37. 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

(株高速道路総合技術研究所 施設研究部 施設研究室 〇時枝 寛之

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の粉塵や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-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行っており(図-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1~2km/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-2)。

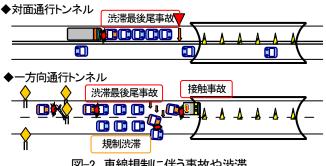


図-2 車線規制に伴う事故や渋滞

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トンネル照明器具の高速清掃に活用し、高速道路の最低走行速度である 50km/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

2.1 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-1)。

表-1 過去の検討状況のまとめ

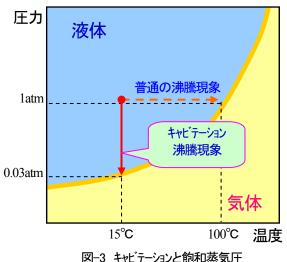
評価項目	高圧水噴射	水溶 洗剤 噴射	ト゛ライア イスブ゛ラ スト	重曹 噴射 (ソフト ブラス ト)	ガーム 噴射
①高速清掃が可能	Δ	×	×	×	×
②清掃効果が高い	×	Δ	0	0	Δ
③照明器具等を損傷しない	0	0	×	×	Δ
④一般車へ影響がない(飛散)	×	×	0	×	0
⑤汚水廃棄物処理施設が不要	0	×	0	0	0
高速清掃実用化	×	×	×	×	×

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れ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。

2.2 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-3)。



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-4)。このとき金属をも破壊する強い衝撃力が発生する。

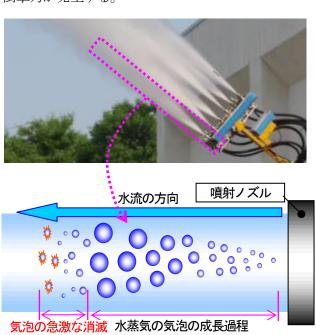


図-4 キャビテーションの気泡の発生と消滅

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。

しかし昨今では高圧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て済み、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。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徴がある。

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。

3.1 トンネル照明器具の汚れに対する清掃能力の確認試験

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)。

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。

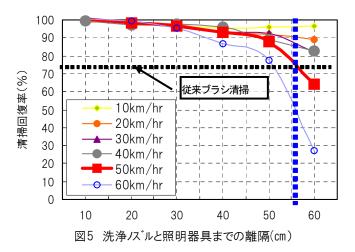


図-5の横軸がノズルと試験片の離隔距離(cm)で 縦軸が清掃回復率(%)であり、手拭清掃によって 完全に汚れを落した状態を100%としている。

従来の回転ブラシ (時速 1.5km/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 50km/h で達成するためには、洗浄ノズルを 55cm 以内に近づければ良いことがわかった。

なお離隔が55cm以上になる場合や、速度が60km/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で、 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。

3.2 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 50km/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 8mm 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)、10cm 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10cm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(8mm)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、図-9)。



図-8 回転繰返し噴射試験機

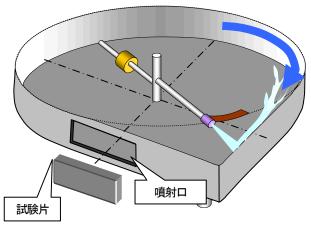


図-9 回転試験機の内部

この試験機は、スイ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、設定した回数が噴射口より噴射されると自動で閉じる自動開閉制御装置を備えており、 予め設定した速度、離隔及び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。

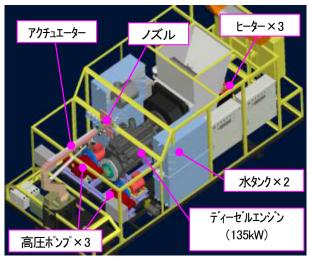
この試験により、離隔が 15cm 以内になって、清掃速度が 10km/h 以下になると急激に破壊力が高まることがわかった。プロトタイプには離隔や速度に応じて噴射を自動で停止する装置を備えることとした。

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 50km/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。

4.1 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-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。



____ 図-10 キャビテーション清掃装置の内部

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。

4.2 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 ンプルな方がよい。
- 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-11)。

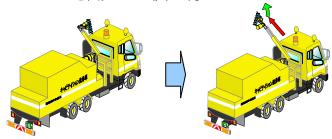


図-11 アクチュエーターの作動図

駆動軸は旋回、仰俯角、伸張、ノズル部仰俯角の 4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。

4.3 GPS連動自動位置合わせ制御装置の開発

トンネル内に進入し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る時も、50km/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)。

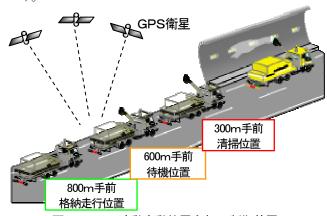


図-12 GPS連動自動位置合わせ制御装置

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50km/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)。



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

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。

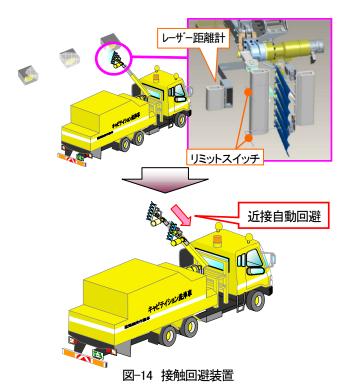
4.4 安全装置の開発

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、またはリミットスイッチ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速やかに回避する。

②/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)。

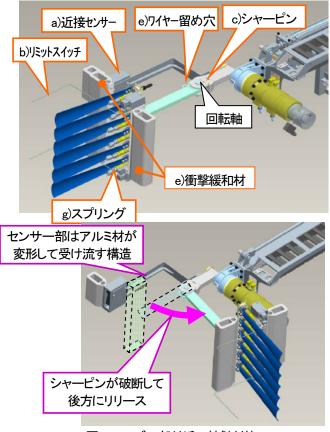


図-15 ノズル部付近の接触対策

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 いただいたが、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。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を使用者に理解していた だくことも必要であることがわかった。

今後は清掃だけでなく錆落とし等の応用技術に関 して研究を行っていく予定である。



図-16 東海北陸道での試験状況