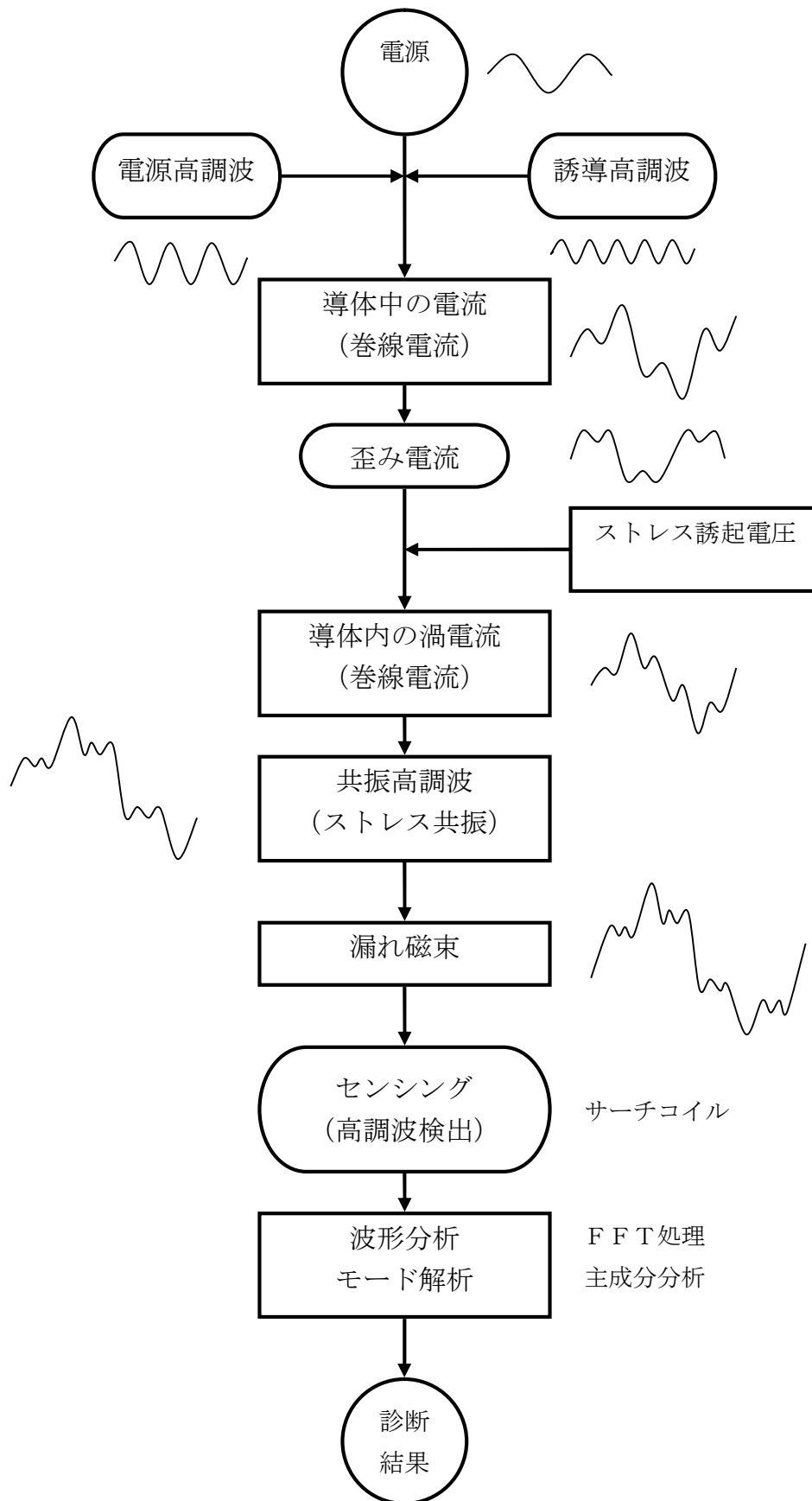


高調波診断のロジック（１）

1. 診断ロジックのフロー

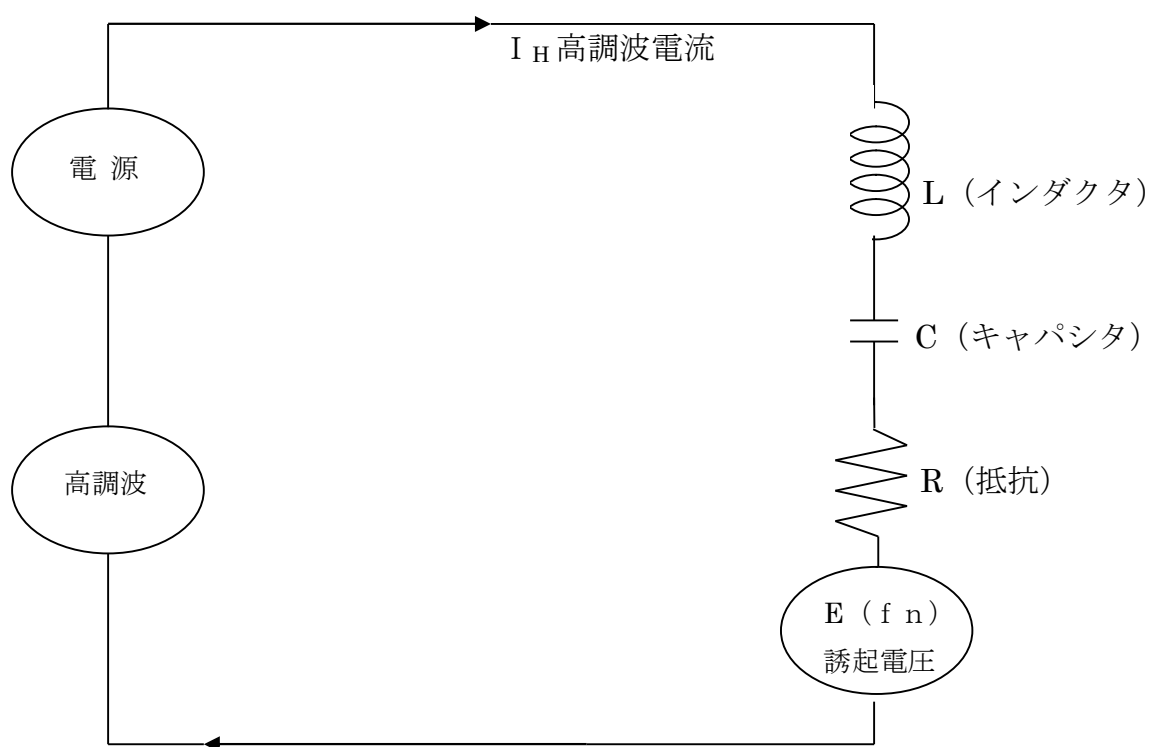


前頁の診断ロジックフローについて、そのロジックを以下に説明する。

一般に診断対象機器の導体（巻線）に流れる電流には、電源高調波や誘導高調波が含まれた歪み波電流が流れている。一方、電気設備機器の各部位、例えばモータ部の軸受や巻線には熱や機械的振動などのストレスが加わり、劣化すると、その程度により磁界中の巻線に微小電圧が誘起される（フレミングの右手の法則）。負荷部の軸受や回転軸に劣化が生じれば、そのストレスによるショックが巻線に伝わりモータ部と同様に巻線に微小電圧が誘起される。一方、インバータは電力調整器の一種であり、この制御回路や電力素子にストレスによる異常・劣化が生じると、モータ巻線に微小振動を誘発させ、起電力が発生する。これらは導体（巻線）に生じている渦電流を歪ませる。このストレスによる歪み渦電流の特定高調波次数と電源からの高調波とが共振（共振高調波）すると大きな高調波電流となり、この高調波電流が線路に流れ、大きな漏れ磁束が生じる。この漏れ磁束は高調波電磁界を発生させるので、これをサーチコイルで検出し、波形分析、モード解析を行って、電気設備機器の異常・劣化の部位や程度を特定する。

2. 診断ロジックのストレス共振解析

（1）解析のためのストレス特性等価回路



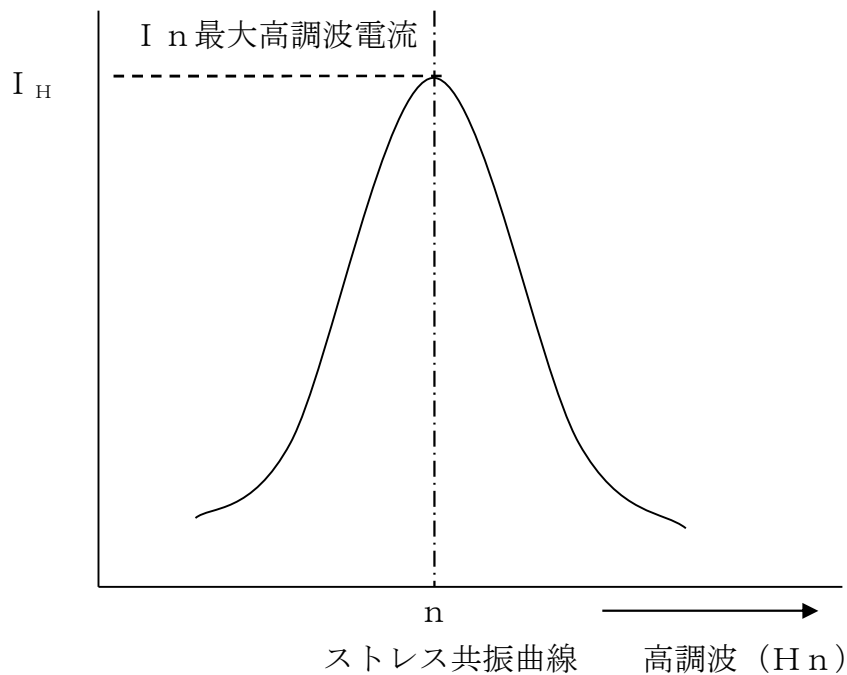
ここで、電気回路における L 、 C 、 R は次の通り対応する。

L = ストレス特性

C = 材料特性

R = 負荷特性

上図における $I_H - H_n$ 特性は次図の通りとなる。



ストレス共振曲線の鋭さ Q (Quality) は次式となる。

$$Q = (1/R) \sqrt{L/C}$$

上式で明らかなようにストレス共振は電気回路理論でいうところの直列共振であり、このとき過大な高調波電流が流れる。

(2) 誘起電圧 $E(f_n)$ の算出

① モータ側

- ・ 回転軸・軸受のストレス電圧： $E(M1)$
- ・ 巻線絶縁のストレス電圧： $E(M2)$
- ・ 軸受・ハウジングのストレス電圧： $E(M3)$
- ・ エアギャップのストレス電圧： $E(M4)$
- ・

$$\begin{bmatrix} E(M1) \\ E(M3) \end{bmatrix} = K_M \begin{bmatrix} a & b & c & d \\ e & f & g & h \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_2 \\ H_3 \\ H_4 \\ H_5 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} E(M2) \\ E(M4) \end{bmatrix} = K_E \begin{bmatrix} i & j & k & l \\ m & n & o & p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_2 \\ H_3 \\ H_4 \\ H_5 \end{bmatrix}$$

