

連携記事

デスケーリングノズルの開発と評価

Development and Evaluation of Descaling Nozzles

浴本 貴生 (株) 共立合金製作所
ノズル事業部 技術開発部
Takao Ekimoto 部長

1 はじめに

製鉄所の様々な工程に、スプレーノズルが使用されている。鋼板の熱間圧延工程では、鋼板表面に生成する酸化スケール除去にフラットパターンのデスケーリングノズルが用いられている。近年、自動車用鋼板などの要求品質がきびしくなっており、デスケーリングノズル技術はますます重要となっている。使用圧は通常10MPa以上の高压であるため、1957年に耐摩耗性に優れた超合金製のノズルチップが採用された。それ以降は、超合金製のノズルチップが標準となっており、超合金の組成と加工方法が工夫されてきた。超合金チップの製作は、粉末の混合、中間材の製作、成形、焼結、加えて、研削加工が行われる。一方、高いスケール除去性能を得るために、ノズル内部の流路の改善、改良が積み重ねられてきた。1960年代後半にはフィルターが取り付けられ、1980年後半にはノズル内部の流れの整流化のため、整流器付フィルターが採用された。ノズル内部の流れの整流化は、デスケーリング性能に直結するために、その後、各社で改善が進められている。

デスケーリングノズルのスケール除去性能の評価については、オンラインでの評価が難しいため、オフラインの評価が行われており、衝突力試験、アルミ板等の壊食試験が利用されてきた。本稿では、デスケーリングの概要、評価試験につ

いて説明し、デスケーリングノズルの開発に要求される性能について説明する。

2 デスケーリングノズルの概要

図1にデスケーリングノズルの断面図を、図2に内部の流体解析例を示す。最も流速が高くなり、耐摩耗性が要求されるノズルオリフィスに超合金チップ部品が組み込まれている。デスケーリングノズルの標準的な使用圧は、15MPa程度であるが、鋼板品質改善の観点から、除去性能を高めるために高压化の傾向にある。より高压なデスケーリングに対応するために、硬度の高い超合金ノズルチップも採用されている。近年では、フィルター内には流れの整流効果を高める整流器が取り付けられている。ノズル外径は22mmが標準的であり、整流効果を高めるためには、内径とのバランスから適切な長さにする方が良く標準タイプは、175mmの長さに設定している。流量、スプレー角度は、おおむね流量40～200L/min、スプレー角度は25～40°調整している。ポンプの

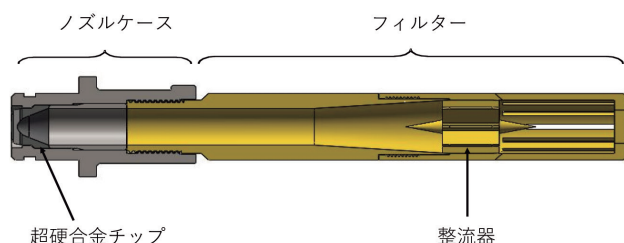


図1 デスケーリングノズルの断面図

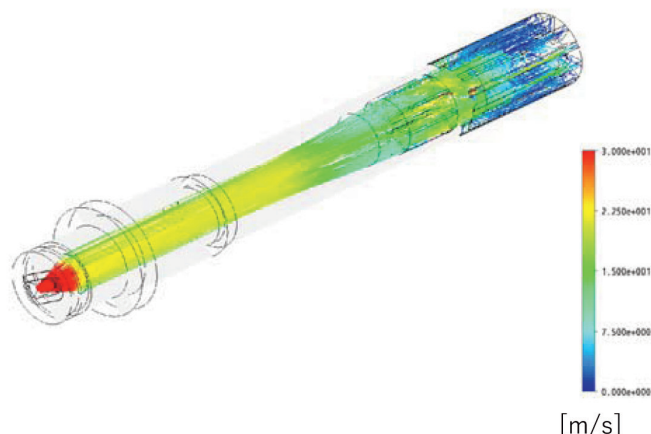


図2 デスケーリングノズル内流体解析による速度分布

吐出圧、流量、及び設置寸法、ノズル配置等の要求仕様の範囲で、スプレー性能を高める内部流路設計をどのようにするかが重要である。近年では、解析技術の向上により、内部構造の設計を行い、流体解析結果と、実際のスプレー性能試験結果を対比して、優れたスプレー性能のノズル開発を進めている。

