

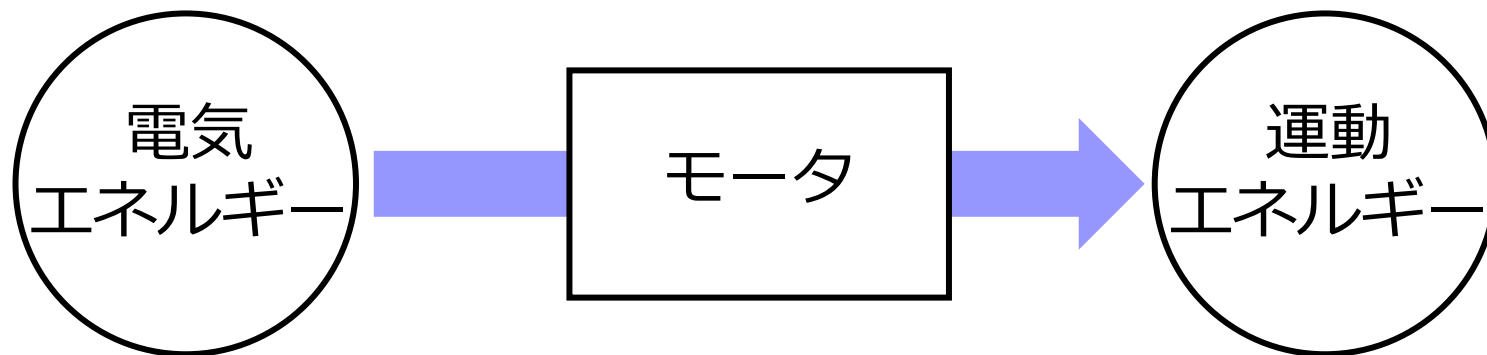
# IPMSMの回生動作とMPPT制御

## Maximum Power Point Tracking Control

大阪府立大学 工学研究科  
清水 悠生

# モータの回生状態とは？

- ✓ モータは電気エネルギーを運動エネルギーに変換するが逆に**運動エネルギーを電気エネルギーに変換する動作**のことを**電力回生（回生制動，回生ブレーキ）**という



力行(リックウ)状態



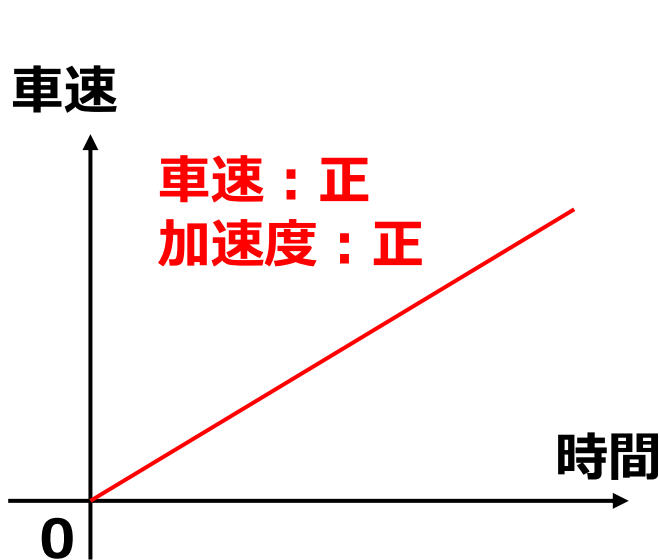
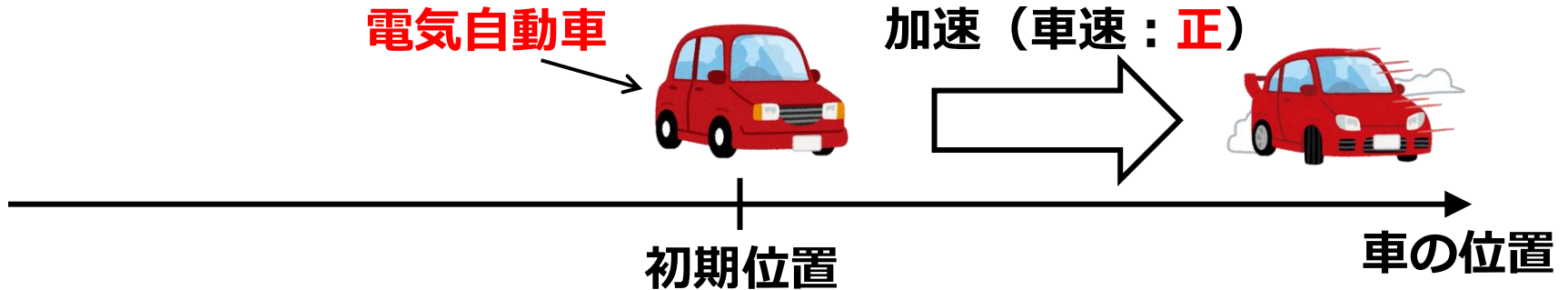
回生(カエイ)状態