但し、 K_M ：機械定数
 K_E ：電気定数

②負荷側（モータ側に換算）

- ・ アンバランスのストレス電圧：E（L 1）
- ・ 軸受損傷のストレス電圧：E（L 2）
- ・ 回転軸のストレス電圧：E（L 3）
- ・ 歯車・ベルトのストレス電圧：E（L 4）

$$\begin{pmatrix} E(L1) \\ E(L2) \\ E(L3) \\ E(L4) \end{pmatrix} = K_L \begin{pmatrix} a' & b' & c' & d' & e' \\ f' & g' & h' & i' & j' \\ k' & l' & m' & n' & o' \\ p' & q' & r' & s' & t' \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H_6 \\ H_7 \\ H_8 \\ H_9 \\ H_{10} \end{pmatrix}$$

但し、 K_L ：負荷定数

③インバータ（モータ側に換算）

- ・ 平滑コンデンサのストレス電圧：E（I 1）
- ・ コントロール基板のストレス電圧：E（I 2）
- ・ 電力素子のストレス電圧：E（I 3）
- ・ ドライブ基板のストレス電圧：E（I 4）

$$\begin{pmatrix} E(I_n) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a'' \cdots \cdots 0 \\ \cdot & A & \cdot \\ \cdot & & \cdot \\ 0 \cdots \cdots p'' \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H_2 \\ \vdots \\ H_n \\ \vdots \\ H_{38} \end{pmatrix}$$

但し、Aは16行16列の行列

H_n は（ $n=2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 13, 17, 19, 23, 25, 38$ ）

以上において H_n は第 n 次高調波含有率（%）で、記号 $a \cdots p$ 、 $a' \cdots t'$ 、 $a'' \cdots p''$ は部位毎の寄与率である。

(3) ストレス特性

電気回路のインダクタに相当するストレスは次の三つである。

① 熱ストレス

このストレスは最も基本的なものであり、劣化進展により発生高調波の主要次数は変化する。即ち、

- ・ 局部過熱・・・・・・・・奇数次高調波（対称波）
↓
- ・ 熱振動・・・・・・・・奇数次高調波
↓
- ・ 熱ひずみ・・・・・・・・偶数次高調波（非対称波）
↓
- ・ 振 動・・・・・・・・偶数次高調波

② 電圧ストレス

- ・ 電磁力・・・・・・・・奇数次高調波
- ・ 放電現象
 - 部分放電・・・・・・・・偶数次高調波
↓
 - グロー放電・・・・・・・・奇数次高調波
↓
 - アーク放電・・・・・・・・奇数次高調波

③ 機械ストレス

- ・ 機械的ショック・・・・・・・・偶数次高調波
↓
- ・ クリープ応力・・・・・・・・偶数次高調波
↓
- ・ 疲労破壊・・・・・・・・偶数次高調波

(3) 材料特性

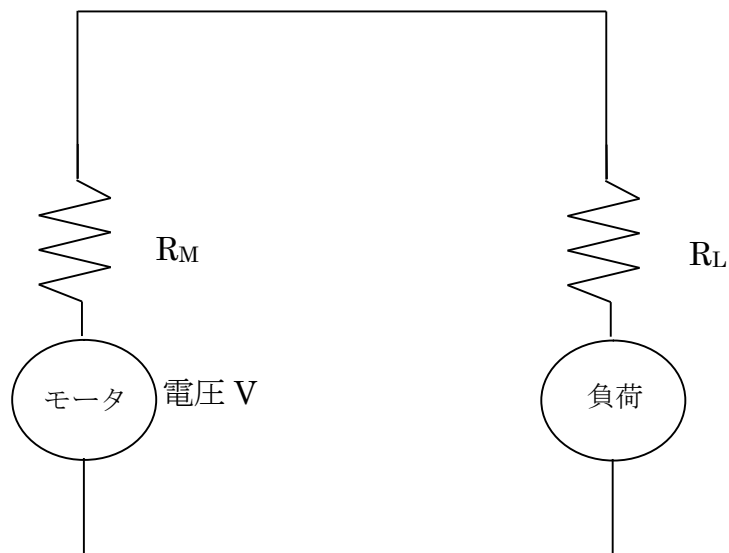
ここでの材料は絶縁体を指し、モータ巻線等の絶縁劣化に関係するもので、静電容量を有しているので電気回路のキャパシタと等価である。

(4) 負荷特性

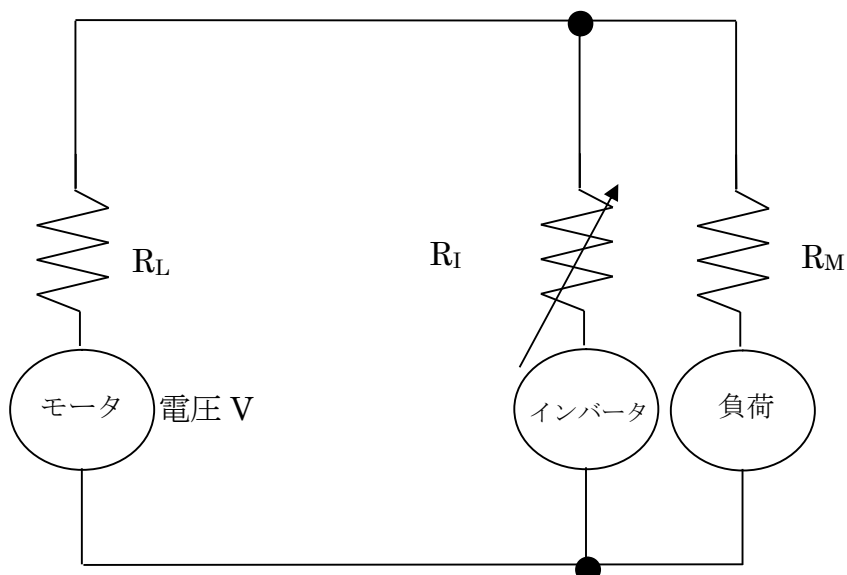
モータの場合、負荷は抵抗で等価的に表現でき、また他の電気機械も純抵抗分以外に負荷を解析する場合は同様に等価抵抗で示すことができる。また、インバータを含む場合も、後述するように負荷で等価的に表す事ができる。

3. 負荷モードと電力バランス

高調波診断において、モード解析は極めて重要な事項である。このモード解析で負荷モードを算出するが、この負荷モードの数値により、モータや負荷系で消費される電力の状態を把握する事が出来る。即ち、負荷モードとは機器に発生しているストレスに起因した損失を評価し、異常・劣化を判定するファクタである。その説明を下図の等価回路で説明する。



インバータ無しの等価回路



インバータ有りの等価回路

先ず、インバータ無しの等価回路において、駆動部モータの全損失に対応する実効抵抗を R_M （モータ実効抵抗）、負荷の機械動力に対応する実効抵抗を R_L とすると、負荷 R_L （負荷実効抵抗）が最大効率で運転する条件は、 P_0 を R_L が消費する電力とすると、この値は

$$P_0 = \{V / (R_M + R_L)\}^2 R_L$$

となる。従って、

$$d P_0 / d R_L = 0$$

とする R_L を求めれば、モータ電圧 V が一定の時に P_0 が最大、即ち効率最大となる条件が求まる。この値を計算すると、

$$R_L = R_M$$

この状態がモータの運転で望ましい状態で、この時のモードが安定モードである。

一方、 $R_M > R_L$ はモータ損失が大きい状態で高位モード、また $R_M < R_L$ は負荷損失が大きい状態で低位モードと呼んでいる。

次に、インバータ有りの等価回路は負荷実効抵抗 R_L と並列にインバータの電力調整に対応する実効抵抗 R_I が入ることになる。即ち、効率最大で運転するためには安定モードが望まれるが、低位モードの場合（負荷損失大）、インバータにより運転周波数を変化させ（このことは実効抵抗 R_I を変化させる事と等価）、換言すると整合（**Matching**）をとることにより、安定モードに変える事が出来る。即ち、この運転状態は省エネ効果が大きいモードともいえる。

ところで、モードに関係する高調波次数はモータ部（第2次～5次）、負荷部（第6次～10次）のうち、正相成分（モータの回転と同方向の回転磁界）を含むものでなくてはならない。つまりこの場合、負荷部の第7次高調波が第1主成分となり、カップリング数値がモードの数値となる。

高調波診断のロジック（２）

1. モータ設備と高調波次数との関係

モータ部と負荷部およびインバータ部について以下の通り説明する。

① モータ部

三相交流電源によってモータに回転磁界が生じるが、この回転磁界（起磁力）には対称波としての正相分（回転方向と同方向の磁界成分）と零相分（回転方向に関係しない磁界成分）と逆相分（回転方向と逆方向の磁界成分）とからなる基本奇数次高調波（第1次、第3次、第5次）と整流器等により発生する非対称波の基本偶数次高調波（第2次、第4次）がモータの回転に関係する。即ち、正相—偶数—零相—偶数—逆相のグループ（駆動高調波）によりモータは回転している。モータは駆動系のため、エネルギーの高い、即ち最も次数の低いグループである1次（基本波）と、高調波としてはその後の2次、3次、4次、5次が関係する事になる。整理すると、モータに関係するものは、駆動高調波（ H_D ）で次のものからなる。

基本波（1次）・・・・・・・・・・正相（対称波）
2次・・・・・・・・・・偶数（非対称波）
3次・・・・・・・・・・零相（対称波）
4次・・・・・・・・・・偶数（非対称波）
5次・・・・・・・・・・逆相（対称波）

② 負荷部

負荷はモータによって駆動される被駆動系であり、エネルギーの低い被駆動高調波によって構成される。これは、モータ系の高調波群（第2次、第3次、第4次、第5次）が負荷で反射する反射高調波で、駆動高調波と合成され、モータより高次の高調波群となる。即ち、負荷に関係するものは、反射高調波（ H_R ）で次のものからなる。

6次・・・・・・・・・・偶数（非対称波）
7次・・・・・・・・・・正相（対称波）
8次・・・・・・・・・・偶数（非対称波）
9次・・・・・・・・・・零相（対象波）
10次・・・・・・・・・・偶数（非対称波）
*（11次）・・・・・・・・・・逆相（対称波）

*小さいので無視する

③ インバータ部

最後にインバータは駆動系モータ、被駆動系の負荷を含むため、上記モータ系の駆動高調波群と負荷系の反射高調波群の他に、制御高調波群によって構成される。即ち、インバータに関係するものは、次の制御高調波（ H_C ）を含む合成高調波（ $H_D + H_R$ ）となる。

