

令和 6 年 5 月 28 日現在

機関番号：32682

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03777

研究課題名（和文）アコースティックエミッション法を用いた腐食減肉量の定量評価手法の開発

研究課題名（英文）Development of a Quantitative Evaluation Method of Corrosion Defect Using Acoustic Emission Method

研究代表者

松尾 卓摩（Matsuo, Takuma）

明治大学・理工学部・専任教授

研究者番号：80406834

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：アコースティックエミッション（AE）法を用いて鋼製構造物の腐食モニタリングを行うためにAE波のモード強度比を用いた腐食状態評価手法を構築した。薄板鋼板の腐食モニタリングによって、ラム波AEのSモードとAモードの強度比が経時的に変化することが確認でき、減肉量が板厚の50%までの範囲であれば評価できる可能性を示した。また、実際の大型構造物で適用するために、AE波の距離減衰を考慮した補正方法を検討した。モードごとの減衰比を算出し、検出されたAEに適用することで、モード強度比を用いた腐食減肉量評価の精度が向上することが確認できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

アコースティックエミッション（AE）法で鋼製構造物の腐食をモニタリングする場合には、腐食進展量の定量評価が難しい課題がある。これは、AE信号の「発生頻度」というパラメータの大小と腐食進展量に直接的な関連性がないことが原因である。一方で本研究で着目したAE波のモードの強度は、AE発生源となる錆の割れに起因するパラメータであり、AE発生位置、すなわち腐食減肉量と関連するパラメータである。そこで、本手法を用いることで腐食減肉量を定量的に評価できる可能性を示し、AE法による腐食モニタリング技術を通じて社会インフラの安全性の向上に寄与できると考えられる。

研究成果の概要（英文）：A corrosion condition evaluation method using the mode intensity ratio of acoustic emission (AE) signals was developed for monitoring corrosion of steel structures. Through corrosion monitoring of a thin steel plate, it was confirmed that the intensity ratio of the S-mode and A-mode of Lamb wave AE changes as a function of duration. This result indicates the possibility that the amount of wall thinning can be evaluated within a range of up to 50% of the plate thickness. To apply this method to actual large structures, a correction method involving the distance attenuation of AE signals was investigated. It was confirmed that calculating the attenuation ratio for each mode and applying it to the detected AE improved the accuracy of evaluating the amount of corrosion loss using the mode intensity ratio.

研究分野：機械材料・材料力学

キーワード：非破壊検査 アコースティックエミッション 腐食 モニタリング

1. 研究開始当初の背景

我が国のインフラ設備やプラントでは、高経年化による損傷が多く発生している。特に、橋梁やガス・水道用鋼管に代表される鋼製構造物にとって腐食は避けられない問題である。防食には種々の方法があるが、経済性や施工性から塗装による防食が最も普及している。しかし、塗膜表面の傷や塗装時の欠陥部などから腐食が発生・進展する場合、腐食状態を表面から評価することは困難となる。また、配管内面から腐食が進展する場合、外観から腐食状態を評価することはできない。それらの点検は目視や打音検査が主であり、検査には時間と費用がかかることから、高精度かつ簡便で安価な検査技術が求められている。

鋼製構造物の腐食を検査する手法の一つにアコースティックエミッション (Acoustic Emission, 以下 AE と表記) 法がある。AE 法は材料の損傷に伴って発生する弾性波を検出する手法である。鋼製構造物の腐食の場合では、腐食の進展時に伴って生じる腐食性生物 (錆) の自壊によって生じる二次 AE 波を検出することで腐食の進展の有無や腐食位置を標定することが可能になる。しかしながら、AE 法を用いた腐食進展状態 (減肉量) の評価については短期的な AE 計測で生じる AE イベント数によって腐食進展量の評価が可能であるという報告がある一方、錆の破壊による AE の発生は発生頻度のばらつきや周辺環境の影響があるために腐食進展量の評価には長期的なモニタリングが必要であるという報告もある。これらの議論について明確な結論が出ない原因として、AE 信号の「発生頻度」というパラメータの大小と腐食進展量に直接的な関連性がないことが原因であると考えられる。例えば、同じ超音波を用いる非破壊検査手法である超音波探傷による腐食減肉量の評価では、検査対象を伝搬する超音波の音速と反射エコーの到達時間から残存肉厚を評価できるが、評価方法については数式的に示すことが可能である。一方で、前出の AE 発生数による評価の場合では、このような説明が難しい。

