

変動磁場がひずみゲージに及ぼす影響に関する研究

井山 義信 中根 淳

Studies on Influences of Dynamic Magnetic Fields on Strain Gauges

Yoshinobu Iyama Sunao Nakane

Abstract

In case of measuring strains of structures under dynamic magnetic fields, for example, the linear motor car, unreal strains may happen to be indicated. Therefore, incorrect outputs may be measured. Numerical estimations and model tests using five types of strain gauges sold on the market were carried out for the purpose of explaining the mechanisms of unreal strains. The results were as follows: ① Unreal strains were produced in all of the kinds of strain gauges. In case of giving maximum power of dynamic magnetic fields, the maximum measurement was about $2,800 \mu$ and the minimum about 200μ . ② The unreal strains calculated by numerical estimations were nearly equal to the measured value. ③ Methods of preventing unreal strains are to make innovations in gauge configuration and adoption of higher voltage for the circuit.

概 要

リニアモーターカーなど、超伝導特有の強い磁場が変動して作用する構造物のひずみを、電気抵抗式ひずみゲージで測定する場合、電磁誘導による見かけひずみが発生し、正確な測定値が得られない可能性がある。

そこで、電磁誘導により発生する見かけひずみを把握し、その対策を提案することを目的とし、市販のひずみゲージ5種を対象に解析、および、実測を行なった。この結果、以下の点が明らかになった。

- ① いずれのひずみゲージにおいても見かけひずみは発生し、その発生量は、変動する磁場が最大の時、最も大きいもので約 $2,800 \mu$ 、最も小さいのもので約 200μ であった。
- ② 今回の解析法で、一部のケースを除き、実測値とほぼ同じ見かけひずみを予測することができる。
- ③ 見かけひずみを低減させる方法は、ひずみゲージの形状工夫とブリッジ電圧の高圧化である。

1. はじめに

構造物の変形計測には、電気抵抗式ひずみゲージ（以下ひずみゲージと略称）、および、これを応用した変位計が一般に使用されている。超伝導浮上式リニアモーターカーのガイドウェイなどの構造物では、従来の施設よりも作用する磁場、変動速度、共に大きいため、ひずみゲージに電磁誘導を原因とする誤信号（以下見かけひずみと略称）が発生し、変形計測に影響が生ずると考えられる。変動磁場を原因とする見かけひずみに関する既往の報告¹⁾はほとんど無く、対策方法についても不明な点が多い。また、今後、超伝導技術を利用する他の施設の実用化により、類似した問題が増加することが予想される。ここでは、超伝導浮上式リニアモーターカーを対象としたモデル実験、および、解析について述べる。

2. 見かけひずみの定義

2.1 電磁誘導

研究対象とする超伝導浮上式リニアモーターカーのように、磁石が移動する場合に生じる電磁誘導の説明には、図-1に示すフレミングの右手の法則が有用である。フレミングの右手の法則では、電磁誘導による起電力、作用する磁場、運動の3要素は、互いに直行する3軸座標系で説明されている。

2.2 見かけひずみの定義

ひずみゲージによるひずみ検出は、ひずみを感知する抵抗線部分に変形することで生じる抵抗変化を、電圧の変化に置き換えることで行なっている。従って、抵抗線部分に磁場が変化して作用すると、フレミングの右手の法則により、電磁誘導による起電力として誘導電圧が発生し、実際にひずみが生じていないにもかかわらず、

誘導電圧に応じたひずみが検出される。このひずみを、電磁誘導による見かけひずみと定義する。

2.3 見かけひずみと誘導電圧の関係

見かけひずみは、誘導電圧を変換して得られる値であり、一方の値から、他方を求めることができる。ひずみゲージに発生する誘導電圧と見かけひずみには、下式²⁾の関係が成立する。

$$\epsilon_{nr} = (4 \times e) / (E \times K) \dots\dots\dots(1)$$

但し、

- ϵ_{nr} : 見かけひずみ (μ)
- e : 誘導電圧 (Volt)
- E : ブリッジ電圧 (Volt)
- K : ゲージ率

3. 実験方法

3.1 使用ひずみゲージ

実験に使用したひずみゲージの概要を表-1 に示す。ひずみゲージは、すべて市販品から選択した。選択の基準は、比較用の No. 1 を除き、以下述べるような、見かけひずみの防止に有効と考えられる特徴を有しているものとした。

