

キャビテーション噴流技術を用いた トンネル照明灯具の高速清掃装置の開発

時 枝 寛 之

現在の NEXCO 各社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いる。この作業は灯具正面のガラス面とブラシ位置を合わせながら行うため、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るため、サービスレベルの低下につながっている。

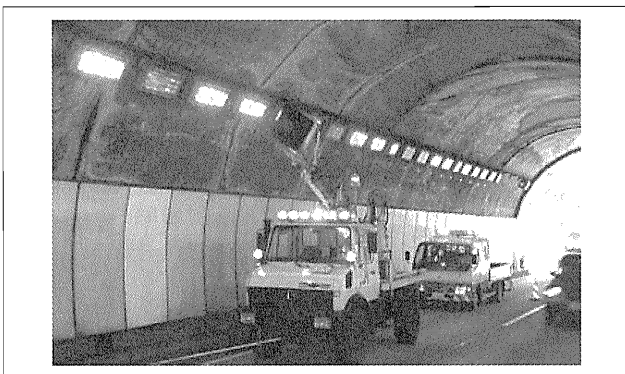
本報文ではキャビテーション噴流という非常に清掃効果の高い気泡を用いて清掃速度 50 km/h（高速道路の最低走行速度）を実現し、サービスレベル低下の要因である車線規制を必要としない高速清掃装置の開発経緯を紹介する。

キーワード：交通規制、事故、渋滞、コスト、削減、車両、維持作業、高速道路、キャビテーション、ウォータージェット、高速清掃、トンネル照明

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。

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（写真—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。



写真—1 トンネル照明器具の清掃状況

本開発は清掃効果の非常に高い気泡を含んだ、キャビテーション噴流技術をトンネル照明灯具の高速清掃に活用し、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。また作業効率向上による清掃コスト削減も期待している。

研究開発は平成 16 年度から始めており、キャビテーション噴流の能力に関する基礎検討や要素実験、平成 17 年度に行ったアクチュエータ等制御装置関係の開発やプロトタイプ製作状況、平成 18 年度現在もフィールド試験を実施中である。状況を以下に報告する。

2. 基礎の検討

(1) トンネル照明灯具清掃の過去の検討

回転ブラシによるトンネル照明灯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

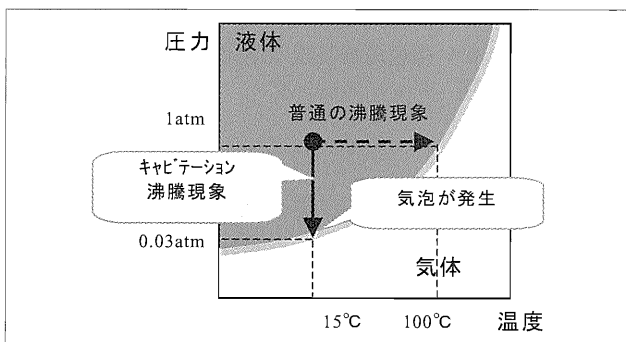
評価項目	高圧水	水溶洗剤	ドライアイス	重曹噴射（ソフトブラスト）	スチーム
①高速清掃が可能	△	×	×	×	×
②清掃効果が高い	×	△	○	○	△
③照明器具等の損傷がない	○	○	×	×	△
④一般車への影響がない（飛散）	×	×	○	×	○
⑤汚水、廃棄物処理施設が不要	○	×	○	○	○
高速清掃実用化	×	×	×	×	×

