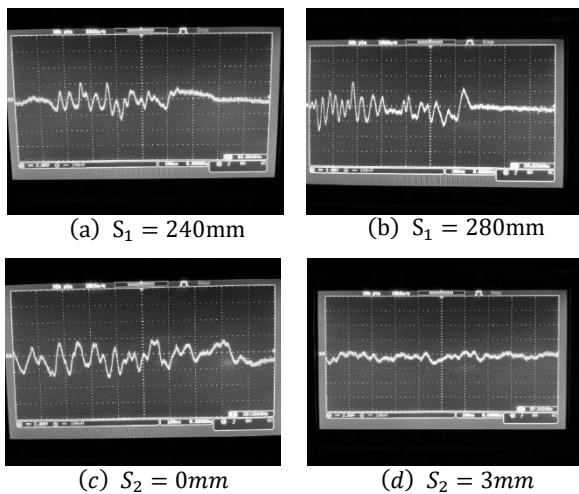


図5 観測波形の例

6 おわりに

非接触速度計に関する背景を調査し、空間フィルター法を用いた基礎実験で信号波形の観測を行った。本プレ共同研究にて現状の把握及び課題の抽出を行えたので、今後は共同研究によって解析可能な周期信号を得る条件の最適化を図りアイデアの妥当性を研究する段階に進むことが望まれる。

文献

- (1) Y. Aizu and T. Asakura, "Spatial Filtering Velocimetry" (Springer-Verlag, Heidelberg, 2005).
- (2) 相津佳永, 岩井俊昭, 朝倉利光, "レーザー計測の基礎 I : 速度計測", レーザー研究 27, 8 (1999) 572-578.
- (3) 岩井俊昭, 相津佳永, 朝倉利光, "レーザー計測の基礎 II : 散乱計測," レーザー研究 27, 9 (1999) 642-651.
- (4) 朝倉利光, 岩井俊昭, 相津佳永, "レーザー計測の基礎 III : 総論," レーザー研究 27, 10 (1999) 715-718.
- (5) 大島伸一, "周波数変調レーザを用いた距離と速度の同時計測" 計測と制御 60, 12 (2021) 880.

大型構造物の異材溶接部に関する超音波検査手法の検討

長船 康裕*1, 高田 紳吾*2

1 はじめに

大型プラントにおいて、耐食性と強度を併せ持った省 Ni ステンレス鋼の適用が進められている。しかし、プラント全体に適用すると高コストとなるため、耐食性が必要な部位のみにステンレスを使用し、一般構造物鋼との溶接構造とすることが現在実プラントの設計レベルで検討されている。この異材溶接部は複雑な金属組織となることが想定されるが、このリーン Ni ステンレス鋼と溶接構造用圧延鋼(SM 材)の組み合わせにおける溶接部の健全性評価手法について、JIS に記載がなく、超音波検査における条件設定および検査精度の確認が必要である。

2 概要

リーン 2 相ステンレス鋼 SUS821L1 は、21Cr-2Ni-0Mo-0.17N から成り、ニッケルやモリブデンの添加量を抑えた省資源設計となっている。SUS304 と同等の耐食性に加え、約 2 倍の降伏応力を併せ持っているため、河川設備で採用されている。2 相ステンレス鋼はフェライト相とオーステナイト相の 1:1 の層状組織に加え、熱影響部での粗大化したオーステナイト相による超音波の減衰や散乱が大きい。これらの要因から、リーン(省資源) Ni ステンレス鋼と炭素鋼の溶接部における超音波探傷検査は未だに確立されていない状況である。プラント製造で想定される溶接材に人工的に溶接欠陥を導入したサンプルを製作し、X 線 CT 装置で内部欠陥位置を正確に把握した。本研究では超音波探傷検査における母材や熱影響部でのエコー特性を確認すると

*1: もの創造系領域機械工学ユニット

*2: 株式会社北央技研

ともに欠陥検出に関する基本情報を報告する。

3 実験方法

3.1 溶接試料の製作

図 1 に試験片の形状および寸法を示す。橋や水門などの構造物に使用されることを考え、試験片形状は一般的な T 字溶接試験片を用いた。超音波探傷検査の際に超音波を入射させる金属の影響を比較するため、ウェブ材とフランジ材を入れ替えた 2 種類の試験片を製作した。

