

コールドスプレーを用いた 鋼橋の防食技術について

曾我 麻衣子¹・井口 進²

¹ (株) 横河ブリッジホールディングス 総合技術研究所 研究課 (〒261-0002千葉県千葉市美浜区新港88)

² (株) 横河ブリッジホールディングス 総合技術研究所 主幹 (〒261-0002千葉県千葉市美浜区新港88)

本防食技術は、コールドスプレー技術を応用しており、亜鉛とアルミナの粉末を融点以下の温度で加熱し、超音速で基材に吹き付けて皮膜を形成するものである。鋼橋の防食上の弱点部の一つとして挙げられる高力ボルト継手部を対象に、防食性の検証やボルトの力学的性状に与える影響についての検証を行っている。あわせて、実橋での施工も実施しており、ノズルの改良や施工法の改善を行い、高力ボルト継手部以外にも適用範囲を広げている。本文では、同技術の概要を述べるとともに、各種基礎的な検証結果を報告する。また、施工性向上のための改良内容および実構造物における施工事例について報告する。

キーワード 鋼橋、コールドスプレー、腐食、防食、高力ボルト継手部

1. はじめに

鋼橋の防食上の弱点部の一つとして、高力ボルト継手部が挙げられる。塗装橋の場合、高力ボルトの角部において十分な塗膜厚が確保できていないことや、高力ボルト継手部の塗装仕様において、ボルト本体に防食性の高い無機ジンクリッチペイントが防食下地として採用されてこなかったことが原因として考えられる。腐食環境の厳しい地域においては、この高力ボルト継手部の腐食が維持管理上の大きな負担となっている。また、既設橋梁においても、塗装塗り替えコストの増大が、長寿命化にあたって最大の課題となっている。

これらの課題に対して、筆者らはコールドスプレー技術¹⁾ (以下、CS) を応用した特殊金属塗装「Smart ZIC工法」 (以下、SZ) を用いた、高力ボルト継手部の耐食性の向上法について検討を行っている。そのなかで、アプリケーションの改良や施工法を改善したことで、高力ボルト継手部以外にも適用範囲を拡大している。

本文では、SZによる防食技術の概要を述べるとともに、各種基礎的な評価試験結果について報告する。また、SZの適用範囲拡大を目的に行ったアプリケーションの改良や施工法の改善内容と、それらの具体的な適用事例として実橋での施工事例を報告する。

2. 防食技術の概要

SZは、1980年代半ばにロシア科学アカデミーのA.Papyrinらによって考案されたCSを応用した、鋼部材の防錆工法である。

CSは、図-1に示すように、皮膜材料となる金属粉末を超音速流のガスに投入し、固相状態のまま基材に高速で衝突させることで皮膜を生成するものである。融点あるいは軟化温度よりも低い温度のガスを用いるため皮膜材料を溶かさずに噴射させる点で、従来の金属溶射技術とは皮膜形成プロセスが異なる。また、生成皮膜の微細孔容積率が5%未満と小さいことから、従来の金属溶射

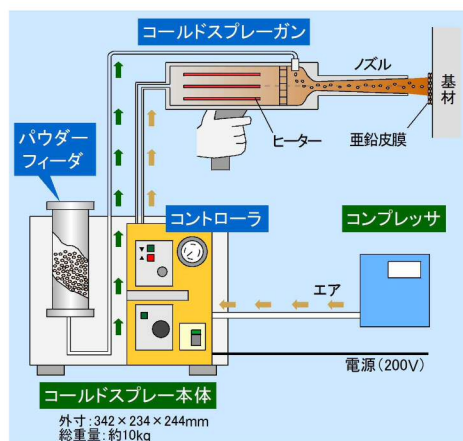


図-1 コールドスプレーの概要

が必要であった封孔処理が省略できる。

CSで使用できる粉体は多岐にわたるが、SZは鋼部材に防食皮膜を生成することを目的としていることから、犠牲防食機能の高い亜鉛（Zn）を選定している。また、基材表面の下地処理と活性化を目的に、アルミナ（ Al_2O_3 ）を亜鉛粉末に混合している。亜鉛とアルミナの混合比率は、平均膜厚や塩水噴霧試験等の検討結果²⁾を考慮して、重量比で50：50を標準としている。ただし、施工面の錆度合い等により配合比率の調整を行う。