2. 研究の目的

申請者らは AE 法を用いて腐食減肉量の定量的な評価を行うための新しい手法として、鋼板や鋼管を伝搬する弾性波の伝搬モードに着目した。板を伝搬する弾性波の場合、板の肉厚方向の中心から対称に変形して伝搬する S モードと非対称に変形して伝搬する A モードが存在する。そして、弾性波の発生源が板厚中心に近づくほど S モードの励起効率が向上することが明らかとなっている。この特性を用いて、申請者らは鋼板の腐食減肉量が板厚の半分までの範囲であれば、腐食減肉量が増加するほど AE 波に含まれる S モードの強度が増加すると推定した。つまり、検出した AE 波の S モードと A モードの強度比率から腐食減肉量を推定できると考えた。申請者らは上記の手法について、疑似 AE 音源を用いて板を伝搬する AE 波の板厚方向の音源位置と S モード波の強度に相関が見られることを明らかにした。

そこで本研究では、上記の手法を実際の腐食減肉量評価に適用するため、初めに減肉なしの薄板鋼板に対して加速腐食試験を行い、腐食が鋼板を貫通するまで試験を実施する。そして、腐食進展量と AE 波のモード比の関連性を評価する。また、大型の構造物で本手法を適用するために、AE 波の距離減衰を考慮した腐食減肉量の補正方法について検討した。

3. 研究の方法

3-1 腐食進展モニタリングについて

初めに薄板鋼板に対して図 1 に示す実験装置図を用いて板表面にパルスレーザを照射し、発生した疑似 AE 信号のモード強度比を評価した。そして、減肉量と AE 波の特性を確認した後、図 2 に示す実験装置図を用いて、鋼板に 5% の NaCl 水溶液を定期的に滴下し、腐食を発生、進展させた。そして、発生する AE 波を連続的にモニタリングした。検出した AE 波に対してウェーブレット変換を行い、モード強度比を計算し、その経時変化を調べることで、腐食減肉とモード強度比の変化を評価した。

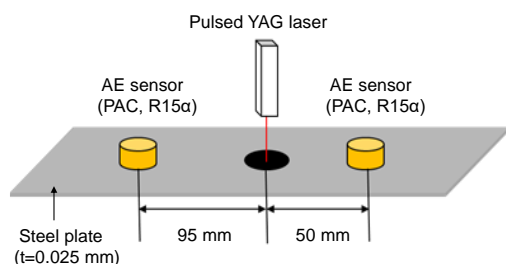


図 1 疑似音源試験装置図

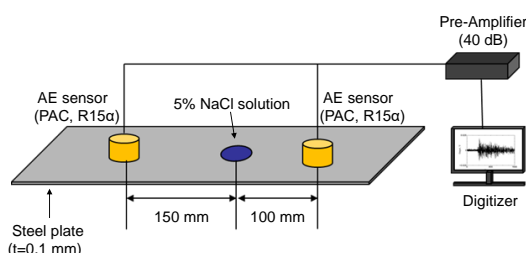


図 2 薄板の腐食モニタリング試験装置図

3-2 各モードの減衰率を考慮した腐食減肉量評価について

図3の実験装置図に示すように、鋼管表面で、シャープペンシル芯の圧折による疑似AE信号を励起し、鋼管表面に設置した6個のAEセンサで信号を検出した。そして、検出波の各モードの振幅から距離減衰を算出した。そして、同じ形状で人工欠陥を付与した鋼管の欠陥部分で疑似AE信号を励起し、各センサで検出したAE波のモード強度比に対して距離減衰を補正して、各位置での結果を比較した。