トンネル照明灯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程度

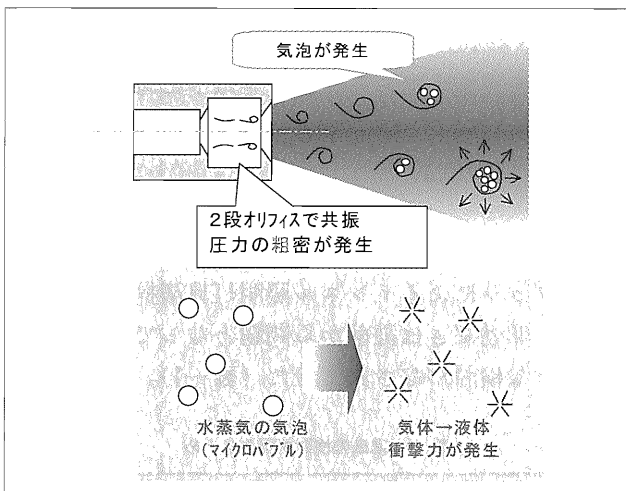
ではきれいに落すことができない。また洗浄污水の処理が必要な手法や、隣の車線には一般車両が通行しているため、周囲へ洗浄物が飛散するような手法も実用では使えない。それぞれの清掃方法にそれぞれの課題や問題があり、現在まで実用化に至ることはなかった。

(2) キャビテーション噴流技術

水やお湯は流れの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(図一1)。気泡は間もなく周囲の圧力により一瞬で潰れる。このとき金属をも破壊する衝撃力が発生する(図一2)。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。



図一1 水の飽和蒸気圧



図一2 気泡の発生と潰れる過程

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起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1/4~1/5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。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污水を処理する必要もないので環境にやさしいというメリットがある。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、扱いが簡単であるのも特徴の一つである。

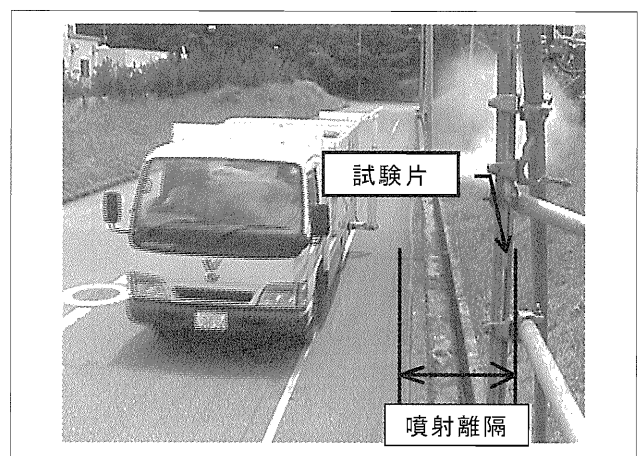
キャビテーション噴流技術をトンネル照明灯具清掃に活用し、従来なし得なかった清掃速度の高速化を実現した。

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の開発に必要な要素試験を行った。

(1) トンネル照明灯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灯具に対する清掃能力については未知数であったため、写真一2のような噴射試験により清掃能力を調べた。



