皮膜の損傷抑制に関する基礎的研究* (第 2 報, 損傷抑制効果の向上について)

宅間 正則^{*1}, 新家 昇^{*1}, 鈴木 健^{*2}
清水 満^{*2}, 丹羽 義和^{*3}

Basic Study on Damage Restraint of Coating Film (2nd Report, Improvement of Damage Restraint Effect)

Masanori TAKUMA^{*4}, Noboru SHINKE, Ken SUZUKI,
Mituru SHIMIZU and Yoshikazu NIWA

^{*4} Department of Mechanical Engineering, Kansai University,
3-35 Yamate-cho, Suita-shi, Osaka, 564-8680 Japan

Recently, coating materials are widely used in the several fields. However, it is being taken up as a serious problem that the large-scale destruction of the structure will be occurred at the time when the damage of the coating film generates. In the previous report, the basic study on the efficiency of actively restoring the bending damage of the film by adopting the concept called smart material or smart structure was proposed, and the effectiveness was shown. However, the problems of improvement on the reactivity of the actuator and application of the flexible processor function were pointed out. In this paper, the smart structure body is reported that is constituted by the information from the added strain gauge as the sensor function and the applied neural network as the processor function. As the result, it was showed that the problems of the previous report could be improved.

Key Words: Acoustic Emission, Crack Propagation, Bending, Neural Network, Coating Film, Shape Memory Alloy, Smart Material, Smart Structure, Strain Gauge

1. 緒 言

過酷な環境下で使用されている構造部材の破損事故は, 社会活動や経済活動などに大きなダメージを与える可能性が極めて高い⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾. このようなことから, 周囲の環境に能動的に働きかけて損傷を抑制・修復するスマート材料・構造に関する研究が行われている⁽⁵⁾⁻⁽⁷⁾.

前報⁽⁸⁾では, スマート材料・構造の概念を導入した皮膜の損傷抑制について報告した. つまり, アクチュエータ機能として採用した形状記憶合金(SMA)を母材のシリコンに埋め込み, その表面にセンサ機能として採用した AE センサを取り付け, それらをプロセッサ機能の役割を担うコンピュータにつなげた(図 1 参照). そして, 母材表面の皮膜に対する 3 点曲げ試験で生じた損傷を AE センサで検知し, SMA への電流供給によって皮膜の損傷抑制を試みた. その結果, 以下のことが明らかになった.

- (1) SMA の形状回復力により, 皮膜の損傷を抑制することができた.
- (2) 損傷状態に応じた電流供給により, 電気量(消費エネルギー)を考慮した損傷抑制を行うことができた.

* 原稿受付 2003 年 11 月 19 日.

^{*1} 正員, 関西大学工学部 (〒564-8680 吹田市山手町 3-3-35).

^{*2} 関西大学大学院工学研究科.

^{*3} 大同特殊鋼(株) (〒541-0043 大阪市中央区高麗橋 4-1-1).

E-mail: t940081@ipcku.kansai-u.ac.jp

しかし, 『SMA の応答性と形状回復力の向上』『複数の情報を考慮して供給電流を決定するプロセッサ機能の充実』といった課題を克服する必要があった. そこで本報では, ひずみ情報も考慮して SMA の応答性の向上を試みるとともに, AE センサとひずみゲージからの情報を処理するニューラルネットワークをプロセッサ機能として適用した結果について報告する.

2. 前報のスマート構造体の変更と実験装置

2.1 スマート構造体の変更点 前述したスマート構造体(以下, 試験片と略す)の課題を克服するために, 以下の変更を施すことにした.

- (1) アクチュエータ機能: SMA の形状回復力を向上させるために, 直径を 0.8mm から 1.2mm に変更し

Fig.1 Specimen configuration in previous report

た(熱処理条件: 400℃で1時間加熱後に急冷)。

- (2) センサ機能: SMA の予熱開始時期の判断情報を得るために, 自己温度補償型のひずみゲージ(株式会社和電業: KFP-2-120-C1-65, 温度補償範囲: 10~80℃, 線膨張係数: $65 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)を追加し, 応答性の向上を試みる。
- (3) プロセッサ機能: センサ機能からの情報が増し, それらを考慮しながらアクチュエータに制御信号を出力するとなると, プロセッサ機能の重要性が増すことになる⁹⁾, そこで, 生物の神経系と頭脳をモデル化したニューラルネットワーク^{10), 11)}のパターン認識能力に注目し, 環境の変化に対しても適切な電流を供給できるように試みた。