# 回生したエネルギーはどこへ？

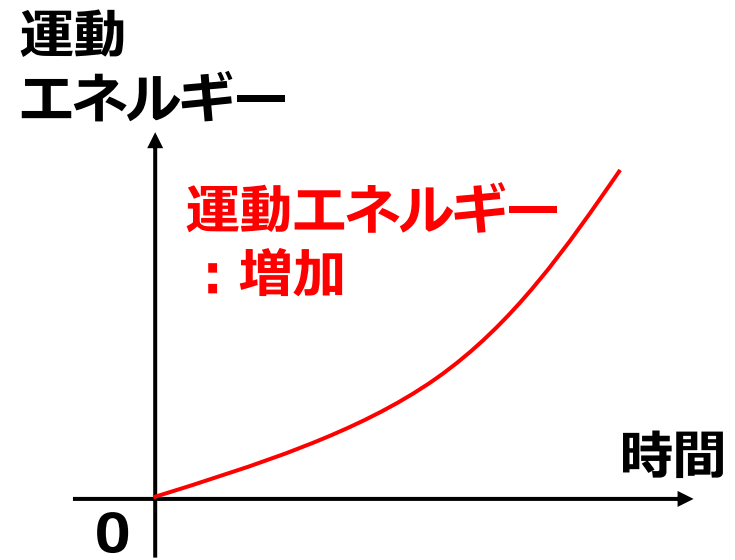
- ✓ 回生した電気エネルギーはバッテリーに充電されたり抵抗で消費したりする

# 力行と回生のイメージ（**前進**，**加速**）

- ✓ イメージとして電気自動車で考える
- ✓ 前進，加速の**力行状態**では**車速も車に加わる力も正**



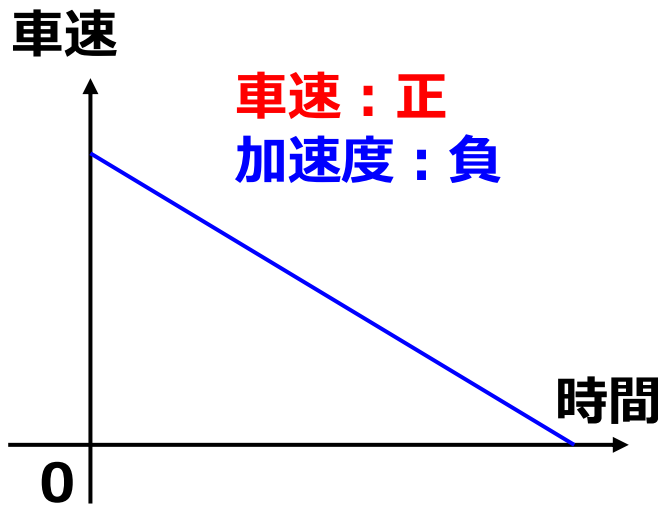
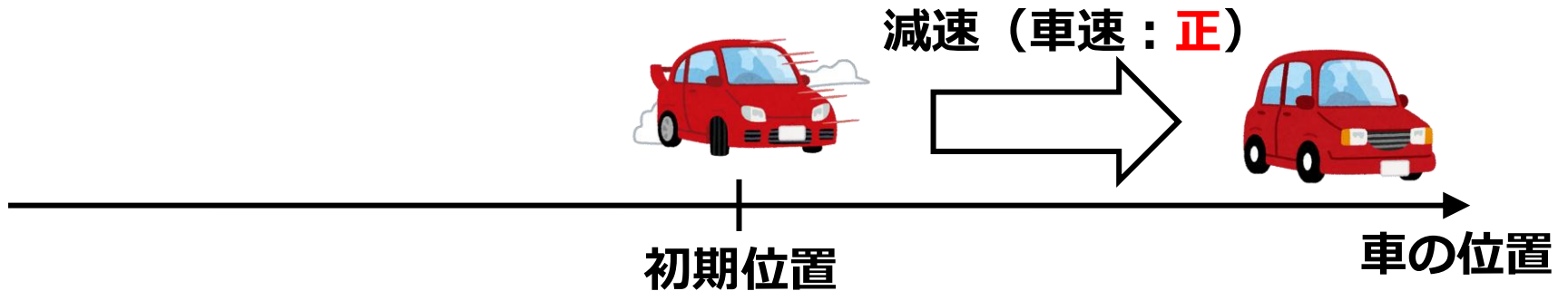
**加速度が正**  
⇒運動方程式( $F=ma$ )より  
車に加わる**力**は**正**



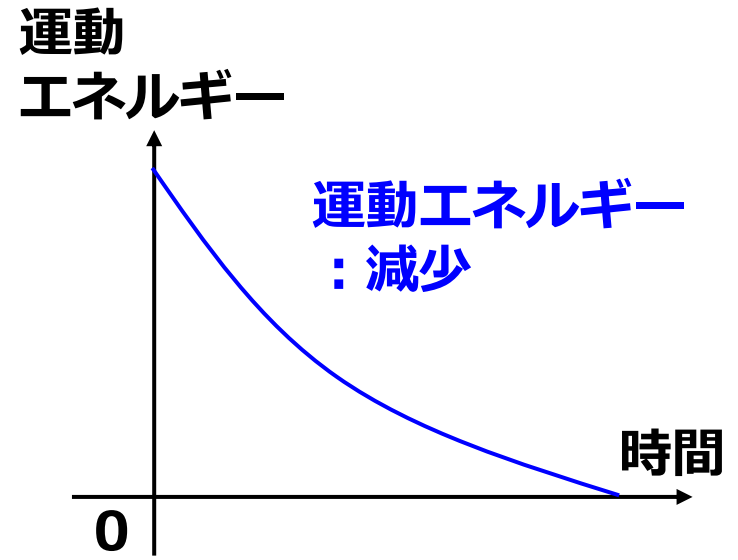
電気エネルギーを消費して  
運動エネルギーに変換  
⇒**力行状態**

# 力行と回生のイメージ（**前進**，**減速**）

✓ 前進，減速の回生状態では車速は正だが車に加わる力は負



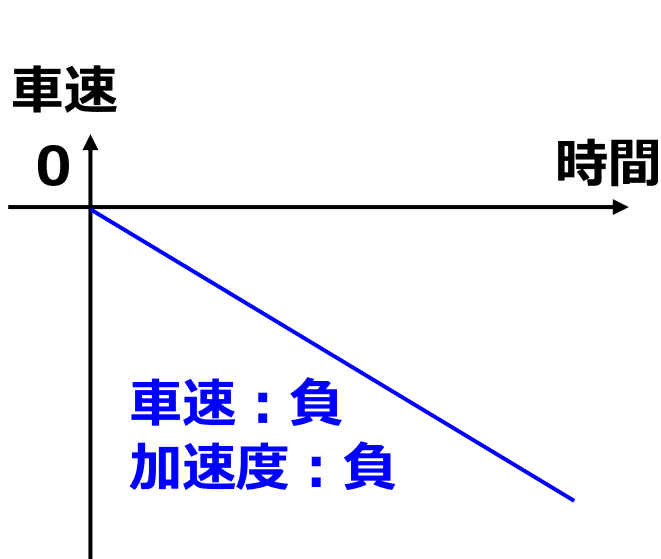
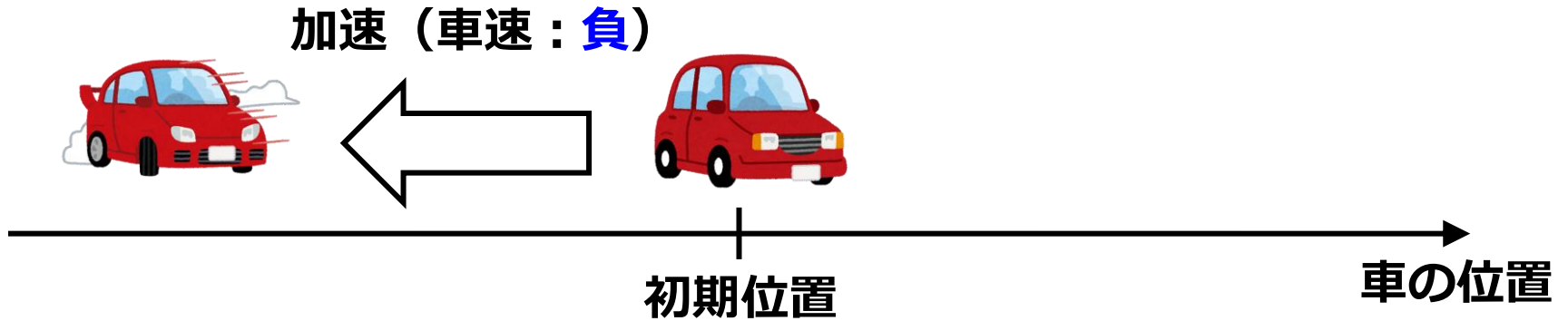
**加速度が負**  
⇒運動方程式( $F=ma$ )より  
車に加わる力は負



