

回轉機研究会資料

資料番号	RM-73-17
------	----------

多相誘導電動機の磁気騒音に関する一考察

(第1報—分布力の波形と空間分布についての考察)

齊 藤 兆 古

(法政大学)

1973年12月20日

社団
法人 電 気 学 会

東京都千代田区有楽町1の11

多相誘導電動機の磁気騒音に関する一考察
第1報 分布力の波形と空間分布についての考察

齊藤 兆古

(法政大学 工学部)

1. まえがき

従来から多相(かご形)誘導電動機においては起磁力分布とスロットパーミアンスの空間的変動によって生ずる空間高調波の存在により各種の異状現象が発生することが知られている。これらの異状現象は非同期ローリングや同期ローリングなどの異状トルク現象と騒音や振動の問題に大別することができる。このなかで異状トルク現象については過去に多くの研究が行なわれてその大部分が解決されている。^{(1)~(7)} また、騒音や振動の問題についても非常に多くの研究が行なわれ、空間高調波で最もその大きさが大なる溝高調波による騒音については定量的な取り扱ひも試みられている。^{(7)~(10)}

しかし、実際は一次と二次の溝高調波(の磁界)の干渉による騒音の周波数とは異なる周波数の騒音や脈動(うなり)をともなう騒音が発生するために機械的(幾何学的)な非対称や磁気飽和まで考慮した解析がなされている。⁽¹¹⁾⁽¹²⁾

本論文はこれらの従来の磁気騒音に関する研究結果のなかで、従来の理論で明確に示されていない起磁力分布とスロットパーミアンスの空間的変動による空間高調波が磁気騒音に与える(磁気騒音の源となる分布力に与える)影響の差異および分布力の波形とその空間分布について、デジタル計算機によるシミュレーションと実験によって考察を行なう。

2. 従来の磁気騒音に関する研究の概要

<2.1> 一次と二次の溝数組み合わせ 最も古くから磁気騒音に関係する要素として知られているもので、騒音源となる分布力は一次と二次それぞれの溝高調波(の磁界)の干渉によって発生し、その周波数は二次の溝数に直接関係し、その次数は一次と二次の溝数に関係する。すなわち、一次溝数を n_1 、二次溝数を n_2 、電源周波数を f [Hz]、極対数を p (さるにすべり)を s とすれば、分布力の次数と周波数はオイ表に示すものとなる。⁽⁹⁾

但し、オイ表はオイ次の溝高調波によるものである。

オイ表 溝高調波による分布力

分布力の次数	分布力の周波数
$ n_1 - n_2 $	$n_2(1-s)f/p$
$ n_2 - n_1 + 2p $	$\{2 + n_2(1-s)/p\}f$
$ n_1 - n_2 + 2p $	$\{2 - n_2(1-s)/p\}f$

表1に示されている分布力以外に一次と二次の溝高調波以外の空間高調波による分布力が存在するが、実用上は表1に示されているものだけを考えれば充分であると考えられている。したがって、この騒音源に対する対策は分布力の次数を高次なものとし、さらに固定子枠や回転子の機械的共振を避けることとされている。これらの代表的な計算例は Jordan 氏, Eerdelyi 氏 さらに石崎氏らによって報告されている。(8)~(10)

〈2.2〉 機械的非対称による騒音 固定子枠の内側や回転子が完全な円形でなく機械的に非対称である場合の騒音源である。このなかで、固定子の内側が機械的に非対称である場合の分布力は新しい分布力の次数を持つが、新しい分布力の周波数は発生しない、しかし、回転子が機械的に非対称である場合の分布力は新しい分布力の次数と周波数を持つことが Muster 氏, Wolfert 氏 さらに Magyar 氏らによって指摘されている。(11)(12)

これらの機械的な非対称による騒音を防止するためには電動機の機械的な精度を向上させることである。しかし、技術的に対処することのできない機械的な非対称に対しては固定子枠や回転子の機械的共振を避けることで対処しなければならない。特に, Muster 氏らの例にあるように回転子の機械的な共振には注意すべきである。(11)

