

電気電子情報工学実験II 交流電動機の特性と制御 講義資料

令和2年6月18日分

担当:宮崎

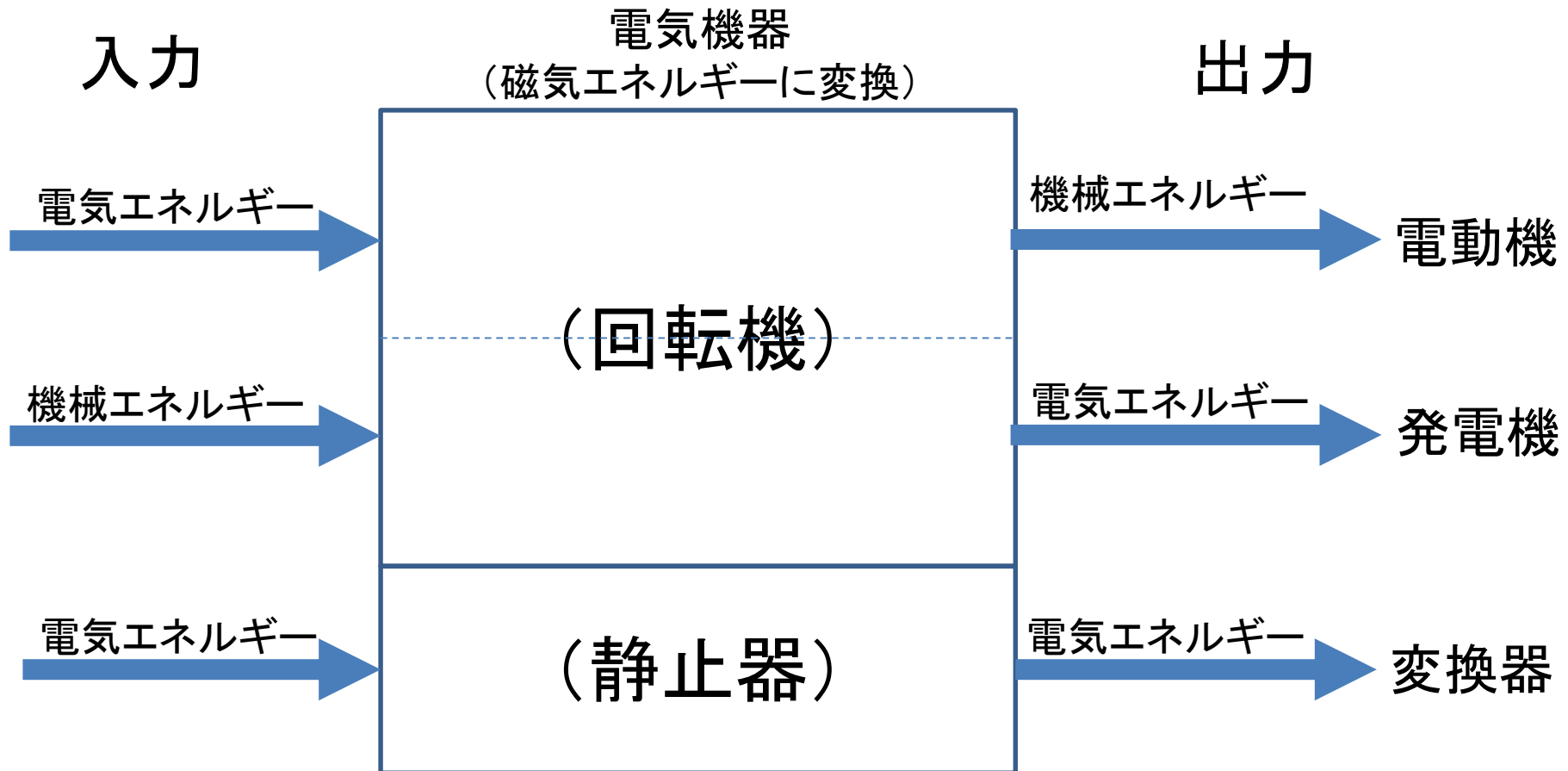
誘導機

- 本授業では回転機について話をする
 - 電動機: 電気エネルギーを機械エネルギーに変換
 - 発電機: 機械エネルギーを電気エネルギーに変換
 - 回転機器の種類
 - 誘導機: 交流電力、電磁誘導を積極的に使う
 - 同期機: 交流電力、クーロン力(磁極が引き合う力)を利用
 - 直流機: 直流電力、電磁誘導を利用
- この実験は誘導機の話。
- 実は、誘導機の動作自体は変圧器とよく似ている。
- 入力電力が磁束を作り、その磁束が機械的な出力を作る

- 電気エネルギーの利用
 - 過去のエネルギーの利用
 - 熱(蒸気)エネルギーを動力として利用
 - 現在のエネルギーの利用
 - 熱(蒸気)および自然エネルギーを電気エネルギーに変換
 - 電気エネルギーを様々な動力として利用
 - 約60%を電動機で、その他は照明など(教科書図1.1)
- 電気エネルギーの発生方法
 - 発電機を使用: 様々なエネルギーから運動エネルギーを取り出し電気エネルギーに変換
- 電気エネルギーの使用方法
 - 電動機を使用: 回転動力を提供できる

電気機器とは

電気機器とは、磁気エネルギーを媒介して、機械エネルギーと電気エネルギーを相互に変換する装置



電気機器の歴史(的な何か)

- 動電気(電流)の発見
 - 1800年 ボルタ(イタリア) 電池を発明
 - 持続的な電流の発生
- 電流の磁気作用の発見
 - 1820年 エルステッド(デンマーク)
 - 電流が磁気を生み出し、その結果として電流が磁針を動かくことを発見
 - 機械を動かす電気の出現
- 電磁石の発明
 - アンペール(フランス) アンペールの法則を発見
 - アラゴ(フランス) 電磁石の原理を発見
 - 1825年 スタージョン(イギリス) 強力な電磁石を作成
- 電動機の基本原理解見
 - ファラデー(イギリス) 電流の磁気作用の逆の現象を発見
- 発電機の基本原理解見
 - 1831年 ファラデー(イギリス) 電磁誘導の法則を発見
- 1832年 ピクシー(フランス)の手回し式発電機試作
- 1834年 ヤコビ(ロシア)の磁石式直流電動機試作
- 1873年 アルテネック(ドイツ)のドラム形発電機開発
 - 現代の発電機・電動機の原型となる