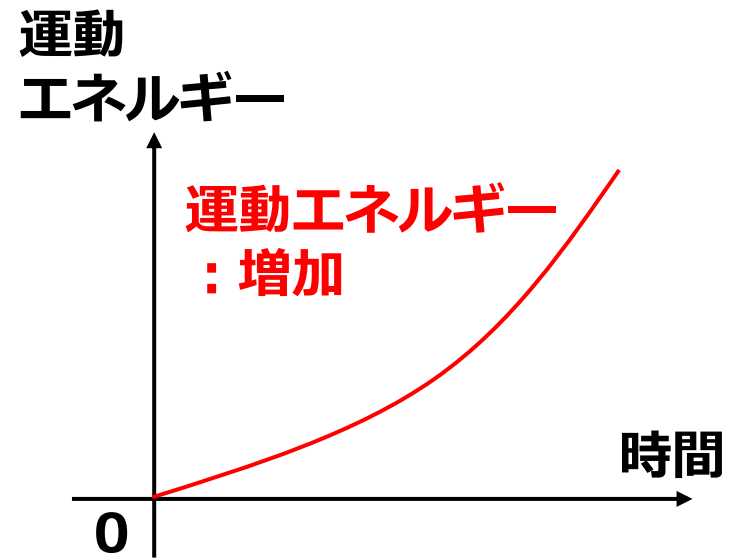
運動エネルギーを消費して  
電気エネルギーに変換  
⇒**回生状態**

# 力行と回生のイメージ (後進, 加速)

✓ 前進, 加速の力行状態では車速も車に加わる力も負



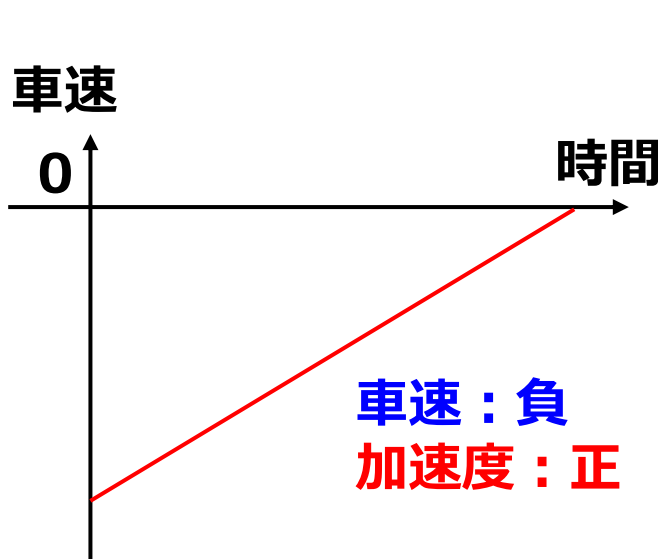
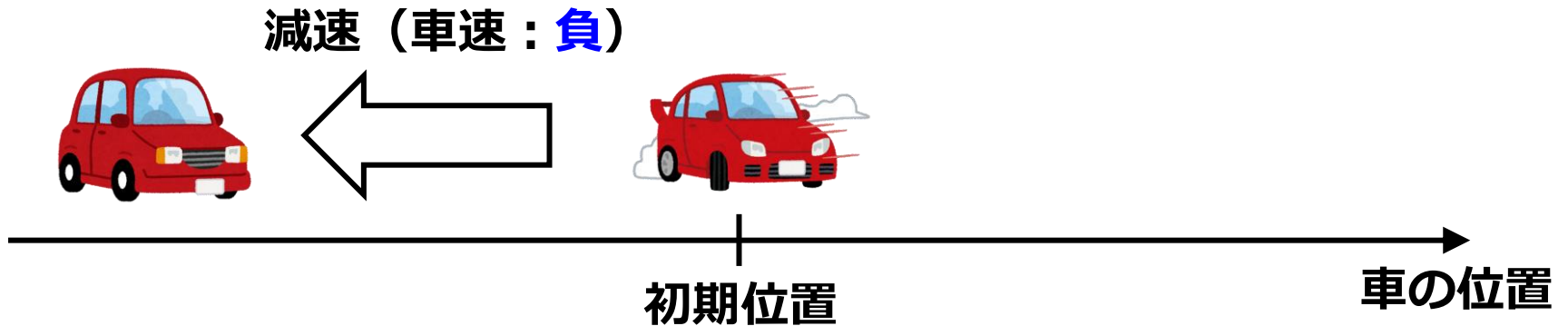
加速度が負  
⇒運動方程式( $F=ma$ )より  
車に加わる力は負



