テーパ状石英棒を用いたダウンチャープ用パルス圧縮フィルタ

正員 吉 沢 昌 純 (都立高専)
 非会員 桐 生 昭 吾 (電 総 研)
 正員 守 屋 正 (都 立 大)
 正員 布 施 正 (都 立 大)

1. ま え が き

さきに石英棒を伝搬する弾性波のうち、 $L(0,3)$ モードを用いて、超音波断層法用のパルス圧縮フィルタを実現できることを報告した⁽¹⁾。このフィルタは、低い周波数から高い周波数に変調された FM チャープ信号 (以後、アップチャープ信号と呼ぶ) を圧縮するためのものであった。

これに対して、高い周波数から低い周波数に変調された FM チャープ信号 (以後、ダウンチャープ信号と呼ぶ) を圧縮するためのパルス圧縮フィルタ (以後、ダウンチャープ用パルス圧縮フィルタと呼ぶ) があれば、(1) 単一の探触子で異なる中心周波数のアップチャープとダウンチャープ信号を送信し、二つの周波数成分の異なる超音波で同時に断層像を得るマルチスペクトル超音波断層法⁽²⁾、また(2) 走査線密度とフレーム書換レートを上げるため、同時に二つの探触子を用いた同時複数周波数超音波法⁽³⁾などに応用できる。

本論文は、溶融石英棒中を伝搬する弾性波のうち $L(0,2)$ モードを用いて、ダウンチャープ信号を圧縮するための超音波断層法用パルス圧縮フィルタを構成する方法について述べたものである。

これまでダウンチャープ用のフィルタは、CCD を

用いたものがあった⁽⁴⁾。しかしこのフィルタの帯域幅は 0.8 MHz、遅延時間差は 14 μ s であり、断層法に用いるには十分な特性ではなかった。

さきに報告した $L(0,3)$ モードフィルタでは、使用する周波帯に存在する $L(0,2)$ モードにより生じる不要信号成分を除去していた。ところが、この $L(0,2)$ モードは、 $L(0,3)$ モードと分散特性の傾きが逆である。このため、 $L(0,3)$ モードにより生じる不要信号成分 (以後 $L(0,3)$ 不要信号成分と呼ぶ) を除去できれば、 $L(0,2)$ モードを用いてダウンチャープ用のパルス圧縮フィルタを構成できる。

そこで、テーパ状石英棒を用い、電荷の打消しを利用した方法と吸収体を用いた方法を併用することにより、不要となる $L(0,3)$ モードによる信号成分を除去し、ダウンチャープ用パルス圧縮フィルタが実現できることがわかったのでその方法について述べる。

2. ダウンチャープ用パルス圧縮フィルタに適したモードの選択

まず、 $L(0,2)$ モードを用いてダウンチャープ用のパルス圧縮フィルタを構成する根拠を明らかにする。Pochhammer-Chree の式^{(5)*1}から求めた直径 1 mm の溶融石英円柱棒中を伝わる弾性波の分散特性を図 1 に示す。図中、 ω は角周波数、 a は半径を表す。

Flexural, Torsional モードなどは、Longitudinal モードに比べ、振幅が十分小さかったので Longitudinal モードのみを示してある。

図 1 において、石英棒 1 m あたり 100 μ s 程度の遅延時間差をもつのは (A) の領域の $L(0,1)$ モード、(C) の領域の $L(0,2)$ モードである。

FM Down Chirp Pulse Compression Filter for Ultrasonotomography Utilizing $L(0,2)$ Mode of the Elastic Wave in a Fused Quartz Rod with Tapered Ends. By Masasumi Yoshizawa, Member (Tokyo Metropolitan Technical College), Shogo Kiryu, Non-member (Electrotechnical Laboratory), Tadashi Moriya, Member & Tadashi Fuse, Member (Faculty of Technology, Tokyo Metropolitan University).

吉沢昌純：正員，東京都立工業高等専門学校電気工学科

桐生昭吾：非会員，電子技術総合研究所

守屋 正：正員，東京都立大学工学部電気工学科

布施 正：正員，東京都立大学工学部電気工学科

*1：ポアソン比 0.17, Shear Wave Velocity = 3692.57 m/s, Dilatational Wave Velocity = 5973.43 m/s で計算した。

図 1 石英棒を伝わる Pochhammer-Chree 波の分散特性
Fig. 1. Delay time for longitudinal modes in a fused quartz rod 1 m in length.