電動機(モータ)の用途と種類

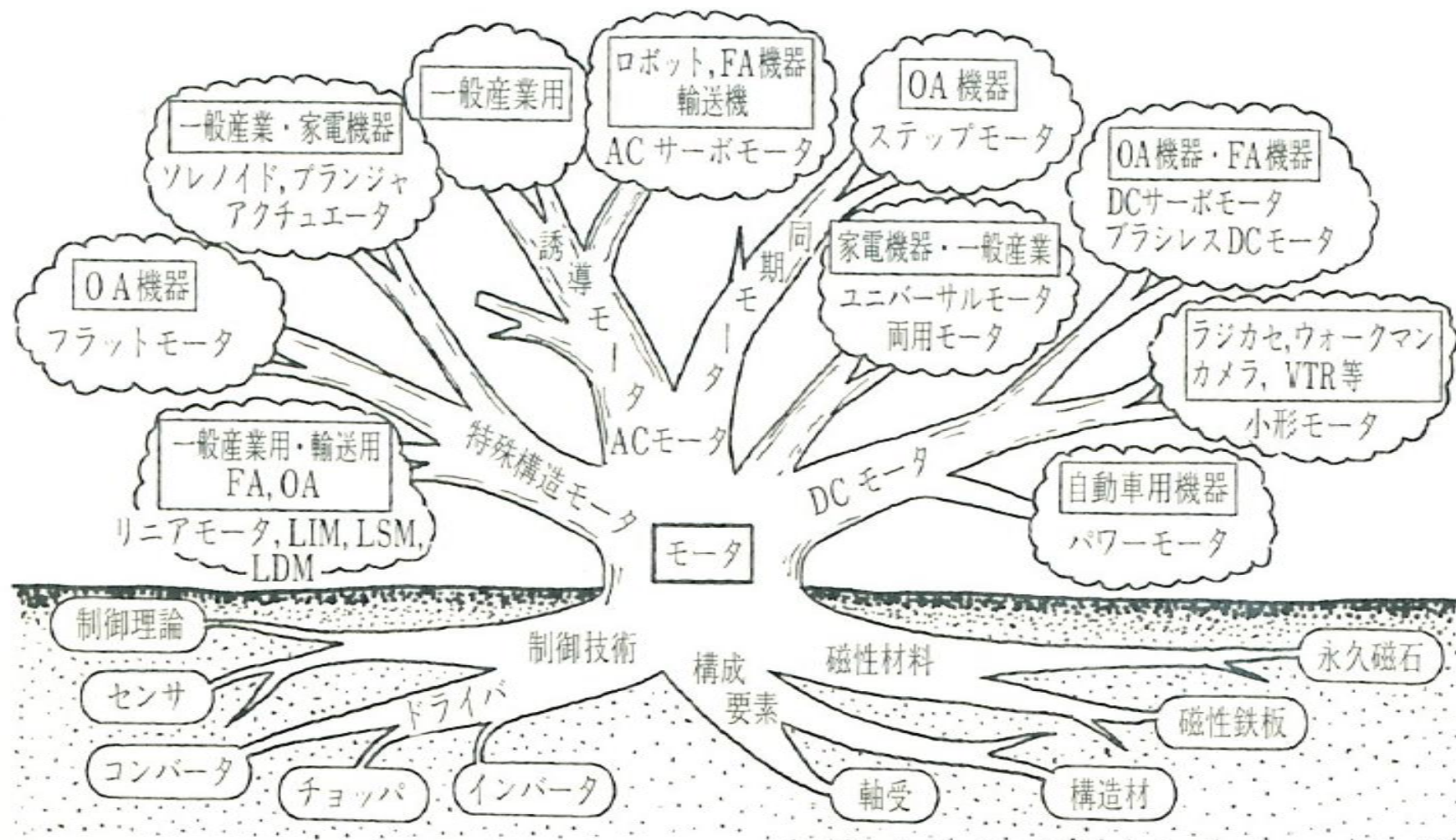


図 3.1 モータの種類⁶⁾

電気機器を支配する4つの力 (電磁気現象による力)

- 変圧器起電力(磁束変化による起電力)
 - 電磁気:ファラデーの法則
 - 磁束の変化を妨げる方向に電流を流そうとする
- 速度起電力(運動による起電力)
 - 電磁気:フレミングの右手の法則
 - 運動によって変化する次回からの影響を一定に保つようにする
- 電磁力
 - 電磁気:フレミングの左手の法則 or ローレンツ力
 - 磁界中のコイルに電流を流すことでそのコイルに力が加わる
- マクスウェル応力
 - 電磁気:リラクタンストルク
 - 一様な磁界中でコイルを使って磁束を変化させようとしたときにコイルに加わる力

インダクタンス

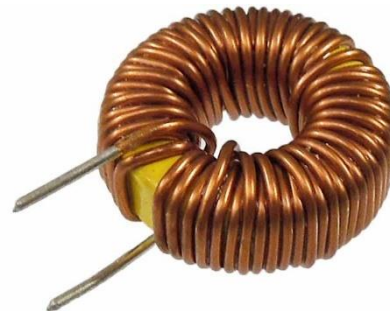
(電気機器の中核となる部品)

- 電気磁気A,B の教科書も参考に・・・
- 磁気エネルギーを介したエネルギー変換に必要
- 磁気エネルギーを蓄える素子としてインダクタンスがある。
- 電気回路IではLとして習っているもの

インダクタンスの実物は？



インダクタンスの図記号



鉄心に導線を巻いたもの
ほかにもいろいろな形状
あり

インダクタンスの動作(1)

- 教科書8ページ 図1.10を参照
- 断面積 A 、長さ l の鉄心に導線(巻線)を N 回巻く
- コイルに交流電流 $i(t)$ を流す
- 鉄心には交流の磁束 $\phi(t)$ が発生

$$\phi(t) = \frac{\mu AN}{l} i(t)$$

ここで、 μ は透磁率と呼ばれる定数

インダクタンスの動作(2)

- 交流電流 $i(t)$ の瞬時値が変化したとき鉄心の磁束 $\phi(t)$ の瞬時値も変化する
- コイルの両端にはその電流(もしくは磁束)の変化を妨げる方向に誘導起電力 $e(t)$ が発生

$$e(t) = -\underline{L} \frac{d}{\underline{dt}} i(t)$$

比例定数:
自己インダクタンス

電流の微分に比例する
電流とは位相が90度進む

インダクタンスの動作(3)


- これまでは鉄心に1つの導線(巻線)を巻いた場合の話であった
- ここで同じ鉄心に2つの導線(巻線)を巻いたらどうなるか？
- 教科書10ページの図1.11を参照
- コイルAとコイルBにそれぞれ電流 I_A, I_B を流す
- それぞれの電流によって鉄心内には平衡した磁束 $\phi(t)$ が発生する

インダクタンスの動作(4)

- ここでコイルAには、コイルBの電流 I_B の変化により起電力 e_A が誘導される

$$e_A = -\underline{\underline{M}} \frac{d}{dt} I_B$$

共通の比例定数
相互インダクタンス



- 同様にコイルBには、コイルAの電流 I_A の変化により起電力 e_B が誘導される

$$e_B = -\underline{\underline{M}} \frac{d}{dt} I_A$$

共通の比例定数
相互インダクタンス



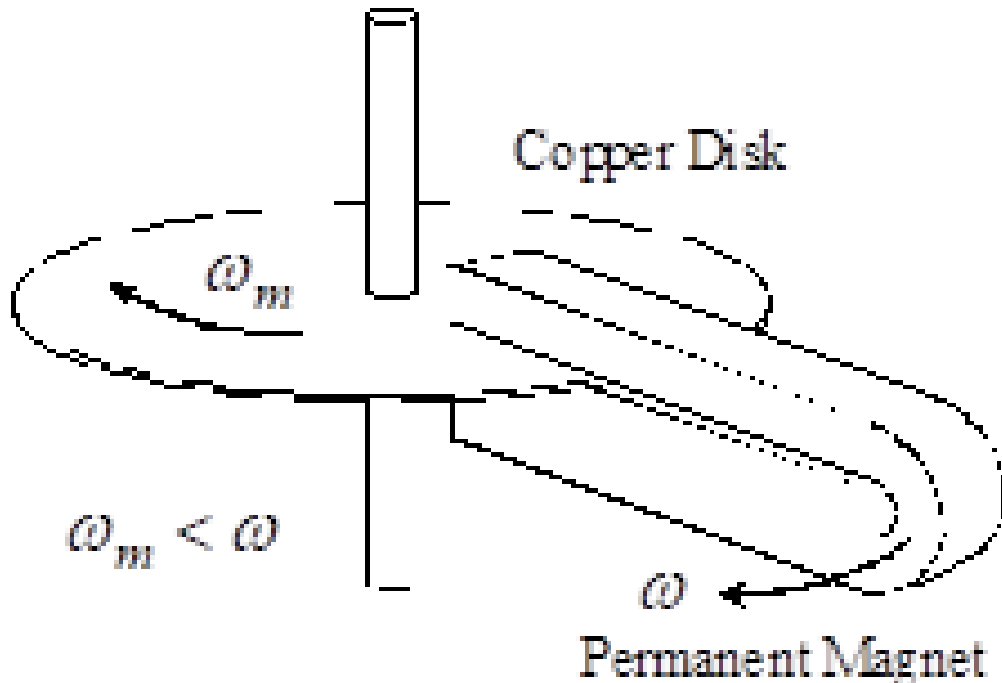
- 各コイルには自己インダクタンスがそれぞれ存在し以下の関係で相互インダクタンスが決まる

$$M = k \sqrt{L_A \cdot L_B} \quad 0 \leq k \leq 1$$

改めて実験の座学に入ります

- Ilias から以下のものをダウンロードしてください
 - ガイダンスで配布された実験のレポートの書式ファイル(wordのファイル)
 - LectureMaterial_InductionMotor_R02.pdf
 - この講義の基本となる実験指導書とレポート課題含む