亜鉛皮膜の膜厚は、熔融亜鉛めっきの膜厚を参考に、100 μ mを目標膜厚としている。

CSは作動ガスの圧力によって、高压方式（1MPa以上）と低压方式（1MPa未満）に分類される。筆者らが検討を行っているSZは、現場での施工を念頭にしていることから、小型で取扱資格が不要な低压方式を採用している。また、作動ガスは圧縮空気を用いる。



図-2 高力ボルトナット部の塩水噴霧試験結果
(1,512時間経過後)

表-1 SZ+重防食塗装の仕様

塗装工程	塗料名	使用量※ (g/m ²)	目標膜厚 (μ m)
防食下地	Smart ZICの亜鉛皮膜	-	100
下塗	超厚膜形エポキシ樹脂塗料	500×2	300
中塗	ふっ素樹脂塗料中塗り	140	30
上塗	ふっ素樹脂塗料上塗り	120	25

※:使用量は、はけ・ローラー塗りの場合を示す。

3. 防食性能の検証³⁾

(1) 亜鉛皮膜の防食性

各種防食処理を行ったボルトとSZによる防食性能を比較することを目的として、新材の高力ボルト供試体による塩水噴霧試験（JIS Z 2371、温度35℃、5%食塩水（pH7）を噴霧）を行った。供試体には、①ボルトの締付け完了から塗装施工までの期間に発生する錆を防止するために、ボルト表面に特殊プライマー（20 μ m）を塗布した防錆処理ボルト、②ボルトの締付け後、表面を3種ケレンし、有機ジンクリッチペイント（30 μ m×2層）を塗布したもの、③熔融亜鉛めっきボルト（550g/m²）、④ボルトの締付け後、SZにより亜鉛皮膜を生成したものの、の4ケースを用いて比較を行った。

塩水噴霧試験1,512時間経過後の各供試体の状況を図-2に示す。防錆処理ボルト（①）は、ナットおよび座金全体に腐食が進行している。有機ジンクリッチペイントを施したボルト（②）は、ねじ部や座金と被締付け部材との接触面から錆が発生している。熔融亜鉛めっきボルト（③）は、めっきの犠牲防食効果が認められるものの、ナット角部で錆が発生している。これはナット締付け時のきずが原因と考えられる。これに対して、SZを適用したボルト（④）については、亜鉛の犠牲防食に伴う白色の腐食生成物が確認できるものの、SZ適用範囲に錆は見られなかった。これらの結果より、SZにより生成した亜鉛皮膜の高い犠牲防食機能が確認できた。

(2) 亜鉛皮膜上に塗装を施した場合の防食性

SZで生成した亜鉛皮膜は高い防錆力を有していることを確認したが、実橋においては美観（色あわせ）の点より塗装を施す場合がほとんどである。そこで、SZで

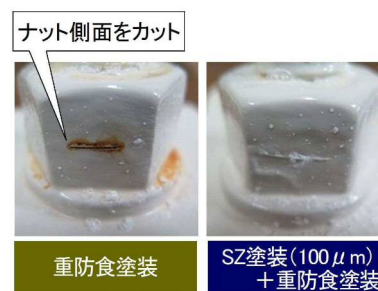


図-3 高力ボルトナット部の塩水噴霧試験結果
(塗装仕様, 1,500時間経過後)

生成した亜鉛皮膜上に塗装を施した場合の防食性について、塩水噴霧試験により検証した。

供試体として、表-1に示すように新材の高力ボルトにSZを施工した上に重防食塗装（F-11）を施したものと、従来の重防食塗装のみを施したものをを用いた。本試験で用いる供試体は、プライマーを塗布せずに亜鉛皮膜上に直接重防食塗装を施工しており、ナット部にはカットを導入している。

塩水噴霧試験1,500時間経過後の各供試体の状況を図-3に示す。亜鉛皮膜上に重防食塗装を施した供試体では錆は発生していないのに対して、SZを施していない重防

食塗装は、カット部から錆が発生している。これより、SZを防食下地とした重防食塗装仕様が高力ボルトの重防食塗装として有効であることを確認した。

4. SZを施工した高力ボルトの力学性状の検証³⁾

(1) SZ施工時の温度特性

SZは、通常の金属溶射に比べれば低温であるものの、粉体の衝突エネルギーで基材はある程度発熱する。一般に、鋼材は調質温度を超える温度に加熱されると、調質により得られた機械的性質が失われてしまう。そこで、SZを高力ボルト継手部に適用する場合、高力ボルトの上昇温度が強度に悪影響を与えない範囲であるかを確認しておく必要がある。高力ボルトの焼き戻し温度は約400～450℃であり、これ以上の温度になるとボルト強度が低下する恐れがある。ここでは赤外線サーモグラフィと熱電対を用いてSZ施工時のボルトの温度を測定した。

