平成 30 年度採択

戦略的基盤技術高度化・連携支援事業

戦略的基盤技術高度化支援事業

「精密水流制御と画像処理技術を統合した農産物運搬用車両洗浄装置の開発」

研究開発成果等報告書

令和２年　３月

担当局　　北海道経済産業局

法認定企業　株式会社　北土開発

事業管理機関　公益財団法人　とかち財団

目次

第１章　　研究開発の概要 ..... - 4 -
１-１ 研究開発の背景・研究目的及び目標 ..... - 4 -
１-１-１ 研究開発の背景 ..... - 4 -
１-１-２ 中小ものづくり高度化指針における課題とニーズ ..... - 5 -
１-１-３ 研究目的及び目標 ..... - 5 -
１−２ 研究体制（研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者） ..... - 8 -
１-３ 成果概要 ..... - 9 -
１－４　当該研究開発の連絡窓口 ..... - 11 -
第２章　　本論 ..... - 12 -
２-１ 洗浄精度の対応 ..... - 12 -
２-１-１ 流体解析シミュレーションと洗浄装置設計 ..... - 12 -
２-１-２ タイヤ追従制御の開発 ..... - 15 -
２-２ 高速化、小型化、可用性 ..... - 16 -
２-２-１ 高速化 ..... - 16 -
２-２-２ 小型化 ..... - 22 -
２-２-３ 可用性 ..... - 24 -
２-３ 耐環境性 ..... - 25 -
２-４ 殺菌対策 ..... - 25 -
２-５ 可搬化 ..... - 26 -
２-６ 評価試験 ..... - 27 -
第３章　　全体総括 ..... - 27 -
３-１ 研究開発成果・研究開発後の課題 ..... - 27 -
３-２ 事業化展開 ..... - 28 -

図目次

図 1　初年度　研究体制 ..... - 8 -
図 2　最終年度　研究体制 ..... - 8 -
図 3　ワーラー入りノズルのシミュレーション例 ..... - 12 -
図 4　衝突干渉面生成の実機検証 ..... - 12 -
図 5　車両洗浄装置の設計概要 ..... - 13 -
図 6　車両洗浄装置の外観（車両出口側から撮影） ..... - 13 -
図 7　車両洗浄装置の外観（上空より撮影） ..... - 14 -
図 8　測定データ例（ポンプ圧力及び流量） ..... - 14 -
図 9　1 対のノズル噴射水が交叉するデータ例（左；吐出量分布、中央；粒子分布、右；打力分布） - 15 -
図 10　可搬型の圧力、流量データ例（左図）　７孔ノズルとフラットノズルの噴射状況（右図） ... - 16 -
図 11 時刻 t のフレーム、時刻 t-1（一つ前の）フレーム（中心の写真）、差分フレーム（右の写真） - 16 -
図 12　差分フレームの２値化 ..... - 16 -
図 13　Vivado Desing Suite での設計 ..... - 17 -
図 14　画像処理ボード　TB-7Z-IAE（左図） ..... - 18 -
図 15　画像処理アルゴリズム（左図：入力フレーム、右図：エッジ検出 Canny） ..... - 19 -
図 16　画像処理アルゴリズム（左図：動的閾地法、右図：Closing 処理） ..... - 19 -
図 17　画像処理アルゴリズム（左図：Opening 処理、右図：反転処理） ..... - 19 -
図 18　画像処理アルゴリズム（左図：ラベリング、右図：輪郭検出処理） ..... - 20 -
図 19　画像処理アルゴリズム（左図：形状特徴分析（面積、真円度）、右図：外接円近似） ..... - 20 -
図 20　画像処理アルゴリズム（ホイール検出結果） ..... - 20 -
図 21　実験機の洗浄制御部 ..... - 22 -
図 22　画像処理ボード（左）とインタフェースボード（右） ..... - 23 -
図 23　試験装置 ..... - 23 -
図 24　画像処理ボード（左図）　制御盤への実装（右図） ..... - 24 -
図 25　遠隔診断用アプリ ..... - 24 -
図 26　振動試験（左図）　温度試験（右図） ..... - 25 -
図 27　タイヤ走行面の拭き取り（左図）　真菌の培養結果(通過前後)（右図） ..... - 25 -
図 28　テスト終了後の搬出状況（左図）　テスト前の搬出状況（右図） ..... - 26 -
図 29　テスト風景（左図） ..... - 26 -
図 30　ダブルタイヤ隙間の洗浄状態(左；通過前、右；通過後)..... - 28

表目次

表 1　実証機の課題と新技術 ..... - 5 -
表 2　研究開発項目と目標値 ..... - 6 -
表 3　目標値に対する結果 ..... - 9 -
表 4　コンパイル環境 ..... - 21 -
表 5　処理時間 ..... - 22 -

第１章　研究開発の概要

１-１研究開発の背景・研究目的及び目標

１-１-１研究開発の背景

ジャガイモシストセンチュウは，1972 年に北海道後志支庁管内の真狩村で発見されて以来，拡大の一途を辿っており，北海道の発生面積は，2014 年度末で，11,000ha を超えるまでに拡大している（古川，2016）。そして，ジャガイモシストセンチュウの蔓延は人為的に移動する人災の場合が多いとも言われている。さらに，2015 年に網走市の圃場に於いて，道内に抵抗性品種が存在しないジャガイモシロシストセンチュウが確認された（古川，2016，奈良部，2019）。さらには、令和元年 8 月、斜里町の一部地域において本線虫の発生が確認された。（農水省 HP,第９回対策会議の概要）

車両洗浄は有効な水際対策の一つとして認知されているが、シストセンチュウは薬剤耐性を有している上に軽く水に浮く性質があるため、一般的な薬液を噴霧する車両洗浄装置では、シストセンチュウの殺虫効果が期待できない。また、水にタイヤを漬ける浸漬型は水に浮いたシストが後続車両に再度付着する可能性もあり根本的な解決にはならない。車両洗浄装置が体面的な対策とならないためには、タイヤに付着する土砂を十分に落とし、かつ後続車両に土砂を付着させないシステム構築が必要である。

本研究は、噴射される水飛沫の動的挙動をモデリング、シミュレーションすることでこれまでの勘や経験に頼っていたノズル諸元を流体工学の見地から最適化すると共に、画像処理技術を応用して噴射タイミング制御し、タイヤに追従させることで洗浄精度を高めることを目的している。

車輌洗浄装置の市場は、すでに競合他社が多数参入しており成熟産業といえるが、その方向は、単純なセンサーによる ONOFF 制御、噴射水の高圧化一辺倒である。エンドユーザーの声を聞くとそれらへの不満と本物の洗浄装置を望む声も聞かれ、エンドユーザーの期待に答えられる装置作りが出来ればマーケットへの参入が可能と考えられた。また、広域対策として圃場単位での車両洗浄や口蹄疫等の突発的に発生する家畜伝染病への可搬型車両洗浄及び除菌装置への潜在的ニーズが多い事もわかってきた。

このため研究の取組は、初年度に（株）北土開発のモータープールに実験機を設置しノズル諸元の検討や噴射タイミングをシミュレーションと実機で検証するテーマ（テーマリーダー　北土開発）と高速化／小型化の技術を実証するテーマ（テーマリーダー　とかち財団）を並行して推進してきた。本年度は、実験機を使い、洗浄装置としての完成度を高めるとともに、開発した技術を使いながら、さらに新技術にチャレンジをしながら可搬型車両洗浄装置の開発を行った。

１-１-２　中小ものづくり高度化指針における課題とニーズ

(八)機械制御に係る技術に関する事項

1.　機械制御に係る技術において達成すべき高度化目標

（３）川下分野横断的な共通の事項

①川下製造業者等の共通の課題及びニーズ

イ.　小型化・軽量化

小型化・軽量化は、可搬性を高めるだけではなく最終的にローコスト化に資する。これは、個人事業者、レンタル会社への普及拡大を促し、病害虫対策を広範に普及することが期待できる。