写真一2 性能試験の状況

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(図一3)。

計測方法は清掃前後に試験片ガラス裏面に白紙をあ

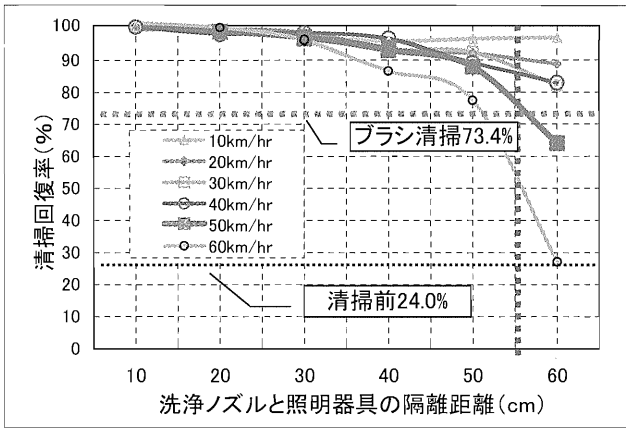


図-3 清掃速度、噴射距離と清掃効果の関係

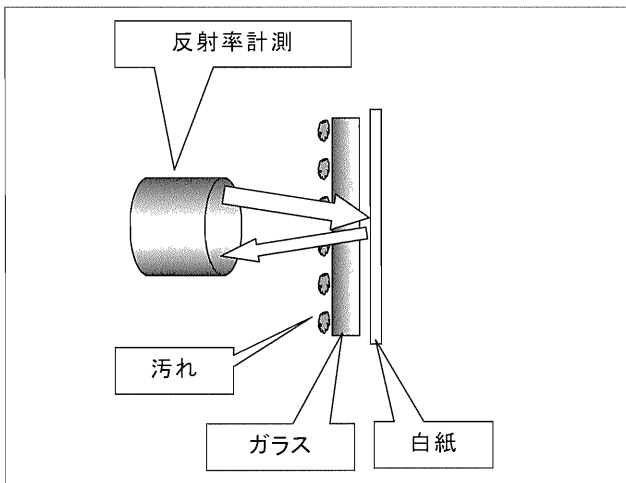


図-4 清掃効果の測定

てがって反射率計を用いて測定を行った (図-4)。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分かった。

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分かった。これは走行風が大きく影響しているので、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 50 km/h から上げていきたいと考えているが、この時アクチュエータの動作速度も向上させる必要があるため、軽量化等も行っていくことになる。このとき風防の形状によっては走行風によってカルマン渦が発生し、軽量化されたアクチュエータ全体が振動してしまう可能性がある。これらは液体

(キャビテーション噴流) と気体 (走行風) が複雑に影響し合った流体であり、非常に解析が困難であるため、清掃速度アップについては十分に実験と検証を行っていく必要がある。

(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灯具の母体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、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。

写真-3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。また写真-4はトンネル照明灯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。



写真-3 強化ガラス (8mm) の破壊試験

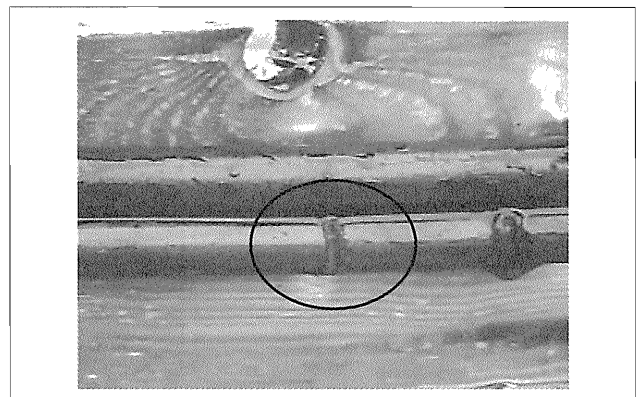


写真-4 ケーブルの破壊試験

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分かった。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(写真-5, 図-5)。

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調整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、あらかじめ設定した速度、距離、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できる。

この試験により、清掃速度が10 km/h以下になる場合や、離隔が15 cm以内になると、急激に破壊力が高まることが分かった。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なった。