図2は, ひずみゲージのスペース確保とSMA(大同特殊鋼牌, 46.6Ni-Bal.Ti-8.3Cu wt%)の直径増加を考慮して決定した試験片形状を示したもので, SMA は皮膜(テスコ(株), アンダーコート: STRESSMAP-UC, 応力塗料: STRESSMAP SC-20)の生成とAE波の減衰防止のためのアクリル樹脂(板厚: 1mm)に挟まれた母材(シリコン, 信越化学工業(株): シーラント45)に埋め込まれている。なお, 試験片の厚さ h は SMA の形状回復力の妨げを極力抑え, 十分な回復力が得られる 5A の電流を 700 秒間供給したときの試験片表面の温度が皮膜特性に影響を及ぼさない範囲(19~24℃)になるように 15mm とした。一方, 成膜時にはアンダーコートと塗布面との距離を 300mm とする 3 回の吹き付けで下地を作成したのち(膜厚の上限: 0.03mm), 塗布面との距離を 200mm (移動速度: 0.17m/s)にして応力塗料(ひずみ感度: $800 \mu\epsilon$ 前後)を吹き付けて, 乾燥

させた(10回の重ね塗りでの膜厚: 0.09~0.12mm)。この際, 最適温度条件よりも少し高い温度で乾燥させれば、『乾燥時間の短縮, クレージングの予防, ひずみ感度の向上』などの利点があることから¹²⁾, スペースヒータによる 30℃で2時間の乾燥後に空冷する空冷増感法(ひずみ感度: $500 \mu\epsilon$ 前後に向上¹²⁾)を採用した。

2.2 実験装置および実験方法 給水ポンプ(榎本マイクログン製作所(株): MW-700EPH)で試験片の中央を一定速度(設定可能範囲: 0~0.802N/min)で負荷する3点曲げ試験を行い(図2参照), 皮膜の損傷に伴って放出される信号を AE センサ(株式会社NF回路設計ブロック: AE-900S-WB)で検出するとともに, 被覆面側のひずみを測定する。AE 信号は AE テスタ(株式会社NF回路ブロック: 9501)で増幅と雑音除去がなされたのちにイベントパルスとして出力され, ユニバーサルカウンタでカウントされたのちにコンピュータに取り込まれる。その後, センサ機能からの情報を処理するニューラルネットワークが DA 変換ボードを介して電源(菊水電子工業(株): PMC18-5A)に制御信号を送って SMA に電流を供給し, 皮膜の損傷抑制を行う。

3. 実験結果および考察

下記の電流供給法で得た結果から, 皮膜の損傷抑制効果を比較することにした。この際, SMA の直径増加に伴って生じる『形状回復力の発生に時間がかかる』や『少量の供給電流に対する反応が極めて鈍い』という点を考慮し, 前報のような細かい電流供給(AE事象数が5 events 増えるごとに0.05A ずつ増加)を行わなかった。

- (1) 電流供給なし。
- (2) 設定した累積AE事象数のしきい値を越えたときから, 5A の供給を開始(以下, Pattern-A と略す)。
- (3) SMA の応答性と形状記憶劣化の改善を目指した電流供給(以下, Pattern-B と略す)。
- (4) ニューラルネットワークによる電流供給(以下, Pattern-C と略す)。

3.1 電流供給なしの結果 図3は 0.588N/min での荷重に対するひずみ・累積 AE 事象数・AE 事象率・供給電流の関係を示したもので, 実験終了時のひずみとき裂密度は $1311 \mu\epsilon$ と $31\text{in}/\text{cm}$ であった。同図より, 3.4N 付近から累積 AE 事象数と AE 事象率が急増しており, このときの累積 AE 事象数とひずみは約 20events と約 $520 \mu\epsilon$ であった。この値は, 3~5℃前後の空冷増感法によるひずみ感度は約 $500 \mu\epsilon$ になる¹²⁾とされていることとほぼ一致していることから, 実験結果の妥当性を伺い知ることができる。

