

画像処理を用いた低合金鋼非破壊劣化診断（寿命評価）技術

Non-destructive Evaluation of Low Alloy Ferritic Steel Using Image Processing

技術本部 吉本宣哉*1 尾崎政司*2
西村宣彦*3 熊野信太郎*4
川瀬直人*4

火力発電設備の老朽化が進む中、効率的で信頼性の高い寿命評価技術は、プラント延命化のキー技術として重要性を増してきている。このような状況の下、当社は既設火力ボイラにおいて、使用中の組織変化に着目した金属組織学的クリープ寿命評価法を開発・実用化してきた。従来、これら評価は材料知識を有する専門家が判定してきたが、今回、この中の代表的手法である組織対比法について、画像処理技術を用いた計算機処理により劣化を評価する手法（Auto-MLAS）を開発した。これにより、専門家の知見のみに頼らない客観的な劣化評価と、コンピュータ処理による迅速な劣化評価を可能とした。

Effective, accurate evaluation of plant lifetime plays an important role in extending power plant management. MHI has developed creep damage evaluation, MLAS, for the fossil-fuel-burning plants, focusing on microstructure transition. MLAS is currently used in both domestic and overseas plants. We introduce Auto-MLAS, which computes damage classification, Auto-MLAS uses image processing, whereas conventional MLAS is based on human expertise, and enables fast, objective evaluation.

1. ま え が き

現在火力発電設備においては、運転時間 10 万時間以上経過した高経年化設備が増加する一方、新規発電設備の建設が困難な状況にある。高温かつ頻繁な起動停止を伴う過酷な運転にさらされる火力発電設備の経年劣化は、設備の安全性・信頼性を脅かす大きな問題である。このような状況から、現有設備の有効利用のために寿命延長が要求される今、適切な寿命評価技術の必要性は非常に高い。特に平成 11 年に資源エネルギー庁が発布した定検周期延長のための指針において、適切な寿命診断を行うことにより定検周期を従来の 2 年ごとから 4 年ごとへの延長を可能としたことから、信頼性の高い寿命評価技術の開発の気運が更に高まってきている。

当社は既に、金属材料の組織変化に着目した非破壊余寿命診断法（MLAS：Mitsubishi Metallurgical Life Assessment System）を開発し実機適用中であるが、今回新たに、MLAS の代表的な手法である組織対比法に付加する形で、計算機を用いた画像処理により客観的・定量的に劣化評価指標を算出する手法（Auto-MLAS）を開発したので、本報でこれについて紹介する。

2. 従来技術（MLAS）

MLAS の最も代表的な手法である組織対比法は、マルテンサイト組織を有する低合金鋼溶接部粗粒域の脆性的なクリープ損傷の寿命評価法として開発され⁽¹⁾、1987 年に実用化後、国内外を合せ延べ数百プラントに適用実績がある。これまで、破壊試験との対比による豊富な精度検証データにより寿命評価精度は検証され⁽²⁾、定検周期延長のための余寿命診断手法としても認められている⁽³⁾。

図 1 に組織対比法の概要を示す。組織対比法は機械的損傷、光学顕微鏡組織、析出物分布の 3 つの損傷区分から構成され、主に寿命前半で生じるマルテンサイト組織の回復（光学顕微鏡組織）及び析出物の形態変化（析出物分布）から成る冶金的变化と、寿命後半に発生するクリープポイド、微視き裂及びき裂の発生・合体・成長から成る機械的損傷を組合せて評価する。これは実機評価対象部位の表面から採取したレプリカ及び抽出レプリカを研究所へ持帰り、光学顕微鏡、走査型電子顕微鏡及び分析電子顕微鏡を用いて観察し、材料知識を有する専門家が組織の劣化度を 3～4 段階にランク分けして定量化する。

以下に Auto-MLAS で計算機処理方法を開発した組織対比法の 2 つの損傷区分について述べる。なお、析出物分布については、研究所内での抽出レプリカの作製及び分析電子顕微鏡での観察が必要であることから、Auto-MLAS の対象から除外した。