No. 2 は、ひずみゲージ表面に電磁波シールド用の銅箔を貼りつけたもの、No. 5 は、2枚のひずみゲージを貼り合わせ誘導電圧を打ち消し合うもの、No. 4 は、抵抗値が高いもの、No. 3 は、抵抗素子にゲージ率の大きい半導体を使用したものである。

ひずみゲージのゲージ長は、ひずみゲージに作用する磁場の均一性が失われないよう、使用する磁石の断面(30×30 mm)に対し、十分に小さい2 mmとした。

3.2 変動磁場発生装置

ひずみゲージに変動磁場を与える方法として、以下の方法が考えられる。

- ① ひずみゲージを固定し、磁石を移動させる。
- ② 磁石を固定し、ひずみゲージを移動させる。
- ③ 交流電磁石を使用する。

これらの方法のうち、超伝導浮上式リニアモーターカーの模擬を考慮すると、①の方法を採用することが妥当である。磁石の移動方法は、直線運動と回転運動が考えられるが、回転運動の方が装置を容易に製作できるため、図-2 および、表-2 に示す仕様で、変動磁場発生装置を製作した。

3.3 実験条件

電磁誘導によりひずみゲージに発生する誘導電圧の大小を左右する要因として、以下のものが挙げられる。

- ① 磁束密度
- ② 移動速度
- ③ ひずみゲージの配置方向

磁束密度と移動速度は、ひずみゲージに与える変動磁場のエネルギーである。変動磁場のエネルギーが小さいと、ノイズ等の影響を受け、正確な誘導電圧を計測することができないため、表-3 に示す水準で実験を行なっ

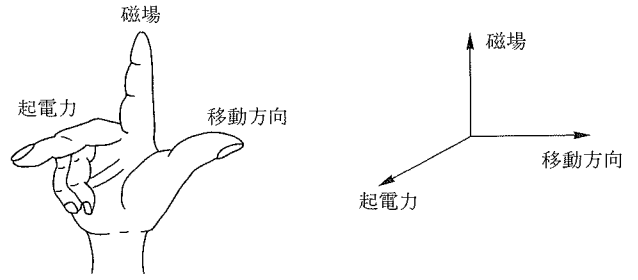


図-1 フレミングの右手の法則

表-1 ひずみゲージの概要

ゲージ番号	抵抗素子	抵抗値 (Ω)	ゲージ長 (mm)	ゲージ率	名称
No.1	Cu-Ni	120	2.0	2.1	一般用箔ゲージ
No.2	Cu-Ni	120	2.0	2.1	シールドゲージ
No.3	Ni-Cr	350	2.0	2.0	無誘導ゲージ
No.4	特殊合金	1,000	2.0	2.1	高抵抗ゲージ
No.5	N型Si	120	2.0	-100	半導体ゲージ

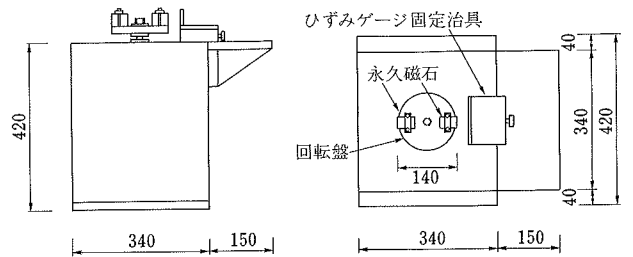


図-2 変動磁場発生装置

表-2 変動磁場発生装置の仕様

本体	主要構成材料	アクリル板 (t=20mm), SUS304, アルミニウム
	モーター	サーボモーター (最大回転数 1,400 rpm)
磁	製品名	NEOMAX-35
	寸法	断面30×30mm, 長さ40mm
石	残留磁束密度	12.56 K Gauss
	保磁力	11.87 KOe

