

耐食性の観点から見た 金属部材用

Additive Manufacturing の現状と key point

橋爪修司*

HSS Co-labo, 公益社団法人 腐食防食学会 腐食センター

Present Status of Additive Manufacturing for Metallic Components and Key Point from the Viewpoint of Corrosion Resistance

Shuji Hashizume*

HSS Co-labo, The Corrosion Center, the Japan Society of Corrosion Engineering

*責任著者 (Corresponding Author) 〒113-0033 東京都文京区本郷 2-13-10 湯浅ビル 5 階 (5F Yuasa Build. 2-13-10 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-0033, Japan)
Email: shashizume2@jcom.zaq.ne.jp

Recently, careful attention has been paid to additive manufacturing for metallic components. Additive manufacturing will be effective when a small amount of metallic components are necessary in short time. Additive manufacturing equipment for metallic components showed higher cost than that for plastic components. Therefore, cheaper methods have been recently developed. This report will focus to metallic components. Activity for utilize additive manufacturing in oil and gas industry and examination of corrosion performance are reported. Key points of producing superior corrosion resistant alloys metallic components by additive manufacturing will be discussed.

Key words : Additive Manufacturing, Metal, Corrosion Resistance, 3D printer

1. はじめに

近年 Additive Manufacturing (付加製造) による部品の製造が目立っている^{1),2)}。研究面から見ると, Additive Manufacturing の機械的特性に関する論文数は 2015 年前後から急激な増加が確認される³⁾。また, 2022 年 5 月には USA にてバイデン大統領から AM Forward という, Additive Manufacturing の活用によるサプライチェーンの回復力の向上を目的とした政策が始動した。これは USA 国内の製造業が Additive Manufacturing に取り組むことでローカルなサプライチェーンを成長させることを目指している。このように USA では Additive Manufacturing により経済の活性化の後押しが実施され始めた。

ISO/ASTM52900:2021⁴⁾によれば, Additive Manufacturing は以下のように定義される。

1. 部品を製造する際, 3D model data から材料を Joining (結合)するプロセスで, 通常は層の積み重ねを行なう。
2. Subtractive (引き算) や Formative (造型) の製造方法と対比される。具体的には, 切削方法を用いた製造方法や鋳造のように型に金属を流し込む製造方法と対比される。

Additive Manufacturing を実現する装置が 3D printer で, 従来の切削等による手法と比べると, 短納期で少量の部品が必要な場合, メリットは大きいと考えられる。金属の場合はプラスチックに比べ装置導入コストが高く, 安価な手法が近年導入され始めている。

本報では対象を金属に絞り, 石油産業における Additive Manufacturing 導入の取り組みと, 耐食性に対する検討に関して主に紹介する。Additive Manufacturing

により耐食性の優れた金属部材を製造するための key point に関して議論したい。

2. 金属部材用 Additive manufacturing の製造方式

2.1 PBF (Powder Bed Fusion, 粉末床溶融結合)⁵⁾

Fig. 1 に PBF による製造装置の概要を示す。原料の金属粉末を平面に敷き詰め, 必要な部分にレーザーまたは電子ビームを走査しながら照射し, 粉末を溶融する。この工程を何層も繰り返し, 目標の 3 次元構造物を得る。製造雰囲気はレーザーの場合は Ar が一般的で, 電子ビームの場合は減圧雰囲気となる。電子ビームの場合は粉末を敷き詰めた後に予備過熱を実施するのが一般的である。従来の切削による手法で得られた構造物に比べ, 急速な加熱, 冷却による凝固のプロセスを経て成形されたものとなる。

2.2 DED (Directed Energy Deposition, 指向性エネルギー堆積)⁵⁾

Fig. 2 に DED による製造装置の概要を示す。原料はワイヤーまたは粉末で, これらを供給しながら熱源を照射し, 構造物を得る手法である。熱源はレーザーが一般的であるが, 電子ビームやアーク生成によるものもあり, 既存の肉盛りや溶接に近い製造方法である。アーク溶接を応用したものは Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) と呼ばれ, DED に分類される。粉末の使用が必須ではないので, PBF に比べ, 装置が扱いやすい。また, レーザー使用の場合, PBF に比べ, 一般的にパワーやビーム径が大きく, スキャンスピードは遅く, 成形層は厚く, 冷却速度は遅くなる。比較的大きな造形に有利