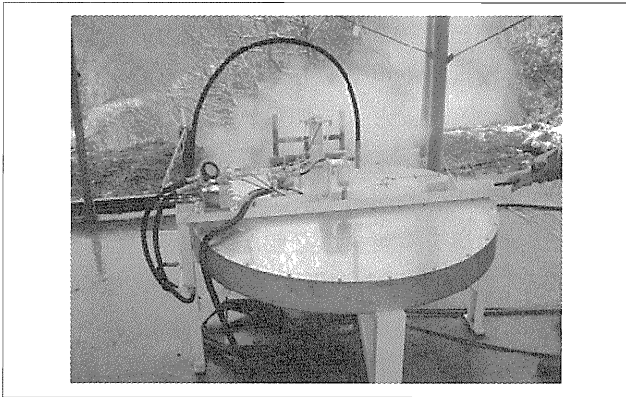


写真-5 回転繰返し噴射試験機

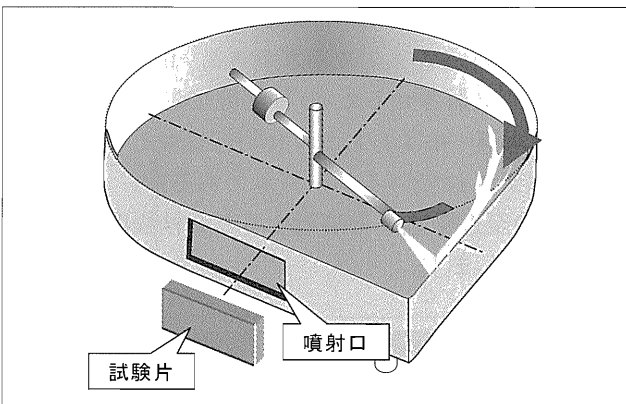


図-5 回転試験機の内部

4. プロトタイプの製作

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、トンネル照明灯具を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。

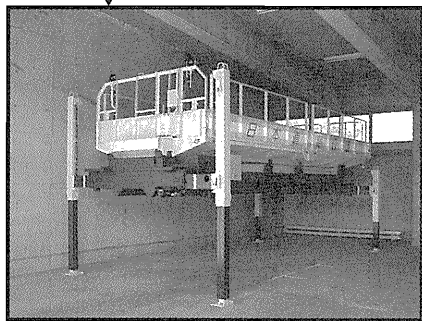
(1) ベーストラックの選定と装置構成

キャビテーション発生装置やアクチュエータ等制御装置の容量や重量を検討し、ベースとするトラックを選定した。装置はディーゼルエンジン等、重量が大きい部位を含むため、大型トラックに搭載することとし、大型万能車(写真-6)に搭載することとした。

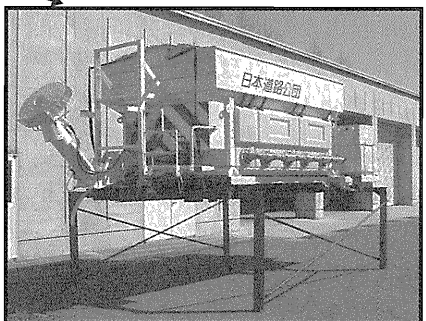
大型万能車とは、高速道路を維持補修する作業装置をコンテナ化し、20分程度で着脱することが可能な固縛装置を装備した車両であり、トラック車両本体の



散水装置



リフト装置



湿塩散布装置

写真-6 大型万能車

稼働率向上と購入費、車検費及びメンテナンス費の削減を図っている（平成14年までにNEXCO中央研究所で開発）。また油圧動力を作業装置に供給する機構（PTO）を装備しているため、キャビテーションの噴射ノズルの位置制御を行うアクチュエータに油圧動力源を装備する必要がないので、動力源にかかる重量、設計及び開発コストが削減できる。

大型万能車に適合するよう対応で開発したのが図-6である。キャビテーションの発生装置は高圧ポンプ、同ポンプ駆動用及び発電用エンジン、水タンク、ノズル等で構成されており、これらを着脱可能なサブフレー