表-3 実験のパラメータと水準

パラメータ	水準
磁束密度 (Gauss)	3,000, 2,000
回転数 (rpm)	1,000, 500
ひずみゲージ配置方向	x, y

た。なお、磁束密度は、静止状態においてひずみゲージに作用する最大磁束密度、つまり、磁石中心を通り、磁極 N, S 方向に平行な軸上で測定される値とした。ひずみゲージの配置方向が変わると、ひずみゲージに作用する磁場の成分が変わり、誘導電圧の発生量も変わってくる。そこで、ひずみゲージの配置方向は、図-3 に示す通り、2 方向について検討することとした。

3.4 測定項目および測定方法

測定した項目は、下記の 2 項目である。

- ① 誘導電圧値、および、出力波形
- ② 見かけひずみ

これらの測定は、① は FFT アナライザ、② は、データロガーで行ない、得られた値は、各々マイクロディスクレコーダーで記録した。また、ひずみゲージに作用する磁束密度は、ガウスメーターで測定した。

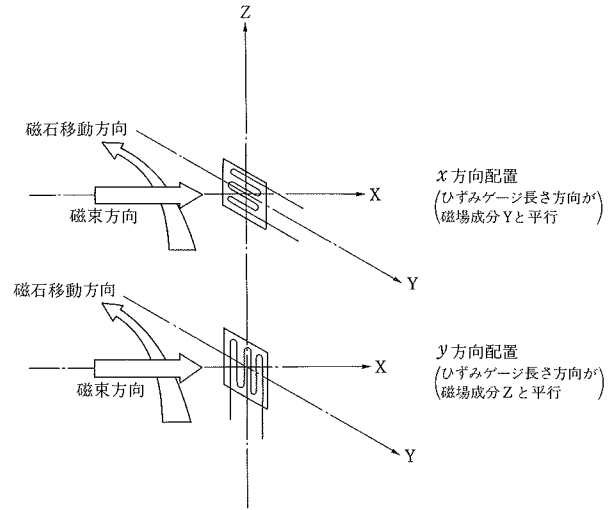


図-3 ひずみゲージの配置方向

4. 解析方法

4.1 ひずみゲージの解析モデルと解析式

電磁誘導の基本モデル³⁾には、図-4 に示す単線の導体を対象とするものと、図-5 に示す単ループを対象にするものがある。

単線モデルに発生する誘導電圧は、図-4 に示すように、導体に作用する磁束が一様であれば、下式で求めることができる。

$$E = B \times l \times v \quad \dots\dots\dots(2)$$

但し、

- E : 誘導電圧 ($\times 10^{-5}$ Volt)
- B : 磁束密度 (Gauss)
- l : 導体の長さ (cm)
- v : 移動速度 (cm/sec)

これに対し、単ループモデルに発生する誘導電圧は、下式で求めることができる。

$$E = (B_1 - B_2) \times l \times v \quad \dots\dots\dots(3)$$

この式中の B_1 、および、 B_2 は、図-5 で示すように運動方向に直行する 2 本の導体に作用する磁束密度であり、式中の他の変数は、式(2)と同様である。

次に、ひずみゲージにおける誘導電圧の解析には、どちらのモデルの適用が妥当であるか検討する。

一般的なひずみゲージの形状は、図-6 に示す通り、ひずみを感知する抵抗線部分に折返しがあることを除けば、図-6 中に点線で示すような単ループと考えることができる。折返し部分に生じる誘導電圧について考えてみると、使用したひずみゲージは、3.1 節の表-1 で示したように、ゲージ部分の長さが、全てのひずみゲージにおいて 2 mm と短いため、折返し部分の抵抗線間隔は数 10~100 μm 程度と非常に狭い。ここで、折返し部分の抵抗線を単線の導体と考えると、図-7 に示すように隣り合う抵抗線には、互いに打ち消し合う方向の誘導電圧が発生する。先に述べたように、隣り合う抵抗線の間隔が狭いため、ほぼ同じ磁束密度が双方に作用するので発生する誘導電圧値もほぼ同一になり、完全に打ち消し合う