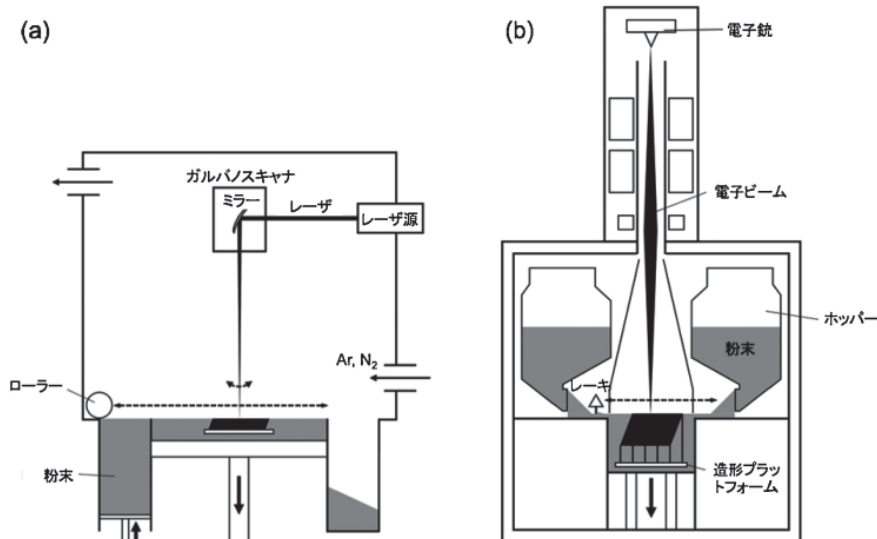


Fig. 1 Appearance of Additive Manufacturing equipment by PDF. (a) SLM (Selective Laser Melting). (b) EBM (Electron Beam Melting)⁵⁾

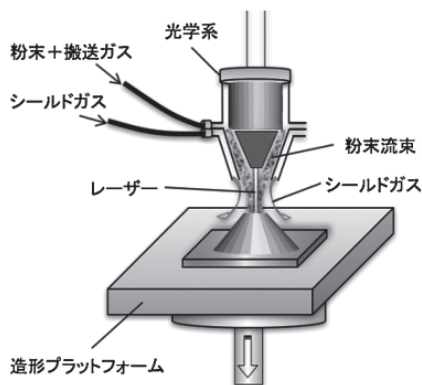


Fig. 2 Appearance of Additive Manufacturing equipment by DED⁵⁾

である。

2.3 BJT (Binder Jetting, 結合剤噴射)⁶⁾

BJTは上記の2手法とは異なり、レーザーや電子ビームは使用しない。金属粉末に液体の結合剤を噴射して構造物を作成し、その後炉にて焼結処理をする手法である。粉末冶金の分野で金型を使用し、成型、焼結していたプロセスの成型の部分を3D printerに変えたものと理解できる。PBFやDEDに比べ、装置導入が安価である。

3. 石油産業における導入の取り組み

3.1 API standard 20S

API (The American Petroleum Institute, アメリカ石油協会) は2021年10月にAPI standard 20Sの初版を発行した⁷⁾。これは石油および天然ガス産業で使用されるAdditive manufacturingで造形された金属部品の製造プロセス、製品の両方の認定方法を記述した規格である。造形形式は、PBF (Powder Bed Fusion), DED (Directed Energy Deposition), BJT (Binder Jetting) に分類される。技術的な品質要求はAMSL (Additive Manufacturing Specification Levels) と呼び AMSL1, AMSL2, AMSL3 の3段階に分類する。末尾の数字が大きいくほど要求項目は

増加する。また、原料である粉体、ワイヤー等に関する規定、基盤を用いる場合の規定、使用する装置のメンテナンスプラン、First Article (初回製品) に対する要求項目、実生産製品に対する要求項目が記述されている。製品の品質に関しては化学成分分析、引張、衝撃、硬度等の機械的特性、金属組織観察、密度測定に関しては記述があるものの、耐食性に関しては初版では触れられていない。なお、この規格では実施すべき項目やその方法に関して議論しているものの、しきい値に関しては触れられていないので、実使用に関しては別途仕様設定が必要となる。