しかし、(A)の領域の $L(0,1)$ モードを用いる場合、1~2 MHz 程度の帯域幅を得るためには、直径 0.5 mm 程度の石英棒を用いなければならないが、このような細い径の棒には効率良く Pochhammer-Chree 波を励振することができなかった。(C)の領域では、 $L(0,2)$ モードと $L(0,3)$ モードが大きな振幅で検出されており、他のモードはほとんど検出されなかった^{*2}。

そこで、この $L(0,2)$ モードを用いてダウンチャープ用のパルス圧縮フィルタを構成することにした。

この $L(0,2)$ モードを用いた場合、 $L(0,3)$ 不要信号成分を除去する必要がある。

3. $L(0,3)$ 不要信号成分の除去法

$L(0,3)$ 不要信号成分は、 $L(0,2)$ モードと $L(0,3)$ モードの断面内の振動パターンの違いを利用し、電荷の打消し、および吸収体を用いて除去した。

〈3・1〉 振動パターンの周波数特性 まず、 $L(0,2)$ モードと $L(0,3)$ モードの石英棒断面の振動パターンの特徴を明らかにするため、各モードの振動パターンを測定した。

図 2 の回路でサファイア針（先端径 約 0.05 mm）を用いた探触子を石英棒の断面内で径方向に移動させながら測定した。図 3 は図 1 の (D) の領域での

図 2 振動パターンの測定回路
Fig. 2. Arrangement for measuring vibration patterns of $L(0,1)$, $L(0,2)$ and $L(0,3)$ modes.

$L(0,1)$, $L(0,2)$, $L(0,3)$ モードの各変位分布の実測値である。図中、Pochhammer-Chree の式から求めた Longitudinal モードの変位の伝搬方向成分⁽⁵⁾を破線と実線で示してある。なお、破線の部分は実線の部分と位相が逆であることを表しており、縦軸は振幅の最大値で規格化してある。

必要とする帯域で $L(0,3)$ 不要信号成分を除去するためには、 $L(0,2)$ モードと $L(0,3)$ モードの振動パターンに特徴的な違いがあり、その帯域で振動パターンの変化が少ないことが必要である。図 3 から、(B)の領域では比較的模式の変化が少なく、 $L(0,2)$, $L(0,3)$ モードの振動パターンに特徴的な違いがあることがわかる。

〈3・2〉 振動パターンの違いを利用した $L(0,3)$ 不要信号成分の除去法 図 3 の (B) の領域で、 $L(0,2)$ モードでは位相が逆の領域はないが、 $L(0,3)$ モードでは位相が逆の領域がある。そこで、電気信号と機械振動の変換を行う PZT 上の電極面内で起こる電荷の打消しにより、 $L(0,3)$ 不要信号成分を除去できる。

まず、この電荷の打消しの大きさを表す量を導入する。

ところで、PZT の面内の位相と振幅の分布が一樣でないと、PZT 上の電極面内で電荷の打消しが起こり、断面内の全エネルギーに対して PZT で取出し得るエネルギーが小さくなる。いま（平面の PZT で取出し得るエネルギー）/（断面内の全エネルギー）を η で表すことにする。

$L(0,2)$ モードに比べ、 $L(0,3)$ モードの η が十分小さければ $L(0,3)$ 不要信号成分を除去することができる⁽⁶⁾。なお著者らが用いているフィルタの構造で (B) の領域では、前述のように $L(0,1)$ モードは検知しえないほど微小なので無視する。

図 4 に各モードに対する η の周波数特性を示す。

*2: $L(0,1)$ モードが検出されない理由については検討中であり、ダウンチャープフィルタを構成するのに直接的には関与しないのでここでは言及しない。

図 3 $L(0,1)$, $L(0,2)$, $L(0,3)$ モードの振動パターン
Fig. 3. Calculated vibration patterns of $L(0,1)$, $L(0,2)$ and $L(0,3)$ modes.

図 4 η 対 $\omega \cdot a$ 特性
Fig. 4. η versus $\omega \cdot a$ for each mode.

図 3, 図 4 から, (B) の領域では振動パターンの周波数による変化が少なく, なおかつ $L(0,3)$ モードの η が十分小さいので, 広い帯域にわたり $L(0,3)$ 不要信号成分を除去できることがわかる。

〈3・3〉 吸収体を用いた残留 $L(0,3)$ 不要信号成分の除去法 吸収体により選択的に $L(0,3)$ 不要信号成分を除去するためには, $L(0,2)$ モードと $L(0,3)$ モードの伝搬形態に特徴的な違いがなければならない。図 3 から, $L(0,2)$ と $L(0,3)$ モードの振動パターンに

図 5 吸収体によるモードの除去
Fig. 5. Elimination of signal due to $L(0,3)$ mode using absorber.