3.2 電流供給 Pattern-A の結果 図3の結果を踏

Fig.2 Specimen configuration and experimental equipment in this report

まえ、累積 AE 事象数が 20events に達したときから 5A の電流を供給することにした。その結果の一例を示したものが図 4 で、0.588N/min での荷重に対するひずみ・累積 AE 事象数・AE 事象率・供給電流の関係が示されている。同図より、ひずみの極小値 (578 $\mu\epsilon$) と極小値を示した荷重での電流供給なしのひずみ (845 $\mu\epsilon$) との差 (回復量) は 267 $\mu\epsilon$ となり、SMA の形状回復力の効果が現れていることがわかる。なお、実験終了時のひずみは 958 $\mu\epsilon$ 、き裂密度は 15n/cm であり、これらの値は電流供給なしの場合と比較して約 27% と約 52% の減少を示していることから、皮膜の損傷抑制効果が現れているといえる。しかし、負荷応力による SMA の変態温度の上昇が応答性を更に悪化させているといえる^(a)。このことは、負荷応力と SMA の変態温度との関係に供給 Pattern-A での両者の関係を矢印で示した図 5(a) の模式図で説明することができる。つまり、ひずみは

Fig.3 Experimental results of non-current supply

Fig.4 Experimental results of current supply pattern-A

Fig.5 Conceptual scheme on austenite transformation in loading and heating process

A_s 点を超えるまで減少しないので、累積 AE 事象数は増加するが、 A_s 点後に発生し始める形状回復力により、ひずみは極大値に達したのちに減少し、AE の発生も抑制される。しかし、 A_f 点に達すると、ひずみは極小値から再び増加し始める。そして、さらに通電加熱を続けると、過加熱による形状記憶劣化などのダメージを SMA に与えることになるので^(a)、過加熱の防止対策も必要となる。

3.3 電流供給 Pattern-B の結果 応答性の改善と過加熱による形状記憶劣化の問題を軽減するために、以下の対策を講じることにした。

- (1) 低電流の供給開始によって SMA の温度を A_s 点に近づけておき、累積 AE 事象数の急増点からの 5A 供給で逆変態開始までの時間短縮を試みることにし、応答性の改善を図ることにした。この電流供給法を模式的に表したものが図 5(b) で、累積 AE 事象数の急増点である 550 $\mu\epsilon$ 付近の約 1/2 に相当する 300 $\mu\epsilon$ を超えたとき (累積 AE 事象数: 約 5events) から 3A 供給で予熱を開始し、累積 AE 事象数が 20events に達したときから 5A を供給する。
- (2) 形状記憶劣化を防ぐために、ひずみが再び極大値に達したときから数え始めた AE 事象数が 5events に達した時点で 5A の断続通電法^(a)を行うことにした (10 秒間の ON と 5 秒間の OFF の繰り返し)。なお、 A_f 点 (約 60 $^{\circ}\text{C}$) 後も 5A を供給し続けたときと断続通電法を適用したときの 350 秒後の SMA の温度を測定したところ、前者が 69.8 $^{\circ}\text{C}$ であったのに対し、後者は 60.1 $^{\circ}\text{C}$ であった。

図 6 は上記の電流供給法による結果の一例を示したもので、0.588N/min での荷重に対するひずみ・累積 AE 事象数・AE 事象率・供給電流の関係が記されている。同図より、ひずみの極大・極小値の差とこの区間の荷重変化は 199 $\mu\epsilon$ と 0.496N であるのに対し、供給 Pattern-A では 151 $\mu\epsilon$ と 0.692N であったことから、3A 供給による予熱が応答性を向上させているといえる。なお、

Fig.6 Experimental results of current supply pattern-B

実験終了時のひずみとき裂密度は $978 \mu\epsilon$ と $16n/cm$ であり、これらの値は電流供給なしの場合に比べて約25%と約48%の減少を示していることから、供給 Pattern-A と同様の損傷抑制効果が得られているといえる。

3.4 電流供給 Pattern-C の結果 荷重負荷速度などの環境の変化にも対応できるプロセッサ機能を保有することが、スマート材料・構造の構築に必要である。そこで、ルール間に矛盾があれば適切な解を導くことが困難な演繹推論よりも、脳の情報処理(パターン認識)機能を模倣したニューラルネットワークによる電流供給を検討することにした。