引き続き、APIは2022年8月にAPI standard 20Tにて高分子材料部品に関する同様の規格の初版を発行した⁸⁾。基本思想は金属と同様で、造形形式は異なる。

3.2 AM Energy Network による適用部品等の調査結果⁹⁾

AM Energy Networkは2020年にエネルギー関連の会社とAdditive Manufacturingの工業化を促進する会社の協力的な関係を構築できるように設立された。主な目的は革新的で、持続可能な考え方、創造性を促進する知識の共有であり、将来の工業化に寄与すると考えられた。石油ガスのみならず、原子力、再生可能エネルギーなどエネルギー関連領域の金属、非金属を対象としている。2023年1月には、メンバーの専門知識を活用して、Additive Manufacturingに対する業界の認識を評価し、導入に対するギャップを特定する調査を開始した。

その結果、返答者の90%がすでにAdditive Manufacturingを利用し、50%が試作段階、40%が実応用レベルにあった。エネルギー関連領域においてAdditive Manufacturingが重要である理由として、リードタイムの短縮が最重要で、続いて特性改善、設計の自由度向上、ライフサイクルコストの低減、持続可能性が挙げられた。先行投資コストの削減は重要性の観点から低いランクとなった。

一方、Additive Manufacturing採用の障壁として、工業的仕様に合致可能な製品、工程の評価にコストや時間がかかることが最も重要な項目として挙げられた。これは、評価方法や実機経験の不足による、ユーザーの製品

特性に対する信頼性の欠如の表れである。その他に、設計思想の変更が大きな障壁として挙げられた。

最も望まれる手法は金属ではレーザーによる PBF、高分子材料の場合は、Fused Filament Fabrication (溶融フィラメント製造)であった。金属の場合は興味のある手法として、レーザーまたはアークにより DED が挙げられた。

材料の観点から見ると、ステンレス鋼が最も興味があり、Ni 基合金、Ti 合金、Al 合金が続いた。

材料に関する障壁として、信頼性があり基礎的なデータの欠如が挙げられる。この中には耐食性に関連するデータも含まれる。また、工業化のためには現在の規格と協調したドキュメントの必要性が認識された。

設計に関する障壁に対しては、いくつかの対応が示唆された。また、この調査書の中では、調査では重要と認識されていない熱処理に関して議論している。Additive Manufacturing により製造された部品の組織が従来法のそれと異なる。したがって、特別な熱処理の必要性の検討のために基礎的なデータの充実などやるべきことは多々あるとしている。この点に関しては筆者も同意見である。さらに表面仕上げの障壁に対しても言及しており、耐食性のみならず、クリープ特性、疲労特性を重要な観点としている。

さらに本調査では、エネルギー関連各分野における Additive Manufacturing により製造された金属、高分子材料の部品の適用状況をまとめた。本報では、その報告より石油ガス産業において実機レベルの適用がなされている部品に関して、PBF、DED、BJT と金属材料の種類別に抜粋して、筆者がまとめたものを Table 1 に示す。また、同様なまとめで、デモ完了レベルのものを Table 2 に示す。レーザーによる PBF を用いた 316L の適用が最も多く認められる。

さらに部品の Qualification (適格性確認) に関して議論が行われた。Part Family (どこまでを同じ部品として扱うか)、非破壊検査、Online Monitoring が重要と考えられ、シミュレーション技術は特性の予測には有効であるが、適格性確認への有効性は低いとした。

最終的に、Additive Manufacturing の工業化のためには今後、実機レベル適用部品の拡充、幅広い分野の協力、適格性確認手法の確立、Part Family の定義、材料データベースの確立、トレーニングや教育等を必要とした。

Table 1 Mature product of 3D printed metallic component in Oil and Gas sector modified by published report⁹⁾

Components	Method	Materials
Disc, Ball, Gate, Trim, Seat, Seals in Valves	LPBF	718, 625, CoCr, 316L
Blades in Pumps, Compressors	LPBF	Ti, 316L
Impeller in Pumps, Compressors	LPBF	316L, Duplex, 15-5PH*, 17-4PH, 718, 625, Al
Impeller in Pumps, Compressors	DED	316L

* : Author modified to 15-5 due to seemed to be typo(Original description was 15-4).