2.1 組織対比法（顕微鏡組織）

CrMo 鋼の溶接部粗粒域はマルテンサイト組織から成り、これに高温で応力が負荷されると、クリープ変形によりマルテンサイト組織の回復が生じる。この過程を材料知識を有する専門家が 3 段階の劣化度（ I_M 、 II_M 、 III_M ）に判定する。 I_M は未使用材と同等で、マルテンサイトラス（以下、ラスと称す）と呼ばれる粒内の線状構造が明確に観察される。 II_M はラス境界上炭化物が析出した状態である。 III_M はラスが消失し、ラス境界炭化物が分散するとともに旧オーステナイト粒界上に炭化物が析出した状態である。

材料知識を有する専門家が劣化度のクラス分けを行う際、最も着目する点はラスの消失度であり、健全な状態では明りように確認できる線状構造が次第に不明りようになる。この

*1 長崎研究所制御システム研究室

*3 長崎研究所材料・溶接研究室主席 工博

三菱重工技報 Vol. 38 No. 3 (2001-5)

*2 長崎研究所第一実験課材料・物理チーム

*4 高砂研究所電子技術研究室

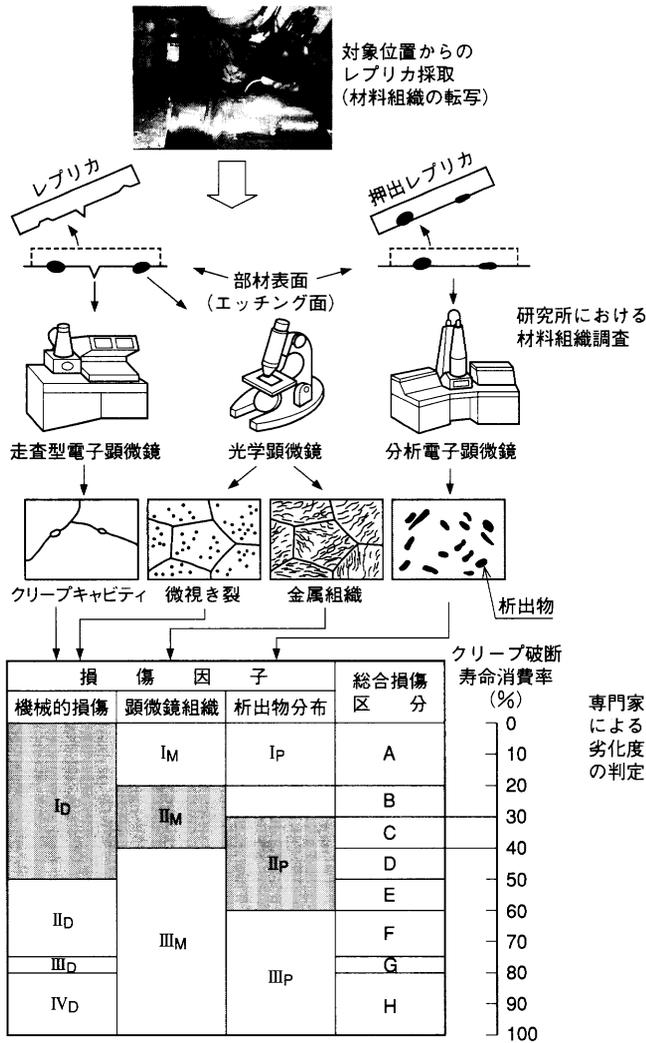


図1 組織対比法 機械的損傷, 光学顕微鏡組織, 析出物分布の3つの損傷区分を定量化して, 総合損傷区分により対象部位の寿命を評価する。
Damage classification method

健全なラスがどのくらいの割合を占めているかで劣化度を判定している。

2.2 組織対比法 (機械的損傷)