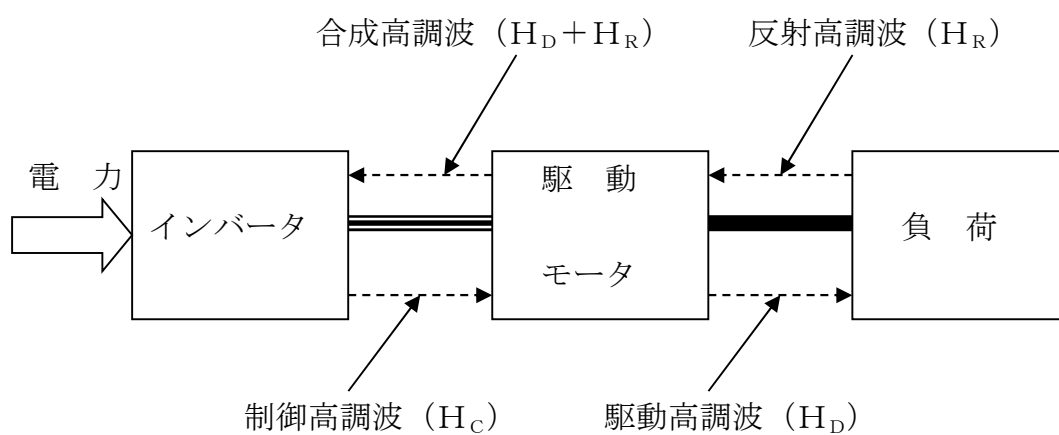
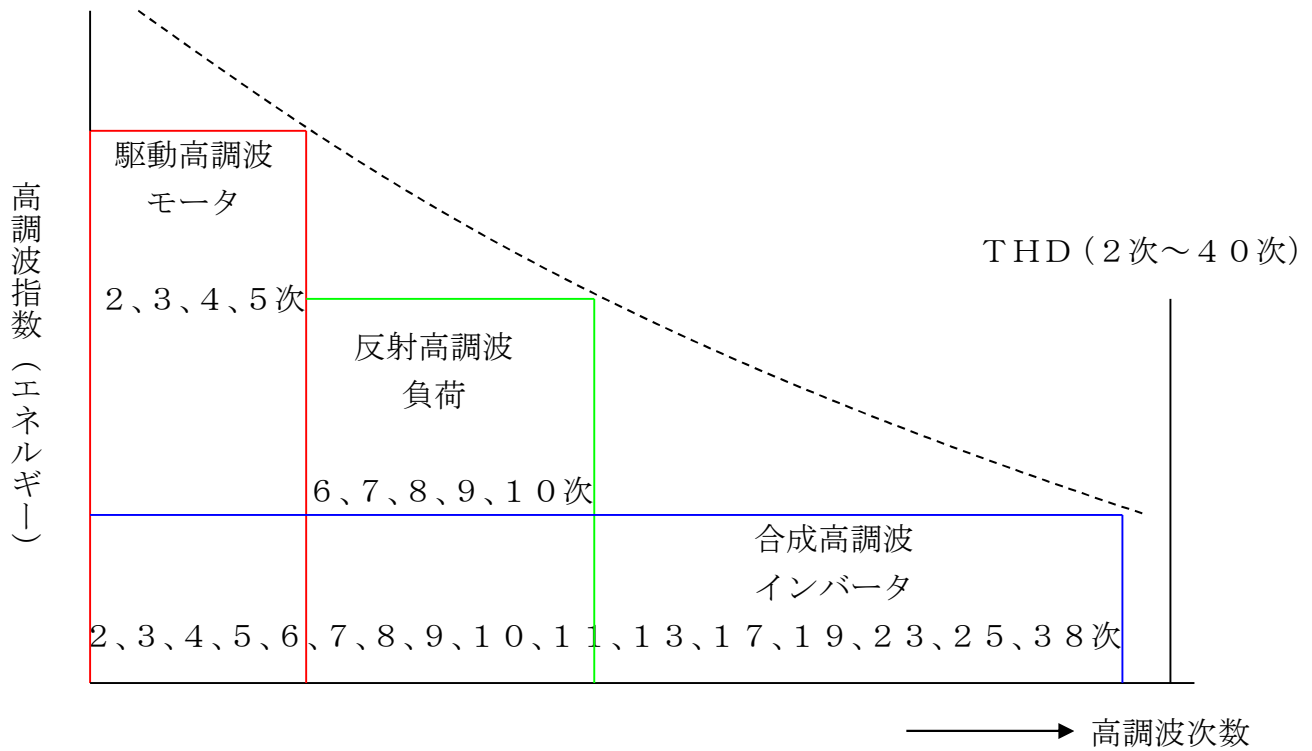
*（11次・・・・・・・・・・逆相（非対称波））

*インバータにのみ適用

13次・・・・・・・・・・正相（対称波）
17次・・・・・・・・・・逆相（対称波）
19次・・・・・・・・・・正相（対称波）

- 2 3 次 逆相 (対称波)
- 2 5 次 正相 (対称波)
- 3 8 次 偶数 (非対称波)

前頁の関係を図示すると次図の通りである。



2. 正常時の高調波と異常・劣化時の高調波の比較

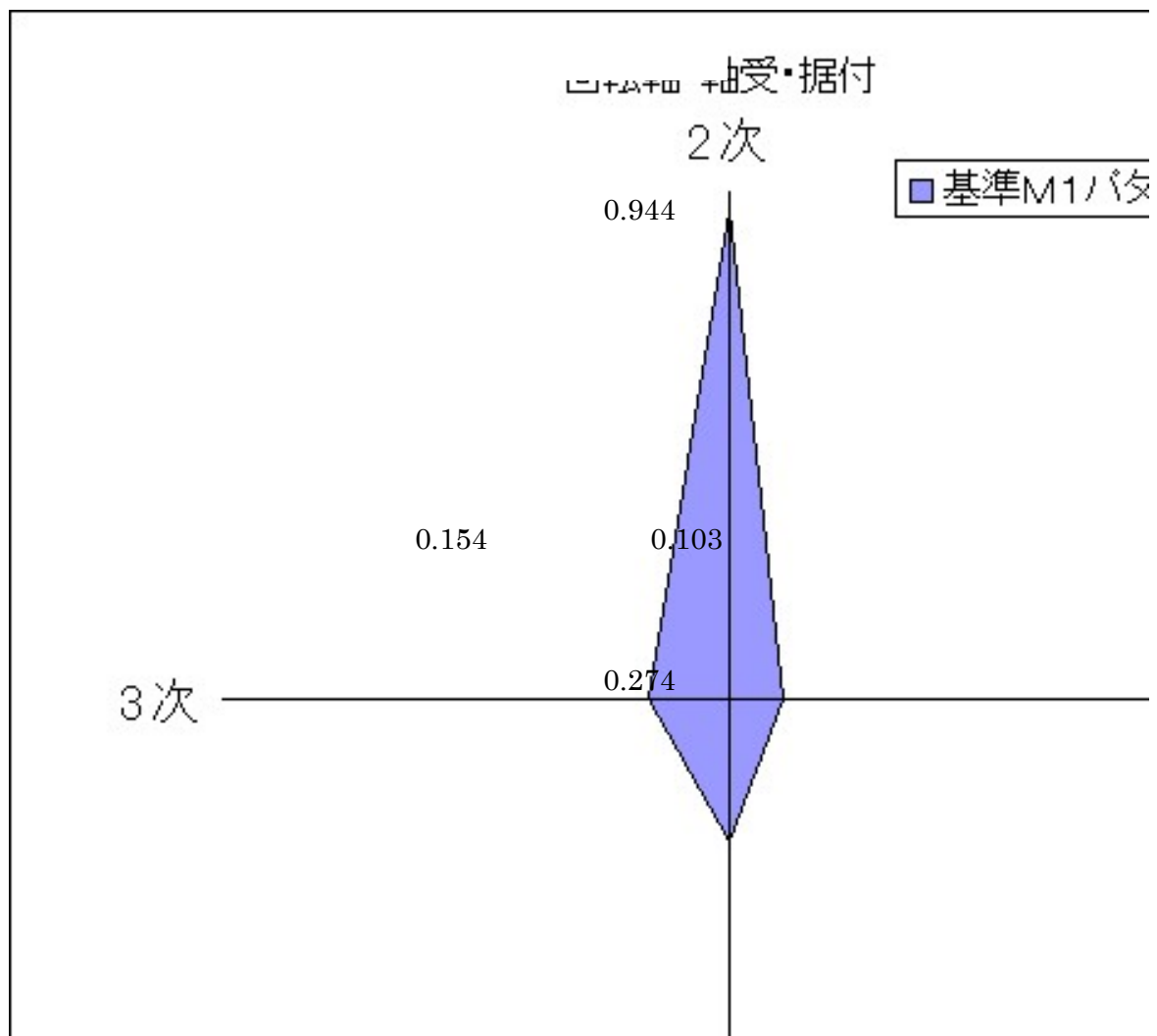
高調波診断は正常時の高調波パターンと異常・劣化時の高調波パターンを比較するパターンマッチング（パターン認識）手法による診断法である。

即ち、異常・劣化度100%とは、各部位毎の基準高調波パターン（37, 200件のデータをもとに解析的に求めた寄与率より算出）と、実測高調波パターン（実測データより算出）とが一致（マッチング）したときである。従って、基準高調波パターンと実測高調波パターンの違い（波形の歪み）の程度によって、各部位の異常・劣化度を表す。以下にこれらについて図解する。ここで、PTH Dは寄与率換算総合歪率であり、図中の数値は $(C_n / PTHD) \ll n = 2, 3, 4 \dots \gg$ （各次数寄与率/PTH D）で指数化したものを表す。

（1）モータ部（四角形）

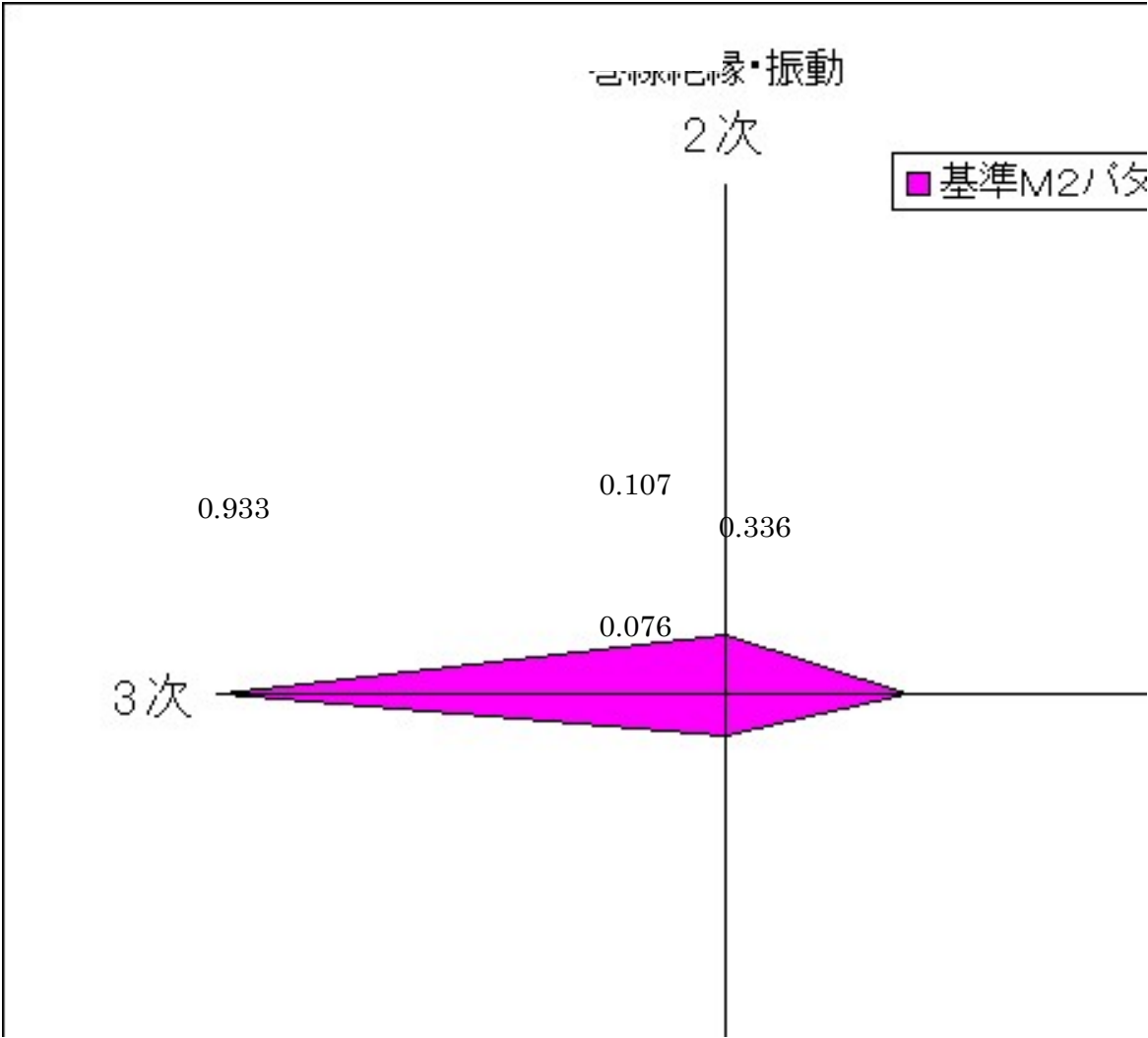
①回転軸・軸受・据付（M1）

$$\begin{aligned} PTHD &= (C_2^2 + C_3^2 + C_4^2 + C_5^2) \\ &= (55^2 + 9^2 + 16^2 + 6^2)^{1/2} \\ &= 58.29 \end{aligned}$$