〈2.3〉 2倍のすべり周波数で脈動する騒音と実験的に知られている騒音 斎藤氏や前田氏は二次の溝数に関係なく一次の溝数にのみ関係する周波数の騒音が存在することを実験的に証明している。(13) また, 90相誘導電動機の磁気騒音は2倍のすべり周波数で脈動することが知られているが, Magyar 氏は二次の発生する空間高調波の磁界で極数が $2p$ 極(一次の極数)だけ異なるものがそれぞれ一次の基本波の磁界と作用して生ずるそれぞれの分布力の周波数は2倍のすべり周波数だけ異なることを指摘し, 2倍のすべり周波数で脈動する騒音源についての説明を試みている。(12) また, Summers 氏は二次回路を流れる空間高調波による電流の次数が一次の極対数 p だけ異なるものが干渉して2倍のすべり周波数で脈動する電流を生じ, この電流による磁界が一次の磁界と作用して2倍のすべり周波数で脈動するトルクが発生することを指摘している。(14) このことから, 2倍のすべり周波数で脈動するトルクは2倍のすべり周波数の振動を生じ, 2倍のすべり周波数で脈動する騒音の一原因と考えられる。

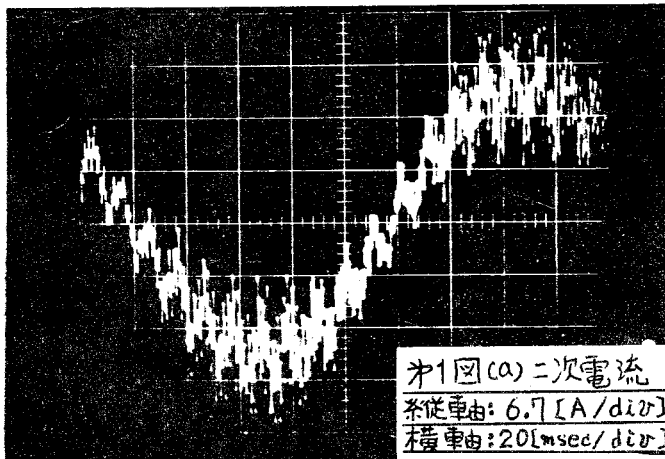
3. 本論

〈3.1〉 シミュレーションモデルの設定 本論文では磁気騒音の源となる分布力のデジタルシミュレーションを行なって考察を行なう。実際の電動機をそのままシミュレーションすることは不可能であるために本論文では次に述べる条件でシミュレーションのモデルを設定する。1) 磁気回路の飽和は無視する。2) スロットパーミアンスの空間的変動は一次

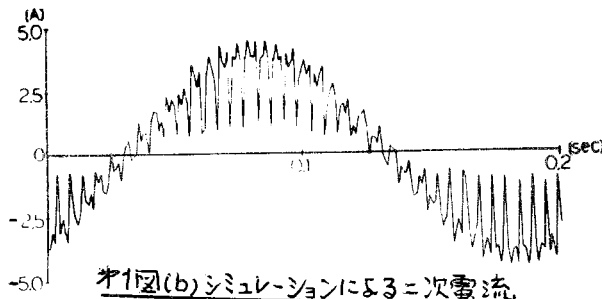
と二次間のギャップの変動として導入する。 3) 空間的に不連続な変化を起す起磁力分布やギャップの変動をそれぞれ1個の関数として取り扱う。

4) 非正弦波に対するインピーダンスは非正弦波をフーリエ級数に展開したときの基本波に対する値で近似する。(6)(7) 5) 一次側に流れる高調波電流は無視する。 6) 一次と二次間のギャップの空間的変動による二次の自己インダクタンスの空間的変動(ギャップが一次と二次の相対的な位置によって変動すれば磁束の分布も一次と二次の相対的な位置によって異なるために二次の自己インダクタンスは一次と二次間の角度の関数となる。)は無視する。