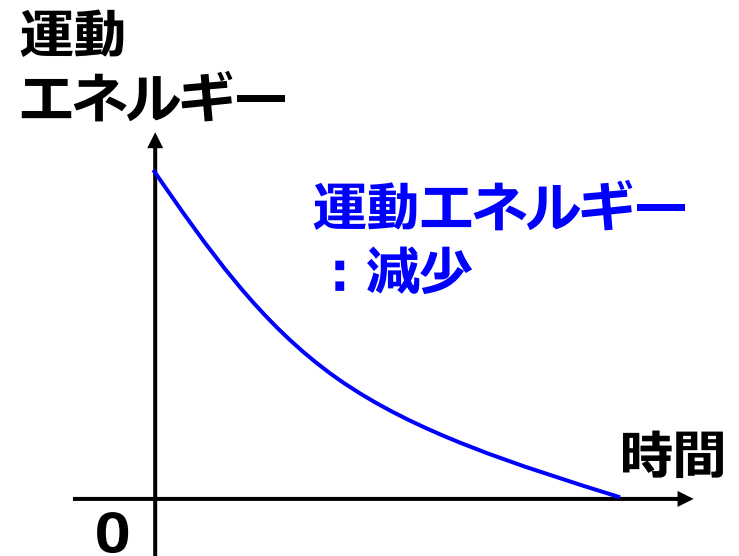
電気エネルギーを消費して  
運動エネルギーに変換  
⇒力行状態

# 力行と回生のイメージ（後進，減速）

✓ 前進，減速の回生状態では車速は負だが車に加わる力は正



**加速度が正**  
⇒運動方程式( $F=ma$ )より  
車に加わる力は**正**



運動エネルギーを消費して  
電気エネルギーに変換  
⇒**回生状態**

# まとめると…

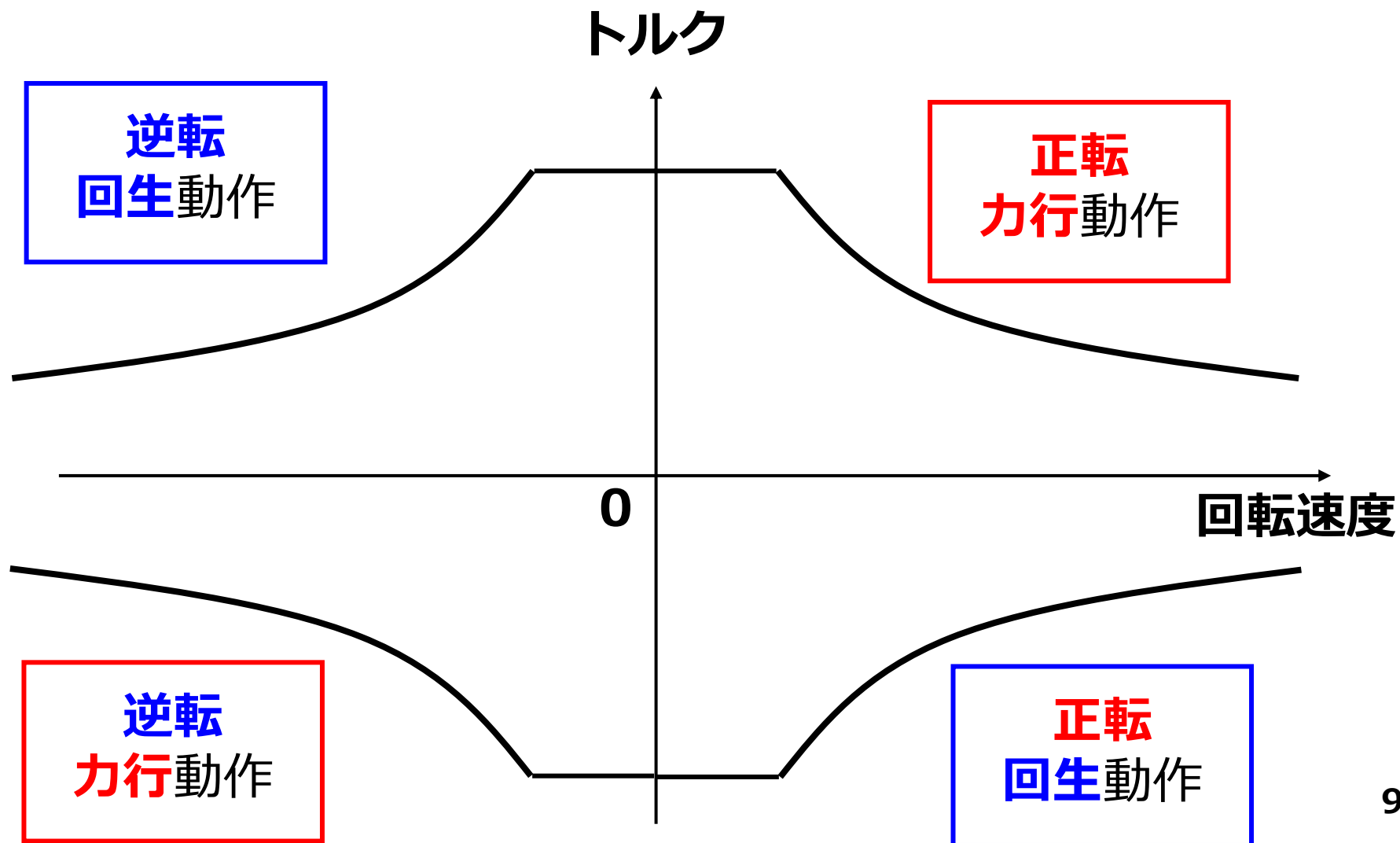
- ✓ 今までの話をまとめると  
車速と加速度 or 車速と車に加わる力 の符号が  
同じであれば力行状態，異なれば回生状態