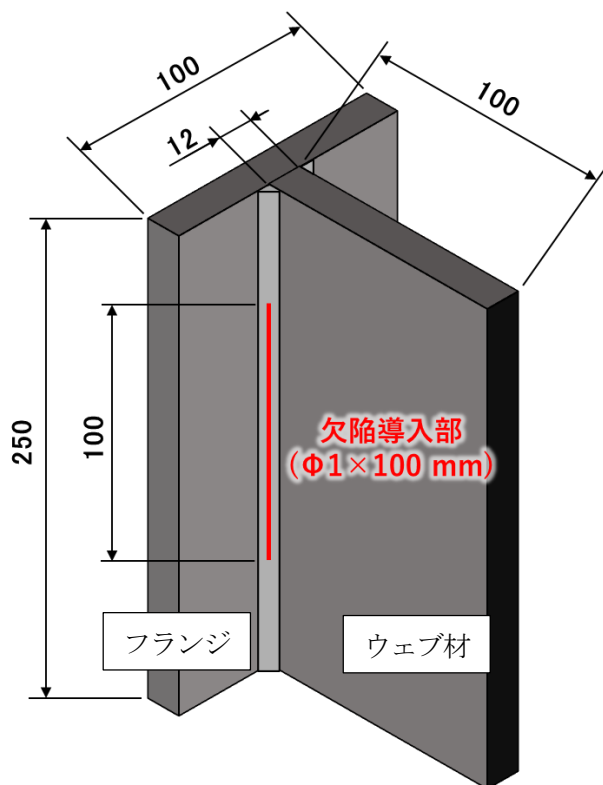


図 1 T 字型溶接試験片の形状

使用した金属はリーニ 2 相ステンレス鋼の

SUS821L1 と溶接構造用圧延鋼材 (Steel Marine) の SM490YA である。SM490YA は SM490A に比べ降伏点が高く、炭素 (C) の含有量を抑え、溶接性を考慮した材料となっている。そのため 2 相ステンレス鋼と同様に材料を薄肉による設備軽量化が図れる。以後、ウェブ材が SUS821L1 のものを試験片 1、SM490YA のものを試験片 2 と呼ぶこととする。溶接時の条件を操作して溶接部に直径 ϕ 1mm、長さ 100mm 程の人口欠陥を導入した。

溶接条件は、厚さ 12mm、幅 100mm、長さ 250mm の SUS821L1 と SM490YA のレ形開先とすみ肉溶接と完全溶け込み溶接の T 継手である。溶接方法は半自動溶接で行い、溶接材は軟鋼側溶接金属および母材からの希釈を受け、溶接金属中の Cr、Ni 量が低減するのを防止するために、ステンレス鋼と軟鋼など異材継手用である 309 系溶接材料の SF309L を用いた。

3.2 産業用 X 線 CT 検査装置による溶接欠陥の解析

欠陥を導入した試験片の内部欠陥位置を正確に把握するために産業用 X 線 CT (TOSCANER-34500FD (東芝 ITC(株))) を用いた。この装置は X 線出力が 450kV で密閉管である。密閉管は開放管と比較して、分解能は密閉管が $5 \mu\text{m} \sim 100 \mu\text{m}$ (マイクロフォーカス/ミリフォーカス) である。

3.2 超音波探傷

探傷器はシングル超音波発信受信探触子のデジタル探傷器（GE 社製 KrautKramer USM36）と、複数探触子を有するフェイズドアレイ探傷器（オリンパス社 OMNIscan）を使用した。実験対象のステンレスは、超音波の減衰が大きい薄板のため、超音波探傷には縦波の探触子を用いるのが一般的である。しかし、供試材の板厚が 20 mm 以下の材料にはモード変換の問題から縦波は使用できないために横波斜角探触子を使用した。超音波探傷条件を表 2 に示す。

