

ウェーブレット変換による磁気傾斜センサーの磁界分布解析

妹尾 義久*、遠藤 久、早野 誠治、斎藤 兆古
(法政大学 工学部)

Wavelet analysis of the magnetic flux distributions in magnetic tilt sensor

Yoshihisa Senoo, Hisashi Endo, Seiji Hayano and Yoshifuru Saito
(Graduate School of Engineering, Hosei University)

Abstract

To exploit a small, lightweight and low power consumption magnetic tilt sensor having high and wide-range sensibility, we have examined various factors constructing the magnetic tilt sensor. For example, materials, shape, operating principle and so on. At first, we have examined a dependency of the materials to the sensibility and range concerning with an exploited tilt sensor. Second, we have examined a theoretical background of the operational characteristics of the magnetic sensor by means of the finite elements method. As a result, we have found a deterministic difference in the sensibility as well as dynamic detection range, which depends on a material combination. Namely, a combination of the magnetic fluid and glass ball has yielded a wider dynamic detection range with a relatively higher sensibility. The permeability of magnetic fluid is relatively small compared those of the other ferromagnetic materials so that a global magnetic field distribution change caused by a movement of glass ball is larger than those of the ferromagnetic materials.

In the present paper, after extracting the magnetic flux distribution that reflects to the sensor signal, we apply the wavelet transform to this magnetic flux distribution in order to find the dominant magnetic flux distribution. It is found that a combination of the finite element solutions with wavelet transform is an effective and useful approach to evaluate the characteristics of the magnetic field distributions, which depend on the combination of the materials.

キーワード：傾斜センサー、磁性流体、磁束分布、有限要素法、ウェーブレット変換
(Tilt sensor, Magnetic fluid, Magnetic flux distribution, Finite element method, Wavelet transform)

1. はじめに

土木・建築や船舶・車両或いは地表の傾斜検出など、現在広い分野で角度・傾斜センサーが用いられている。中でも、流動性と磁性を有する磁性流体を利用した角度センサーに関する研究報告は比較的多い。例えば、深町等は円筒の容器に適量の磁性流体を入れ、その中に矩形状の3個の検出コイルを互いに $2\pi/3$ の角度間隔で配置する。センサー本体が傾くと各検出コイル近傍の磁性流体の量が変化するため、磁性流体と各検出コイルの位置関係が各検出コイルのインダクタンスの変化となり、インダクタンスの変化を計測することによって角度検出を行っている。このセンサーの長所は、1) 1ユニットで2方向の角度検出が可能。2) 小型・軽量。3) 機械的駆動部分がない。4) 構造が簡単、堅牢のため保守が容易である。5) 液面の水平性を利用してセンサー自身で水平検出ができる。他方、短所はセンサー周辺の振動に起因する液面の波立ち等があるが、この欠点も液面に直流磁界をかけることによって制御可能な、直流バイアス型磁性流体角度センサーを提案し、報告している[1]。

磁性流体は本質的に透磁率が低いため、感度限界が存在してしまう。この欠点を克服するため、岡等は磁性流体と磁性体を併用した傾斜センサーを報告している[2]。

これらのセンサーの本質的な特徴は、磁性流体の流動性

を利用しており、角度変化による磁性流体の流動が結果として磁束分布を変化させ、コイルのインダクタンスを変化させる。このインダクタンスの変化を利用して機械的な角度を電気信号へ変換する。これが磁性流体を利用した角度センサーの共通な原理である。

センサーはその役割から、使う環境・検出物の違い等により多種多様であるが、共通に求められる性能としては1) 高感度。2) リニアリティー。3) 低消費電力等がある。そこで我々は傾斜センサーを磁性流体やその他の個体の強磁性・反磁性材料等を使用することにより、使用する材料の組み合わせを変えることによってどのような特性を示すか、また使用する材料の割合変更がどのような特性を持つかを実験値、ウェーブレット変換による解析、またシミュレーションによる磁束分布を用いて比較・検討し報告する。[3]

2. 使用材料と実験装置

2.1 使用材料

本研究においてはいくつかの磁氣的性質が異なる材料を使用する。使用材料は、強磁性体であり透磁率が比較的大きい鉄球、反磁性体であるガラス球、常磁性体である空気、また磁性流体である。磁性流体は比較的、透磁率は低