車速	加速度	車に加わる力	状態
正	正	正	力行
正	負	負	回生
負	負	負	力行
負	正	正	回生



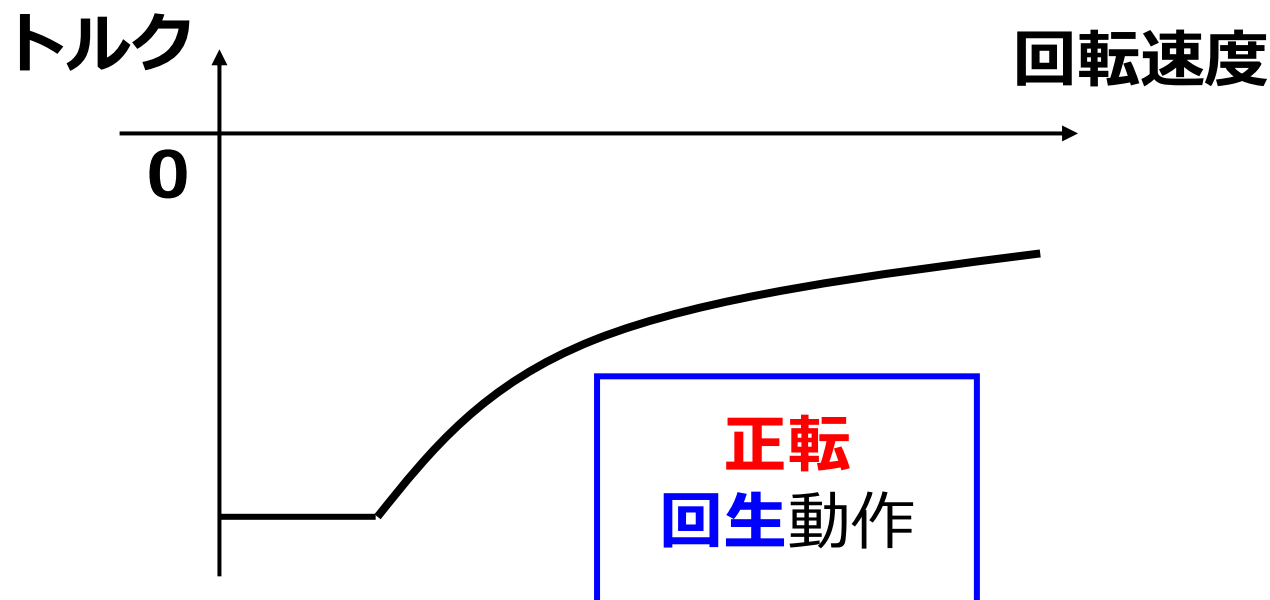
# モータの世界に落とし込む

- ✓ 車速⇒回転速度, 車に加わる力⇒トルク(回転運動への変換)  
とすると下図のような関係になる



# 正転時の回生動作

- ✓ 以下では、正転時の回生動作について議論する

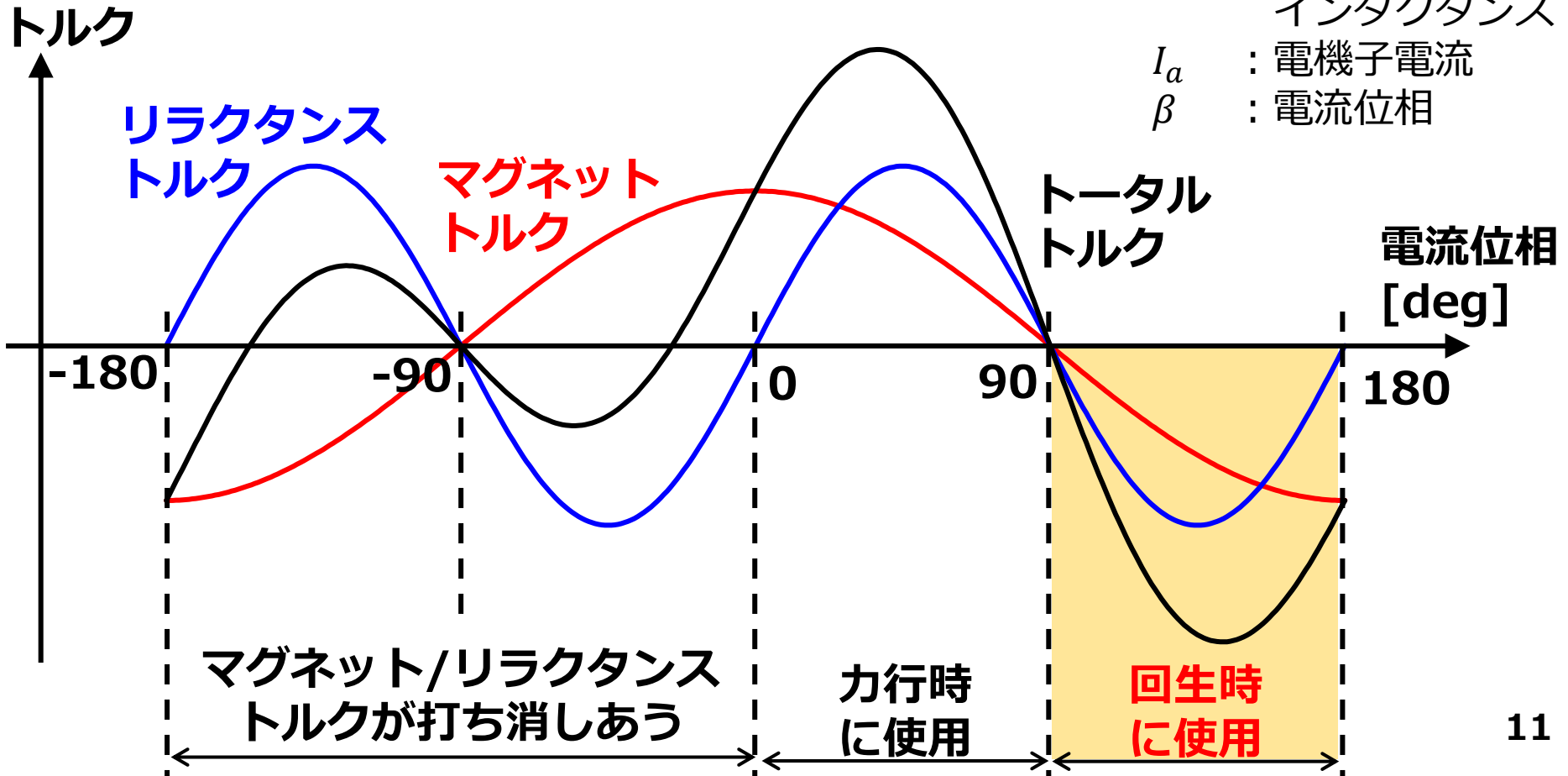


# 回生時に用いる電流位相領域

✓ 回生時にはトータルトルクが負方向に大きくなる電流位相90-180°の領域を使用

$$T = P_n \left( \underbrace{\Psi_a I_a \cos\beta}_{\text{磁気トルク}} + \underbrace{\frac{1}{2}(L_q - L_d) I_a^2 \sin 2\beta}_{\text{リラクタンストルク}} \right)$$

- $P_n$  : 極対数
- $\Psi_a$  : 永久磁石による電機子鎖交磁束
- $L_d, L_q$  : d,q軸インダクタンス
- $I_a$  : 電機子電流
- $\beta$  : 電流位相