表 2 超音波探傷条件

| | | |
|----------|--------|---------------|
| 斜角探触子 | 超音波の種類 | 横波 |
| | 周波数 | 2 MHz |
| | 入射角度 | 70 度 |
| | 音速 | 3230 m/s |
| | 振動子寸法 | 14 mm × 14 mm |
| フェイズドアレイ | 超音波の種類 | 横波 |
| | 周波数 | 5 MHz |
| | 入射角度 | 30~60 度 |
| | 音速 | 3230 m/s |
| | 振動子数 | 20 個 |

4 実験結果および考察

図 2 に典型的な溶接欠陥部分の X 線 CT による解析結果を示す。欠陥は溶接金属内部に直線状に観察された。解析結果から欠陥の位置座標や形状の情報を得ることができた。また、欠陥の深さから超音波の路程 W を求め、超音波エコーピークと欠陥位置の

路程距離を算出した。欠陥までの路程距離 W は試験片 1 で 28.07mm、試験片 2 は 24.55mm であった。

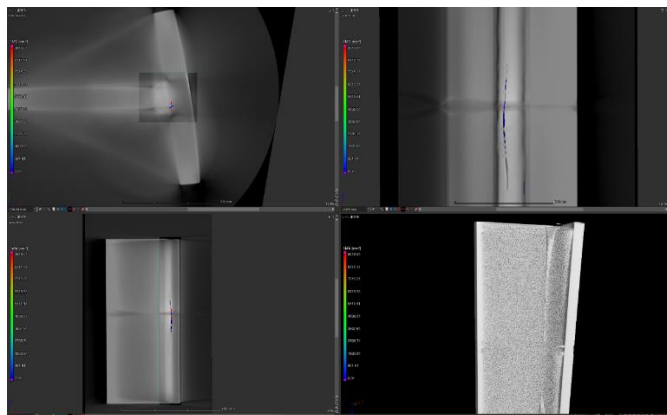


図 2 X 線 CT による欠陥検出例（試料 1）

超音波底面エコーが表示スケールの 80 % となるゲインの値はそれぞれ、SUS821L1 が 54.4 dB、SM490YA が 45.2 dB であった。鋼製の標準試験片と比較して SUS821L1 は 16.8 dB、SM490YA は 7.6 dB ゲインが大きい値である。また、SUS821L1 は SM490YA に対して 9.2 dB ゲインが高くなっており、これらの現象は SUS821L1 が大きな減衰を発生させる材料であることを示している。また、超音波探傷の際にエコーの散乱減衰によって発生するバックグラウンドノイズ（林状エコー）は、SUS821L1 の路程距離 15 ~ 33 mm 地点で不規則に確認した。一方、SM490YA の波形内に林状エコーは確認されなかった。

T 字試験片の溶接欠陥部を超音波探傷した結果を図 3 に示す。試験片 1 と試験片 2 のビーム路程 W

はそれぞれ 28.07 mm と 24.55 mm である。図中①は送信パルス、②、③はウェブ母材部分のエコー、④、⑤は熱影響部 (Heat-affected Zone: HAZ) -ウェブ材のボンド部付近のエコーである。これらのエコーに続いてのビーム路程 W に欠陥エコーが図中⑥に位置で確認された。