Table 2 Demonstrator completed product of 3D printed metallic component in Oil and Gas sector modified by published report⁹⁾

Components	Method	Materials
Disc, Ball, Gate, Trim, Seat, Seals in Valves	DED	316L, 625, 718
Impeller in Pumps, Compressors	BJT	316L
Guar in Pumps, Compressors	BJT	17-4PH
ICD, Flanges, Back up ring, Reamer Shoe, MWD/LWD, Seals, Connectors in Oilfield Tooling	LPBF	718, 625, 316L
Separator, Pressure Vessels, Cracking Catalyst, Heat Exchangers, Under Hot Pipe Corrosion, Pigs and ILI tools in Petrochemical/Pipe line	LPBF	316L, Hynes 230, 625

4. 耐食性に関する検討

4.1 AMPP activity TR12522

AMPP(The Association for Materials Protection and Performance)では2021年8月、Additive Manufacturing を使用して製造された金属製品の腐食試験に関する知識の現状をまとめ、将来適用される試験方法に対する基礎を提供することを目的に TR21522 : Corrosion Testing for Additive Manufacturing という委員会を立ち上げ活動を始めた。具体的には、約30名のエンジニアがこの活動に委員として参加し、約400の Additive Manufacturing の耐食性に関する論文や学会発表を読み、内容を腐食メカニズム別、材料別、手法別、従来製法から得られた部品との比較等の視点からまとめた。この文献のまとめから、Additive Manufacturing により製作された部品の耐食性を評価する場合の特徴、注意点、今後の課題等を委員間で議論し、レポートにまとめた。このレポートのドラフト版は2023年11月に完成し、レビュー後に公開される予定である。なお、活動内容に関するより詳細な報告^{10),11)}は公開されている。

筆者もこの活動に参加し、いくつかの文献を熟読し、議論に参加した。この中で Additive Manufacturing を理解するうえで重要と考えられる内容を紹介する。

Fig. 3¹²⁾はステンレス鋼の耐食性に関する研究の材料と製造方法および試験環境をまとめたものである。Additive Manufacturing により製造されたステンレス鋼金属部材の全景を確認するために有効である。材料別ではオーステナイト系ステンレス鋼の316Lが圧倒的に多く、析出硬化型マルテンサイト系ステンレス鋼、二相系ステンレス鋼の研究が認められる。市販の粉末を原料にする場合が多く、材料の選択は現状限界がある。製造方法としてはSLM(Selective Laser Melting, レーザーを使用したPBF)が圧倒的である。試験環境は塩化物含有環境が多い。なお、ステンレス鋼以外の金属の研究も盛ん

に行われ、AMPP activity TR12522 では析出硬化型 Ni 基合金の Alloy 718, Ti 合金, Al 合金, Co-Cr 合金が検討されている。

Fig. 4¹³⁾ は SLM により製造された 316L に熱処理を与えたときの MnS 介在物の単位面積当たり数量の変化を示したものである。製造まま、あるいは 1000°C 以下の熱処理では MnS 介在物は認められないが、1100°C 以上の熱処理で MnS 介在物が認められる。熱処理時間は増加すると単位面積当たりの MnS 量は増加する。この原因は明確に立証されていないが、急速凝固 (10^6 - $10^{8^{\circ}\text{C}}/\text{sec}$ 以下) された SLM 製造ままの 316L は熱力学的に非平衡な状態であるが、より高温の熱処理を与えられるほどより平衡状態に近づいてきた結果と考えられている¹³⁾。なお、酸化物系の介在物は製造まま、熱処理材すべてで存在が確認された。ただし、1000°C 以下の熱処理では Mn-Si-O であったが、1100°C 以上では Mn-Cr-O が確認された。