(a)ニューラルネットワークの構成: 図7は本報で提案する入力層(ユニット数:4)・中間層(ユニット数:12)・出力層(ユニット数:1)からなる3層のニューラルネットワークの構成を示したもので、入力信号によって中間層の各ユニットが興奮・抑制し、それらを考慮した信号が出力層から出力される。すなわち、ひずみ量(最小値: $0 \mu\epsilon$, 最大値: $1800 \mu\epsilon$)、ひずみの変化率(最小値: $-555 \mu\epsilon/N$, 最大値: $200 \mu\epsilon/N$)、累積 AE 事象数(最小値:0event, 最大値:200 events)、AE 事象率(最小値:0event/N, 最大値:85events/N)が入力され、供給すべき電流(最小値:0A, 最大値:5A)が出力される。なお、中間層と出力層での各ユニットの出力信号は図中に記した式から導かれ、各信号は各項目の最小・最大値で閉区間[0, 1]に正規化された値で処理される。

図7に示したネットワークが Pattern-B と同様の電流を供給するには、入出力間の関係を記したパターン情報に基づいて結合荷重としきい値を修正しながらネットワークを形成する学習過程を経なければならない。そこで、供給 Pattern-B の結果(荷重負荷速度 $0.588N/min$ の図6参照)から各荷重での入力情報(ひずみ量と変化率、累

Fig.7 Structure of neural network

積 AE 事象数と事象率)に対する出力情報(供給電流)の関係を記したパターン情報を作成し、それらを誤差逆伝播法に基づく修正モーメント法⁽⁶⁾によって学習することにした。この際、下記の条件下でネットワークの形成を試みた結果、 $\alpha=0.087$, $\beta=0.044$, $u_0=0.78$, $m=0.0002$, $\Delta m=0.00003$ のときに学習回数 68027 で評価データに関する誤差の2乗和が最小値 1.138(平均誤差:0.0879)を示したので、このときに汎化能力に優れたネットワークが形成されたと判断して学習を終了させた⁽⁶⁾。なお、このときの教師データの誤差の2乗和は 0.3793、平均誤差は 0.0285 であった。

- (1)作成した 480 個のパターン情報のうち、240 個をネットワークの形成に直接関与する教師データ、残りを学習中にネットワークの汎用性を評価する評価データとする。
- (2)学習環境は、学習定数 α と β を0.001~0.5(Step:0.001)と0.001~0.5(Step:0.001)、シグモイド関数の傾き u_0 を 0.50 ~ 0.98(Step:0.02)、モーメントの初期値 m と増分値 Δm を 0.0001~0.01(Step:0.0001)と 0.00001~0.009(Step:0.00001)とする。

(b)ネットワークによる電流供給の結果: 図8はニューラルネットワークによる電流供給の結果を示したもので、 $0.588N/min$ での荷重に対するひずみ・累積 AE 事象数・AE 事象率・供給電流の関係が記されている。なお、ひずみが再び極大値に達したときから数え始めた AE 事象数が 5events に達した時点でネットワークによる供給は遮断され、断続通電法に切り替えられている。同図より、供給 Pattern-B と同様に約 $300 \mu\epsilon$ から SMA の予熱が開始され、累積 AE 事象数が 20events に達した付近での 5A 供給で形状回復力の効果が速やかに現れていることがわかる。つまり、ひずみの極大・極小値の差とこの区間の荷重変化は $189 \mu\epsilon$ と $0.352N$ (減少率: $537 \mu\epsilon/N$)であるのに対し、供給 Pattern-A では $151 \mu\epsilon$ と $0.692N$ (減少率: $218 \mu\epsilon/N$)、Pattern-B では $199 \mu\epsilon$

Fig.8 Experimental results of current supply pattern-C with neural network

と0.496N(減少率:401 $\mu\epsilon/N$)であることから, Pattern-Cが応答性に優れているといえる。これは, 予熱開始が300 $\mu\epsilon$ 付近からではなく, それ以前から少しずつ供給電流が増えているためだと推察される。なお, 実験終了時のひずみとき裂密度は946 $\mu\epsilon$ と14n/cmであり, これらの値は電流供給なしの場合に比べて約28%と約55%の減少を示していることから, 供給 Pattern-AやBと同様の損傷抑制効果が得られているといえる。

3.5 電流供給法の比較 皮膜の損傷抑制とSMAの応答性を評価する際に下記の領域を定め(図9参照), その領域でのひずみとAE信号の特徴を比較することによって, 各電流供給法の有効性を評価することにした。この際, ひずみが300 $\mu\epsilon$ に達した時点(A), 5Aの供給開始点を(B), ひずみが極大・極小値を示す時点(C)と(D), 断続通電法の開始時点(E)とした。

