

高耐食Ni基合金ADMUSTER® C21Pの 各種特性とその発現機構の調査

Investigation of Mechanical and Corrosion Properties and Corrosion Resistance
Mechanism of Nickel Base Alloy ADMUSTER® C21P

太期 雄三*
Yuzo Daigo

桑原 孝介**
Kosuke Kuwabara

牛 晶**
Jing Niu

菅原 克生*
Katsuo Sugahara

*
株式会社プロテリアル
金属材料事業本部
Advanced Metals Division,
Proterial, Ltd.

**
株式会社プロテリアル
グローバル技術革新センター
Global Research and Innovative
Technology center GRIT,
Proterial, Ltd.

金属積層造形は医療や航空宇宙分野での適用が拡大し、今後は石油化学プラントや半導体製造装置など産業機器への拡大が期待される。当社では、1990年代に開発された当社オリジナル合金である高耐食Ni基合金MAT21®を産業機器分野へ向け製造販売している。積層造形分野への高耐食材の投入と、積層造形によるMAT21の用途拡大や調達性向上のため、本合金を金属積層造形用材料ADMUSTER® C21Pとして適用を進めた。C21P造形体はMAT21鍛造圧延材に対して耐食性は同等で強度が向上することを確認した。詳細な組織観察から、強度の向上が積層造形プロセスに起因する転位密度の増加によることを示した。また、C21P造形体に時効処理を施して微細な金属間化合物を析出させることで、さらに高強度化できることを明らかにした。C21P造形体はすでに産業機器分野において継続して使用いただいております、C21Pのさらなる市場拡大を目指す。

The applications of metal additive manufacturing are expanding in the medical and aerospace fields, and further expansion into the industrial machinery field is expected, including petrochemical plants and semiconductor manufacturing equipment. MAT21®, which is a Ni-based alloy with excellent corrosion resistance, has been supplied to customers for more than 20 years. In order to expand the applications of MAT21 and to reduce the delivery time, the alloy has been developed as ADMUSTER® C21P for additive manufacturing. The strength of products fabricated using additive manufacturing with C21P is higher than that of wrought MAT21. The corrosion resistance of C21P products is comparable to that of wrought MAT21. Microstructural observations revealed that the higher strength of C21P is due to the high dislocation density induced in the additive manufacturing process. The strength can be further increased by introducing fine intermetallic precipitates during an aging heat treatment process. C21P products are already being used for industrial machinery, and we aim to expand the C21P market further.

■ Key Words : 積層造形, 耐食性, 強度
■ Production Code : C21P

■ R&D Stage : Prototype

1. 緒言

積層造形(Additive Manufacturing, AM)は設計やサプライチェーンを一新する製造方法として注目されている^{1) -5)}。1990年代から先行展開した樹脂材料向けの積層造形法に続き、金属材料を対象とする粉末レーザー焼結法(SLS: Selective Laser Sintering), 粉末レーザー溶融法(SLM: Selective Laser Melting), 電子ビーム溶融法(EBM: Electron Beam Melting), 指向性エネルギー堆積法(DED: Direct Energy Deposition)が2000年代になって欧州を中心に装置開発が進められた。金属材料において実用が進みつつある市場は、航空・宇宙分野, 医療分野, 自動車分野が中心であり, 材質としてはチタン合金, ニッケル合金, コバルト合金に加えステンレス鋼およびマルエージング鋼などの鉄基合金の検討が進められている。積層造形における合金開発は各種造形法の適正条件探索や強度評価に力点が置かれ, 耐酸化性や耐食性に関する報告は少ない^{6) -11)}。

前述の先行する市場に続き, 今後不要積層造形の適用が期待される市場として製薬および化学プラント, Oil & Gas, 半導体製造装置などが挙げられる。これらの市場では一般的に厳しい腐食性環境を有する設備が用いられ, 装置材料に高耐食合金が必要とされる。腐食性環境には塩化物イオンに代表されるハロゲン化物イオンを含むことが多く, 特に高濃度の塩化物イオンを含む場合は耐食合金の局部腐食耐性を示す指標であるPRE(Pitting Resistance Equivalent)¹²⁾の高い合金が望まれる。図1にPREとGreen death水溶液(11.5% H₂SO₄ + 1.2%HCl + 1%FeCl₃ + 1%CuCl₂)中の臨界孔食発生温度の関係を示す^{12) -15)}。Fe基とNi基を同一平面上にプロットすると, 高い温度域まで孔食発生温度はPREで非常によく整理されており, PREが高くなるに伴い, 局部腐食耐性が向上することが理解できる。これまでにAMで研究報告がある最も高いPREを示す合金はAlloy 625であり, また産業界ではAlloy 22などのNi-Cr-Mo系合金粉が溶射から流用される形で, 積層造形向けでも使用されるようになってきている。