CrMo 鋼溶接部粗粒域の機械的損傷は, クリープ損傷の進行に伴って生成するクリープポイドと, これが合体して生成する微視き裂及びき裂を専門家が定量化して4段階 (I_D, II_D, III_D, IV_D) に区分する。I_Dはクリープポイドが生成していない状態又は独立したクリープポイドが発生した状態であり, II_Dはクリープポイドが連結した状態である。III_Dは1結晶粒界の全長にクリープポイドが連結した微視き裂が発生した状態であり, IV_Dは微視き裂が2結晶粒界以上にまたがったき裂が発生した状態である。なお, I_D及びII_Dは, ある一定面積内に生成するクリープポイドの数を定量化して寿命を評価するクリープポイド個数密度法と相関がある。

3. Auto-MLAS の開発

MLAS の更なる拡張 (Auto-MLAS 開発) のためには, 以下の理由で, 光学顕微鏡画像での自動劣化評価技術開発の必要性があった。

- MLAS は寿命評価に関する十分な知識と経験のある, 高度な技術を保有した一部の検査員 (エキスパート) による評価に限られる。

- MLAS は電子顕微鏡による観察が必要であるため現地サイトからデータを持帰る必要がある, 評価に時間が掛かる。

自動劣化評価の実現の手段としては, コンピュータによる画像処理技術を適用した。また, 組織観察には従来の光学顕微鏡よりも分解能が高く, 現地への携帯も可能な高精度デジタル顕微鏡を用いた。画像処理アルゴリズム開発の基本方針としては, 検査員の知見をそのまま適用することを目標に考えた。つまり, 検査員が評価するのと同じように, 以下の金属組織の認識を画像処理で実現し, 統計的手法により損傷評価パラメータを計算することを目指して開発した。

- マルテンサイトラス構造認識

- ボイド認識

この技術の開発により, プラントサイト現地で一貫性があり, かつコスト効果の高い評価の実現を達成できた。

3.1 基礎アルゴリズム

3.1.1 マルテンサイトラスの定量化 (組織対比法: 顕微鏡組織)

図2に3段階の損傷レベルでのラスの顕微鏡写真の例を示す。劣化が進行するとラスが消失しているのが分かる。処理アルゴリズムとしては, 以下の方針で健全なラス領域の抽出を試みた。

- 輝度 (画像中の各画素の明るさの度合い) に基づいて, ラスらしき部分とそうでない部分の基本的な分割 (2値化) を実施した。このとき, 結晶粒界も抽出されるが, 全体への影響は無視できるほど小さかった。

- ラス構造が不明りょうになるということは, 画像上では線状構造が切れ切れになり, 2値化後のラベル (画像上での連結した同輝度の画素の集まり) が微小面積ラベルの集合になることを意味する。よって, 面積しきい値で小さいラベルを除去することで劣化が進行したラス構造部分を除去した。

図3に今回開発したラス構造抽出の画像処理ロジックフローを示す。このフローの最後にある, 抽出されたラス健全部の面積率が識別指標となる。

全画素数を N_T , 画像処理によってラスと認識された画素数を N_M とすると, ラス健全部面積率 r_{HAZ} は式 (1) で表される。

$$r_{HAZ} = N_M / N_T \quad (1)$$

3.1.2 クリープポイドの定量化 (組織対比法: 機械的損傷)

図4に4段階の損傷レベルでのそれぞれのクリープポイドの顕微鏡写真の例を示す。劣化が進行するとクリープポイドの数と大きさが増加していくことが分かる。処理アルゴリズムとしては, 以下の方針でポイド領域の抽出を試みた。

