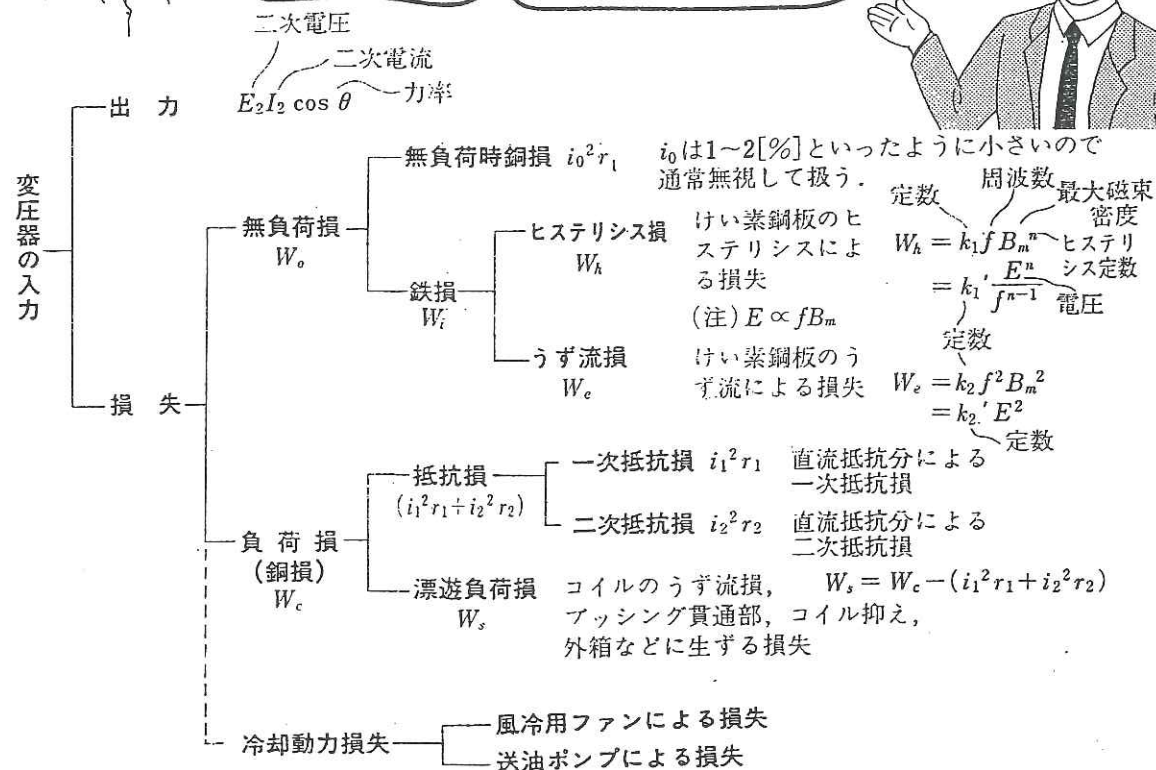




変圧器にも損失がある……でしょう。
どんな損失があるのかしら。

入力は、100[%]出力になるわけではありませんから、どんな物にも損失があるんですが、変圧器はこんなふうだと思えばいいでしょう。



それぞれの損失にはこんな特性があります。

- 無負荷損(鉄損)——① 周波数によって変化する。
② 磁束密度によって変化する。
③ 周波数、電圧が変わらない限り一定である ($\because E \propto f B_m$)。
- 負荷損(銅損)——① 負荷電流によってのみ変化する。
② したがって、負荷が変わらない限り一定である。
③ 温度が変化すると抵抗値が変わり変化する。
a 抵抗値は温度に比例する。
b 漂遊負荷損は温度に反比例する。

これらの特性の差を利用して損失の分離を行うわけですよ。
また、この関係から、
(1) 負荷が変わると変圧器の効率が変わる。
(2) 鉄損と銅損の比率によって変圧器の最大効率となる負荷が異なることになります。



