

129 AEによる焼結金属歯車の曲げ疲労損傷予知・監視

Prediction and Monitoring of Bending Fatigue Failure of Sintered Metal Gear Teeth

○ 鄭 銀 鈴 (鳥取大[院])
 正 宮 近 幸 逸 (鳥取大)
 名 小 田 哲 (福山大)

薛 衛 東 (鳥取大[院])
 正 小 出 隆 夫 (鳥取大)
 難 波 千 秋 (鳥取大)

Yin Ling ZHENG, Graduate School of Engineering, Tottori University, 4-101 Minami, Koyama-cho, Tottori
 Wei-Dong XUE, Graduate School of Engineering, Tottori University
 Kouitsu MIYACHIKA, Tottori University, 4-101 Minami, Koyama-cho, Tottori
 Takao KOIDE, Tottori University
 Satoshi ODA, Fukuyama University, Sanzo 1, Gakuen-cho, Fukuyama
 Chiaki NAMBA, Tottori University

This paper presents a study on acoustic emission (AE) in the bending fatigue process of sintered metal gear teeth. Research was conducted on AE cumulative event count, AE cumulative energy count, AE amplitude, frequency spectra of AE signals and crack length in the bending fatigue process of sintered metal gear teeth. The relationship between the AE parameters and the fatigue crack propagation was examined, and the AE characteristics in the bending fatigue process of the sintered metal gear teeth were determined. Basic data were obtained for the prediction of bending fatigue crack initiation of the sintered metal gear tooth by means of the AE method.

Key Words: Gear, Sintered Metal, Acoustic Emission, Bending Fatigue Failure, AE Signal, AE Cumulative Event Count, AE Cumulative Energy Count, Wavelet Transform, Crack Length

1. 緒言

最近の粉末冶金における生産技術の進歩とともに、高密度の焼結金属の生産が容易になり、焼結金属歯車に浸炭焼入れや高周波焼入れなどの表面硬化処理を施して、従来の表面硬化溶製材歯車と同等の高い強度を持つ歯車の開発が進められている。これらの歯車の曲げ強度および歯面強度に関する研究結果⁽¹⁾⁽²⁾が報告されているが、曲げ疲労損傷の AE (Acoustic Emission) 特性については、ほとんど報告されていないのが現状である。

本報では、ずぶ焼入れおよび浸炭焼入れ焼結金属歯車の歯の曲げ疲労過程の AE 測定 (AE 波形, AE 事象計数総数, AE エネルギー総数, AE 振幅) およびき裂長さの測定を行って、これらの歯車の歯の曲げ疲労損傷の AE 特性について明らかにしている。次に AE 波形の周波数分析およびウェーブレット変換を行って、曲げ疲労過程の AE 波形の周波数特性およびウェーブレットについて検討を加えている。さらに、これらの結果に基づいて、AE による歯車の曲げ疲労損傷予知・監視法についても検討を加えている。

2. 実験方法および実験装置

2.1 試験歯車 本実験に用いた焼結金属歯車の主諸元、材料および加工条件などを表 1 に示す。部分拡散合金 (4.0%Ni, 1.5%Cu, 0.5%Mo, 0.5%C, Balance Fe) を成形圧力 764 MPa, 焼結温度 1300°C で焼結後、図 1 (a) に示すずぶ焼入れ焼戻し処理が施されたものを GTA, 図 1 (b) に示す浸炭時間 $t_h = 1, 2, 4$ h の浸炭焼入れ焼戻し処理が施され

たものをそれぞれ GCA, GCB, GCC としている。図 2 は、試験歯車の Hofer の危険断面位置 [接線角度 $\theta = 30^\circ$ の位置 (θ : 歯形中心線と歯元すみ肉曲線の接線のなす角)] における歯面垂直方向の硬さ分布の測定結果を、図 3 は、試験歯車の歯面および心部の組織写真を示す。

2.2 実験方法 本実験では、2.1 節に述べた試験歯車

Table 1 Dimensions of test gears

Gear sign	GTA	GCA	GCB	GCC
Module m	4			
Pressure angle α	20°			
Number of teeth z	18			
Face Width b	10 mm			
Material	Sintered powder metal (4.0%Ni, 1.5%Cu, 0.5%Mo, 0.5%C, Balance Fe)			
Treatment conditions	Hobbed, Through hardened	Hobbed, Carburized		
Treating temperature	870°C			
Treating time t_h	1 h	1 h	2 h	4 h