- 輝度に基づいて, ボイドらしき部分とそうでない部分の適当な分割 (2値化) を実施した。

- とぎれた粒界部分を除去するために, 微小ラベルの除去を行った。

上記処理後に残っているラベルのほとんどは, ボイド及び

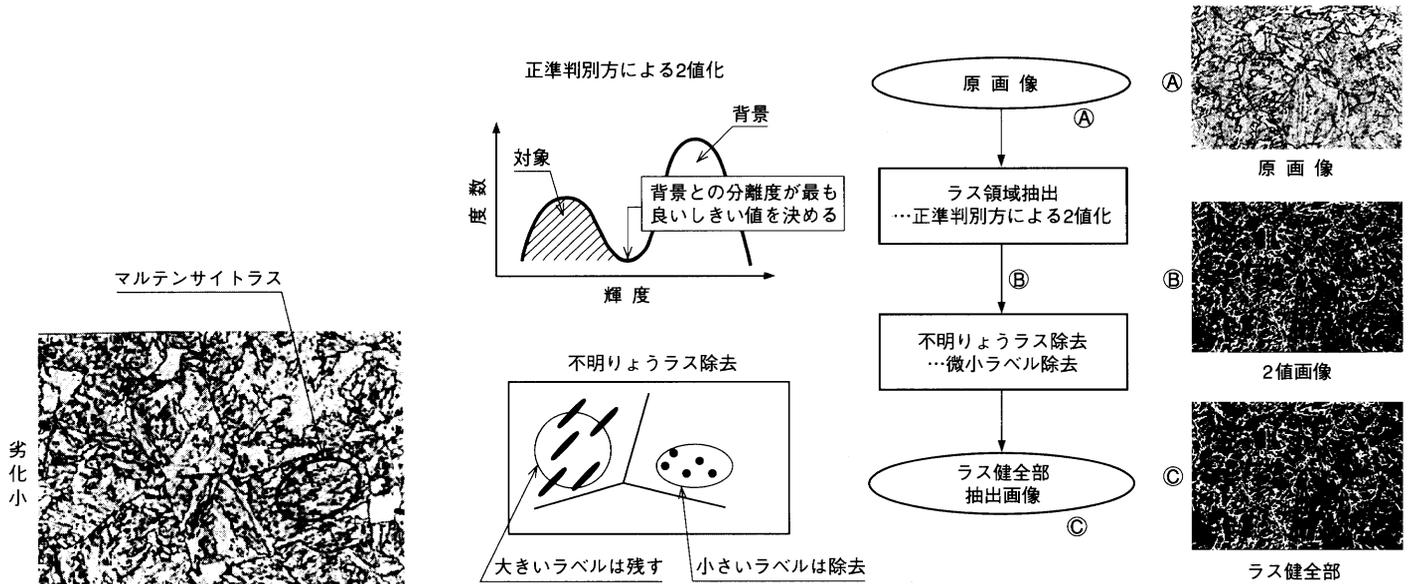


図3 ラス構造抽出処理フロー ラス領域抽出後、面積しきい値で微小ラベルを除去しラス健全部（面積の大きいラベル）を抽出。
Lath extraction flow

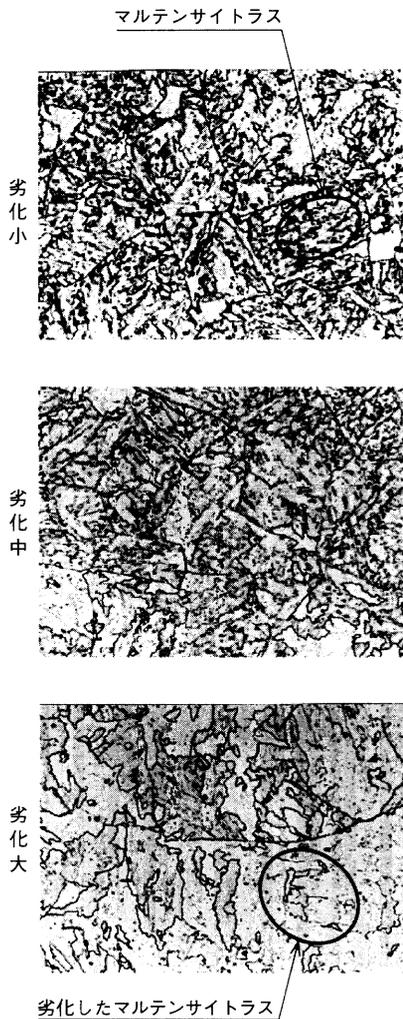


図2 劣化に伴うラスの消失 さの葉状に見える組織がマルテンサイトラスである。劣化が進むにつれて、ラス構造が消失していく。
Dissipation of martensitic lath according to life consumption