供試体には、板厚9mmの鋼板に締付けたトルシア型高力ボルトM22 (S10T) を用いてSZを施した。

まず、SZ施工中の温度分布を赤外線サーモグラフィで計測した結果を図-4に示す。最高温度はナット側で204.8℃、頭側で222.6℃であった。SZ皮膜の放射率が不明なこと、また施工中に放射率が変わってしまうことから、測定において放射率は $\epsilon=1.0$ で固定としたが、亜鉛めっきの放射率である $\epsilon=0.25$ を仮定した場合、今回のケースで推定される最高温度は313.9℃となる。いずれにせよ安全側に評価してもボルト表面の最高温度は400℃以下であったと推察される。

次に、ボルト軸部と被締結材表面の施工時の温度を熱電対で計測した結果を図-5に示す。ボルト軸部の最高温度は112.5℃、被締結材の最高温度は199.1℃であった。

以上の結果より、SZ施工時の熱影響は高力ボルト焼き戻し温度(400℃)以下であり、高力ボルトの機械的性質が変化する可能性は低いといえる。

(2) リラクゼーション試験

高力ボルトを締付けると、被締結材のへたりや陥没、ボルト軸部のクリープ等が原因で、時間とともに軸力が低下するリラクゼーションが生じる。SZの施工により基材が発熱するため、熱影響でこれらの要因が促進されてリラクゼーションに影響を与えることが懸念された。そこで、高力ボルトにひずみゲージを貼付け、SZの施工前後のボルト軸力を測定した。ひずみゲージはボルト頭やナット部へのSZ施工の際に損傷しないよう、ボルト軸部に貼付け、測定期間は締付け後から90日間とした。

供試体は2摩擦面の継手を想定して鋼板3枚重ねとし、接触面の塗装は無機ジンクリッチペイントで膜厚を75 μm とした。ボルトは呼びM22、首下長さ65mmのトル

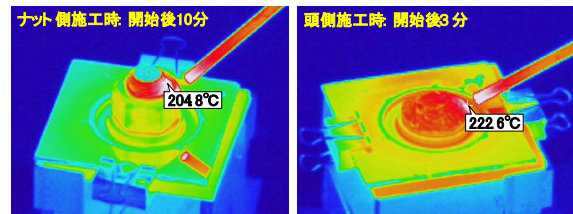


図-4 SZ施工時のサーモグラフィ画像

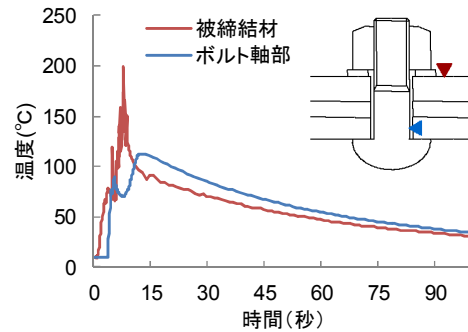


図-5 SZ施工時の温度履歴

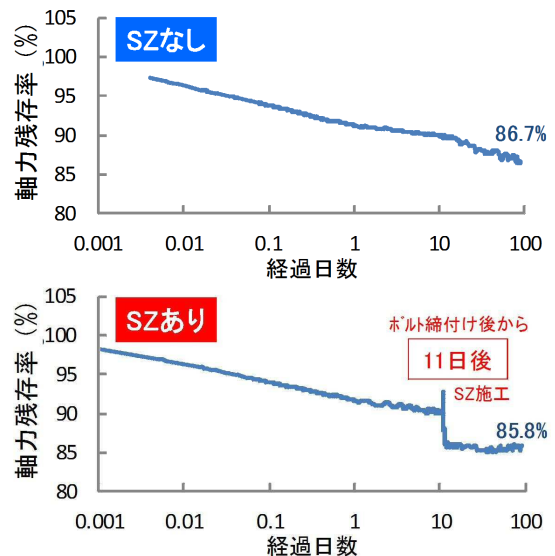


図-6 リラクゼーション試験結果

シア型高力ボルトであり、強度はS10Tである。

SZ施工の有無を比較した実験結果を図-6に示す。SZ施工後に軸力が5%程度低下したが、その後の軸力値はほぼ一定となり、最終的な軸力残存率はSZ施工の有無に関わらず同程度となることを確認した。SZの施工前後に見られる軸力の低下は、塗装のクリープが施工時の熱影響で促進されることが主な原因と推察される。

