

キャビテーション噴流技術を用いた 高速清掃装置の開発と応用

時 枝 寛 之

現在の高速道路におけるトンネル照明灯具の清掃は回転ブラシを用いて行われており、清掃速度が遅く(1~2 km/h)車線規制を必要とする。車線規制は渋滞や事故の要因となり、サービスレベル低下になるので、車線規制削減が求められている。

本件はキャビテーション噴流という非常に清掃効果の高い気泡を用いて清掃速度 50 km/h (高速道路の最低走行速度) を実現し、車線規制を必要としない高速清掃装置を開発した。

キーワード：キャビテーション, 道路, 清掃, ウォータージェット, 削減, 高速, 車線規制

1. はじめに

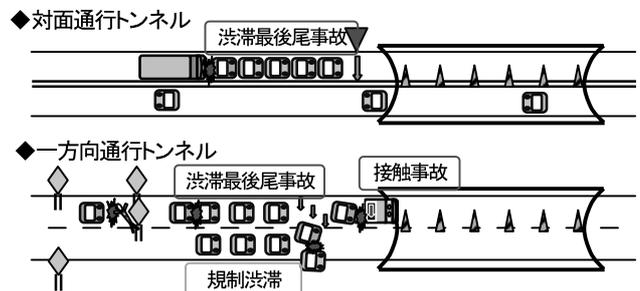
トンネル内には安全で快適な走行を目的として照明設備が設置されており、これらの照明器具は排ガスや路面の粉塵及び雪氷作業による凍結防止剤の付着により明るさが低下していくため、定期的な清掃が必要である。



図一 1 トンネル照明器具の清掃状況

現在トンネル照明器具の清掃は、回転ブラシで擦るようになっており(図一1)、灯具のガラス面とブラシ位置を正確に合わせながら進む必要があるため、清掃速度が1~2 km/hと非常に遅い。このため渋滞や事故の要因ともなる交通規制が必要であり、サービスレベルの低下が懸念されている(図一2)。

本開発は非常に清掃効果の高い気泡を含んだキャビテーション噴流技術を用いてトンネル照明器具の高速清掃に



図一 2 車線規制に伴う事故や渋滞

活用し、高速道路の最低走行速度である 50 km/h での高速清掃を実現し、事故や渋滞等のお客様サービスの低下原因となる車線規制を削減することが目的である。

本開発は平成 16 年度から始め、トンネル照明器具高速清掃装置は平成 19 年度に実用装置として完成した。その開発の状況を報告する。

2. 基礎検討

(1) トンネル照明器具清掃の過去の検討

回転ブラシによるトンネル照明器具清掃の清掃速度の遅さ、非効率さは従前から問題となっており、過去にも様々な検討がなされてきた(表一1)。

トンネル照明器具に付着する汚れは、排気ガスに含まれる油脂分や凍結防止剤が照明の熱(130℃程度)により固着しており、単なる高圧洗浄や洗剤溶液をかける程度ではきれいに落すことができない。また洗浄汚水の処理が必要な手法や、隣の車線には一般車両が通行しているので、周囲へ洗浄物が飛散するような手法も実用では使えない。それぞれの清掃方法にそれぞ

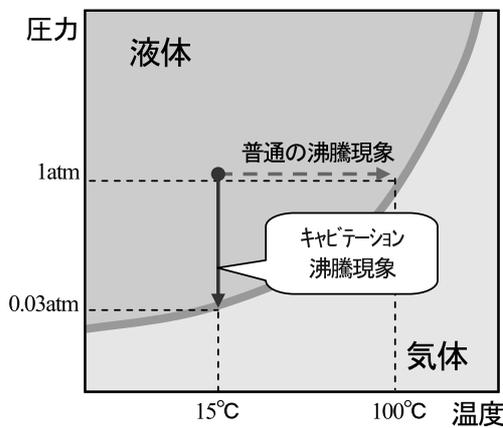
表一 過去の検討状況のまとめ

評価項目	高压水噴射	水溶洗剤噴射	ドライアイスプラスト	重曹噴射(ソフトプラスト)	スチーム噴射
①高速清掃が可能	△	×	×	×	×
②清掃効果が高い	×	△	○	○	△
③照明器具等を損傷しない	○	○	×	×	△
④一般車へ影響がない(飛散)	×	×	○	×	○
⑤汚水廃棄物処理施設が不要	○	×	○	○	○
高速清掃実用化	×	×	×	×	×