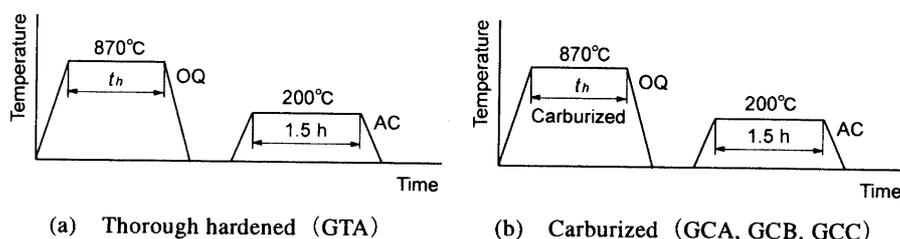


Fig.1 Heat treatment conditions of test gears

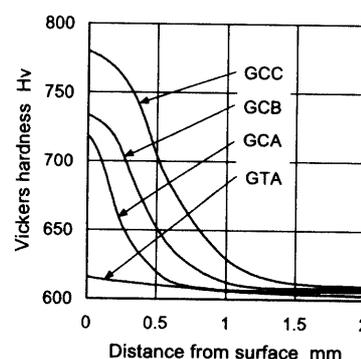


Fig.2 Hardness distributions at Hofer's critical section of test gears

に対して、曲げ疲労過程の AE (AE 波形, AE 事象計数総数, AE エネルギー総数, AE 振幅) およびき裂長さの測定を行った。図 4 は, AE センサの取付け状態を, 図 5 は, AE 測定のプロック線図を示す。AE 測定は, 図 4 に示す位置に高真空用シリコングリスを介して取付けた AE センサからの信号をプリアンプで 40 dB 増幅し, 次にディスクリミネータでフィルタリングおよび 20 dB 増幅し, AE 波形の最大振幅が, 設定したしきい値 (反射波計数防止のために, 2 レベルのしきい値 V_H, V_L を設定) を超えるものに対して発生するイベントパルスデュアルカウンタで AE 事象計数総数としてカウントし, またディスクリミネータからの AE 信号をエネルギープロセッサでエネルギーに比例した周波数のパルス信号に変換し, それらのパルス数を AE エネルギー総数としてカウントし, それらの結果をペンレコーダに同時記録した。ディスクリミネータからの AE 波形と動ひずみ計からの荷重波形をデジタルオシロスコープ上で観察するとともに, パーソナルコンピュータのハードディスクに記録した。AE 波形については, 周波数分析およびウェーブレット変換⁽³⁾ (Gabor ウェーブレット) を行っている。き裂長さの測定は, 歯車側面に接着したクラックゲージ⁽⁴⁾ を用いて行った。

本実験に用いた曲げ疲労試験機は, ディーゼルエンジンの燃料噴射ポンプを用いた油圧式歯車曲げ疲労試験機で, 負荷棒と歯面の接触衝突によるノイズ低減のための二段油

圧シリンダを有するものである⁽⁵⁾。本実験では, 歯車の曲げ疲労過程の AE 特性について明らかにすることを目的としているため, AE 測定における荷重値としては, 図 6 に示す曲げ疲労試験結果に基づいて, $P=8.0\text{ kN}$ を選んだ。

3. 計算結果および考察

3.1 曲げ疲労過程の AE とき裂長さの関係 図 7 は, ずぶ焼入れおよび浸炭焼入れ焼結金属歯車 GTA, GCA, GCB, GCC の曲げ疲労過程の AE 事象計数総数, AE エネルギー総数およびき裂長さの測定結果を示す。図 7 (a) (b) (c) より, GTA, GCA, GCB の場合には, いずれも AE 事象計数総数, AE エネルギー総数は, き裂発生直前