このような状況の中で, 当社は市販の鍛造・圧延品の中で最も高いPREを持つ合金の一つであるMAT21®を金属積層造形向け材料ADMUSTER®C21Pとして適用し, SLMによる積層造形プロセスの開発と耐食性を含めた特性評価をいち早く進めてきた^{14), 15)}。本報告は, これまでに明らかにしたC21Pの特徴を報告するとともに,

新たに検討を進めたC21P高強度材(C21P時効材)などの知見について示す。

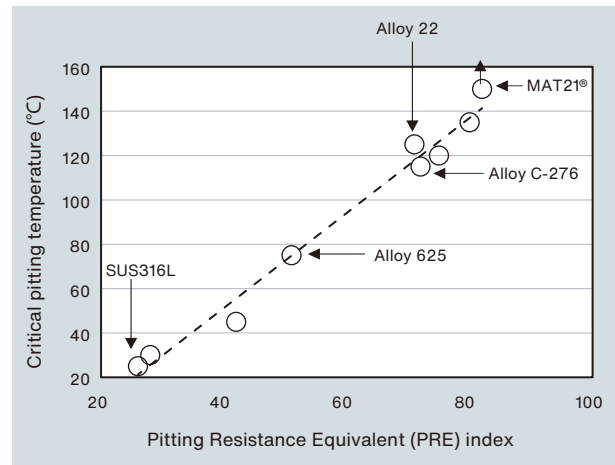


図1 耐食合金の Green Death 液中の臨界孔食発生温度^{12) -15)}

Fig.1 Critical pitting temperature for corrosion resistant Fe and Ni base alloys¹²⁾⁻¹⁵⁾

2. C21P開発の経緯と本開発が提供する価値

MAT21(Ni-19Cr-19Mo-1.8Ta)は,1990年代に鍛造圧延材として開発された当社のオリジナル合金である¹⁶⁾。MAT21は,多様な腐食環境に対応できる優れた耐食性の実現をめざし, Ni-Cr-Mo系合金の耐食材として広く採用されているAlloy 22やAlloy C-276をベンチマークとして開発され, これら合金より優れた耐食性を示すことが知られている。

MAT21の主たる用途は, 公害防止設備や化学プラントのタンク類が想定されたため, それらを構成する板・丸棒・線・ブロックなどの形状で市場に供給されてきた。一方で半導体製造装置部材など複雑な形状が要請される際には, これら素材から機械加工や溶接によって部品を製造してきた。しかし, MAT21は他のNi-Cr-Mo系合金と同様に難削材であることから, 複雑な形状を要求される部品の短納期供給要請には十分に答えられなかった。

このような背景から, MAT21を積層造形用金属粉末ADMUSTER®C21Pとして積層造形に適用する検討を開始した。C21Pを市場に投入することによって, 以下の3点の価値を顧客に提供することができる。

1. 高耐食部品の短納期化が可能
2. 積層造形が可能とする高特性形状の実現
3. 製造プロセス特徴に起因した材料の高特性化

1. は積層造形が得意とする価値の提供である。積層造形は、造形設備と材料、3次元モデルがあればすぐに素材をニアネットシェイプで製作することが可能で短納期化が期待される。C21Pのように既存製法でも製造している材質であれば、例えば試作ステージでは短納期の積層造形で試作部品を製作して特性を評価し、目標とする特性を満たすことが確認できた段階で、改めて既存製法での量産部品化検討も可能である。一方、積層造形可能な新合金であれば、積層造形は少量からでも短納期で部品供給が可能であるためとくに試作用途では有用である。

2. は材料種に依らず積層造形のみが提供できる価値であり、これまで適用できなかった新たな部品設計を適用することが可能となる。3. に関しては積層造形の急冷プロセスによる材料特性の向上がこれまでに報告されている¹⁷⁾。後述するようにC21Pでも同様に材料特性の向上が見られ、顧客の部品特性向上への寄与が期待される。これらの価値提供を可能にするのは、鋳造品や鍛造圧延品、粉末冶金製品で培った品質保証方法や機械加工方法、熱処理等の高機能材料に共通して活用できる基盤技術を有しているからであり、当社本来の強みであると考えている。

3. C21Pの特性評価とその発現機構の検討

3.1 試験方法

試験に使用した金属粉末は、MAT21組成を標準として社内ガスアトマイズ設備で作成し、SLMに適した粒径範囲($\phi 10\sim 53\ \mu\text{m}$)に調整したものを使用した。積層造形にはSLM方式の造形装置であるEOS M290(EOS社)を用いた。造形プラットフォームには $250\times 250\times 35\ \text{mm}$ のベースプレート(S45C製)を設置し、造形体

はこのベースプレート上に造形した。造形体の強度および腐食特性評価に先立ち、欠陥率を指標として適正造形条件を導出し、試験体を造形した。造形体は、そのプロセスに由来した、強度や腐食特性の異方性を示す場合がある。異方性評価も目的とし、引張試験方向と各試験面は図2のように定義した。