3 開発における各種性能評価試験と結果

オフライン試験としては、衝突力試験や壊食試験が行われている。以下の説明では、試験方法の説明と、従来ノズルをCノズル、最新ノズルをNノズル、とした評価結果について説明する。尚、試験については、圧力15MPa スプレー角度35°、

流量111L/min という条件で実施した。

3.1 衝突力試験

オフラインのスプレー性能評価試験としては、試験衝突力試験が代表的である。図3に衝突力試験の模式図を示す。所定の圧力にて、要求される流量とスプレー角度となるノズルチップを選定、あるいは試作し、ロードセルを幅方向と厚み方向に移動させることにより衝突力を測定する。ノズルチップの作製においては、幅方向に均等となることが前提であり、衝突力分布の均等性と厚み方向の最大衝突力を評価する。この試験においては、いかに最大衝突力を向上させるかが課題である。図4に距離300mmでのCノズルとNノズルの衝突力データの比較例を示す。二つの機種で幅方向の衝突力均等性は維持されており、Nノズルの最大衝突力比は1.16

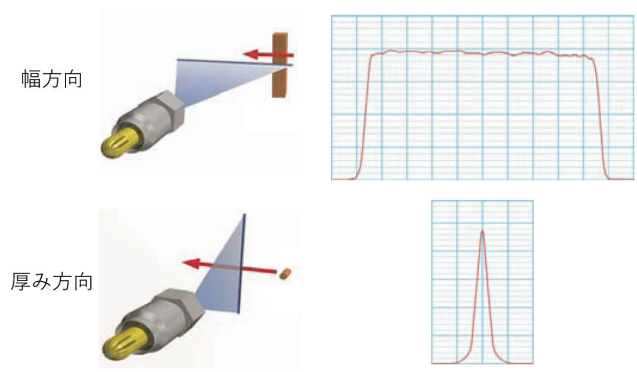


図3 衝突力試験の模式図

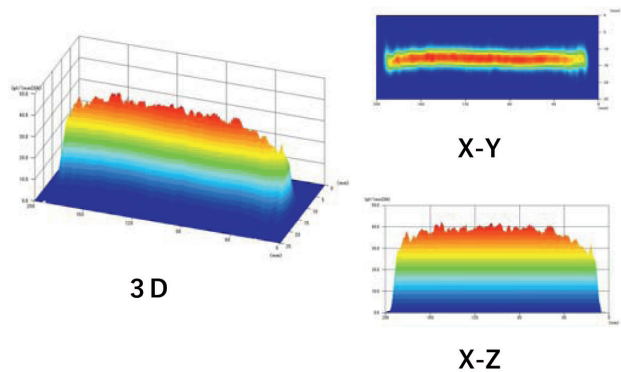


図5 3次元の衝突力分布

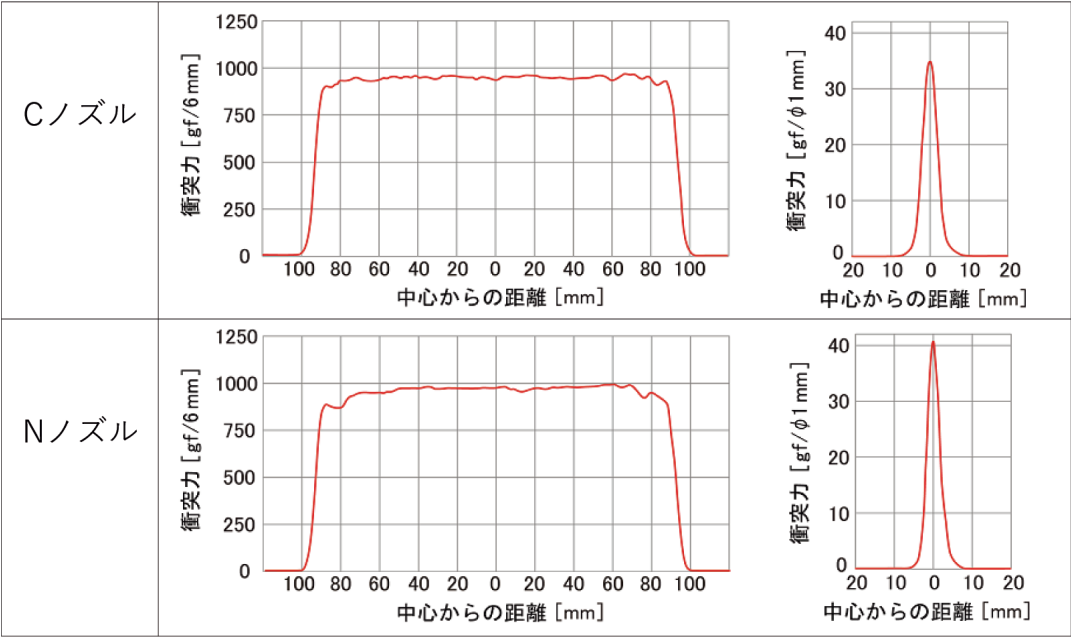


図4 衝突力分布の比較

倍で改善されている。近年では、図5に示す3次元の衝突力試験も実施しており、衝突試験において、より詳細な情報が得られるようになった。

