

第8章：フィードバック制御系の設計法

8.3 位相進み-遅れ補償による制御系設計

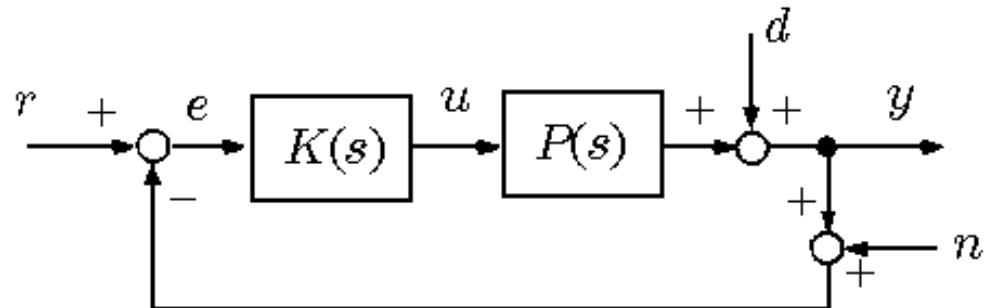
キーワード：ループ整形，位相遅れ補償，
位相進み補償

学習目標：ループ整形の考え方を理解する。位相遅れ補償，位相進み補償による制御系設計を習得する。

8. フィードバック制御系の設計法

8.3 位相進み-遅れ補償による制御系設計

ループ整形



感度関数 $S(s)$ を小さくする : (ノミナル)性能

- 低感度特性(パラメータ変動) : $\Delta_T = S\Delta_P$

$$\Rightarrow \begin{array}{ll} \text{• 外乱抑制} : y = Sd & S(s) = \frac{1}{1 + P(s)K(s)} \\ \text{• 目標値追従} : e = Sr & |W_1S| < 1 \end{array}$$

相補感度関数 $T(s)$ を小さくする : 口バスト安定性

$$\Rightarrow \begin{array}{ll} \text{• 口バスト安定性} : |W_2T| < 1 & T(s) = \frac{P(s)K(s)}{1 + P(s)K(s)} \\ \text{• 雑音除去} : y = -Tn & \end{array}$$

拘束 $S(s) + T(s) = 1 \Rightarrow$ 同時に 0 に近づけることは出来ない

周波数帯を分ける

- （低周波数帯: S を小さくする
- 高周波数帯: T を小さくする

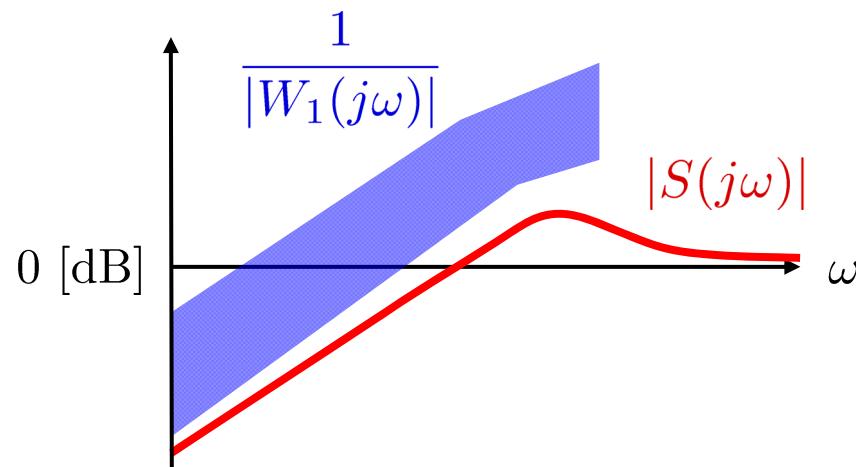


図7.14 感度関数とノミナル性能

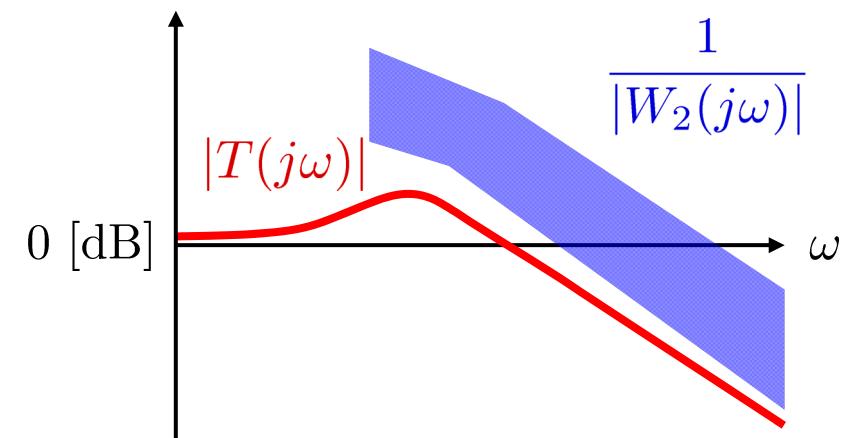


図7.11 相補感度関数と
ロバスト安定性

$S = \frac{1}{1+L}$ より, 低周波域で $|L|$ を大きく ($|L| \gg 1$)
 $\Rightarrow S$: 小

$T = \frac{L}{1+L}$ より, 高周波域で $|L|$ を小さく ($|L| \ll 1$)
 $\Rightarrow T$: 小

(閉ループ伝達関数から, 開ループ伝達関数へ)