強度試験と腐食試験の対象試験片と試験項目を表1に示す。各種の試験片を採取できる素材をプラットフォーム上に造形し、機械加工で試験片を作成した。引張試験片形状は、ASTM E8/E8Mのsmall-size試験片とした。

腐食試験は①各種酸性水溶液中に単純に浸漬する単純腐食試験 ②Green death水溶液中の孔食発生温度試験 ③Green death水溶液中の隙間腐食発生温度試験 ④100%塩素ガスの 200°C での暴露試験の合計4種類を実施した¹³⁾。本研究では耐食性の積層方向に対する依存性を調査するため、図2に示すXY面、Z面を露出面積の大半とした試験片をワイヤーカットで切り出した。単純浸漬試験の試験片寸法は $2\times 12.5\times 25\ \text{mm}$ とし、表面は研磨紙1000番仕上げとした。腐食試験は、水分蒸発による試験液の濃縮を防ぐための水冷機構を持つ蓋を付けたビーカー中の各水溶液に24時間浸漬

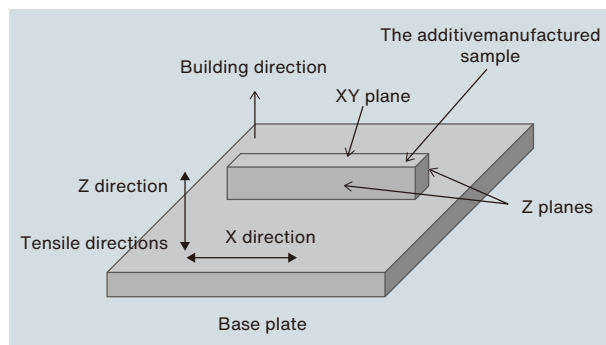


図2 試験方向および各試験面の定義

Fig.2 Definitions of test directions and planes

表1 強度試験および腐食試験の条件一覧

Table 1 Mechanical and corrosion test conditions

Test conditions	Test directions or planes	C21P specimens		
		As built	Solution annealed	HG
Tensile test	Tensile directions	XY, Z	XY, Z	XY
Vickers hardness test		XY, Z	XY, Z	Z
Immersion corrosion test in 1% boiling HCl / 24 h	Tested planes	XY, Z	-	-
Immersion corrosion test in 2% boiling HCl / 24 h		XY, Z	XY	Z
Immersion corrosion test in 5% boiling HCl / 24 h		XY, Z	-	-
Immersion corrosion test in 30% HF at room temp. (25°C) / 24 h		XY, Z	-	-
Immersion corrosion test in 10% boiling H_2SO_4 / 24 h		XY, Z	XY	Z
Pitting corrosion test in boiling Green Death solution / 50 h		XY, Z	-	-
Crevice corrosion in boiling Green Death solution / 50 h		XY, Z	-	-
High-temp. corrosion test in 100% Cl_2 gas (200°C) / 24 h		XY, Z	XY, Z	-

した。試験前後の重量測定から腐食減量を求め、試験片の表面積と材質の密度を用い、年間当たりの腐食速度 (mm/year) を算出した。

孔食試験とすき間腐食試験の試験片寸法は2×25×25 mmとし、表面は同様に研磨紙1000番仕上げとした。すき間腐食試験片については中心にφ5 mmの穴をあけ、すき間環境を形成するためにフッ素樹脂ワッシャーをTi製ボルトとナットで押し付けた¹⁵⁾。チタンねじと試験片はフッ素樹脂シールテープで絶縁した。両試験とも圧力容器中のフッ素樹脂カップ中の加熱Green death水溶液で50時間保持後に孔食もしくはすき間腐食の有無を実体顕微鏡で確認した。孔食もしくはすき間腐食が発生していなければ、研磨面を再研磨し、5°C試験温度を上げて試験を継続した。

高温ガス腐食試験は、東北大学未来科学技術共同研究センターで共同研究として実施した。試験片は板状試験片をワイヤーカットで切り出し、表面は複合化学研磨を施した。用いた試験装置の概略を図3に示す。試験ガスは100%塩素ガスを0.5 MPaで封入し、温度200°C、試験時間24時間のバッチ試験を実施した。試験後に走査電子顕微鏡(SEM,日本電子,JSM-6700F)により腐食の程度を確認し、X線高電子分光法(XPS: X-ray Photoelectron Spectroscopy,日本電子,JPS-9010MX)を用いてCl腐食生成物の厚みを測定した。