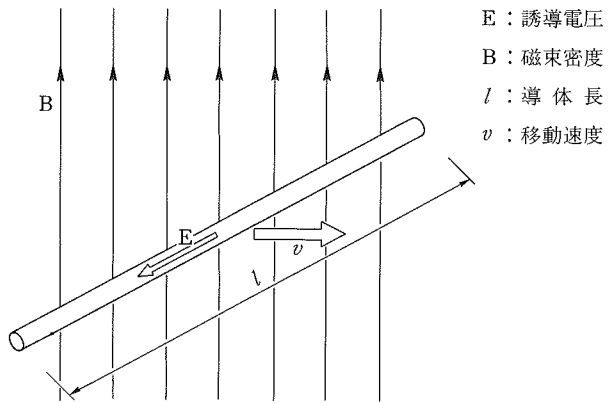


図-4 単線モデルにおける電磁誘導

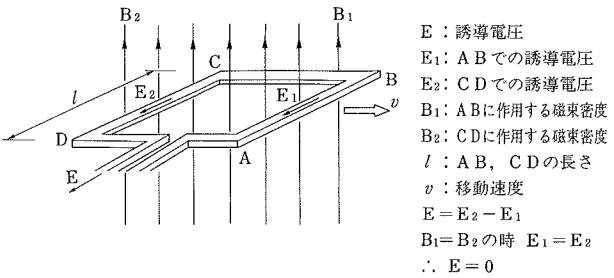


図-5 単ループモデルにおける電磁誘導

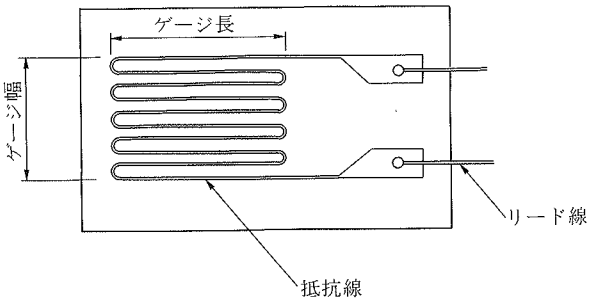


図-6 一般のひずみゲージの形状

ことになる。従って、折返し部分を考慮する必要がなくなり、解析には式(3)の単ループモデルを適用することができる。見かけひずみについては、2.3節で示した式(1)により求めることができる。

次節以降では、式(3)の右辺の他の変数の算出方法について述べる。なお、解析における座標系は、図-8に示す通りである。

4.2 磁束密度

変動磁場発生装置において、磁石を設置した円盤周囲の静磁場を求めれば、ひずみゲージに作用する磁束密度を得ることができる。円盤周囲の静磁場を求める方法として、実測と静磁場解析がある。静磁場解析から磁束密度を求める場合、精度確認のための実測を必要とするが、その測定点数は、実測だけで磁束密度を求める場合よりも少なく済み、任意の点の磁束密度を求めることもできる。静磁場解析は、下式に示す一般解⁴⁾を利用すれば、簡単に求めることができる。

$$B(X,Y) = 2 \times I \times (\tan^{-1}A - \tan^{-1}B - \tan^{-1}C + \tan^{-1}D) \dots\dots\dots(4)$$

但し、

$$A = (X-a) / (Y-b)$$

$$B = (X-a) / (Y+b)$$

$$C = (X+a) / (Y-b)$$

$$D = (X+a) / (Y+b)$$

$B(X, Y)$: 磁石中心を原点とする座標系の任意の座標 (X, Y) の磁束密度 (Gauss)

a, b : 磁石断面の辺の長さの1/2 (cm)

I : $M_x \times (1/4\pi)$

M_x : X 軸方向の磁化 (Gauss)