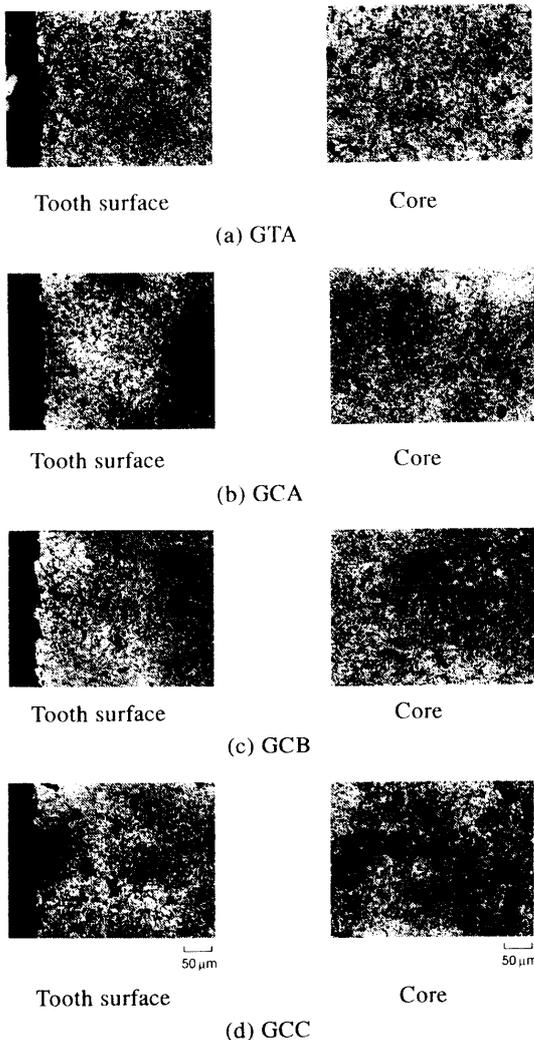


Fig.3 Microphotographs of test gears

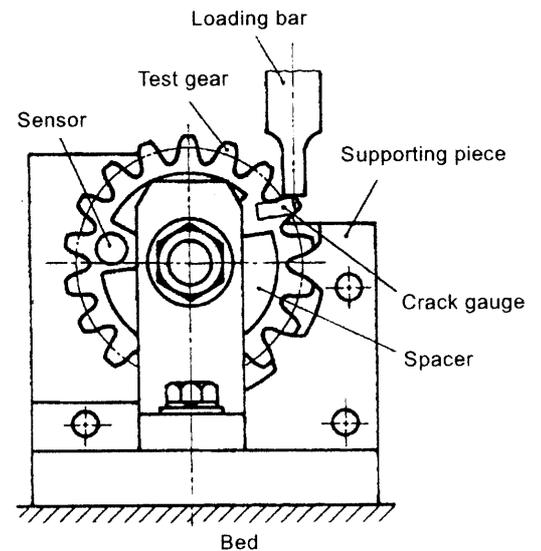


Fig.4 Position of AE sensor

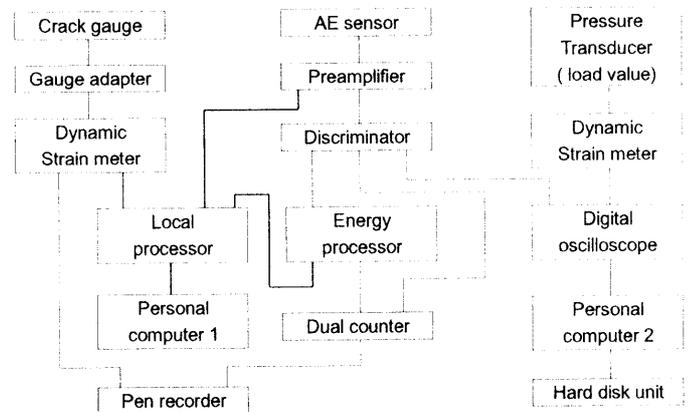


Fig.5 Block diagram for AE measurement

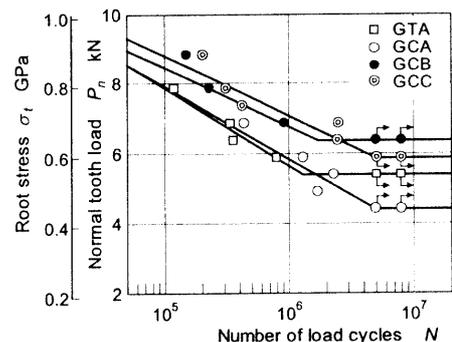
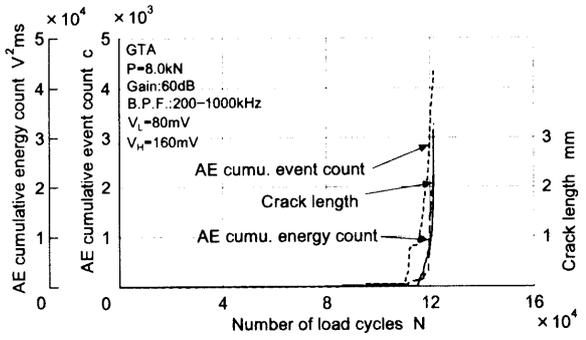