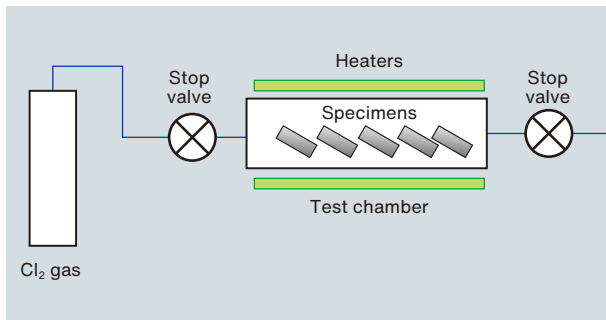


図3 高温ガス腐食試験に用いた試験装置の構成

Fig.3 Schematic of high-temperature gas corrosion test equipment

表2 引張試験とビッカース硬さ試験の結果

Table 2 Results of tensile and hardness tests

Specimen	Direction	0.2% offset yield strength, MPa	Tensile stress, MPa	Strain, %	Vickers hardness, HV10
C21P as built	XY	754	1,023	45.4	323
	Z	623	885	60.1	282
C21P solution annealed	XY	424	905	71.6	209
	Z	416	860	76.3	206
C21P aging treated	XY	952	1,441	20.6	428
	Z	-	-	-	-
Wrought MAT21®	-	381	812	72	180 - 200
Wrought MAT21®HG	-	733	1,241	53	345

3.2 C21P造形体とC21P時効材の強度特性および発現メカニズム調査

表2に各熱処理状態におけるC21P造形体の引張特性とビッカース硬さを示す。比較として鍛造圧延材MAT21の溶体化材および時効処理材の特性も掲載した。時効条件は、比較的低温での長時間保持(約600°C, 30時間以上)であり、鍛圧材ではナノレベルの金属間化合物(A2B型)が析出することが知られている。表2から、MAT21に対して、C21P造形まま材とC21P時効材が高強度化していることが理解される。特にC21P時効材の強度は、MAT21を時効処理し高強度化させたMAT21HGよりも高く、硬さは一般的に普及しているコバルト系耐摩耗肉盛材(BISHILITE®No.6)と同程度の硬さに達した。高耐食性でかつ高強度や耐摩耗性が要求される用途への展開が期待される。一方、C21P造形材も溶体化処理を掛けることで鍛圧材であるMAT21と同等の強度特性に調整できることが分かった。

C21P造形まま材および時効材の強化機構を解明するため、走査型透過電子顕微鏡(STEM: Scanning Transmission Electron Microscope)観察とエネルギー分散型X線分析(EDX: Energy dispersive X-ray spectroscopy)を実施した。図4にC21P造形まま材とC21P時効材のSTEM像とEDXの成分マッピングを示す。一般的に積層造形体はその急冷プロセスに起因し、セル状組織を形成する。本観察からC21Pでもセル状組織が形成されていることが確認される(図4)。またC21P造形まま材およびC21P時効材ではセル界面でのMo偏析が認められる。図5, 6に鍛圧材を含めたSTEM像と電子線回折パターンを示す。回折線から、C21P造形まま材では母相以外のパターンは確認されず、強化機構は析出硬化ではないと推定される。一方で、セル内にはひげ状の転位が多数見られ、転位密度が高いことが明らかとなった。C21P造形体を溶体化すると、転位密度はMAT21と同程度に低減し、偏析およびセル状組織

