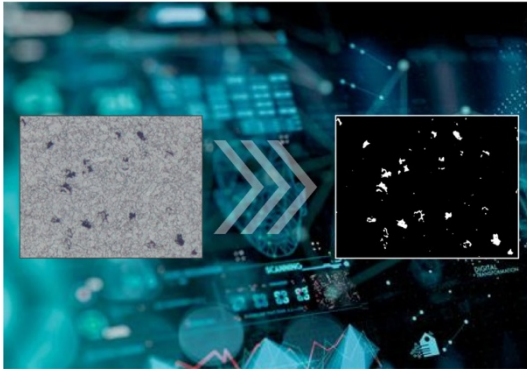


AIによる画像解析を活用した 高強度フェライト鋼配管溶接部の余寿命診断サービス

Remaining Life Assessment Service of High Strength Ferritic Heat Resistant Steel Piping
Weld Utilizing Image Analysis by AI



本田 雅幹*1
Masaki Honda

熊野 信太郎*2
Shintaro Kumano

岩佐 直樹*1
Naoki Iwasa

山口 航*3
Wataru Yamaguchi

プラント設備の安定運用に必要となる設備保全に関して、三菱重工業株式会社(以下、当社)では様々なアフターメンテナンスサービスを開発し、お客様に提供している。しかしながら、ベテランサービスマンや専門家の退職などの問題が今後深刻化すると予想されるため、人に依存しないサービス提供の仕組みを構築する必要がある。その対策の一例として、AIによる画像処理を活用したプラント配管溶接部の余寿命診断サービスを開発した。保全計画立案に必要な情報を、これまで以上に早く、正確にお客様に提供できるようにすることで、適切な設備保全の実行に繋がり、ひいては中長期的なプラント設備の信頼性確保と電力の安定供給に貢献する。

1. はじめに

発電プラントや化学プラントなどの当社の大型プラント設備は、お客様に納入した後、数十年に亘って使用されるものが多い。このような製品をお客様に安心して、末永く使用・運用いただくためには、製品の性能を十分に引き出すことや信頼性を向上することが必要であり、これには適切な設備保全が不可欠となる。当社は従来、豊富な製品知識や経験に基づいて、設備保全に関するアフターメンテナンスサービスを開発し、お客様に提供してきた。その種類は製品によって様々であるが、例えば、配管の余寿命診断サービス⁽¹⁾や非破壊検査・評価サービス⁽²⁾、遠隔監視・異常診断サービス⁽³⁾などがあげられる。

ここで昨今のプラント設備における保全上の問題に目を向けると、多くのプラント設備では高経年化が問題となっており⁽⁴⁾、設備保全の重要性はますます高くなると考えられる。また、専門知識が豊富なベテランの退職などによる技術伝承問題や労働力不足の問題も顕在化しており⁽⁴⁾、これは当社も例外ではなく、これまでベテランのサービスマンやエンジニア、専門家などによって支えられてきたアフターメンテナンスサービスの提供レベルの維持・向上への対応が急務である。このように、プラント設備の安定運転に向けて、今後一層重要度の高まる設備保全に関するアフターメンテナンスサービスを継続的にお客様に提供するために、人の力量や経験に依存しない仕組みを早期に構築することが課題の一つである。

これに対し当社では、ベテランや専門家などの知識やノウハウを学習させた AI (Artificial Intelligence) や人の作業を代替するロボットなどを活用し、アフターメンテナンスサービス業務の品質確保と自動化に関する取組みを行っている。本報では、重要な設備保全方法の一つである状態保全 (CBM: Condition Based Maintenance) に必要な余寿命診断に関する取組みの例として、高強度フェライト鋼配管溶接部を対象に開発した AI 技術の内容、ならびに同技術を用いた

*1 総合研究所 サービス技術部

*2 総合研究所 サービス技術部 博士(情報学)