これら SLM により製造された 316L (熱処理有無を含む) に商用材を加えて、常温の 0.6 M NaCl 水溶液中で動電位分極曲線を行ない、Breakdown Potential を測定した結果を Fig. 5¹³⁾ に示す。図中の点と error bar は少なくとも 5 回の測定を行った結果から得られた平均値と標準偏差である。商用材に比べ、SLM 製造まま、あるいは

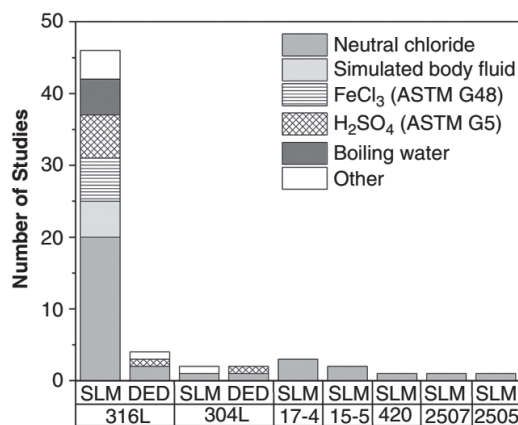


Fig. 3 Distribution of corrosion studies in terms of stainless steel, process and environment. (Reprinted with permission from E.J. Schindelholz, et al., *Corrosion* 77, 5 (2021), ©2021, NACE International)¹²⁾

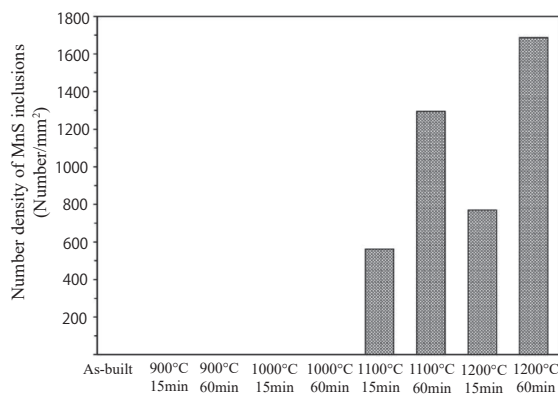


Fig. 4 Effect of heat treatment conditions on the number density of MnS inclusions in the SLM produced 316L SS¹³⁾

1000°C 以下の熱処理では貴な Breakdown Potential となる。1100°C 以上の熱処理では商用材と同様の Breakdown Potential を示す。MnS がステンレス鋼の孔食発生に影響を与えることはよく知られており、Fig. 5 の結果は MnS 介在物が関与していると考えられる。

熱処理を与えることによる耐局部腐食性の低下は他の文献でも認められた。Fig. 6 は SLM により製造された 316L に 1050°C または 1200°C の熱処理を加えた試験片を用いて、常温の 3.5% NaCl 水溶液中で動電位分極曲線を行ない、Pitting Potential を測定した結果である¹⁴⁾。熱処理時間を变化させたこの図では熱処理温度が高いほど、熱処理時間が長いほど、Pitting Potential は卑な値となる。1200°C で 1 時間以上の熱処理を与えると、従来の製造方法で作成された 316L と同等の Pitting Potential を示す。この論文の筆者は原因として、熱処理により残留応力が解放された結果、pore の拡大による不働態皮膜の劣化を原因のひとつに挙げている。ただし、pore のサイズ分布などは評価していないので、将来の研究に期待するとしている。

熱処理を与えることによる耐局部腐食性の低下は析出硬化型ステンレス鋼である 17-4PH ステンレス鋼 (Type 630) でも確認された¹⁵⁾。SLM により製造された 17-4PH ステンレス鋼を 1050°C に 1 時間保持した後水冷した材料と SLM

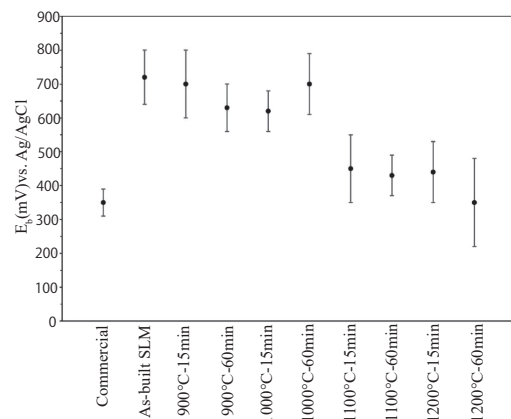


Fig. 5 Breakdown potential obtained from polarization curves for the heat treated SLM produced 316L SS specimens in 0.6 M NaCl solution at room temperature, Error bars represent the standard deviation obtained from at least five measurements¹³⁾