# 回生時の電流制限を考慮したMPPT制御

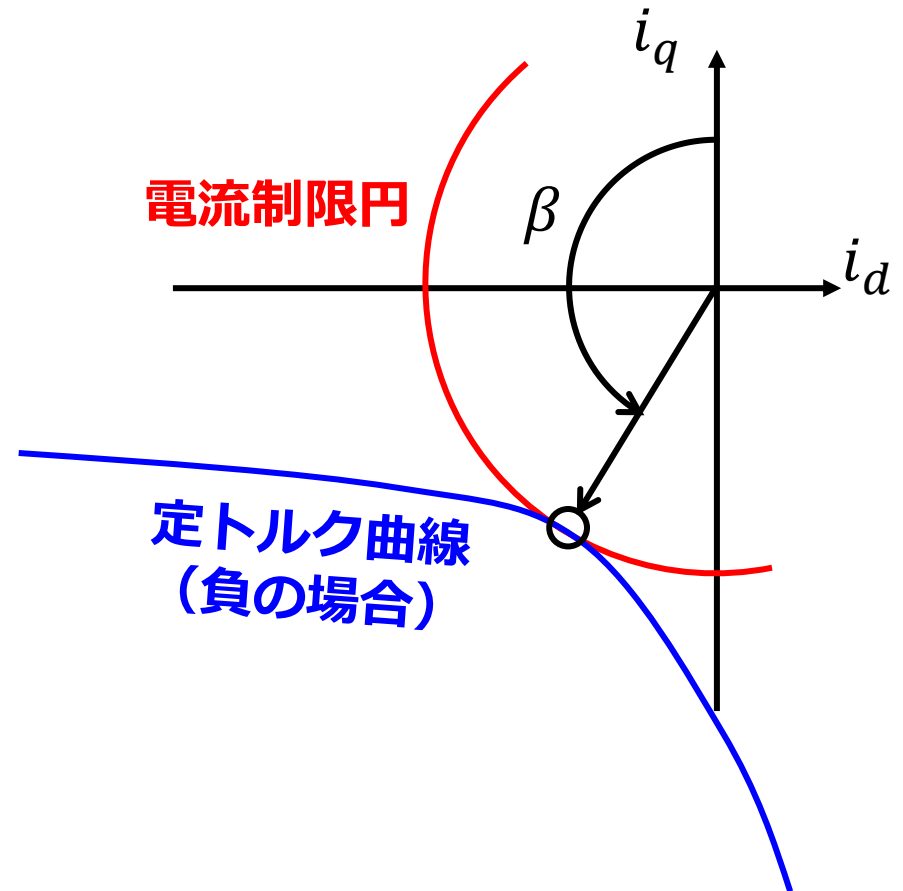
- ✓ 回生時の電流制限を考慮したMPPT制御は力行時のMTPA制御時の関係を $i_d$ 軸について反転

$$T = P_n(\Psi_a i_q + (L_d - L_q) i_d i_q)$$

$$\Leftrightarrow i_q = \frac{T}{P_n(\Psi_a + (L_d - L_q) i_d)}$$

$$= \frac{T}{P_n(L_d - L_q)} \cdot \frac{1}{i_d + \frac{\Psi_a}{L_d - L_q}}$$

↑ 反比例の式  $y=a/x$  を平行移動した形



# 回生時の電圧制限を考慮したMPPT制御

- ✓ 回生時の電圧制限を考慮したMPPT制御も同様に力行時のMTPF制御時の関係を $i_d$ 軸について反転

$$\Psi_o = \sqrt{(L_d i_d + \Psi_a)^2 + (L_q i_q)^2}$$

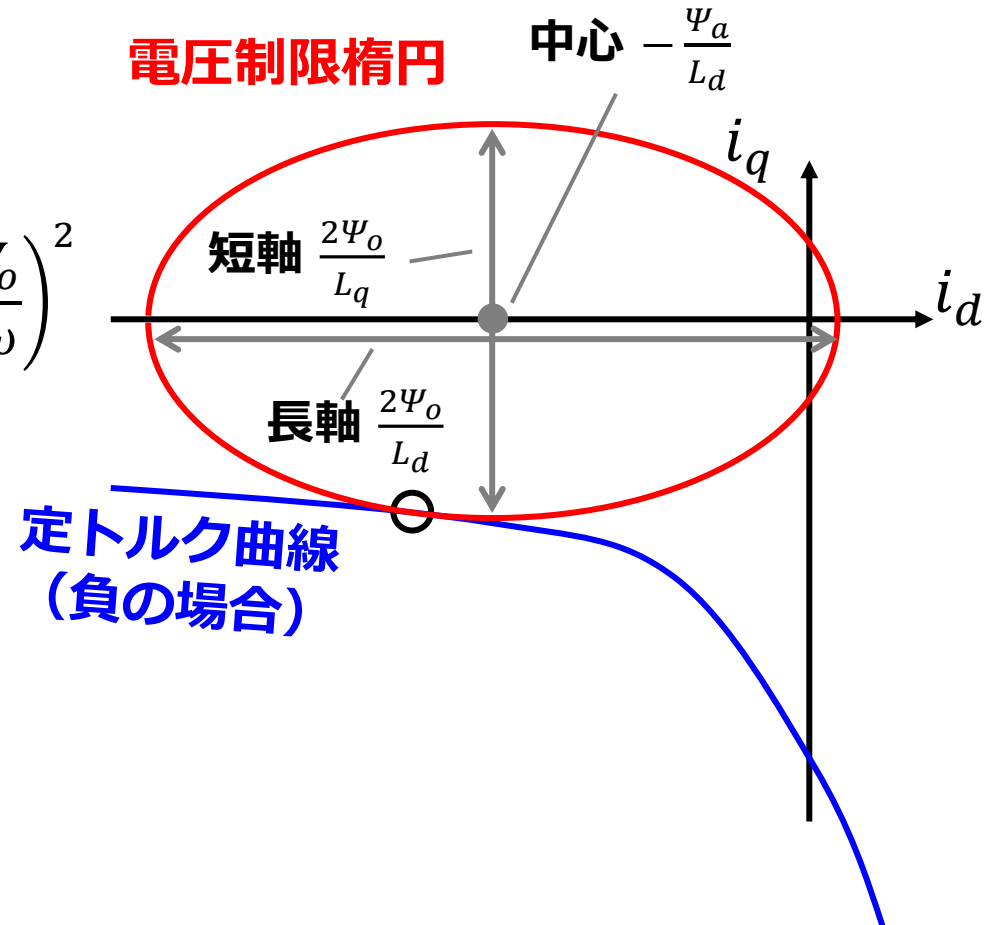
$$\Leftrightarrow \Psi_o^2 = (L_d i_d + \Psi_a)^2 + (L_q i_q)^2 = \left(\frac{V_o}{\omega}\right)^2$$

$$\Leftrightarrow 1 = \left(\frac{i_d + \Psi_a/L_d}{\Psi_o/L_d}\right)^2 + \left(\frac{i_q}{\Psi_o/L_q}\right)^2$$