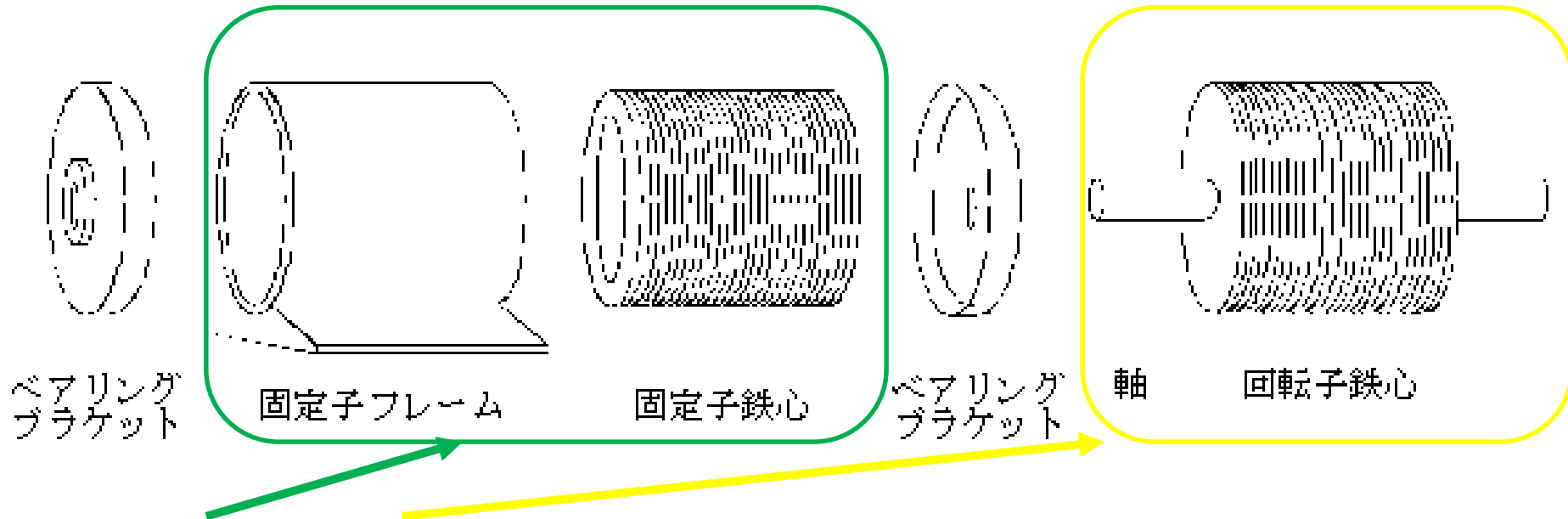
アラゴ円盤



- 円盤は銅、アルミ等の非磁性体
- 円盤は軸を中心に自由に回転
- 磁石は円盤を挟むように配置
- 接触はしない

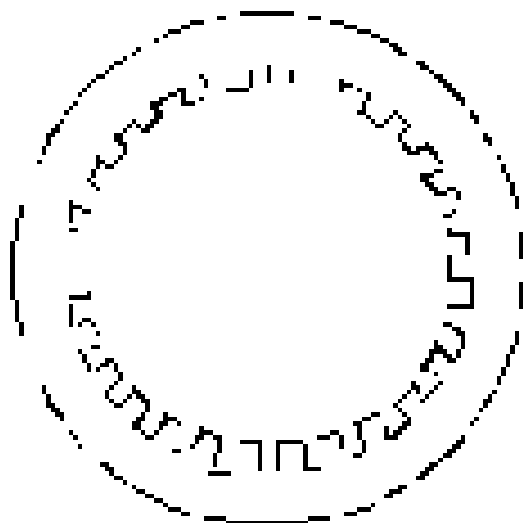
1. 磁石を円盤に沿って移動
2. 磁石の作る磁束は円盤上を移動
3. 円盤状の磁束は変化するので電磁誘導で起電力が発生
4. 円盤にうず電流が流れる
5. 渦電流と磁石の磁界の間に電磁力が働く
6. 円盤が磁石よりやや遅れて回転

誘導電動機の構造



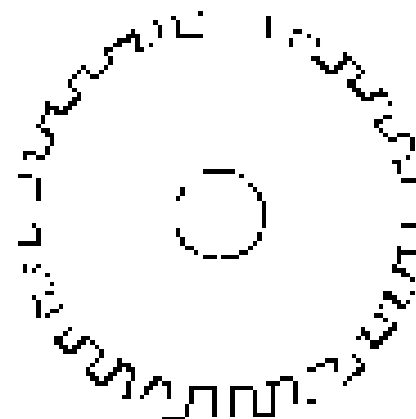
- 固定子 と 回転子 からなる
- 固定子は、移動する磁石に相当
- 回転子は、円盤に相当
- 固定子の円筒の中に回転子と軸が置かれる構造
- 固定子と円筒の間のアギャップは 0.1~0.3 mm 程度 (非常に狭い)
- 変圧器と似たような構成 (2つの鉄心と巻線が磁氣的に結合している)
- 固定子側を1次側と呼ぶ
- 回転子側を2次側と呼ぶ

固定子鉄心および回転子鉄心



固定子鉄心けい素鋼板

- けい素鋼板をリング状に切り出して積層
- 内側に巻線用のスロット形状をつける



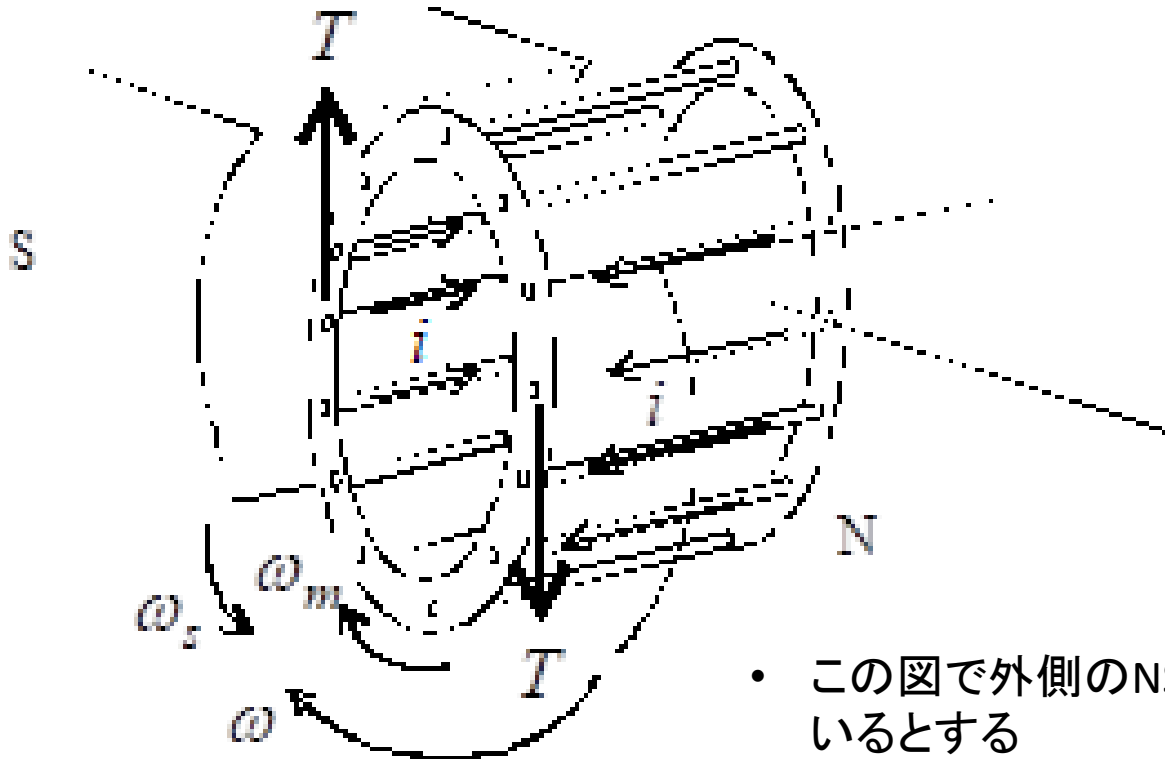
回転子鉄心けい素鋼板

- けい素鋼板を円状に切り出して積層
- 外側に巻線用のスロット形状をつける

巻線構造

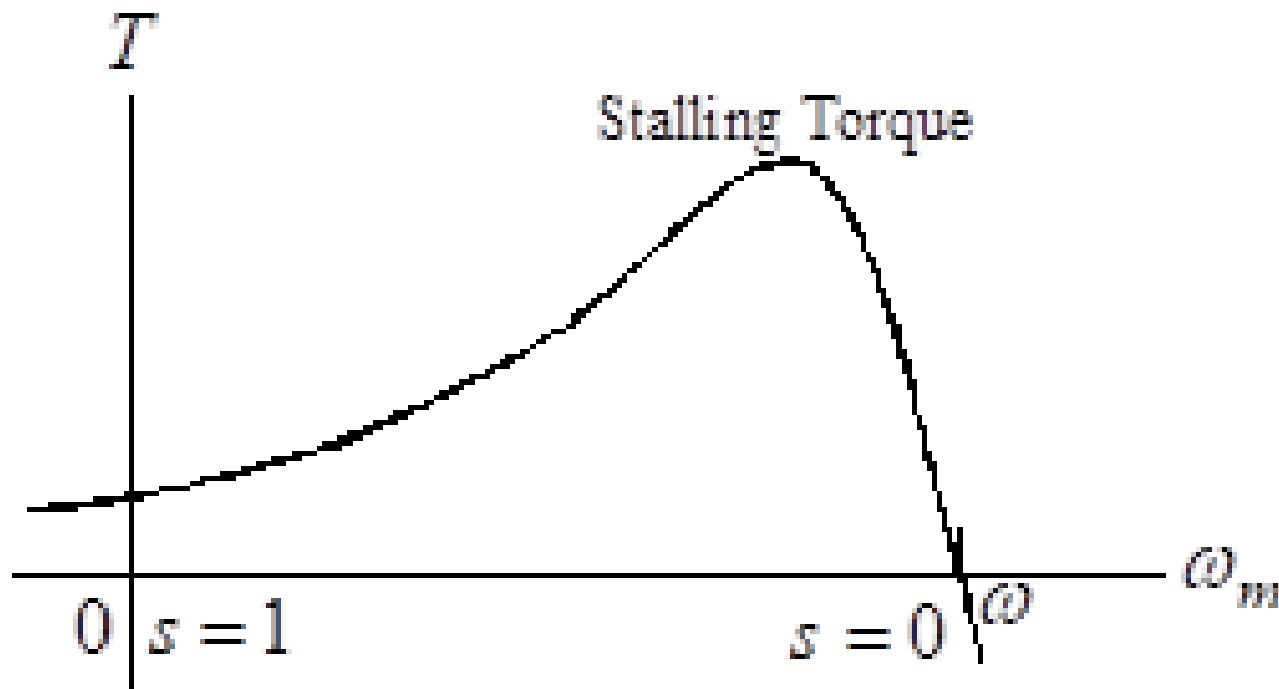
- 固定子巻線
 - 形成したスロットに、お互いに 120deg ずつ角度を持って、3本の相当の巻線を巻く：三相巻線
 - 3つの巻線にはそれぞれ端子をつける
- 回転子巻線
 - 巻線型
 - 形成したスロットに固定子と同様の3相巻線を巻く
 - 3つの巻線にはそれぞれ端子をつける
 - 端子は軸上のスリップリングを介してモータの外へ接続する
 - かご型
 - 成形したスロットに導体バー(アルミや銅)を埋め込む
 - 各導体バーの両端は、エンドリングで短絡する
 - かご型回転子はアラゴの円盤によく似た導体となるが、渦電流ではなく交流電流が流れる