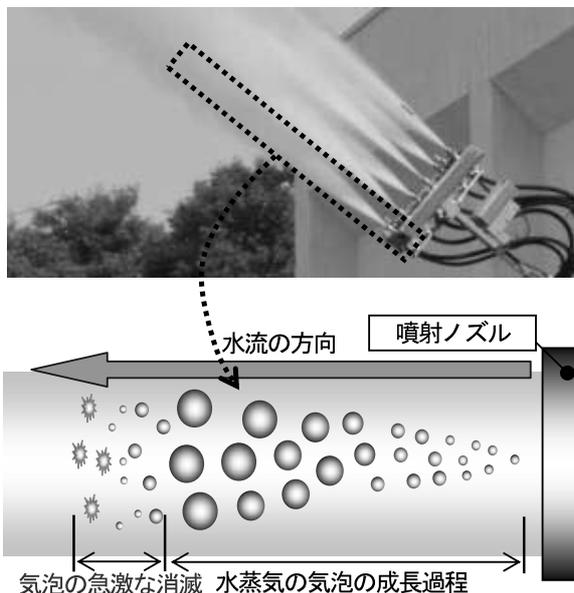
これらの課題や問題があり、現在まで清掃速度の高速化はできなかった。

(2) キャビテーション噴流技術について

水やお湯は流れ中での圧力が飽和蒸気圧より低くなったときに、液体が蒸発したり溶存気体の遊離で気体が生じたりして気泡が生じる(図一3)。



図一3 キャビテーションと飽和蒸気圧



図一4 キャビテーションの気泡の発生と消滅

気泡は間もなく周囲の圧力や物体に接触すると一瞬で潰れる(図一4)。このとき金属をも破壊する強い衝撃力が発生する。

この気泡発生から消滅までの現象のことをキャビテーションという。

古くから船舶のスクリューやポンプ等が破壊され、また騒音や振動を引き起こす破壊現象として知られており、キャビテーションに関する研究は、主に発生を抑制することを目的として行われてきた。

しかし昨今では高压ジェット噴流の圧力と温度を制御し噴流内にキャビテーションを効率よく発生させて、大気中にキャビテーション噴流を噴射することが可能となり、ビル外壁の古くなった塗装の除去等に活用される等、有効に利用する研究がなされるようになった。

この「キャビテーション噴流」は非常に高い破壊力のある気泡を含んでいるため、従来のウォータージェットに比べるとポンプ圧力が1/5～1/6と少ないので設備規模が少なく済み、さらに水圧が低いメリットとして、設備や構造体の母体まで破壊せずに表面の劣化部だけを除去することが簡単にできる(健全なコンクリートの破壊はウォータージェットの方が有利)。また、使用する水量が少なく洗剤等環境汚染物質を含んでいないため、周辺への飛散も少なく洗浄後の汚水を処理する必要もないので環境にやさしい。なお、破壊力の強弱は噴射ノズルの遠近により容易に調整ができるため、扱いが簡単であるという特長がある。

このキャビテーション噴流技術をトンネル照明器具清掃に活用し、従来成し得なかった清掃速度の高速化を実現した。

3. 要素試験

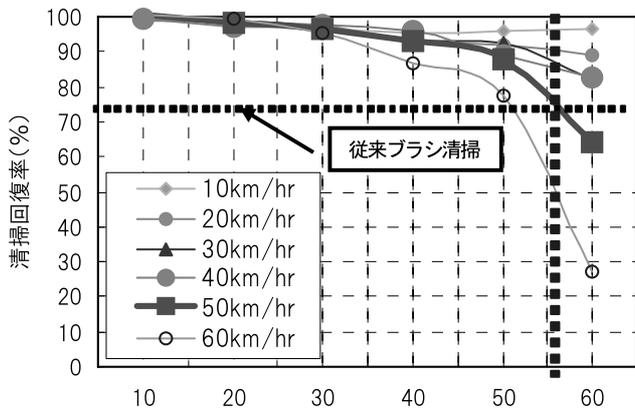
清掃装置の開発にあたり、キャビテーション噴流の清掃能力を調査する実験や、噴射ノズルの位置を制御するアクチュエーターの開発に必要な要素試験を行った。

