

AE 計測における F.C.O.G. 手法のリアルタイム処理化

大森 征一^{*1} 大森 真実^{*2} 中村 英之^{*3} 川崎 拓^{*4}
Ohmori Seiichi Ohmori Mami Nakamura Hideyuki Kawasaki Hiraku

当社で以前より研究を続けている、CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastic) 材の引張試験での Acoustic Emission (AE) 信号の重心周波数 (F.C.O.G. : Frequency Center Of Gravity) の変化を利用した健全性評価手法について、リアルタイム処理適用技術を開発したので紹介する。以前は、複数のソフトウェアを用いて解析しており、多大な解析時間と膨大なデータ容量が必要であった。今回の検討では、F.C.O.G. の計算方法を変更し、Vallen 社製ソフトウェアの中で処理を完結させることで、これまでと同等の結果を半分以下の処理時間、データ容量で出力できるようになった。加えて、F.C.O.G. 手法を計測中に適用できるようになり、インライン検査やモニタリングへの適用が可能となった。

キーワード：Acoustic Emission (AE)、重心周波数 (F.C.O.G.)、リアルタイム表示、CFRP

1. はじめに

AE 試験は複合材料の健全性評価手法として普及しており、カイザー効果を用いた方法は ASME 規格で制定されている⁽¹⁾。日本国内においても、ロケット部品などの製造時検査にカイザー効果を用いた AE 試験の適用例が報告されている⁽²⁾。

当社では、AE 信号の周波数変化を活用した CFRP 材の評価手法について研究してきた。その中で、引張試験時に F.C.O.G. 解析結果が変化した試験片を調査した結果、CFRP 試験片に層間剥離が発生する直前の現象であることを確認した。しかしながら、周波数変化に着目した手法 (以下、F.C.O.G. 手法) で解析する際には、通常の AE 計測に加えて、フィルタ処理、Fast Fourier Transform (FFT)、統計処理などの手順を、複数の解析ソフ

トウェアを用いて実施する必要があった。そのため、F.C.O.G. 手法の適用は多大な時間を要し、特に計測中には実施不可能であった。そこで、著者は、解析時間の削減と計測中の F.C.O.G. 解析結果の表示を目的とし、従来と同等の処理を一つの解析ソフトウェアにすることで、リアルタイムで動作する F.C.O.G. 手法を開発した。本稿では、その方法を紹介する。

2. F.C.O.G. 手法

F.C.O.G. とは、AE 信号に含まれる主な周波数成分を表す代表値である。重心とは加重平均のことであり、式 (1) に示すように、周波数 f_i における成分強度 $A(f_i)$ の積和を、成分強度の総和で割った値である。

*1：検査事業部 技術部 (株式会社 IHI 技術開発本部 生産技術センター 生産基盤技術部 検査・計測グループ 出向中)

*2：検査事業部 技術部

*3：検査事業部 部長 博士 (工学) 日本非破壊検査協会理事

*4：研究開発センター 研究開発グループ

$$F.C.O.G. = \frac{\sum_i A(f_i) * f_i}{\sum_i A(f_i)} \quad (1)$$

図1にCFRP試験片の引張試験時に取得したAE信号の例を示す。図1(a)は時間波形を、図1(b)は周波数パワースペクトルを示している。図1(b)より、80kHz近傍、150kHz近傍、250kHz近傍の三か所の帯域にピークをもつ周波数成分が確認できる。このAE信号について、式(1)よりF.C.O.G.を算出すると188kHzとなる。このように、F.C.O.G.を用いることで、ピーク周波数では把握できないスペクトルの特徴を得ることができる。

