

打検法の周波数解析法に関する研究

— 現行の周波数解析手法に関する一考察 —

竹之内 健* 高田淳一* 白鳥正樹**

A Study on Frequency Analysis Method of Tapping Inspection.

— A Consideration on Conventional Frequency Analysis Method. —

Ken TAKENOUCHI*, Junichi TAKADA*, and Masaki SHIRATORI**

缶詰の漏洩や変敗を検査する打検法では、缶体から発する短時間振動波形の周波数を高い精度で同定するために、観測した N_s 点波形データ列の後ろに 0 値を付加した N_e 点拡張データ列の FFT スペクトルを求める周波数解析手法が用いられている。この手法を N_s/N_e 点データ拡張 FFT と名付けて、その動作特性を計算原理に基づいて考察し、さらに打検振動の模擬波形を用いた計算実験により周波数分解能を評価した。

サンプリング間隔 τ で観測した N_s 点波形データ列に対する N_s/N_e 点データ拡張 FFT の、2 つの振動モードを分離検出する能力は、データ拡張の程度に関わらず、 N_s 点 FFT と同じ $2/(N_s\tau)$ であるが、振動モードの周波数を同定する能力は $1/(N_e\tau)$ となり、データ拡張の程度に応じて向上する。このデータ拡張 FFT の動作特性は、打検法の周波数解析法に対する要求に適合する。

キーワード：打検法、FFT、データ拡張 FFT、周波数分解能

In tapping inspection of canned food, a frequency analysis method, which calculates FFT spectrum from N_e points extended data sequence filled with zero value after N_s points measured waveform data sequence, has been used in order to detect the frequency of short time vibration waveform with high accuracy. In this paper, the authors have named this method N_s/N_e points Data Extended FFT, and they have evaluated the frequency resolution property by theoretical consideration and calculation experiments.

The N_s/N_e points Data Extended FFT spectrum from N_s points waveform data sequence measured in sampling intervals τ shows that the frequency separation capability of $2/(N_s\tau)$ is unchanged for any extent of data extension, while the frequency identification capability of $1/(N_e\tau)$ is improved depending on extent of data extension. This character of Data Extended FFT is suitable for tapping inspection.

Keywords : Tapping Inspection, FFT, Data Extended FFT, Resolution

*東洋製罐グループ総合研究所 (〒240-0062 横浜市保土ヶ谷区岡沢町 22-4) : Corporate Research and Development, Toyo Seikan Group 22-4 Okazawa-cho, Hodogaya-ku, Yokohama, 240-0062, Japan.

**横浜国立大学大学院 (〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5) :

Yokohama National University 79-5 Tokiwadai, Hodogaya-ku, Yokohama, 240-8501, Japan.

1. 緒言

1.1 打検法

打検法は、缶詰の底部または蓋部をたたいて、発した音の周波数から漏洩や変敗による缶内圧異常を検知・排斥する検査法で、缶詰の安全保証検査技術として昔から用いられている¹⁾。打検法の実施手法としては、打検士が打検棒で缶体をたたき、その音を耳で聞いて判定する伝統的手法もあるが、現在では、図1に示すように、電磁パルスで缶体に振動を励起して、発した音をマイクで捕らえ、周波数解析を行ってピーク周波数を検出するシステムが開発されている。このシステムは、高速充填に対応した毎分1000~1200缶の検査速度を有し、また缶詰内部の状態を非破壊で検査できることから、効率的な検査手法として多くの飲料製造ラインで用いられている。

打検法については多くの技術開発と運用実績が積み重ねられており、安定性と信頼性のある検査技術として確立している。しかし、打検法の技術開発は多分に実践的側面が強く、理論的基礎は十分には明らかになっていない。

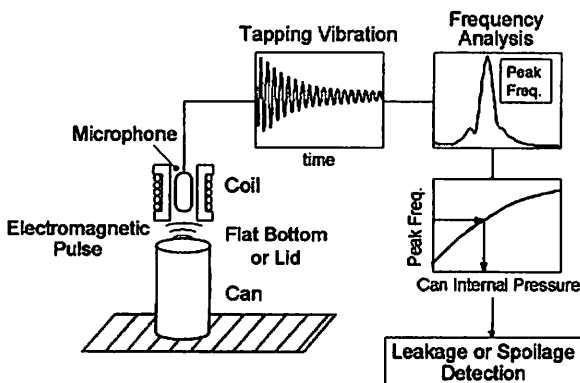


Fig. 1 Schematic Diagram of Tapping Inspection System.