区分	寿命消費率 (%)	標準組織 I (光学顕微鏡)	標準組織 II (走査型電子顕微鏡)	判定基準
I _D	0~50			機械的損傷なし、又は独立したクリープポイド発生。
II _D	50~75			クリープポイドの連結
III _D	75~80			微視き裂の発生
IV _D	80~100			き裂の発生

図4 劣化に伴うポイド発生の変化 クリープポイドの発生・成長・連結が分かる。
Generation of void according to life consumption

粒界であることが確認されている。したがって、ポイドは円に近く粒界は線状の構造であることに着目して、次に表す円形度を識別指標とした。ラベル周辺画素数を N_R 、ラベル面積を N_A とすると、ラベル円形度 r_c は式(2)で表される。

$$r_c = 4 \pi N_A / N_R^2 \quad (2)$$

r_c は、円に近いほど大きく、複雑な形ほど小さくなる。

さらにこれに加え、ラベル面積、アスペクトレシオ（ラベルの長短比）、正規化輝度平均、正規化輝度標準偏差も識別指標とし、ポイド抽出の正解率が最も高くなるよう、各識別指標の最適な重み係数を探索（学習）・選定した。

図5に今回開発したポイド抽出の画像処理ロジックフロー

を示す。

3.2 検証結果

評価対象データには、火力発電設備の伝熱管など損傷発生の可能性が高い部位での使用率が高い STBA 23 と STBA 24 を選定した。各供試体共、被覆アーク溶接法により突合溶接継手を作製後、溶接後熱処理として 715°C、15 min 保持後空冷の熱処理を行った。その後、550~650°C で 30~10 000 h の高温加熱試験を行った。

これらについて、HAZ 粗粒域の代表的部位の光学顕微鏡組織を 300 倍で撮影し、前述したラス抽出ロジックで画像処理を実施した。

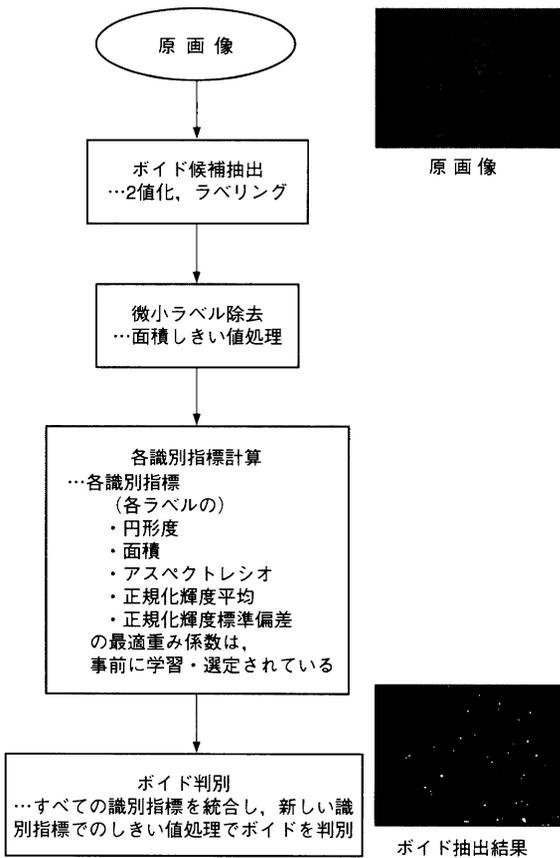
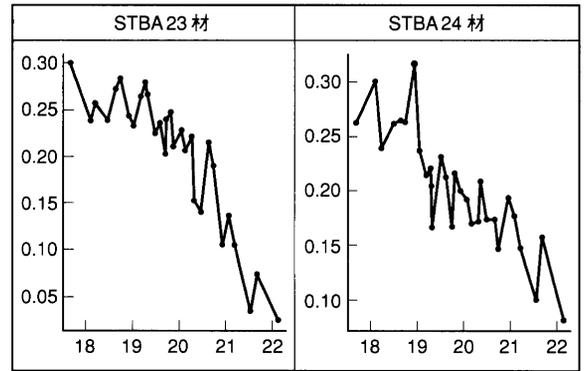