く3.2> シミュレーションの妥当性の吟味 計算結果の吟味は分布力の源となる一次と二次それぞれの磁界を間接的に測定してその波形と計算によるそれぞれの波形と比較することで行なう。 一次の磁界を切って誘起する二次の電圧による二次電流の波形は巻線形誘導電動機では容易に測定される。 二次が巻線形の場合はかご形の場合と比較して、空間高調波が小さいことや空間高調波に対する二次のインピーダンスが大きいため、二次回路に流れる高調波電流はかご形と比較して小さくなるが定性的に波形そのものは同じである。 オイ図に 三相、出力2[kW]、4極、一次溝数36個の巻線形誘導電動機をすべり $\beta = 0.1$ で運転した場合の二次電流波形とオ2表に示す各定数で計算した二次電流波形を示す。



オ1図(a)二次電流
縦軸由: 6.7 [A/div]
横軸由: 20 [msec/div]



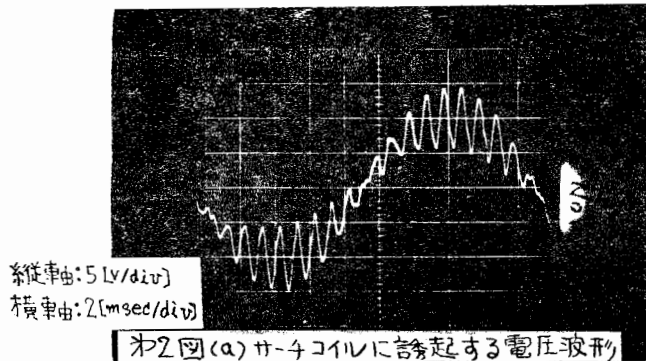
オ1図(b)シミュレーションによる二次電流

オ2表 シミュレーション
モデルの各定数

相数	: 三相
極数	: 4極
周波数	: 50 [Hz]
すべり	: 0.1
一次電流	: 1 [A]
一次スロット数	: 36 [個]
二次スロット数	: 44 [個]
一次半閉スロット	
二次全閉スロット	
一次スロットの深さ	: 0.8 [mm]
一次スロット開口の幅	: 2.3 [mm]
一次スロットピッチ	: 0.17 [rad]
1スロット1相の巻数	: 50 [回巻]
ギャップ長	: 0.3 [mm]
電機子半径	: 49 [mm]
電機子長	: 80 [mm]
二次抵抗	: 8.34 [mΩ]
二次リアクタンス	: 0.28 [Ω]

オ1図(a)と(b)の波形は比較的よく一致しているが、これはオ1図(a)の電流波形は二次が巻線形であるために高調波成分ががご形の場合に比較して小さいこととオ1図(b)のシミュレーションによる電流波形は二次回路を基本波に対するインピーダンスで近似しているために高調波成分が小さく算定されているためである。よって、二次電流の波形は実際のがご形誘導電動機と一致するがその高調波成分は実際より小さいと考えられる。

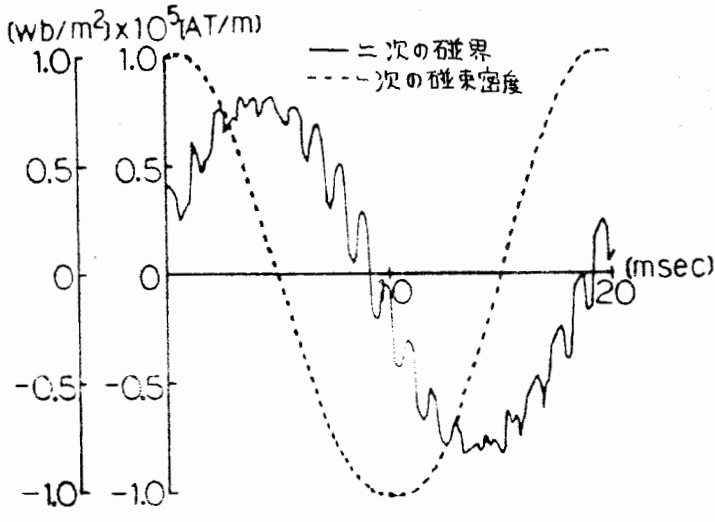
二次の磁界を直接に測定することは不可能であるが、固定子にサーチコイルを取り付けてサーチコイルに誘起する電圧波形を考えるとすれば、サーチコイルに誘起する電圧波形のひずみ波成分は二次の磁界によるものであるから定性的にはサーチコイルに誘起するひずみ波成分の電圧波形は二次の磁界の形状と同一であると考えられる。オ3表に示す定数の供試電動機の固定子の1磁極ピッチに5回サーチコイルを巻き、すべり $s = 0.1$ で運転した場合のサーチコイルに誘起する電圧波形をオ2図(a)に示し、オ2図(b)にオ1表の定数でシミュレーションを行なった場合の二次の磁界と一次の磁束密度の波形を示す。