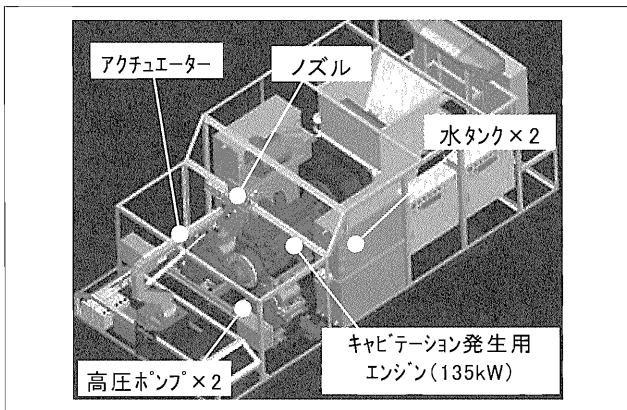


図-6 キャビテーション清掃装置の内部

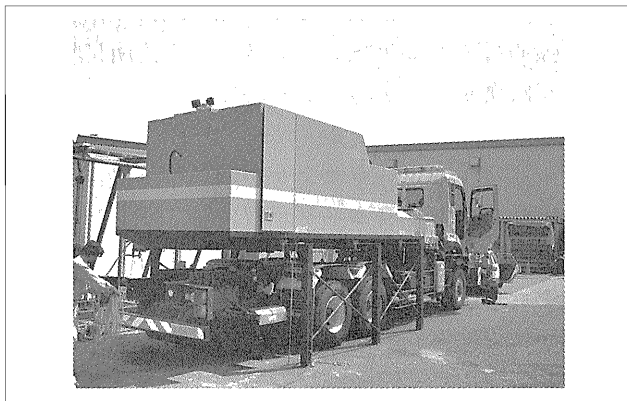


写真-7 キャビテーション清掃装置の着脱状況

ム上に配置しており、必要に応じて大型万能車に着脱して使用する（写真-7）。

なお、本装置はトンネル照明灯具の清掃用に開発を開始したが、その他の設備の清掃や錆落とし、塗装落とし等様々な利用が考えられる。年間休みなく装置を稼働することになった場合には専用車として製作することが望ましいと思われる。

(2) アクチュエータの開発

ノズルをトンネル照明灯具の位置に合わせるためのアクチュエータの開発を行った。アクチュエータ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、下記の条件を満たすものとして、油圧式のアクチュエータを開発した（図-7）。

- 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大型万能車の油圧動力を活用できる。

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、トンネル照明灯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機構の開発

トンネル内に入るとトンネル照明灯具の清掃を行う前に、トンネルごとに設置位置が異なる灯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、ノズル位置を照明灯具に合わせる時も、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灯具位置に自動で合わせる GPS 連動