3.2 壊食試験

デスケーリングにおける鋼板表面のスケール剥離は、液塊、液滴のウォーターハンマー現象が主に影響していると考えられている。そのため、アルミ板 (A5052) 等により壊食試験を実施している。図6に、壊食試験の模式図を示す。壊食試験では、自動シャッターの開閉により、所定時間噴流を試験板に衝突させて、壊食質量を測定する。図7に、壊食時間と壊食速度の試験結果を示す。時間の経過により、アルミ板壊食速度は高くなり、一定時間経過後に低下に転じる。壊食速度の低下は、液だまりが発生することにより、壊食作用が弱まるためと考えられる。このような壊食予備試験を実施した後、適切な評価時間を設定し、同一の試験板及び時間で比

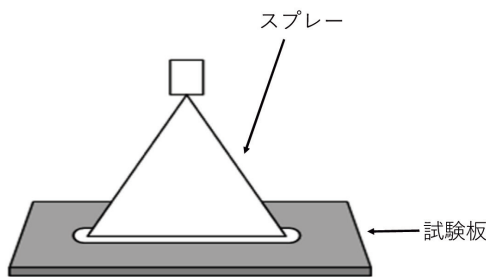


図6 壊食試験模式図

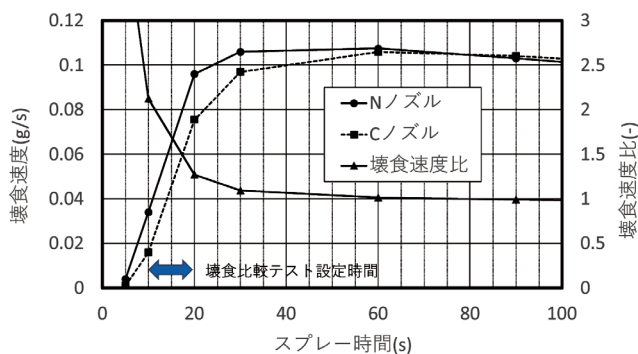


図7 壊食速度と壊食時間

表1 デスケーリングノズルによる最大衝突力と壊食速度比の比較

ノズルタイプ	スプレー距離 [mm]	スプレー厚み [mm]	最大衝突力 [N/mm ²]	壊食速度比 [-]
Cノズル	100	3.0	2.88	1.00
Nノズル		2.6	3.29	1.58
Cノズル	200	5.2	0.85	1.00
Nノズル		4.9	0.97	1.30
Cノズル	300	7.1	0.44	1.00
Nノズル		6.3	0.51	1.41