*3 MHIソリューションテクノロジーズ(株) 長崎支社 第一技術部

寿命診断サービスについて述べる。

2. 高強度フェライト鋼配管溶接部に生じるクリープ損傷と余寿命診断

まず、上述した余寿命診断の対象となる高強度フェライト鋼配管溶接部と、そこで生じるクリープ損傷について述べる。高効率発電プラントを支える材料の一つである高強度フェライト鋼は、高強度フェライト系耐熱鋼や Creep Strength Enhanced Ferritic (CSEF) Steels などとも呼ばれ、焼戻し抵抗の高い炭化物、炭窒化物、あるいはその他の安定、準安定相で安定化されたマルテンサイト、またはベイナイト組織を高度に制御することによってクリープ強度を高めたフェライト系鋼の総称であり⁽⁶⁾、超々臨界圧(USC:Ultra Super Critical)ボイラの主要配管や伝熱管、原子力発電プラントの配管などに採用されている。これらの配管や伝熱管は、高温・高圧の環境で長時間使用されるため、マイクロ組織の経年的な変化に伴うクリープ強度低下とクリープ損傷が生じ、特に母材部よりもクリープ強度の低い溶接熱影響部(HAZ:Heat Affected Zone)細粒域にクリープ損傷が生じやすい⁽⁶⁾。図1に一般的なクリープ損傷挙動の概念図を示す。クリープ損傷の初期段階では、析出物の凝集・粗大化や転位密度の低下などの組織的な変化が生じるが、中期以降は、組織変化に伴ってクリープひずみが蓄積しやすくなり、クリープひずみの蓄積とともにクリープボイドと呼ばれる空隙が結晶粒界に優先的に生じ、それらが増加・合体して、クリープ亀裂が発生する。このクリープ損傷は、一定面積中のボイドの数を示すボイド個数密度とクリープ破断寿命消費率に相関関係があり、この相関性を利用し、ボイド個数密度からクリープ寿命消費率を評価する手法をボイド個数密度法⁽¹⁾と呼ぶ(図2)。

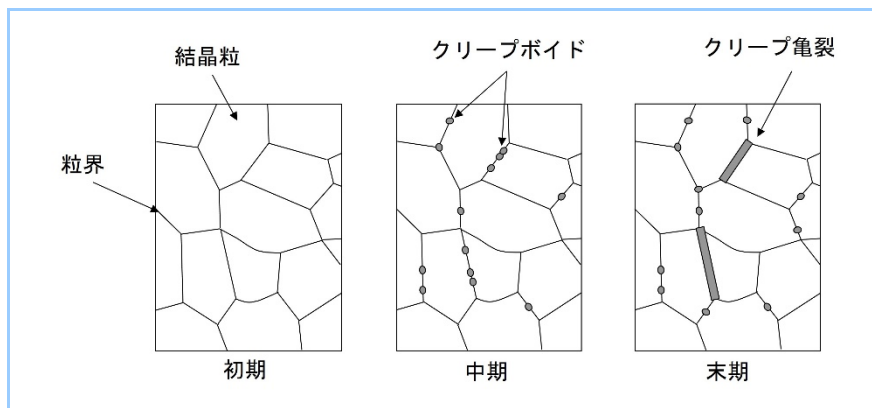


図1 一般的なクリープ損傷の進行とボイドの発生・成長

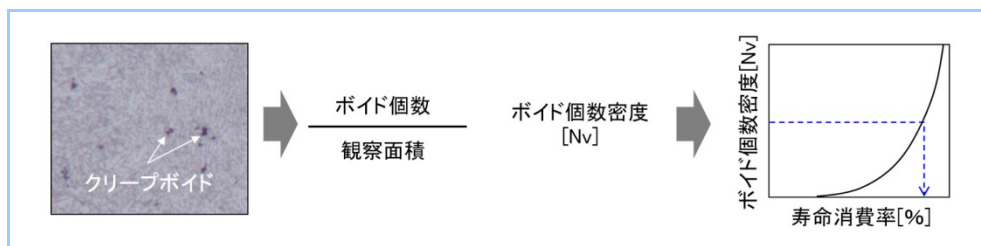


図2 ボイド個数密度法による寿命診断の概念図

3. 従来技術と問題点

ボイド個数密度は、レプリカ法により金属表面から採取した組織を専門家が顕微鏡で観察し、ボイドを一つ一つ数えて算出されるものであるが(図3)、組織画像からボイド個数密度を評価可能な専門家の人数に限られることや、評価に時間を要するなどの問題が顕在化している。そこで当社では、高強度フェライト鋼の誕生より前から多用されていた低合金鋼について、ボイドを判別する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技術を開発し、ボイド個数密度法による寿命評価の半自動化手法を確立してこれまで多数の実績を積んでいる⁽⁷⁾。この画像処理アル