1.2 打検法の周波数解析に対する要求特性

打検振動波形、および缶内圧と打検周波数の関係の一例として、陰圧2ピース缶（内容量250g用）に対する測定結果を図2に示す。測定は以下の手順で行った。缶内圧をあらかじめ調整した缶体を、倒立状態で設置した。この缶体には、缶底部に打検用円板部が設けられている。缶底円板部の上部8mmに銅線コイル（30ターン）を配置し、電圧365V、電流96A、持続時間270 μ sのパルス電流を引加して電磁パルスを発生させた。缶底円板部から発した音を約200mm上方に設置したマイクロホン（RION, NA-51）で集音し、出力電圧信号をA/D変換器（National Instruments, DAQ Card-700；20kHz, 12bit）でパソコン上に数値データとして記録した。この振動波形データに対して、表計算ソフトウェア（Microcal Software, Origin Ver. 6.0）のFFT演算機能を利用して、後述するデータ拡張FFTを行いピーク周波数を求めた。ここで得られる打検周波数は、缶底円板部の基底振動周波数に対応している。機器構成に違いはあるが、打検装置では同様の手法によって打検周波数の測定を行っている。

図2a)で示すように、打検周波数の缶内圧に対する感度は、缶種により異なるが、概ね 1×10^{-2} Hz/Paである。内容物充填工程において、缶内圧分布は設定値に対して通常 ± 10 kPa程度に管理され、打検ではこの圧力範囲から外れた缶を検知・排除する。このような生産現場では、ブルドン管式圧力計やダイヤフラム式圧力計を用いた抜き取り・破壊法缶内圧測定も併用されているが、これらの測定で缶内圧は1 kPa単位で測定されており、整合性の観点から、打検法には10 Hzの周波

数分解能が要求される。

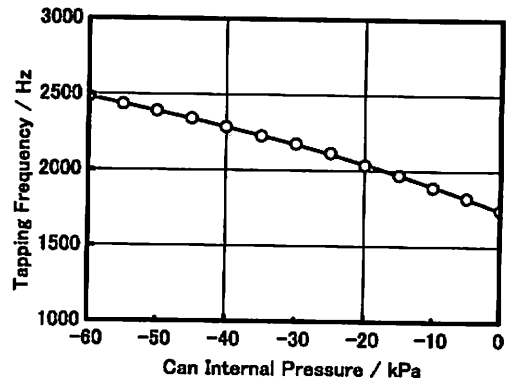
一方、図 2 b) で示すように、打検振動は持続時間が約 10~20 ms の減衰波であるが、高速充填に対応した検査速度が必要であることから、振動波形の全観測時間は 10 ms 程度に制限される。

周波数分解能と全観測時間との間には反比例関係、すなわち相反則がある。この相反則に抵触せずに高い周波数分解能を得るため、通常の周波数解析は全観測時間を十分に長くとして行われる。しかし、持続時間の短い打検振動波形の周波数解析には、短い全観測時間で高い周波数同定能力を得ることが必要となる。

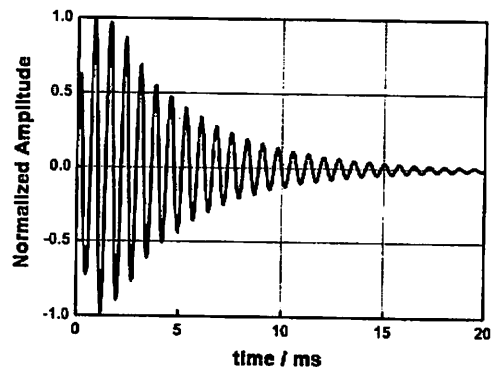
本報で述べるデータ拡張 FFT は、これらの要求を満たす手法として、長年打検法のシステムの中で使用され、その有用性は運用実績の中で評価されている。しかし、データ拡張 FFT の動作特性を計算原理に基づいて把握することは十分には行われていない。