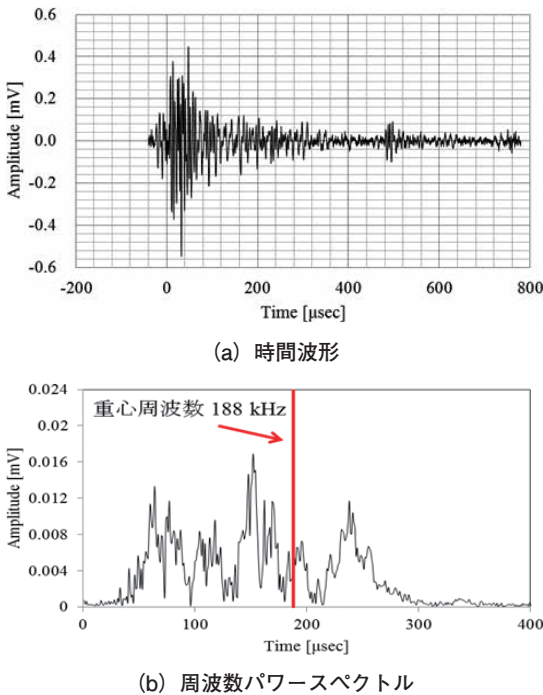


図1 CFRP試験片に生じたAE信号例

一般的にAEでは、カイザー効果⁽¹⁾の成立有無をもって材料の健全性を評価することが多い。カイザー効果が成立すると材料が健全であり、不成立となると材料中の健全性が損なわれたと判断している。カイザー効果の成立有無とF.C.O.G.解析の結果を比較すると、両者の変化するタイミング

はよく一致している。また、F.C.O.G.解析結果が低下する際に、試験片に生じた損傷を調査し、F.C.O.G.解析結果の低下が層間剥離の直前を示す結果も得ている⁽³⁾。

このように、F.C.O.G.を解析することで試験片の健全性を評価できる可能性が得られ、当社ではCFRP材の評価手法として有効な手段と考えている。

3. リアルタイムF.C.O.G.手法

3.1 従来のF.C.O.G.解析手順

前章では本手法の有効性について述べた。しかし、従来のF.C.O.G.手法では、図2に示す処理手順を経る必要があり、解析に多大な時間を要していた。解析者は、特に図2の②に示す前処理で、生のAEデータとは別に解析用に大容量のAEデータを作成することになる。また、抽出したAEデータに対して、図2の③の「専用編集ソフト」、図2の④の「専用表示ソフト」などでも処理が必要となるため、手順が複雑となっていた。これらの処理は、計測したデータサイズにもよるが、最大で数日間かかることもあった。

著者らは、以上の問題を解決するため、使用するソフトウェアを一元化し、手順の簡略化および処理時間を削減した。

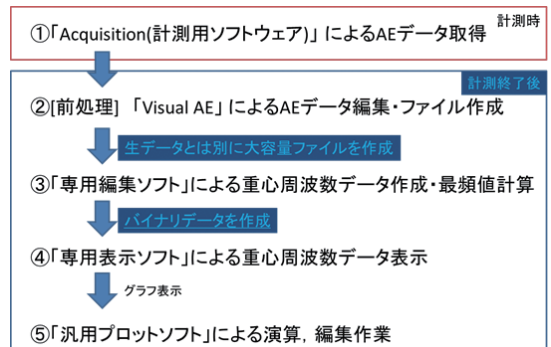


図2 従来のF.C.O.G.解析手順

3.2 開発した F.C.O.G. 解析手順

開発した F.C.O.G. 手法の手順を図 3 に示す。新手法では、Vallen 社製の周波数解析ソフトで F.C.O.G. のパラメータをデータベースファイルとして作成する。以降の処理も同一規格のデータベースファイル内で行うため、データ量の削減と処理時間の向上が可能となる。次に、図 3 の③の「Visual AE」でフィルタリングする。ここでは、図 2 の②と異なり、AE データの抽出が不要となる。そのため、前処理のために大容量の AE ファイルを作成する必要がない。

このように、開発した手法は、全ての作業において Vallen 社製ソフトウェアを用いることで、計算に必要なデータを最小限にとどめ、処理に要する工程を大幅に削減することができる。これによ

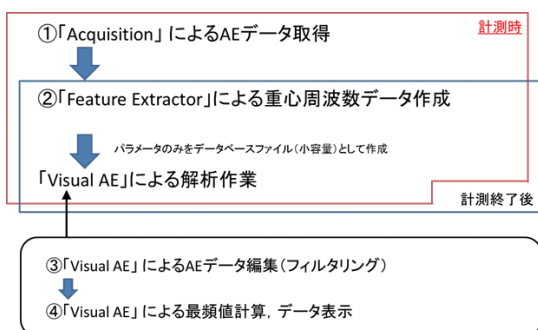
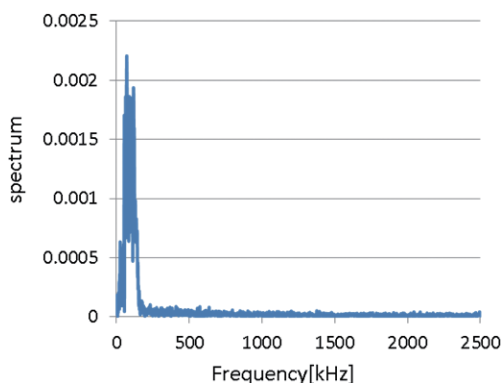