図-9に、変動磁場発生装置の静磁場の解析、および実測の結果を示す。図-9から明らかなように、解析値と実測値は、ほぼ一致した。以上のことから、誘導電圧の解析に用いる磁束密度は、静磁場解析により得られる値を使用しても差し支えないことがわかった。

4.3 導体の長さ

4.1節でひずみゲージを単ループとみなすこととしたが、ひずみゲージのどの部分までを単ループとするかによって、解析式に代入する導体長が変わってくる。ひずみゲージには、出力用のリード線があるため、図-10に示すように、リード線のよりが始まる部分までを単ループと考えるのが妥当である。そこで、導体長は、リード線のよりが始まる部分までとした。

4.4 移動速度

磁石は回転運動するため、ひずみゲージから見た磁石の移動速度は接線方向の速度となる。従って、等速円運動の公式から、磁石の移動速度は、下式で求めることができる。但し、本文中における移動速度は、便宜上、回転数で表現する。

$$v = (1/30) \times \pi \times r' \times N \dots\dots\dots(5)$$

但し、

v : 移動速度 (cm/sec)

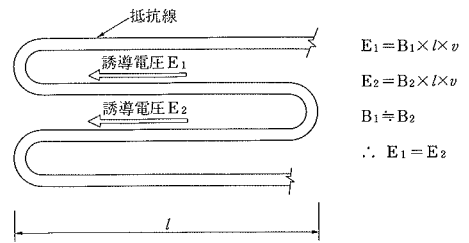


図-7 折返し部分での誘導電圧の打ち消し

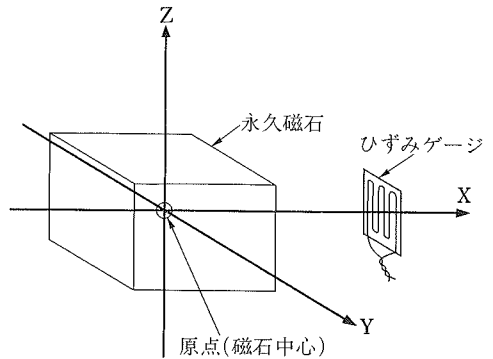


図-8 解析における座標系

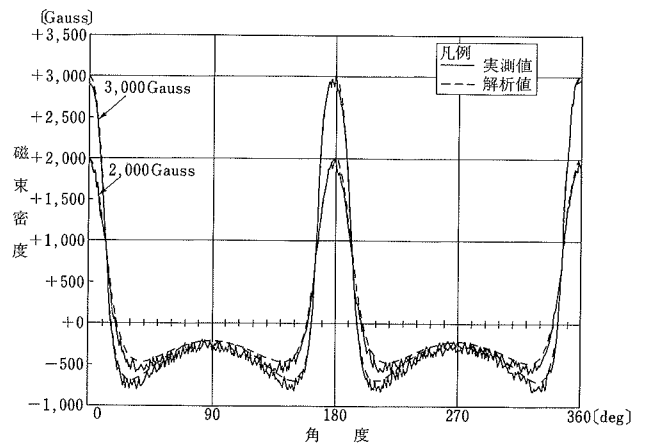


図-9 静磁場解析結果

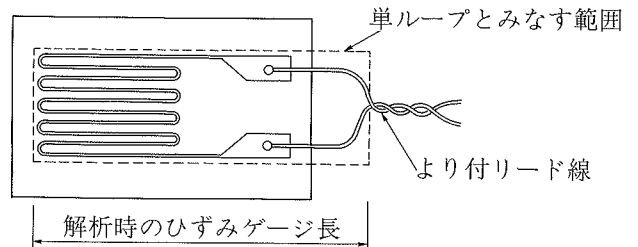


図-10 単ループとみなす範囲

r' : 回転盤中心から、ひずみゲージまでの距離 (cm)

N : 回転数 (rpm)