また、打検法の運用にあたって、打検缶体には“打検適性”が求められる²⁾。打検振動波形にうなりがなく、きれいな単振動減衰波となる場合、“打検適性がよい”と評価されることから、振動モードの励起状態を評価する指標と考えられるが、その物理的意味や必要性は明確ではない。打検適性とデータ拡張 FFT の動作特性との間には密接な関係があると考えられ、単一モード振動や複数モード振動に対するデータ拡張 FFT の動作特性を調べることにより、打検適性の意味を明確にできると考えられる。

本研究では、データ拡張 FFT の動作特性を計算原理に基づいて考察した。また、模擬波形による計算実験により動作特性を調べた。



a) Relationship between Can Internal Pressure and Tapping Frequency.



b) Waveform of Tapping Vibration.

Fig. 2 Typical Behavior of Tapping Vibration.

この結果を報告する³⁾。

2. データ拡張 FFT

2.1 短時間振動波形に対する FFT の周波数分解能

FFT (Fast Fourier Transform) は、1965 年に J. W. Cooley と J. W. Tukey⁴⁾ とによって発明された、離散フーリエ級数展開の高速化アルゴリズムで、周波数解析を高速で行なう手法として、今日広く用いられている。

サンプリング間隔 τ で測定した N_s 点波形

データ列 $\{x[n\tau] : n = 0, 1, \dots, N_s - 1\}$ に対する FFT スペクトルは式(1)で表される。

$$X\left[\frac{k}{N_s\tau}\right] = \frac{1}{N_s} \sum_{n=0}^{N_s-1} x[n\tau] \exp\left(-i2\pi \frac{kn\tau}{N_s\tau}\right) \quad (1)$$

$; k = 0, 1, \dots, N_s - 1$

ここで、 $X[k/N_s\tau]$ は、周波数 $f_k = k/N_s\tau$ に対する振幅成分を表す。FFT では、データ点数 N_s は 2^p の形に限定される⁵⁾。波形データ列には端部不整合の影響を軽減するために窓関数をかける事が多い。

式(1)で見られるように、FFT の表示分解能は、離散フーリエ級数展開の直交性に由来する相反則のため、波形データ列の全観測時間 $N_s\tau$ に反比例する。全観測時間が 10 ms の場合 FFT の表示分解能は 100 Hz となり、打検法に必要な周波数同定能力を得ることはできない。

2.2 データ拡張 FFT の計算原理

前節で述べたように、打検法に通常の FFT を適用した場合、相反則により周波数同定能力が不足する。この問題に対して、測定した N_s 点波形データ列の後ろに 0 値を付加してデータ列を N_e 点に拡張し、見かけの全観測時間を長くして FFT を行う手法が、打検システムの開発過程において見出された。この手法が缶内圧を精度よく検知できることは実験的に確認されており、打検装置にはこの周波数解析手法が採用されている。この手法を N_s/N_e 点データ拡張 FFT、この手法で得られるスペクトルを N_s/N_e 点データ拡張 FFT スペクトルと名付ける。

N_s/N_e 点データ拡張 FFT の動作特性を計算原理に基づいて考察する。 N_s 個の観測データの後ろに 0 点を付加することによりデー

タ点数を $N_e = M \times N_s$ ($M > 1$) と M 倍に拡張したとき、拡張データ列 $\{x'[(mN_s+n)\tau] : m = 0, 1, \dots, M-1; n = 0, 1, \dots, N_s-1\}$ に対する FFT スペクトルは、式(1)に拡張データ列を適用することにより式(2)で表される。

$$X\left[\frac{k'}{N_e\tau}\right] = \frac{1}{N_e} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N_s-1} x'[(mN_s+n)\tau] \times \exp\left\{-i2\pi \frac{k'(mN_s+n)\tau}{N_e\tau}\right\} \quad (2)$$

$; k' = 0, 1, \dots, N_e - 1$

ここで、 $X[k'/N_e\tau]$ は周波数 $f_{k'} = k'/N_e\tau$ に対する振幅成分を表す。データ拡張 FFT の表示分解能は通常の FFT に比べて N_e/N_s 倍に細くなる