- 評価領域Ⅰ(A~B): AE事象率とひずみの変化率から, SMAへの予熱の影響を評価する。
- 評価領域Ⅱ(B~D): この領域が短くてAE事象数やAE事象率が小さく, 区間C~Dのひずみの変化率(減少率)と回復量(減少量)が大きいくほど, 応答性と損傷抑制に優れていることになる。
- 評価領域Ⅲ(C~E): この領域が長くてAE事象率が小さいほど, 損傷進展抑制に優れている。

表1は各電流供給法で得られた各項目の最小・最大値を示したもので, カッコ内の数値は各電流供給法における各点(A~E)での荷重値に対する電流供給なしの値を示したものである。同表の結果から, 以下のことを伺い知ることができる。

- 評価領域Ⅰ: 電流供給なしと比較したとき, ひ

Fig.9 Items for evaluation on damage restraint of film and reactivity of SMA

ずみの増加率に大きな違いは認められないが, AE事象率は供給 Pattern-BとCで減少傾向を示していることがわかる。これは, 5Aの供給開始が Pattern-Aよりも約0.6N遅くなり(3A供給による予熱の影響), これが電流供給なしでのAE事象数の増加範囲に入ったためだと推察される。特に, Pattern-Cでは予熱開始前と予熱開始中に少しずつ電流が増加しているので, この傾向が顕著に現れたといえる。よって, AE事象率から見た各電流供給法に対する予熱の影響は, Pattern-C→B→Aの順に現れているといえる。

- 評価領域Ⅱ: 区間B~Cでの各項目値は電流供給なしの値と変わらないが, 供給 Pattern間の各項目値は Pattern-A→B→Cの順に減少していることから, 予熱による応答性と損傷抑制の向上が現れ始めているといえる。なお, 電流供給なしとの間に差異が認められない理由として, この時点ではSMAの形状回復力が十分に発揮されていないことが挙げられる。また, 供給 Pattern-AのAE事象数が多いのは Response range-1が広いことで, ひずみの増加率が大きいのはSMAの形状回復力が十分に発揮されていないためだといえる。そして, 供給 Pattern-BとCの応答性は Pattern-Aよりも向上していることを, Response range-1が狭いことから伺い知ることができる。

区間C~DでのAE事象率・ひずみの減少率と回復量からSMAの形状回復力の効果が現れ始めていることがわかり, 供給 Pattern間での『Response range-2』『ひずみの減少率と回復量』からは応答性の向上に違いが観られる(Pattern-A→B→Cの順に Response range-2が狭くなり, ひずみの回復量が増加: ひずみ

Table 1 Evaluation of current supply method about damage restraint of film and reactivity of SMA

Evaluation area I	Range ③~④	Current supply method	AE event rate events/N	Strain rate $\mu\epsilon/N$	
		Pattern-(A)	9.115~9.429 (9.177~9.491)	161.1~169.5 (159.6~168.0)	
		Pattern-(B)	6.969~7.269 (12.09~12.39)	166.2~175.7 (158.8~168.1)	
		Pattern-(C)	5.753~6.053 (12.62~12.92)	159.9~169.1 (158.1~167.6)	
Evaluation area II	Range ⑤~⑥	Current supply method	AE event counts events	Strain rate $\mu\epsilon/N$	Response range-1 N
		Pattern-(A)	18~20 (25~27)	175.2~184.4 (164.1~172.2)	1.014 ~1.047
		Pattern-(B)	8~10 (6~9)	50.53~59.35 (41.25~49.52)	0.1984~0.3017
		Pattern-(C)	3~6 (5~7)	37.36~45.86 (40.71~47.21)	0.2762~0.4575
	Range ⑦~⑧	Current supply method	AE event rate events/N	Strain rate $\mu\epsilon/N$	Response range-2 N
		Pattern-(A)	5.669~5.931 (21.67~21.93)	-219.3~-220.8 (160.1~166.2)	0.6790~0.7121
		Pattern-(B)	7.901~8.198 (25.88~26.18)	-399.5~-401.8 (161.2~165.7)	0.4157~0.5190
		Pattern-(C)	5.472~5.872 (24.98~25.40)	-533.9~-535.7 (159.7~163.9)	0.2525~0.4338
	Range ⑨~⑩	Current supply method	AE event rate events/N	Response range-3 N	Recovery strain $\mu\epsilon$
		Pattern-(A)	13.28 ~13.54 (23.77~24.03)	1.704 ~1.737	-151.9~-152.2 (112.5~112.8)
		Pattern-(B)	16.60 ~16.90 (25.42~25.69)	0.6952~0.7985	-199.0~-199.4 (81.52~81.92)
		Pattern-(C)	9.401~9.803 (23.92~24.31)	0.6928~0.8102	-188.4~-188.9 (90.72~91.22)
Evaluation area III	Range ⑪~⑫	Current supply method	AE event rate events/N	Restraint range N	
		Pattern-(A)	9.652~9.914 (36.98~37.24)	1.433~1.683	
		Pattern-(B)	6.962~7.252 (33.23~33.53)	1.487~1.878	
		Pattern-(C)	6.333~6.721 (33.82~34.27)	1.587~2.087	