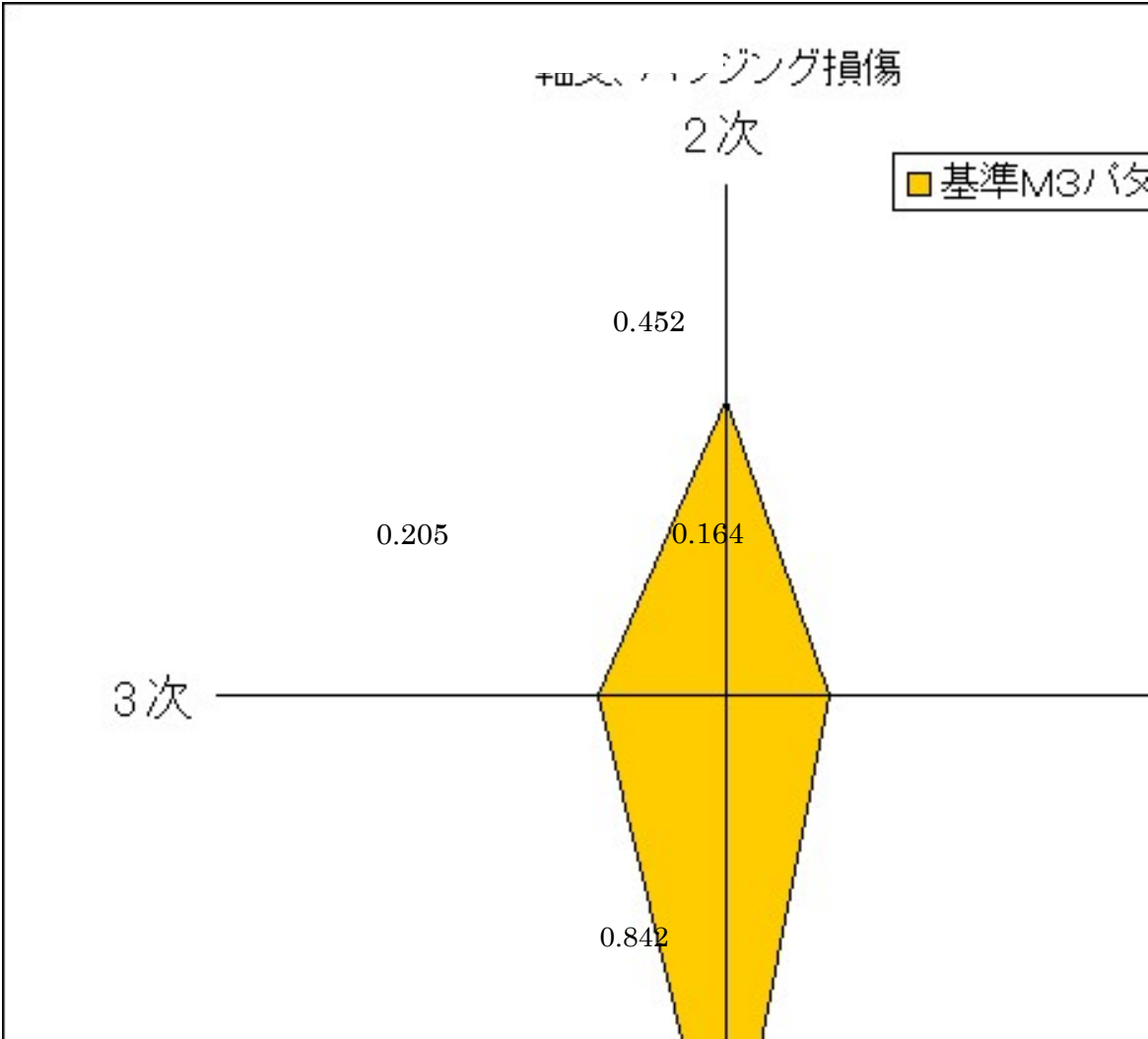
②巻線の絶縁（M2）

$$\begin{aligned} \text{PTHD} &= (7^2 + 61^2 + 5^2 + 22^2)^{1/2} \\ &= 65.41 \end{aligned}$$



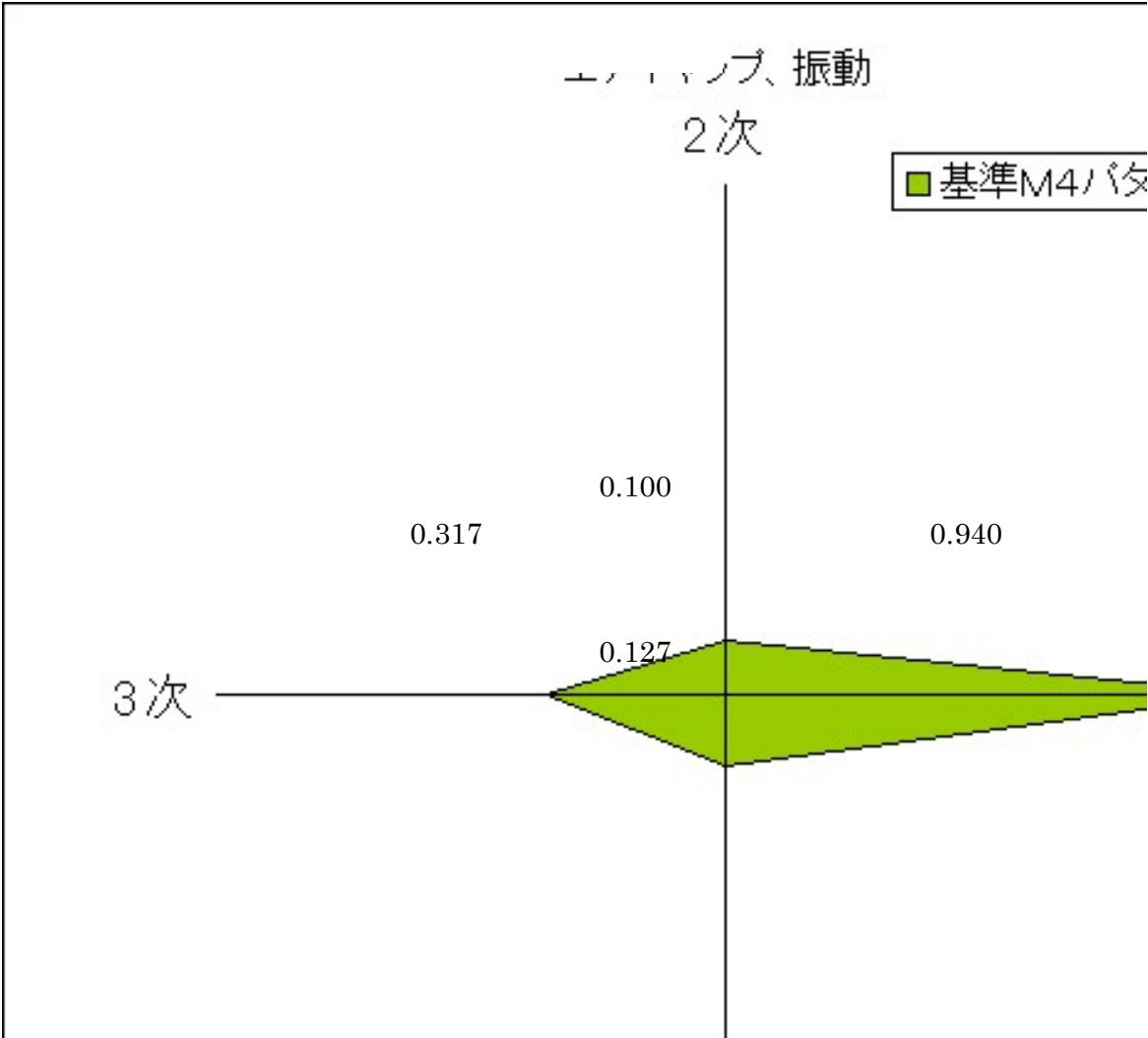
③軸受・ハウジング損傷（M3）

$$\begin{aligned} PTHD &= (2 \cdot 3^2 + 1 \cdot 0^2 + 4 \cdot 1^2 + 8^2)^{1/2} \\ &= 48.72 \end{aligned}$$