4.5 解析条件

誘導電圧の解析で、設定した解析条件は下記の通り。

- ① ひずみゲージに誘導電圧を発生させる磁場の成分は、磁石の磁極 N, S の方向に平行なもののみ
- ② 磁石から発生する磁場は、Z 軸方向に一樣

表一4 結果一覧

ゲージ番号	磁束密度 (Gauss)	回転数 (rpm)	ゲージの配置方向	誘導電圧		みかけひずみ	
				解析値 (mV)	実測値 (mV)	解析値 (μ)	実測値 (μ)
No.1	3,000	1,000	x	1.61	1.66	1,533	1,581
			y	1.67	1.70	1,590	1,619
		500	x	0.80	0.80	762	762
	2,000	1,000	x	0.83	0.78	790	743
			y	0.72	0.87	686	829
		500	x	0.73	0.70	695	667
			y	0.36	0.40	343	381
			y	0.37	0.36	352	343
No.2	3,000	1,000	x	1.94	1.81	1,848	1,724
			y	2.21	2.16	2,105	2,057
		500	x	0.97	0.85	924	810
	2,000	1,000	x	1.11	1.03	1057	981
			y	0.94	0.90	895	857
		500	x	0.97	0.94	924	895
			y	0.47	0.44	448	419
			y	0.49	0.44	467	419
No.3	3,000	1,000	x	0.35	0.37	350	370
			y	0.35	0.38	350	380
		500	x	0.17	0.17	170	170
	2,000	1,000	x	0.17	0.15	170	150
			y	0.15	0.17	150	170
		500	x	0.15	0.22	150	220
			y	0.08	0.06	80	60
			y	0.08	0.09	80	90
No.4	3,000	1,000	x	2.37	2.02	2,257	1,924
			y	2.46	3.01	2,343	2,867
		500	x	1.19	1.09	1,133	1,038
	2,000	1,000	x	1.23	1.39	1,171	1,324
			y	1.07	1.17	1,019	1,114
		500	x	1.08	1.20	1,029	1,143
			y	0.53	0.50	505	476
			y	0.54	0.54	514	514
No.5	3,000	1,000	x	5.13	10.90	103	214
			y	7.87	8.64	157	164
		500	x	2.57	5.14	51	99
	2,000	1,000	x	3.94	4.18	79	83
			y	2.93	4.84	59	96
		500	x	3.45	4.22	69	84
			y	1.47	2.36	29	47
			y	1.73	2.05	35	40

③ 渦電流の発生は考慮しない

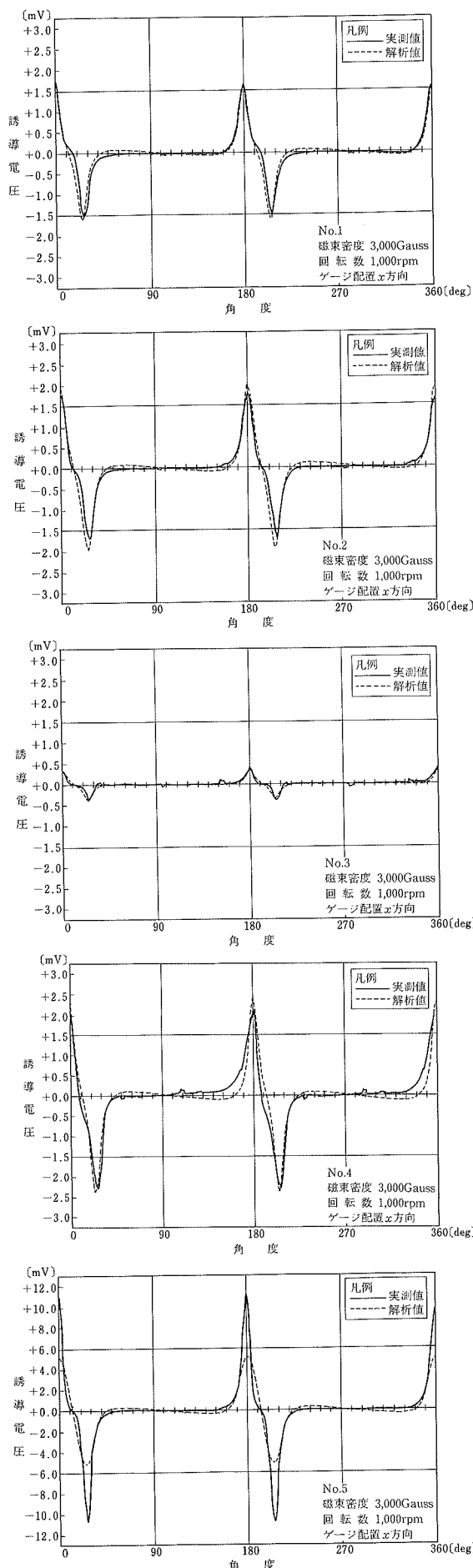
誘導電圧の発生に關与する磁場の成分を、①のよう
に限定するのは、フレミングの右手の法則から判断で
ることによる。②については、3.1節で述べたように、磁
石断面に対し、ひずみゲージが十分小さいことによる。
③の渦電流とは、導体の微小部分に生じる誘導電流の一
種で、変動磁場の周波数が高くなるほど多く発生する。
今回の変動磁場の周波数は20 Hzと低く、ほとんど発生
しないものと見なせるため、考慮しないこととした。解
析のパラメータは、3.3節、表一3の通りとした。