5. ノズルの改良と施工法の改善

本技術は、実橋での施工試験を複数回実施し、施工性や歩掛などの確認を行っている。図-7に示すSZで用い

るCS装置は、小型で可搬性に優れ、現場での施工性も高いという特徴がある。しかし、ノズルが小径であるため広い面積を有する部材への施工能率が低いことと、ノズルが長いこと狭隘部への施工性が悪いといった欠点があった。本章では、これらアプリケーションの改良や施工法の改善について報告する。

(1) ノズルの改良

従来使用してきたノズル（以下、従来ノズル）は、これまで実施してきた試験施工の経験より、以下3つの課題があった。一つ目は、粉体によるノズル内の磨耗である。磨耗によって損傷したノズルは1~2時間毎に交換する必要があり、交換に時間を要することから、磨耗に対する耐久性向上が課題となっていた。二つ目は、一度に吹き付けられる皮膜の面積が比較的小さいことである。従来ノズルの吹き出し口径が5mmであり、面積の広い対象物への施工を考えたとき、ノズル口径を大きくし、施工能率を上げる必要があった。三つ目は、狭隘部において施工困難箇所が存在することである。図-8に示すように、従来ノズルは長さが120mmと比較的長く、スプレーガン本体の長さとの離隔距離を含めると420mm以上の施工空間が必要となる。SZの施工では対象物との推奨施工角度が70°~90°とされていることから、狭隘部での施工ではスプレーガンの取り回しができない場合があった。これらの課題を解決するために、以下に示すノズルの改良を行うこととした。

a) 耐摩耗性の向上

ノズルを厚肉化することで、耐摩耗性の向上を図った。具体的には、従来ノズルが0.5~1.0mm厚であったのに対し、改良ノズルでは1.5~4.5mmと増厚させた。

b) 吹き出し口径

吹き出し口径を従来の5mmから7mmに拡大した。これにより、一度に生成できる皮膜面積が約2倍となり、施工能率の向上が期待できる。なお、吹き出し口径の拡大に伴い、粉体の供給口を1箇所から2箇所に変更することで粉体供給量の増大に対応した。

c) ノズル長さの短縮

ノズル長さを従来の120mmから90mmに短縮し狭隘部での施工性を向上させた。

粉体の付着性能に影響を与えるノズル吹き出し口におけるガス速度は、ノズルの断面形状や長さなどに大きく依存するため、前述のノズル径やノズル長さの改良にあたっては、別途流体解析を行って最適な数値を決定した。図-9(a)~(c)の改良点とノズル外観を示す。

d) ジョイントの工夫

狭隘部におけるSZの施工性を向上させるため、ノズル角度を変えられる可変ジョイントと、直角としたエルボジョイントおよび延長パイプを製作した（図-10）。可変ジョイントは、ノズルを固定するアダプタにボールジョイントを取り付け、ノズルを両振りで約30°ずつ可



図-7 コールドスプレー装置

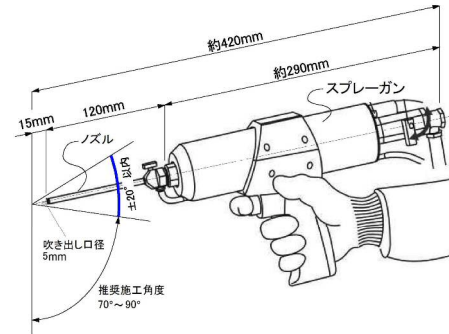


図-8 従来ノズルとスプレーガン

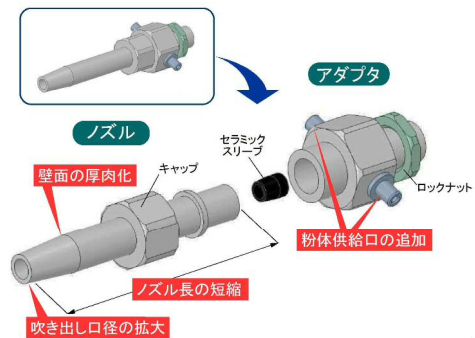
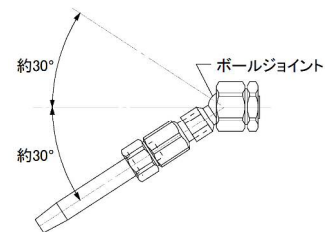
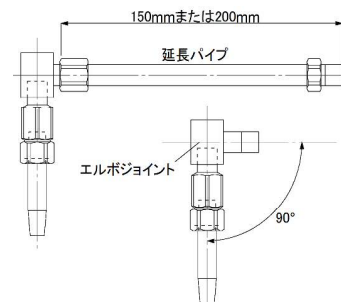