違いがあることがわかるが, 選択的に $L(0,3)$ 不要信号成分を除去するためには, 振動パターンと吸収体による信号成分の除去の関係を調べる必要がある。

図 2 の測定回路で, 図 5 (c) に示すような振幅変調した正弦波信号を入力し, サファイア針を用いた探針を石英棒の断面内で径方向に移動させながら写した透過信号の写真を図 5 に示す。図 5 では $\omega \cdot a = 1.88 \times 10^4$ (rad·m/s) とし, (a) は何も塗布しない状態, (b) は吸収体を塗布した状態である。ここで, 各モー

ドは、遅延時間の違いによって識別した。図5から、吸収体により $L(0, 3)$ 不要信号成分を除去できることがわかる^{*3}。

よって、図4の(B)の領域で吸収体を石英円柱棒に塗布すれば、 $L(0, 3)$ 不要信号成分を広い帯域にわたり除去することができる。

4. 分散性の調整

一定径の石英円柱棒では、使用する帯域内で十分 $L(0, 3)$ 不要信号成分を除去できる(B)の領域になるよう直径を選ぶと、必要とする分散性は得られない。

ところで図1から石英円柱棒の直径の増加に伴い(C)の領域が低い周波数に移動することがわかる。つまり、一つのフィルタの中に変換部の直径より太い直径の部分があれば、その部分で必要とする分散性を得ることができる⁽⁷⁾。

いま、図6に示すような両端の変換部の直径に対して中央の直径が太くなるよう直線的に直径が変化する構造を考える。この構造のフィルタの分散特性を図7に示す。この図は、直径が0.1 mm 間隔で階段状に変化すると近似して Pochhammer-Chree の式から求めた。図7から、 r_2/r_1 を小さくするにつれて、全体としての分散性は小さくなるが、(B)の領域に限っては分散性が大きくなるのがわかる。

5. パルス圧縮フィルタの設計と試作

前述の検討に基づいてパルス圧縮フィルタを設計・試作した。

〈5・1〉 パルス圧縮フィルタの設計 まず、図6に示すテーパ状石英棒の両端の直径を決める。

パルス圧縮システムでは、圧縮後の信号のサイドロープレベルを低減するために送信チャープ信号にアポタイジングと呼ばれる振幅重み付けが行われる。このため、分散特性を示す周波数範囲は帯域幅の2倍程度必要となる。いま、帯域を1 MHz とすると分散特性を示す周波数範囲は約2 MHz 必要となる。

図6に示すフィルタで使用する周波数範囲は、 $L(0, 3)$ 不要信号成分を十分除去できる(B)の領域である。よって、(B)の領域の周波数範囲を2 MHz とするため、図1から、テーパ状石英棒の両端の直径を0.75 mm とする。

*3: 図2からは、 $L(0, 3)$ モードに比べ、変位が石英棒の表面近傍に偏っている $L(0, 2)$ モードのほうが吸収体の影響を大きく受けると考えられる。しかし、図5の実験結果では、吸収体により $L(0, 3)$ 不要信号成分が除去されている。そのメカニズムについては現在検討中である。

図6 テーパ状石英棒を用いたパルス圧縮フィルタとPZTの構造

Fig. 6. Schematic diagram of pulse compression filter made of a fused quartz rod with tapered ends and PZT

図7 テーパ状石英棒での $L(0, 2)$ モードの分散性の計算結果

Fig. 7. Calculated delay time versus $\omega \cdot a$ for $L(0, 2)$ mode in a fused quartz rod with tapered ends 1 m in length.

次に、2 MHz の周波数範囲で単位長さあたり 100 μ s 程度の遅延時間差を得るためテーパ状石英棒の直径を決定する。

図7より、十分な(B)の領域の分散性を得られる $r_2/r_1 \approx 130\%$ になるようテーパ状石英棒の中央の直径を1 mm とする。必要とする遅延時間差を得るためには、テーパ状石英棒の長さを選ばばよい。

〈5・2〉 パルス圧縮フィルタの試作 前述の設計に基づき、2本のテーパ状石英棒をつないで試作したパルス圧縮フィルタの直径分布を図8に示す。図9(a)は図5(c)に示す振幅変調した正弦波信号を一端のPZTに加え、周波数を7.0~10.0 MHzの範囲で0.2 MHz おきに变化させたときの透過波形である。このとき、図2の測定回路で探針をPZTに付けかえて測定した。なお、 $L(0, 3)$ 不要信号成分の除去の効

図 8 試作したテーパ状パルス圧縮フィルタの直径分布

Fig.8. Distribution of diameters of the fused quartz rod with tapered ends used in the experiment.

図 9 パルス圧縮フィルタを透過した振幅変調波

Fig.9. Amplitude modulated signal through the pulse compression filter.