図 3 リアルタイム化された F.C.O.G. 解析手順



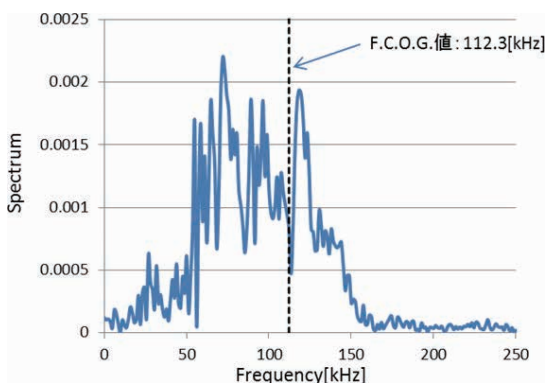
(a) AE 信号のパワースペクトル
(サンプリング周波数 5MHz の場合)

り、3.1 節で述べた膨大なサイズの AE データに対しても、数時間で解析が可能になった。

3.3 開発した F.C.O.G. 手法と従来の F.C.O.G. 手法の相違点

開発した F.C.O.G. 手法と従来の F.C.O.G. 手法では、AE 波形の F.C.O.G. の算出方法が異なる。AE 波形の周波数成分のうち、解析の対象としている成分は 0 ~ 250kHz 程度の帯域に存在する。しかし、図 4 (a) に示すように、例えば、サンプリング周波数 5MHz で取得した AE 波形のパワースペクトルの計算範囲は 0 ~ 2500kHz である。そのため、図 4 (b) に示す式 (1) で算出された F.C.O.G. は、不必要な高周波成分の影響を受けてしまう。この影響を避けるため、従来の F.C.O.G. 手法では、発生する AE 信号の周波数帯域にあわせ F.C.O.G. の算出範囲を低周波数側に限定していた。

一方、新手法では、図 5 に示すように、F.C.O.G. 計算の際にしきい値を設け、破線で示したしきい値以下のスペクトル値を 0 とし、しきい値以上のスペクトル値のみを用いて計算した。しきい値はスペクトルのピーク値 (p_{max}) に、0 ~ 0.99 の範囲で定めた任意の係数をかけた値である。なお、図 5 では係数を 0.1 としている。この計算方法は



(b) 周波数帯域を限定せずに算出した F.C.O.G.

図 4 従来の F.C.O.G. 手法

既存の Vallen ソフトウェア内で利用可能なため、新手法ではソフトウェアを一元化できる。さらに、従来法と異なり、あらかじめ周波数帯域を限定することなく、不必要な帯域に生じるスペクトルの影響を避けられる。

新手法の妥当性を確認するため、従来法と新手法の F.C.O.G. 計算結果を比較した。結果の一例として、図 6 に AE 波形に対して新手法と従来法で算出した F.C.O.G. を示す。図 6 より、従来法、新手法ともに F.C.O.G. が 92.77kHz となりよく一致していることがわかる。

4. 引張試験における新手法の実施例

4.1 F.C.O.G. 解析手法

ここまで、従来法と新手法について各 AE 信号の F.C.O.G. 算出方法の違いを説明してきた。引張試験などで AE 計測を行うと多数の AE 信号が生じる。この一つひとつの AE 信号に対して F.C.O.G. を算出すると、変化のタイミングを判断することが困難になる。図 7 は引張試験時の AE 計測結果を表したもので、赤い点は各 AE 信号の F.C.O.G. を示す（左縦軸）。70 ~ 145kHz の広帯域に渡り F.C.O.G. が生じており、変化の識別が困難である。そのため、F.C.O.G. 解析では、一定の「時間 - 周波数」間隔のうちで F.C.O.G.（赤い点）が