$k' = kM + l$ ($k = 0, 1, \dots, N_s - 1; l = 0, 1, \dots, M - 1$) とおき、複素指数関数の周期性に留意して式(2)を整理すると、式(3)が得られる。

$$X\left[\frac{k}{N_s\tau} + \frac{\ell}{N_e\tau}\right] = \frac{1}{N_s} \sum_{n=0}^{N_s-1} \left\{ \frac{x[n\tau]}{M} \exp\left(-i2\pi \frac{\ell n\tau}{N_e\tau}\right) \right\} \exp\left(-i2\pi \frac{kn\tau}{N_s\tau}\right) \quad (3)$$

$; k = 0, 1, \dots, N_s - 1; \ell = 0, 1, \dots, M - 1$

式(3)と式(1)とを比較すると、データ拡張 FFT スペクトルは、 l の値によって分けられた M 個の N_s 点波形データ列を生成し、各々のデータ列に対して独立した N_s 点 FFT を行なうことにより、周波数原点が $1/N_e\tau$ ずつずれた M 個のスペクトルを求め、これらのスペクトルを周波数順に並べ替えた包絡線として捉えることができる。この包絡線は、拡張する前の N_s 点波形データ列に対する N_s 点 FFT の包絡線と同じ形になる⁶⁾。

データ拡張 FFT においても、端部不整合の影響を軽減するため、窓関数処理を行う。

データ拡張 FFT における端部不整合は元の観測波形データ列と 0 値拡張部の境界に現れる。このため、窓関数処理は拡張前のデータ列 $x[n\tau]$ に対して行う。本研究では、すべての波形データに対してハニング窓関数による窓関数処理を行った。

2.3 データ拡張 FFT の周波数分解能

2.3.1 模擬波形による特性評価

データ拡張 FFT により、表示分解能は向上するが、実際の周波数分解能が向上するかどうかは必ずしも保証されない。データ拡張 FFT の周波数分解能について調べるため、打検振動の模擬波形データ列を計算機上で生成し、これに対するデータ拡張 FFT スペクトルを求めた。単一モード振動の周波数同定能力、および近接した 2 つのモード振動の分離能力を調べるため、模擬波形データ列として次式に基づく 2 つの単振動減衰波の合成波を生成した。

$$x[n\tau] = A_1 \exp(-\gamma_1 n\tau) \cos(2\pi f_1 n\tau + \theta_1) + A_2 \exp(-\gamma_2 n\tau) \cos(2\pi f_2 n\tau + \theta_2) \quad (4)$$

$; n = 0, 1, \dots, N_s - 1$

ここでサンプリング間隔 $\tau = 5 \times 10^{-5}$ s、測定データ数 $N_s = 128$ 、減衰定数 $\gamma_1 = \gamma_2 = 1/(N_s \tau)$ とした。全観測時間は $N_s \tau = 6.4$ ms となる。 $A_1, A_2, f_1, f_2, \theta_1, \theta_2$ は、各々第 1 および第 2 振動モードの振幅、周波数、位相を表す。第 1 あるいは第 2 モードの振幅が 0 のときの振動状態を 1 モード振動、モードが 2 つとも生成されるとき振動状態を 2 モード振動と呼ぶこととする。

2.3.2 1 モード振動に対する動作特性

式(4)において、 $A_1 = 1, A_2 = 0, \theta_1 = 0$

deg とし、 f_1 を 1600 Hz から 2400 Hz まで 5 Hz ずつ変化させて、1 モード振動の模擬波形データ列を生成し、この模擬波形データ列に対する 128/2048 点データ拡張 FFT スペクトル、および 128 点 FFT スペクトルのピーク周波数を求めた。1900 Hz から 2300 Hz の範囲の結果を図 3 に示す。

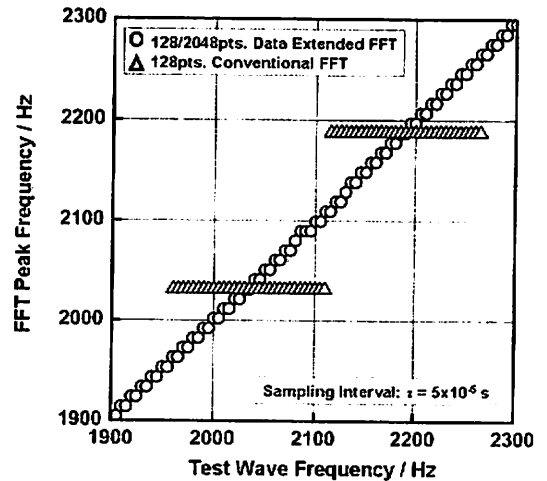


Fig. 3 Peak Frequency for 1 Mode Test Wave by Data Extended FFT and Conventional FFT