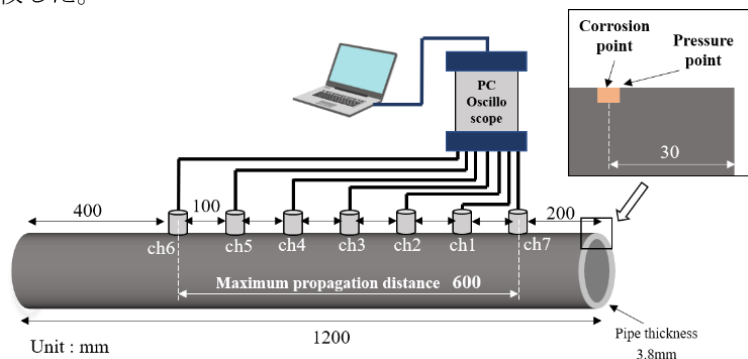


図3 鋼管を伝搬するAE波モードの減衰率測定試験装置図

4. 研究成果

4-1 腐食進展モニタリングについて

厚さ0.025mmの薄鋼板にパルスレーザーを照射した結果、レーザー強度180 mJにおいて、107回照射時に試験片が貫通した。図4に代表的な波形(左)と150kHzにおけるウェーブレット係数経時変化(右)を示す。また、右図の実線はそれぞれラム波S₀モード及びA₀モードの理論到達時間を示している。レーザーを試験片表面に照射しているため、Sモードの励起効率は低いが、試験片が減肉するにつれて振幅が増加し、その後低下した。図5にレーザー照射回数と検出波のラム波S₀モードとA₀モードの強度比の経時変化を示す。強度比は一度増加した後には低下しており、減肉量と相関がある事が確認できた。

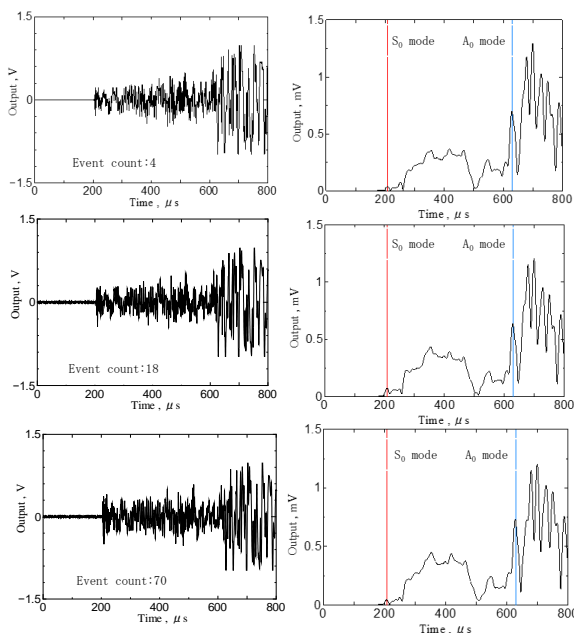


図4 検出波(右)及び150 kHzのウェーブレット係数経時変化

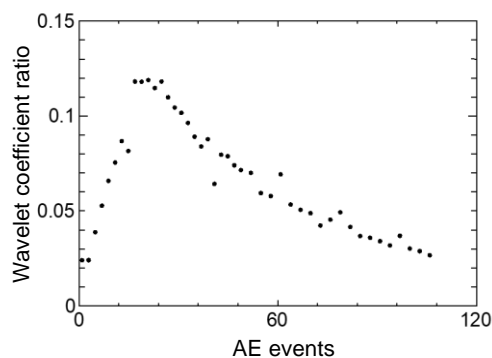


図5 ウェーブレット強度比の経時変化

次に厚さ0.1mmの鋼板を用いて腐食モニタリングした結果、試験片は14週で裏面側に腐食が観察された。各週における検出AE波のS₀モードとA₀モードの強度比分布を図6に示す。強度比は6週目まで増加した後に緩やかに低下する傾向が見られた。これは腐食量が増加すると発生するAEも増加し、また深さ方向の発生位置も広範囲になるため、AE波の強度比のばらつきが大きくなるためであると考えられる。つまり、肉厚方向に対して腐食進展量が50%までの範囲ではS₀モードとA₀モードの強度比で腐食進展を評価できる可能性を示した。