の減少率は増加)。なお、Pattern-C での各項目に著しい効果が観られた理由として、3A と 5A 供給の前から少しずつ電流が増加していることにより、他の供給法よりも小さい荷重域から SMA の形状回復効果が現れたためだと推察される。

区間③~④での AE 事象率は電流供給なしよりも減少していることから、SMA の形状回復力による損傷抑制効果を確認することができ、Response range-3 では供給 Pattern 間での応答性の向上に差異が観られた。なお、この傾向が Pattern-C で著しいのは、各区間(③~④と④~⑤)でのひずみの減少率が大きくて Response range が狭いために、他の供給法よりも低荷重域で SMA の形状回復力が発揮されたためだと推察される。また、Pattern-B と C の Response range-3 は Pattern-A よりも狭いことから、応答性を向上させることができたといえる。

(3) 評価領域Ⅲ： SMA の形状回復力が発揮されている領域なので、損傷進展抑制を評価する AE 事象率は電流供給なしに比べて激減している。供給 Pattern 間の AE 事象率の減少は Pattern-A よりも Pattern-B や C の方が大きく、Restrain range は Pattern-A や B よりも Pattern-C の方が広い。ここで、Pattern-C の Restrain range が広いのにも関わらず AE 事象率が小さいことを考慮すると、供給 Pattern-C の損傷進展抑制は他の供給 Pattern よりも優れているといえる。また、供給 Pattern-C の Restrain rang が広い理由として、SMA の応答性が他の電流供給法より優れているので、低荷重域で大きな回復力を得ることができたためであると推察される。

以上のことから、荷重負荷速度 0.588N/min に対するニューラルネットワークによる電流供給は、本報の他の供給法よりも応答性・損傷抑制・損傷進展抑制に優れていることがわかった。

3.6 ネットワークによる電流供給の有効性 図10と図11は、異なる荷重負荷速度(0.441N/minと0.735N/min)に対しても妥当な電流供給を行える汎用性を、プロセッサ機能(ニューラルネットワーク)が有しているのかを検討した一例である(図(a)は電流供給なし、図(b)はネットワークによる電流供給)。なお、図10に示した電流供給なしと供給ありに対する実験終了後のひずみは1275 $\mu\epsilon$ と932 $\mu\epsilon$ 、き裂密度は29n/cmと14n/cmであり、ひずみとき裂密度は約27%と約52%の減少を示した。一方、図11での実験終了後のひずみは1345 $\mu\epsilon$ と1012 $\mu\epsilon$ 、き裂密度は33n/cmと17n/cmであり、ひずみとき裂密度は約25%と約48%の減少を示した。

表2は前節で示した評価項目を用いて図10と図11の結果を比較・評価したもので、同表の結果から以下のことを伺い知ることができる。

(1) 荷重負荷速度0.441N/minでの電流供給なしとの比較

評価領域Ⅰ： AE 事象率が減少していることから、予熱による若干の損傷抑制が認められるが、ひずみの増加率に関しては予熱の影響が観られなかった。

評価領域Ⅱ： 区間③~④で大きな差異は認められないが、区間④~⑤では損傷抑制と応答性に関する各項目(AE 事象率、ひずみの増加率と回復量)に効果が現れ始めた。そして、区間③~④では AE