ここで、横軸は模擬波形の周波数、縦軸は周波数解析によって得られたスペクトルのピーク周波数を表す。128/2048 点データ拡張 FFT の表示分解能は 9.77 Hz、128 点 FFT の表示分解能は 156.25 Hz である。

図 3 は、データ拡張 FFT が、1 モード振動の周波数を表示分解能と等しい精度で同定できることを示す。これに対して、通常の FFT は表示分解能が粗いため、1 モード振動周波数を精度よく同定することはできない。

2.3.3 2 モード振動に対する動作特性

2 つの振動モードの位相差の影響を調べるため、式(4)において、振幅比 $A_1 : A_2$ を 1 : 1、第 1 モードの周波数と位相を $f_1 = 2000$ Hz、

$\theta_1 = 0 \text{ deg}$ に固定し、第 2 モードの周波数 f_2 と位相 θ_2 を変化させて 2 モード振動模擬波形を生成し、この模擬波形に対するデータ拡張 FFT スペクトルを求めた。図 4 に周波数差が 80 Hz、位相差が 0 deg と 120 deg との場合のデータ拡張 FFT スペクトルを示す。また、図 5 に 2 つの振動モードの位相差がピーク周波数に与える影響を示す。図 5 において、第 1 モードは $f_1 = 2000 \text{ Hz}$ 、 $\theta_1 = 0 \text{ deg}$ に固定し、第 2 モードの周波数 f_2 を 2080、2160、2240、2320 Hz とし、各周波数に対して

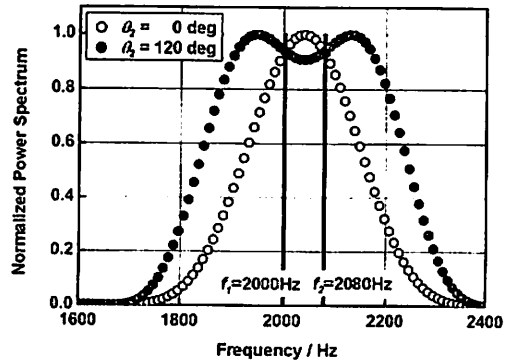
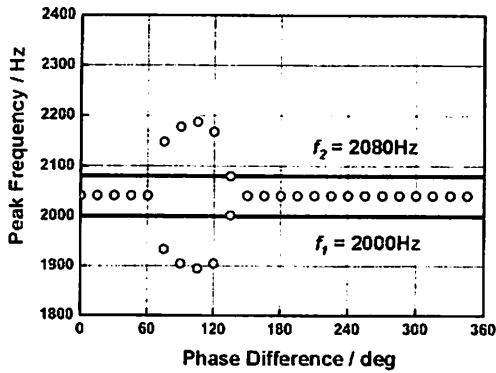
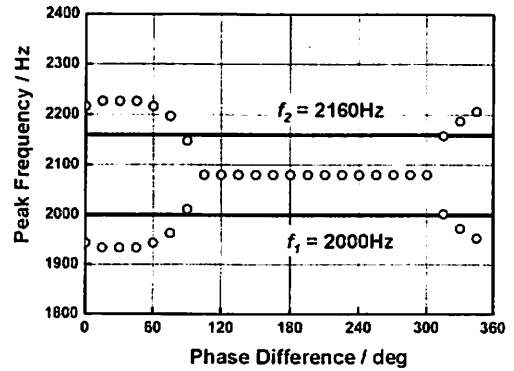