オ2図(a)サーチコイルに誘起する電圧波形

オ3表 供試電動機の名定数

相数	: 三相
極数	: 4極
出力	: 1.5 [kW]
周波数	: 50 [Hz]
一次溝数	: 36 [個]
二次溝数	: 44 [個]
一次は	半開スロット
二次は	全開スロット



オ2図(b) 二次の磁界と一次の磁束密度

オ2図(a)とオ2図(b)の二次の磁界(実線部分)のひずみ波成分の波形で、周期は一致するが位相が一致してない、これはオ2図(a)の波形にはオ2図(b)に示されている一次の磁束密度(破線部分)による電圧が含まれているためである。

オ1図とオ2図の結果から、空間高調波の大きさそのものは問題があるが(特に二次回路を流れる高調波電流の大きさは問題であるが、他の起磁力分布やギャップの変動による空間高調波は磁束が電動機の半径方向のみに分布するとすれば、理論的にはすべての空間高調波を考慮したこととなる。)、シミュレーション結果から定性的な結論を得るためには十分なシミュレーションモデルといえる。また、従来から計算されているものに比較すれば、二次回路を流れる高調波電流の大きさは小さく算定されるが、すべての空間高調波を同時に考慮した点では精確である。

〈3.3〉 分布力の波形についての考察 オ2表に示してある各定数(一次半開スロット、二次全開スロット)の場合とオ1表に示してある定数で、一次も二次も半開スロット(二次スロットの深さは0.3[mm]、二次スロット開口の幅は0.5[mm])とした場合、さらに一次も二次も全開スロットとした場合、それぞれのシミュレーションによる分布力(一次の磁場の強さと二次の磁場の強さの間で生ずる分布力)の波形をオ3図(a)、(b)さらに(c)に示す。オ3図から次のことがわかる。

〔1〕 分布力の基本波は、 f を電源周波数(この場合は50 Hz)とすれば、 $2f$ [Hz]の周波数からなっている。

〔2〕 分布力のひずみ波成分は、 g を正の整数(たとえば、 $g=1$ または2のとき、それぞれ分布力のひずみ波成分をフーリエ級数に展開したときの基本波およびオ2次高調波を示すこととする。)とすれば、その振幅が $2f$ [Hz]で脈動する $gn_2(1-s)f/p$ [Hz]なる周波数である。