ウ.　高精度化・高速化

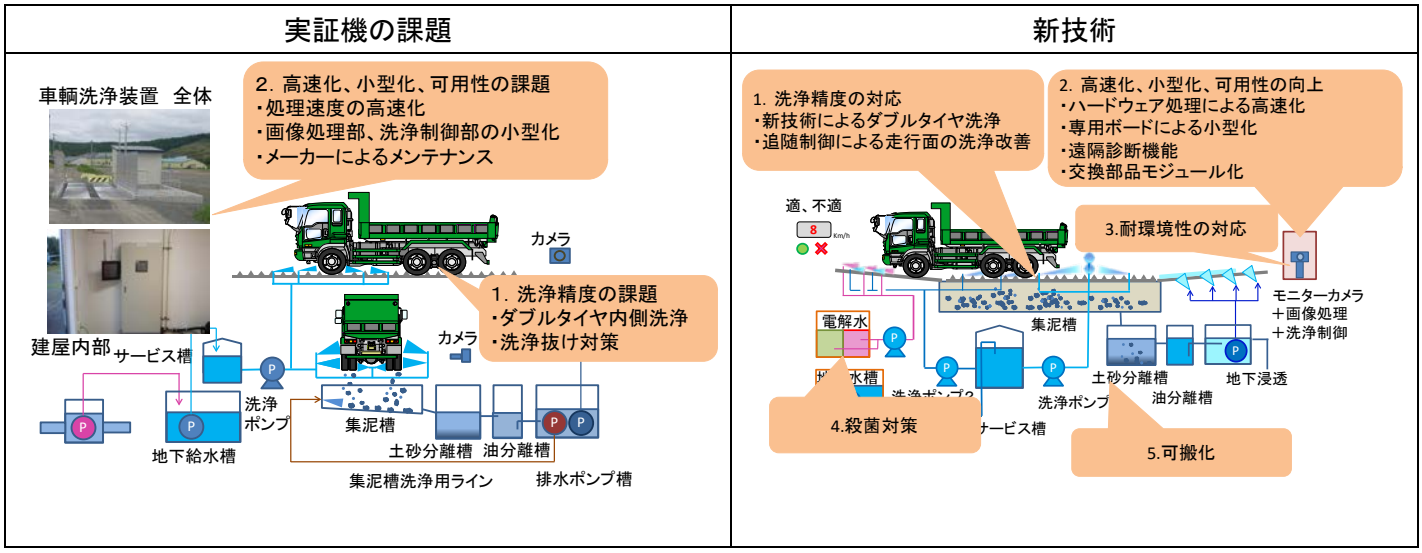
従来技術では相反関係ある洗浄スピードと洗浄確度を革新的な洗浄技術により解決し、病害虫対策に効果を発揮する真の車両洗浄装置を追求する。

１-１-３　研究目的及び目標

平成 29 年度には画像処理を応用した定置型の車両洗浄装置(実証機)を先行で試作し、実証試験を行った。実証機では土砂除去量を向上するコア技術の評価や走行状態のタイヤを画像処理で検出し、タイヤだけをピンポイントで洗浄する技術を確立した（特許 6303058 号)。

エンドユーザ―からは高い評価を得ており、製品化への確かな手ごたえを感じているが、後輪のダブルタイヤの内面や走行面全周を洗浄できていない点を指摘されており、洗浄については更なる高精度化が必要と判断した。更に実証機では洗浄技術や画像処理技術の評価工程を重視したため、可搬型に向けた小型化、高速化や可用性といった点に配慮していない。評価についても他機種との相対評価に留まっており十分ではない。実証機で露呈した問題から新技術で解決すべき課題を表 1 に整理した。

表 1　実証機の課題と新技術



【中小ものづくり高度化指針における課題とニーズ】
(八)機械制御に係る技術に関する事項
1. 機械制御に係る技術において達成すべき高度化目標
（３）川下分野横断的な共通の事項
②高度化目標
イ. 小型化・軽量化のための技術の向上
画像処理部と洗浄装置制御部の機能は、小型のプリント基板でモジュール化し小型化・軽量化することで、コスト低減を図ると共に可搬性や可用性を高める。水回りについては、物理的に分割可能な機構設計としエンドユーザが現地で組立できるような構造に配慮する。
ウ. 高速化・高精度化のための技術の向上
ハードウェアによる高速画像処理でタイヤ追従制御におけるノズル噴射切替の高速化を実現し、走行面全周において噴射圧力を維持する。また水飛沫の衝突干渉面を利用することにより従来技術では困難であった走行状態での精密洗浄を実現する。
ケ. IoT、AI等のデータ利活用の推進
不測の事態が発生した場合、遠隔診断でリアルタイムにシステムの状態を把握できるため最適な復旧方法を教示できることや修理／交換が必要な部位を早急に特定することが可能となる。交換部品をモジュール化することで現地での交換作業が容易となり可用性が向上する。

表 2　研究開発項目と目標値

研究開発項目	目標値
【1】洗浄精度の対応	
【1-1】流体解析シミュレーションと洗浄装置設計	タイヤの斜め前方からのノズル噴射を基本にシミュレーションにより、特にダブルタイヤの隙間の洗浄を想定した効果範囲、干渉面の発生から消失までの時間等を把握し、洗浄装置の設計仕様に反映する。
【1-2】タイヤ追従制御の開発	移動状態にあるタイヤの全周を均一に洗浄するため、流体解析シミュレーションで各要素をパラメトリックに検証し、タイヤの位置が噴射ノズルの洗浄効果範囲内に常に位置できるシステムを設計する。

表 2　研究開発項目と目標値（つづき）

研究開発項目	目標値
【２．小型化、高速化、可用性の向上】	
【２－１　高速化】	実証機の性能を勘案して１秒間に 20 フレーム程度の処理能力を実現し、追随制御は、通過車速 30km/h まで追随可能とする。
【２－２　小型化】	処理ボード（筐体に入れた状態）は、一人で運搬が可能な質量を想定し 10kg 以下を目標として設計を進める。処理ボードの売価は詳細設計完了後に試算するが、30 万円程度を見込んでいる。
【２－３　可用性】	自己診断機能の発動は、システム起動時、運用時（１日 3 回程度）、エンドユーザの任意のタイミングで実行できるものとし、所要時間は数秒以内とする。モジュール交換時間は、工具の使用回数を低減した機構設計とし、概ね 10 分で交換することを想定している。
【３．耐環境性】	環境試験は、公知規格として信頼性が高い JIS 規格(JIS60068)をベースに試験計画を立案し、それを満足する設計を行う。
【４．殺菌対策】	固定式では床を流す酸性電解水が流末まで効果（PH維持）が継続する水量設計を行う。
【５．可搬化】	可搬を考え４トン車１台に積載可能な構造とし、水配管等の接続にはカプラ等を用いホース接続で分割かつ組み立て容易な設計を目標とする。
【６．評価試験】	殺菌効果の検証には、タイヤ面の拭き取り分析を行い、効果を検証する。2 流体の干渉衝突現象のシミュレーションと実験により、実用機に活用できるデータを取得する。

１−２　研究体制（研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者）

初年度の研究体制を図 1 に示す。

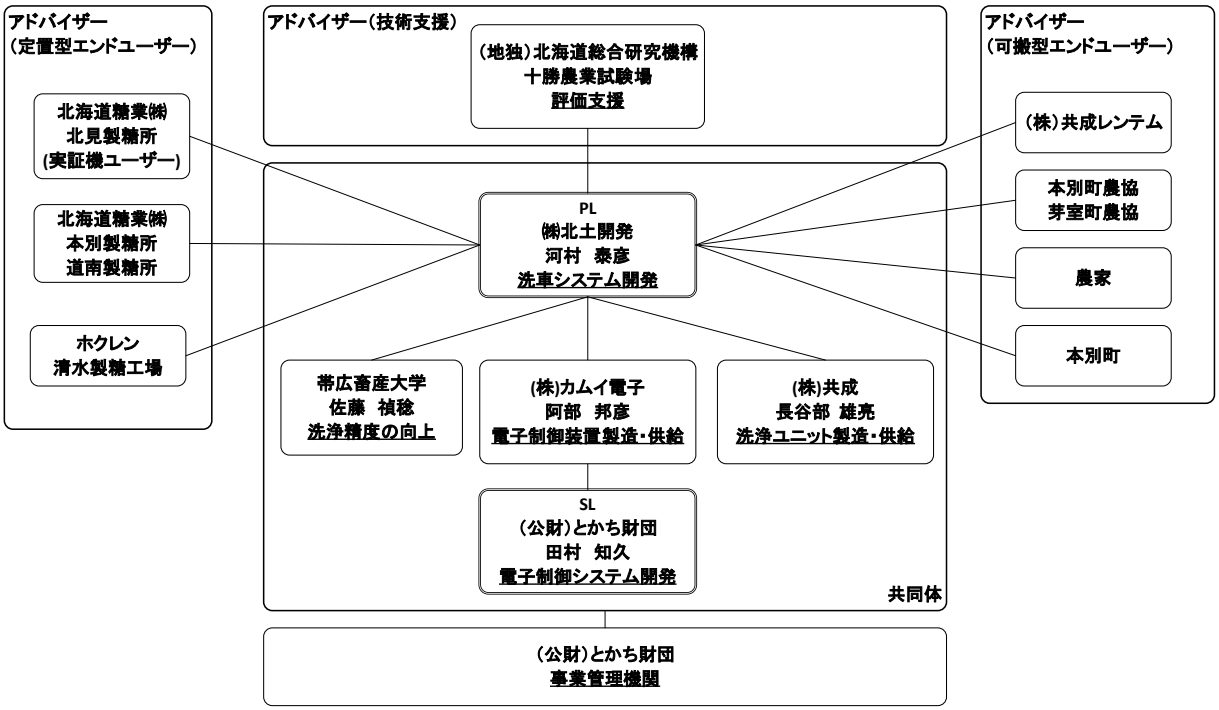


図 1　初年度　研究体制

最終年度の研究体制を図 2 に示す。前年度に加えて販路開拓支援のアドバイザーと定置型エンドユーザのアドバイザーに参画していただき、販路拡大に向けたアドバイスをいただいた。