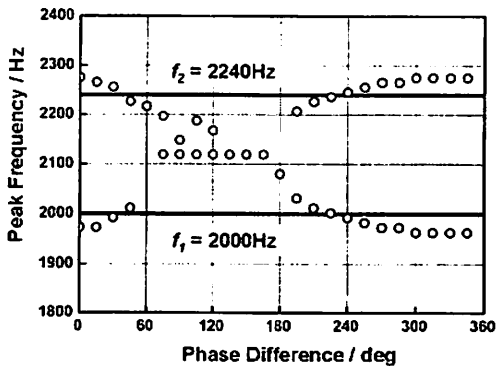
Fig. 4 Data Extended FFT Spectrum for 2 Mode Test Wave. $\tau = 5 \times 10^{-5} \text{ s}$, $N_s = 128$, $N_e = 2048$, $A_1:A_2 = 5:5$, $\theta_1 = 0 \text{ deg}$



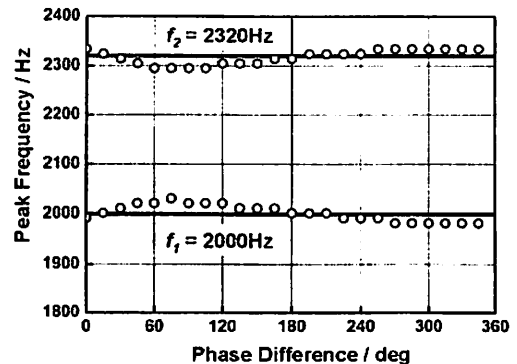
a) Frequency Difference 80Hz.



b) Frequency Difference 160Hz.



c) Frequency Difference 240Hz.



d) Frequency Difference 320Hz.

Fig. 5 Effect of Frequency Difference and Phase Difference on Peak Frequency of 2 Mode Test Wave by Data Extended FFT. $\tau = 5 \times 10^{-5} \text{ s}$, $N_s = 128$, $N_e = 2048$, $A_1:A_2 = 5:5$

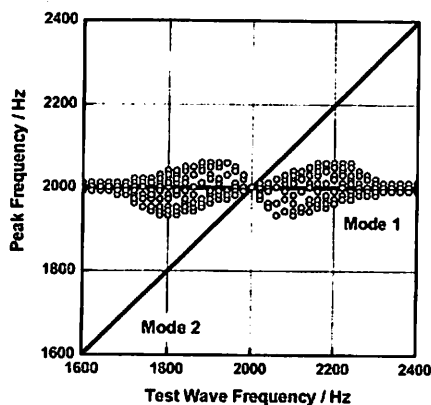
位相 θ_2 を 15 deg ずつ変化させた。図中の黒線は、模擬波形の周波数を表す。

図 4 で示すように、模擬波形の 2 つの振動モードが周波数差 240 Hz 以下に近接した場合、データ拡張 FFT スペクトルのピークに分裂する形態と 1 つのピークに縮退する形態との 2 つの形態をとる。

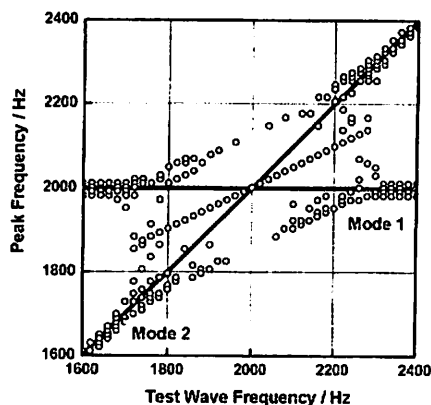
図 5 で見られるように、ピークが 1 つに縮退する場合、ピーク周波数は模擬波形の 2 つの振動モード周波数の中間値をとる。ピークが 2 つに分裂する場合、各ピーク周波数は位相差によって変化し、模擬波形の周波数を正確には示さない。模擬波形の振動モードの周波数差が小さくなるにしたがって、データ拡張 FFT スペクトルのピーク周波数は模擬波形の周波数から大きくずれるようになり、またピーク周波数の縮退が起りやすくなる。模擬波形の 2 つの振動モードの周波数差が 320 Hz の場合、ピーク周波数の縮退は起こらず、ピーク周波数のずれは小さい。