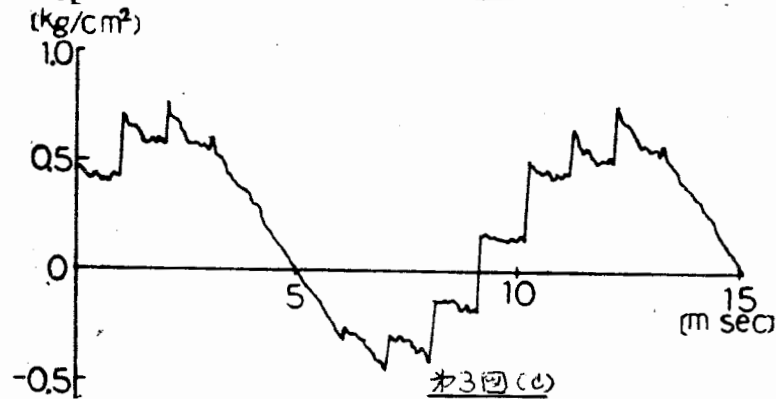
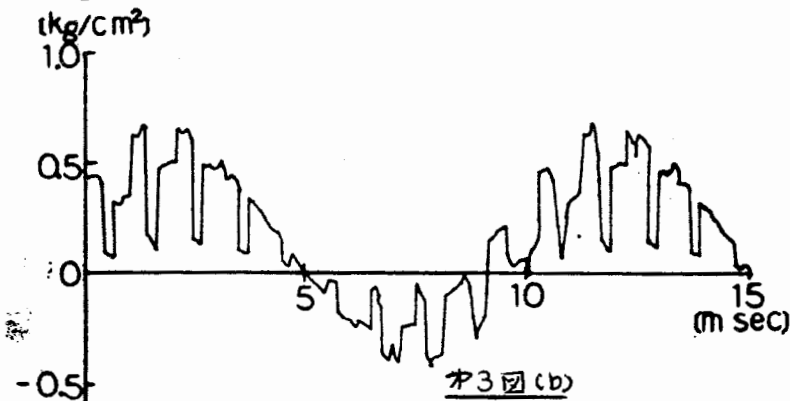
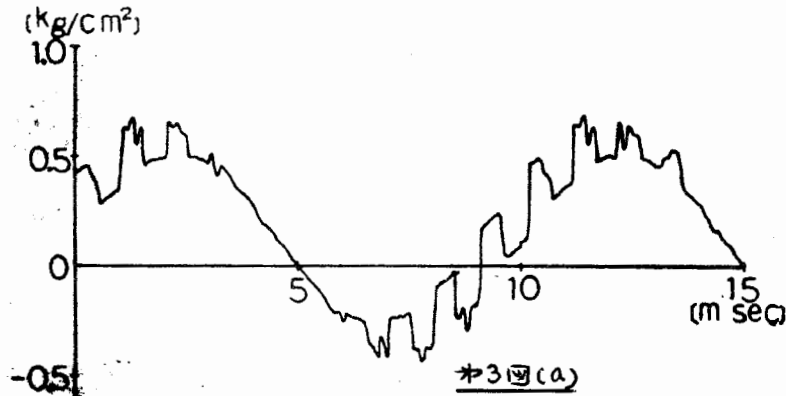
したがって、 F_g をひずみ波成分の振幅、 F_0 はひずみ波成分を振幅変調している $2f$ [Hz]の振幅とすれば、オ3図の分布力の波形でひずみ波成分は、

$$\begin{aligned}
 F &= \sum_g \left\{ F_g + F_0 \cos 2\omega t \right\} \cos \left\{ \frac{g}{p} n_2 (1-s) \omega t \right\} \\
 &= \sum_g \left[F_g \cos \left\{ \frac{g}{p} n_2 (1-s) \omega t \right\} + \frac{F_0}{2} \left\{ \cos \left(2 - \frac{g}{p} n_2 (1-s) \right) \omega t \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. + \cos \left(2 + \frac{g}{p} n_2 (1-s) \right) \omega t \right\} \right] \dots (1)
 \end{aligned}$$

と表現できる。これが従来のフーリエ級数法による理論で得られる分布力の周波数である。

〔3〕 オ3図(a)は一次が半開スロット、二次が全開スロットである

が、オ3図(c)の一次も二次も全開スロットの場合と比較して、起磁力分布によるひずみ波に重なった形で一次のギャップ(スロットパーミアンス)の変動によるひずみ波(空間高調波)の影響が現われている。さらにオ3図(b)(一次も二次も半開スロット)では、起磁力分布と一次のギャップの変動によるひずみ波に二次のギャップの変動によるひずみ波が重なった形となっている。すなわち、起磁力分布とスロットパーミアンス(ギャップの変動)の空間的変動に起因する空間高調波は定性的には全く同じである。

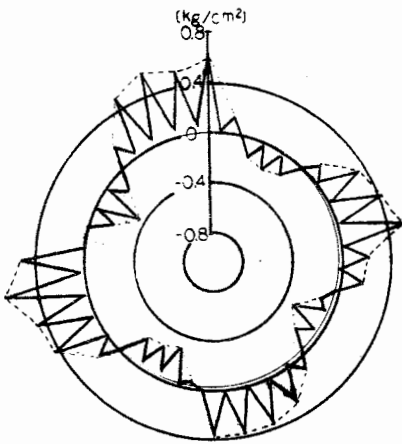


オ3図 分布力の波形

〈3.4〉 分布力の空間分布に関する考察 オ2表の各定数で二次スロット数を 29, 33, 26, 30, 28, 44とした場合の分布力の空間分布をオ4図(a)~(f)に示す。但し、計算開始から 0.1 [msec]におけるものである。従来の一次と二次の溝数組み合わせによる理論、すなわち、オ1表に示されている計算式による分布力の次数とオ4図からわかる分布力の次数を各種の二次スロット数についてオ4表に示す。