ゴリズムは、ポイドの円形度、面積、アスペクト比および輝度などの画像特徴をポイド識別の指標とし、専門家の知見を基にそれらの最適なパラメータを定めて専門家と同様の観点で低合金鋼のHAZに生じるポイドを自動的に識別可能とした(図4)。ここで、低合金鋼のHAZに生成するポイド画像と高強度フェライト鋼のHAZに生成するポイド画像の例を図5に示す。ここで示したものは一例ではあるが、低合金鋼のポイド形状と比較して高強度フェライト鋼のポイド形状は複雑なものが多い。よって、低合金鋼用の画像処理アルゴリズムで高強度フェライト鋼のポイドを識別することは困難であり、高強度フェライト鋼のポイド個数密度の評価、ならびに余寿命評価は、専門家が1件1件手作業で行わざるを得なかった。

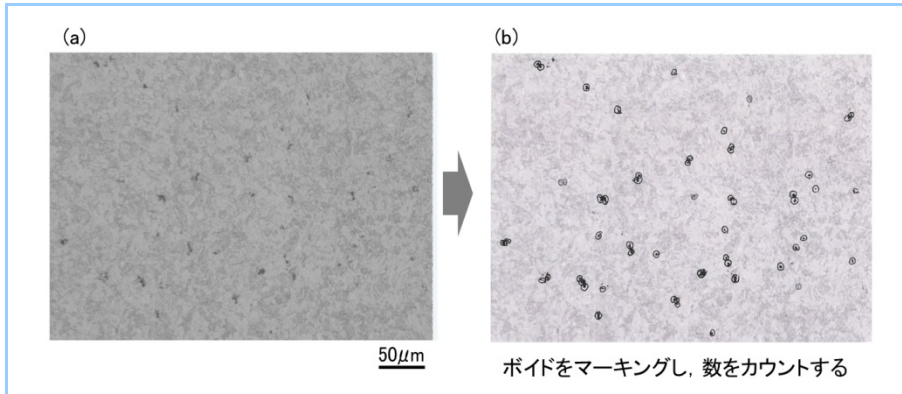


図3 専門家によるポイドの検出例
(a) 観察対象画像, (b) ポイドマーキング結果

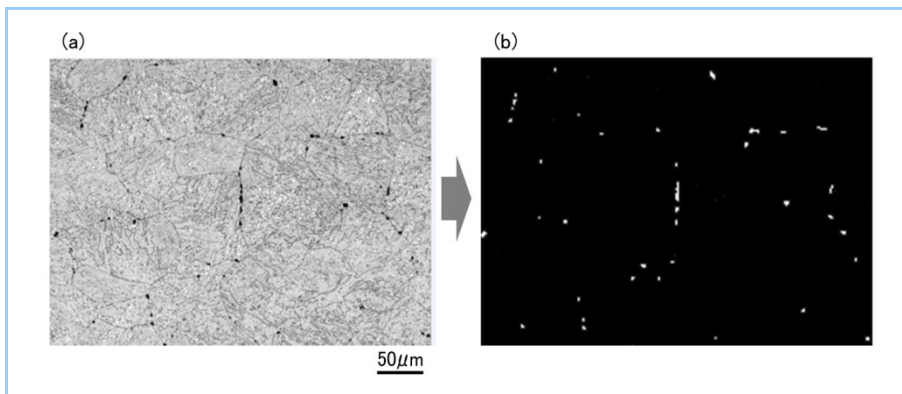


図4 低合金鋼 HAZ に発生したポイドと画像処理の例
(a) 原画像, (b) 識別画像

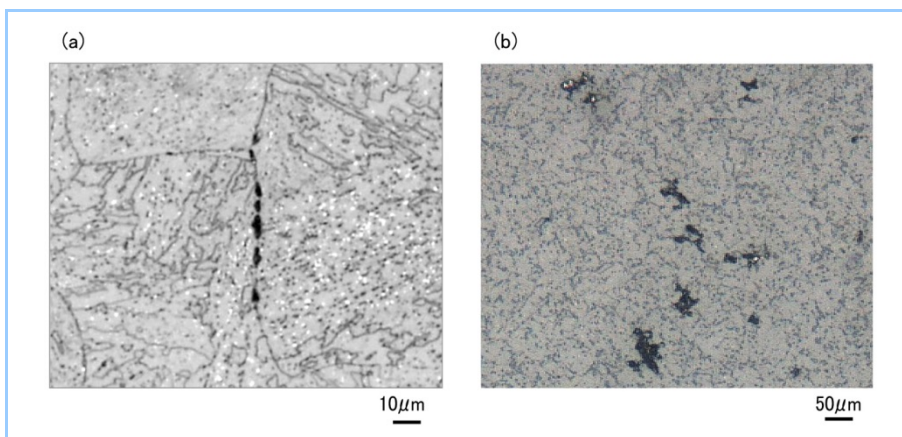


図5 低合金鋼と高強度フェライト鋼のポイド形状の比較
(a) 低合金鋼, (b) 高強度フェライト鋼

4. ラベル補正型 AI を用いた画像処理技術の適用

ボイドの円形度や面積などの一般的な画像特徴に着目した画像処理では、識別が困難な高強度フェライト鋼のボイドに対し、近年注目を集める AI 技術の適用を試みた。AI を活用した材料組織画像の識別手法は多数存在し、セグメンテーションなどの手法が知られている⁽⁸⁾。ボイド画像の場合、バックグラウンドである組織画像やコンタミネーション(レプリカ採取時の混入物など)と、ボイド領域とを識別する必要があるため、インスタンスセグメンテーションを用いることが有効であると考えられる。しかしながら、インスタンスセグメンテーションを用いた画像識別器を作るには、ラベリング済み(アノテーション済み)の教師画像を多量に用意する必要があり、多大な時間とコストを要することになる(図6)。

そこで当社では、簡易的にラベル付けした少量の画像と多量のラベルなし画像から、多量のラベル付き画像を生成可能な教師ラベル補正技術^{(9), (10)}に着目し、本技術を活用して高強度フェライト鋼のボイド画像識別器の構築を試みた(図7)。

