

光応答性結晶を用いる振動測定における信号の周波数特性

中 島 俊 典*

Frequency Characteristics of the Signal in Vibration Measurement by the Use of Photorefractive Crystal

Toshinori Nakajima

抄録

物体の振動を干渉測定するとき光の強度によって屈折率が変化するフォトリフラクティブ結晶を用いると、干渉計の調整が簡単になり、外からの振動などの影響も受けにくい。しかし、物体の振動周波数が高くなると、振動振幅が同じでも検出される信号が小さくなる。これは結晶の応答時間が有限で、干渉縞の強度の高い周波数変化には応答できないことによる。このような干渉縞記録の周波数特性について結晶の応答のモデルに基づいて計算を行ない、予測されていた低周波フィルタリングの特性を確認した。この特性は振動測定で複数の周波数で振動している物体から特定の周波数成分の振動を分離して測定するために利用できる。

1. 序論

光の干渉を利用する物体の変位や振動の測定で二つの光を重ね合わせるのに、通常用いられる半透明鏡の代わりに光の強度に対応して屈折率が変化するフォトリフラクティブ結晶を用いると、光学素子の調整の精度や機械的な安定性に対する要求が大幅に緩和される。

フォトリフラクティブ結晶に二つの光を照射させて重ね合わせると、干渉縞の強度に対応して屈折率が周期的に変化する格子が結晶の中にできる。できた格子によって、もとの

二つの入射光自身がそれぞれ回折される。回折される光の方向は、結晶に入射したもう一方の光が透過する方向と自動的に一致する。これが2光波結合で、結晶を透過する光と結晶で回折された光が重なって同一の方向に進む¹⁻³⁾。

そのため、通常の干渉測定で必要な反射鏡や半透明鏡の位置の精密な調整をしなくても、干渉縞に対応する信号を光電検出器で検出できる。また、外部からの機械的な振動によって反射鏡などの位置がずれても、検出される信号は常に一定に保たれる。位置ずれによって干渉縞の強度が変動しても、結晶に記録される格子も対応して書き換えられ、回折される光の方向は透過光と同じ方向になるた

*なかじま としのり 文教大学教育学部

めである。

しかし、機械的な振動の周波数が高くなると、その影響を打ち消すことができなくなる。振動によって干渉縞の強度が高速で変動すると、光の強度変化に対する結晶の応答時間が有限であるために、結晶中にできる格子が強度変動に対応して書き換えられなくなる。干渉縞の動きによって格子のコントラストが低下するので、回折される光の強度が小さくなって検出される信号が小さくなる。

このような2光波結合での低周波フィルタリングの特性は、物体の振動を測定するとき、振動の振幅が周波数に依存することになるので、望ましくない。一方で、このような特性を積極的に利用すると、これまでできなかった応用が可能になる。例えば、結晶に記録される光の強度が時間変化するとき、特定の変化分だけを取り出して検出できる^{4, 5)}。物体の振動を測定するときにも、振動の特定の周波数成分を分離して測定できる⁶⁾。

これまでに、フォトリラクティブ結晶であるBSO ($\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$) に物体の振動によって

強度が時間変化する干渉縞を記録し、2光波結合で検出される信号の周波数特性を測定して低周波フィルタリングの特性を確認した⁷⁾。

この報告では、結晶の強度に対する応答のモデルに基づく計算によって検出される信号の周波数特性を求め、信号の低周波フィルタリングの特性が光の強度変化に対する結晶の応答時間の有限性によることを明らかにする。

2. 光応答性結晶の特性解析

BSO結晶に強度が時間的に変化する干渉縞を記録して2光波結合により信号を検出する場合の特性を調べる。

振動する反射鏡によって位相が時間的に変調された光を物体光とし、位相変化しない光を参照光として、図1のように、BSO結晶に入射させる。二つの光の重ね合わせにより強度が時間変化する干渉縞が結晶に記録される。ここでは、透過する物体光と、結晶で回折される参照光とが重なって得られる信号を