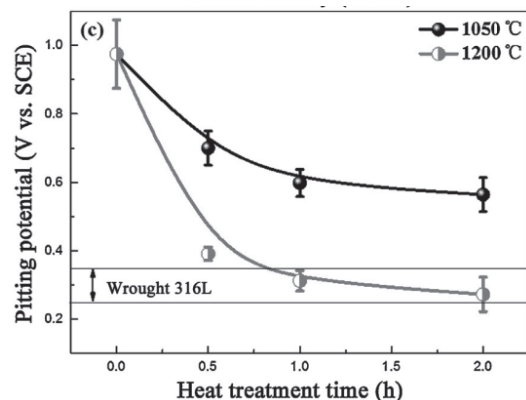


Fig. 6 Pitting potential of SLMed 316L stainless steel after heat treatment in 3.5 wt% NaCl solution at room temperature¹⁴⁾

製造ままの材料の孔食電位を比較した。常温、30 g/l NaCl 水溶液中で pH を 1.5, 2.5, 3.5 に調整した環境で測定した。すべての環境中で、SLM 製造まま材の方が孔食電位は貴な値を示した。原因のひとつに MnS が熱処理後に形成されたことを挙げている。この論文の中で筆者が興味をもったのが、17-4PH ステンレス鋼 SLM 製造ままの組織が主にフェライトであった点である。SLM 製造ままの組織は冷却速度は速いが、従来見慣れたアーク溶接ままの組織と大差はないだろうと想像されるが、17-4PH 鋼は一般的には溶接材に用いないので、この材料の熱処理後の組織を確認している筆者にとっては目からうろこが落ちた感覚であった。Additive Manufacturing により製造された材料の耐食性を議論する場合、関連性の強い金属組織に注意を払う必要がある。

4.2 国内の動向

国内の Additive Manufacturing の耐食性に関連する報告もいくつかあるので紹介したい。堤らは日本金属学会の若手研究グループ公募に採択された「Additive Manufacturing (付加製造) による超高耐食性金属材料の開発研究」にて、2018 年 3 月から 2 年間活動した¹⁶⁾。活動の成果として SLM により製造されたマルテンサイト系ステンレス鋼の耐局部腐食性を MnS との関連で議論している。引き続き、関連の研究成果が当学会の講演大会で発表^{17), 18)}された。海藤らはレーザーを用いた PBF と電子ビームを用いた PBF により製造した Type316L の耐局部腐食性を比較した^{19) - 21)}。このように現状は極めて限られた報告しか確認されていない。

Additive Manufacturing 全般の国内の動きとして、AM 研究会 (<http://www.mat.eng.osaka-u.ac.jp/msp6/nakano/jiam/>) を紹介したい。この研究会は、日本金属学会における産学協創研究会のひとつとして、2022 年 4 月 1 日に発足した。産学官、学協会の枠組みを超え、Additive Manufacturing の学術、技術の構築を行なうことにより、デジタル技術を駆使して Additive Manufacturing 技術を日本に広く普及させ、日本の製造技術の強化を図ることを目的とした。また、政府への政策提言、日本学術会議での活動などの取りまとめ、「日本 AM 学会」の設立を目指し、金属にとどまらず、高分子、セラミックスやそれらの複合材料など広い分野を対象にした。今後の活動が期待される。

5. 耐食性の観点から見た Key point

耐食性の観点から見た Additive Manufacturing により製作された部品の製作プロセスの重要な点を Table 3 に示し、議論したい。第 1 に後熱処理に関する検討である。Additive Manufacturing で製作された部品の製造ま

Table 3 Key point from the view point of corrosion performance

Number	Item	Remarks
1	Post Heat Treatment	Rapid solidification
2	HIP apply	Internal defects such as pore
3	Effect of Oxygen	-
4	Selection of powder	-