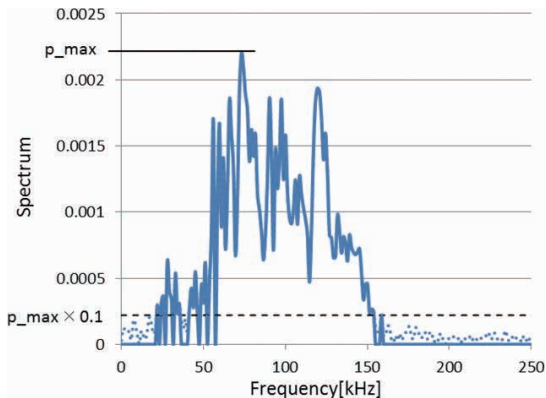


図 5 新手法での F.C.O.G. 計算時のしきい値の具体例

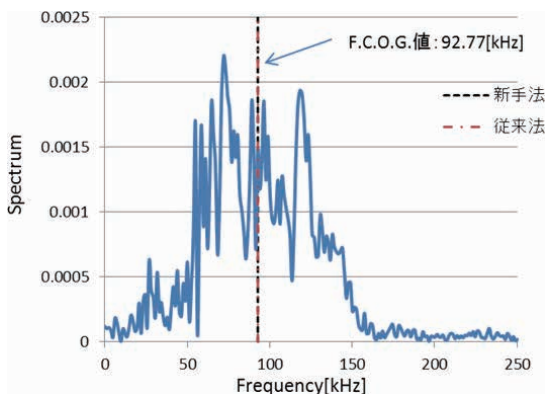


図 6 従来法と新手法の F.C.O.G. 計算結果

最も多く生じた帯域（F.C.O.G. の最頻値）から変化のタイミングを判断する。図 7 の緑のプロットは F.C.O.G. の最頻値を示している（右縦軸）。最頻

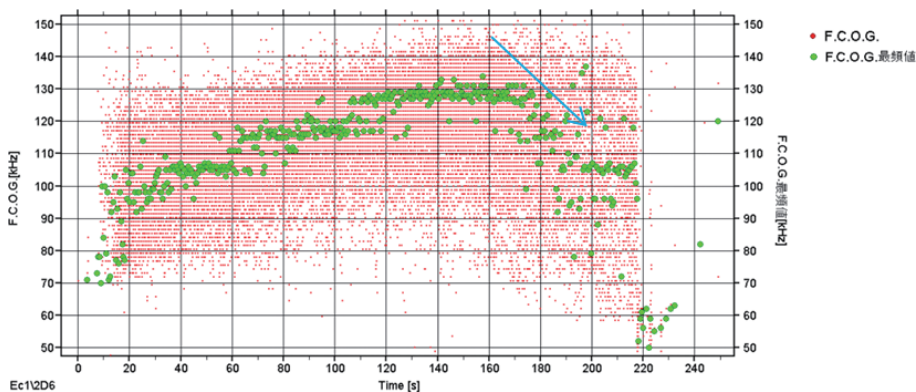


図 7 引張試験における F.C.O.G. と F.C.O.G. 最頻値の比較

値で整理すると、F.C.O.G. が 160sec 付近で低下したことを容易に識別できる。F.C.O.G. 解析は、この F.C.O.G. の最頻値の変化から健全性を評価する。

4.2 従来法と新手法の F.C.O.G. 解析結果の比較

F.C.O.G. 解析における新手法の妥当性を確認するため、従来法を用いた解析結果と新手法による解析結果を比較した。図 8 (a)～(c) に 3 種類の試験片の引張試験を行ったときの F.C.O.G. 解析結果を示す。図 8 (a)～(c) において、青ひし形が従来法、緑丸が新手法の解析結果を示している。図 8 (a)～(c) 中にそれぞれ矢印で示すように、従来法と新手法で F.C.O.G. 最頻値の低下が同じようなタイミング (150sec 付近) で起きており、両手法ともよく一致する。これより、新手法は従来法と同等と考えられる。また、今回開発した手法は一つのソフトで F.C.O.G. 解析できることによ

り、AE 計測中を F.C.O.G. 解析結果をリアルタイムに表示することが可能となった。

5. まとめ

本稿では F.C.O.G. 手法について概要を紹介し、問題点として手法の処理の複雑さなどを説明した。また、新たな手法では、F.C.O.G. の算出方法を変更することで、使用するソフトウェアを一元化することができ、従来手法と同等の結果が得られることがわかった。実施例として、CFRP 試験片の引張試験に適用した F.C.O.G. 手法のリアルタイム処理化について紹介した。今後、F.C.O.G. 手法の適用範囲の拡大について検証し、リアルタイム評価手法としての適用を進めていく予定である。