(1) トンネル照明器具の汚れに対する清掃能力

キャビテーション噴流のトンネル照明器具に対する清掃能力については未知数であったため、要素試験により清掃能力を調査した。

試験方法はトンネル内の粉塵を分析して製作した擬似汚れを試験片ガラスに付着させ、従来の回転ブラシによる清掃とキャビテーション噴流による清掃との比較を行った。なおキャビテーション噴流は噴射ノズル

の移動速度、試験片との離隔を変化させて、清掃速度と噴射離隔と清掃効果の関係を調査した(図—5)。



図—5 洗浄ノズルと照明器具までの離隔 (cm)

計測方法は清掃前後に試験ガラス裏面に白紙をあてがって反射率計を用いて測定を行った。

図—5の横軸がノズルと試験片の離隔距離 (cm) で縦軸が清掃回復率 (%) であり、手拭清掃によって完全に汚れを落した状態を 100% としている。

従来の回転ブラシ (時速 1.5 km/h 程度) による清掃回復率が 73.4% なのに対して、従来回転ブラシと同等以上の清掃効果を 50 km/h で達成するためには、洗浄ノズルを 55 cm 以内に近づければ良いことがわかった。

なお離隔が 55 cm 以上になる場合や、速度が 60 km/h 以上となると、急激に清掃能力が低下することがわかった。これは走行風が大きく影響しているため、清掃能力向上のためにプロトタイプでは噴射ノズル付近に風防を設置している。

将来的には清掃速度を向上させたいが、このとき走行風への対策が大きな課題になると思われる。

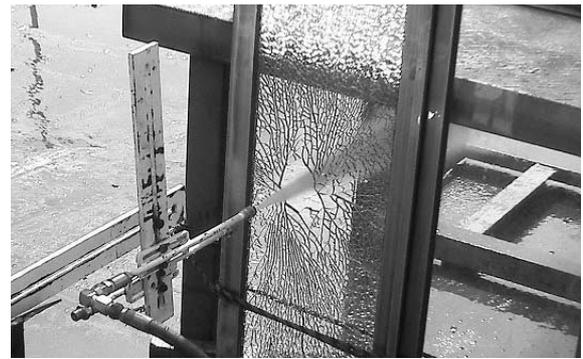
(2) キャビテーション噴流の破壊力の確認試験

清掃と破壊は紙一重であり、キャビテーションは金属をも破壊する現象として知られていることから、噴流が強すぎるとトンネル照明器具の表面や周辺設備も破壊してしまう恐れがある。よって、破壊力を把握し十分に安全対策を検討する必要がある。

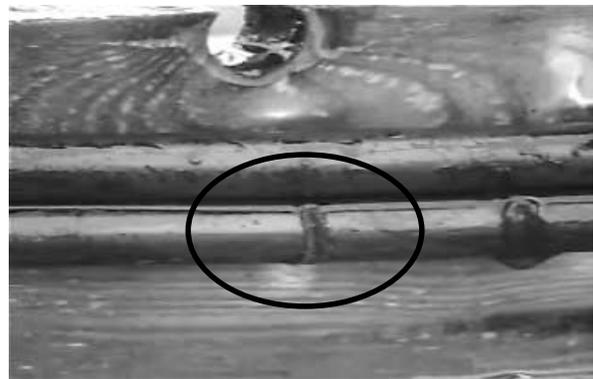
基本的には時速 50 km/h で清掃を行うため、1箇所を集中的に噴射することはないが、路面に障害物がある場合等、清掃速度低下や停止状態になることも考えられるので、キャビテーション噴流を1箇所に集中的に噴射させた破壊試験を行った。

図—6は厚さ 8 mm の強化ガラスであるが (トンネル内非常電話ボックスのガラス)、10 cm 程度の至

近距離から噴射させると 50 秒程度で破壊されてしまう。また図—7はトンネル照明器具やその他トンネル内に添架されているケーブルであるが、これも 10 cm 程度の至近距離から噴射すると 5 秒程度で被覆がなくなってしまう。