↑ 楕円  $1 = (x/a)^2 + (y/b)^2$  を平行移動した形

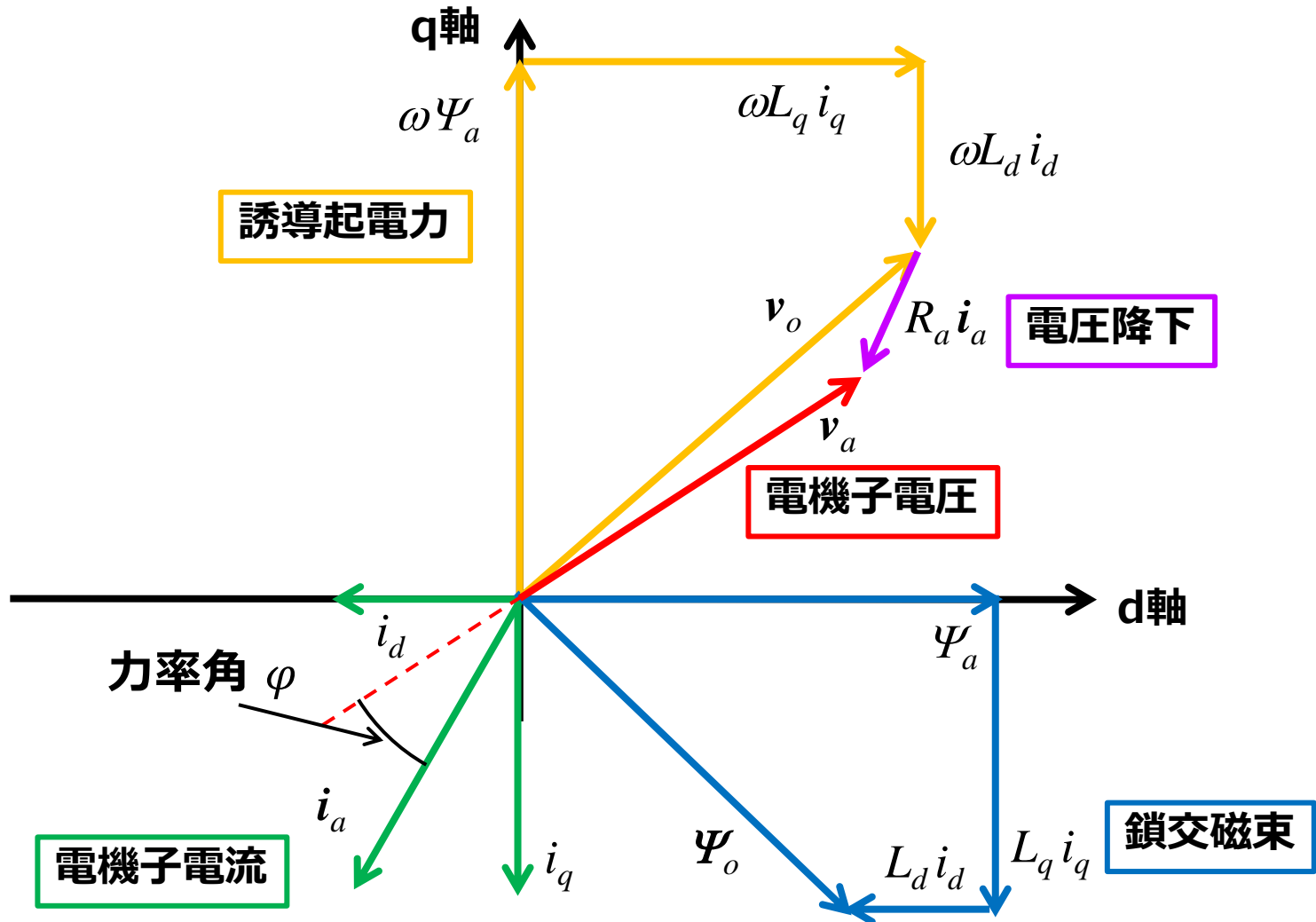
$V_o$ : 誘起電圧ベクトルの大きさ

$\omega$ : 角速度



# 回生時のd-q回転座標系の基本ベクトル図

- ✓ 回生時の定常状態におけるベクトル図は下図の通り
- ✓ 力行時のベクトル図の説明はこちら↓  
<https://yuyumoyuyu.com/2020/10/25/voltageequation3/>



# 回生時の誘起電圧制限値

- ✓ 回生時の誘起電圧制限値は力行時に比べて電圧降下の向きが変わるため大きくなる

右図より, 余弦定理を用いて

$$\begin{aligned}V_o^2 &= (R_a I_a)^2 + V_a^2 - 2R_a I_a V_a \cos(180 - \varphi) \\ &= (V_a + R_a I_a \cos\varphi)^2 + (R_a I_a \sin\varphi)^2\end{aligned}$$

