光干渉型マイクロセンサーの試作と欠陥による受信波形特性

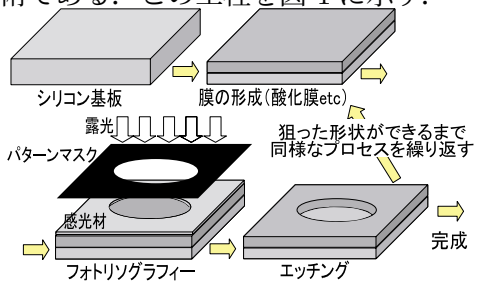
東北大学大学院　学生員　志賀みゆき　正　員　山田真幸　正　員　北原道弘
東北大学大学院　　鈴木　学　　新妻弘明

1　はじめに

地下弾性波計測の分野への利用が検討されている光干渉型マイクロセンサーを，構造物の欠陥評価へ応用することを考える．マイクロセンサー化することにより従来の圧電型探触子に比べて非常に小さくなり，また主な部分をシリコンで作るため低コスト・大量生産化が可能になる．基本設計は既存のものを用いるが，欠陥評価に用いる場合には現在の数百 Hz より 3 オーダー高い 100kHz 以上の帯域で使用できなければならない．そこでここでは，土木構造物の欠陥評価用光干渉型マイクロセンサー製作の過程と特性評価実験を行った結果を示し，欠陥評価利用への可能性についてまとめる．

2　マイクロマシニング技術とは

光干渉型マイクロセンサー (以下光センサーと略す) の製作には，半導体集積技術を応用したマイクロマシニング技術を用いている．これは，主として基板上への膜の堆積等の付加加工，その表面への光焼付けによるマスクパターン転写，転写されたパターンに基づくエッチングによる除去加工，及び熱処理・他種原子のドーピングなどによる改質加工を繰り返す製造技術である．この工程を図-1 に示す．



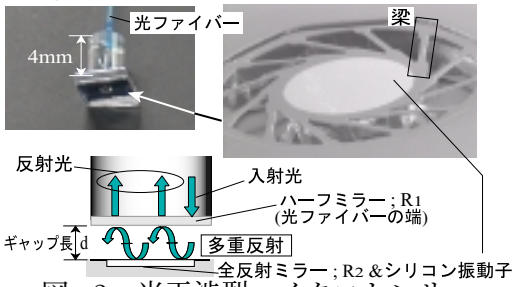
図– 1　マイクロマシニング技術の主な流れ

3　光干渉型マイクロセンサーの基本設計

光センサーの基本構造と光学的原理を図-2 に示す．光センサーは振動を検出する原理として，ファブリ・ペロー干渉計の原理を用いている．これは 2 枚の平行に置かれた鏡の間での光の多重反射による干渉現象を利用したものである．ここでファブリ・ペロー干渉計における光の反射率 R_{FP} は次式で与えられる [1]．

$$R_{FP} = \frac{R_1 + R_2 - 2\sqrt{R_1 R_2}\cos(\frac{4\pi nd}{\lambda})}{1 + R_1 R_2 - 2\sqrt{R_1 R_2}\cos(\frac{4\pi nd}{\lambda})} \qquad (1)$$

ここで R_1, R_2 はそれぞれハーフミラー，全反射ミラーのエネルギー反射率，n はミラー間の媒質の屈折率，λ は入射光の波長，d はミラー間の距離である．シリコンおもりが光ファイバ端面に対して垂直に振動すると，ファイバ端面のハーフミラーを透過した光がシリコンおもり表面の全反射ミラーとの間で多重反射して干渉が生じ反射光の強度変化が起きるので，反射光強度をフォトディテクターで検出してその変化を計測すればよい．この基本設計には，これまで本学地球工学専攻新妻研究室で開発されてきたものを用いている．



図– 2　光干渉型マイクロセンサー

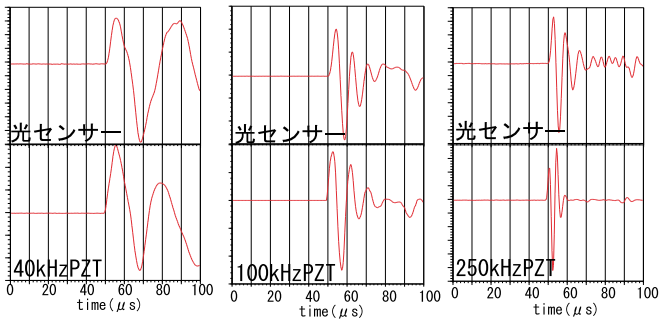
以上のような原理に基づき構造物欠陥評価に利用可能な特性を持つ光センサーを設計することを考える．ただし光学的設計については特に変える必要がないので基本設計通りとし，振動子部分の機械的設計についてのみ再設計を行った．その結果地下計測用センサーと比較して共振周波数が高くなるため振動子を支える梁の部分を短くし，梁の本数を増やした．また，フラットな周波数特性を得るためには振動子に減衰をきかせた設計にする必要があるが，現実に光センサーの内部で狙い通りの減衰を生じさせることができるかどうかは確実でない．そこで今回の設計では減衰について考慮しないものとした．