図—6 強化ガラス (8 mm) の破壊試験

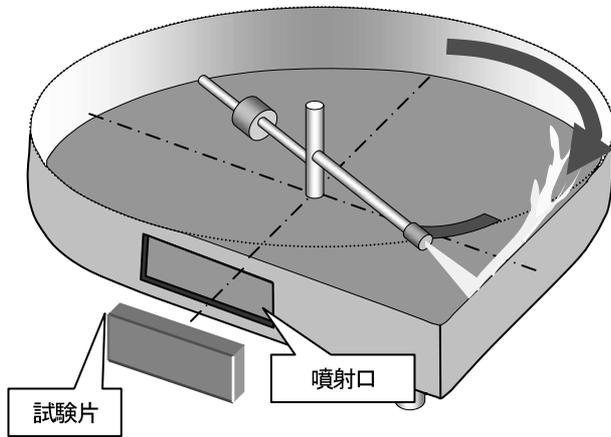


図—7 ケーブルの破壊試験

これら試験から装置を開発するにあたり近接時や速度低下時に噴流が1点に集中しないようにするために、自動噴射停止装置が必要となることがわかった。そこで噴射を停止させなければならない危険な速度や距離を調査するため試験装置を開発した(図—8, 9)。



図—8 回転繰返し噴射試験機



図一9 回転線返し噴射試験機の内部

この試験機は、スィベルジョイント機構により、回転しながらキャビテーション噴流を噴射することができる装置であり、ノズルの速度（角速度）と試験片との離隔を任意に設定することが可能である。

また噴射口はノズルが設定した速度に達すると自動的に開放し、設定した清掃回数が噴射口より噴射されると自動で閉じる自動閉鎖制御装置を備えており、予め設定した速度、離隔及び清掃回数で正確に試験片にキャビテーション噴流を噴射させることが可能である。

この試験により、離隔が15 cm以内になると、清掃速度が10 km/h以下になると急激に破壊力が高まることがわかった。プロトタイプには離隔や速度に応じて噴射を自動で停止する装置を備えることとした。

4. キャビテーション高速清掃装置の開発

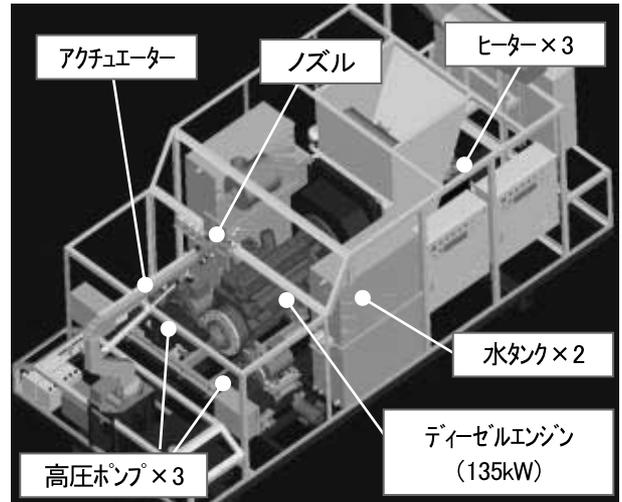
キャビテーション噴流の清掃能力等が要素実験によって明らかとなったので、トンネル照明器具を50 km/hで清掃することができるキャビテーション清掃装置の詳細設計とプロトタイプの製作を行った。

(1) 装置構成

キャビテーションを発生させるための装置構成を図一10に示す。ディーゼルエンジンからVベルト等から取出した動力で高圧ポンプを運転させて水タンクからの洗浄水を加圧する。なお、このとき高圧ポンプ内や配管内等でキャビテーションが発生するのを抑えるため、洗浄水温度は低く保たれている。

高圧化された洗浄水は噴射ノズルの手前でヒーターによって80℃程度の温水にされる。ヒーターは高圧水に耐えられる必要があるため特殊で高価なものとなるが、装置内部でキャビテーションを発生させないために加熱は噴射までの最後工程で行う必要がある。最