まの金属組織は急速凝固の影響を強く受けており、偏析も含めて注意深い検討が必要である。また、製造時の走査速度等のパラメーターや部品の大きさによりその組織は変化するものと考えられる。しかも、その変化の度合いは材料により異なる。このように製造ままの組織の不均一さを解消できるのが後熱処理であるが、従来法で製作されたものとは元の組織が異なるので、例えばオーステナイト系ステンレス鋼の場合は溶体化熱処理温度等の最適化が今後必要になると考えられる。析出硬化型ステンレス鋼の場合は時効処理が加わるので、オーステナイト系ステンレス鋼に比べ、更に複雑で詳細な検討が必要と考えられる。他分野ではあるが、near- α -Ti 合金に関する後熱処理温度の検討がクリープ特性の観点から実施された報告²²⁾などがすでにある。

第 2 に、HIP (Hot Isostatic Pressing) 適用の可否である。HIP とは高温高圧環境に部品をさらず処理プロセスで、具体的には約 2000°C 以下の高温と 200 MPa 以下の高圧環境で熱処理するプロセスである。Additive Manufacturing で製作された部品は従来法で作成された部品に比べ、熱間や冷間の加工が伴わないために pore 等の内部欠陥の存在に注意が必要である。内部に存在する内部欠陥は HIP を適用すれば低減することが可能である。HIP 適用による時間とコストの発生から工業的には望まれるプロセスではない。どの程度の内部欠陥が工業的に許容されるのか今後の検討が必要であろう。

第 3 に酸素の影響である。固溶酸素の問題、熱処理や溶接時等に表面に生成する酸化皮膜の問題に分けられる。前者に関しては、原料の粉末が酸化物に覆われており、しかも十分に酸素除去を行わないので、従来法で製作された部品に比べ固溶酸素量は多くなると予想される。固溶酸素が機械的特性に影響する場合は多いので、耐食性の観点から見ると、切れ欠きや応力の存在と共に耐食性を評価する場合は注意が必要と考える。後者に関しては、熱処理や溶接に比べ雰囲気をコントロールした状態で Additive Manufacturing は実施されるので、酸化皮膜は薄くなると考えるが、最終工程に切削等の酸化物除去処理の必要性を検討すべきである。

第 4 に挙げたいのが、粉末の選定である。現状は市販の粉末を使用している。必ずしも、Additive Manufacturing に検討されたものではなく、規格の範囲内の成分が満たされればいいものという概念で製作されたものである。どのような化学成分が最適か検討が必要と考える。

なお、前述の AMPP activity TR12522 の議論の中では、異方性、製造ままの部品表面の粗さに関しても注意を払うべきという意見が出ていた。最終的には現状得られつつある Additive Manufacturing と従来法で製作された部品との違いの基礎的な知見をもとに、工業化された部品の実際の使用環境での Performance を確認し、フィードバックしてより良い方向に改善し続けることが必須と考える。これが工業化を目的とするエンジニアリングの使命であると考えられる。

6. おわりに

本報では対象を金属に絞り、現在の石油産業における Additive Manufacturing 導入の取り組みと、耐食性に対

する検討に関して主に紹介した。さらに Additive Manufacturing により耐食性の優れた金属部材を製造するための key point に関して議論した。現状、レーザーを使用した PBF が主に検討されていることがわかった。基礎研究自体は進められているが、工業化には多くの点を克服する必要がある。既存の金属材料の組織、熱処理、溶接、粉末冶金等の知識が有効に利用できる分野であると考えられる。耐食性に関してはこれらの知見をもとに、実機 performance をフィードバックしながら改善することが重要と考える。本報が Additive Manufacturing で製造された部品の工業化に役立つことを期待する。