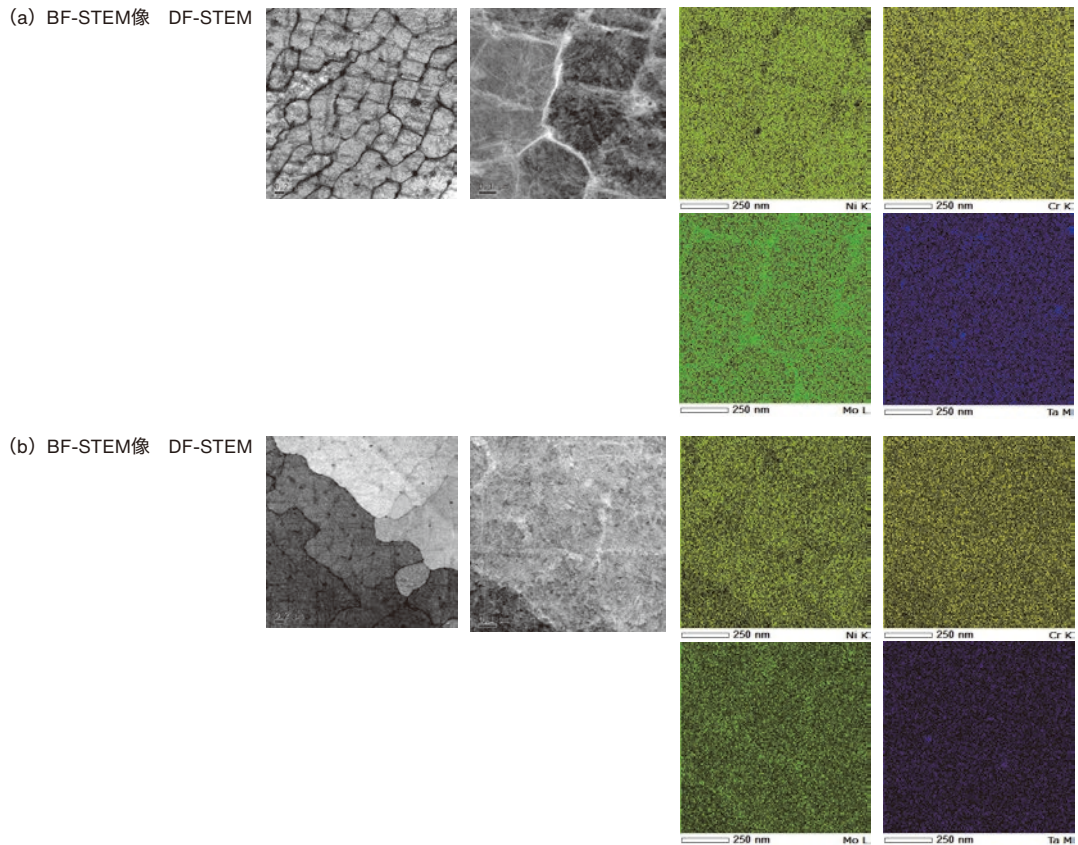


図4 C21P 造形まま材と C21P 時効材の STEM 像および EDX マッピング (a) C21P 造形まま材 (b) C21P 時効材

Fig.4 STEM images and EDX maps of as-fabricated C21P and C21Paging treated samples (a) C21P as-fabricated sample, (b) C21Paging treated

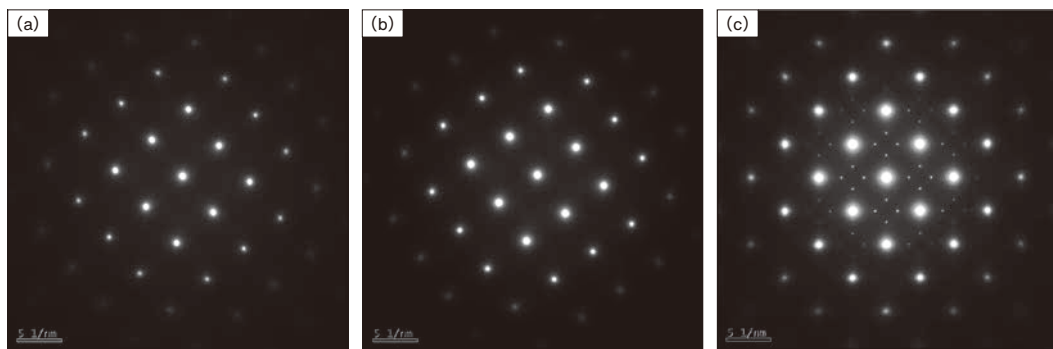


図5 MAT21®, C21P と C21PHG の STEM 評価で得た電子線回折パターン (a) MAT21® (b) C21P 造形まま材 (c) C21P 時効材

Fig.5 Electron diffraction patterns for MAT21®, C21P as-fabricated and C21Paging treated samples obtained during STEM observations (a) MAT21®, (b) C21P as-fabricated, (c) C21Paging treated

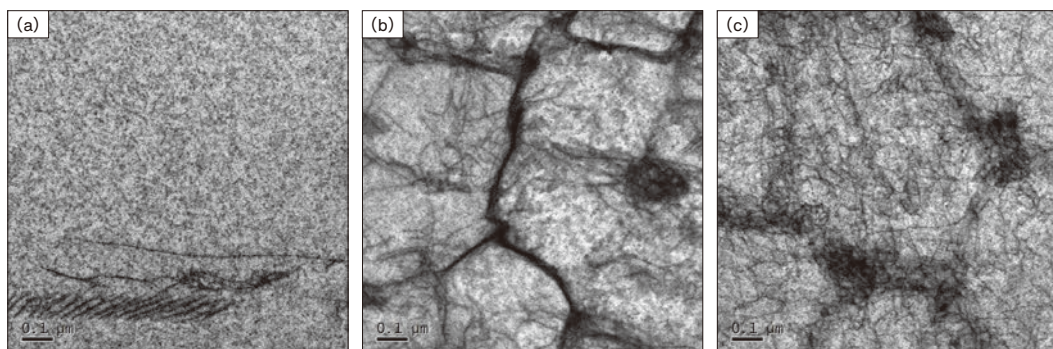


図6 MAT21®, C21P 造形まま材と C21P 時効材の STEM 像 (a) MAT21® (b) C21P 造形まま材 (c) C21P 時効材

Fig.6 STEM images of MAT21®, as-fabricated C21P and C21Paging treated samples (a) MAT21®, (b) C21P as-fabricated, (c) C21Paging treated