変圧器は、まるで鉄と銅の塊みたいね。電気機器は大体そうだけど特にね。そんな感じが強いわ。

けい素鋼板というのはどんな材料なの。磁気特性の良いのは純鉄でしょう。鉄ではだめなのかしら。

そうだよ、まさに鉄と銅だね。鉄は磁気部分、銅は導電部分ですね。導体として使われるのは導電率の関係から銅かアルミニウムだけど、鉄心はもうけい素鋼板ですな。



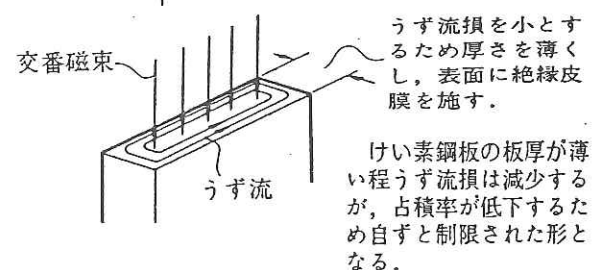
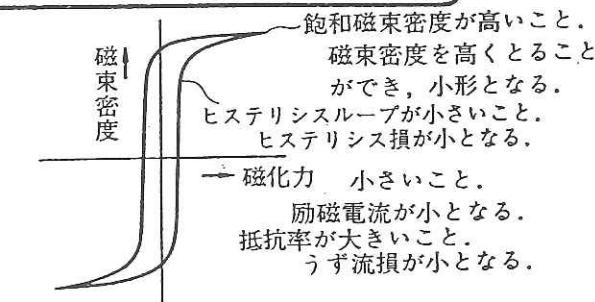
純鉄は確かに磁気特性のすぐれた材料ですけどね。

- (1) 飽和磁束密度は高いけど時効効果といってね特性変化がある。
- (2) 抵抗率が低いので交流に使うとうず流損が大きくて損失—鉄損が大きい。こういうことで使えないんですよ。直流電磁石あたりでは使われることはありますけどね。

このような特性を抑えるために入れるのがけい素<シリコン Si> なんです。けい素を添加した鋼板、すなわちけい素鋼板。

Al はまれに添加されることはありますが、他の不純物 S, P, C は嫌われますね。特性が落ちますから。特に C はね。

大体ね、交流機用の鉄心材料としてはこういうことが必要なんです。



変圧器に使われるけい素鋼板(電磁鋼板)はこんなところでしょう。

- 電磁鋼板
- 熱間圧延——現在は生産されていない。けい素鋼板 占積率、磁化特性が劣る。
 - 無方向性電磁鋼帯——無方向性であるが特性は若干圧延方向のほうがすぐれている。中容量変圧器。
 - 方向性電磁鋼帯——圧延方向に特性がすぐれている。巻鉄心形変圧器 大容量電力用変圧器

電磁鋼帯の種類		鉄損 [W/kg]	
		W _{15/50}	W _{17/50} 50Hz 17キロガウス
無方向性電磁鋼帯(0.35t)	35A440	<4.40	—
	35A300	<3.00	—
	35A250	<2.50	—
方向性電磁鋼帯(0.3t)	30G150	—	<1.50
	30G130	—	<1.30
	30P120	—	<1.20
	30P110	—	<1.10

問 47 変圧器のヒステリシス損はうず電流損のおよそ 4 倍であるからヒステリシス損は鉄損の約 80% になるといわれていますが、何が何やらザッパリわかりません。わかりやすく説明して下さい。

岡 村 正 友

変圧器のヒステリシス損とは

お答え 最初簡単に説明しますと、変圧器の鉄損とはヒステリシス損とうず電流損を加えたものということが、わかっていれば、後はすぐわかります。

$$\text{鉄損 (} W_t \text{)} = \text{ヒステリシス損 (} W_h \text{)} + \text{うず電流損 (} W_e \text{)} \quad (1)$$

ヒステリシス損がうず電流損の 4 倍ですから

$$W_h = 4 W_e \quad (2)$$

この (2) 式を (1) 式に代入すると

$$W_t = 4 W_e + W_e = 5 W_e$$

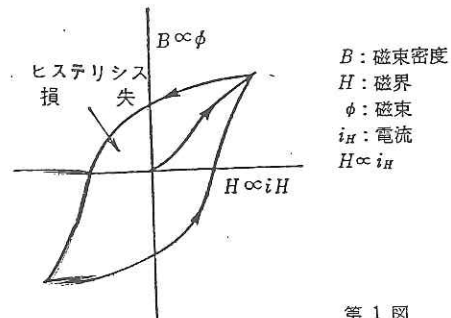
すなわち、鉄損はうず電流損の約 5 倍であり、ヒステリシス損はうず電流損の 4 倍であるから鉄損の中にしめるヒステリシス損の程度は

$$\frac{\text{ヒステリシス損}}{\text{鉄 損}} \times 100 [\%]$$

すなわち、

$$\frac{4 W_e}{5 W_e} \times 100 = 80 [\%]$$

となり、鉄損の 80% がヒステリシス損であることがわかります。つぎに鉄損とはどうゆうものかといいますと、変圧器の鉄心のような磁性材料を交流で励磁すると鉄心は第 1 図のようなヒステリシス特性があるために 1 サイクルごとに第 1 図の