実際の誘導電動機の動作原理(1)



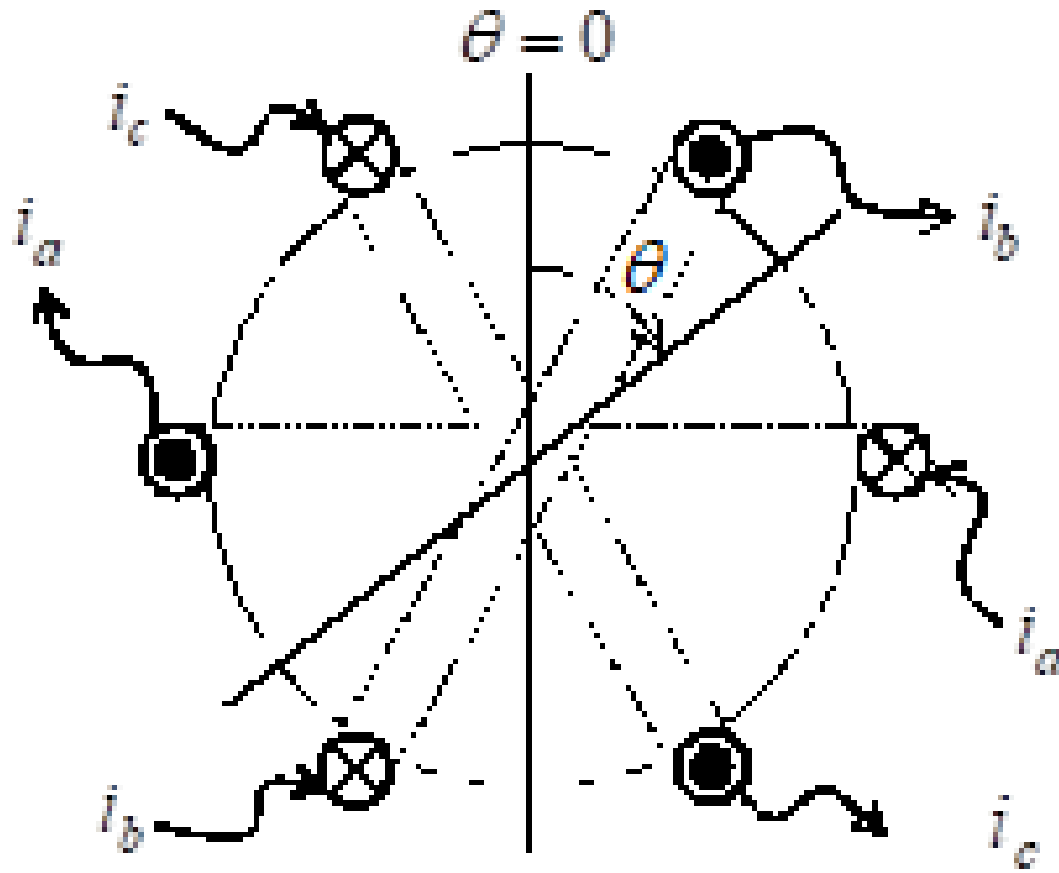
- この図で外側のNS磁石が回転速度 ω で回転しているとする
- 回転子の導体には矢印の方向に電流 i が流れる
- この電流とNS磁石が作る磁束がトルク T を作る
- トルクによって回転子は ω_m で回転する
- NS磁石の回転速度と回転子の回転速度は差がある
- この差をすべり角周波数 ω_s と呼ぶ

実際の誘導電動機の動作原理(2)



- すべり(前述のすべり角周波数を回転磁界の速度で規格化したもの)とトルクの関係は上の図のようになる
- すべりは1と0の間の値となる
- すべりが1でないことは、すべり角周波数が0でありトルクは発生しない
- トルク傾向は2つある
 - すべりが0に近いところではすべりの増加に合わせてトルクも増加
 - すべりが1に近いところではすべりの増加に合わせてトルクが減少
- すべりが1のときは誘導機が止まっているときであるが、トルクは0ではない

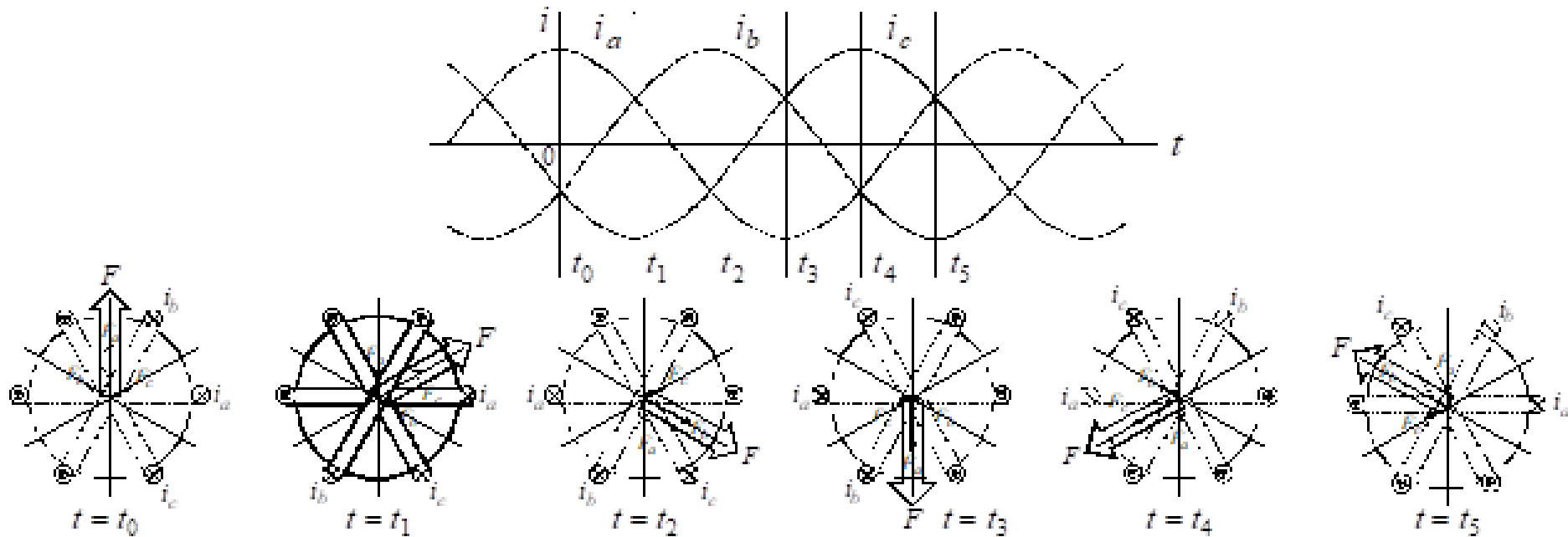
回転磁界を作ろう！（１）



- 固定子側の巻線を簡略化すると右図になる
- 3つのコイル a,b,c 空間的に120度筒位相がずれて配置されている
- このコイルは Y 結線 Δ 結線 どちらで結線してもよい
- 巻線に3相交流電圧をかけるとコイルに流れる電流は、理想的には以下になる。

$$\begin{cases} i_a = I \cos \omega t \\ i_b = I \cos(\omega t - 2\pi/3) \\ i_c = I \cos(\omega t - 4\pi/3) \end{cases}$$

回転磁界を作ろう！（２）



- 各時刻にコイルに流れる電流を考えると上図となる
- 右式のように固定子内部の角度 θ によって正弦波状に分布する起磁力を仮定する
- 固定子内部の起磁力は以下となる