図-9 改良ノズルの概要



a) 可変ジョイント



b) エルボジョイントおよび延長パイプ

図-10 狭隘部の施工性を向上させる各種ジョイント

変としたものである。また、エルボジョイントは、直角のエルボ部分を有するアダプタであり、延長パイプと組み合わせることで、スプレーガン本体が接近しにくい狭隘で奥まった空間への施工性の向上も期待できる。

(2) 施工法の改善

SZは、一般的な施工速度として7mm/sec程度を目安としている。また、ノズル先端と対象物との間は、15mm程度の離隔を一定に保持しなければならないため、長時間の施工となる場合は、その作業姿勢によっては作業員の負荷が大きくなり、SZ皮膜の品質もばらつく可能性がある。そこで、ある一定の範囲を連続的に施工する場合を想定して、半自動溶断機の自走台車にスプレーガンを取り付けることで、SZ施工の半自動化を図っている（図-11）。これにより、施工速度やノズルと対象物との離隔を常に一定とすることができ、SZ皮膜の安定した品質が得られるとともに、作業員の負荷低減に大きく貢献している。



図-11 自走式台車へのスプレーガン設置例



図-12 SZの施工状況

6. 実構造物を対象とした施工事例

実構造物において実施したSZ施工の事例を報告する。

(1) については、腐食環境の厳しい地域において高力ボルト継手部への施工を実施し、経過観察を行った結果を報告する。(2) については、近畿地方整備局管内で実施した施工事例を報告する。(3)、(4) については、ノズルの改良や施工法の改善を行った施工事例について報告する。

(1) 高力ボルト継手部

ここでは、従来ノズルを使用して既設橋での施工性と施工能率を確認した（図-12）。前述の通り、機材は小型かつ軽量であり、コンプレッサー等の周辺基材を含めて、現場での施工性に問題はなかった。図-13に示すように、着目したボルトは、著しく腐食が進んだ状態であったが、SZの施工により、ボルト部表面の素地調整と亜鉛皮膜の生成が良好に行われたことを確認した。また、この部位は上向きの施工であったが、亜鉛皮膜の生成状況は良好であった。

施工終了後、SZを施工したボルトは、亜鉛皮膜上に塗装を施さずに1年間の大気暴露状態とした。施工箇所は、飛来塩分量が最大0.98mddと大変厳しい腐食環境であったにもかかわらず、SZ施工後1年経過後も錆は認められなかった。

施工能率に関しては、トルシア型高力ボルト頭部1箇所あたり約2分で、ナット部1箇所あたり約5分であった。ナット部は、ねじ部の凹凸や腐食の進行も進んでいたことから頭部に比べて施工性は落ちた。なお、新設工事を

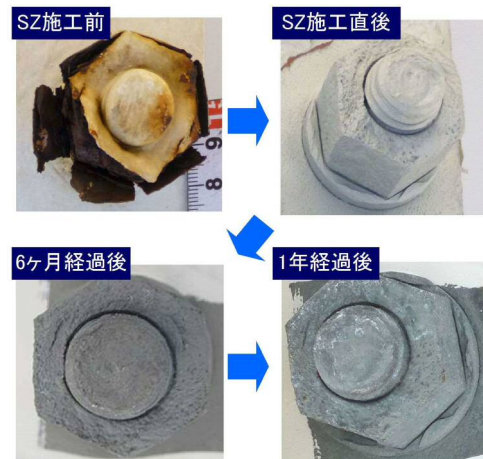


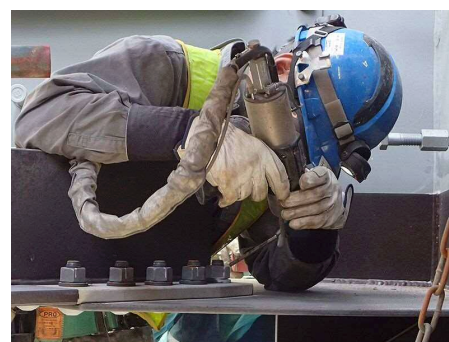
図-13 SZ施工後の大気暴露結果

想定し、事前に浮き錆等を除去したボルトナット部へ施工した場合は、約4分の施工時間であった。したがって、既設の高力ボルト継手部を対象にSZを施工する場合、あらかじめ劣化した塗膜や浮き錆を機械工具等により除去しておくことがSZのみでこれらを除去するのに比べ、コストダウンや施工能率の向上につながるという。