後にこの高圧温水を特殊なノズルから噴射させると、高圧噴流の中にキャビテーションの気泡が発生する。



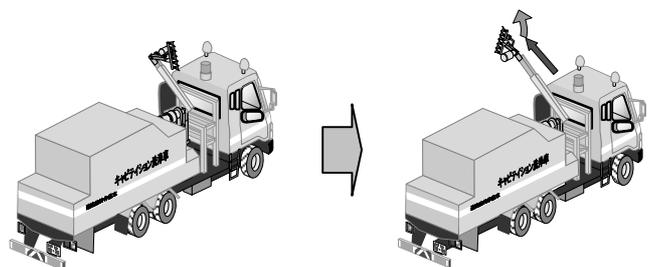
図一10 キャビテーション清掃装置の内部

(2) アクチュエーターの開発

ノズルをトンネル照明器具の位置に合わせるためのアクチュエーターの開発を行った。アクチュエーターはロボットアームのような高精度なものも考えられるが、

- ①屋外で使用するため、耐久性が必要。構造がシンプルの方がよい。
- ②車両に搭載するため振動に強い。高所作業車やクレーン車等での実績がある。
- ③汎用性能高い油圧動力を活用したい。

これら条件を満たすものとして、油圧式のアクチュエーターを開発した（図一11）。



図一11 アクチュエーターの作動図

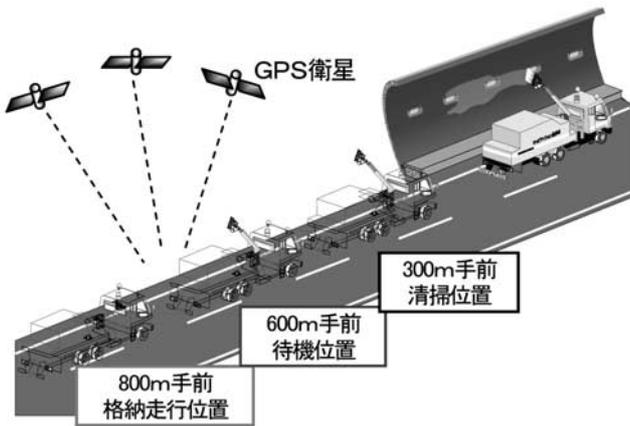
駆動軸は仰俯角、伸張、ノズル部仰俯角の3軸となっており、トンネル照明器具の様々な設置位置や取付け角度に対応できるようになっている。

(3) GPS連動自動位置合わせ制御装置の開発

トンネル内に入るとトンネル照明器具の清掃を行う

前に、予めトンネル毎に設置位置が異なる器具位置にノズルを合わせておく必要がある。本装置は車線規制の削減を目標としているので、ノズル位置を照明器具に合わせておき、50 km/h 以上で走行しながら行う必要がある。

この速度でオペレーターの目視とレバー操作によって位置を合わせることは困難であるため、GPS で現在地とトンネル入口までの距離を計測しながら、段階的にノズルを照明器具位置に自動で合わせる「GPS 連動自動位置合わせ制御装置」を開発した（図—12）。



図—12 GPS 連動自動位置合わせ制御装置

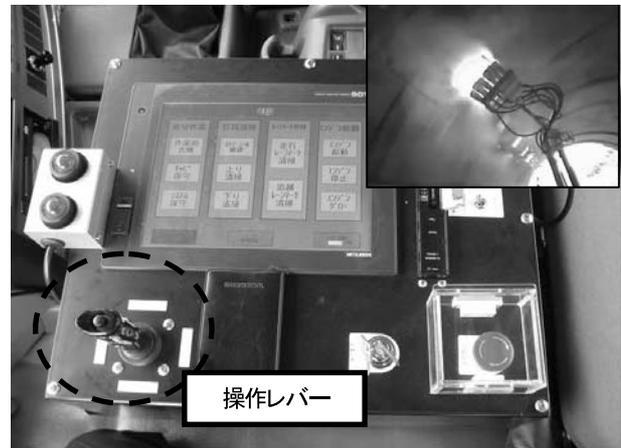
トンネル毎、走行車線側、追越車線側それぞれで、事前に入口の緯度経度データと器具位置の計測が必要であるが、このGPS連動制御装置により準備段階から清掃まで50 km/h 以上で実施することが可能である。

なお、待機位置になるとキャビン内の左右Aピラーに備え付けた警報ランプのうち、アクチュエーターが伸張した方向（走行または追越）のAピラーのランプが点灯する。オペレーターはそれを確認してから「確認ボタン」を押すと清掃を開始する。これによりヒューマンエラーを防止する。

実際の清掃は自走式標識車等の後尾警戒車を伴った移動規制で行うことになるが、各都道府県警高速隊との協議等関係機関との調整が必要である。

またトンネル内に進入後もノズル位置の微調整が必要となる。これはトンネル内にカーブがあると装置にかかる遠心力や横断勾配によって装置全体が傾き、キャビテーション噴流が照明器具を外してしまうためである。このため助手席のオペレーターが監視カメラモニターを見ながらレバー操作でノズル位置を調整できるようにした（図—13）。