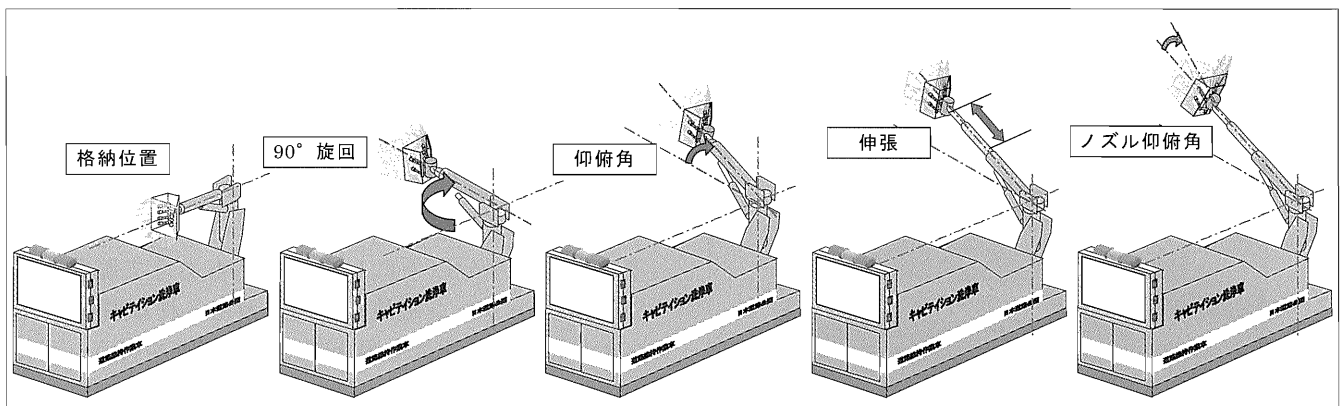


図-7 4軸アームの作動容量図

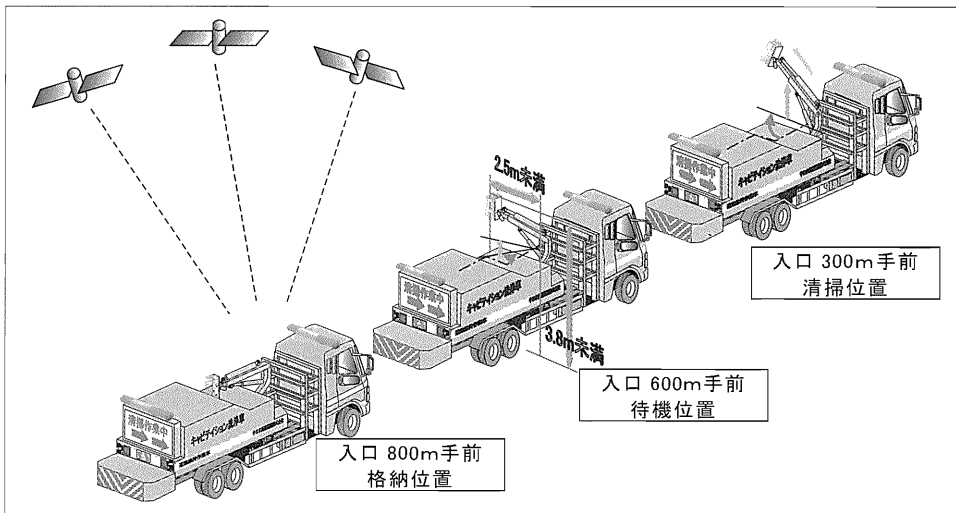


図-8 アクチュエータの動作アルゴリズム

自動位置合わせ制御装置を開発した(図-8)。

トンネル毎、走行車線側、追越車線側それぞれで、事前に予備走行によって入口の緯度、経度データと灯具位置の計測が必要であるが(本装置に備えているセンサ類によって計測が可能)、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、待機位置を設けているのは、道路交通法施行令等によって、車両幅と高さ制限があり、清掃時以外ではできるだけこの制限内にアクチュエータ部を収めたかったからである。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灯具を外してしまうためである。このためノズル後方にカメラを設置し(写真-8)、助手席のオペレータが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。

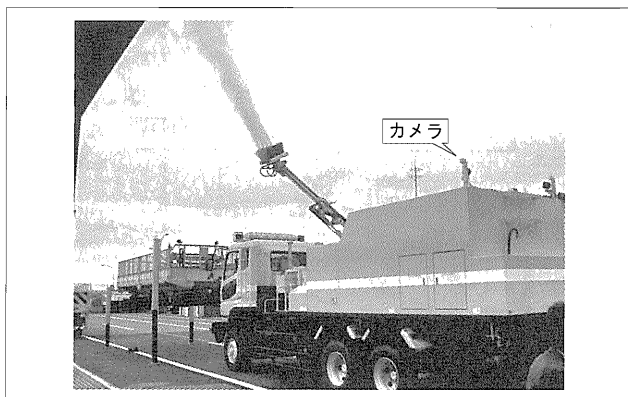


写真-8 後方からの監視カメラ

(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は、以下の安全機能が必要である。

- ①破壊力の強いキャビテーション噴流で他設備等を破壊しない。
- ②清掃作業中にノズル部分がトンネル照明灯具等に接触しない。
- ③万一がノズルが照明灯具等に接触した場合に備え、

設備側の損傷を最小限にし、さらに後続車両に破損物が接触しない。

上記①～③の安全機能を実効させる対策は下記のとおりである。

①キャビテーション噴流による破壊対策

上記要素試験で危険な離隔と速度が明らかとなったので、離隔についてはノズル部付近にレーザ式距離計を設置し、速度については大型万能車から車速パルス信号を取出して、それぞれ低速時と近接時に自動でキャビテーション噴流を停止できる機能を開発した。これにより強力な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。

②ノズルの接触防止対策

ノズル部付近のレーザセンサが同じく近接を感知すると、自動でアクチュエータが収縮して回避する機能を設けた。回避動作時は動力の油圧量を通常より増やして、すみやかに回避できるようになっている。

③接触時の被害を最小限にとどめる対策

ノズル部周辺に衝撃吸収材を設置するとともに、ノズル部の根本付近にシャープピン機構を設けて、接触時にノズル部が後方へリリースして衝撃を受け流す構造を設けた。なお、衝撃エネルギーは重量に比例するので、ノズル部付近の重量を軽くすれば損傷も少なくなる。