4.1 及び 4.2 に、上記技術の適用性検証試験に関する手順および結果を述べる。

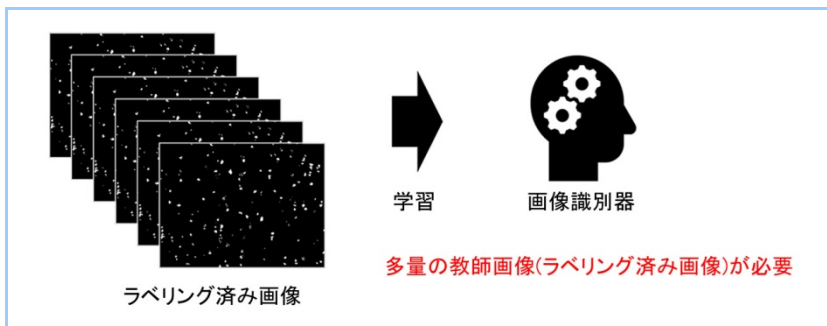


図6 一般的な画像学習の問題点

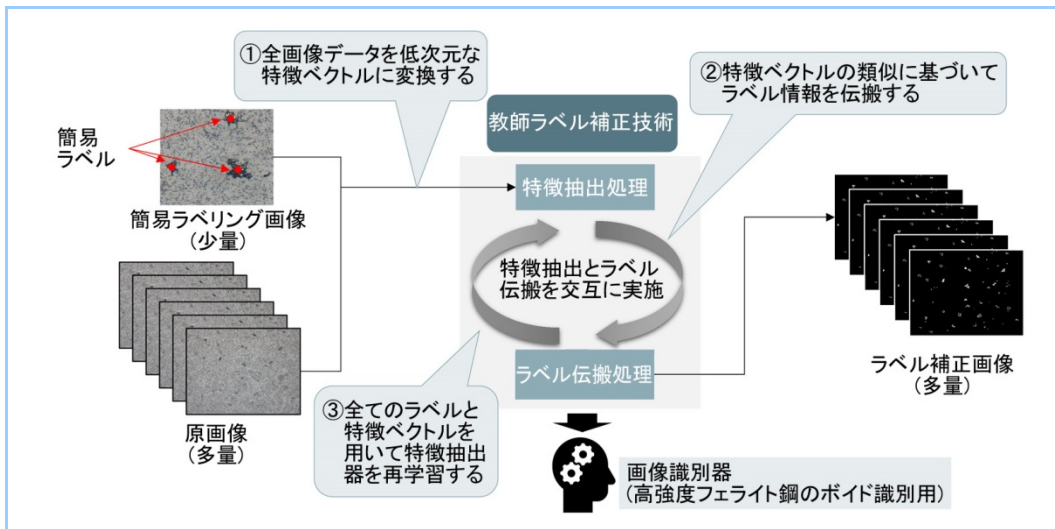


図7 教師ラベル補正技術を活用した高強度フェライト鋼ボイド画像識別器の構築手順

4.1 試験手順

今回は、高強度フェライト鋼の中でも国内ボイラの配管や伝熱管で採用実績の多い Gr.91 系鋼(火 STPA28 など), Gr.122 系鋼(火 SUS410J3TP など), 及び Gr.23 系鋼(火 STPA24J1 など)を検討対象とした。学習に用いた画像データの情報を表1に示す。教師ラベル補正技術は、基本的にラベルなし画像と簡易ラベル付き画像を学習に用いるが、今回は識別器の精度向上のためにラベル付き画像を一部学習に用いた。なお、これらの画像を学習する際の前処理として画像分割を行った。これにより、学習に用いた実際の枚数は表1に示す数量よりも多くなるが、ラベル付き画像の作成枚数は同じである。表1の画像について、図7に示した①～③の手順で処理を行

い、正答率の高い補正されたラベル画像が生成されるまでラベル伝搬と特徴抽出器の学習を交互に繰り返した。なお、正答率の指標は、画像上の物体検出の指標として用いられる IoU (Intersection over Union) とし、専門家が作成した正解画像の IoU などから、IoU が 0.6 以上であれば精度良くボイドを識別できていると定義した。

表1 学習に用いた画像データ

対象鋼種	学習に用いた画像[枚]		
	原画像	簡易ラベル画像	詳細ラベル画像
Gr.91 (9Cr-1Mo-V-Nb)	140	9	13
Gr.122 (11Cr-0.4Mo-2W-Cu-V-Nb)	91	42	3
Gr.23 (2.25Cr-1.6W-V-Nb)	75	0	0
合計	306	51	16

※()内は基本成分を示す

4.2 試験結果

上記手順で作成した識別器を用いてラベルなし画像(原画像)を識別した結果の代表例を図8に示す。この画像に写るボイドは形状が複雑であるが、識別画像の IoU は 0.72 と精度良く識別できていることがわかる。なお、ボイドが無い場所を一部誤検知している例もあるが、このような場合は、後述するペイントツールにより専門家が画像を訂正することで、IoU ならびにボイド個数密度の評価精度を専門家と同等にできる。