果を確かめるため、 $L(0,2)$ モードによる信号が一定振幅になるよう入力を調整してある。図 9 (a) のように、このままでは使用する帯域内の不要モードの除去は不十分である。

そこで、3・3 節で述べた吸収体を用いて $L(0,3)$ 不要信号成分の除去を行った。図 8 の斜線で示す部分にあたる石英棒の表面に吸収体としてグリースを塗布し、上記と同様に得た透過波形を図 9 (b) に示す。この図から、吸収体により $L(0,3)$ 不要信号成分が除去されていることがわかる。以上の結果から、 $L(0,2)$ と $L(0,3)$ モードの振幅比と分散特性をプロットしたのが図 10 である。図中、 $V_{L(0,2)}$ 、 $V_{L(0,3)}$ は $L(0,2)$ モード $L(0,3)$ モードそれぞれによる信号成分の振幅を表している。

なお参考のため、図 3 と同様にして求めた $n_1/n_2 = 133\%$ のときの理論値を実線、および一点鎖線で示してある。この図で 7~9.8 MHz の範囲で $L(0,3)$ 不要信号成分は -20 dB 以下に抑えられている。なお、吸

図 10 テーパ状パルス圧縮フィルタの分散特性と振幅比

Fig.10. Measured delay time and amplitude ratio for the pulse compression filter made of a fused quartz rod with tapered ends.

図 11 パルス圧縮フィルタの遅延時間と挿入損失の周波数特性

Fig.11. Delay time and insertion loss of the pulse compression filter as a function of frequency.

収体を用いたときの挿入損失の増加は約 10 dB であった。

両端の PZT の中心周波数を選ぶことにより、このフィルタの振幅特性をある程度調整できる。中心周波数 8.5 MHz の PZT を使用し、挿入損失を測定した結果を図 11 に示す。このとき、-3 dB の帯域は約 1 MHz、単位長さあたりの遅延時間差は約 70 μs であった。

6. ま と め

溶融石英棒中を伝搬する弾性波の $L(0,2)$ モードを用いて、高い周波数から低い周波数に変調された信号

(ダウンチャープ信号)を圧縮する超音波断層法用パルス圧縮フィルタを構成する方法について検討した。

$L(0, 2)$ モードを用いてパルス圧縮フィルタを構成する場合、パルス圧縮後の S/N 比の低下の原因となる $L(0, 3)$ モードにより生じる不要信号成分を除去する必要がある。そこで、石英棒断面内の各モードの振動パターンの違いを利用し、① PZT 上の電極での電荷の打消し、および、②吸収体、を用いて $L(0, 3)$ 不要信号成分を除去した。このとき、テーパ状熔融石英棒を用いることにより、広い帯域にわたり不要信号成分を除去できると同時に、十分な遅延時間差を得られることがわかった。

更に、上記の方法を用いてダウンチャープ用パルス圧縮フィルタを設計し、試作したところ、帯域幅 1 MHz、単位長さあたりの遅延時間差約 70 μ s の結果を得、ほぼ設計どおり動作することを確認した。

なお、図 1 の (C) の領域で $L(0, 1)$ モードが微小な理由、および、 $L(0, 3)$ モードが吸収体により抑圧される理由については検討中である。

終りに、本研究を行うにあたり御助言いただいた都立大学 多気昌生助教授、小島健二助手および実験に御協力いただいた都立大学大学院生 松川英男氏に感謝いたします。

(昭和63年 6月27日受付、平成元年 3月 7日再受付)

文 献

- (1) 桐生, 他: 「熔融石英棒を伝搬する弾性波の $L(0, 3)$ モードを用いた超音波断層法用パルス圧縮フィルタ」, 信学論 A, J69-A, 1006 (昭 61-8)
- (2) 桐生, 他: 「FM チャープパルス圧縮技術を用いたマルチサブクトル超音波断層法」, 昭 62 信学総全大, No. 2564, p. 7
- (3) 志村, 他: 「同時複数周波数超音波法」, 医用電子と生体工学, 22, 7 (昭 59-10)
- (4) 伊藤, 他: 「二周波弁別フィルタ」, 昭 56 信学総全大, S 8-1, p. 6
- (5) J. E. May Jr.: "Wire-Type Dispersion Ultrasonic Delay Lines", *IRE Trans. Ultrason.*, UE-7, 44 (1960)
- (6) M. Yoshizawa, et al.: "A Method for Suppressing the $L(0, 2)$ Unwanted Signal in an $L(0, 3)$ Mode P. C. Filter", *J. Appl. Phys.*, 27, 117 (1988)
- (7) Arthur H. Fitch: "Synthesis of Dispersive Delay Characteristics by Thickness Tapering in Ultrasonic Strip Delay Lines", *J. Acoust. Soc. Am.*, 35, 709 (1963)