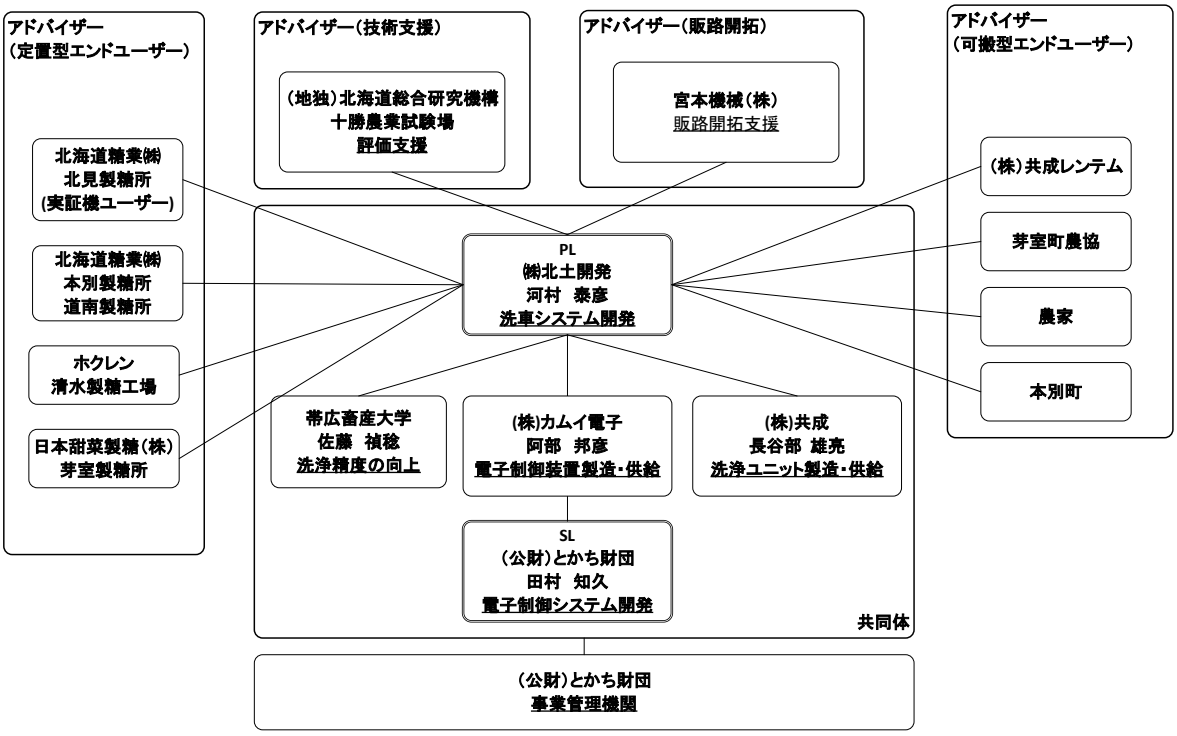


図 2　最終年度　研究体制

1-3　成果概要

提案時の目標値に対する結果を表 3 に示す。

表 3　目標値に対する結果

研究開発項目	目標値	結果
【1.】洗浄精度の対応		
【1-1】流体解析シミュレーションと 洗浄装置設計	タイヤの斜め前方からのノズル噴射を基本にシミュレーションにより、特にダブルタイヤの隙間の洗浄を想定した効果範囲、干渉面の発生から消失までの時間等を把握し、洗浄装置の設計仕様に反映する。	ノズル噴射のシミュレーションと実験により、ダブルタイヤ間の洗浄に有効な手法を開発し、実験結果に基づき試験装置に反映した。この技術は、令和 2 年 2 月 7 日に特許登録された。
【1-2】タイヤ追従制御の開発	移動状態にあるタイヤの全周を均一に洗浄するため、流体解析シミュレーションで各要素をパラメトリックに検証し、タイヤの位置が噴射ノズルの洗浄効果範囲内に常に位置できるシステムを設計する。	実測、打力測定をもとに均一洗浄のためのノズル配置、タイヤに追従可能なタイミング調整可能シーケンスを構築し、試験装置に反映した。シミュレーションは、室内実験が先行したため、それに合致した各条件設定を追求した。改良といった場面では有効となる。開発した追従制御について、上記の特許登録に含まれる。
【2．小型化、高速化、可用性の向上】		
【2－1　高速化】	実証機の性能を勘案して 1 秒間に 20 フレーム程度の処理能力を実現し、追随制御は、通過車速 30km/h まで追随可能とする。	画像処理に必要な組込み Linux カーネルをビルドし、画像処プラットホームを構築した。ローコスト化のために画像処理ライブラリは、OpenCV を使用し、ベンチマークテストを実施したがフレームレートは、概ね 2.5fps となり新たなアプローチにより高速化が必要である。追随制御は、SoC のもつ PL 部に実装することで、ノズル制御をタイミングを us オーダで制御可能である。
【2－2　小型化】	処理ボード（筐体に入れた状態）は、一人で運搬が可能な質量を想定し 10kg 以下を目標として設計を進める。処理ボードの売価は詳細設計完了後に試算するが、30 万円程度を見込んでいる。	画像処理ボードは 285mm × 260mm × 1.6mm、質量 830g となり体積比は 1/10 となるが、コストが 65 万円（MOQ10 枚）となり、更なるローコスト化が必要である。

研究開発項目	目標値	結果
【２－３　可用性】	自己診断機能の発動は、システム起動時、運用時（１日 3 回程度)、エンドユーザの任意のタイミングで実行できるものとし、所要時間は数秒以内とする。モジュール交換時間は、工具の使用回数を低減した機構設計とし、概ね 10 分で交換することを想定している。	自己診断は作業員が自らモバイルアプリで実施する方式を採用し、任意のタイミングで実施することが可能となった。故障時は、モジュール単位で交換することを想定しており想定している 10 分以内の交換が可能である。
【３．耐環境性】	環境試験は、公知規格として信頼性が高い JIS 規格(JIS60068)をベースに試験計画を立案し、それを満足する設計を行う。	JIS C 60068-2-6、JIS C 60721-3-2、JIS C 60721-3-4 を参考に可搬型の運用条件、運搬条件に適した環境試験方法を策定、及び実施し問題ないことを確認した。
【４．殺菌対策】	固定式では床を流す酸性電解水が流末まで効果（PH維持）が継続する水量設計を行う。	散布液のサンプリングにより、PH維持に必要な酸性電解水の散布1回当たりの量を確認した。
【５．可搬化】	可搬を考え４トン車１台に積載可能な構造とし、水配管等の接続にはカプラ等を用いホース接続で分割かつ組み立て容易な設計を目標とする。	20 トントレーラー1 台で可搬可能な構造の洗浄装置を設計製作し、分解、運搬、組立、装置稼働の一連の試験を実施した。運搬での積込み、荷卸しは 1 時間程度と短時間だった。
【６．評価試験】	殺菌効果の検証には、タイヤ面の拭き取り分析を行い、効果を検証する。2 流体の干渉衝突現象のシミュレーションと実験により、実用機に活用できるデータを取得する。	車両洗浄装置の通過前後のタイヤ面の拭き取りを行い、菌数の減少は確認できたが、残存菌数に対する評価基準がないため、比較対象となる別法での除菌試験を準備中である。 2 流体の干渉衝突現象を実験とシミュレーションで確認した。同様のノズル配置を実用機に導入、同じ現象が発生し、洗浄方法として有効である事を確認した。

１－４　当該研究開発の連絡窓口

(1) 法認定企業

・所属：　株式会社　北土開発 事業本部

・氏名：　技術部長　河村　泰彦

・Email：　y.kawamura@hokudo-kaihatsu.co.jp

・電話番号：　0155-62-3121

(2) 事業管理機関

・所属：　公益財団法人　とかち財団

・氏名：　研究主査　菅原　崇

・Email：　sugawara@tokachi-foundation.com

・電話番号：　0155-38-8850

第２章　本論

２-１洗浄精度の対応

２-１-１流体解析シミュレーションと洗浄装置設計

２-１-１-１流体解析シミュレーション、ノズル噴射諸元の測定と最適化

当初計画である衝突干渉面を利用した高度な水流制御による洗浄方法の技術開発については、実機で確認された物理現象を論理的に解析し制御可能な状態とするため、実機検証とシミュレーション解析を同時並行で進めた。

まず、当初使用を予定していたノズルを用いた場合の水流の挙動について、粒子法による流体解析シミュレーションを実施した。このノズルはワーラー（回転子）の入ったタイプであるが、水流量の脈動、流量分布の不均一の生じる事がシミュレーション結果から判明した（図 3 参照）。ダブルタイヤの内面を効率的に洗浄するためにはこれら２つの現象は不適当と判断し、代替ノズルを選定した。

2 つの代替ノズルを使用した衝突干渉面の生成の実機検証については、帯広畜産大学、佐藤禎稔教授の研究室が所有するノズル試験装置を使用して実施した（図 4 参照）。

代替ノズルを使用したシミュレーション解析についても並行して実施したが、実機確認結果との相違が見られたため、シミュレーションモデルやパラメータ設定の見直しを実施した。シミュレーションモデルの完成後、衝突干渉面生成の最適化について検討を行った。