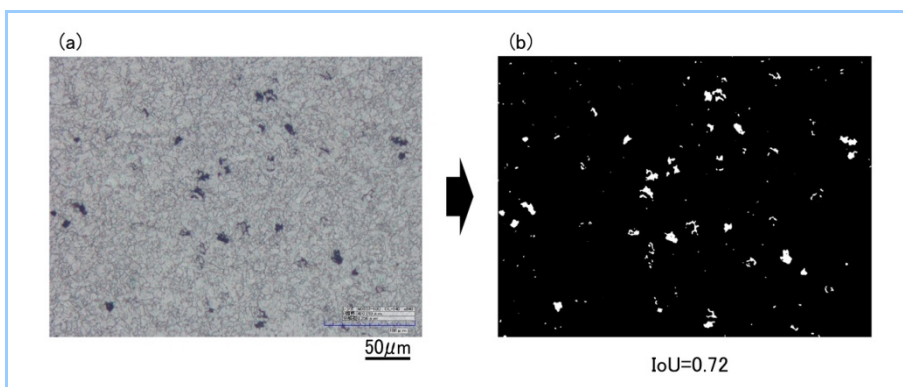


図8 ラベル補正型 AI による画像識別結果の例
(a)原画像, (b)識別画像

5. 寿命診断サービスの提供価値

今回構築した識別器を活用し、高強度フェライト鋼配管溶接部のボイド個数密度評価と寿命評価が可能なシステムを開発した。専門家による従来の寿命診断手法と本システムを用いた寿命診断手法の作業手順を図9に示す。従来は一連の作業を専門家が行っていたが、本システムを活用する場合は、AI が自動で識別した画像を必要に応じて専門家が GUI (Graphical User Interface) 上でペイントツールを使って訂正し、その画像からボイド個数密度、ならびに寿命消費率を自動で評価することができる。本システムを用いて Gr.23 系鋼のボイド画像から寿命消費率を評価した結果を図10に示す。同図の縦軸は専門家による寿命評価結果、横軸は AI を活用した本システムによる寿命評価結果であり、AI による評価結果は専門家の評価結果と良く一致した⁽¹¹⁾。また、一連の余寿命診断時間について、専門家(2人)による従来手法と上記システムを用いた新手法とを比較した結果を図11に示す。新手法によって診断時間を約 80%程度短縮できることが示された。

以上の結果から、ボイド画像から余寿命を評価するアフターメンテナンスサービス業務に AI を活用することにより、専門家への依存度を低減しつつ、従来専門家が行っていた診断サービスと同品質のものを従来よりも短期間でお客様に提供することが可能となった。中長期的な設備保全

計画の検討に必要な余寿命診断結果を、これまでよりも早く、正確にお客様に提供できるようにすることで、適切な設備保全の実行に繋がり、ひいては中長期的なプラント設備の信頼性確保と電力の安定供給に貢献できると考える。