2 つの振動モードの周波数差の影響を調べるため、第 1 モードの周波数と位相とを $f_1 = 2000$ Hz, $\theta_1 = 0$ deg に固定し、第 2 モードの周波数 f_2 を 1600 Hz から 2400 Hz まで 20 Hz 刻み、位相 θ_2 を 0 deg から 330 deg まで 30 deg 刻みで変化させて 2 モード振動の模擬波形を生成し、これに対するデータ拡張 FFT スペクトルのピーク周波数を求めた。最大ピークに対して、2 番目のピークの大きさが 90% 以上ある時、ピークが 2 つあるものとした。図 6 に、振幅比が a) 6 : 4、b) 5 : 5、c) 4 : 6 のときの結果を示す。図中の黒線は、模擬波形の周波数が正確に検出された場合の理想検出線を表す。

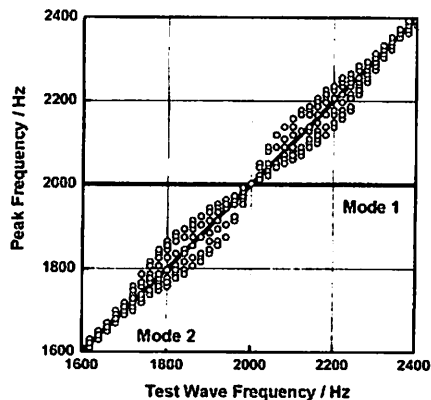
2 つの振動モードの振幅が等しい図 6 b)



a) Amplitude Ratio $A_1:A_2 = 6:4$



b) Amplitude Ratio $A_1:A_2 = 5:5$



c) Amplitude Ratio $A_1:A_2 = 4:6$

Fig.6 Effect of Frequency Difference on Peak Frequency of 2 Mode Test Wave by Data Extended FFT.

$\tau = 5 \times 10^{-5}$ s, $N_s = 128$, $N_o = 2048$, $\theta_1 = 0$ deg, $\theta_2 = 0 - 330$ deg (step 30deg).

の場合、振動モードの周波数差が約 300 Hz 以下の領域で、検出ピークの縮退が位相差によって起こり、2つの振動モード周波数の中間にピークが現れる。ピークが分裂する場合もその周波数は模擬波形の振動モード周波数からのずれを示す。2つの振動モードの振幅に差がある図 6 a) および図 6 c) の場合、データ拡張 FFT の最大ピーク周波数は、振幅の大きい方のモードの周波数を示す。2つの振動モードの周波数差が 300 Hz 以下の領域では、検出ピーク周波数は振幅の大きい方のモード周波数からずれず。ずれの程度は2つのモードの振幅が等しくなるにつれて大きくなるが、図には示していない他の振幅比に対する解析結果で観察された。すべての場合において、2つの振動モードの周波数差が約 300 Hz 以下になると、データ拡張 FFT のピーク周波数は模擬波形のモード周波数を正しく示さなくなる。

3. 考察

周波数分解能には、近接した2つの振動モードを分離検出する能力と、個々の振動モードの周波数を同定する能力とが含まれる。通常、周波数分解能を論ずるときに、この2つの能力は厳密に分けずに用いられている。しかし、上で述べたように、データ拡張 FFT では2モード振動の分離検出能力と1モード振動の周波数同定能力との間には開きがあり、これらを別々に考えるべきである。

離散化されたスペクトルから2つの振動モードを分離検出するためには、少なくともスペクトルに〈山—谷—山〉のパターンが現れることが必要である。 N_s 点 FFT では全観測

時間 $N_s \tau$ に対して、 $2/(N_s \tau)$ となり、これは表示分解能の2倍にあたる。2.2節で示したように、 N_s/N_c 点データ拡張 FFT スペクトルは、元の N_s 点波形データ列に対して周波数を $1/(N_c \tau)$ ずつずらせた (N_c/N_s) 個の独立した N_s 点 FFT を求め、周波数順に並べ替えた包絡線として得られる。すなわち、 N_s/N_c 点データ拡張 FFT は、計算の実態として N_s 点 FFT と同等であり、2つの振動モードの分離検出能力は N_s 点 FFT と同じ $2/(N_s \tau)$ であると考えられる。また、模擬波形による動作特性評価によると、図 6 において元の波形データ列の全観測時間は $N_s \tau = 6.4$ ms であるので、 $2/(N_s \tau) = 312.5$ Hz であり、2モード振動の周波数を正しく検出できる限界、約 300 Hz はこれと符合する。これらの結果は、 N_s/N_c 点データ拡張 FFT が2つの振動モードを分離検出できる限界は、データ拡張の程度に関わらず、 N_s 点 FFT と同じ $2/(N_s \tau)$ であることを示していると考えられる。通常の FFT における相反則は、表示分解能に関する制約と一致している。しかし、データ拡張 FFT では、数学的操作により、表示分解能の制約を取り除いているにもかかわらず、2つの振動モードの分離能力に関して、同等の制約が現れる。