第 1 図

面積に相当するだけの損失を生じます。この損失をヒステリシス損といいます。

そしてこの鉄心の単位体積、単位サイクルあたりの損失の実験式は

$$\text{ヒステリシス損 } W_h = \tau B_m^{1.6} [W]$$

で表わされます。τ はヒステリシス係数と呼ばれるものであり、鉄の材質によって変わり、0.008 ~ 0.001 程度です。B_m は磁束密度の最大値で単位は [Wb/m²] です。したがって、f サイクルあたりの損失は

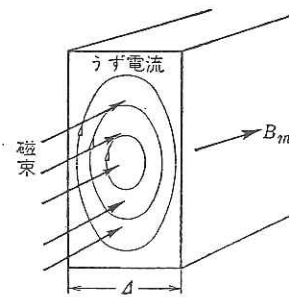
$$W_h = \tau B_m^{1.6} f [W]$$

で表わされます。一方、鉄心も導電体ですから磁束変化により鉄心内に起電力をもち、鉄心中に電流が流れ I²R の損失を生じます。この電流は第 2 図のように磁束に直角な面内、すなわち鉄心の厚みの中をうず状に流れます。この損失は次式で表わされます。

$$W_e = \frac{4}{3} \frac{f^2}{\rho} K_f^2 B_m^2 \Delta^2$$

f: サイクル, ρ: 抵抗率, Δ: 鉄板の厚さ, K_f: 波形率。

変圧器などの鉄心は磁束および鉄心の寸法が与えられた場合、鉄板の厚さ Δ を小さくしてこのうず電流損を減少させているために有効面積が小さくなり、B_m が大となるからうず電流損が減少しヒステリシス損が増加する傾向となります。このため一般に鉄損中の約 80% がヒステリ



第 2 図

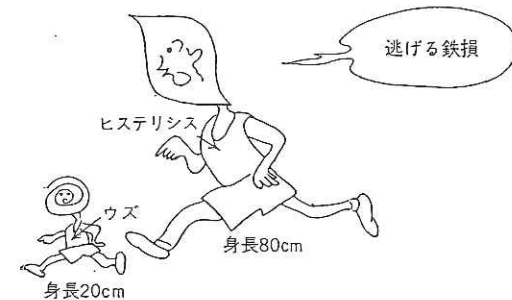
ス損となるのです。

【関連事項】一知っていると便利です—

変圧器の損失中の鉄損だけについてのべましたが、このほかに誘電体損失がありますが、これは高圧の変圧器において絶縁物をとおして電流が流れるために生ずる損失ですが、試験用変圧器のように小容量、高電圧のものをのぞいては省略してさしつかえありません。この損失も考えにいれますと、鉄損、誘電体損を無負荷損失といいます。このほかに負荷電流が流れるときに生じる負荷損を加えたものが、変圧器の全損失になります。ヒステリシス損、うず電流損をそれぞれ分離して測定する方法としてはさきに説明したようにヒステリシス損は f に比例し、渦流損は f² に比例することを利用します。

【注 意 事 項】—ここは間違いやすいのです—

負荷損の中にもうず電流損があります。これは磁束が必ずしも鉄心中ばかり通るのではな



問 48 けい素鋼板(帯)には、なぜ薄い板状のものや帯状のものが用いられるのでしょうか。

く、漏れ磁束は導体内をも通ります。したがって、導体内にもうず電流損失を生じます。また、漂遊損といわれているもので、これも負荷電流による磁束が変圧器箱の側壁にもうず電流を生じ損失を作ります。これらはいずれも I²R の抵抗損とともに負荷損といわれるものであり、負荷電流の 2 乗に比例します。