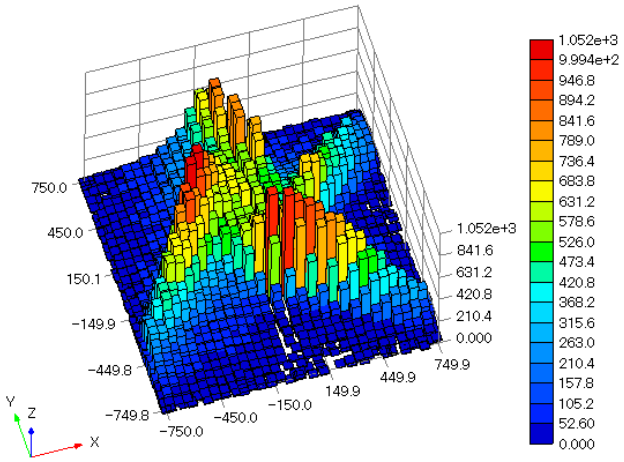


図 3　ワーラー入りノズルのシミュレーション例

図 4　衝突干渉面生成の実機検証

２-１-１-２洗浄装置設計、洗浄装置の試作

車両洗浄装置の設計概要を図 5 に示す。主な設計方針は次のとおりとした。

■　前段洗浄、噴射水洗浄、後段洗浄の 3 部構成とする。

■　前段洗浄部では、処理水を再循環して路面を濡らし、土砂を落ちやすくする。

■　噴射水洗浄部においては、タイヤ走行面を洗浄するために、ノズル設置高さを低くする。また、アングル桁によりタイヤに上下振動を与え、水、土砂切りを行うとともに、走行速度を抑制する。

■　後段洗浄部では、路面を電解水で洗い流し、タイヤ走行面を除菌するとともに土砂の引きずりを抑制する。

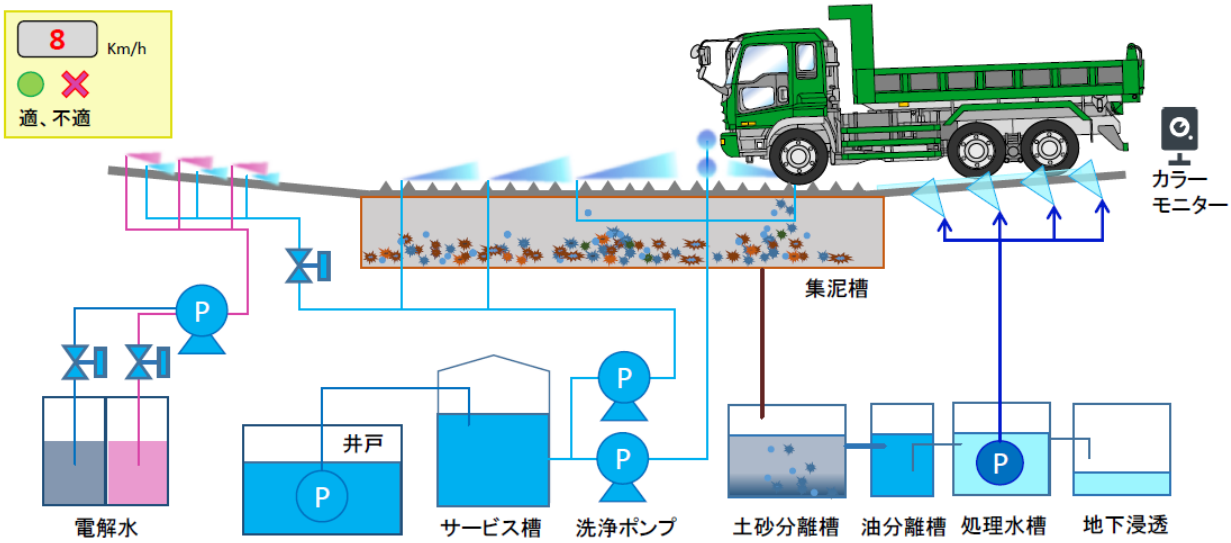


図 5　車両洗浄装置の設計概要

上記設計方針に基づき試作した車両洗浄装置の外観を　図 6、図 7 に示す。

図 6　　車両洗浄装置の外観（車両出口側から撮影）

図 7　車両洗浄装置の外観（上空より撮影）

試作機は平成 30 年 11 月に製作を完了した。その後、実機検証試験に供し、洗浄タイミング、可変ノズルの角度、洗浄タイミング、洗浄動作について、撮影したビデオ画像を参考に検証作業を進めた。検証作業の結果、ダンプの３軸目のタイヤ洗浄が部分的に不足する事が判明したため、後方からの洗浄強化を行う事とし、ノズル追加による改良を行った。また、タイヤ後部に取り付けられている泥よけによる洗浄阻害が確認されたため、ノズルの噴射範囲の狭いフラットのノズルの採用を検討し最終年度に評価を行った。

試験時には洗浄水の圧力、流量を 0.1 秒での精度で記録可能なポータブルレコーダで各部のデータ測定を行い、取得されたデータからも動作検証を行った。その結果、図 8 に示すようにポンプ圧力と流量発生との間にタイムラグが発生する事が判明したため、洗車装置の制御装置にタイミング補正機能の追加実装を行い対応した。

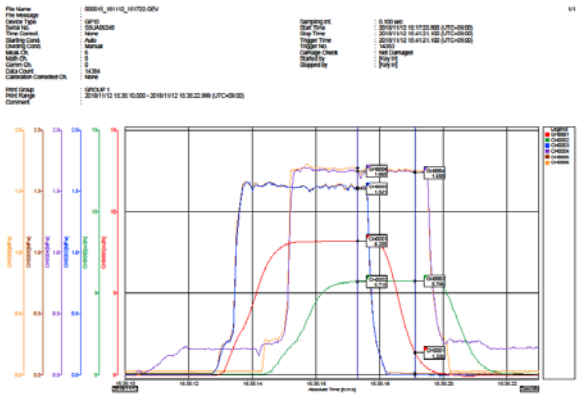


図 8　測定データ例（ポンプ圧力及び流量）

２-１-２タイヤ追従制御の開発

ビデオを使い、スロー再生により、洗浄状況の目視にて土砂除去の解析を行った。その結果、現状の配管配置であるとダブルタイヤの 2 軸目に比較して、3 軸目の洗浄が十分でない事実が判明した。3 軸目の洗浄能力を上げるために、後方からの洗浄強化を行う必要が有ると判断、配管配置、電磁弁配置の変更を行った。これらより洗浄状態は良好となった。結果的にはノズル配置は前後方向で対称配置となったため、双方向通過が可能な車両洗浄装置が作れるといった発展性を有する事となった。

数十台のダンプの泥よけの高さとタイヤとの距離を調査し、泥よけに阻害されないパターンのノズル選定を行った。１つにはフラットノズルを選定したが、さらに打力のある多孔ノズルを使っての比較試験を行った。多孔ノズルは噴射角度が目的とする角度より狭角であるため、現状のノズル数の 2 倍数が必要となるため、特注ノズルについてメーカーと交渉中である。

距離と打力の関係を知る事は、装置設計上（ノズル間隔等）重要であるが、ノズルの種類は膨大であるため、打力についての絶対値がわかる資料は無い。よって、帯広畜産大学佐藤教授の研究室では、その打力の絶対値を測定出来る装置を製作、ノズルの距離と打力の関係について分布測定を行った。また、パーティクルワークスによる粒子法によるシミュレーションを行い、水粒子の分布、挙動を把握した。

1 対のノズル噴射水の交叉した打力についても測定、またシミュレーションより粒子分布の再現しており、これらよりダブルタイヤ間が有効に洗浄できている根拠となる貴重なデータが確保できた。

タイヤの土砂除去は、使用される噴射水の打力、噴射時間、水量などが関係しており簡単ではないが、打力の絶対値が明らかになった事、1 対のノズル噴射水の粒子分布及び打力分布等が明らかとなった事により、今後の装置改良、ノズル選定やノズル配置を検討する上で有効なデータとなる。

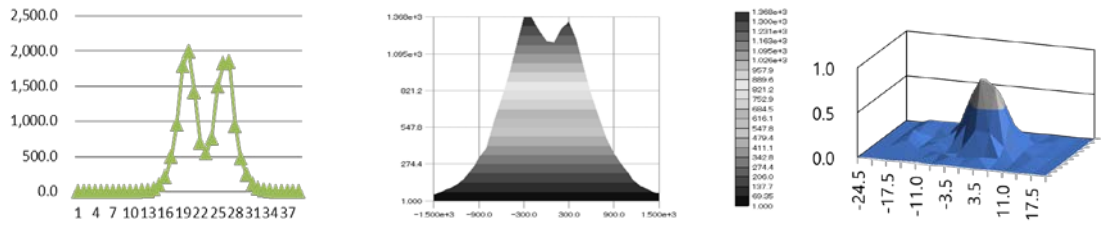


図 9　1 対のノズル噴射水が交叉するデータ例（左；吐出量分布、中央；粒子分布、右；打力分布）

可搬型では、汎用性も考慮し、側面ノズルの大型車、中小型車の区別による制御を組み込んでいる。また定置型、可搬型とも、画像処理で検出の難しい黒いホイールに対処するために動態検知機能を開発して、新たにシステムに組み込んでいる。