いが強磁性体であり、液体特有の流動性を持つ点に注目した。

本研究において使用する磁性流体の主な仕様を以下に示す。

- 型名： M300
- 溶媒： 水
- 飽和磁束密度： 3.20[mT] (320[gauss])
- 粘度(20℃/50℃)： 21/10[mPa・s]
- メーカー： シグマハイケミカル社製

2.2 実験装置

実験装置の形状と使用したコイルの諸定数を Fig. 1 に示す。

装置、コイルの形状は後のシミュレーションを簡潔に行うため対象性を考慮に入れた。装置内に封入する材料の組み合わせは、以下の通りである。1) 空気中の容器に鉄球を挿入する。 2) 容器に磁性流体を満しその中に鉄球を挿入。 3) 容器に磁性流体を満しその中にガラス球を挿入する。容器内に使用する球の径としては鉄球、ガラス球それぞれ 10mm、20mm、30mm を使用する。

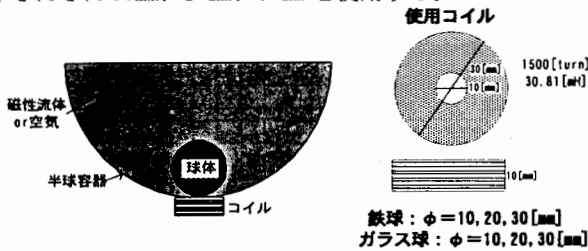


Fig.1 Schematic diagram of the tested sensor.

3. 実験

3.1 実験結果

それぞれのセンサーの周波数特性を Fig. 2 に示す。感度の設定としては、それぞれの装置における 0 度時のインピーダンスを基準とした比、すなわち、傾斜角 0 度時のインピーダンスを Z_0 、傾斜角 θ 度時のインピーダンスを Z_θ とした場合、 $Z = Z_\theta / Z_0$ で表す。

実験結果よりどの装置においても周波数が 1kHz 周辺において感度が飽和することがわかる。従って、ここからは周波数が 1kHz のみの実験結果を示す。

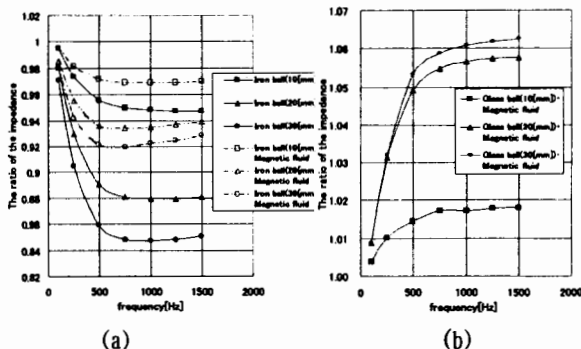


Fig.2 Frequency characteristic of the sensors.

Fig. 3 に鉄球を使用した場合の感度を示し、Fig. 4 にガラス球を使用した場合の感度を示す。

磁性流体の透磁率は鉄球の透磁率と比べると非常に小さいものであり、感度にそれほど影響を与えない。しかし実験結果を比較してみると感度を半分近くまで低下させていることがわかる。これは鉄球の体積に比べ磁性流体の量が多いため磁性流体の性質が支配的になっていることを意味する。

鉄球を使用した場合に対して、ガラス球を使用した場合、わずかではあるが測定可能な角度が広域である。これはガラス球の透磁率と磁性流体の透磁率の差が小さいため微妙な角度変化にも対応できることを意味している。

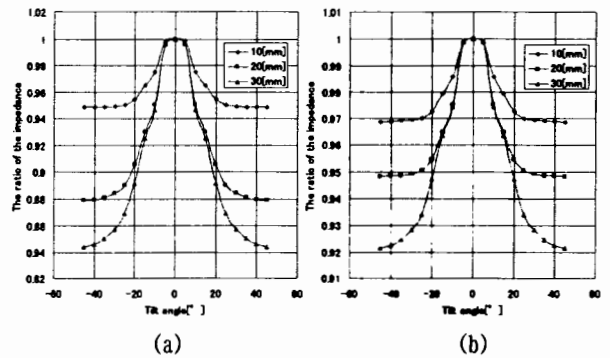


Fig.3 Sensibility of the sensor.

(a): an iron ball and air; and (b): an iron ball and magnetic fluid.