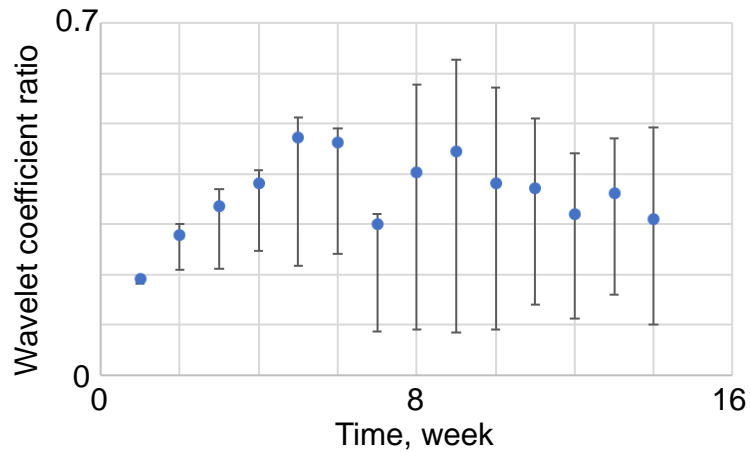


図6 腐食モニタリング中のAE波のウェーブレット強度比の経時変化

4-2 各モードの減衰率を考慮した腐食減肉量評価について

図7に人工音源を用いて測定した、使用した鋼管(外径 89.1 mm, 肉厚 3.8 mm, 長さ 1200mm)ラム波 S_0 モード及び A_0 モードの減衰率を示す。この近似線の傾きが各モードの減衰率となる。各鋼管における $L(0,1)$ mode, $F(1,1)$ mode の伝搬距離に対する減衰率はそれぞれ、 -24.7dB および -30.4dB であった。そして、 $L(0,1)$ mode および $F(1,1)$ mode の伝搬距離に対する減衰の差を補正せずに各モードのウェーブレット係数強度の比を算出した後、上記の減衰率を用いて補正した。腐食減肉量の異なる2本の鋼管における補正前後の伝播距離と強度比の関係を図8に示す。ここで、図中の点線は各鋼管における強度比の平均値を示している。補正後の強度比は補正前と比較して、データのばらつきが小さくなった。