制御シーケンスはあらゆるパターンでのテストが可能となる仕様とするとともに、その試験に於いては、ビデオの撮影、そして圧力、流量を 0.1 秒での精度で記録可能なデジタル記録計を使い、PC でデータ解析を行っている。

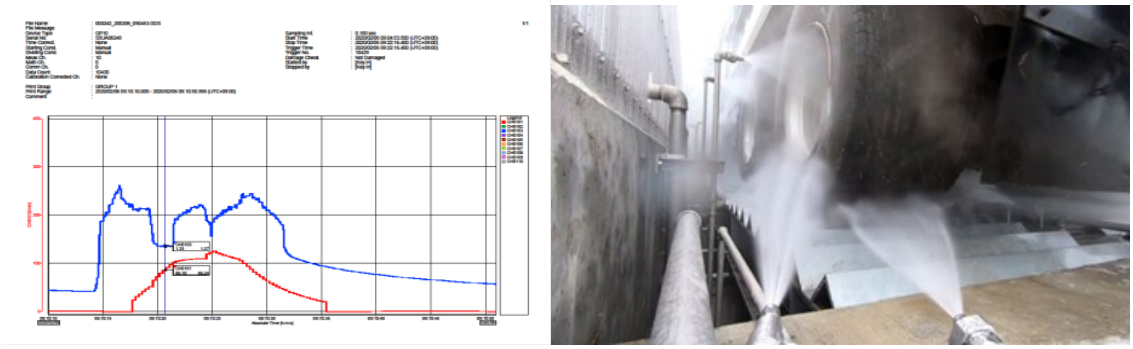


図 10　可搬型の圧力、流量データ例（左図）　７孔ノズルとフラットノズルの噴射状況（右図）

２-２高速化、小型化、可用性

２-２-１高速化

初年度は、ホイルを認識できなかった場合の冗長性について検討した。画像処理アルゴリズムは、特許6303058 号がベースなっており、輝度差がでないスチールホイルの検出が困難である。検出不能な状況化での冗長性については、動体検知技術を導入して解決した。タイヤを検知できない場合、動体を検知した時点で電磁弁を駆動し、未洗浄となる最悪のケースを回避する。動的検知技術を実現するアルゴリズムは、代表的なフレーム差分法を採用した。フレーム差分法は、あるフレームと一つ前のフレームの差分をとることで、移動体を検出できる手法である。

図 11 時刻 t のフレーム、時刻 t-1（一つ前の）フレーム（中心の写真）、差分フレーム（右の写真）

図 12　差分フレームの２値化

ノズルの追随制御については、初年度はハードウェアのプラットホームがないことから市販の評価ボード使用した。画像処理システムは既存の PC ベースでホイルを検知し、RS485 で車速情報を通知しその情報を基にノズルを駆動しタイミングを検証できるブロックデザインや Proramable Logic 部（以下、PL 部）への実装を Xlinx Vivado 、及び Xilinx SDK で構築した。

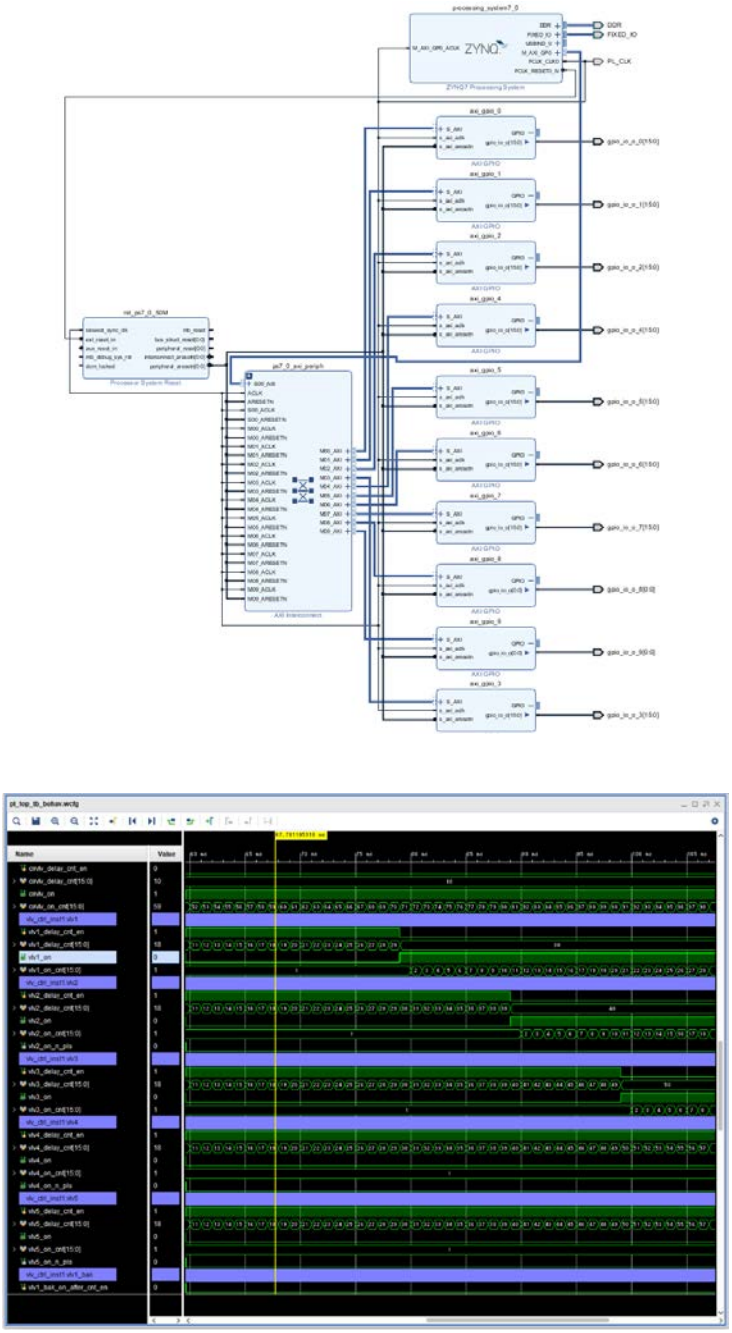


図 13　Vivado Desing Suite での設計
（ブロックデザイン（左）、電磁弁のタイミング検証（右））

最終年度は高速化に向けてハードウェアプラットホームの調査から着手した。高速かつ柔軟に画像処理を行い洗浄装置とインタフェースをとるためには System on Chip(SoC)が適切と判断したが、ハードウェアを設計／製造するにはコストと時間が必要であることから、画像処理部には汎用品として販売されている東京エレクトロンディバイス社の SoC 搭載ボード TB-7Z-IAE を採用した。TB-7Z-IAE は、ユーザーサイドでマザーボードを用意する必要がある。洗浄制御部は機能の性質上、汎用性が低いため２-２-２に示す通り内製化する必要がありこれをマザーボードと兼用とすることでコストを軽減する方針とした。

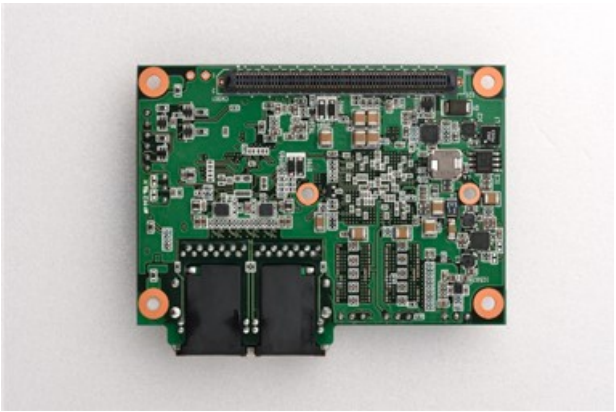
TB-7Z-IAE は、SoC に Xilinx 社の Zynq-7000 XC7Z020-1CLG400I を採用している。Processing System 部（以下 PS 部）には、前述したブロックデザインのハードウェア情報を基に、Petalinux ツールを利用し

て画像処理に適した組込み用 Linux カーネル（4.19.0-xilinx-v2019.1）を構築した。画像処理ライブラリについてもローコスト化のために商用ライブラリは採用せず、OpenCV でアルゴリムを設計している。

画像処理のアルゴリズムは、特許 6303058 をベースしたホイール検出手法を検討している。このアルゴリズムは商用画像処理ツールで開発されており、OpenCV のライブラリでは完全に再現することは難しいため、一部のアルゴリズムを変更して実装し、各処理のベンチマークを行った。OpenCV で実装したアルゴリズムについては図 15～図 20 に示す。詳細は割愛するが昼夜の光量変化は動的閾地法で吸収し、モフォルジー処理のパラメータを調整することで汚れ、雨、雪の影響に対して堅牢化するアプローチとした。