電機子電圧制限値  $V_{am} \geq V_a$  を考えると

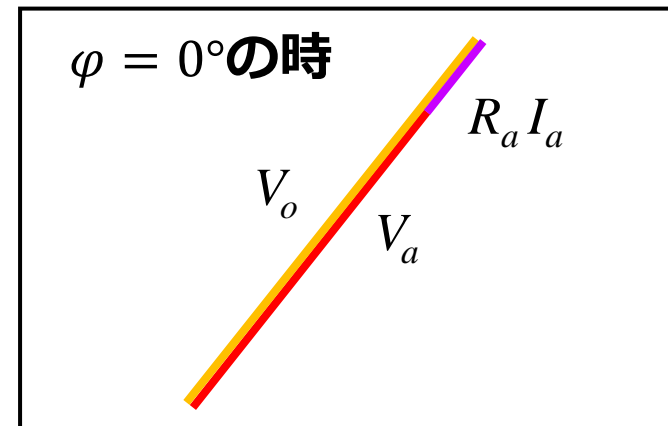
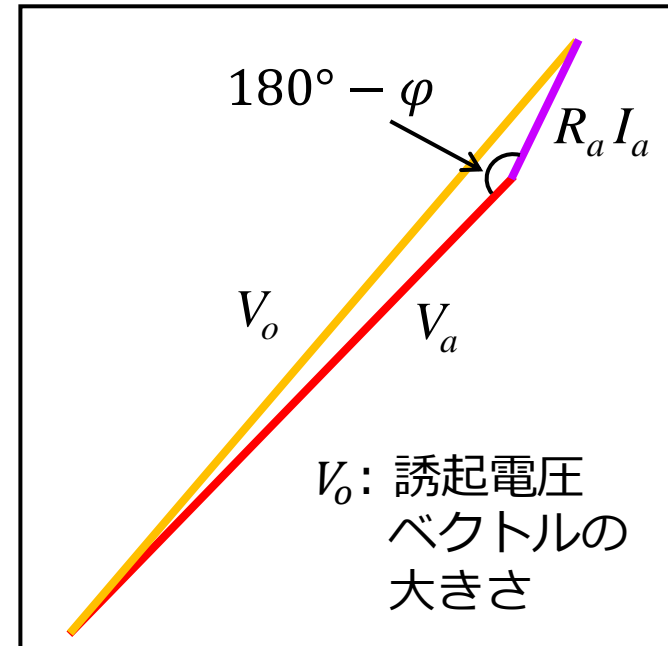
$$\begin{aligned}V_o &= \sqrt{(V_a - R_a I_a \cos\varphi)^2 + (R_a I_a \sin\varphi)^2} \\ &\leq \sqrt{(V_{am} + R_a I_a \cos\varphi)^2 + (R_a I_a \sin\varphi)^2} = V_{om}\end{aligned}$$

力率角が $0^\circ$ の時の誘起電圧制限値は

$$V_o = V_a + R_a I_a \leq V_{am} + R_a I_a = V_{om}$$

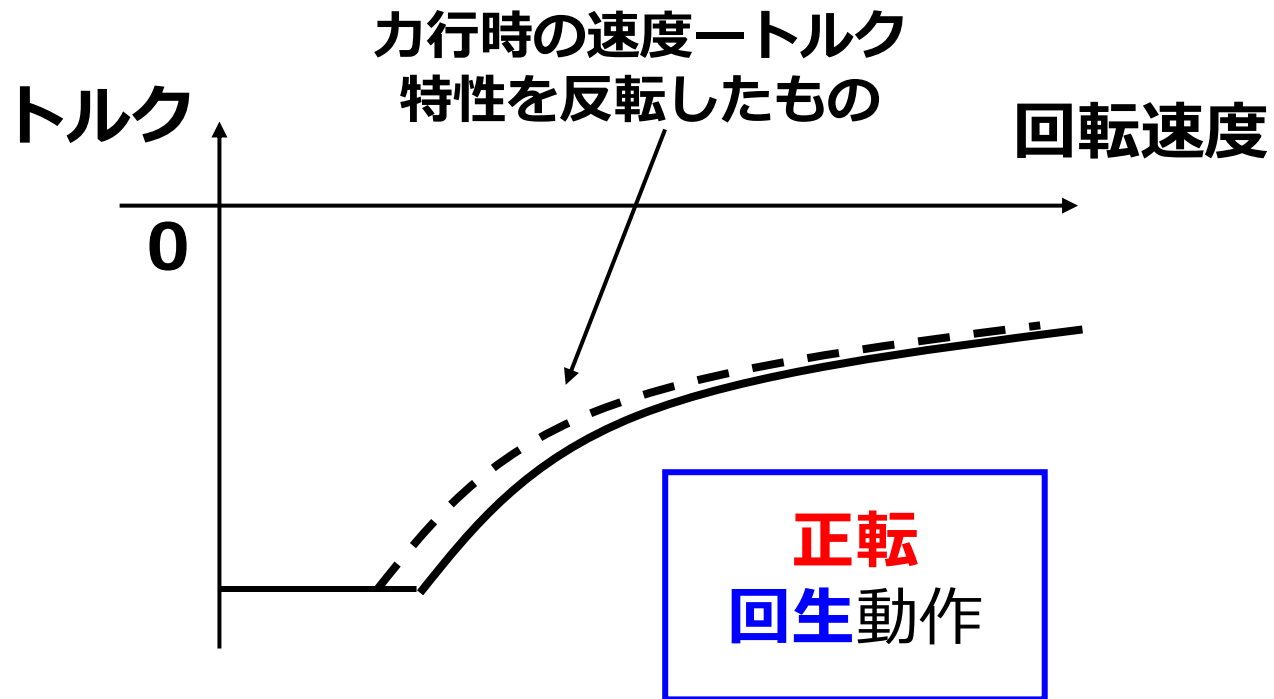
力行時の制限値の計算はこちら↓

<https://yuyumoyuyu.com/2020/11/22/currentandvoltage/limit/>



# 回生時の速度ートルク特性

- ✓ 回生時の誘起電圧制限値が力行時に比べて増加するため理論的には速度ートルク領域は拡大する





# 回生時の高調波特性

- ✓ 力行動作を主とするモータの回生時のトルクリプルや鉄損高調波は力行時に比べて増加する傾向にある
  - ⇒ 力行時の特性をベースとして設計しているためq軸電流の向きが変化すると例えば磁束密度分布が変化して悪影響を及ぼす

# 回生時と力行時の制御

- ✓ 力行動作を主としたIPMSMでは  
回生動作としての実動作領域・頻度がそこまで大きくない
- ✓ またMPPT制御ではトルク指令値を必要とし  
力行時と異なる制御方法になるため、  
力行動作を主としたIPMSMでは  
厳密な最大出力/最大効率制御を行わないことが多い
- ✓ MPPT制御は例えば風力発電用のIPMSG(Interior Permanent Magnet Synchronous Generator)等で用いる<sup>[1]</sup>

[1] 森本ほか：「永久磁石同期発電機を用いた可変速風力発電システムのセンサレス出力最大化制御」, 電気学会論文誌B, Vol. 123, No. 12, pp. 1573-1579, 2003