【参 考 デ ー タ】

(1) 鉄板の厚さ 0.35 mm 第 3 図、珪素鋼板の磁氣的性質

称 呼	鉄 損 [W/kg]	
	W 10/50	W 15/50
T 145	1.45	3.85
T 135	1.35	3.60
T 120	1.20	3.20

(2) W 10/50, W15/50 はそれぞれ磁束密度 1.0 Wb/m² (10 kgauss) および 1.5 Wb/m² (15 kgauss) 50 c/s における鉄損 [W/kg]

(筆者—四国電力)

け い 素 鋼 板 (鋼 帯)

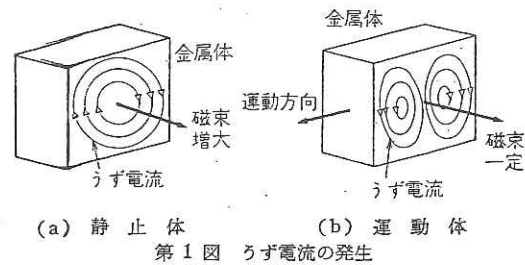
志 摩 彰 一

お答え 一口にいって、うず電流損を小さくするためです。

1. うず電流の発生

うず電流は第 1 図 (a) のように金属と鎖交

する磁束が変化しますと、金属内に起電力が誘導されて、同図のような方向にうず状の電流 i が流れることをいいます。たとえば金属として変圧器鉄心を考えてみますと、鉄心を貫通する磁束は、交番磁束ですから常に増大または減少



していますので、それに応じて常に同図の方向またはその逆方向のうず電流が流れるのです。また、うず電流は磁束が一定の場合でも第1図(b)のように磁束と鎖交する金属体を運動させますと、同図のような方向にうず電流が流れます。これは回転機鉄心のうず電流が対応します。なな、これらのうず電流の発生原理はいずれも電磁誘導の法則を思い起こしていただければ納得できるはずです。

2. うず電流損

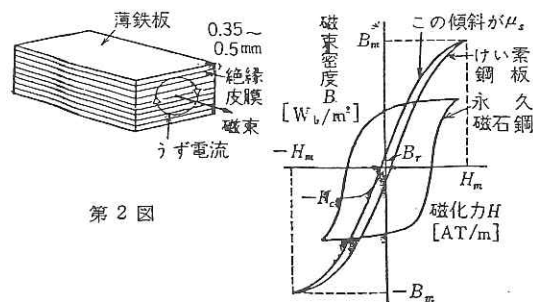
変圧器や回転機の鉄心にこのようなうず電流 i [A] が流れますと、その通路の抵抗を R [Ω] とすれば、 $i^2 R$ [W] の電力損失を生じます。これをうず電流損といっていますが、一般にはつぎの式で算定されることが多いようです。

$$P_e = k f^2 B_m^2$$

ここで、 P_e : うず電流損 [W/kg], k : 材質と厚さによりきまる定数 (0.35 mm けい素鋼板では約 6×10^{-5}), f : 周波数 [c/s], B_m : 最大磁束密度 [Wb/m²].

3. 板(帯)状鉄心

ではこのようなうず電流損を小さくするにはどうするかといいますと、うず電流の通路の抵抗



第3図 B-H 曲線

抗 R をできる限り高くしてやることです。そうしますとうず電流 i が小さくなり、 $i^2 R$ 損失がごく小さくなります。こうするには一般には絶縁した薄鉄板を多数積み重ねて鉄心を作り、これを第2図のようにうず電流を妨げる方向に配置してやります。こうすれば鉄心の磁性体としての性質を変化させることなくうず電流損を激減させることができることになります。

【追加質問】

最近巻鉄心変圧器などに方向性けい素鋼板(帯)が使用されていますが、これも同様の理由によるのでしょうか。

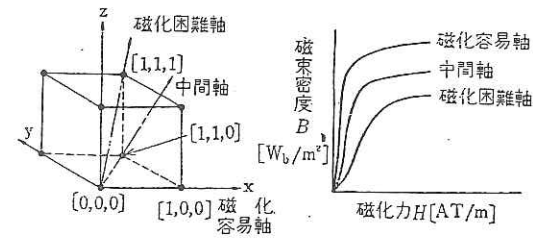
【お答え】

いいえ、この場合はうず電流通路の抵抗の増大というよりはむしろ、方向性けい素鋼板(帯)が磁性体としてよい性質をもっているという理由が大きいです。

(a) 磁性体の性質

一般に磁心材料は第3図の $B-H$ 曲線において、比透磁率 μ_s 、飽和磁束密度 B_m が大きいこと、残留磁束密度 B_r 、保磁力 H_c の小さいこと、ヒステリシスループの面積の小さいこと(ヒステリシス損はこの面積に比例しますから小さいほどよい)、それに電気の抵抗率の大きいこと(うず電流損を小さくするには大きな抵抗がよい)などが要求されます。同図において永久磁石鋼とけい素鋼板(無方向性)とを比較してみますと、この差が実によく表われています。すなわち、従来のけい素鋼板(無方向性)はこれらの性質をほぼ満足しています。