4　光干渉型マイクロセンサーの特性評価

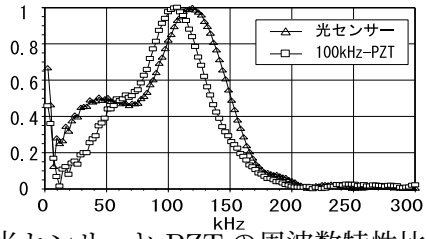
完成した光センサーの特性を評価する．送信側の圧電型探触子 (PZT) を半波長の sin 波で駆動させ，セメントペースト供試体を伝播した透過波を光センサー及び送信側と同じ中心周波数を持つ PZT で受信して，得られた波形を比較する．計測系の構成及びセメントペースト供試体の形状は図-3 に示す通りである．図-4 は 40kHz，100kHz，250kHz の 3 種類の PZT を用い，各々の中心周波数で駆動した際の，光センサーと

キーワード：マイクロマシニング技術，ファブリ・ペロー干渉計，光センサー，非破壊評価
〒 980-8579　仙台市青葉区荒巻字青葉 06,　TEL 022-217-7126, FAX 022-217-7127　URL: http://www.nde.civil.tohoku.ac.jp/

図– 3　計測系の構成と供試体の形状



図– 4　光センサーと PZT との波形の比較

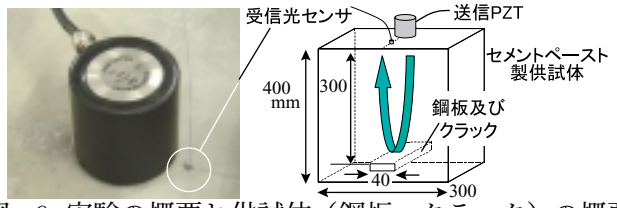


図– 5　光センサーと PZT の周波数特性比較の一例

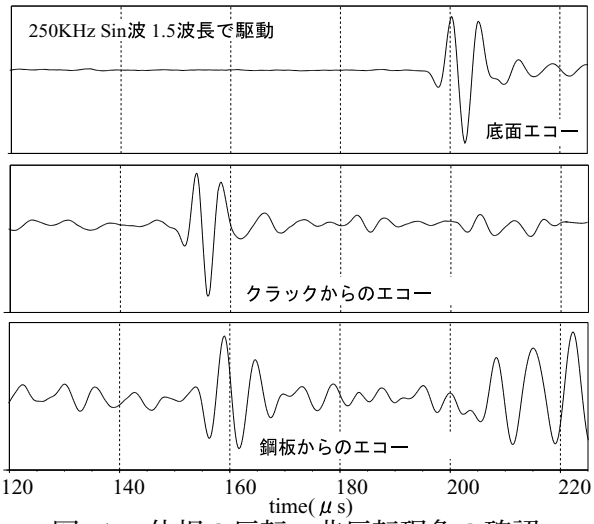
PZT で比較した結果である．これらの図から，光センサーが広い周波数域において振動を感知していることが分かる．次に得られた透過波形についてフーリエ変換して PZT の受信波と比較した．その結果の一例を図-5 に示す．図-5 は，中心周波数 100kHz の PZT を用いた場合の受信波形をフーリエ変換して，それぞれ縦軸の最大値で正規化して描いたものである．80kHz 以下の低周波数域に光センサー自身の共振の影響は見られるものの，PZT と同様の傾向を示していると言える．更に，光センサーの周波数特性のピークが PZT のピークから若干ずれているが，この現象は 40kHz,250kHzPZT での測定結果にも現れた．

5　光干渉型マイクロセンサーの応用例

部材内に存在する欠陥内を推定する一方法として，母材と比較した剛性の大小に関する情報を得るために反射波の位相変化を見る方法が考えられている [2]．そこでこの光センサーの欠陥評価への応用の一例と



図– 6　実験の概要と供試体（鋼板，クラック）の概要



図– 7　位相の反転・非反転現象の確認

して，セメントペースト供試体内に挿入した鋼板とクラックからの反射波を光センサーで計測し，その位相が底面からの反射波と比べて反転・非反転することを確かめる．実験の概要を図-6 に示す．供試体にはクラックまたは鋼板を持つ計 2 種類を用いた．使用した送信子は中心周波数 250kHz の PZT で，受信には光センサーの他に比較として PZT も用いた．参考文献 [2] によれば，この場合底面エコーの位相と比べてクラックは同位相，鋼板は逆となる．本実験の結果が図-7 である．セメントペースト内の縦波の速度を c=4059.5m/s とすると，鋼板またはクラックからのエコーは図の t=147.8μs で現れ，底面からのエコーは t=197.1μs で現れる．底面エコーの位相を基準として考えると，光センサーが位相の反転・非反転現象を感知していることが分かる．

6　まとめ

以上より，光干渉型マイクロセンサーは数 10～250kHz の帯域で PZT との比較に耐えうるだけの性能を持っていることが分かった．構造物欠陥評価に関しても，欠陥と母材の剛性の大小関係を見る用途に使用できる可能性が示された．今後は減衰を考慮した設計についても検討を行うことが課題である．

参考文献

[1] 大津元一：現代光科学　光の物理的基礎，朝倉書店，2000.

[2] 小田島淳，中畑和之，北原道弘：位相の反転・非反転現象に着目した欠陥による後方散乱波形解析，境界要素法論文集，Vol.18, pp.23-28，2001.