5. 結果

表一4に誘導電圧、見かけひずみの実測、および、解
析結果一覧を示す。変動磁場の影響の判断には、ピーク
が判明すれば良いため、表一4には、ピークの絶対値を
示した。また、図一11には、x方向に配置した各ひずみゲ
ージにおいて最大の磁場変化を与えた場合の、誘導電圧
の波形の出力例を示す。

ひずみゲージに発生する見かけひずみは、ひずみゲ
ージの種類によって大きく異なり、磁場変化が最大となる
磁束密度が3,000Gauss、回転数が1,000 rpmの時、No.
4で約2,800 μ 程度、最小はNo.3で約200 μ 発生した。
超伝導浮上式リニアモーターカーでは、これ以上の変動
磁場エネルギーが発生するため、試験に用いたひずみゲ
ージを通常の方法で使用すると、正確なひずみは計測で
きないと判断される。

表一4で実測値と解析値を比較すると、No.5でひず
みゲージをx方向に配置した場合を除けば、両値がほぼ



図一11 誘導電圧波形の出力例

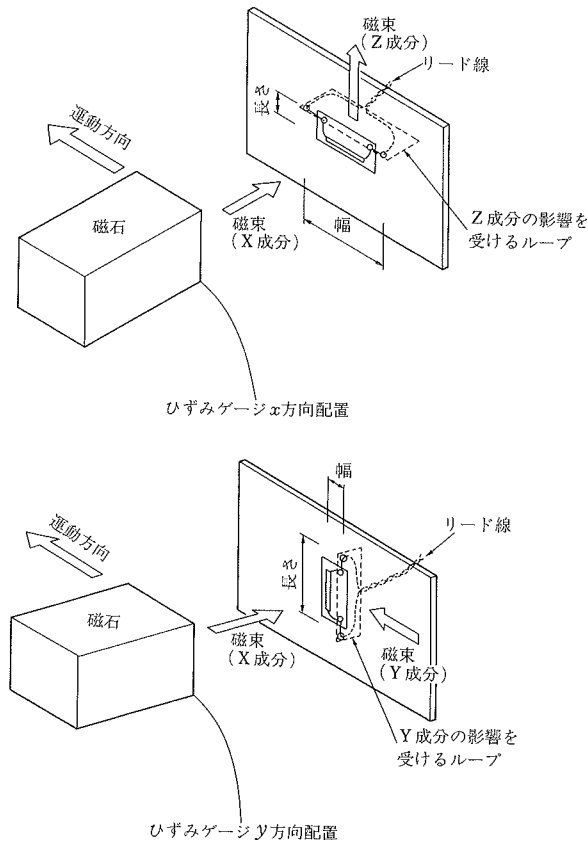


図-12 No. 5 における電磁誘導

一致していることがわかる。また、実測値と解析値が一致している場合、図-11に示したように、波形もほぼ同一になった。

6. 考察

6.1 解析の妥当性

5.章で示した結果から、No. 5でひずみゲージをx方向に配置した場合を除き、解析値と実測値がほぼ一致し、解析方法の妥当性が証明された。

No. 5でx方向に配置した場合に、解析値と実測値の一致が見られなかった原因として、形状の特殊性が考えられる。No. 5をx方向に配置した場合、図-12に示すように、Z軸方向の磁場の成分の影響を受けるループが形成され、このループに誘導電圧を発生させる運動の成分があるため、誘導電圧が発生する。一方、No. 5をy方向に配置した場合には、Y軸方向の磁場成分の影響を受けるループは形成されるが、このループに誘導電圧を発生させるための運動の成分が無いため、誘導電圧は発生しない。解析では、X軸方向の磁場を受けるループだけを対象としているため、他のループに生ずる誘導電圧を求めていない。従って、No. 5をx方向に配置した場合、考慮外の誘導電圧により、解析値よりも実測値の方で、見かけひずみが大きくなったものと考えられる。

6.2 見かけひずみ対策

2.3節で示した式(1)から、見かけひずみを低減させる方

法として以下の手法が有効であることがわかる。

- ① 誘導電圧を低減させる
- ② ブリッジ電圧を高くする