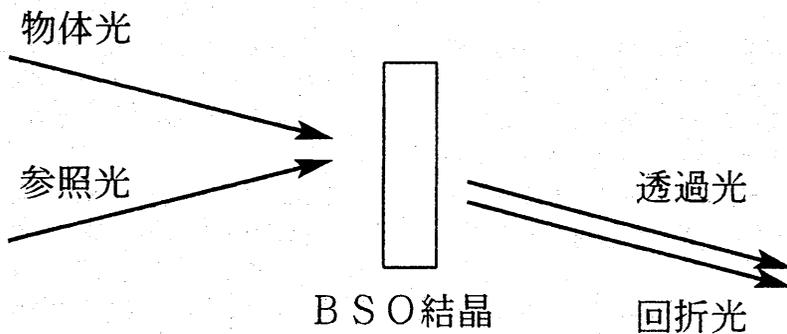


図1 BSO結晶による2光波結合

検出する。

このとき、二つの光による干渉縞の時刻 t での強度 $I(t)$ は次のように表わせる。

$$I(t) = 1 + \cos [ma \cos (2\pi ft) + \phi] \quad (1)$$

ここで、 a は振動振幅、 f は振動周波数であり、 m は干渉縞をつくる二つの光の入射角と光の波長に依存する定数、また、 ϕ は干渉縞の初期位相である。BSO結晶の光強度に対する応答の時間変化を図2のように仮定する。結晶の応答関数が時間に対して指数関数で増大して、時間 T で最大値に達した後、再び指数関数で減小して0になるとする。この応答関数 $R(t)$ は次の式で表わせる。

$$R(t) = \begin{cases} 1 - \exp(-t/T) & 0 \leq t \leq T \\ \exp[-(t-T)/T] - 1/e & T \leq t \leq 2T \end{cases} \quad (2)$$

干渉縞が時間平均されて記録される格子は、干渉縞の強度と応答関数のたたみ込み積分になり、その交流分 $H(t)$ は次のようになる。

$$H(t) = \int_{-\infty}^{\infty} R(t-t') \cos [ma \cos (2\pi ft') + \phi] dt' \quad (3)$$

この式はベッセル関数による級数展開公式を利用して展開し、積分を実行すると、次のように計算できる。

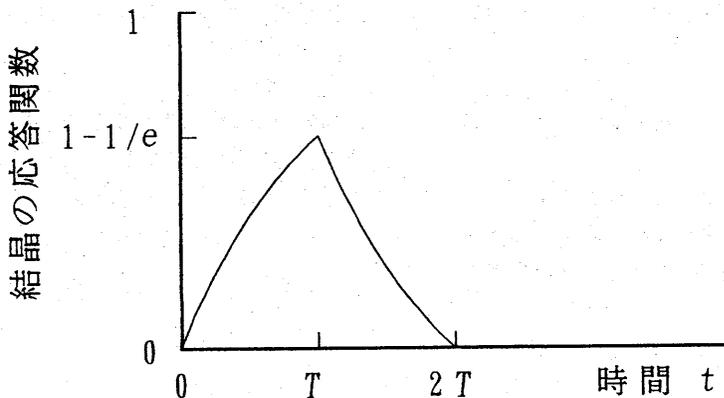


図2 光強度に対する結晶の応答の時間変化

$$\begin{aligned}
 H(t) = & \cos \phi T (1 - 1/e) J_0 (ma) \\
 & - 2 \sin \phi \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n J_{2n+1} (ma) \\
 & \times \left[\left\{ 1/T^2 + [2(2n+1)\pi f]^2 \right\}^{-1} \right. \\
 & \times \left\{ -2(2n+1)\pi f \sin [2(2n+1)\pi ft] \right. \\
 & + (1/T) \cos [2(2n+1)\pi ft] \\
 & - (1-1/e) 2(2n+1)\pi f \sin [2(2n+1)\pi f(t+T)] \\
 & + [(1-1/e)/T] \cos [2(2n+1)\pi f(t+T)] \\
 & + [2(2n+1)\pi f/e] \sin [2(2n+1)\pi f(t+2T)] \\
 & \left. \left. - (1/eT) \cos [2(2n+1)\pi f(t+2T)] \right\} \right. \\
 & + [2(2n+1)\pi f]^{-1} \sin [(2n+1)\pi fT] \cos [(2n+1)\pi f(2t+T)] \\
 & \left. - [2(2n+1)\pi ef]^{-1} \sin [(2n+1)\pi fT] \cos [(2n+1)\pi f(2t+3T)] \right] \\
 & + 2 \cos \phi \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n J_{2n} (ma) \\
 & \times \left[\left\{ 1/T^2 + (4n\pi f)^2 \right\}^{-1} \right. \\
 & \times \left\{ -4n\pi f \sin (4n\pi ft) \right. \\
 & + (1/T) \cos (4n\pi ft) \\
 & - (1-1/e) 4n\pi f \sin [4n\pi f(t+T)] \\
 & + [(1-1/e)/T] \cos [4n\pi f(t+T)] \\
 & + (4n\pi f/e) \sin [4n\pi f(t+2T)] \\
 & \left. \left. - (1/eT) \cos [4n\pi f(t+2T)] \right\} \right. \\
 & + (2n\pi f)^{-1} \sin (2n\pi fT) \cos [2n\pi f(2t+T)] \\
 & \left. - (2n\pi ef)^{-1} \sin (2n\pi fT) \cos [2n\pi f(2t+3T)] \right] \quad (4)
 \end{aligned}$$