図5 ボイド抽出ロジックフロー 複数の識別指標を、あらかじめ学習・選定された最適な重み係数により組合せ、しきい値処理でボイドを判別する。 Void extraction flow



縦軸：画像処理劣化指標
横軸：Larson-Miller Parameter (C=20)

図6 ラス抽出画像処理劣化指標と LMP の関係 画像処理劣化指標と LMP に高い相関がある。 Relation between damage index and LMP

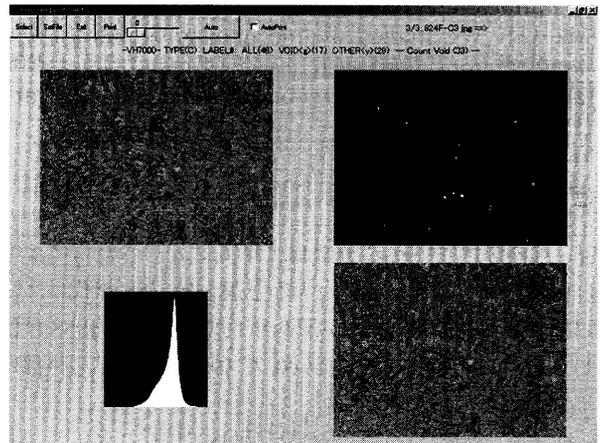


図7 劣化診断画像処理アプリケーション画面例 (ボイド抽出ロジック) 画面左上は原画像、左下は二値化時の原画像の輝度ヒストグラム、右上はボイド抽出結果、右下は原画像にボイド抽出結果を重ね合わせたものである。これにより、PCを用いて、プラントサイト現地での寿命評価が可能になった。 Screen shot of damage evaluation tool on PC

図6に算出した画像処理劣化指標(ラス健全部面積率)と Larson-Miller Parameter (以下、LMP と称す：パラメータ定数 $C=20$) の関係線図を示す。LMP は、異なる温度、時間の試験条件を整理する際に一般的に用いられる指標であり、LMP 値が大きいほど劣化度は大きくなる。画像処理劣化指標と LMP は高い相関を示しており、また、検査専門家の3段階判定に対する画像処理劣化指標の3段階評価の正解率は、STBA 23/STBA 24 共に、90%以上となり、本劣化指標が妥当であることが確認できた。

また、ボイド認識に関しては、前記供試体のクリープ中途止め試験片を用いて評価した。前述したボイド抽出ロジックで算出した寿命消費率と、検査専門家の判断した寿命消費率との間には良い相関が認められ、本ボイド抽出ロジックが妥当であることが確認できた。

これらに併せて、ラス・ボイド認識ロジックを搭載した、Windows PC 上で動作するアプリケーションを開発した。図7にその画面例を示す。

4. む す び

火力発電設備で用いられている低合金鋼のクリープ損傷の寿命評価技術として実績のある MLAS の“組織対比法”を、専門家の知見を反映したアルゴリズムを有する画像処理手順を用いて拡張し、Auto-MLAS を開発した。また、併せて Auto-MLAS を実装したパソコンアプリケーションも開発し

た。これにより、一貫性がある定量評価と高効率な寿命評価が可能となった。

(特許)

- MLAS；特許第 2084622 号，ほか，多数出願。
- Auto-MLAS；特願 2000-116977 号，ほか，現在出願手続き中。

参 考 文 献

- (1) 佐田ほか，既設ボイラ耐圧部の非破壊損傷検出技術及び寿命評価技術の開発，三菱重工技報 Vol.24 No.3 (1987)
- (2) 増山ほか，劣化組織の定量化による既設火力ボイラの非破壊寿命評価法の実用化，三菱重工技報 Vol.28 No.1 (1991)
- (3) 電気事業法施工規則第 94 条の 2 第 2 項第 1 号の運用について (上)(中)(下)，通産省公法 No.14597, 14598, 14599 (平成 12 年 8 月 9,10,11 日)