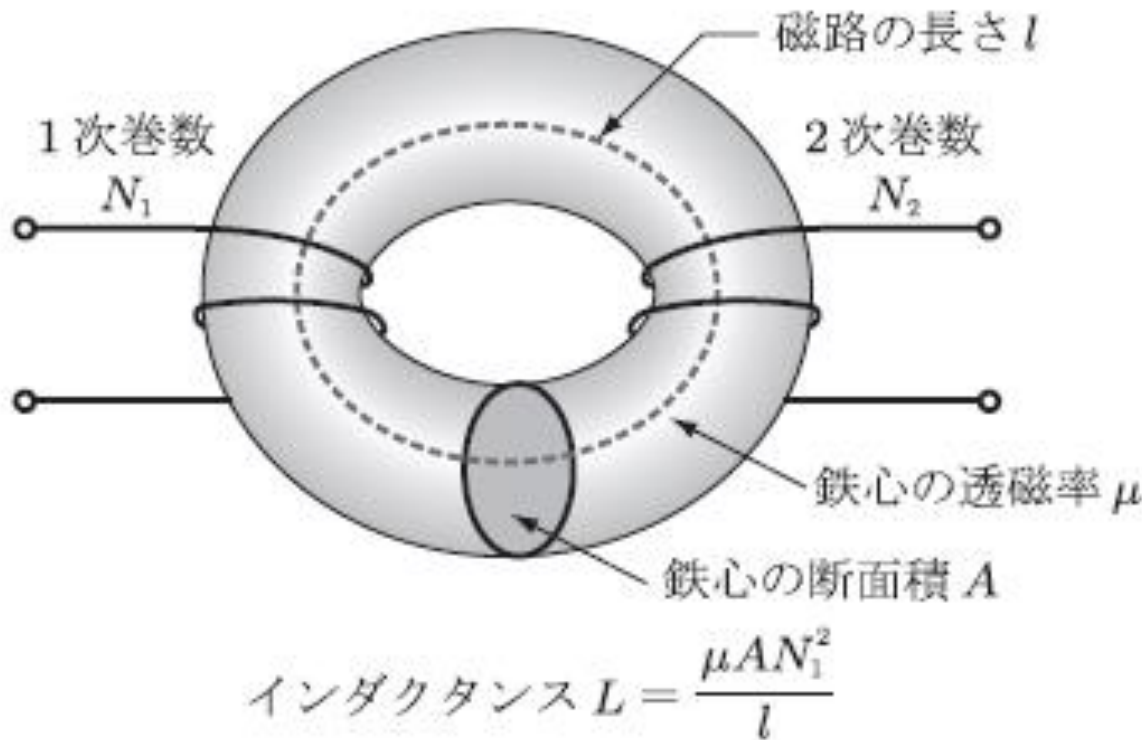
$$\begin{cases} F_a = Ni_a \cos \theta \\ F_b = Ni_b \cos(\theta - 2\pi/3) \\ F_c = Ni_c \cos(\theta - 4\pi/3) \end{cases}$$

$$F(\theta, t) = F_a + F_b + F_c = \frac{3}{2} NI \cos(\theta - \omega t)$$

小テスト兼小休憩1

- スライド21ページの $F(\theta, t)$ の式を導出しましょう！
 - 三角関数の公式を使うといいです。
 - 予定時間は30分です。

自己インダクタンスと相互インダクタンス(1)



$$L_{01} = \frac{\mu AN_1^2}{l}$$

$$L_{02} = \frac{\mu AN_2^2}{l}$$

$$M = \frac{\mu AN_1 N_2}{l}$$

インダクタンスは、磁路となる鉄心の断面積と透磁率、磁路の長さ、コイルの巻き数によって決まる。

主インダクタンスは、コイル自体の巻線の巻き数で決まる

相互インダクタンスは、双方のコイルの巻き数で決まる

なお、漏れインダクタンス成分については計算ができない

自己インダクタンスと相互インダクタンス(2)

ここで、巻き数比の関係に着目する

$$\frac{N_1}{N_2} = a, \Rightarrow N_1 = aN_2, N_2 = \frac{1}{a}N_1$$

相互インダクタンスの式を書き直す

$$M = \frac{\mu A}{l} N_1 N_2$$

大切なのは
相互インダクタンス

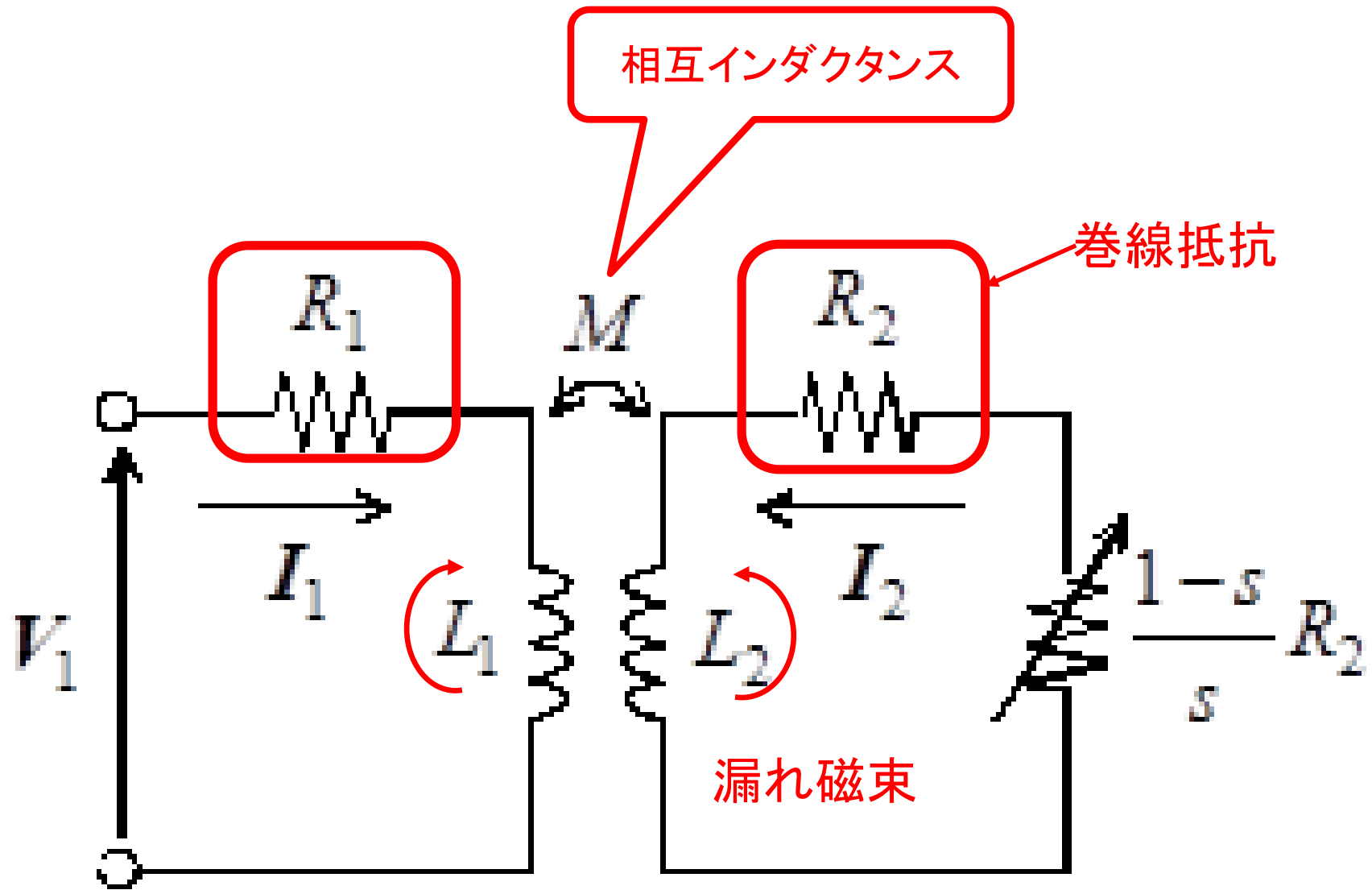


各コイルの主インダクタンスの式を書き直す

$$L_{01} = \frac{\mu A}{l} N_1^2 = \frac{\mu A}{l} N_1 a N_2 = aM$$

$$L_{02} = \frac{\mu A}{l} N_2^2 = \frac{\mu A}{l} \frac{N_2}{a} N_2 = \frac{1}{a}M$$

誘導機の等価回路(1)



誘導機の等価回路(2)