ここで、 $J_n(x)$ は第1種 n 次のベッセル関数である。

検出される信号は、この格子の交流分に比例する。物体の振動振幅を測定するときは、信号の中から振動と同じ周波数をもつ

$J_1(ma)$ の係数に相当する成分を取り出して、その大きさを測定する。(4)式から振動周波数 f の成分 $H_1(t)$ を取り出すと次のようになる。

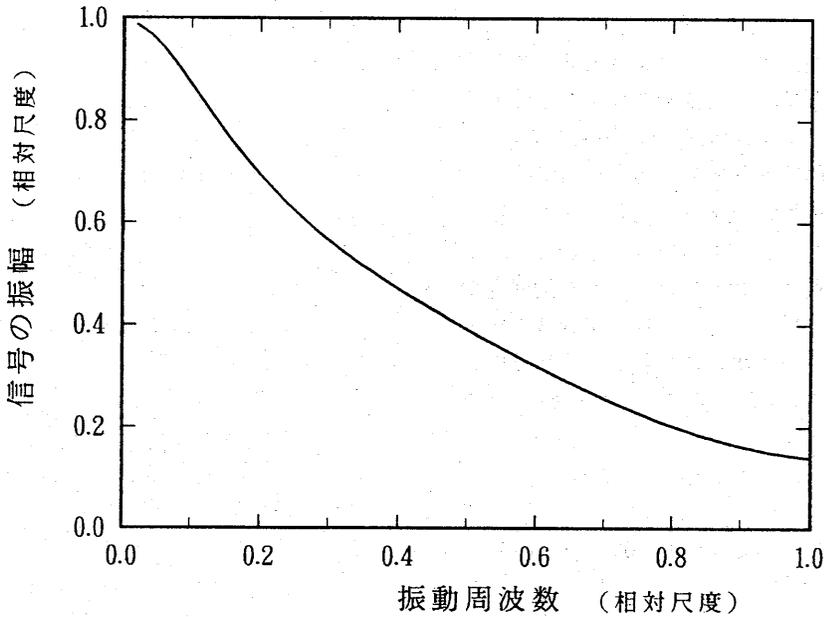


図3 物体の振動周波数に対する信号の振幅の変化

$$\begin{aligned}
 H_1(t) = & 2 \sin \phi J_1 (ma) \\
 & \times [1/T^2 + (2 \pi f)^2]^{-1} \\
 & \times \{ 2 \pi f \sin (2 \pi ft) \\
 & - (1/T) \cos (2 \pi ft) \\
 & + (1 - 1/e) 2 \pi f \sin [2 \pi f (t+T)] \\
 & - [(1 - 1/e) / T] \cos [2 \pi f (t+T)] \\
 & - (2 \pi f/e) \sin [2 \pi f (t+2T)] \\
 & + (1/eT) \cos [2 \pi f (t+2T)] \} \\
 & - (2 \pi f)^{-1} \sin (\pi f T) \cos [\pi f (2t+T)] \\
 & + (2 \pi e f)^{-1} \sin (\pi f T) \cos [\pi f (2t+3T)] \} \quad (5)
 \end{aligned}$$

この信号の振幅が、応答時間 T を一定とするとき振動周波数 f によってどのように変化するかを数値計算した結果を図3に示す。横軸は応答時間の逆数 $1/T$ に等しい周波数を1とする相対的な振動周波数を示し、縦軸は検

出される信号の振幅を示す。振動周波数の増大とともに信号の振幅はゆるやかに減少する。振動周波数が高くなると信号が小さくなるという低周波フィルタリングの特性をもつことがわかる。

3. 結論

フォトリフラクティブ結晶に時間変化する干渉縞を記録して、2光波結合により信号を検出するときの信号の周波数応答を計算した。結晶の応答時間が有限であると、周波数の高い変化には応答が低下して信号が小さくなる低周波フィルタリングの特性を確認した。このような特性は、光の干渉による振動測定では望ましくない。しかし、物体が複数の周波数で振動している場合に、特定の周波数成分の振動を分離して測定するために利用できる。

文献

- 1) 北山研一：応用物理 **61**, No.1 (1992) 14-21.
- 2) J.P.Huignard *et al.* : Appl. Opt. **16**, No.11 (1977) 2796-2798.
- 3) A.Marrakchi *et al.* : Opt.Comm. **34**, No.1 (1980) 15-18.
- 4) T.Sato *et al.* : Appl. Opt. **26**, No.10 (1987) 2016-2019.
- 5) J.Khoury *et al.* : J.Opt.Soc.Am.B **10**, No.1 (1993) 72-82.
- 6) T.Nakajima : Digest of the Topical Meeting of the ICO, Frontiers in Information Optics (1994) 262.
- 7) 中島俊典：文教大学教育学部紀要No. 31 (1997) 9-13.