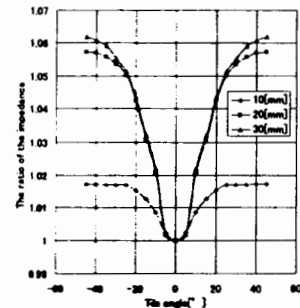


Fig.4 Sensibility of the sensor constructed by a combination of glass ball and magnetic fluid.

3.2 位相変化

本研究において使用するコイルは単一であるため、インピーダンス Z は回路の内部抵抗 R 、リアクタンスを X 、インダクタンスを L とすると(1)式で表せる。

$$\begin{aligned} Z &= V/I \\ &= R + jX \\ &= R + j\omega L \end{aligned} \quad (1)$$

(1)式のインピーダンス Z は実数部と虚数部を含んでいる。そこでオシロスコープを使用し位相変化が装置の角度変化に対してどのように変化するかを調べる。ここでは一例として、容器に鉄球を入れた場合の 0 度から 45 度に変化した場合を示す。Fig. 5 が結果である。

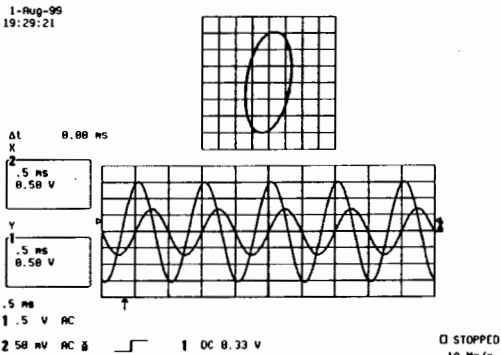
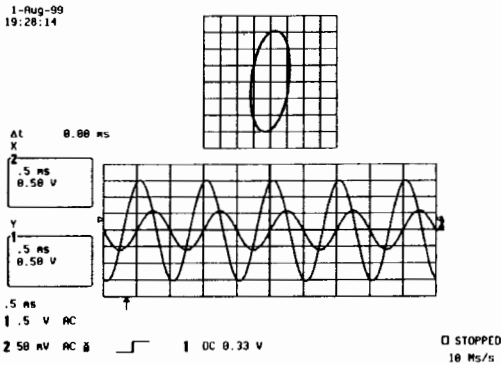


Fig.5. Oscillograms of the current and terminal voltage of a tested sensor.

回路内において内部抵抗が存在するのならば、装置が0度から45度に傾いた場合、インダクタンスが変化を起こすため位相変化が起こると考えられる。しかしコイルのインダクタンスが回路の内部抵抗に比べ非常に大きいため位相差はほぼ90度であった。つまり回路の内部抵抗を無視できるためコイルのみの回路を考えればよく、回路はリアクタンス分が支配的であり、センサーとして機能する磁界がインピーダンスの主要部分を占めていることが判る。

3.3 材料変化による特性

以上の実験結果を前提として、感度、ダイナミックレンジ、および装置の消費電力をTable 1に示す。

Table 1から、所望の特性を有するセンサーの材料がだまかに把握できる。

Table1. Global characteristics depending on the materials.

	感度	ダイナミックレンジ	消費電力
鉄球・空気	高	狭	大
鉄球・磁性流体	中	中	中
ガラス球・磁性流体	低	広	小

4. シミュレーション

Fig. 6 に有限要素法による磁束分布のシミュレーション結果を示す。まず実験において高感度であった径 30mm における計算結果を示す。

Fig. 6 より装置内の材料の変化（鉄球・空気の組み合わせ、鉄球・磁性流体の組み合わせ、ガラス球・磁性流体の組み合わせ）それぞれにおいて、全く異なる磁束分布となることが判る。その結果から、鉄球では磁束の吸収、ガラス球では磁束の削減により角度が検出されることが明らかである。この結果は、Fig3.および Fig4.のインピーダンスの変化を裏付けている。