④エアギャップ不均一・塵埃（M4）

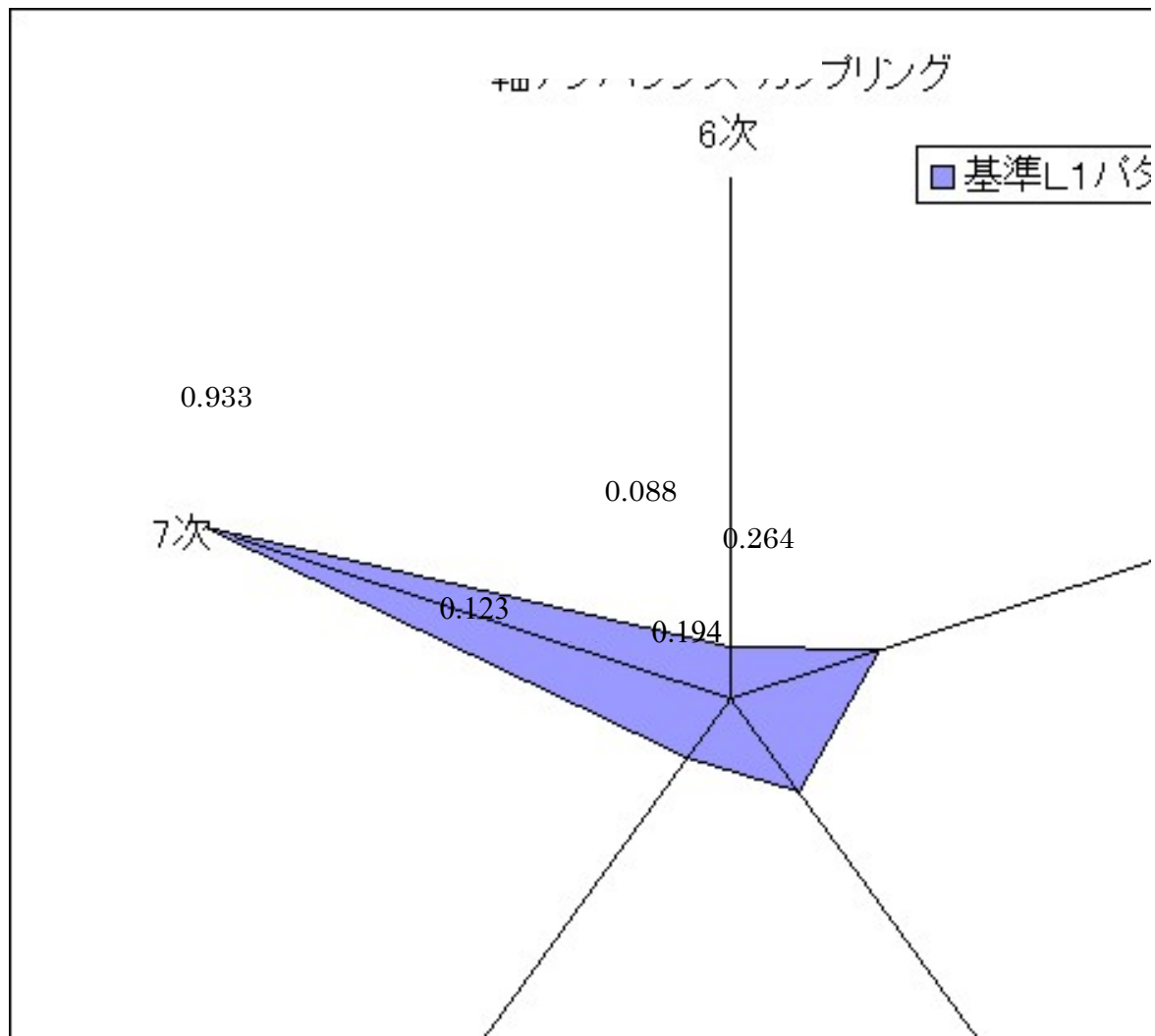
$$\begin{aligned} PTHD &= (6^2 + 20^2 + 8^2 + 59^2)^{1/2} \\ &= 63.10 \end{aligned}$$



(2) 負荷部 (五角形)

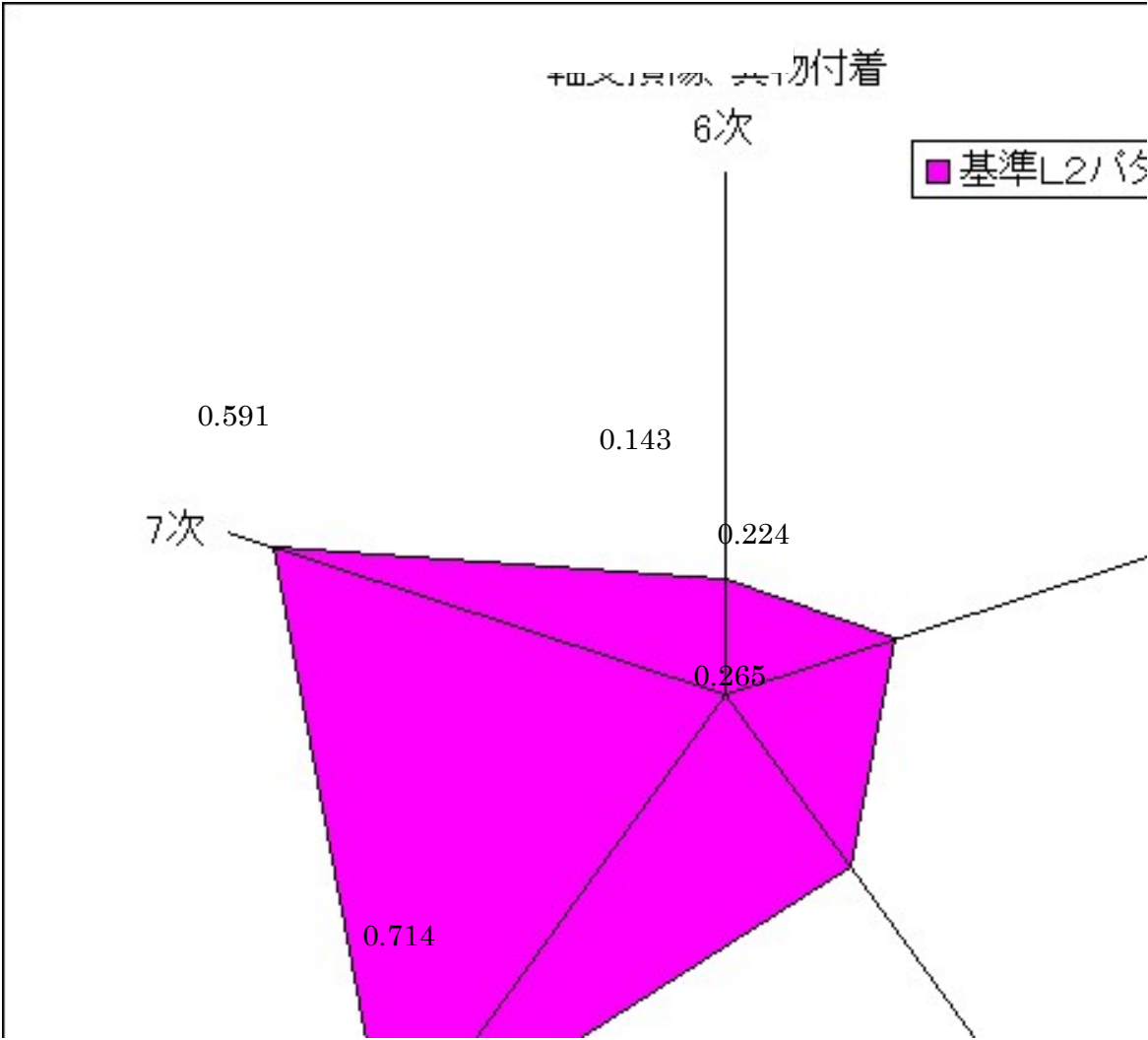
①カップリング・軸アンバランス (L 1)

$$\begin{aligned} PTHD &= (5^2 + 5.3^2 + 7^2 + 11^2 + 15^2)^{1/2} \\ &= 56.82 \end{aligned}$$



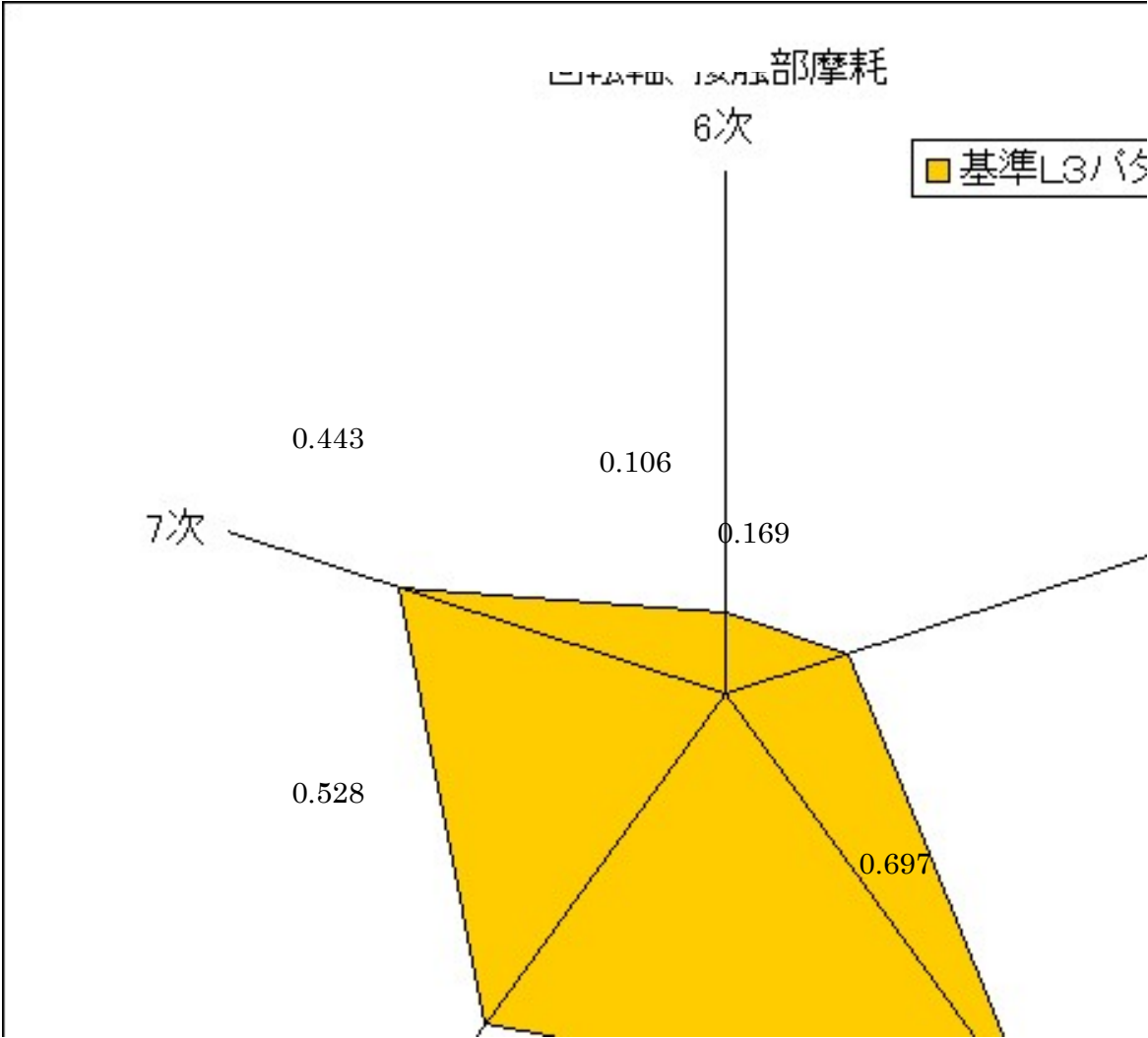
②軸受損傷・異物付着（L 2）

$$\begin{aligned} PTHD &= (7^2 + 29^2 + 35^2 + 13^2 + 11^2)^{1/2} \\ &= 49.04 \end{aligned}$$