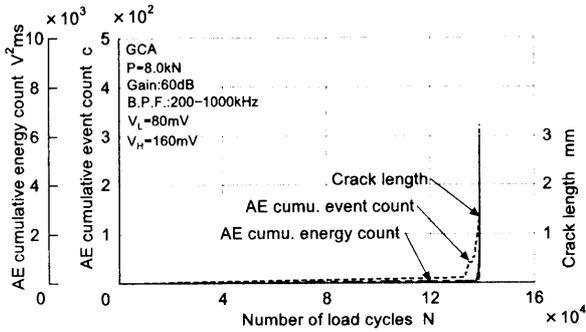
Fig.6 S-N curves

に急激に増加し、いずれの歯車もよく似た傾向を示しており、その増加割合は、AE 事象計数総数のほうが、AE エネルギー総数よりも大きいことがわかる。図 7 (d) より、GCC の場合には、GTA, GCA, GCB の場合とは異なり、AE 事象計数総数は曲げ疲労過程のかなり早い時期から増加するが、AE エネルギー総数は、ほとんど増加しないことがわかる。

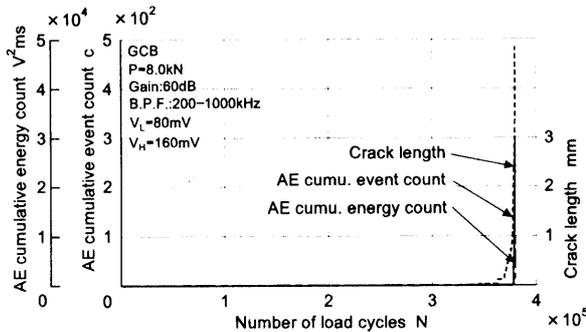
図 7 の結果より、GTA, GCA, GCB の場合には、曲げ



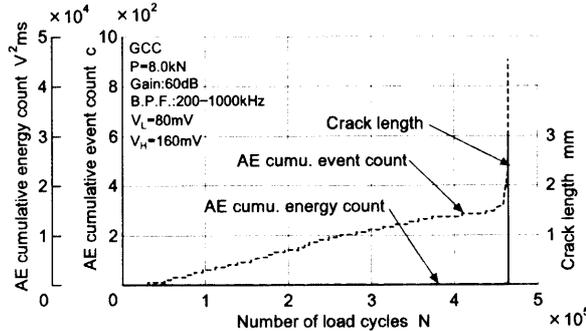
(a) GTA



(b) GCA



(c) GCB



(d) GCC

Fig.7 AE cumulative event count, AE cumulative energy count and crack length during bending fatigue process

疲労き裂発生の直前に AE 事象計数総数, AE エネルギー総数が急激に増加するため、これらの AE による曲げ疲労損傷予知が可能であるが、GCC の場合には、曲げ疲労過程のかなり早い時期から AE 事象計数総数が緩やかに増加するので、AE による損傷予知にはこのことを考慮しなければならない。

3.2 AE 波形のウェーブレット変換と周波数分析の結果

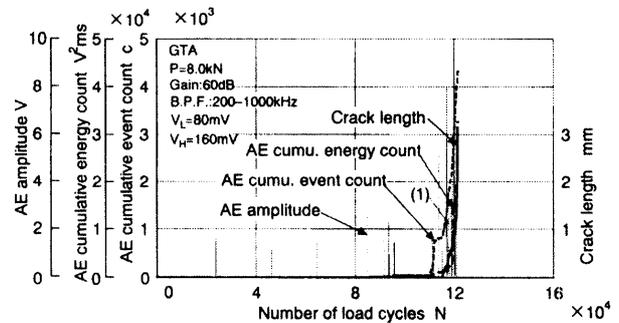
図 8 は、GTA, GCB の曲げ疲労過程の AE 波形の振幅, AE 事象計数総数, AE エネルギー総数およびき裂長さを示す。図 8 より、大きな振幅の AE 波形は、GTA, GCB のいずれの場合も、き裂発生直前まではほとんど見られないが、き裂発生伝ば中に生じることがわかる。

図 9 は、GTA, GCB の曲げ疲労損傷の AE 波形のウェーブレット変換[WT(wavelet transforms) map]および周波数分析の結果を示す。図 9 より、GTA, GCB の AE 波形の周波数スペクトルは、いずれも 500 kHz および 200 kHz 付近でピークを持ち、これらのピークはウェーブレット変換の結果によれば、時間軸上で交互に現れることがわかる。GCA, GCC の AE 波形のウェーブレット変換および周波数分析の結果も図 9 の場合とほぼ同じ傾向を示した。