較壊食試験を実施する。以下で説明する壊食試験結果は、Nノズルの壊食速度をCノズルの壊食速度で除した壊食速度比として示した。このような壊食試験は、距離や流量により、試験板を変更する必要がある、金属板以外の試験板も使用されることがある。また、壊食量だけでなく、図8に示すように、試験片の壊食深さや壊食の均等性を評価することが可能である。

4 デスケーリングにおける水撃力について

表1に、CノズルとNノズルについて、最大衝突力と壊食試験結果を距離ごとに示す。Nノズルは、Cノズルに比較して、最大衝突力、壊食壊食速度比ともに高い。加えて、Nノズルでは、Cノズルと比較して、厚み方向のスプレー厚みが小さくなっている。デスケーリング能力評価モデルが報告されており¹⁾、総衝撃力 F_i と単位衝撃力 E_i は、下記のように求められる。

$$F_i \text{ [N]} = u^2 \times a \times \rho \times C \times 3/2D \times \alpha \times t \dots\dots\dots (1)$$

$$E_i \text{ [Pa]} = F_i / \pi \times W \times d \times 0.25 \dots\dots\dots (2)$$

u : 液滴流速 [m/s], a : 吐出面積 [m²],
 ρ : 液滴密度 [kg/m³], C : 音速 [m/s]
 D : 液滴径 [m] α : 液滴衝突係数 [-],
 t : 液滴衝突時間 [s], W : スプレー幅 [m],
 d : スプレー幅 [m]

デスケーリングにおける鋼板表面の壊食は、液塊ないし液滴の衝突によって発生する衝撃圧 $\rho \text{ CU}$ によって生じ、デスケーリング能力は、総衝撃力と単位衝撃力によって、定量的に評価できる。デスケーリング性能を向上させるためには、液滴速度を高めることが最も重要であり、スプレーの厚みも小さい方が良い。加えて、水撃力を高めるために、液滴径についても考察する必要がある。デスケーリングの噴射距離が

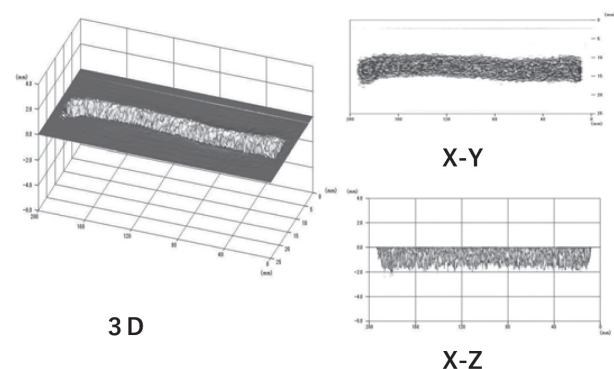


図8 3次元の壊食分布

液滴挙動に与える影響については、すでに詳細に報告されている²⁾。同報告では、圧力15MPaにおいて、30-400mmの各距離で、高速度カメラにより流体挙動が観察されている。噴射距離60mmで連続流が破断し、120mmで破断した流体が液塊に分断されている例が示されている。図9は、位相ドップラー法 (PDPA法) にて、15MPa 流量66/min 距離150mmで、噴流の液滴サイズと速度を測定した結果である。6万個の液滴サイズと液滴速度の関係を示したものである。より大きな液滴サイズでは、速度は維持されており、200 μ mより小さいサイズの液滴は減速が大きい結果となっており、液滴サイズが液滴速度に影響することを示唆している。ノズルから噴射された噴流は、図10に示すように、連続域から周囲気流との速度差により、混合域を経て液滴に分裂していく。銅板に衝突する際には、速度の高いより大きな液塊、液滴の状態で衝突させる必要がある。スプレーの連続域を長く保ち、スプレー厚みを小さくするノズルの流路設計をすることにより、結果的に、厚み方向の最大衝突力は高くなり、よりサイズの大きい液塊、液滴の衝突によって、水撃力が高くなると考えられる。従って、デスケーリングノズルの開発では、所定量水、所定噴射幅で、均一な衝突力分布であり、圧力損失を抑制し、しかも、整流効果を高めた流路設計を行い、噴射