が消失した。このことから、C21P造形まま材がMAT21よりも高強度となるのは、高い転位密度によるものと推定される。造形プロセスでセル状組織に多数の転位が生じる理由は現段階では不明であるが、セル状組織の界面のMo成分偏析が、積層造形における繰り返しの急速凝固の過程で生じる転位の移動と結合を阻害することで多くの転位が残存したと推測される。本現象は、積層造形の急冷凝固などのプロセス特徴により発現する強化機構を活用できた一例と考える。

C21P時効材は、C21P造形まま材で観察されたように、高い転位密度を持つ組織に時効処理を適用した状態である。C21P時効材のSTEM像を見ると、転位密度はC21P造形まま材と同程度かやや低い程度であり、MAT21と比較すると転位密度は高い状態にある。格子パターンから、MAT21HGと同様にA2B型析出が確認された。以上より、C21P時効材は、高密度の転位に加えて微細な析出物によって、高強度化していることが確認された。いずれも積層造形プロセスならではの高強度化機構であり、学術的にも実用的にも有用な知見である。

3.3 C21P造形まま材とC21P時効材の耐食性

腐食試験の一例として、図7に沸騰5% HCl腐食試験後の試験片外観を示す。図中には316L造形体と鍛圧SUS316Lの試験片外観も併せて示した。316Lは造形体と鍛圧材の何れもが著しく腐食を受けたが、MAT21およびC21P造形体は表面がやや白濁する程度の腐食に抑えられた。表3にC21P造形体の酸水溶液中の腐食速度と、Green death水溶液中での臨界孔食発生温度および臨界隙間腐食発生温度を示す^{14), 15)}。比較のため、MAT21およびAlloy 22(代表的な高耐食Ni基合金)の数値を表3に示す。

MAT21とC21P造形体は腐食速度が同程度である

ことが分かる。Green death水溶液中での孔食発生温度および隙間腐食発生温度は鍛圧材よりもC21P造形体の方が5-10°C低い。前述のEDX分析からC21P造形体は軽微ではあるが成分偏析を有しており、局所的に耐食性が低下した領域が存在していると推測する。積層造形における冷却が高速であるため偏析領域は小さく偏析程度も軽微なため、耐食性の大きな低下にはつながらなかったと考えられる。

浸漬試験では、C21Pの耐食性の熱処理状態依存性は確認されなかった。C21P造形まま材とC21P溶体化処理材は成分偏析の有無の差はあるが、差異が軽微であり耐食性に差が生じなかったと推定される。C21P時効材ではMAT21HGと同様に、析出硬化による成分変動が局所的であったために耐食性に影響しなかったと考えられる。

次に、耐食性の異方性について検討する。浸漬試験や臨界温度を比較すると、Z面の方がXY面よりも耐食性に優れているようだが、その差は軽微であった。造形プロセスが方位性を持つために異方性を僅かに生じた可能性はあるが、その影響は小さいと判断される。このように、水溶液中の各種腐食試験においてC21P造形体の耐食性が、Alloy 22よりも優れMAT21同等であることが確認された。

図8に100% Cl₂ガス200°C24時間暴露試験後の試験片表面のSEM像とCl腐食生成物の厚みを示す。本環境は316 Lでは著しい腐食が発生する条件であるがC21P造形体およびMAT21鍛圧品は局所的な腐食を示すに留まった。SEMとXPSによる測定結果から本試験環境においてもC21P造形体については積層方向依存性や、溶体化処理の有無の影響はほぼ観察されず、MAT21と同程度の耐食性であることが改めて確認された。

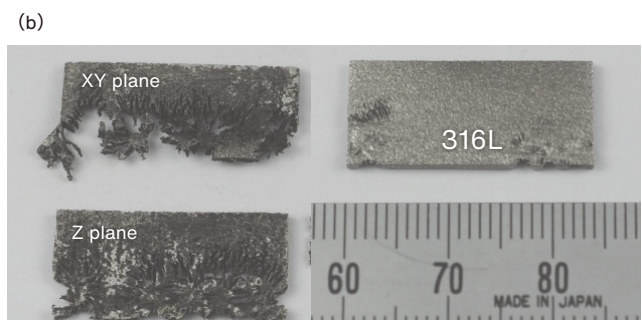
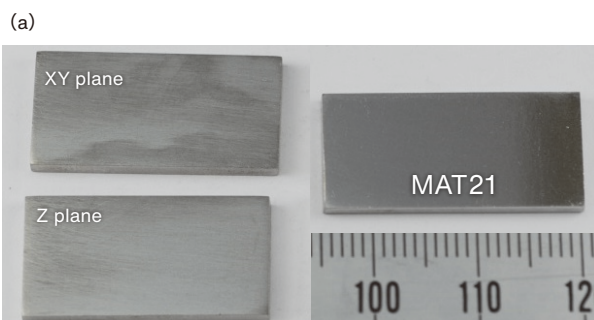