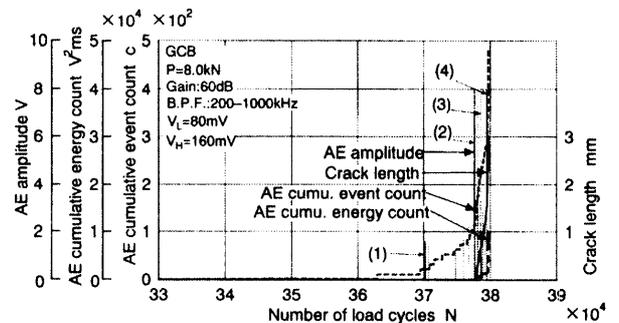
3.3 曲げ疲労過程における AE 波形の周波数スペクトルの変化 図 10 は、GCB の曲げ疲労過程の周波数スペクトルを三次元的に表したものである。図 10 より、GCB の周波数スペクトルの 500 kHz 付近のピークは、き裂発生直前より急激に増大することがわかる。GTA, GCA, GCC の曲げ疲労過程の AE 波形のスペクトルの変化は、GCB の場合と同様な変化を示した。

3.4 き裂長さ と AE 事象計数総数, 硬さ分布の関係

図 11 は、GTA, GCA, GCB, GCC のき裂長さ と AE 事象計数総数, 硬さ分布の関係を示す。図 11 より、き裂発生時の AE 事象計数総数は、GTA, GCA, GCB, GCC の順に大きくなり、表面硬さの順に対応していることがわか

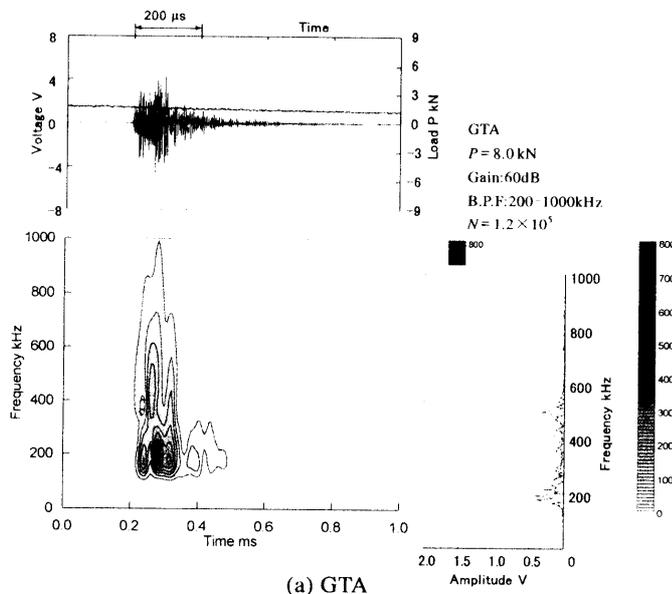


(a) GTA

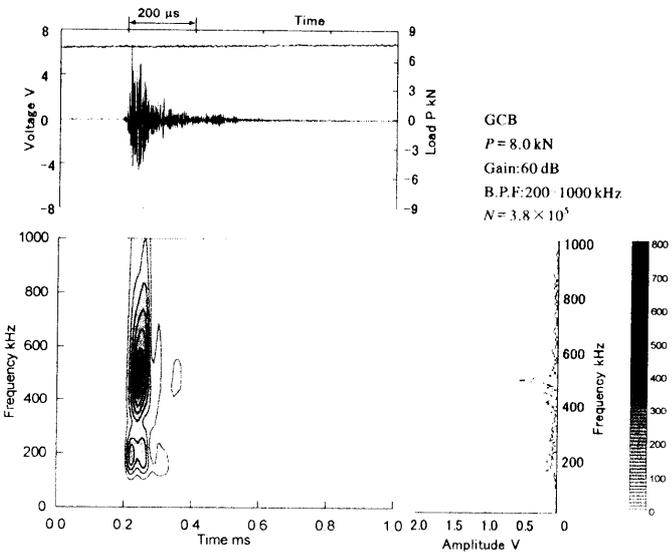


(b) GCB

Fig.8 AE amplitude, AE cumulative event count, AE cumulative energy count and crack length during bending fatigue process