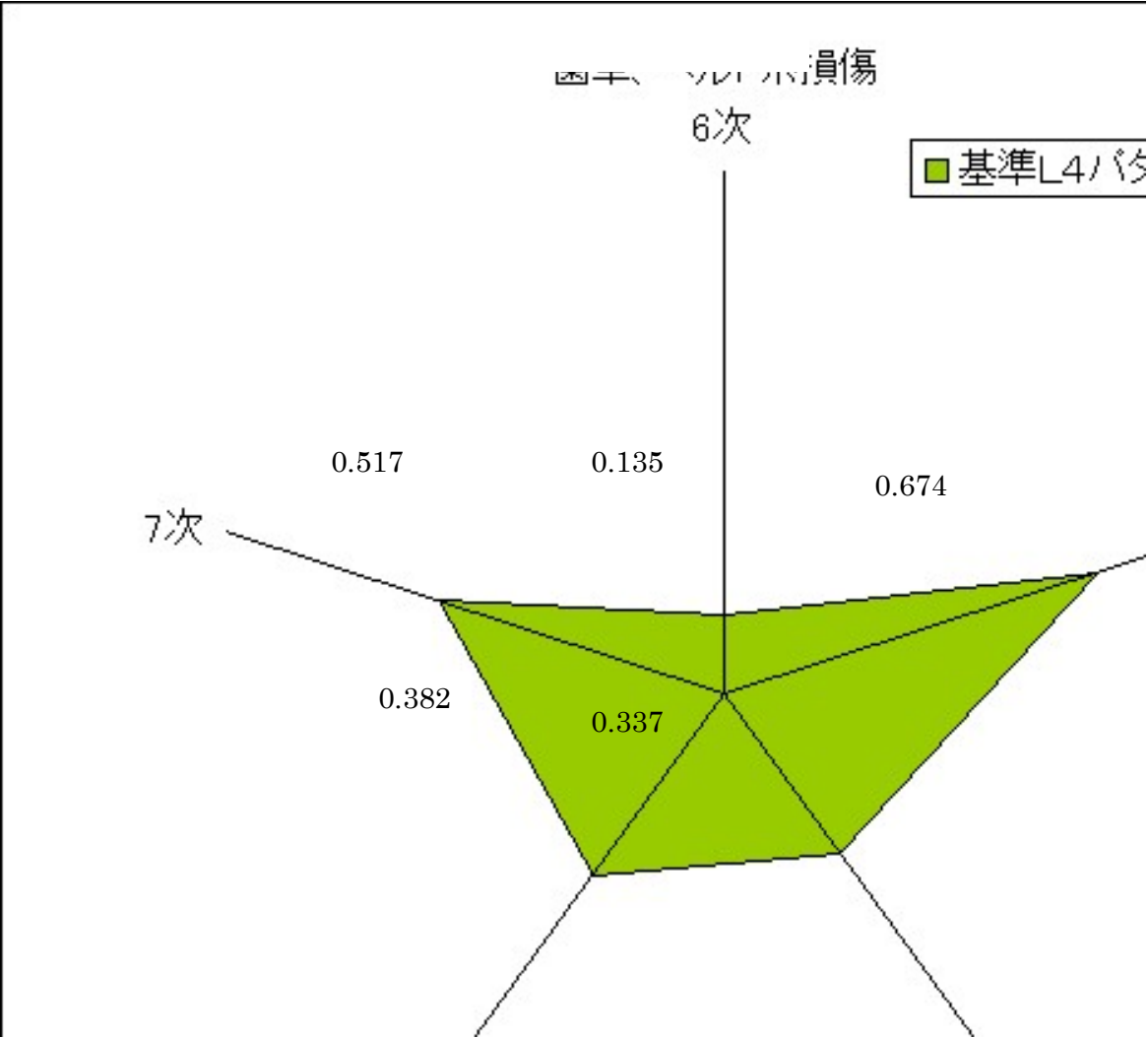
③回転軸異常・バルブ摩耗（L 3）

$$\begin{aligned} PTHD &= (5^2 + 2 \cdot 1^2 + 2 \cdot 5^2 + 3 \cdot 3^2 + 8^2)^{1/2} \\ &= 47.37 \end{aligned}$$



④歯車・ベルト系損傷（L 4）

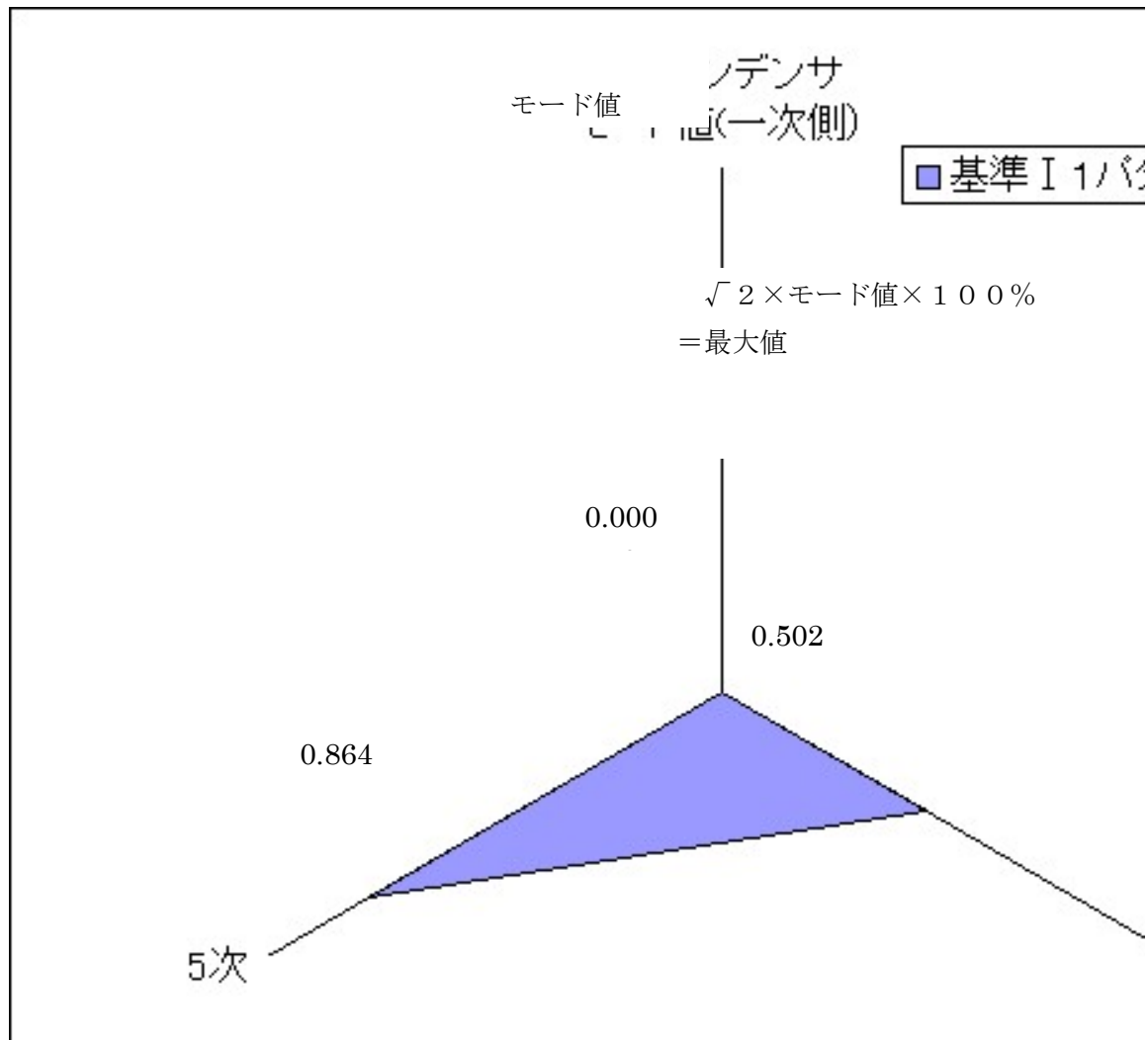
$$\begin{aligned} PTHD &= (6^2 + 2 \cdot 3^2 + 1 \cdot 7^2 + 1 \cdot 5^2 + 3 \cdot 0^2)^{1/2} \\ &= 44.49 \end{aligned}$$