つぎに鉄の磁化特性ですが鉄の微粒子の単結晶について考えてみますと、単結晶では磁化は結晶の方向によって異なります。すなわち、第4図(a)の結晶格子において、原点 $[0, 0, 0]$ から $[1, 0, 0]$ の方向(立方体の稜の方向)がもっとも磁化されやすく、同図(b)の $B-H$ 曲線が一番急しゅんで(μ_s が大)、しかも、ヒステリシス損も最小です。したがって、この方向を磁化容易軸といっています。これに対し原点 $[0, 0, 0]$ から $[1, 1, 1]$ の方向はもっとも磁化されにくく、 $B-H$ 曲線も小さい μ_s を示してい



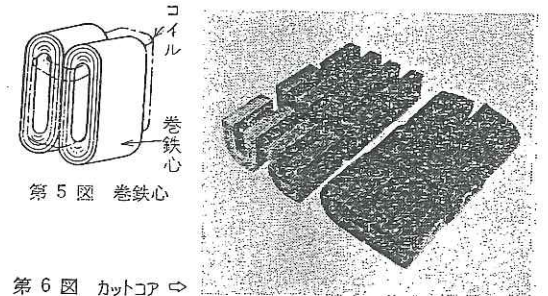
ます。通常のけい素鋼板ではこの結晶の方向は、小さい部分を除き全体ではバラバラの方向を向いていると考えてよいようです。

(b) 無方向性(熱間圧延)けい素鋼板(帯)

けい素鋼板(帯)をつくるには、くず鉄に適量の銑鉄などを加えて溶解させ、これにけい素を加えて鋳型に注入して一度鋼塊をつくります。これを加熱炉、圧延機にかけて熱間圧延し、さらに表面の酸化皮膜を酸で洗い落とし、焼なましをした後、絶縁皮膜を施して仕上げます。絶縁皮膜としては従来はワニスやラックを焼きつけていましたが、最近ではカーライト絶縁も行なわれています。なお、けい素の含有量は磁気的性質からいえば多いほどよいのですが、材質がもろくなるので回転機では2~3%程度、変圧器では3~5%程度になっています。

(c) 方向性(冷間圧延)けい素鋼板(帯)

このような無方向性けい素鋼板に対し、方向性けい素鋼板は、まず製造工程から異なり、冷間圧延と熱間圧延とを適当に組み合わせて(強冷間圧延後、熱処理と脱炭および均質化を行なう)結晶の磁化容易軸を圧延方向にそろえるようにしてあります。その結果無方向性のものと比べて比透磁率が大きく、ヒステリシス損が少ないという好条件の磁心材料となります。したがって、これを回転機あるいは変圧器の鉄心として使用しますと、まず比透磁率が大きですから小さな磁化力で大きな磁束密度すなわち励磁電流が小さくてすみ、また鉄損が小ですから効率があ



第6図 カットコア

んとよくなります。あるいは効率をそのままとしますと機器は小形、軽量にすることが可能です。さらに磁気ひずみが少ないので騒音を出さないという利点もあり、今後方向性けい素鋼板(帯)はますますその利用範囲が広がるものと考えられます。