- ③ ゲージ率を大きくする

これまでに得られた結果から、上記の手法が実現できるか否かについて検討した結果を以下に述べる。

まず、①については、4.1節の式(3)より、導体長を極力短くすることが有効である。また、今回の結果から、No. 3のようにひずみゲージを2枚貼り合わせて無誘導型とすることも、誘導電圧の低減に有効であると判断される。②については、見かけひずみ計算式において分母にあたるブリッジ電圧を高くするほど、誘導電圧の影響は少なくなる。しかし、電圧を高くすることの弊害として、ひずみゲージの発熱量の増加や焼損が発生する。通常使用するひずみ測定器のブリッジ電圧は2 Volt程度、最大でも10 Voltで、これが限界とされている。よって、ブリッジ電圧が10 Voltのひずみ測定器を使用すれば、見かけひずみは約1/5になる。③は、②と同様、計算式において分母にあたるため、ゲージ率が大きいほど見かけひずみは小さくなる。しかし、金属系のひずみゲージでは、現状の2.0前後よりゲージ率を大きくすることができない。一方、No. 5のような半導体ひずみゲージは、ゲージ率が100程度あるため、見かけひずみの低減に有効であり、結果も最小値を示したが、反面、衝撃や温度変化に弱いいため、一般の計測では使用されていない。

以上述べたことから、現状の技術で、見かけひずみを低減させる方法は、①において、ゲージ長を極力短くするなどのひずみゲージの形状工夫を行なうことが、誘導電圧を低減させる方法の第一と考えられ、次いで、ブリッジ電圧の高圧化が有効と考えられる。

7. まとめ

今回の実験、および、解析から、以下のことがわかった。

- ① ひずみゲージに発生する見かけひずみは、制約があるものの、今回の解析方法で実測値とほぼ同じ値を予測することができる。
- ② しかし、半導体ひずみゲージに発生する見かけひずみは、今回の解析方法で求めることができない。
- ③ 検証した解析式から、見かけひずみを低減させる現実的な方法は、ひずみゲージの形状工夫とブリッジ電圧の高圧化が有望と考えられる。

参考文献

- 1) 小林幸雄：無誘導ひずみゲージについて、共和技法, No. 206, 3p., (1975. 4)
- 2) (社)日本非破壊検査協会, ひずみ測定 I, p. 32~37, (1988. 11)
- 3) 中山正敏：電磁誘導, 物理学 One Point-26, 共立出版, 109p. (1984. 12)
- 4) 加川幸雄：電気・電子のための有限要素法の実際, オーム社, 159p., (1985. 5)