(3) インバータ部

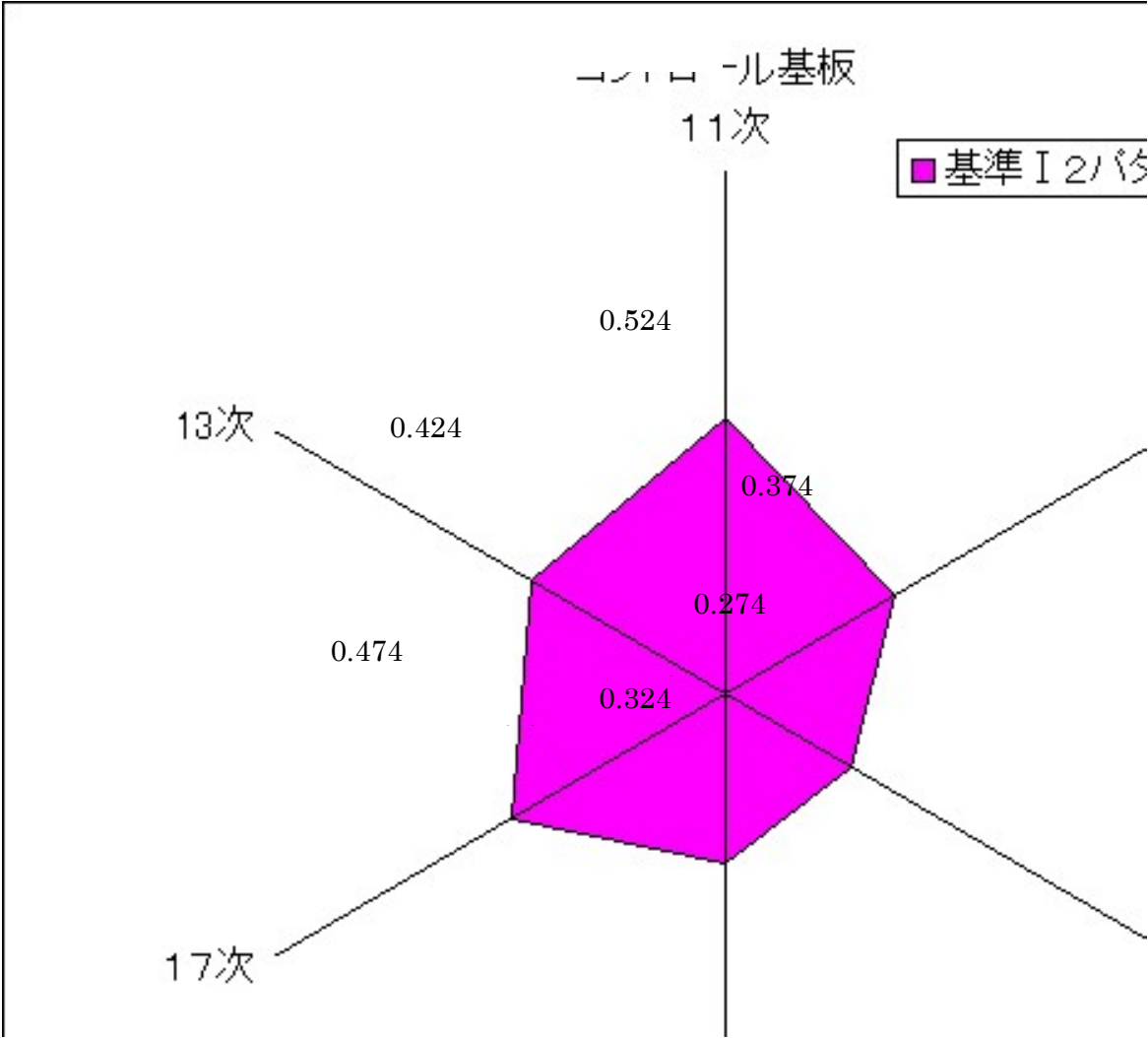
①電解コンデンサ（三角形）（I 1）

$$\begin{aligned} \text{PTHD} &= (62^2 + 36^2)^{1/2} \\ &= 71.69 \end{aligned}$$



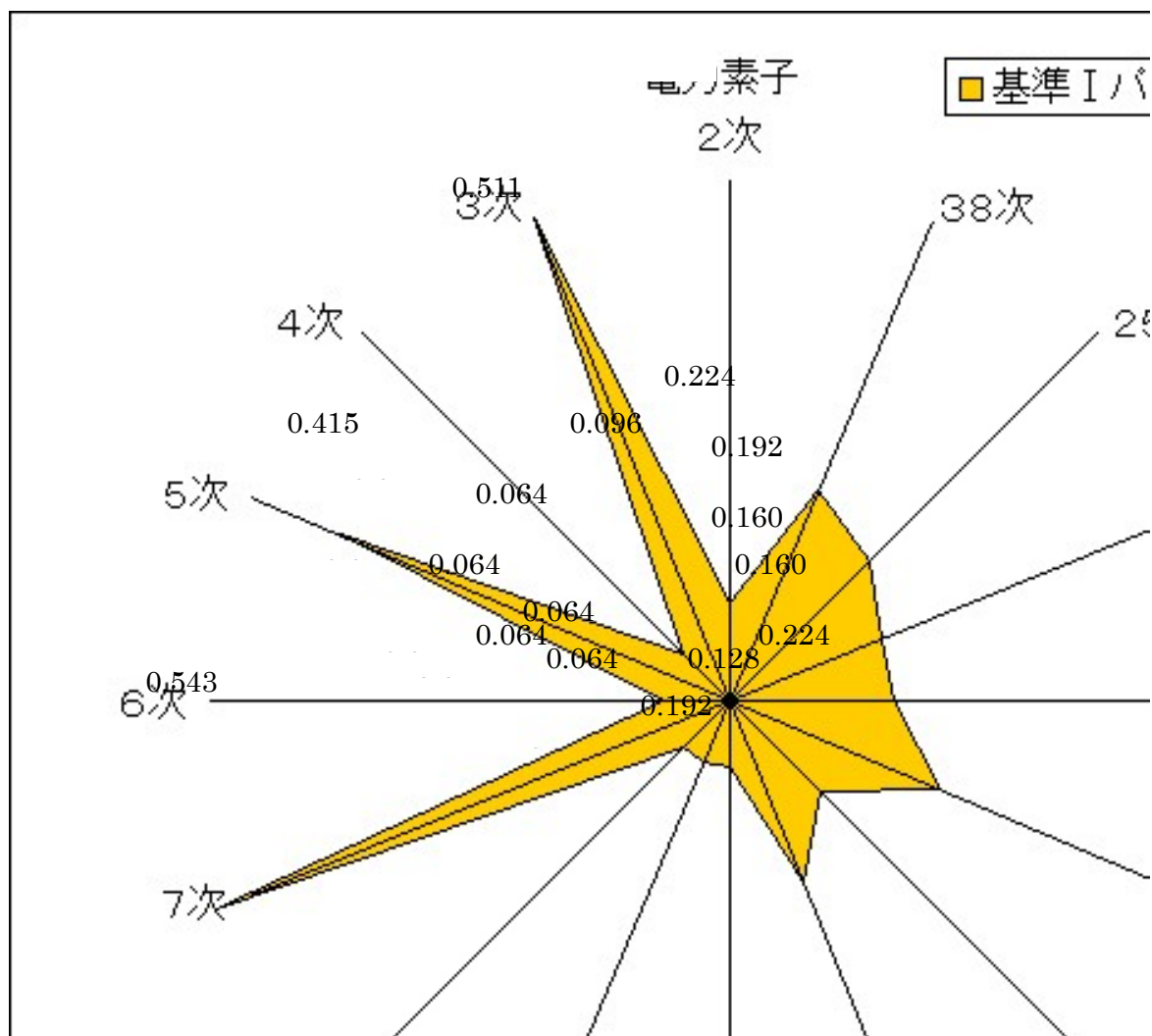
②コントロール基板（六角形）（I 2）

$$\begin{aligned} PTHD &= (21^2 + 17^2 + 19^2 + 13^2 + 11^2 + 15^2)^{1/2} \\ &= 40.10 \end{aligned}$$



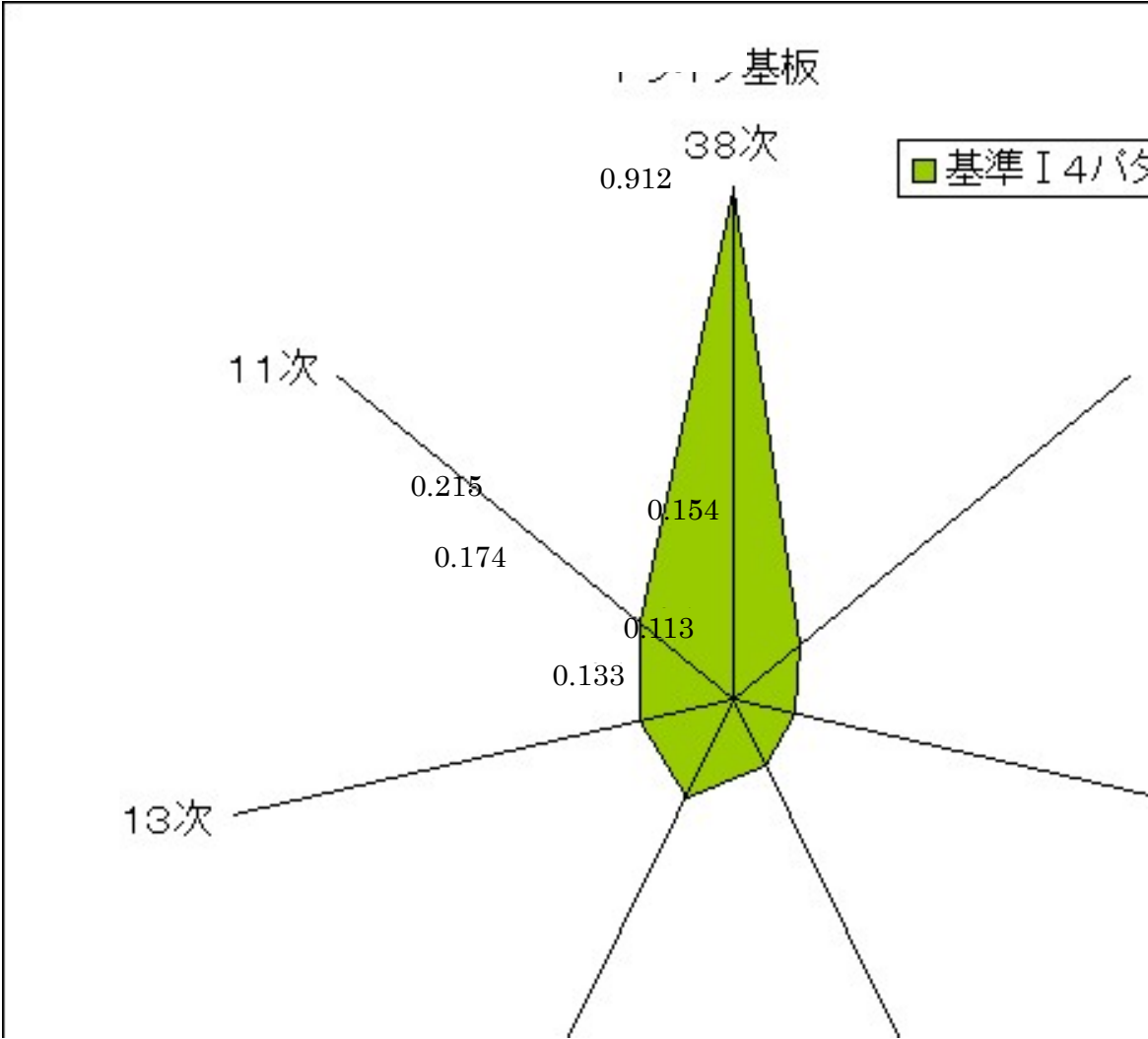
③電力素子（十六角形）（I 3）

$$\begin{aligned} \text{P THD} &= (3^2 + 16^2 + 2^2 + 13^2 + 2^2 + 17^2 + 2^2 + 2^2 + 2^2 \\ &\quad + 6^2 + 4^2 + 7^2 + 5^2 + 5^2 + 6^2 + 7^2)^{1/2} \\ &= 31.29 \end{aligned}$$



④ドライブ基板（七角形）（I 4）

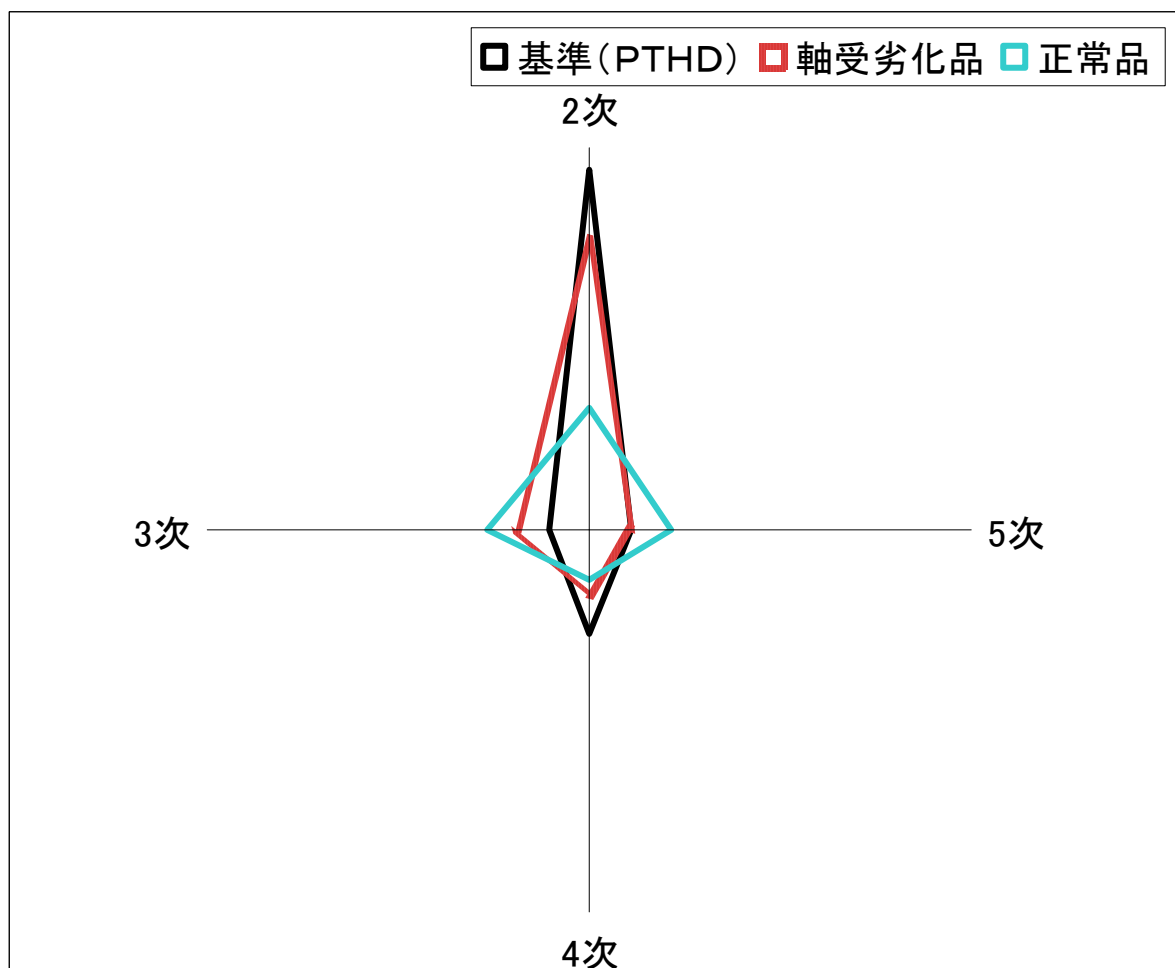
$$\begin{aligned} PTHD &= (89^2 + 21^2 + 17^2 + 19^2 + 13^2 + 11^2 + 15^2)^{1/2} \\ &= 97.6 \end{aligned}$$