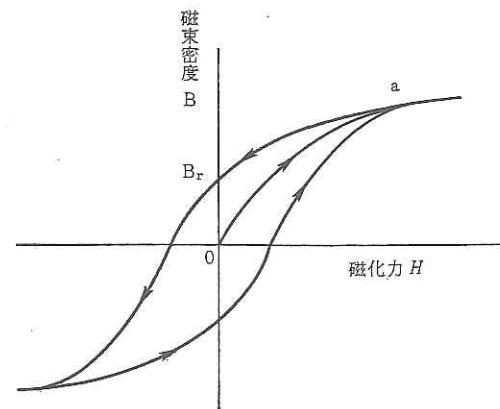
(d) 巻鉄心変圧器

連続リボン状に圧延した方向性けい素鋼帯を、組み立てた巻線の周囲に第5図のようにうず巻状に巻いたものが、巻鉄心変圧器です。方向性けい素鋼帯は上述のごとく磁気的性質がよい上に、鉄心につなぎ目がないので、従来の積鉄心変圧器に比べ、鉄損は65%程度、無負荷電流は50%以下、重量も80%以下とすぐれた特性をもっており、しかも組み立て時間も短縮されています。柱上変圧器など小形のものに多く作られています。しだいに大形のものにもおよんでいます。なお巻鉄心を第6図のように切断し、切断面を精密に仕上げて、ギャップによる磁気特性への影響を極力小さくした鉄心をカットコアといっており、製作容易、量産に最適、故障時に取りはずし容易などの特長をもっています。

(筆者—中国電力)

☆ ☆ ☆

☆ ☆



第7図 鉄心の B-H 特性

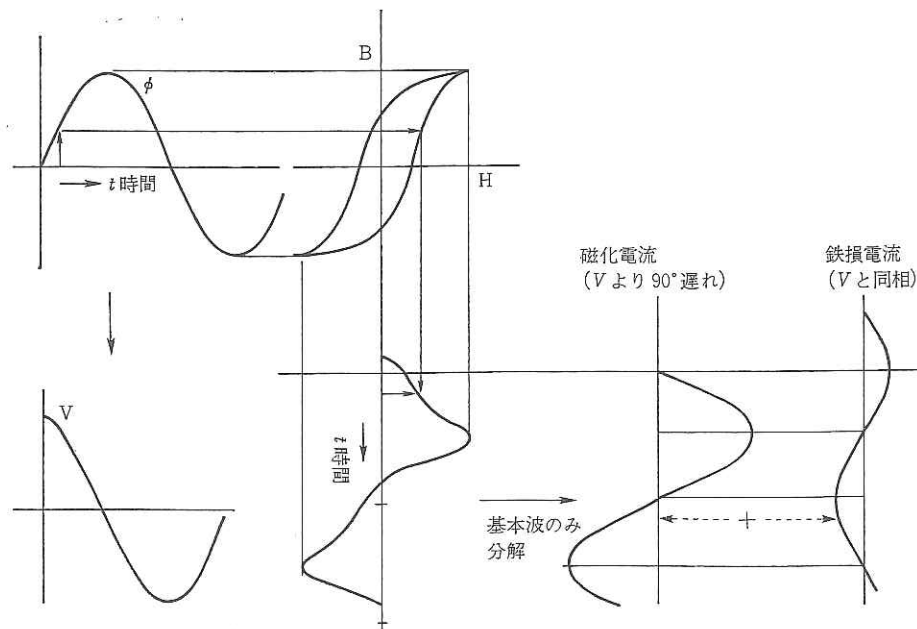
したがって PT にとっては、巻線の抵抗と漏れリアクタンスの影響を低減することが必要である。

b 励磁電流

理想変圧器では励磁電流 I_0 を無視し $I_1/I_2 = N_2/N_1 = 1/\alpha$ としたが、CT にとって I_0 は無視し得なくなる。ここでは励磁電流について、さらに詳しく述べる。

(a) 鉄心の B-H 特性

第7図は鉄心の B-H 特性を示したもので図のループをその鉄心のヒステリシスループという。



第9図 実際の励磁電流

この図でわかることは

- ① 磁化力 H を増加（減少）していくと磁束密度 B は曲線に沿って増加（減少）していく。
- ② 最初は H のわずかな増加によって B が急激に増大する（不飽和域）
- ③ そして図中の a 点に達すると B の増勢は急ににぶり飽和領域に入りこむ（飽和域）
- ④ また H がゼロになっても、 B_r が残る（残留磁気）