図7 沸騰5% HCl 浸漬腐食試験後の試験片外観 (a) C21P as built と MAT21® (b) 316L as built と SUS316L

Fig.7 Appearance of samples after boiling in 5% HCl solution (a) C21P as-fabricated and MAT21®, (b) 316L as-fabricated and SUS316L

表3 各種酸性溶液中の腐食速度と Green death 水溶液中の臨界孔食発生温度および臨界隙間腐食発生温度^{14), 15)}

Table 3 Corrosion rate in acidic solutions, critical temperature for pitting corrosion and crevice corrosion in Green Death solution^{14), 15)}

Test conditions	Evaluation index	C21P				MAT21®	MAT21®HG	Alloy 22
		As-fabricated		Solution annealed	Aging treated			
		XY	Z	XY	Z			
1% boiling HCl / 24 h	Corrosion rate (mm/year)	0.01	0.01	-	-	0.01	0.01	0.13
2% boiling HCl / 24 h		0.01	0.01	0.01	0.01	0.05	0.21	1.72
5% boiling HCl / 24 h		1.6	1.3	-	-	1.15	-	7.95
30% HF at room temp. (25°C) / 24 h		0.06	0.06	-	-	0.08	-	-
10% boiling H ₂ SO ₄ / 24 h		0.03	0.03	0.03	0.02	0.04	0.05	0.23
Pitting corrosion test (boiling) / 50 h	Critical temperature of pitting or crevice corrosion (°C)	140°C	145°C	-	-	>150°C	-	125°C
Crevice corrosion test (boiling) / 50 h		130°C	140°C	-	-	140°C	-	110°C

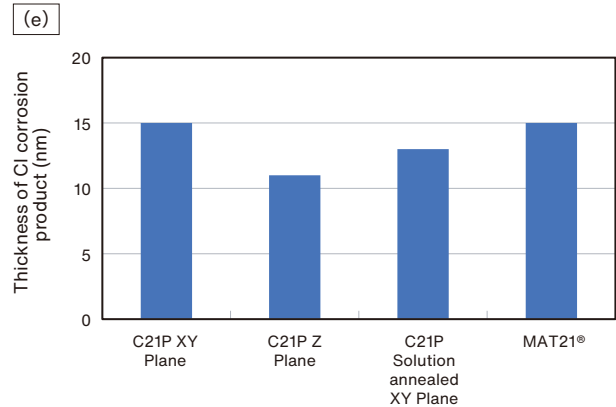
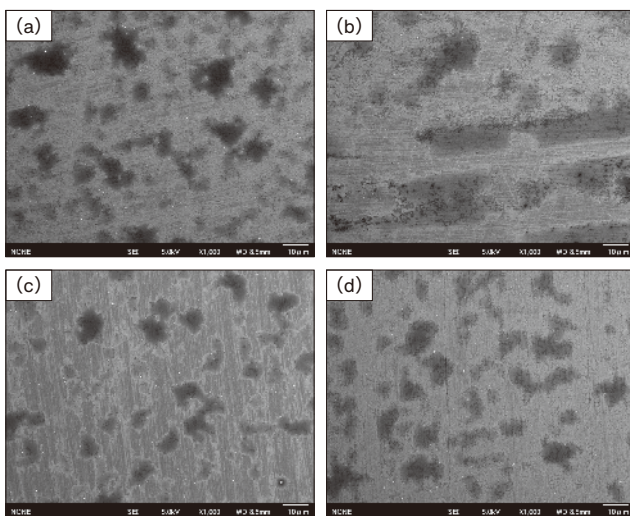


図8 高温ガス腐食試験結果(100% Cl₂ ガス 200°C 24 時間) (a) C21P 造形まま材 (XY 面) (b) C21P 造形まま材 (Z 面) (c) C21P 溶体化処理材 (XY 面) (d) MAT21® (e) Cl 腐食生成物の厚み

Fig.8 Corrosion test results after exposure to 100% Cl₂ gas at 200°C for 24 h (a) C21P as-fabricated (XY plane), (b) C21P as-fabricated Z plane, (c) C21P Solution annealed (XY plane), (d) MAT21® plate, (e) thickness of Cl corrosion product

4. 結言

高耐食Ni基合金の用途拡大や試作品の調達性向上のため、新たにC21Pとして積層造形化に取り組んだ。本取り組みで作成したC21P積層造形体の強度および耐食性を評価し、鍛造圧延材のMAT21に対し、耐食性を維持しながら高強度化することが確認された。詳細な組織観察から、積層造形プロセスに起因した転位密度上昇により高強度化していることを明らかにした。C21P造形体を時効処理し微細金属間化合物を析出させることによって、さらに高強度化できることを明らかにした。積層造形の短納期や、少量での部品提供の容易さから、化学プロセスやOil&Gas領域、フッ素樹脂を取扱う各種機器での検討を進めている状況である。本研究成果の導入実例として、高い耐食性を要求する使用環境におけるネジとしての採用があげられる¹⁸⁾。素材と