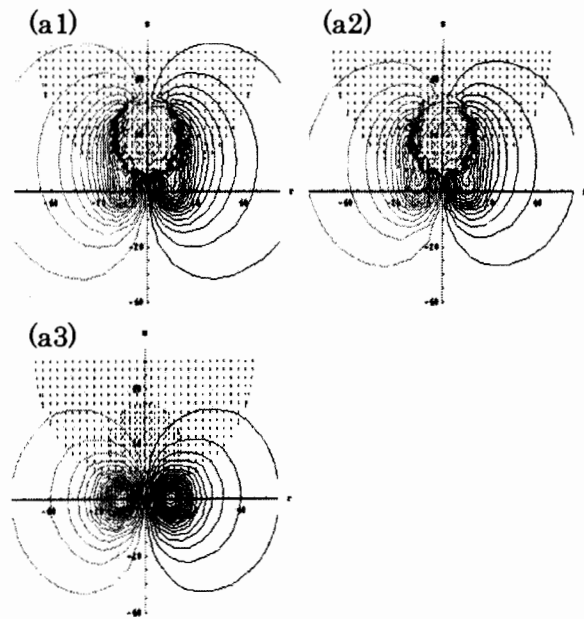
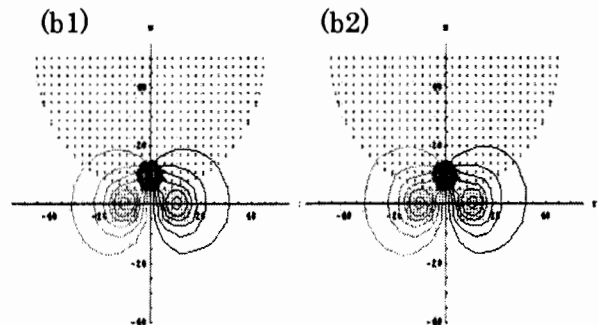


Fig.6 Magnetic flux distributions by the simulation.
 (a1) Combination of an iron ball and air.
 (a2) Combination of an iron ball and magnetic fluid.
 (a3) Combination of a glass ball and magnetic fluid.

また、Figs. 7, 8 それぞれに球の径が 10 [mm]、20 [mm] のシミュレーションにおける磁束分布を示す。球径が 10mm、20mm どちらの磁束分布も、球径が 30 [mm] と比較して磁束分布の乱れが小さくなることが判る。これは実験結果、Figs. 3、4 のインピーダンスの減少を裏付けている。



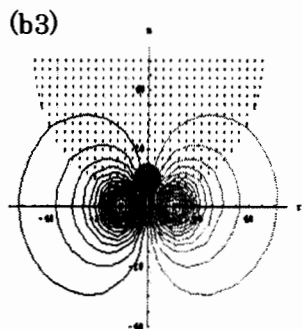


Fig.7 Magnetic flux distributions when sensor is constructed by an iron or glass ball having a diameter 10mm.

- (b1) Combination of an iron ball and air.
- (b2) Combination of an iron ball and magnetic fluid.
- (b3) Combination of a glass ball and magnetic fluid.

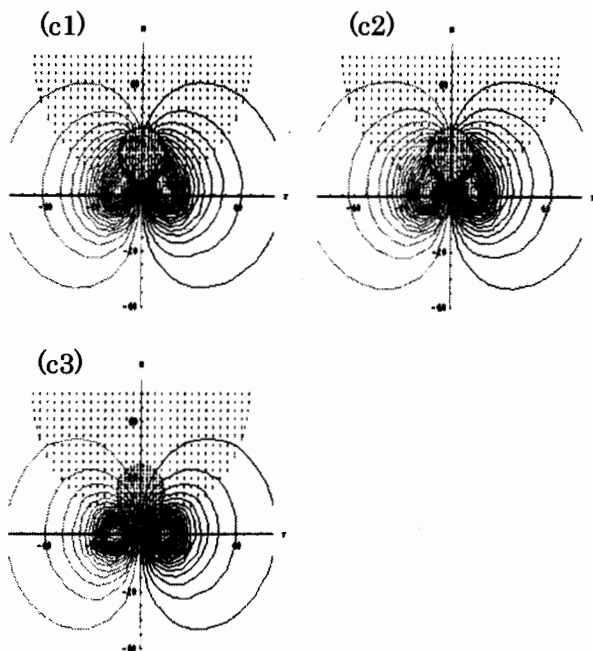


Fig.8 Magnetic flux distributions when sensor is constructed by an iron or glass ball having a diameter 20mm.

- (c1) Combination of an iron ball and air.
- (c2) Combination of an iron ball and magnetic fluid.
- (c3) Combination of a glass ball and magnetic fluid.