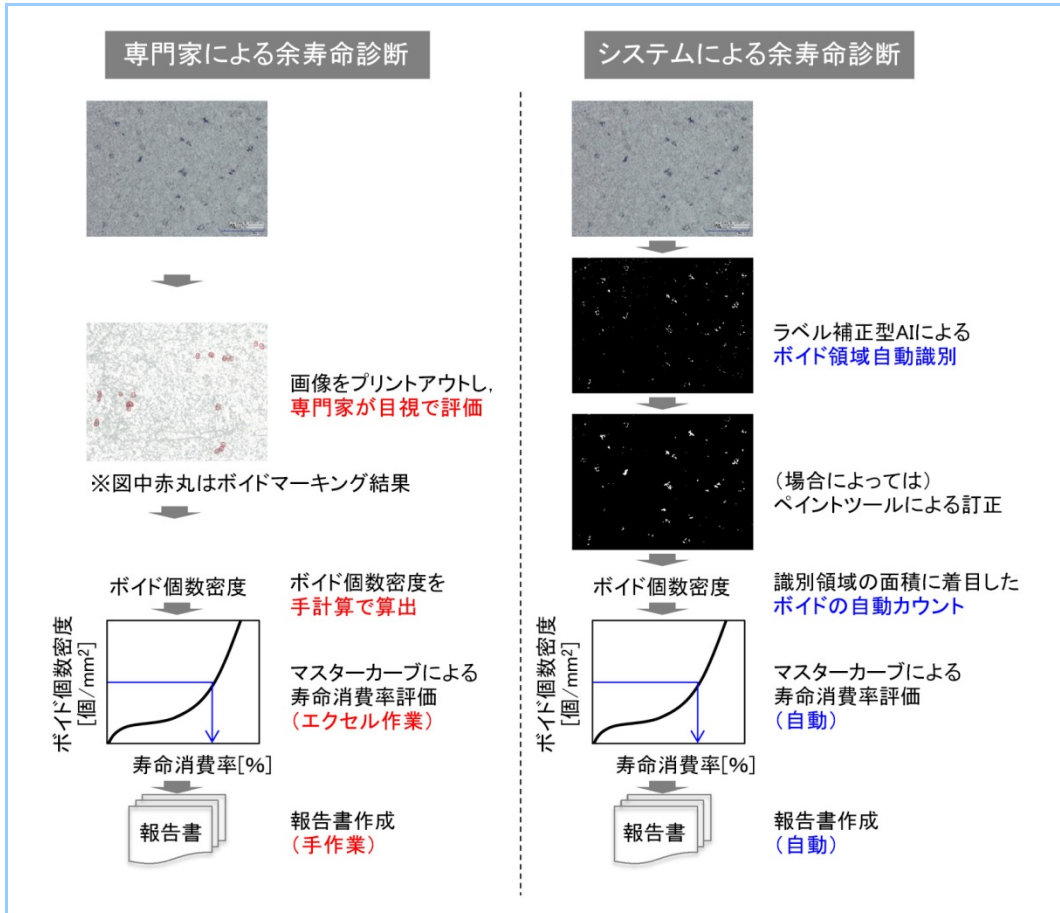


図9 専門家による余寿命診断とシステムによる余寿命診断の比較(高強度フェライト鋼の場合)

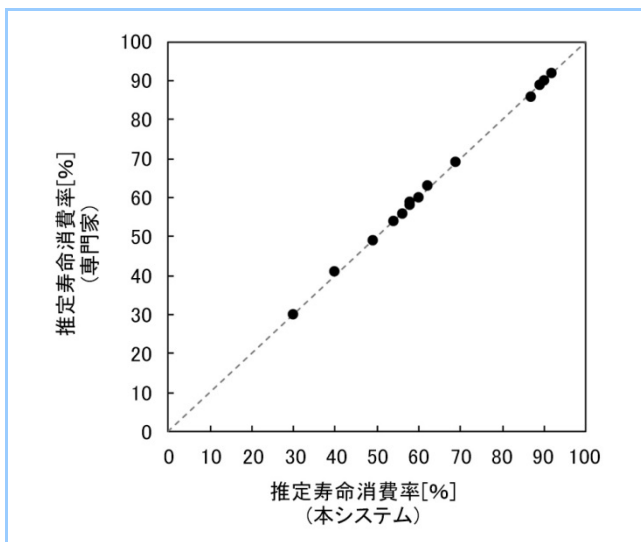


図10 寿命診断精度の検証結果 (Gr.23系鋼(2.25Cr-1.6W-V-Nb))