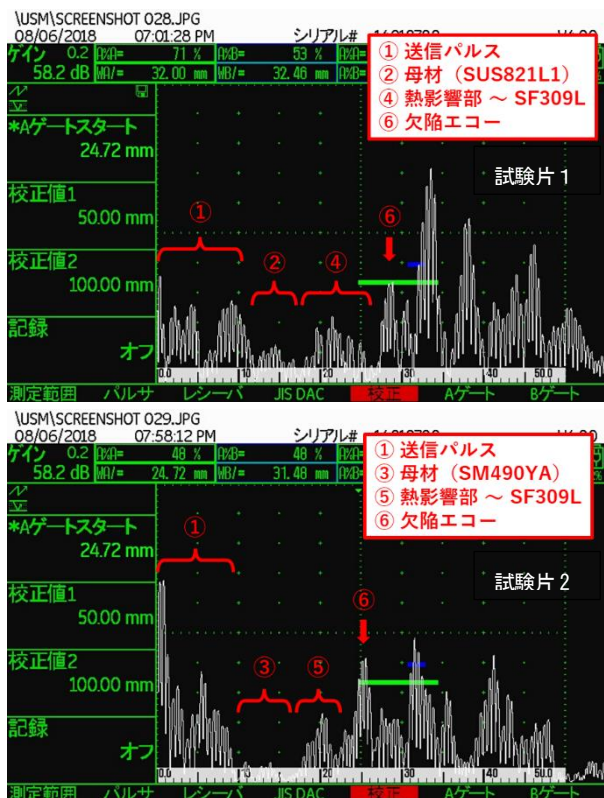


図3 シングルエコーによる超音波探傷結果

フェーズドアレイ探傷結果を図4に示す。超音波は画面の右側から入力し、図中の黄色破線で囲われている範囲を直進しウェブ材の底面で反射して溶接金属、フランジ部分に音波が伝播している。また、最上部に示したエコー波形は図中の白色点線で示した路程の超音波シングルエコーである。

赤色丸で囲われた部分において、エコーの大きい領域が集中していた。この領域位置は欠陥が存在するビーム路程 W と一致していた。以上のことから図中の①領域は送信パルス、⑦領域は溶接界面 (ボンド部)、②③領域は母材、⑥領域は欠陥を示すと考えられる。試験片1と試験片2を比較すると、反射エコーの色の濃さや形状および位置情報は試料2 (SM490YA) から超音波を入力したほうが明瞭に検出された。

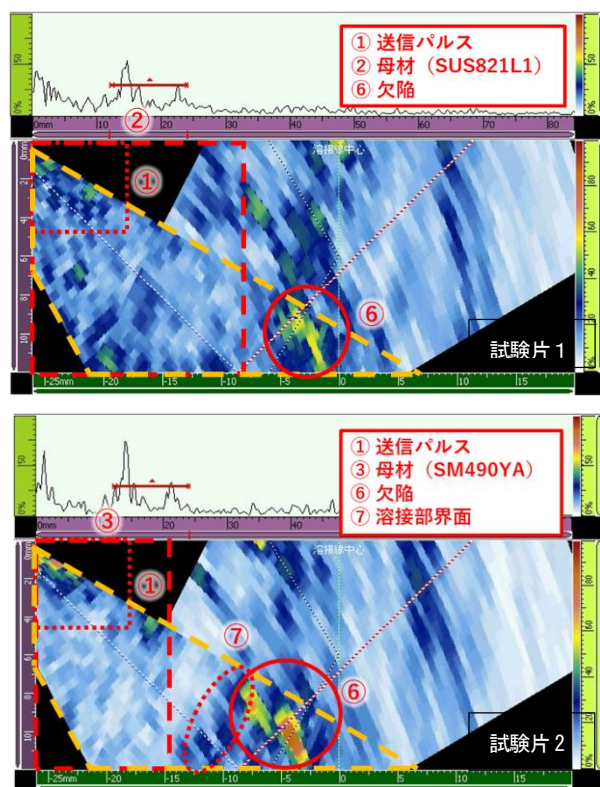


図4 フェーズドアレイによる超音波探傷結果

超音波探傷による欠陥検出に対して材質の影響が確認されたため、供試材の金属組織を観察した。いずれの材料も圧延材であり、SUS821L1の場合はオ

ーステナイト相・フェライト相, SM490YA の場合はフェライト相・パーライト相の層状組織を示した。超音波探傷試験では組織の異方性が影響することから層状組織の存在はエコー特性にとって無視できないと考えられる。

熱影響部 (HAZ) の組織を図 5 に示す。SUS821L1 のボンド部付近では結晶粒径が最大 100 μm 程度まで成長していた。2相ステンレスの HAZ ではフェライト粒が析出している可能性が高い^{1,2,3)}。一方, SM490YA のボンド部付近に粒径 10 μm 程度のものをわずかに存在したが, 溶接熱の影響が大きい部分では粒径 5 μm 以下まで微細化されていた。