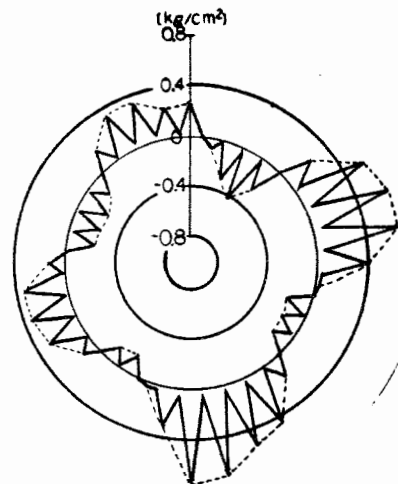
オ4表 分布力の次数

n_2	オ1表	オ4図	n_2	オ1表	オ4図	n_2	オ1表	オ4図
29	7, 3, 11	1	26	10, 6, 14	2	28	8, 4, 12	4
33	3, 1, 7	1	30	6, 2, 10	2	44	8, 12, 4	4



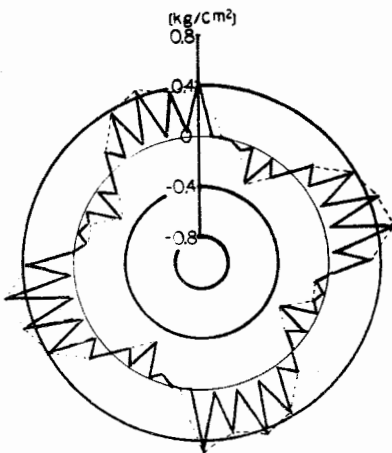
(a)

2p=4, 36/29



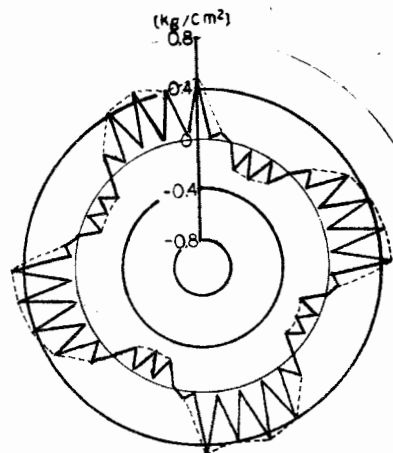
(b)

2p=4, 36/33



(c)

2p=4, 36/26



(d)