一方、図 3 および図 6 で示される様に、1モード振動あるいは周波数差が $2/(N_s \tau)$ 以上である2つの振動モードに対しては、 N_s/N_c 点データ拡張 FFT の最大ピーク周波数は $1/(N_c \tau)$ の精度で最大振幅の振動モードの周波数を同定できる。

缶底・缶蓋に設けられた円板部の振動は、一般に基底振動モードが優勢である。基底振動のみが励起された場合は、振動形態は1モ

ード振動であり、この場合データ拡張 FFT は周波数を正確に同定できる。しかし、基底振動モードと他の振動モードとが同時に励起された場合、2つのモードの周波数が近づくと、データ拡張 FFT は基底振動モードの周波数を正しく示さなくなる。基底振動モードは缶内圧によって変化するので、基底振動モードの周波数変化を正確に検知するには、変化範囲にかかるような振動モードが励起されないように、缶体を設計・製造する必要がある。

ところで、周波数の近い2つのモードが励起されている状態では、振動波形にうなりが生じる。一方、1モード振動の場合には、振動波形はきれいな単振動減衰波を示す。このことを考慮すると、打検適性による評価は、振動形態が1モード振動になるよう制御することを要求していると考えられる。すなわち、データ拡張 FFT を用いて高い周波数同定能力を得るため、振動形態を1モード振動に維持する必要性が、打検缶体に対して“打検適性”を要求する理由である。

4. 結言

打検法の周波数解析に用いられているデータ拡張 FFT の動作特性を計算原理に基づいて考察し、サンプリング間隔 τ で測定した N_s 点波形データ列に対する N_s/N_e 点データ拡張 FFT スペクトルは、周波数原点を $1/(N_e\tau)$ ずつずらした (N_e/N_s) 個の N_s 点 FFT スペクトルを周波数順に並べ替えた包絡線として得られることを示した。

また、データ拡張 FFT の動作特性を、打検振動の模擬波形を生成して解析を行なうこ

とにより評価した結果、サンプリング間隔 τ で観測した N_s 点波形データ列に対する N_s/N_e 点データ拡張 FFT の、2つの振動モードの分離検出能力は、データ拡張の程度に関わらず、 N_s 点 FFT と同じ $2/(N_s\tau)$ であるが、振動モードの周波数同定能力は $1/(N_e\tau)$ となり、データ拡張の程度に応じて向上することを明らかにした。

このようなデータ拡張 FFT の動作特性は、缶体に設けられた円板部の短時間振動の周波数を精度よく同定する能力を持ち、打検法の周波数解析法に対する要求に合致する。しかし、高い周波数同定能力を発揮するためには、基底振動モードに他の振動モードが重ならないよう、缶体形状と励起電磁パルスの特性を制御する必要がある。打検缶体に要求される“打検適性”は、この振動モードが1モード振動になるよう制御することを指している。このことは、打検法が単に検査装置だけでなく、缶体の設計・製造技術との連携の上になり立つ総合的な技術であることを示している。

<参考文献>

- 1) 石谷孝祐編、“食品包装用語辞典”、サイエンスフォーラム、p. 333 (1993)
- 2) “PED-M1 インライン打検器パンフレット”、東洋製罐 (2001)
- 3) 竹之内健、高田淳一、白鳥正樹、日本包装学会第11回年次大会研究発表会要旨集、p. 72 (2002)
- 4) J. W. Cooley and J. W. Tukey, Mathematics of Computation, 19, p. 297 (1965)
- 5) 金井 浩、“音・振動のスペクトル解析”、コロナ社、p. 122-134 (1999)
- 6) 同上、p. 138-141 (1999)

打検法の周波数解析法に関する研究

(原稿受付 2002 年 10 月 16 日)

(審査受理 2003 年 1 月 24 日)