(2) 横構継手部

近畿地方整備局管内では、兵庫県内の新設道路橋において横構の高力ボルト継手部へ施工を行った。本橋では、桁端部の高力ボルトが防食上の弱点部とならないよう、高力ボルトの締付け後にSZを施工した。ここでは、作業姿勢が限定されるため、可変ジョイント+従来ノズルの組み合わせで施工を行った（図-14a）。改良ノズルを用いなかったのは、粉体の吹き付け量が多いため、高力

ボルトのように凹凸がありスプレーガンの取り回しが多い部分では粉体のロスが多くなることが考えられるためである。現時点では、高力ボルト部では従来ノズル、面積の広い部分では改良ノズルというように、部位によってノズルの使い分けを行うことを考えている。SZ施工時は、高力ボルト継手部に結露が発生していたが（図-14b）、300℃程度を超音速で吹き付けるため鋼材表面の水分を瞬時に飛ばすことができた。今回のような結露程度の湿潤状態ならば、事前に拭き取るような処置もなくSZの施工が行えることを確認した。



a) SZの施工状況

(3) 支承部

図-15は、既設道路橋の補修工事において、鋼製支承（BP-A支承）部の塗り替え塗装としてSZを施工した事例である。標準の塗り替え塗装仕様は、オーブンブラスト＋無機ジンクリッチペイント＋重防食塗装であったが、一部の支承にSZを試験的に採用した。支承部は、狹隘でかつ凸凹面が多い形状をしているため、ここでは延長パイプに改良ノズルを取り付けることで施工性を確保した。ノズルの改良によって、現場でのオーブンブラストでは十分に素地調整が施工できない狹隘な場所に対して丁寧にSZを施工できることから、防食性の向上が期待できる。既設橋梁では、このようなBP-A支承をはじめとする鋼製支承が多数使用されていることから、今後も支承部へのSZのニーズはあると考えられる。



b) SZ施工前後のボルト

図-14 横構継手部への施工

(4) 主桁端部

既設道路橋の主桁端部の下フランジにおいて、図-11に示すような、半自動化させたSZ施工を行った。本橋は、伸縮装置からの漏水により桁端部を中心に主桁の腐食損傷が発生していた。特に、主桁下フランジ上面の腐食が著しく、3種ケレンを行った上でSZを施工した。ここでは、比較的広い範囲への施工となったため、品質確保と作業者の負担軽減を目的に半自動施工を行った。ノズルは、従来ノズルと改良ノズルを部位によって使い分けた。



図-15 鋼製支承への施工

SZによる防食下地に重防食塗装を施した仕様は、高力ボルトの重防食塗装仕様として有効である。

(2) SZの施工による熱が、高力ボルトのリラクセーションや強度に与える影響は無い。

(3) ノズルの改良や施工法の改善により、高力ボルト継手部に加え支承部や桁端部へと適用範囲を広げた。

7. まとめ

SZは、素地調整と同時に耐食性の高い緻密な亜鉛皮膜の形成ができ、封孔処理を必要としない、今までにない防食技術である。機材の形状や性能的に高力ボルト継手部のみを対象としてきたが、ノズルの改良や施工法の改善によって適用範囲を広げていることから、同技術への今後の展開が期待できる。

本検討で得られた新しい防食技術であるSZに関する主な知見は以下の通りである。

(1) SZによる亜鉛皮膜は高い犠牲防食機能を有しており、

参考文献

- 1) 榎：コールドスプレーの概要ならびにその軽金属皮膜：軽金属第56巻第7号，pp.376-385，2006.7
- 2) 井口・中東・清川：特殊金属塗装「Smart ZIC」工法による鋼橋の防食技術：YBHDグループ技報No.43，pp.88-91，2014.1
- 3) 清川・井口・木村・下里：コールドスプレー技術で生成する金属皮膜を適用した高力ボルトの防食性能と機械的性質：鋼構造論文第22巻第85号，pp.133-141，2015.3