ベンチマークの結果については、表 5 に示すが、当初の目標であった 50ms(20fps)の性能を大幅に下回る結果となっている。これについては、各処理の画像処理手法を見直すと共に、現在使用しているクロスコンパイラ環境（表 4）を調査し最適化を検討するが、1 フレームの 50ms の処理時間の達成は難しいと考えている。

Xilinx 社 SoC は、PS 部で実現している画像処理機能を PL 部に実装することでハードウェアベースのアクセラレーションが可能である。PL 部への実装は、ハードウェア記述言語による実装方法もあるがピクセルベースの画像処理は煩雑なため、Xilinx 社が近年提唱している Software Defined System on Chip(以下、SDSoC)も視野に検討していく予定である。SDSoC では、C/C++のソースコード上でハードウェアアクセラレーションしたい関数を指定して実装する方法で、ハードウェアアクセラレーション用の OpenCV（xfOpenCV）が提供されているため、トップダウンで設計を行うことができる。ただし、いずれの場合も、設計コストが増加する可能性があるため共同体の中で協議して進める。精密なノズル制御部は、PL 部に実装し試験装置を用いて追随性能を us オーダで制御可能であることを確認した。



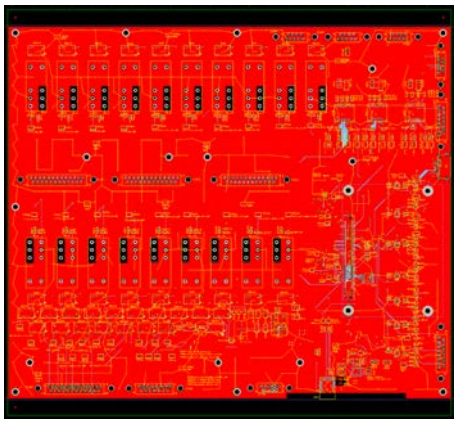


図 14　画像処理ボード　TB-7Z-IAE（左図）
画像処理ボード　インタフェース部パターン設計（右図）

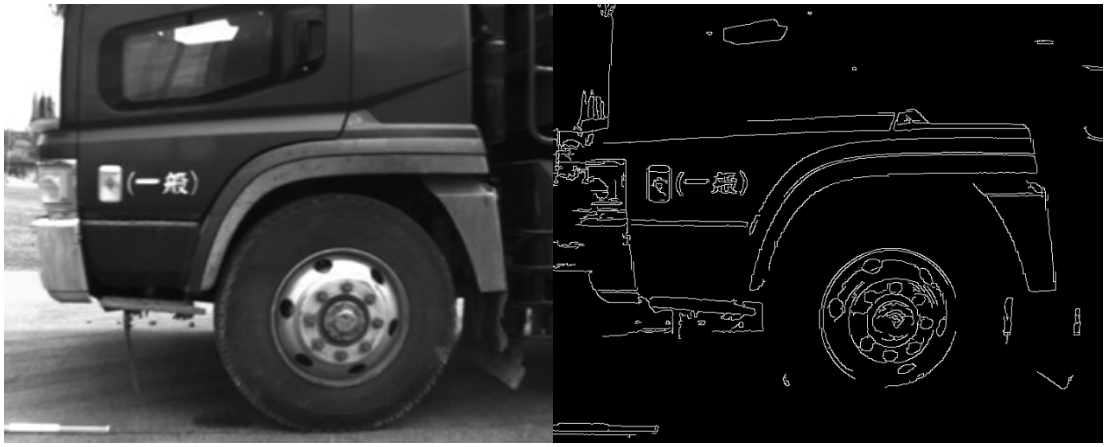


図 15　画像処理アルゴリズム（左図：入力フレーム、右図：エッジ検出 Canny）

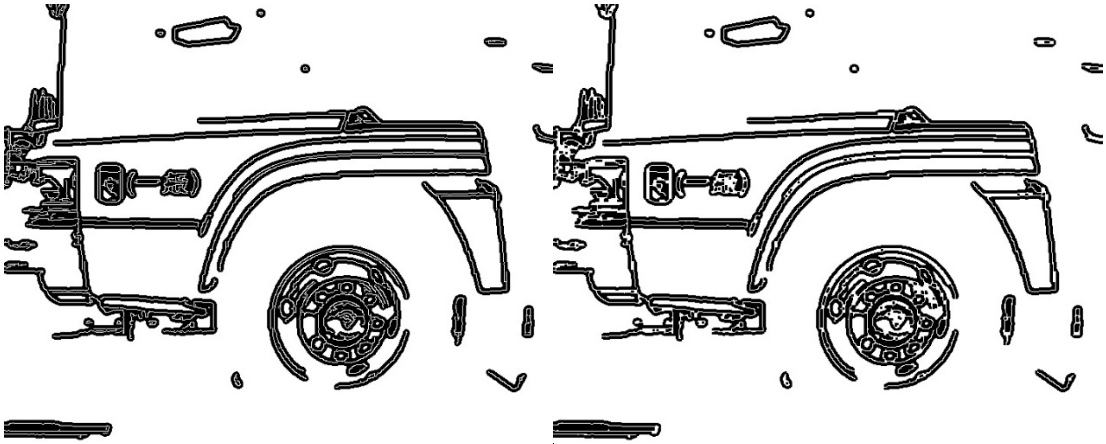


図 16　画像処理アルゴリズム（左図：動的閾地法、右図：Closing 処理）

図 17　画像処理アルゴリズム（左図：Opening 処理、右図：反転処理）

図 18　画像処理アルゴリズム（左図：ラベリング、右図：輪郭検出処理）

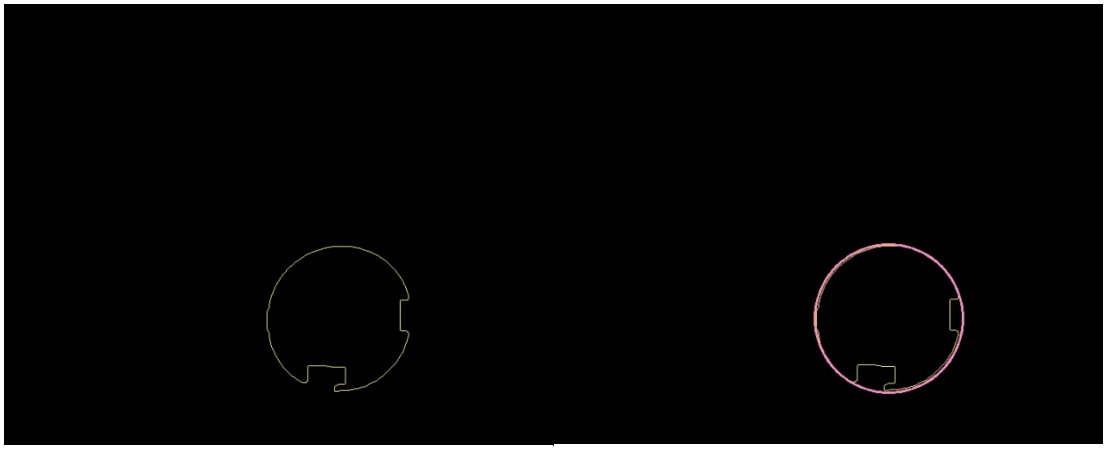


図 19　画像処理アルゴリズム（左図：形状特徴分析（面積、真円度）、右図：外接円近似）

図 20　画像処理アルゴリズム（ホイール検出結果）

表 4　コンパイル環境

項目	名称
開発環境	Ubuntu 16.04 LTS
compiler	arm-linux-gnueabihf-g++ (arm-linux-gnueabihf-g++-5)
include path	/usr/local/include (画像処理ボード)
include files	c++/8.2.0/iostream
	c++/8.2.0/vector
	opencv2/opencv.hpp
	opencv2/imgcodecs.hpp
	opencv2/imgproc.hpp
options	-mcpu=cortex-a9
	-mfpu=neon
	-ftree-vetrorize
	-ffast-math
	-O3
	-Wall
linker	arm-linux-gnueabihf-g++ (arm-linux-gnueabihf-g++-5)
linker path	/usr/lib (画像処理ボード)
shared object	Libz
	Libtbb
	libopencv_imgproc
	libopencv_core
	libopencv_imgcodecs
	Libtiff
	Libpng
	Libwebp
	libpng16
	Libjepg
	Libzma

表 5　処理時間

処理項目	実処理時間
エッジ検出	65ms
動的閾地法	82ms
Closing 処理	38ms
Opening 処理	210ms
反転処理	2ms
ラベリング処理	22ms
輪郭検出処理	7ms
合計	426ms

２-２-２小型化

初年度は、洗浄制御部の基板化に向けて試作を実施した。実証機の洗浄制御部は、精密水流制御の実証試験を初年度から開始するために従来技術であるＰＣとシーケンサで構成したが、最終年度に年度はこれをボードに換装して性能を検証する計画とした。図 21 に実験機の洗浄制御部の内部を示す。