1次側巻線の回路方程式

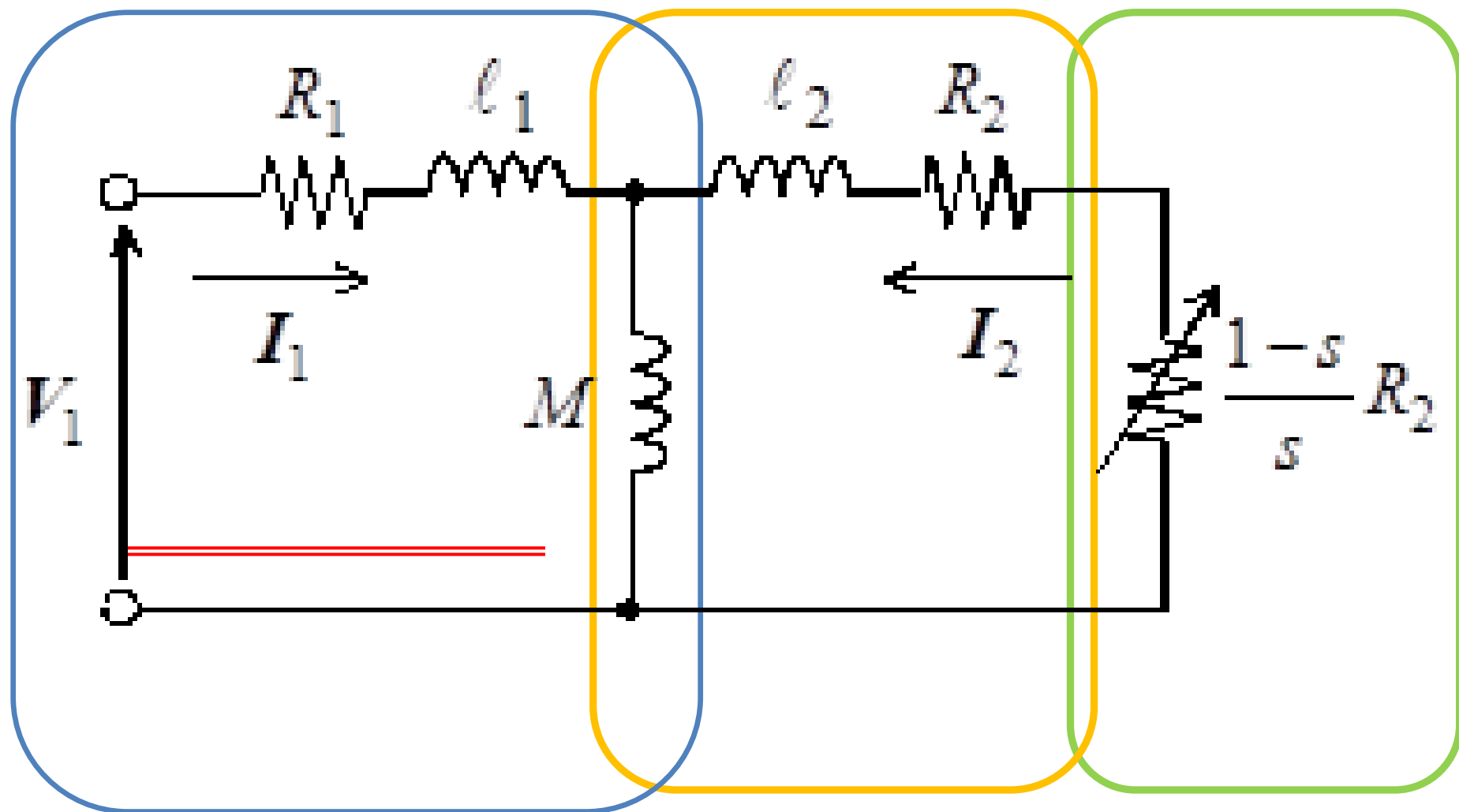
$$V_1 = R_1 I_1 + j \underline{\omega} L_1 I_1 + j \underline{\omega} \underline{M} I_2$$

2次側巻線の回路方程式

$$0 = j \underline{\omega}_s \underline{M} I_1 + R_2 I_2 + j \underline{\omega}_s L_2 I_2$$

- 1次側巻線は角周波数 ω で動作する
- 2次側巻線は角周波数 ω で動作する
- 両者の間の受け渡しは相互インダクタンス M が行う

誘導機の等価回路(3)



1次巻線回路

2次巻線回路

機械出力

ちょっと追加：鉄損

- これまで電気回路に基づいて誘導機の等価回路を導出
- 磁気回路の損失を考慮できていない
- 磁気回路の損失は電気エネルギーの損失としてもとらえられる
- じゃあどこで損失を持たせる？
- それは共通項である相互インダクタンスのところでしょう！
- 結果的に、相互インダクタンスに並列に鉄損に相当する抵抗を挿入する
 - これは、磁化するための電気エネルギーから鉄損に相当するエネルギーを減算する効果があるので、エネルギーの観点からは理にかなっている

誘導機の等価回路(4)

等価回路、計算難しそうですねー。

ということで、より簡単にできる方法を考えてみましょう！

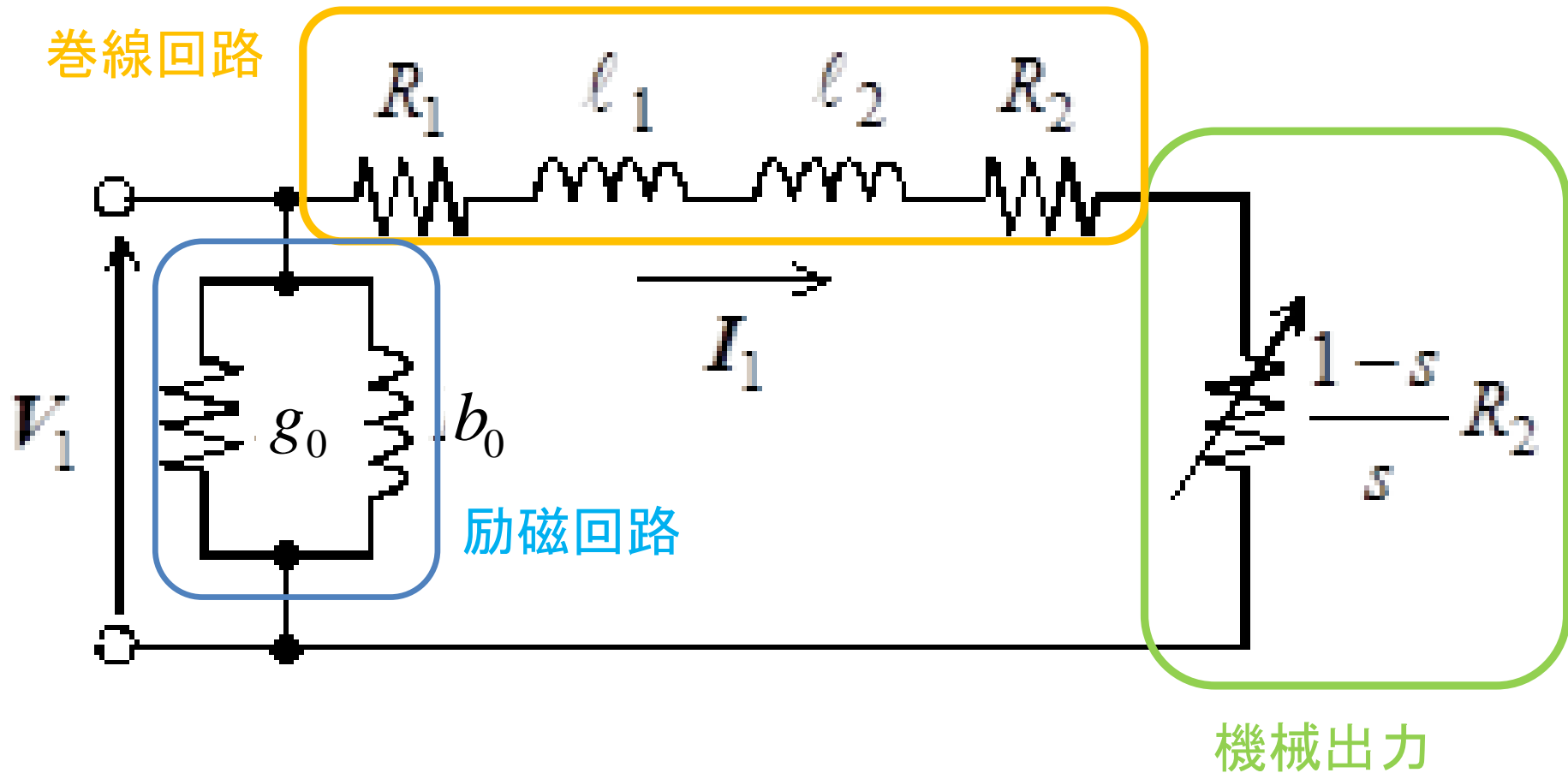
邪魔なのは真ん中にある励磁電流の流れる回路(励磁回路)

ここは無くせないけど、もっと簡単に計算できる場所に移したい

そこで！

1次回路のインピーダンスによる電圧降下が小さいと仮定すると励磁回路が、入力側(回路の左側)にあっても特に問題ないと考えることができる。

誘導機の等価回路(5)



誘導機の等価回路(6)