2p=4, 36/30

オ4図(a)~(d) 分布力の空間分布

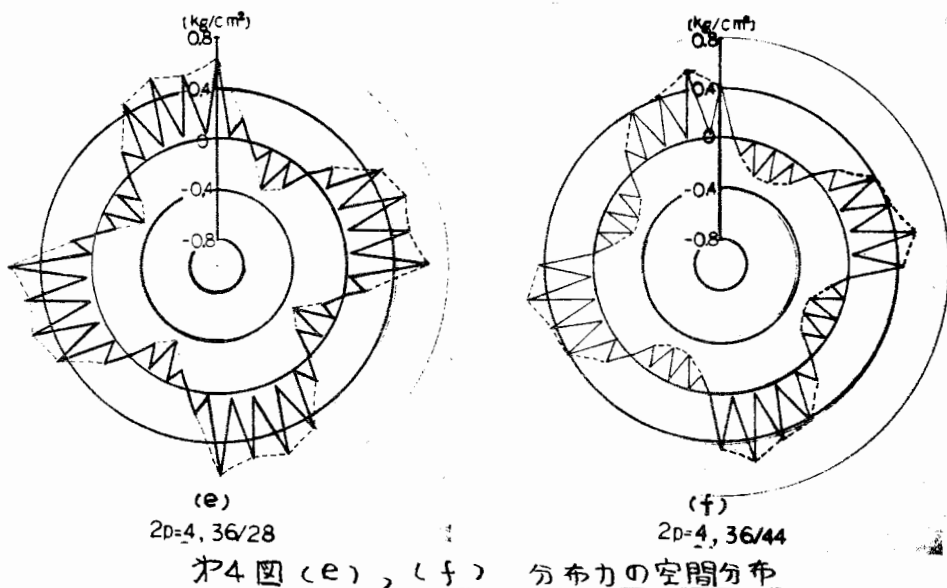


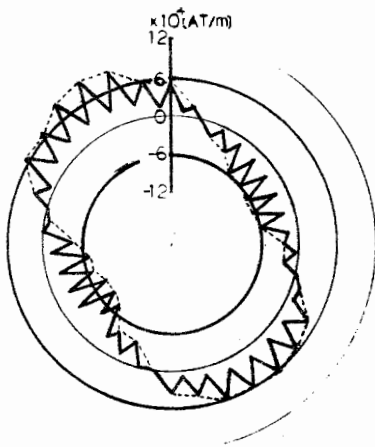
表4から、分布力の次数で従来の一次と二次の溝高調波だけによる理論と一致するものは、二次の溝数が33, 30, 28さらに44の場合であり、一致しないものは、二次の溝数が29と26の場合である。これは分布力の次数が、二次の溝数29と26のとき、一次と二次の溝高調波以外のものも含まれているためであり、従来のフーリエ級数法による理論によれば、分布力に寄与する二次の高調波にオ5次、オ7次の一次側高調波によって誘起されるものが存在するためである。たとえば、二次溝数が29のとき、一次の溝高調波オ19次と一次のオ5次高調波によって誘起する二次の高調波の間で生ずる分布力の次数はオ1次であり、二次の溝数が26のとき、一次の溝高調波オ19次と一次のオ7次高調波によって誘起する二次の高調波の間で生ずる分布力の次数はオ2次である。(2)(10)

表5図(a)~(d)に計算開始から0.1 [msec]における二次の磁界の分布を二次溝数が、29, 33, 26さらに30の場合について示す。表5図から、分布力の次数は一次と二次の溝高調波の干渉によって生ずるものと考えよりも二次の磁界分布が二次の溝数によって異なるためであると考える方が妥当である。すなわち、分布力の次数は二次の磁界分布によって一方的に決定されるものであり、シミュレーションの結果と従来の理論の結果から、二次の溝数は極数で割り切れるものが騒音対策として有効である。(2)

4. 結言

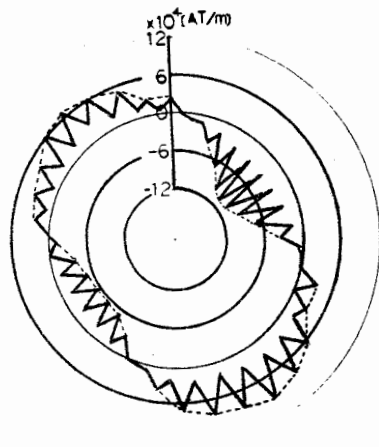
本論文では次のことをシミュレーションによって明らかにした。

(1) 分布力の波形は $2f$ [Hz] に変調された $g n_2(1-s)f/p$ [Hz]



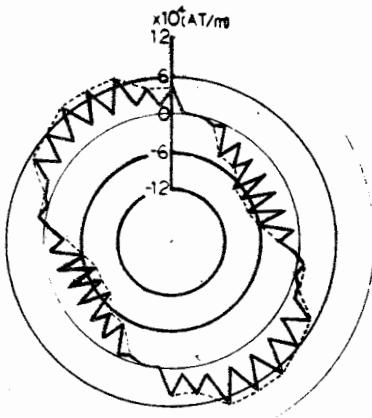
(a)

$2p=4, 36/29$



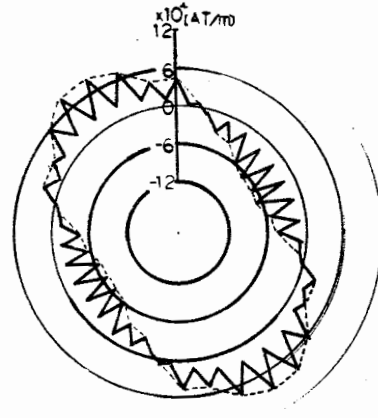
(b)