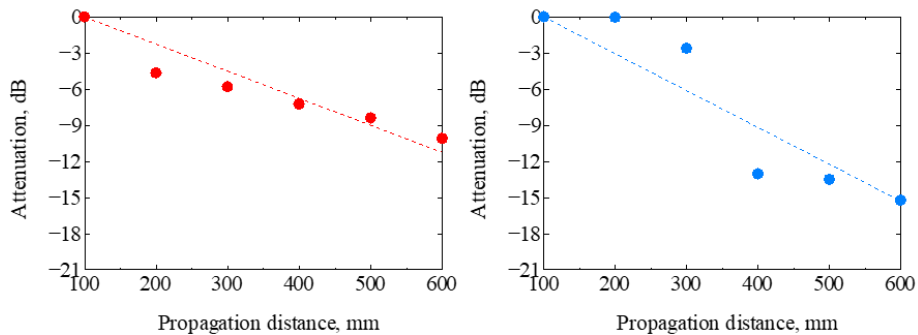


図7 $L(0,1)$ モード(左)及び $F(1,1)$ モード(右)の減衰率測定結果

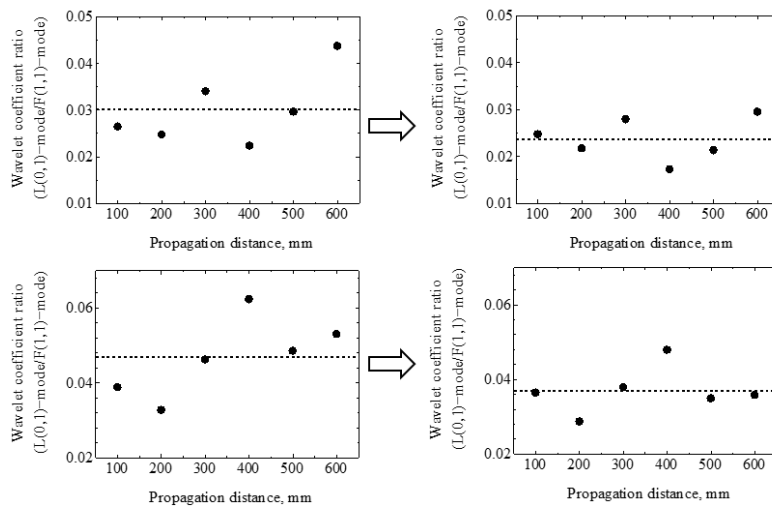


図8 補正前(左)及び補正後(右)のモード強度比の変化

この補正を複数の減肉量の配管に適用した結果を図9に示す。図中の点線が既往の研究で腐食試験によって得られた減肉比であり、左が補正前、右が補正後となっている。図中の実線は腐食位置から 400mm, 500mm, 600mm のセンサを用いた腐食減肉量推定結果となっている。いずれの結果も腐食試験の結果に近づいており、本手法の有効性が示された。

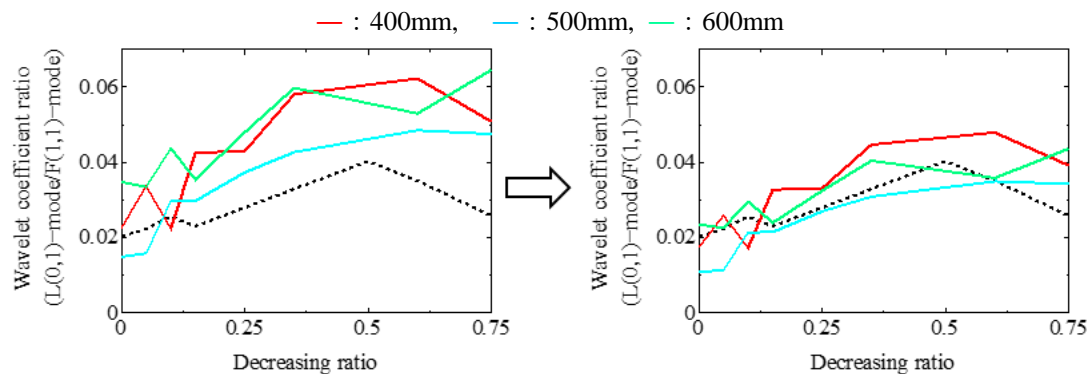


図9 実際の腐食試験におけるモード強度比の結果と補正前（左）及び補正後（右）のウェーブレット強度比の比較

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 戸上慶音, 松尾卓摩
2. 発表標題 AE信号の機械学習による鋼板の腐食進展評価
3. 学会等名 日本非破壊検査協会 秋季講演大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 K.Togami, S.Choi and T.Matsuo
2. 発表標題 Development of a method for detecting corrosion under painted steel sheets using the acoustic emission (AE) method utilizing thermal shock caused by rapid cooling
3. 学会等名 11th International Symposium on Impact Engineering (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 K.Togami and T.Matsuo
2. 発表標題 Evaluation of the relationship between machine learning methods and AE waveform classification accuracy
3. 学会等名 The 13th TSME International Conference on Mechanical Engineering (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------