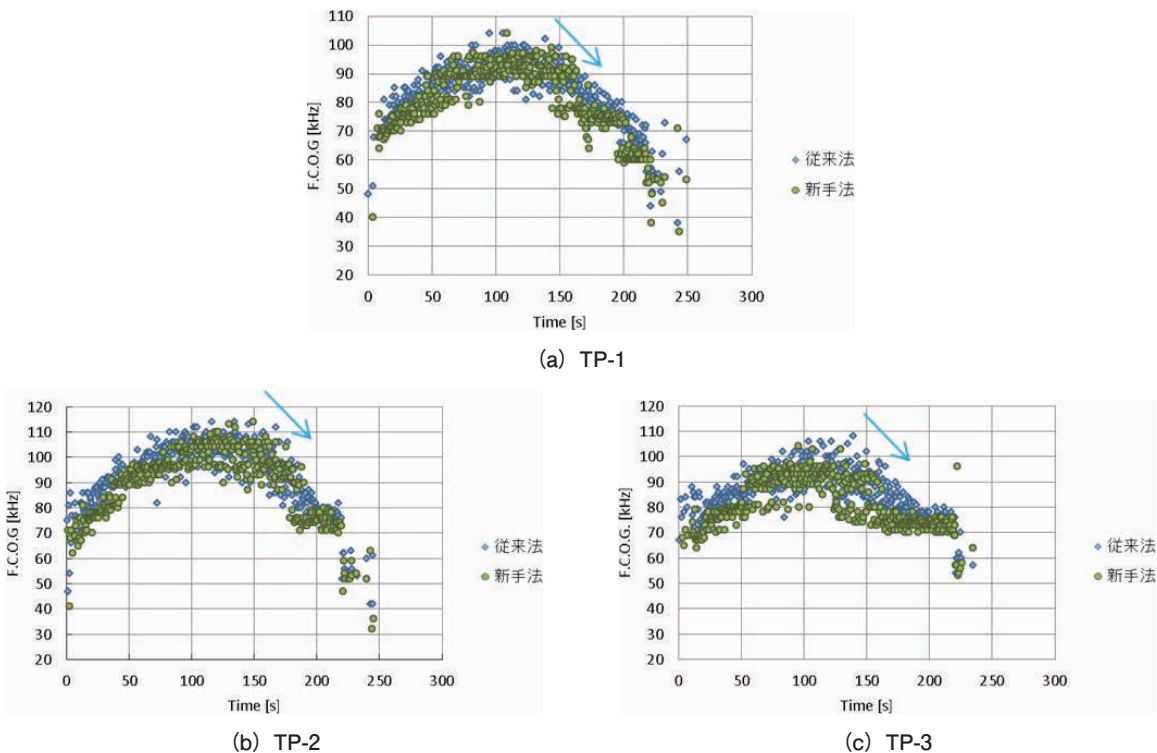


図 8 引張試験における F.C.O.G. 解析結果

参考文献

- (1) ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section V, Article 11, Acoustic Emission Examination of Fiber Reinforced Plastic Vessels, American Society for Mechanical Engineers, Latest edition
- (2) Y. Mizutani, K. Saiga, H. Nakamura, N. Takizawa, T. Arakawa and A. Todoroki : INTEGRITY EVALUATION OF COPVS BY MEANS OF ACOUSTIC EMISSION TESTING, Journal of Acoustic Emission, Vol.26, 2018/12, pp.109-119
- (3) 大森真実、川崎拓、大森征一、中村英之、佐々木孝明：AE 波重心周波数を用いた CFRP 材の損傷評価研究、強化プラスチック、第 63 巻、第 9 号、2017/9、pp.434-439



検査事業部 技術部
(株式会社 IHI 技術開発本部
生産技術センター 生産基盤技術部
検査・計測グループ出向中)

大森 征一

TEL. 045-791-3523
FAX. 045-791-3547



検査事業部
技術部

大森 真実

TEL. 045-791-3523
FAX. 045-791-3547



検査事業部
部長 博士 (工学)
日本非破壊検査協会理事

中村 英之

TEL. 045-791-3523
FAX. 045-791-3547



研究開発センター
研究開発グループ

川崎 拓

TEL. 045-791-3522
FAX. 045-791-3547