Fig.9 に実験値と有限要素法によるコイルのインピーダンス変化を示す。実験値と有限要素法によるインピーダンス変化を観測すると傾斜特性が一致していることがわかる。

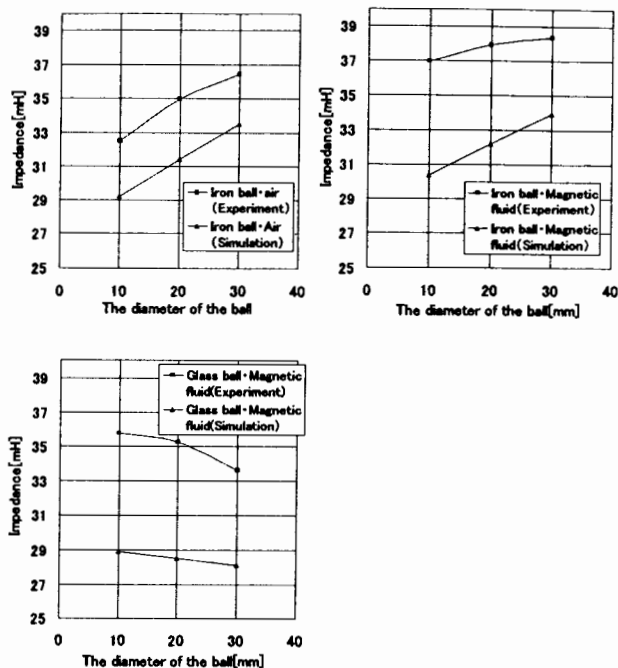
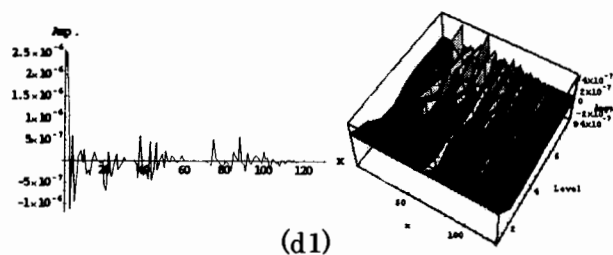


Fig.9 Impedance change when the diameter of the ball is changed.

5. ウェーブレット解析

有限要素法によって求められた解ベクトルに離散値系ウェーブレット変換を適用し、それぞれのセンサーの特徴を抽出する。ここでは、高感度であった球径 30mm におけるウェーブレット解析結果を Fig. 10 に示す。

それぞれのセンサーにおけるウェーブレット解析結果で、最も高感度であった鉄球と空気の組み合わせが最大振幅のスペクトラムを与え、ガラス球を使用した場合は、スペクトラムの振幅が小さい。よって、ウェーブレットスペクトラムの振幅はセンサーの感度に比例する。次にウェーブレットスペクトラムとダイナミックレンジの関係を調べる。その結果、ウェーブレットスペクトラムの高周波部分はダイナミックレンジに反映することがわかる。



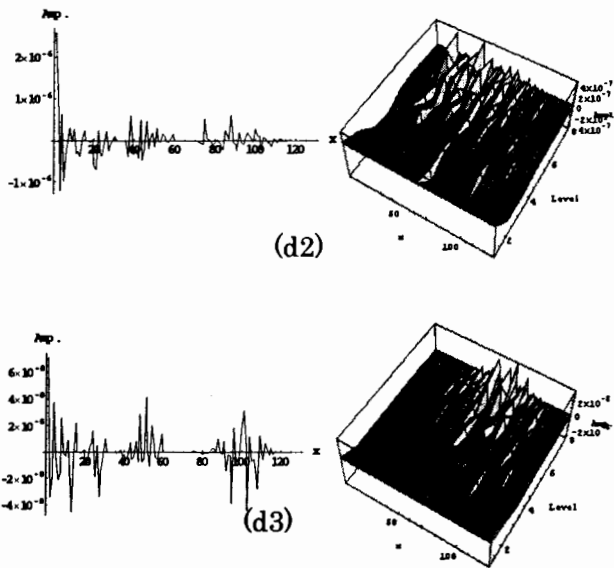


Fig.10 Wavelet spectrums of the sensors.