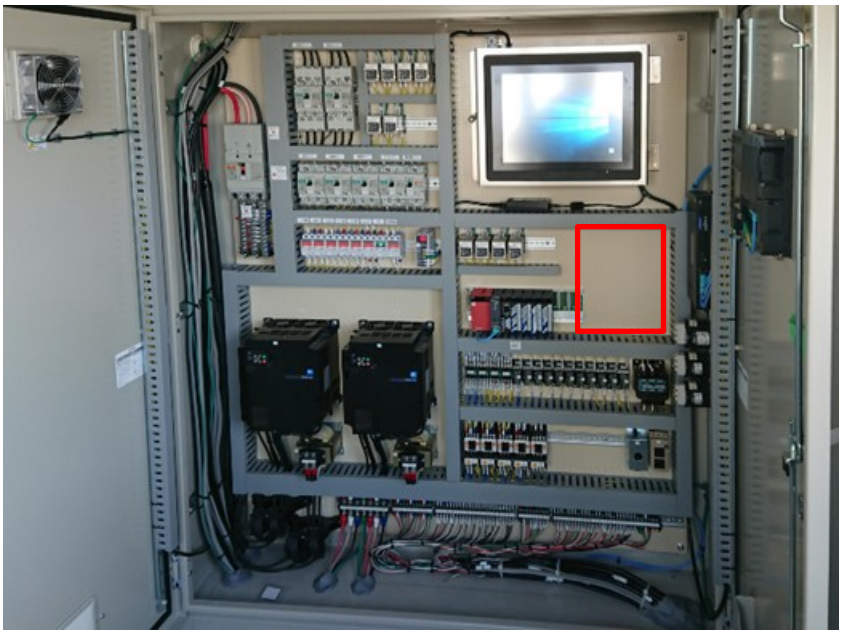


図 21　実験機の洗浄制御部

（赤枠部にボード設置）

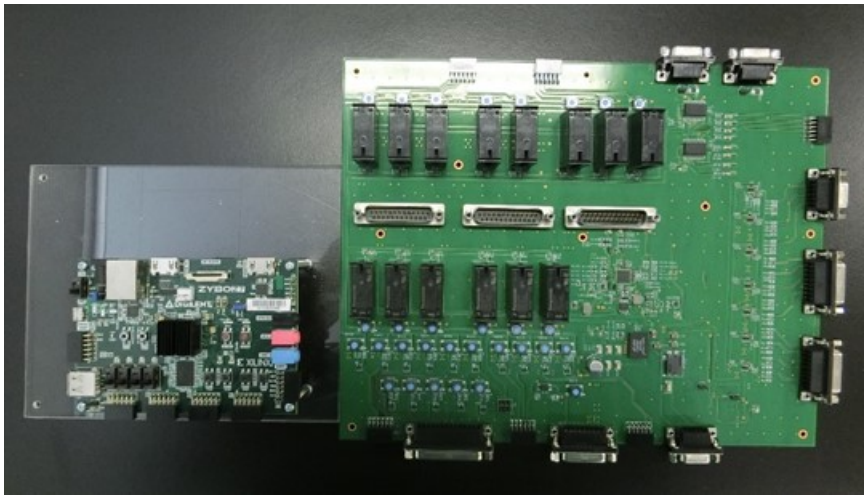


図 22　画像処理ボード（左）とインタフェースボード（右）

ボード開発は図 22 に示す通り画像処理部と洗浄制御部の 2 枚構成とした。画像処理部は設計難易度が非常に高く、初年度の設計だけではモノづくりのフェーズに至らないため、Digilent 社の評価ボードを購入し仮のシステムで機能を充足した。

洗浄制御部は、とかち財団で電気設計を行い、カムイ電子で部品実装を実施した。カムイ電子は、量産化の際の製造を担うため、製品検査や不具合戻入時の故障診断の負荷を低減するために、図 23 に示す試験装置も製作した。

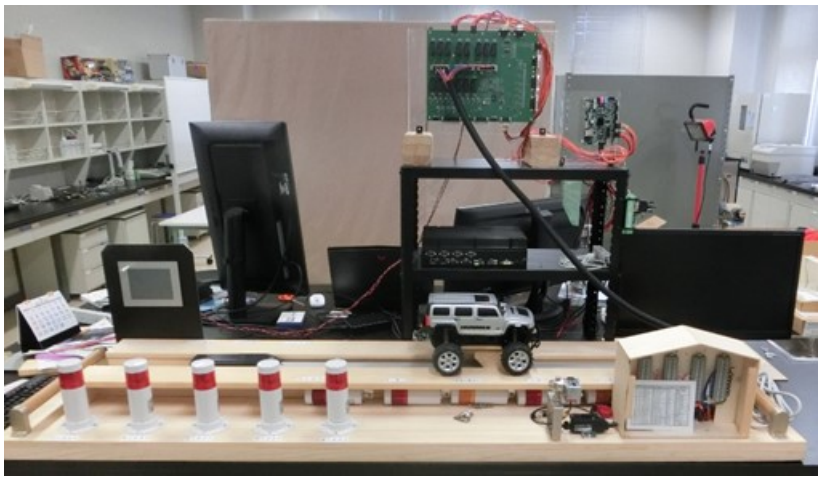


図 23　試験装置

最終年度は、PC ベースの画像処理や PLC による電子制御を 1 枚の処理ボードに集約するための画像処理ボードを試作した。前項で記述した通り、この基板は TB-7Z-IAE をドータボードとして搭載することが可能な仕様で、画像処理した信号から追随制御などの洗浄制御を行うことが可能である。機械的諸元は、洗浄装置のインタフェース部は、サイズ　285mm×260mm×1.6mm、質量 785g で画像処理部（TB-7Z-IAE）がサイズ　85mm×60mm×1.8mm、質量 45ｇであった。制御盤で実装するよりも体積比を 1／10 になる上、質量が 830ｇとコンパクトであるが、コストの面ではまだ課題が残されておりローコスト化に向けた検討を進めている。洗浄装置へのインタフェースは、初年度に導入された実証機のインタフェースと互換性があり、

制御盤の小型化に向けた性能調査も行っている。

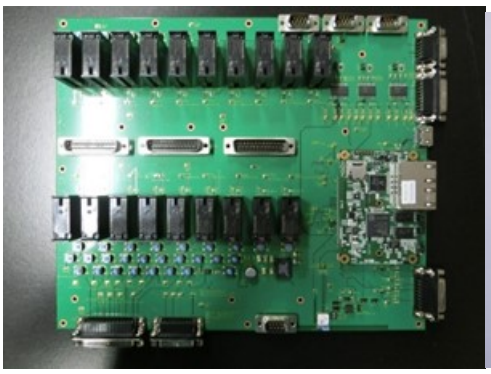


図 24　画像処理ボード（左図）　制御盤への実装（右図）

２-２-３可用性

可搬型は、口蹄疫や鳥インフルエンザなどの家畜伝染病やコムギナマグサ黒穂病等、幅広い農産物の病害虫対策に使用することで販路が拡大する戦略となっているため、全国の各地での利用が期待されている。遠隔地でのメンテンナス作業を省力化するために､洗浄装置として遠隔診断機能を本事業で検討を進めてきた。アドバイザーや顧客からの意見を基に、可搬型洗浄装置自体に通信機能を持たせることは、通信費用の面でエンドユーザーから理解が得られないという結論に至った。遠隔診断の基本的なスタイルは現地の作業員のスマートフォンに専用アプリをインストールし、その場で自己診断の実施と診断結果を送信する形をとっている。前述した基板には、Bluetooth 通信モジュールである Rigado 社の BMD－300 を搭載し、ボードから診断情報を抽出するためのモバイルアプリを開発し評価した。今回開発したアプリは、原理試作である使用感等についてはエンドユーザーからの意見を反映して改良を進めていく予定である。

図 25　遠隔診断用アプリ

２-３耐環境性

可搬型は、20 トンのトレーラー1 台、または 4 トンのユニック車 2 台で搬送可能なものを想定している。環境試験として想定されるのは、輸送振動への耐久性及び、温度試験を行っている。振動試験については、共同体でカムイ電子が保有する EMIC 社　S085-AW/LA で実施した。測定項目については、JIS C 60068-2-6 等を参考に加振前の測定、及び X、Y、X の各軸について加速度を変更しながら正弦波で周波数を掃引しながら試験を行った。また、温度試験については JIS C 60721-3-2、JIS C 60721-3-4 等を参考にして、温度試験の条件を実施している。各試験後の結果、装置に異常は見られなかった。