(a) GTA



(b) GCB

Fig.9 AE signal, WT map and frequency spectra of AE signal

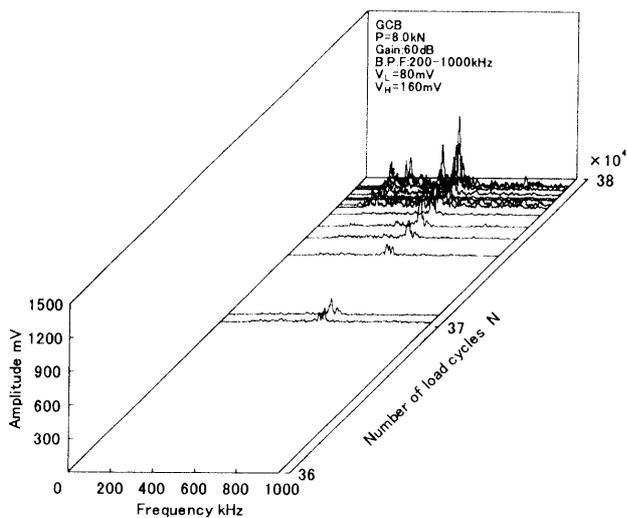
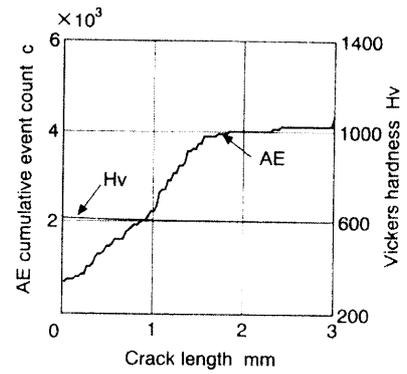
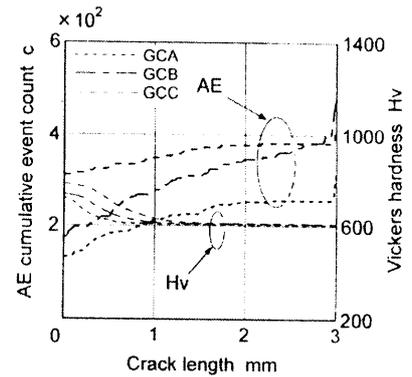


Fig.10 Frequency spectra of AE signals during bending fatigue process (GCB)

る。また、いずれの歯車においても、AE 事象計数総数は、き裂長さが 2 mm 付近までは、き裂長さの増加とともに増



(a) GTA



(b) GCA, GCB, GCC

Fig.11 Relation between crack length, AE cumulative event count and hardness distribution

大し、その程度は GTA, GCB, GCA, GCC の順に小さくなることわかる。

4. 結言

(1) ずぶ焼入れおよび浸炭焼入れ焼結金属歯車の曲げ疲労過程の AE 事象計数総数は、曲げ疲労き裂発生直前に急激に増大するので、これらの歯車の AE による曲げ疲労損傷予知が可能である。なお、浸炭焼入れ焼結金属歯車の硬化層厚さが大きい場合には、AE 事象計数総数がき裂発生よりもかなり早い時期から緩やかに増加するので、AE による曲げ疲労損傷予知にはこのことを考慮する必要がある。

(2) ずぶ焼入れおよび浸炭焼入れ焼結金属歯車の曲げ疲労損傷の AE 波形の周波数スペクトルは、500 kHz および 200 kHz 付近でピークを持ち、これらのピークはウェーブレット変換の結果によれば、時間軸上で交互に現れる。

(3) ずぶ焼入れおよび浸炭焼入れ焼結金属歯車の曲げ疲労損傷の AE 波形の周波数スペクトルの 500 kHz 付近のピークは、き裂発生直前より急激に増大する。

参考文献

- (1) 小田・小出・平田・木口・和田, 機論, 59-565, C(1993), 2825-2829.
- (2) 小出・小田・中村・大西, 機論, 66-647, C(2000), 2383-2387.
- (3) 倪・美佐田, 材料, 47-3 (1998), 305-311.
- (4) K. Miyachika, Y. Zheng, K. Tsubokura, S. Oda, Y. Kanayama, T. Koide, C. Namba and T. Hayashi, Progress in Acoustic Emission XI, The Japanese Society for NDI, (2002), 304-310.
- (5) 小田・宮近・小出・会見, 機論, 58-551, C(1992), 2219-2225.