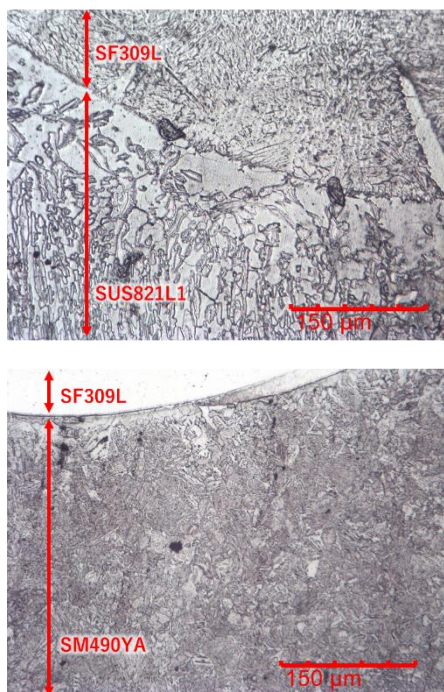


図 5 熱影響部の金属組織

フェーズドアレイはビームが複数出ているため,

斜角探触子のように正確なビーム路程を求める必要がなく, 広範囲の情報を一度に取得できる。ステンレスなどの高減衰材の欠陥の有無を検査する際にゲインを高く設定している。これらのことから, 母材の圧延組織に比べ結晶粒が大きい溶接部では, 母材と溶接部では音響インピーダンス Z の値が異なるため, 結晶粒界や溶接部境界で散乱し, 林状エコーを検出している可能性がある。また, 各フェーズドアレイ探傷結果を比較すると, SM490YA は欠陥エコー (橙色) の中心から周りに向かうにつれ, エコーが弱まっている (橙色 \rightarrow 青色)。SUS821L1 の欠陥エコーは欠陥周りに林状エコー (緑色) が発生しており, 輪郭がはっきりとしていない。このことより, フェーズドアレイで得られた欠陥エコーは散乱によって原寸大の欠陥より大きく表示されていることが考えられる。

5 おわりに

本研究では, 二相ステンレス鋼と SM 材の異材溶接部の内部欠陥を X 線 CT で撮影した後, 超音波検査で探傷することを目的とし, 母材, 熱影響部, 溶接部の接合界面でのエコー特性を調べた。これらの

結果として以下の結論が得られた。

- (1) 母材エコー比較を行った結果, SUS821L1 に対して SM490YA の減衰は小さく, 探傷方向は SM490YA 側から行ったほうが適切であることが示された。
- (2) 熱影響によって SUS821L1 の金属組織は成長・粗大化し, エコーの SN 比が大きく低下することが分かった。
- (3) フェーズドアレイでは高減衰材に合わせたゲインで探傷すると, 散乱によってノイズが大きくなり, 減衰の大きくない材料中での擬似エコーが発生しやすくなる。

た。また, 実験に際して大学院工学研究科博士前期課程生産システム工学系専攻機械工学コースの高井恭兵君の協力を得た。X線 CT 解析に際して地方創生研究開発センターの柴田義光准教授の協力を得た。

文献

- (1) 岡崎司, 二相ステンレス鋼の溶接, WE-COM マガジン, Vol.17 (2015), 参照 (2022年1月12日)
- (2) 白幡浩幸, 溶接構造用鋼, 溶接学会誌, Vol.78, No.3 (2009), pp.206-212.
- (3) 福井太, 溶接学会誌, 二相ステンレス鋼の溶接, Vol.50, No.3 (1981), pp.235-240.

謝辞

本研究は機械航空創造系学科機械システム工学コース4年の日野沢翔君の卒業研究の一部として実施され

**国立大学法人 室蘭工業大学
地方創生研究開発センター**

〒050-8585 室蘭市水元町27番1号

URL <http://www.muroran-it.ac.jp/crd/>

E-mail crd@mmm.muroran-it.ac.jp

T E L (0143)46-5860

F A X (0143)46-5879