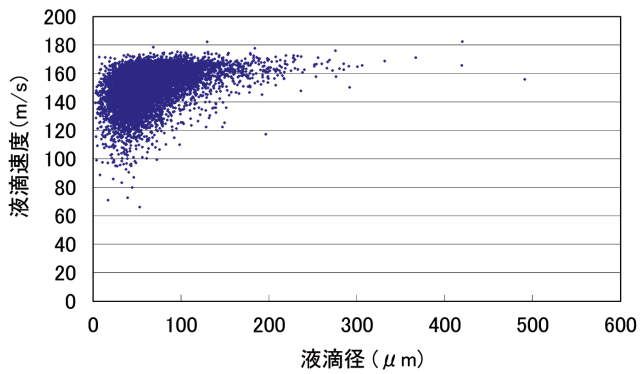


図9 位相ドップラー法により測定された噴流の液滴径と速度

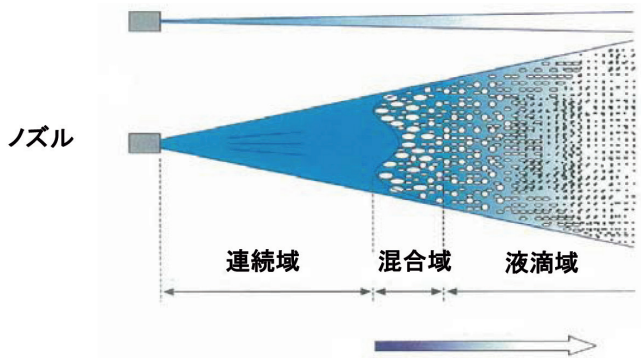


図10 噴流の液滴分裂状態の模式図

厚みを小さくし、単位衝撃力を向上させることが主要な課題であると考えられる。

5 スケール除去試験

実際のデスケーリングにおいては、水冷による熱応力等も影響していると考えられている³⁾。試験銅板を加熱してスケールを生成させ、その試験加熱銅板を移動させて、スケールの除去性能を評価することも報告されており³⁾、衝突力の異なる条件で、スケール除去試験を試みた。試験銅板を同一条件で加熱し、スケールを発生させ、スケールの除去面積を比較した。試験銅板はSi1.5%を含む表2に示す成分のばね鋼SUP-6 (h100mm×w200mm×t8mm) を#800番で研磨し使用した。銅板の加熱には電気炉 (最大加熱温度1150℃) を使用し、加熱温度は1100℃で昇温後、80分間保持して、スケールを発生させた。スケールが生成した試験銅板を所定位置まで移動して設置し、その後、エアシリンダーを使用し1.3m/sで移動させてデスケーリングを実施した。試験後は、Arガス雰囲気内で保管し、冷却した。試験ノズルは、表3に示す4種類のノズルを使用した。水冷の影響をなるべく排除し、衝突力の影響を確認するため、同じ流量モデルのノズルでスプレーの広がり角度を変え噴射幅が同レベルになるように噴射距離を設定し行った。圧力15MPa 距離300mmという条件にて実施した試験前後の銅板の写真を図11に示す。除去率は試験後の銅板をデジタルカメラで撮影し、スケール除去部分を画像処理により求めた。評価面積はデスケーリング後の銅板表面写真の白枠で示す噴射幅140mmと上下10mmを除いた高さ80mmの範囲とした。試験結果を図12に示す。データにバラツキがみられるものの最大衝突力が0.35N/mm²以下の条件では、約60%程度までのスケール除去率となっているが、0.4N/mm²以上になると平均90%と比較的安定してスケールが除去できている。直射のデスケーリングにおける