しての高い耐食性と積層プロセスに起因した高強度が理由となり量産部品として採用されている。今後も高特性和調達性の良さをさらに伸ばし、本材質の普及を促進する。

5. 謝辞

本研究の一部は、未来科学技術共同研究センター未来情報産業研究館で共同研究として実施した。ここに感謝の意を表す。

引用文献

- 1) T. Wohler; Wohlers Report 2017.
- 2) L. Yang, et al.; Additive Manufacturing of Metals: The Technology, Materials, Design and Production (2017).
- 3) 平成27年版 情報通信白書:302-303(2017).
- 4) (株)アクトプローブ 進化する金属3Dプリンター市場の近未来展望(2015)
- 5) (株)旭リサーチセンター 金属積層造形技術(3D プリント)の最新動向(2017)
- 6) Kinga A. Unocic, Lindsay M. Kolbus, Ryan R. Dehoff, Sebastien N. Dryepondt, Bruce A. Pint, “High-Temperature Performance of UNS N07718 Processed by Additive Manufacturing”, CORROSION2014, Paper No.4478, (Houston, TX: NACE, 2014)
- 7) Guy Ben Hamu, “Patient-specific orthopedic implants manufactured by Additive Manufacturing – A corrosion study”, CORROSION2017, Paper No.9257, (Houston, TX: NACE, 2017)
- 8) H. S. Klapper, N. Molodtsov, M. Burns, C. Wangenheim, “Critical Factors Affecting the Pitting Corrosion Resistance of Additively Manufactured Nickel Alloy in Chloride Containing Environments”, CORROSION2017, Paper No.9345, (Houston, TX: NACE, 2017)
- 9) Liu Cao, Anup Panindre, “Characterization of Corrosion Behavior on Additively Manufactured Alloys”, CORROSION2017, Paper No.9472, (Houston, TX: NACE, 2017)
- 10) W. Kovacs III, L. Cao, K. Evans, C. Taylor, S.A. Waters, Z. Berg and J. Silva, “Additive Manufacturing for Sour Service, an Experimental Investigation”, CORROSION2017, Paper No.9667, (Houston, TX: NACE, 2017)
- 11) G. Sander, S. Thomas, V. Cruz, M. Jurg, N. Birbilis, X. Gao, M. Brameld, C. R. Hutchinson, “On The Corrosion and Metastable Pitting Characteristics of 316L Stainless Steel Produced by Selective Laser Melting”, Journal of The Electrochemical Society, vol.164 (6), p.C250-C257, 2017.
- 12) Raul B. Rebak, “Pitting Characteristics of Ni Alloys – A Review”, CORROSION2015, Paper No.7450, (Houston, TX: NACE, 2015)
- 13) M. Cabrini, S. Lorenzi, C. Testa, T. Pastore, F. Brevi, S. Biamino, P. Fino, D. Manfredi, G. Marchese, F. Calignano and F. Scenini, “Evaluation of Corrosion Resistance of Alloy 625 Obtained by Laser Powder Bed Fusion”, 166 (11) C3399-C3408, Journal of The Electrochemical Society (2019)
- 14) Yuzo Daigo, Katsuo Sugahara, Syuhei Ogoshi, Kosuke Kuwabara, “Corrosion Behavior of Additively Manufactured Alloy N06210 in Acidic Solutions”, CORROSION2018, Paper No.11087, (Houston, TX: NACE, 2018).
- 15) Yuzo Daigo, Katsuo Sugahara, Kosuke Kuwabara, “Sensitivity of Localized Corrosion of Additively Manufactured Alloy N06210 in Green death solution”, CORROSION2019 Paper No.13249 (Nashville, TN: NACE, 2019),
- 16) Katsuo Sugahara and Yoshio Takizawa, “Development of A New Corrosion Resistant Ni-Cr-Mo-Ta Alloy with Improved Corrosion Resistance to Sulfur Dewpoint Corrosion,” CORROSION/96, paper no.413. (Houston, TX: NACE International, 1996)
- 17) 桑原孝介, 藤枝正, 大坪靖彦, 陳美伝, “新規耐食合金のレーザー粉末積層造形と熱処理法の開発”, 日立金属技報, Vol.35(2019年), p.30
- 18) 大沼篤彦: “金属積層造形を用いた 高耐食材料MAT21ポルト”, 特殊鋼, 69巻, 2号(2020年3月), p.44.



太期 雄三
Yuzo Daigo
株式会社プロテリアル
金属材料事業本部
AM プロダクションベース
博士(工学)



桑原 孝介
Kosuke Kuwabara
株式会社プロテリアル
技術開発本部
グローバル技術革新センター
博士(工学)



牛 晶
Jing Niu
株式会社プロテリアル
技術開発本部
グローバル技術革新センター
博士(工学)



菅原 克生
Katsuo Sugahara
株式会社プロテリアル
金属材料事業本部
桶川工場
博士(工学)