- (d1) Combination of an iron ball and air.
- (d2) Combination of an iron ball and magnetic fluid.
- (d3) Combination of a glass ball and magnetic fluid.

次に Fig. 11 に一例として鉄球 30mm・空気の組み合わせによる多重解像度解析の結果を示す。本研究では、有限要素法によって求められた解ベクトルより、ウェーブレットスペクトラムを求めているが、解ベクトルの並び方によってウェーブレットスペクトラムも変わってくると考えられる。しかし、それぞれにセンサーにおいてのスペクトラム特徴は大きくは変わらない。鉄球を使用した場合にはマザーウェーブレット近傍に大きな振幅を、ガラス球では高周波成分に大きな振幅を得る。

ここで、解ベクトルの並び替えを行っても Level1 成分は一定であり、Fig. 12 に示すように、この振幅の値は、Fig. 9 に示すコイルのインダクタンスの傾斜特性と一致した傾向を示す。

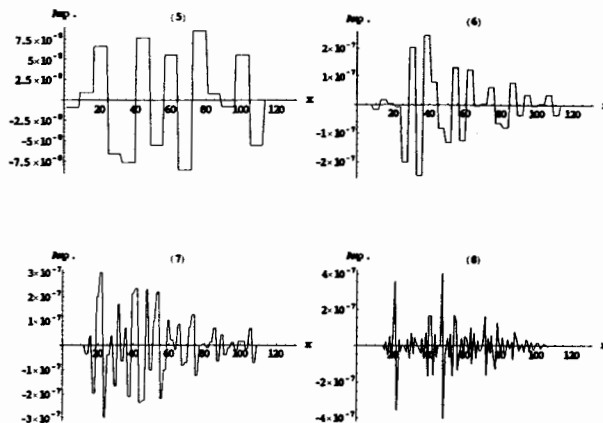
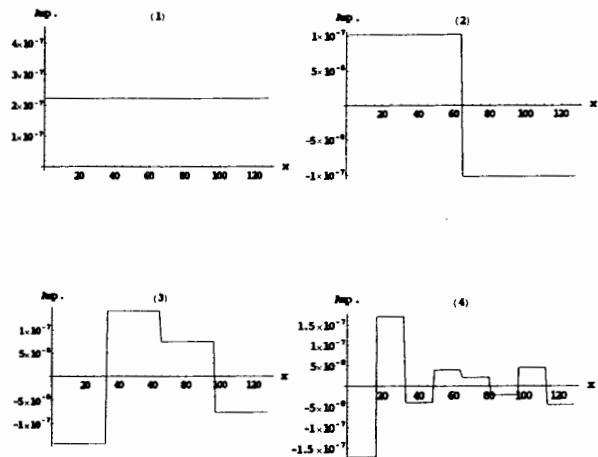


Fig.11 Multiplex resolution analysis of the sensor.

Fig.12 Amplitude change when diameter of the ball is changed.

6. まとめ

装置に使用する材料を鉄球、ガラス球、空気、磁性流体の4種類で行い、使用材料の変更によって、感度、ダイナミックレンジ、消費電力に相違が明らかとなった。

また、シミュレーションによる磁束分布を観測することによって、材料の磁気的性質がセンサーに与える影響が把握できた。

ウェーブレット変換を適用することによって、それぞれのセンサーの特徴はマザーウェーブレットスペクトラムへ集約されることが判明した。

以上のことより全体を通して言えることは、単一の角度センサーで、高感度、広ダイナミックレンジ、低消費電力のすべてを同時に満足することが不可能であり、用途に応じて材料・形状などについて特化したセンサーを開発せざるを得ないことが確認できた。

参考文献

- [1] 深町純一、早野誠治、斎藤兆古、“磁性流体を使った3 コイル角度センサー” 電気学会、マグネティックス研究科資料、MAG-98-266、1998年12月16日。

- [2] 岡英夫、岩田純蔵、“磁性体と磁心による傾斜センサの基礎特性および解析”、電気学会、マグネティックス研究科資料、MAG-85-66、昭和60年6月24日。
- [3] 妹尾義久、早野誠治、斎藤兆古、“磁気傾斜センサーの基礎特性”、電気学会、マグネティックス研究資料、MAG-99-139、1999年11月5日。
- [4] シグマハイケミカル、“磁性分散液カタログ”

原稿受付日	平成12年10月17日
-------	-------------