$2p=4, 36/33$



(c)

$2p=4, 36/26$



(d)

$2p=4, 36/30$

お5図 二次の磁界分布

なる周波数からなり、その結果として三種類の2f [H₂]ずつ異なった周波数の騒音を発生する。

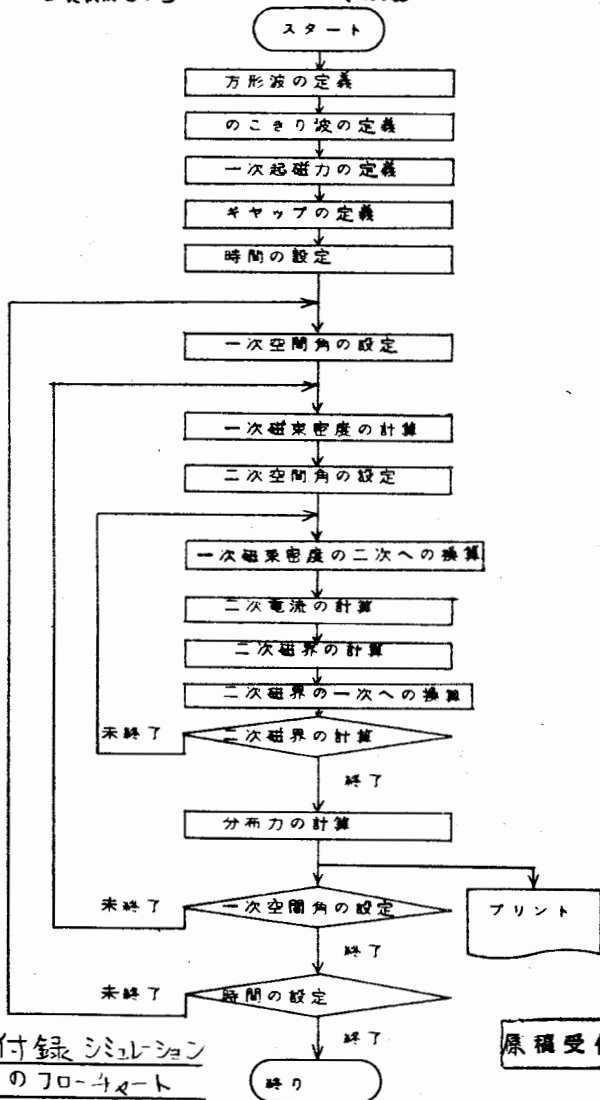
(2) 分布力の次数は二次の磁界によって一方的に決定される

本研究について検討して頂いた本学講師藤田伊ハ即博士および本学教授山村龍男博士に厚くお礼を申し上げます。

文献

- (1) 大川：芝浦レヴュー オ13巻 237ノ-ジ 1934年
- (2) 藤田：東芝レヴュー オ9巻 857ノ-ジ 1954年
- (3) Alger: The Nature of Induction Machines 325ノ-ジ 1965年

- (4) 石崎: 電気工学論文集 才4巻3号 127ノ-ジ 1952年
- (5) 石崎: 電学誌 才74巻789号 705ノ-ジ 1954年
- (6) 斎藤: 回転機研究会資料 RM-73-2
- (7) 斎藤: 回転機研究会資料 RM-73-3
- (8) Jordan: Geräuscharme Electromotoren 12ノ-ジ 1950年
- (9) Erdelyi: AIEE Trans 12月号 1269ノ-ジ 1955年
- (10) 石崎: 電学誌 才75巻800号 451ノ-ジ 1955年
- (11) Muster, 他: AIEE Trans 2月号 1365ノ-ジ 1956年
- (12) Magyar : AIEE Trans 4月号 81ノ-ジ 1959年
- (13) 斎藤, 他 : National Technical Report 才17巻4号 341ノ-ジ
1971年
- (14) Summers : AIEE Trans 4月号 69ノ-ジ 1955年



原稿受付 昭和48年11月22日