この微調整作業は、あえて手動で行うこととしたが、これは開発当初から半自動をコンセプトに掲げてお



図—13 照明器具とノズルの位置関係モニターと操作レバー

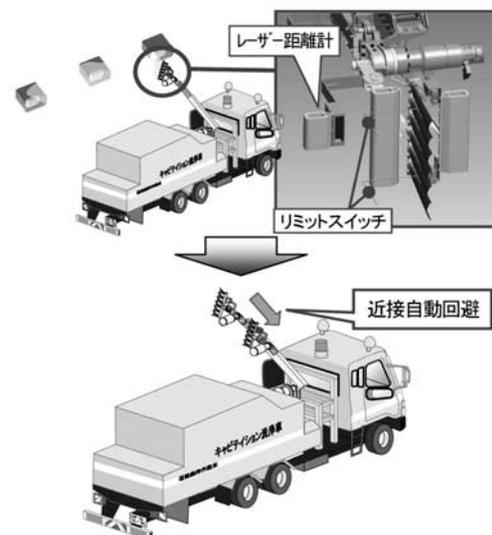
り、過去に機械開発関係で無理に全自動を求めた結果、融通の利かない扱いにくい装置になったことがあり、特にこのような道路環境で使用する機械が精密過ぎると耐久性等実用機としての信頼性確保が困難となるからである。ただし手動作業をカバーするために、以下各種安全装置を備えることとした。

(4) 安全装置の開発

周囲に一般車両が通行している高速道路で、安全に高速で清掃作業を行うために、以下の安全対策機能を開発した。

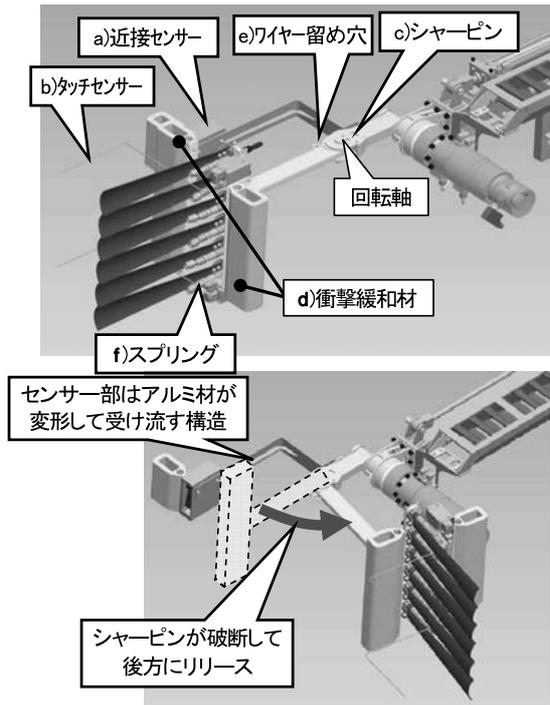
① ノズル部分の路上設備等への接触回避機能

ノズル部付近のレーザーセンサーが近接を感知するか、またはタッチセンサーが障害物に接触すると自動でアクチュエーターが収縮して回避する機能を設けた（図—14）。回避動作時は作動油の油量を通常より増し、4倍速で速やかに回避する。



図—14 接触回避装置

②ノズル部が路上設備に接触した場合の被害軽減対策
 上記回避機能で回避しきれずにノズル部が照明器具等に接触した場合に、設備破壊を軽減するためノズル部に各種衝撃緩和対策を行った（図—15）。



図—15 ノズル部付近の接触対策

設計思想としては、キャビテーション装置側は堅牢な構造とせず、軽量構造で破損して力を受け流すものとしている。また破損したノズル部が後方の一般車両に飛んでいかないようにするために脱落防止ステンレスワイヤーを取付けている。

③破壊力の強いキャビテーション噴流による路上設備の破壊防止対策

破壊力の強いキャビテーション噴流で路上設備を破壊してしまうことがないようにするため、近接時または低速時に自動でキャビテーション噴流を停止させる機能を開発した。これはノズル部付近のレーザー式距離計による近接監視及び車両本体から車速パルス信号を取り出して常に車速監視することで可能とした。これによりキャビテーション噴流が1箇所に集中して設備を破壊するのを防ぐことができる。