表2 試験銅板SUP-6の成分

成分 (%)							
C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr
0.6	1.54	0.73	0.07	0.1	0.1	0.04	0.2

表3 加熱銅板によるスケール除去試験の条件

ノズルタイプ	スプレー角度 [°]	スプレー距離 [mm]	スプレー幅 [mm]	最大衝突力 [N/mm ²]
Cノズル 1	27	275	144.0	0.161
Cノズル 2	35	218	140.6	0.299
Nノズル 1	27	275	144.0	0.347
Nノズル 2	35	218	141.0	0.429

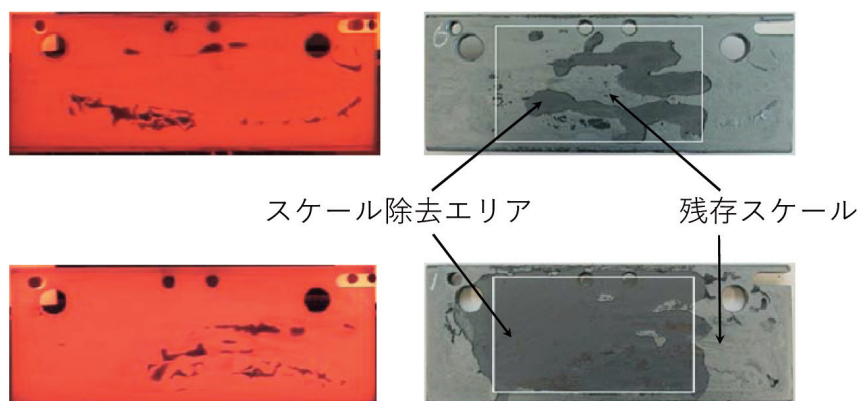


図11 加熱試験銅板とデスケーリング後の試験板

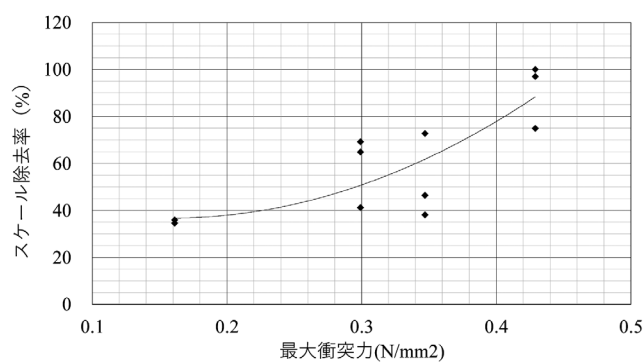


図12 最大衝突力とスケール除去率の関係

剥離挙動に関する基礎研究においても、圧力低下に伴い、スケール剥離はし難くなり、一定の圧力以下ではまったく剥離しなくなったことが報告されている⁴⁾。このようなことから、スケール除去には、ある一定程度の衝突力が必要であると考えられる。

6 まとめ

- ・デスケーリングノズルの評価結果から、最大種突力の向上と、液滴分裂の抑制が、ノズルの開発に重要であることを説明した。
- ・熱間のスケール除去試験を試み、一定の衝突力値がスケール除去に影響していることを示した。

参考文献

- 1) 荻部健太, 西山貴史: SCEJ 38th Autumn Meeting, (2006)
- 2) 田村雄太, 上岡悟史, 木村幸雄, 壁谷和久: 鉄と鋼, 104 (2018) 10, 53.
- 3) 上岡悟史: CAMP-ISIJ, 24 (2011), 41, CD-ROM.
- 4) 岡田光: 噴流工学, 16 (1999) 2, 32.

(2019年3月27日受付)