(4) 軸受（正常品と異常・劣化品）の比較

基準値	高調波次数	2次	3次	4次	5次	PTHD
	寄与率指数	0.944	0.154	0.274	0.103	58.29
ポンプ (正常品)	高調波次数	2次	3次	4次	5次	THD
	高調波含有率(%)	3.1	2.6	1.3	2.1	9.7
	指数	0.32	0.269	0.13	0.216	—
ポンプ (軸受劣化品)	高調波含有率(%)	2.7	1.4	1.1	2	4
	指数	0.675	0.35	0.275	0.5	—

指数 = H_n / THD (H_n : 第 n 次高調波含有率、THD: 総合歪み率)



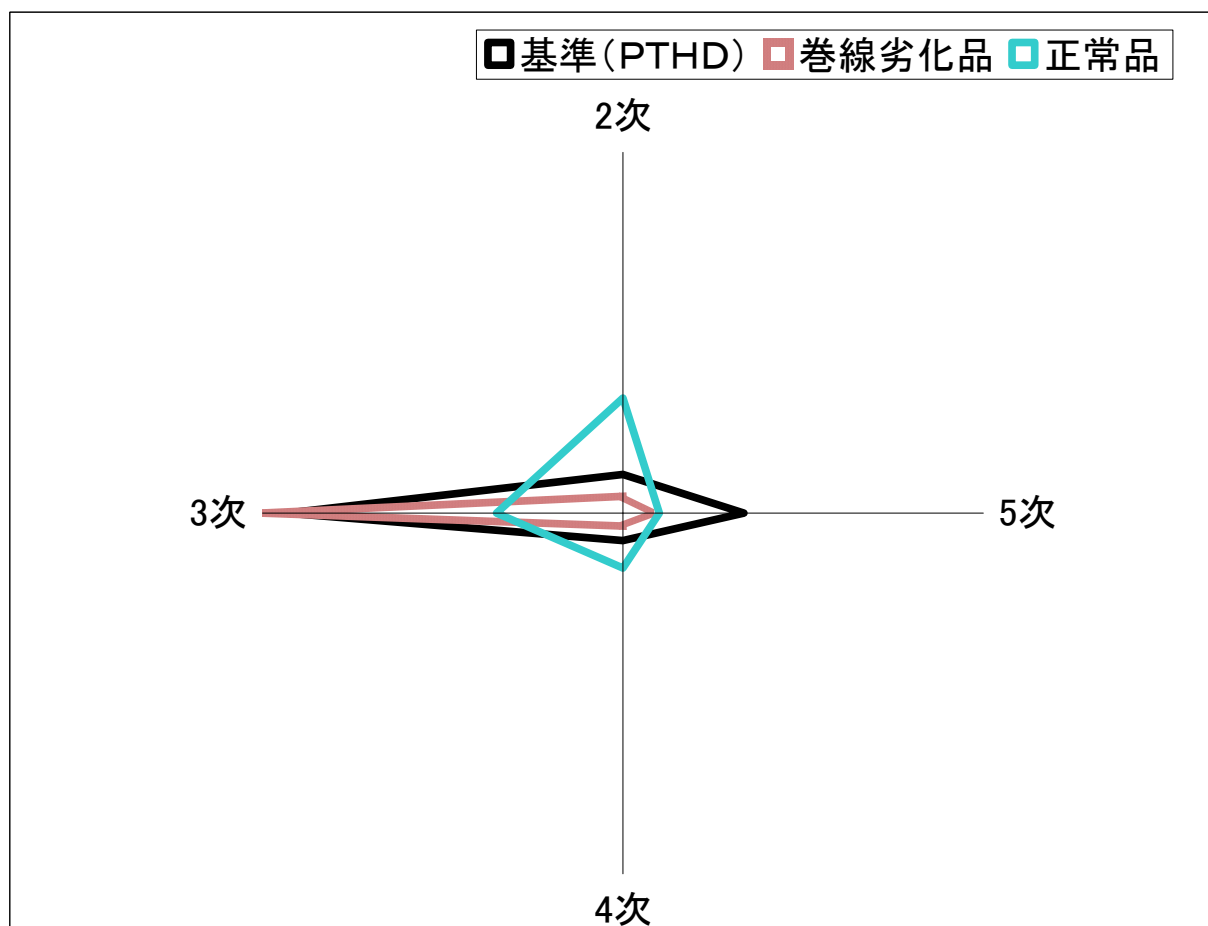
球磨耗



キズ

(5) 巻線（正常品と異常・劣化品）の比較

基準値	高調波次数	2次	3次	4次	5次	PTHD
	寄与率指数	0.107	0.933	0.076	0.336	65.41
ファン (正常品)	高調波次数	2次	3次	4次	5次	THD
	高調波含有率(%)	8.2	9	3.9	2.6	25.7
	指数	0.319	0.351	0.152	0.101	—
ファン (巻線劣化品)	高調波含有率(%)	9.8	206.3	7.8	15.7	207.7
	指数	0.047	0.993	0.036	0.076	—



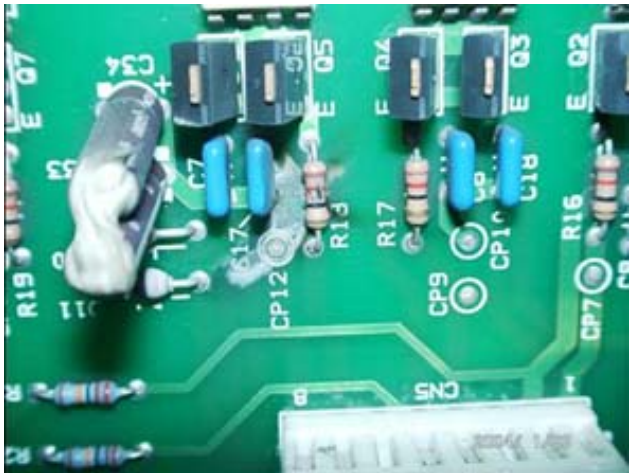
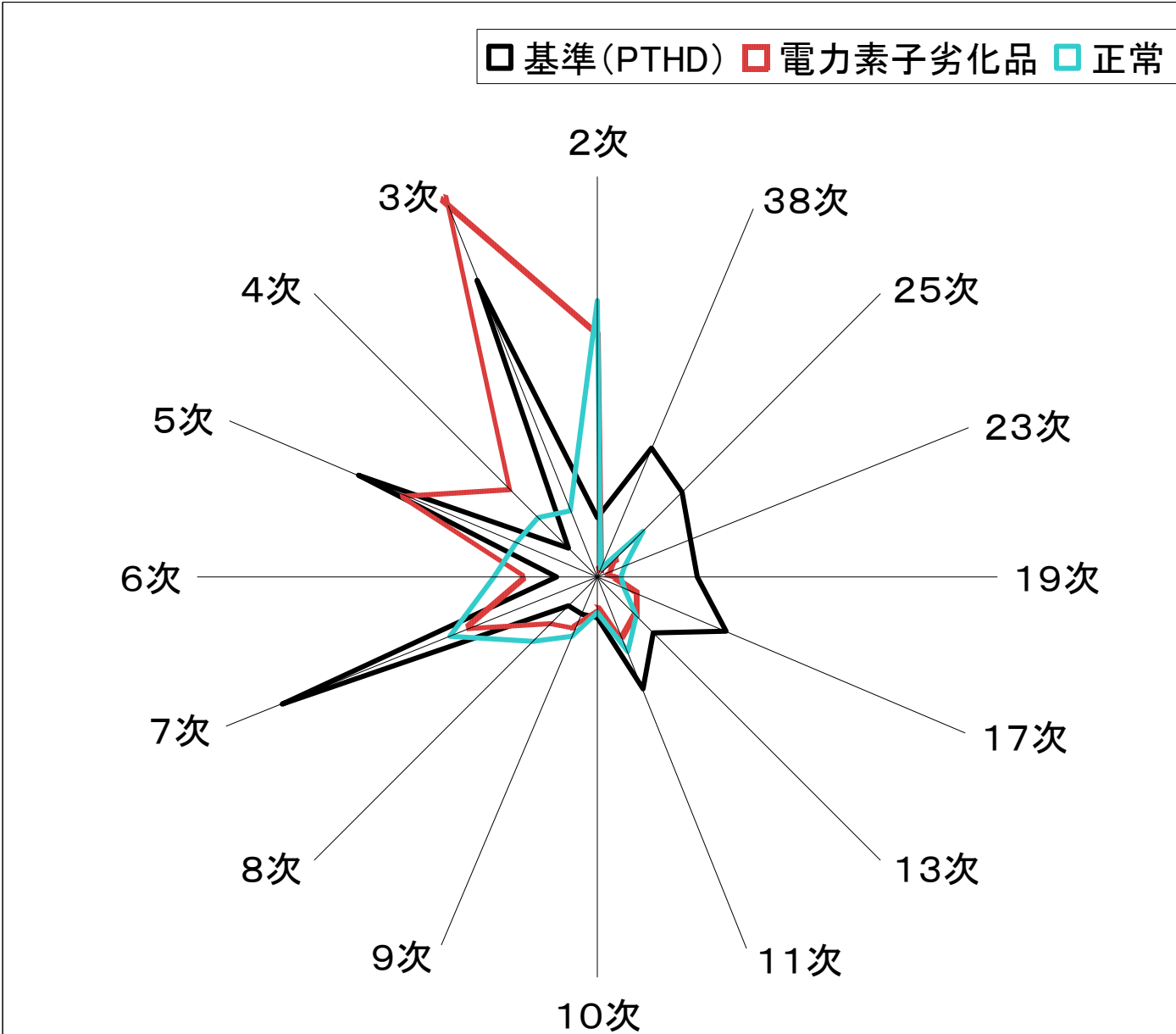
絶縁劣化



レアショート（測定1．5ヶ月後）

(6) 電力素子（正常品と異常・劣化品）の比較

高調波次数	2次	3次	4次	5次	6次	7次	8次	9次	10次	11次	13次	17次	19次	23次	25次	38次	PTHD
寄与率指数	0.096	0.511	0.064	0.415	0.064	0.543	0.064	0.064	0.064	0.192	0.128	0.224	0.16	0.16	0.192	0.224	31.29
高調波次数	2次	3次	4次	5次	6次	7次	8次	9次	10次	11次	13次	17次	19次	23次	25次	38次	THD
高調波含有率(%)	6.9	1.8	2.1	2.2	2.6	4	2.3	1.6	0.9	2	1.4	0.7	0.6	0.7	1.6	0.2	10.8
指数	0.638	0.167	0.194	0.204	0.241	0.37	0.21	0.148	0.083	0.185	0.13	0.065	0.056	0.065	0.148	0.019	-
高調波含有率(%)	12	20.3	6.2	10.5	3.7	6.9	3.2	2.8	1.6	3.2	2.7	2.1	1	0.5	1.3	0.3	28.9
指数	0.415	0.7	0.215	0.363	0.128	0.239	0.111	0.096	0.055	0.111	0.073	0.224	0.035	0.16	0.045	0.01	—



電力素子損傷（測定1ヵ月後）