5. フィールド試験と実用機としての完成

装置の性能確認のため、様々な条件でフィールド試験を行った（図—16）。試験は平成18年度から行い、途中で装置改良を行いながら、最終試験を平成19年10月に行い装置を完成させた。

最終試験時には関係会社関係者だけでなく、警察関係者にも作業の安全性に問題がないか確認をしていたが、安全性等に指摘や改善要望はなかった。ただし、雨天時湿度の高いときには、キャビテーション噴流が気化せずに、噴流の一部が周辺の車両にかかった。この装置のオペレーターは、機械の操作方法だけでなく、このようなキャビテーション噴流の特性の知識も必要であり、作業に当たってはこのような教育を受け熟練したオペレーターによる操作が必要である。

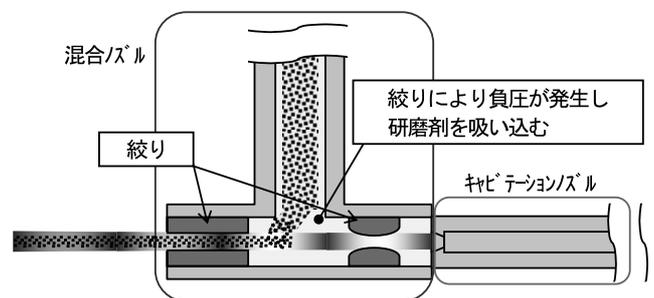


図—16 東海北陸道での試験状況

6. 応用技術

(1) 研磨剤の混合

キャビテーション噴流は各種清掃だけでなく、落書き落としやコンクリート表面の目荒らし（塗装やコンクリートを重ねるときに接着力が向上する）にも利用できるが、研磨剤を混合させることにより、飛躍的に用途を拡大させることができる。そこで研磨剤混合ノズルを開発した（図—17）。



図—17 研磨剤混合ノズル

一般的なショットブラストで使用されているガーネットを用いれば飛躍的に破壊力が高まり、ケレン（錆や旧塗膜落とし）が可能となる。なお溶接部や凹凸があ

るところでも容易に施工が可能であり、鉄素地まで現れている（図—18）。



図—18 橋梁部材の錆落し状況

また研磨剤に重曹を用いると破壊力はガーネットに比べて低いが（ある程度の錆落しは可能）、表面に防錆皮膜を形成させることができる（強い皮膜ではない）。これはアルカリ性の重曹とキャビテーションの衝撃力で赤錆が黒錆に変質したものと考えられるが、ケレンと表面処理を同時に高効率で実施できるので、現在工法の確立のための検討を行っている。またケレン時には鉄表面を鍛えて強度が向上し、「キャビテーションピーニング」効果も期待できる。従来のショットピーニングのように鉄球を使わないので、表面が滑らかであり、また錆の要因の鉄粉が付着しないという特徴がある。

さらに重曹は環境にやさしい洗剤及び消臭剤としても一般的に使われており（ホットケーキのふくらし粉としても使われるので安全）、汚れや臭いが厳しいトイレの床や油やタール等が付着した壁の清掃等に活用すれば、ブラシが届かない隅々まできれいにする事ができる。

他にも研磨剤に塩を用いて路面の凍結を破壊する実験も行っている（図—19）。



図—19 凍結破壊実験の状況

これは塩の粒子によるブラスト効果を期待するだけでなく、溶解した雪氷の再凍結を防止するために凍結防止剤としての塩を用いている。

重曹や塩等、研磨剤の化学的性質を利用することで、単に破壊力が高まるだけでなく、活用用途が飛躍的に広まる。

7. おわりに

本装置は当初清掃作業の効率化を目標に開発を行ってきたが、研磨剤の例にあるように清掃だけでなく様々な用途拡大の検討を行っている。

なおキャビテーション噴流の高い破壊力は人に対する危険性も高いため、作業を行う人は十分な操作、安全講習や訓練を受けておく必要がある。キャビテーションの特性を理解して装置を活用してほしい。

JCMA

【筆者紹介】

時枝 寛之（ときえだ ひろゆき）
 (株)高速道路総合技術研究所
 施設研究部
 施設研究室