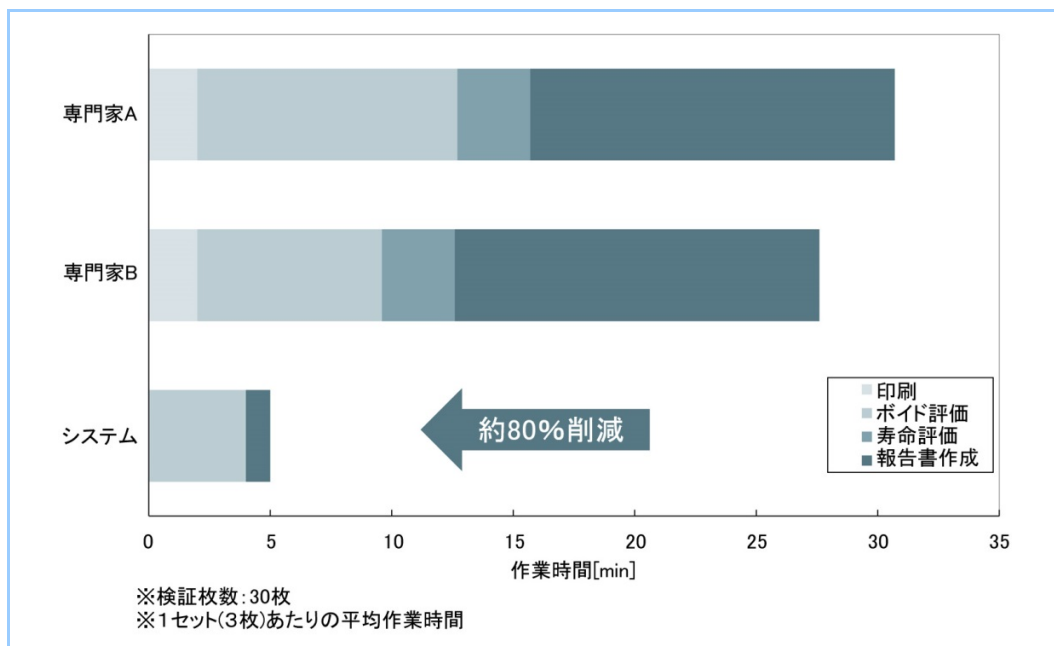


図 11 余寿命診断業務への AI 適用効果

6. まとめ

本報では、当社がお客様に納入したプラント設備の保全業務に関するアフターメンテナンスサービスを対象に、ベテランサービスマンや専門家に依存せず、これまで以上のサービスをお客様に提供するための取組み事例を紹介した。1章であげたプラント設備の高経年化と労働力不足の問題は、今後も深刻化すると予想される。このような社会問題の解決、ならびに当社サービス力向上に向け、今後も AI などの先進技術を活用した取組みを進めるとともに、お客様により一層満足いただけるサービス提供を目指す。

7. 謝辞

本報に関する研究成果は日本電信電話株式会社 (NTT: Nippon Telegraph and Telephone Corporation) との協業成果であり、NTT 及び NTT グループ関係者のご協力に謝意を表す。

参考文献

- (1) 西村宣彦ほか, 定検時期変更のための三菱火力ボイラ配管寿命診断システム, 三菱重工技報, Vol.37 No.1 (2000) p.46~49
- (2) 黒石卓司ほか, 発電設備向けの新しい総合サービス事業, 三菱重工技報, Vol.44 No.4 (2007) p.45~48
- (3) 森村弘一ほか, お客様に安心いただけるサービス技術, 三菱重工技報, Vol.48 No.1 (2011) p.65~71
- (4) 経済産業省, プラントにおける先進的 AI 事例集, (2020)
<https://www.meti.go.jp/press/2020/11/20201117001/20201117001-4.pdf>
- (5) 増山不二光, 超々臨界圧発電ボイラ用鋼, ふえらむ, Vol.28 No.9 (2023) p.24~32
- (6) 駒井伸好, 高強度フェライト系耐熱鋼の溶接継手部特性, 溶接学会誌, Vol.73 No.4 (2004) p.36~39
- (7) 吉本宣哉ほか, 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, 三菱重工技報, Vol.38 No.3 (2001) p.146~149
- (8) 足立吉隆ほか, 画像認識と定量組織学1 (材料工学的に重要な組織特徴量の抽出), ふえらむ, Vol.25 No.9 (2020) p.29~38
- (9) 村崎和彦ほか, ラベルなしデータのクラス比率に基づく Semi-Supervised Triplet Loss による深層表現学習”, 第 26 回画像センシングシンポジウム SSII2020, IS1-24 (2020)
- (10) NTT R&D フォーラム 2018
<https://labevent.ecl.ntt.co.jp/forum2018a/info/exhibit2/detail/H11.html>
- (11) 本田雅幹ほか, AI による画像解析を活用した高強度フェライト系耐熱鋼配管溶接部の余寿命診断技術, 動力・エネルギー技術の最前線講演論文集, Vol.25 (2021)