以上のことを第8図のような交流回路における回路素子として V - I の関係を見るならば、（簡単のため、ヒステリシス特性を無視）

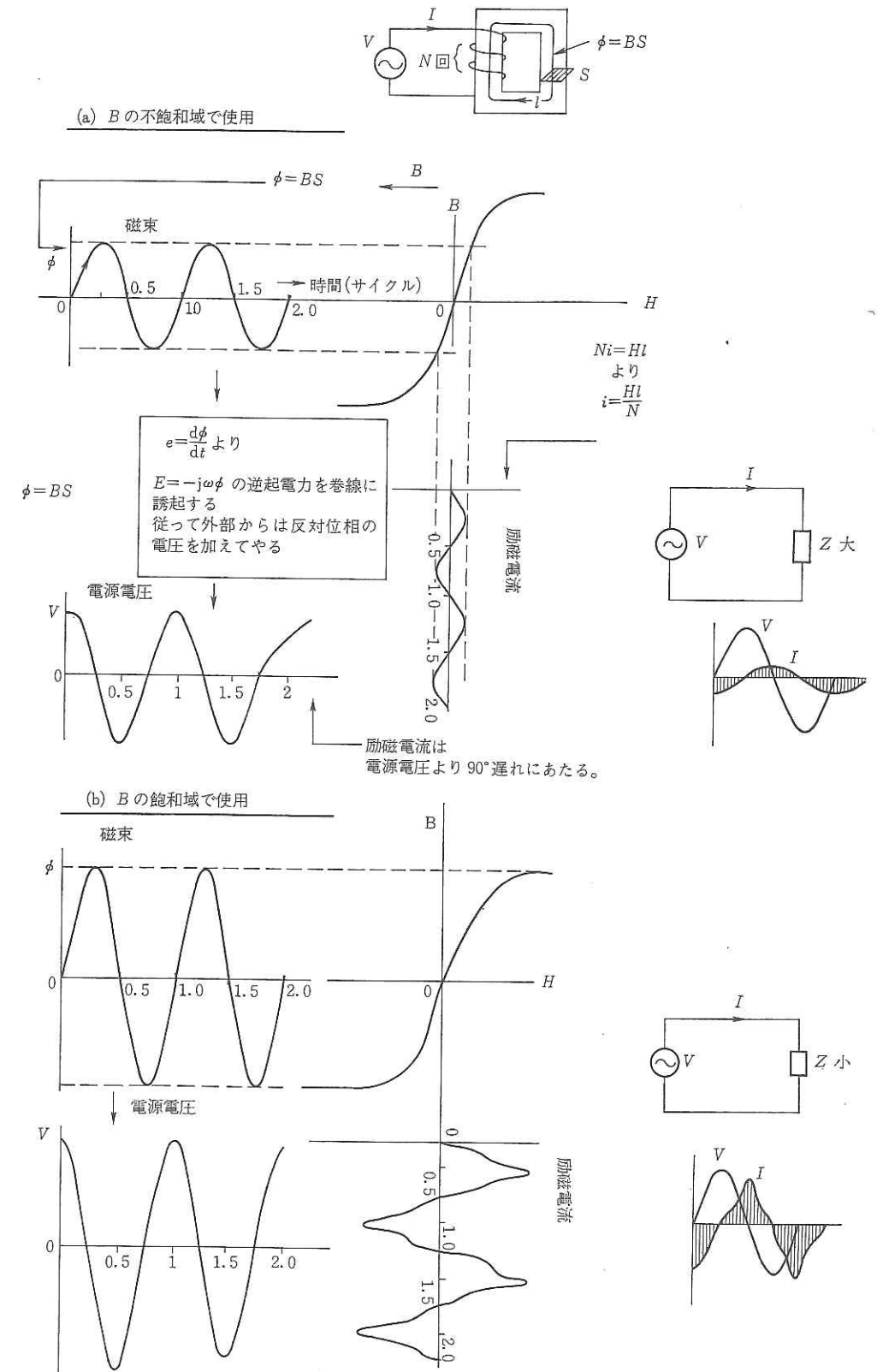
第8図(a)…磁束の不飽和域で使用了場合

$\Delta B/\Delta H$ が大きいので、 I_0 が小さくても大きな起電力を生ずる。また、電源電圧 V と I_0 の位相は I_0 が 90° 遅れであるので、リアクトル素子であるうえ、リアクトルの実効インピーダンスは相当大きい。

第8図(b)…磁束の飽和域で使用了場合

飽和域では $\Delta B/\Delta H$ がほとんどゼロとなり、相当大きな I_0 が流れるのでインピーダンスがかなり小さくなる。

であり、使用する磁束密度 B によって不飽和域と飽和域の2つのインピーダンスをもった回路素子といえる。



第8図 V-I 特性