- 励磁回路:

- 鉄心の磁束を作る回路(鉄損と相互インダクタンスを含む)
- アドミッタンスで表す＝数値での取り扱いを容易にするため

$$\dot{Y}_0 = g_0 - jb_0[\text{S}]$$

$g_0[\text{S}]$: 励磁コンダクタンス

$b_0[\text{S}]$: 励磁サセプタンス

$Y_0[\text{S}]$: 励磁アドミッタンス

- インピーダンス:

- 1次側巻線と2次側巻線の抵抗と漏れインダクタンスの合成

$$\begin{aligned}\dot{Z}_S &= r_S + jx_S \\ &= (R_1 + R_2 + \frac{1-s}{s}R_2) + j(\omega l_1 + \omega l_2) \\ &= (R_1 + \frac{R_2}{s}) + j(x_1 + x_2)[\Omega]\end{aligned}$$

- 機械出力インピーダンス:

- 誘導機の機械出力を模擬する抵抗

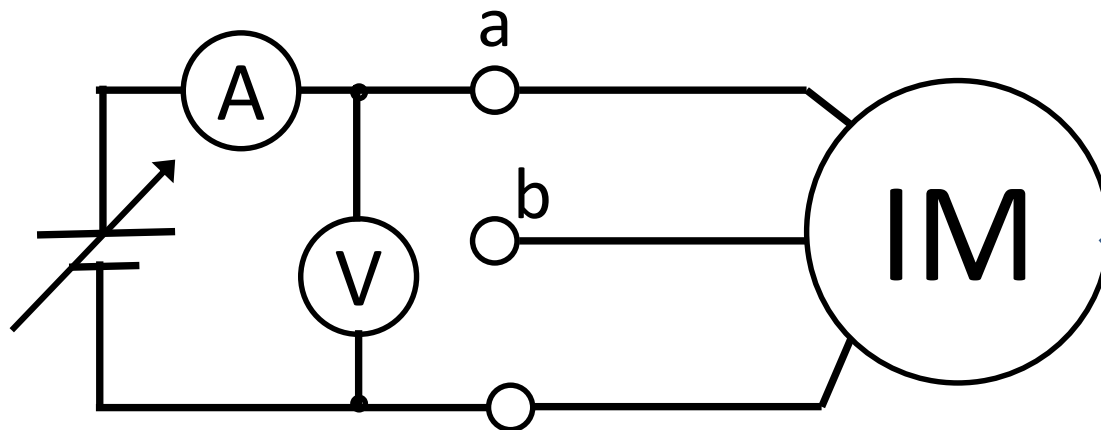
$$\frac{1-s}{s}R_2$$

等価回路定数を求めたい！

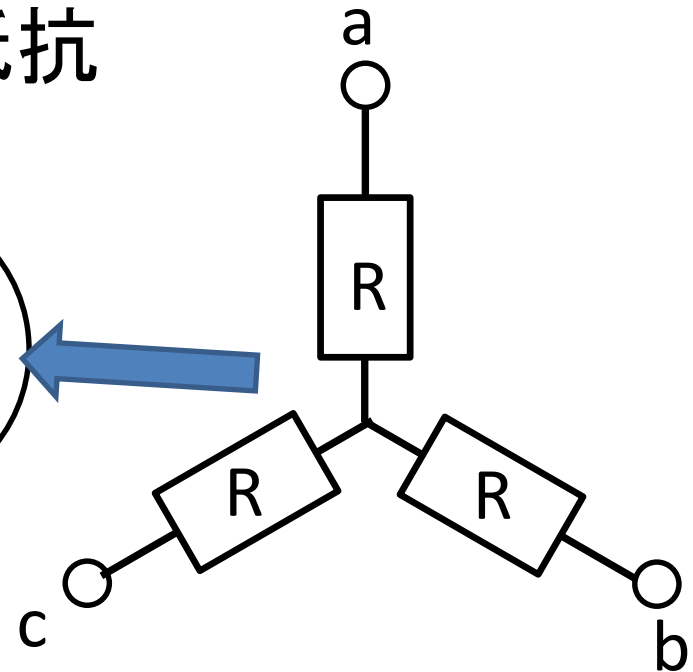
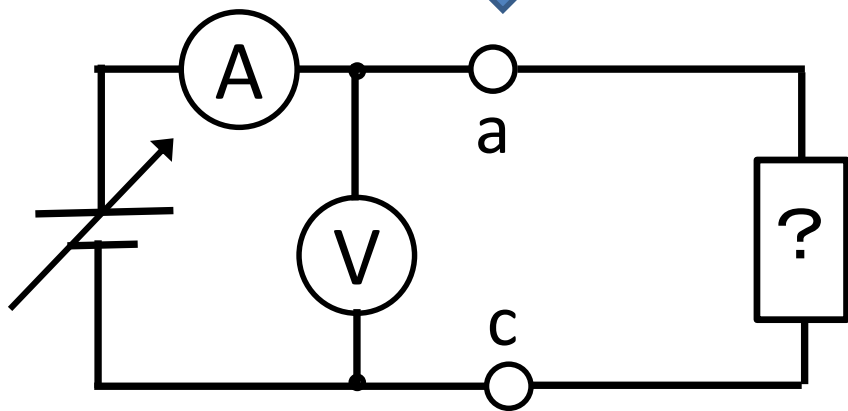
- 等価回路定数は、誘導機1つずつ異なる
- 今日の前にある誘導機の回路定数を求めるにはどうしたらいいか？
- 1つの方法：誘導機の検査証を見る
 - 検査証などがあればそれでもいい。
 - 誘導機は壊れにくいので、古いものも多数存在して、検査証が見当たらない場合もある
- 別の方法：測定する
 - 思い切って測定できれば簡単。
 - 実は量産品でも1台ずつ回路定数が違うので測ったほうが早い！
 - 等価回路定数の求め方：次の3つの試験で求める
 - 直流電位降下法
 - 無負荷試験
 - モータ回転軸に何もつけないで1次巻線に通電する
 - 負荷をつなげないので無負荷試験と呼ぶ
 - 拘束試験
 - モータ回転軸を固定して回転しないようにして1次巻線に通電する
 - 回転軸を固定するので高速試験と呼ぶ

直流電位降下法

求めたいのは各相の巻線抵抗

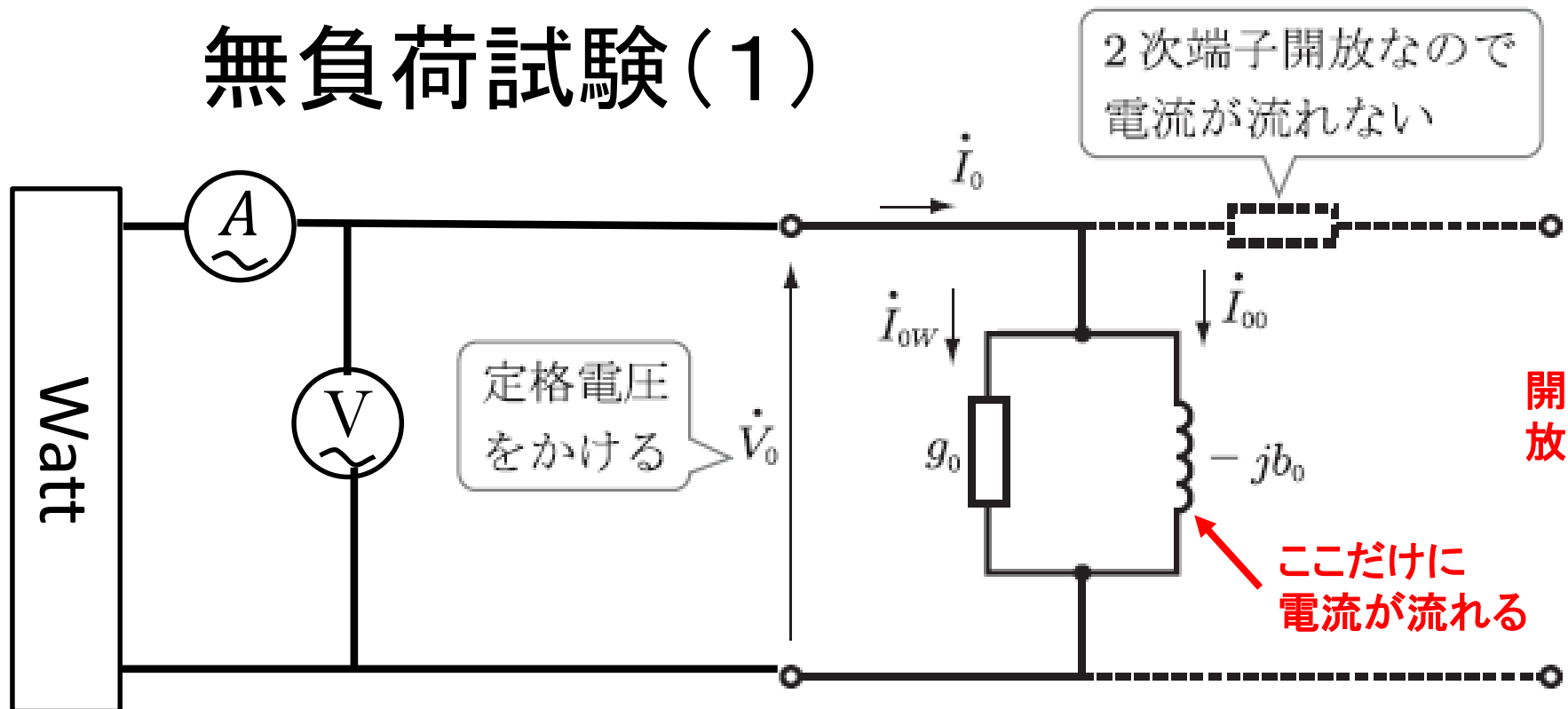


- 端子間に直流を入れたとしたら、等価的な回路は以下になる



- 誘導機の中は3相のY結線でコイルが巻かれている
- 各相の巻線抵抗はRとする
- 右の図で電圧計と電流計を使って測定した抵抗はいくつになる？
- この測定を常温で実施したとして、定格の温度である75度の時の抵抗値はどうやって計算する？