現在はプロトタイプのため、4本あるノズルの噴射角度や間隔を調整できるようにするため、ノズルを固定する金具が大きく重量が重くなっているが、完成形では重量を半分以上にして、構造もあえて脆弱にし(キャビテーション噴流の反力に耐えられる限り)、トンネル設備への損傷を最小限にする対策を行う。また破損した部品が後方へ飛散しないようワイヤ等による対策も行っていく。

さらに運用面でもキャビテーション清掃装置の後続に後尾警戒用標識車を伴走させるなど、一般車両に損害を与えない対策を行っていく予定である。

5. フィールド試験

プロトタイプが完成したので、実際の高速道路のトンネルでフィールド試験を行った。フィールド試験の場所は山形自動車道の山形蔵王 IC～山形北 IC 間にあるトンネルである。選定した理由としては、下記の条件を考慮した。

- ①遠心力の影響を確認するために厳しいカーブがある。
- ②制御装置に負荷がかかる連続トンネルがある。
- ③最初の試験なので交通量が少ない。

フィールド試験は片側 2 車線の道路の 1 車線を規制し、隣の車線では一般車が通行している状況で行った。

清掃速度は当初 20 km/h から始めて、60 km/h (目標 50 km/h に対して、20% 程度厳しい条件で実施) まで速度を上げて行った。

試験の結果は、60 km/h での清掃においても、従来回転ブラシ清掃と同等の清掃効果が得られた。また清掃試験時に山形県警高速隊にパトロールカーで後方から作業の安全性について確認を行っていただいた。その結果、以下①～③のような判定で、安全性に問題はないとの見解であった (写真—9 のキャビテーション清掃装置の 2 台後方を伴走)。

- ①トンネル内の路面を濡らさなかった (一般車がスリッ

プすることはない)。

- ②後続車両に洗浄水が降りかかり、車を汚すことはなかった。

- ③後続車両の走行視界を妨げるようなことはなかった。

ただし、トンネル外でもキャビテーション噴流を噴射し続けてしまうと、風が強い天候では、下方に噴流が舞って、後続車両の走行視界を妨げる可能性があるとして指摘された。この対策として、トンネル群が連続してトンネル間が短いところでも、適切に噴流を停止させることができるよう制御ソフトウェアの改良を行った。

以上のようにフィールド試験の結果から、本キャビテーション清掃装置はほぼ実用レベルに達していることが確認できた。

6. まとめ

現在、実際に運用中の高速道路でフィールド試験を行っている最中であるが、清掃能力や安全性等ほぼ実用レベルに達していることが確認できており、トンネル照明灯具の高速清掃装置は今年度中に完成予定である。また本装置は清掃だけでなく様々な応用が考えられるので、順次検討を行っていく予定である。

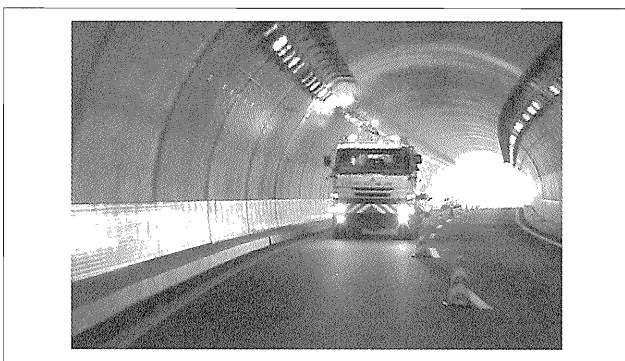
本装置は従来の数十倍の清掃速度を実現したが、トンネル照明灯具にかかわらず 50 km/h で清掃を行うことは、世界でも例がない斬新な技術であると思われる。

今後もこのような新技術を積極的に取入れ、高速道路を利用されるお客様の安全性と快適性の向上に役立っていききたい。

J C M A

【筆者紹介】

時枝 寛之 (ときえだ ひろゆき)
中日本高速道路株式会社
中央研究所
交通環境研究部
施設研究室



写真—9 山形道での試験状況