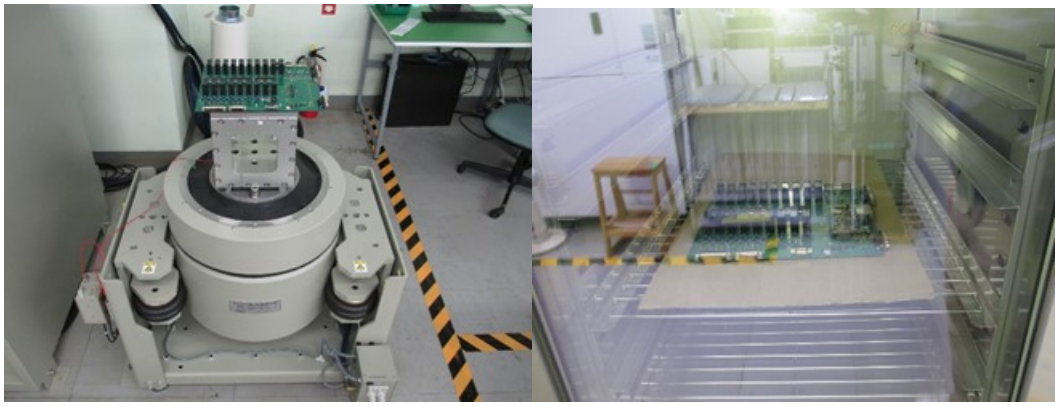


図 26　振動試験（左図）　温度試験（右図）

２-４殺菌対策

電解水生成装置で生成した電解水を車両通過直前に出口床面（長さ 3m）にノズル散布した。生物活性が停止するといわれる PH4～4.5 以下が散布により変化しないかを調べるために散布後の水を採取し PH を測定した。その結果、酸性電解水とアルカリ電解水を交互に配管に通すと、床面の PH が目的に PH にならない事が判明した。このため,アルカリ電解水は中和のみの使用として廃棄、配管内は酸性電解水単独とした。その結果、床面の PH を安定的に 4 以下に保つ事が可能となり、その必要水量は、概ね数リットルである事がわかった。電解水生成装置の生成能力から 1 日 50 台以下の通過数であれば、1 回当たりの通過に対して 5 リットル散布しても、生成能力に不足を来たさなかった事から、これを標準として菌数の測定を行った。

尚、電解水の散布、車両の通過後には、コンクリート床の保護、汚れの除去の必要性から、車両通過毎に清水で自動洗浄している。

図 27　タイヤ走行面の拭き取り（左図）　真菌の培養結果（通過前後）（右図）

通過前後のタイヤの拭き取りによる菌数の測定を行ったが、1/5～1/10 に減少は見られるものの残存する菌の絶対値は小さくは無かった。現状では、効果の有無を判定する基準或いは比較対象となるものがないが、手法としては、この方法が正解と考えている。

比較対象の方法として、供給水を殺菌剤に変えて除菌する方法が考えている。水道水にも使われている安全性の高い塩素系の資材を使った方法で除菌テストを行う準備を進め、塩素資材の投入量と残留塩素の関係はすでに測定済みである。これにより、電解水を使用する事との除菌効果の比較ができるとともに、可搬型の除菌装置としての発展が期待される。

２-５可搬化

可搬型装置については、20 トンのトレーラー1 台、または 4 トンのユニック車 2 台で搬送可能なものを設計製作し、実際に搬送を行いその有効性を確認した。これについては、構造的な特許出願を予定しているため、概要のみの報告とする。製作した装置は、積み込み、積み卸しにかかる時間は概ね 1 時間から 1 時間半であり、セッティング含めても半日で十分可能である。タイヤの通過する架台ユニットを可搬可能なブロックに分割できるよう設計した。架台ユニットに設置されるノズル配管とポンプ・モーターユニットとの接続はカプラ接続である。

図 28　テスト終了後の搬出状況（左図）　　テスト前の搬出状況（右図）

可搬型の動力ユニットは、2 種類、製作した。1 号機のポンプ・モーターユニットは、ポンプ・モーター、制御盤、水タンクで構成され、架台の大きさは、2 トンユニック車に積み込み出来る大きさ（1.7m×3.5m）に収め、設置のための車輪付きである。概ねコンパクトに出来ているが、評価試験用の流量計、圧力計等の計測器を取りつけているため全長が長くなっており、これらを取り除くとさらに１mほどコンパクトに出来る余地が残っている。

図 29　テスト風景（左図）

２号機のポンプユニットは、トラクター兼引用として製作した。牽引用タイヤが張り出しているが、4 トンのユニック車に積み込み出来る幅（2.5m×3.15m）に収めた。1 号機はモーターがあるため、電源供給は基本 200V であるが、制御盤内でトランスにて制御用の 100V を確保している。２号機はモーターが不要のため、電源としては制御用の 100V のみであり、トラクターからの電源供給を受ける構成とした。よって、外部電源の無い所でも運用可能である。尚、可搬型装置のポンプは、小型軽量化の観点から、定置型と異なる形式のピストンポンプを 1 台使い、アキュムレータを組み合わせた新方式にチャレンジしている。

２-６評価試験

洗浄能力の評価は、ビデオ撮影により、タイヤに残った土砂を観察する事により行った。洗浄パターンの異なるノズルを使っての洗浄力の差異を評価しようとし、泥よけを避けるためのフラットノズル、距離による打力低下の少ない多孔ノズル（直線ノズル）に変更しての試験を行った。出入口を 150mに渡り舗装とした事で、洗浄装置出口以降の路面の汚れ具合からもその効果が判断できると考えたが、いずれのノズルに於いても出口以降を目立って汚すほどの除去量低下は見られなかった。除菌の評価方法については、【5】殺菌対策に記載。

1 対のノズル噴射による干渉現象を使ったダブルタイヤの隙間の洗浄については、車両洗浄装置に通過前後の写真及び目視でその効果を確認した。その詳細は研究論文としてまとめ、農業食料工学会　北海道支部会報　第 60 号(令和 2 年 3 月発行)に掲載している。

図 30 ダブルタイヤ隙間の洗浄状態（左；通過前、右；通過後）

第３章　全体総括

３-１研究開発成果・研究開発後の課題

初年度の衝突干渉面を利用した高度な水流制御による洗浄方法の技術開発は、実機検証とシミュレーション解析を同時並行で検証した。粒子法による流体解析シミュレーションを実施し、衝突干渉面を利用した洗浄に必要なノズルの諸元を精査した上で、洗浄能力を検証するための実証機の設計及び試作を行った。完成した実証機では、洗浄タイミング、可変ノズルの角度、洗浄タイミング、洗浄動作などの有用な実験データを収集し、シミュレーションにフィードバックすることで洗浄精度の高度化を実現している。画像処理部については、ホイルを検出できなかった場合の冗長処理として動体検出機能を追加し、その動作確認をしている。電装系の小型化は、実証機のインタフェース踏襲する形で、洗浄制御部の基板を試作し追随制御時に必要となるノズルのタイミング制御を検証することができた。

最終年度については、定置型の実証試験で得られた知見を基に潜在ニーズを高い可搬型の試作の開発に着手した。可搬型は、２種類製作しており電気的には１号機はモーターを搭載して外部から電源供給するタイプで、もう１種類はアドバイザーから要望があったトラクタから電源を供給するタイプである。トラクタタイプは、電源の供給がないところでも運用が可能で、突発的に発生する家畜伝染病、及び病害虫などに迅速に対応できる仕様となっている。架台ユニットは、ユニックで搬送可能な構造部材で構成されており、積込みから組立まで半日程度と実用性が高い。このような可搬性の高い洗浄装置を供することは、幅広い用途へ防疫を可能し北海道はもとより日本全国の農畜産業の発展に資すると考えている。画像処理部と洗浄制御部は、基板化することで大幅な小型化が見込めることがわかったがターゲットコストを満足できておらず、製品化に際してはローコスト化の課題が残されている。これについては、外部の協力を得て解決していく予定である。

３-２事業化展開

定置型についての販売先は、まずは道内８か所の製糖会社と道内 108 箇所の農協と考えている。具体的には、シロシストセンチュウ対策としての新規の需要、さらには既設装置の置換え需要などを取り込む計画としている。すでに砂糖製造業者が計画している土場増設時での設置、またシストセンチュウ対策としての設置等の打診がある。昨年の８月には、新たな地域でのシロシストセンチュウの発生拡散があり車両洗浄装置にニーズは高まっているが、その洗車性能についての意識は希薄である。また、出展した展示会に於いて、石炭ヤードの汚れ防止、産業廃棄物処分場の出入口での運搬車両の洗浄、塩カル除去といった新たなニーズがある事が判明している。これら分野への参入も検討していきたい。

定置型については、令和２年４月より販売開始となるが、弊社の洗浄システムの認知度は十分であるとは言えない。農業関係の展示会への出展が十分出来ているわけではないため、特に病害虫関連を指導する立場の農業関係者の認知は少ないと思われる。当面、１ 号試験機を定置型のデモンストレーション装置の位置づけで、ニーズのある地域に持ち込み、農業関係者への宣伝活動とユーザーの意向調査を進めたい。また、販売開始に合わせてホームページの新規作成、洗浄装置用パンフレットの作成を進めている。

可搬型洗浄装置の製品化については、多くのアドバイザーから、早期完成を強く要望されているところであり、また、家畜伝染病対策として全国の地方自治体への導入も期待されている。１ 号試験機は、試験装置としての計測器が配置されている事もあり製品としての完成形ではない。さらに小型化とコスト削減が可能な要素が残っているので、それらを解決して製品化を進めたい。この装置は、高度な電子機器となっている部分もあり、弊社単独では全国展開した場合のメンテナンス体制が難しいと考えており、販売及びメンテナンスを共に進めて頂けるビジネスパートナーの確保が重要な課題である。

以　上