参考文献

- 1) 榎原弘之：計測と制御, **54**(2015)381-385.
- 2) 新野俊樹：化学工学, **84**(2020)171-174.
- 3) García-León, R.A., Gómez-Camperos, J.A. Jaramillo and H.Y. Sciento: J. Mater. Eng. Perform. **30**(2021)4724-4734.
- 4) ISO/ASTM 52900:2021. Additive manufacturing - General principles - Fundamentals and vocabulary, ISO/ASTM (2021).
- 5) 小泉雄一郎, 千葉昌彦, 野村直之, 中野貴由: までりあ, **56**(2017)686-890.
- 6) Amir Mostafaei, Amy M. Elliott, John E. Barnes, Fangzhou Li, Wenda Tan, Corson L. Cramer, Peeyush Nandwana and Markus Chmielus: Prog. Mater. Sci., **119**(2021)100707.
- 7) API Standard 20S, Additively Manufactured Metallic Components for Use in the Petroleum and Natural Gas Industries, First Edition, API (2021).
- 8) API Standard 20T, Additively Manufactured Polymer-based Components for Use in the Petroleum and Natural Gas Industries. First Edition, API (2022).
- 9) AM Energy Network, Committee Materials and Design for Additive Manufacturing, Market Survey Results and Initial Recommendations, AM Energy (2023).
- 10) Robert P. Badrak, AMPP Annual Conference + Expo, Paper C2023-19317 (Houston, TX: AMPP, 2023).
- 11) Robert P. Badrak: Mater. Perform., **62**(2023)38-42.
- 12) Eric J. Schindelholz, Michael A. Melia and Jeffrey M. Rodelas: Corrosion **77**(2021)484-503.
- 13) M. Laleh, A.E. Hughes, W. Xu, P. Cizek and M.Y. Tan: Corros. Sci. **165**(2020)108412.
- 14) D. Kong, C. Dong, X. Ni, L. Zhang, J. Yao, C. Man, X. Cheng, K. Xiao and X. Li: J. Mater. Sci. Technol. **35**(2019)1499-1507.
- 15) M. Alnajjar, F. Christien, V. Barnier, C. Bosch, K. Wolski, A. D. Fortes and M. Telling: Corros. Sci., **168**(2020)108585.
- 16) 堤 祐介, 石本卓也, 上田恭介, 丸山晋平, 久世哲嗣, 松垣あいら, 蘆田茉希, 陳 鵬: までりあ, **59**(2020)679-684.
- 17) 堤 祐介, 片山英樹, 石本卓也, 中野貴由, 上田恭介, 成島尚之, 真中智世, 塙 隆夫: 材料と環境 2021, (JSCE, 2021)pp.191-194.
- 18) 堤 雄介, 真中智世, 後藤光宏, 蘆田茉希, 陳 鵬, 片山英樹, 塙 隆夫: 第 68 回材料と環境討論会(JSCE, 2021)pp.17-18.
- 19) 海藤雅裕, 長山 瞬, 山本涼太郎, 野口 学, 畠山賢彦, 砂田 聡: 第 65 回材料と環境討論会, 富山(JSCE, 2018)pp.169-172.
- 20) 海藤雅裕, 長山 瞬, 山本涼太郎, 野口 学, 畠山賢彦, 砂田 聡: 材料と環境 2019, 大宮(JSCE, 2019)pp.263-266.
- 21) 海藤雅裕, 長山 瞬, 山本涼太郎, 野口 学, 畠山賢彦, 砂田 聡: 第 66 回材料と環境討論会, 札幌(JSCE, 2019)pp.91-94.
- 22) 御手洗容子, Pince Valentine Cobbinah, 松永紗英, 戸田佳明, 小笹良輔, 石本卓也, 中野貴由: 日本金属学会 2023 年秋期第 173 回講演大会, S5.15, 富山(2023).

(2023 年 12 月 13 日受理)

要 旨

近年 Additive Manufacturing による部品の製造が注目されている。従来の切削による手法より短納期で少量の部品が必要な場合、メリットは大きいと考えられている。金属の場合はプラスチックに比べ装置導入コストが高く、安価な手法が近年導入され始めている。本報では対象を金属に絞り、石油産業における Additive Manufacturing 導入の取り組みと、耐食性に対する検討に関して主に紹介する。Additive Manufacturing により耐食性の優れた金属部材を製造するための key point に関して議論したい。

キーワード 付加製造, 金属, 耐食性, 3D プリンター