Fig.10 Experimental results of current supply pattern with neural network (Loading speed: 0.441N/min)

Fig.11 Experimental results of current supply pattern with neural network (Loading speed: 0.735N/min)

事象率が減少傾向を示していることから、損傷抑制効果が得られていることがわかる。

評価領域Ⅲ： AE 事象率の激減により、損傷進展抑制の効果が顕著に現れているといえる。

(2) 荷重負荷速度0.735N/minでの電流供給なしとの比較

評価領域Ⅰ： 3A 供給による予熱の影響は大きな荷重負荷速度で現れ難くなっていることと、負荷速度が大きいときの供給 Pattern をネットワークに教示していないことなどが影響し、各項目に対する差異は認められない。

評価領域Ⅱ： 区間⑧～⑩では、ひずみの増加率に対して効果が出始めているが、損傷抑制を評価する AE 事象数に関しては効果が認められない。一方、区間⑩～⑫の各項目値は激減してい

るので、損傷抑制効果と SMA の応答性が向上しているといえる。また、区間⑧～⑩では AE 事象率が激減していることから、損傷抑制効果が顕著に現れているといえる。

評価領域Ⅲ： AE 事象率の激減により、損傷進展抑制の効果が顕著に現れているといえる。

(3) 荷重負荷速度0.441N/minと0.735N/minの比較

評価領域Ⅰ： 各項目とも 0.441N/min の方に効果が現れている。この理由として、荷重負荷速度が速い電流供給 Pattern をネットワークに教示していないことなどが挙げられる。

評価領域Ⅱ： 区間⑧～⑩では両者に大きな違いは観られないが、区間⑩～⑫と区間⑧～⑩では各項目とも 0.441N/min の方が優れた結果を示し

Table 2 Evaluation on validity of processor function (i.e. neural network) under different environment

Evaluation area I	Range ④~⑤	Loading speed	AE event rate events/N	Strain rate $\mu\epsilon/N$		
		0.441 N/min	8.763~9.065 (17.63~17.93)	158.9~168.4 (153.8~155.6)		
		0.735 N/min	10.29~10.58 (10.26~10.55)	178.0~186.4 (164.3~172.7)		
Evaluation area II	Range ③~④	Loading speed	AE event counts events	Strain rate $\mu\epsilon/N$	Response range-1 N	
		0.441 N/min	3~6 (2~5)	52.53~61.55 (47.11~56.17)	0.2311~0.4314	
		0.735 N/min	6~8 (8~10)	38.76~48.28 (47.94~57.46)	0.2543~0.3263	
	Range ②~③	Loading speed	AE event rate events/N	Strain rate $\mu\epsilon/N$	Response range-2 N	Recovery strain $\mu\epsilon$
		0.441 N/min	6.227~6.703 (19.08~19.56)	-656.9~-658.7 (158.5~160.3)	0.2106~0.4145	-204.3~-204.8 (49.36~49.83)
		0.735 N/min	14.05~14.31 (26.79~27.05)	-205.3~-206.8 (167.8~169.3)	0.5839~0.6559	-130.5~-130.9 (106.1~106.5)
Evaluation area III	Range ③~④	Loading speed	AE event rate events/N	Response range-3 N		
		0.441 N/min	10.69~11.12 (15.39~15.82)	0.5419~0.7315		
		0.735 N/min	17.07~17.33 (27.46~27.72)	0.8892~0.9612		
	Range ②~③	Loading speed	AE event rate events/N	Restraint range N		
		0.441 N/min	8.567~8.991 (34.95~35.37)	1.343~1.837		
		0.735 N/min	6.116~6.377 (29.69~29.95)	1.301~1.593		

ている。よって、教示した荷重負荷速度よりも遅い場合には十分な対応ができていといえる。
評価領域Ⅲ： Restrain range は 0.441N/min の方が広く、AE 事象率は 0.735N/min の方が小さい値を示した。これは、0.441N/min の Restrain range が広いために、AE 事象が検出される機会が高まったためだといえる。