無負荷試験(1)



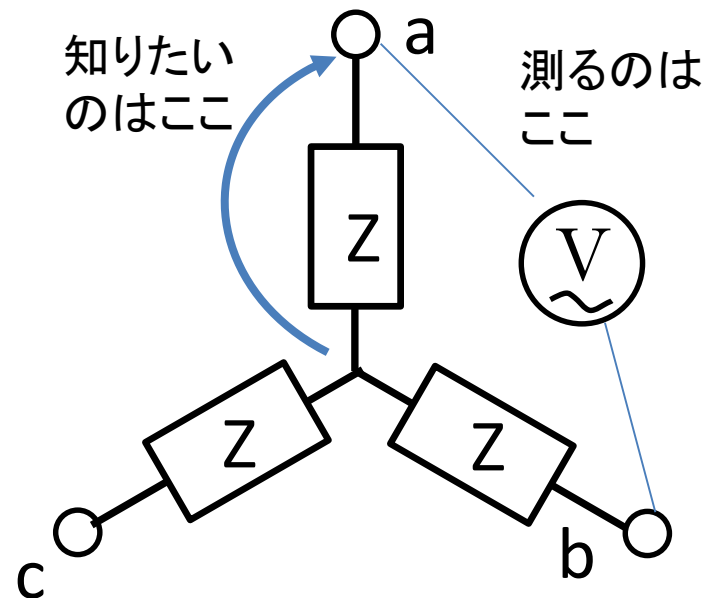
回転軸に何もつけないと何が起きる？

1次回路。2次回路には電流が流れない(電流経路がない)

電流が流れるのは、励磁回路のみ

電圧と電流の関係を測定したら定数が分かりそうだ！

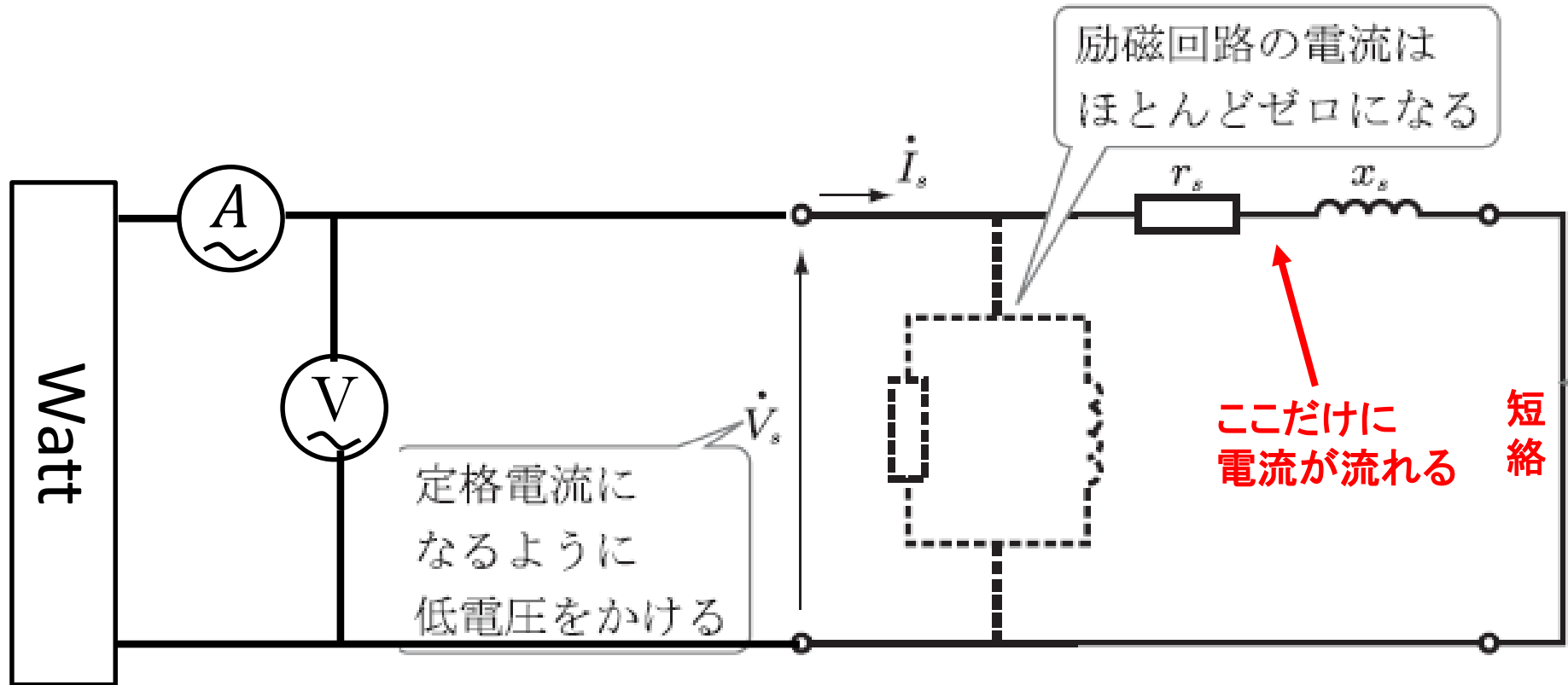
だけど、電圧計も電流計も大きさだけしか測れない
どうやったら測定できるか考えてみよう！



無負荷試験(2)

- 電流計で測定するもの $|\dot{I}_0| = \sqrt{\dot{I}_{0w}^2 + \dot{I}_{00}^2} = |\dot{Y}_0 \dot{V}_0| = \sqrt{g_0^2 + b_0^2} \dot{V}_0$
- 電圧計で測定するもの $|\dot{V}_0|$
- 電力計で測定するもの $P_0 = \dot{I}_{0w} \dot{V}_0 = g_0 \dot{V}_0^2$
- 測定値から回路定数を求める
 - 電圧計と電力計から(電力の式から)励磁コンダクタンスを求める
 - (どんな式になる?)
 - 電流計と電圧計と電力計から励磁サセプタンスを求める
 - (どんな式になる?)
 - 計測結果から回路定数が求められる

拘束試験(1)



回転軸を拘束すると何が起きる？

短絡電流は大きいので、低い電圧しかかけられない
励磁回路には電流が流れない。(電圧が低すぎるから)
電流が流れるのは、1次巻線、2次巻線のみ
電圧と電流の関係を測定したら定数が分かる！
無負荷試験と同じように求めてみよう！

短絡試験(2)

- 電流計で測定するもの $|\dot{I}_s|$
- 電圧計で測定するもの $|\dot{V}_s| = |\dot{Z}_s \dot{I}_s| = \sqrt{r_s^2 + x_s^2} \dot{I}_s$
- 電力計で測定するもの $P_s = r_s \dot{I}_s^2$
- 測定値から回路定数を求める
 - 電圧計と電力計から
 - (どんな式になる?)
 - 電流計と電圧計と電力計から
 - (どんな式になる?)
 - 計測結果から回路定数が求められる

小テスト兼休憩2

- LectureMaterial_InductionMotor_R02.pdf の1-7ページ
2.11 式を 導出してみよう
- ヒント: 2.11式は等価回路の一番右にある抵抗で消費される電力を計算しています
抵抗に流れる電流を求めてください。
- なおこの問題はレポートの問題でもありますので早めにやっておくことを進めます
- 予定時間は40分です。

レポートについて

- レポートの課題
 - LectureMaterial_InductionMotor_R02.pdf
の1-9ページに太文字で書いています。
- これまでの実験と同様に電子ファイルで提出してください。
- 提出期限 6月25日(木) 12:30
- やむを得ない理由で遅れるなどの場合は必ず！事前に miyazaki@vos.nagaokatuac.jp まで連絡をしてください。