以上の結果と供給 Pattern-B (0.441N/min と 0.735N/min) の結果とを比較したところ、0.588N/min のときと同様の効果(表1参照)が供給 Pattern-C に観られた。以上のことから、構築したプロセッサ機能は負荷速度の異なる場合にも対応できる汎化能力を有していることがわかった。また、供給 Pattern-C の結果(図8, 図10, 図11参照)には電流が徐々に上昇する前報の供給法(AE 事象数が 5 events 増えるごとに 0.05A ずつ増加)に類似した区間が僅かに存在し、この区間で人間が考えるような電流供給をネットワークが行っていることになる。そして、これが損傷抑制効果の向上に貢献しているといえる。よって、多数の電流供給 Pattern を教示したプロセッサ機能(ニューラルネットワーク)により、よりスマートな損傷抑制を行える可能性を示すことができた。

本報で示した実験結果から、センサ機能とプロセッサ機能を改良した今回のスマート構造体が前報の課題に対する改善策となり得ることを、実験結果との照合によって明らかにすることができた。

4. 結 言

過酷な環境下で使用されるコーティング材の破損事故は、深刻な社会問題に発展する可能性が高い。そこで前報では、皮膜の損傷を能動的に抑制することを目指したスマート構造体について提案したが、SMA の応答性の向上とプロセッサ機能の充実といった課題が残されていた。よって本報では、センサ機能とプロセ

ッサ機能を変更することによって、これらの課題に対する改善を試みることにした。その結果、本報で明らかになったことを要約すると、以下のようになる。

- (1) センサ機能(AE センサとひずみゲージ)からの情報に基づいて SMA の予熱を開始することにより、応答性の向上を図ることができた。また、断続通電法の採用により、過加熱による SMA の形状記憶劣化を予防することができた。
- (2) 電流供給に関する情報を学習させたニューラルネットワークをプロセッサ機能として採用することにより、よりスマートな損傷抑制を行える可能性を示すことができた。

終わりに、本研究の一部は『関西大学工業技術研究所 研究グループ(ライフサイクルエンジニアリング研究グループ)』の援助を受けたことを記し、謝意を表す。

参 考 文 献

- (1) 佐々木 良夫, 武井 厚, 尾形 幹夫: 表面処理-化学と技術, 大日本図書(1994)。
- (2) 日本材料科学会: 先端材料シリーズ表面処理と材料, 朝倉書店 (1996)。
- (3) 遠藤 吉郎: 表面工学-金属の表面損傷とその防止法-, 朝倉書店 (1983)。
- (4) 足立 忠晴, 松本 浩之: 能動的損傷制御, 非破壊検査, 43-3 (1994), 173-176。
- (5) 福田 武人, 北出 真太郎: 複合材料の設計と評価の最前線 6. 複合材料のスマート化, 材料, 46-6 (1997), 696-702。
- (6) 江川 幸一: 知的(スマート)材料: 構造, 日本機械学会誌, 99-929 (1996-4), 239-245。
- (7) 谷 順二: インテリジェント材料・流体システムの研究動向, 日本機械学会論文集(C編), 63-615 (1997-11), 3702-3709。
- (8) 宅間正則, 新家 昇, 木村元昭, 丹羽義和: 皮膜の損傷抑制に関する基礎的研究(スマート材料の適用), 日本機械学会論文集(A編), 67-660 (2001-8), 1345-1349。
- (9) 谷 順二: インテリジェント材料・流体システム, コロナ社 (1999)。
- (10) 合原 一幸: ニューラルコンピュータ 脳と神経に学ぶ, 東京電機大学出版局 (1989)。
- (11) 中野 馨, 飯沼 一元, ニューロンネットグループ, 桐谷滋: 入門と実習 ニューロコンピュータ, 興技術評論社 (1989)。
- (12) 自然乾燥用エアゾール型応力解析塗料 STRESSMAP 使用説明書, テスコ(株)。
- (13) 戸伏 壽昭, 奥村 佳代, 遠藤 雅人, 田中 喜久昭: ひずみ制御と応力制御での TiNi 形状記憶合金の変形挙動, 日本機械学会論文集(A編), 67-661 (2001-9), 1443-1450。
- (14) 舟久保 照康: 形状記憶合金, 産業図書 (1984)。
- (15) 梅崎 栄作, 河原 栄次, 渡辺 寛: 形状記憶合金埋込み的構造材におけるき裂閉鎖機能の評価, 日本機械学会論文集(C編), 63-615 (1997-11), 3766-3771。
- (16) J.M.Mann, L.W.Schmerr and J.C.Moulder: Neural Network Inversion of Uniform-Field Eddy Current Data, Materials Evaluation, 49-1 (1991), 34-39。