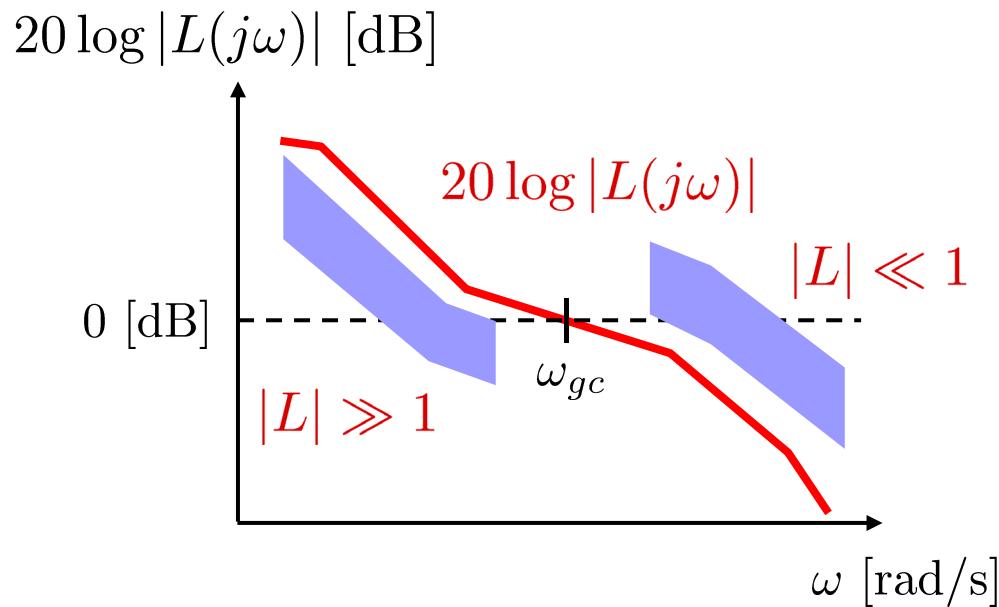


図8.9 ループ整形

位相遅れ補償

コントローラ

$$K(s) = K \frac{\alpha(Ts + 1)}{\alpha Ts + 1} \quad (\alpha > 1)$$

定常特性の改善

+20 log α [dB]

($K(0) = \alpha K$, $K(\infty) = K$)

ゲイン

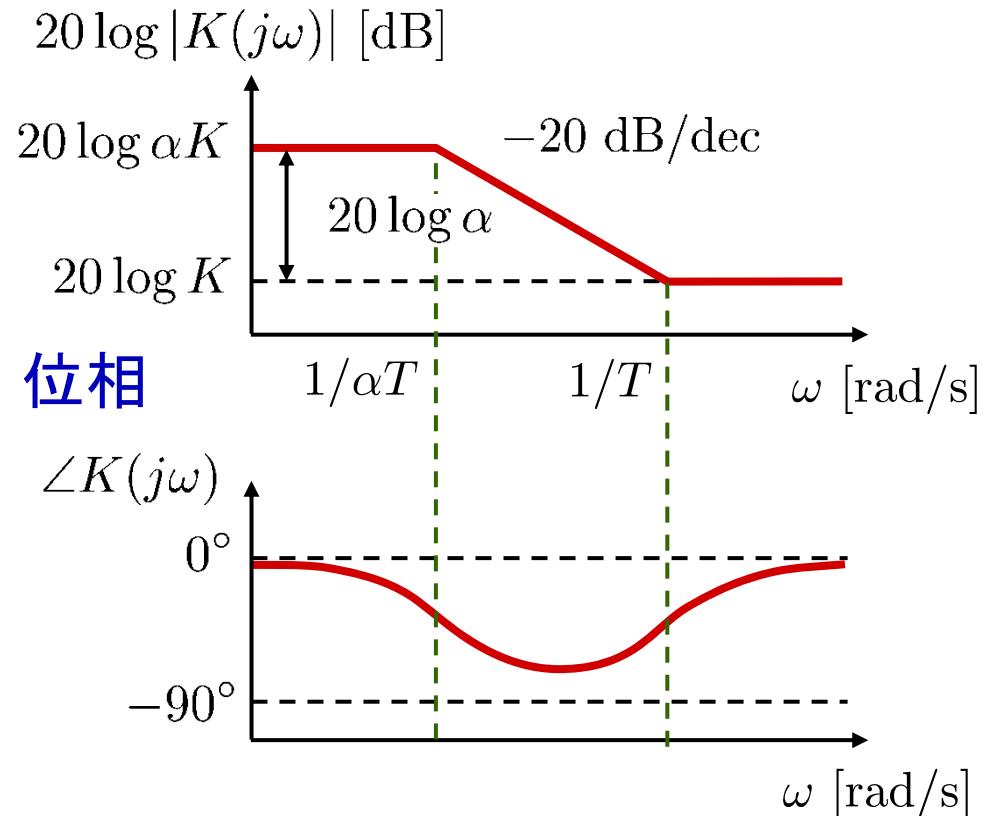
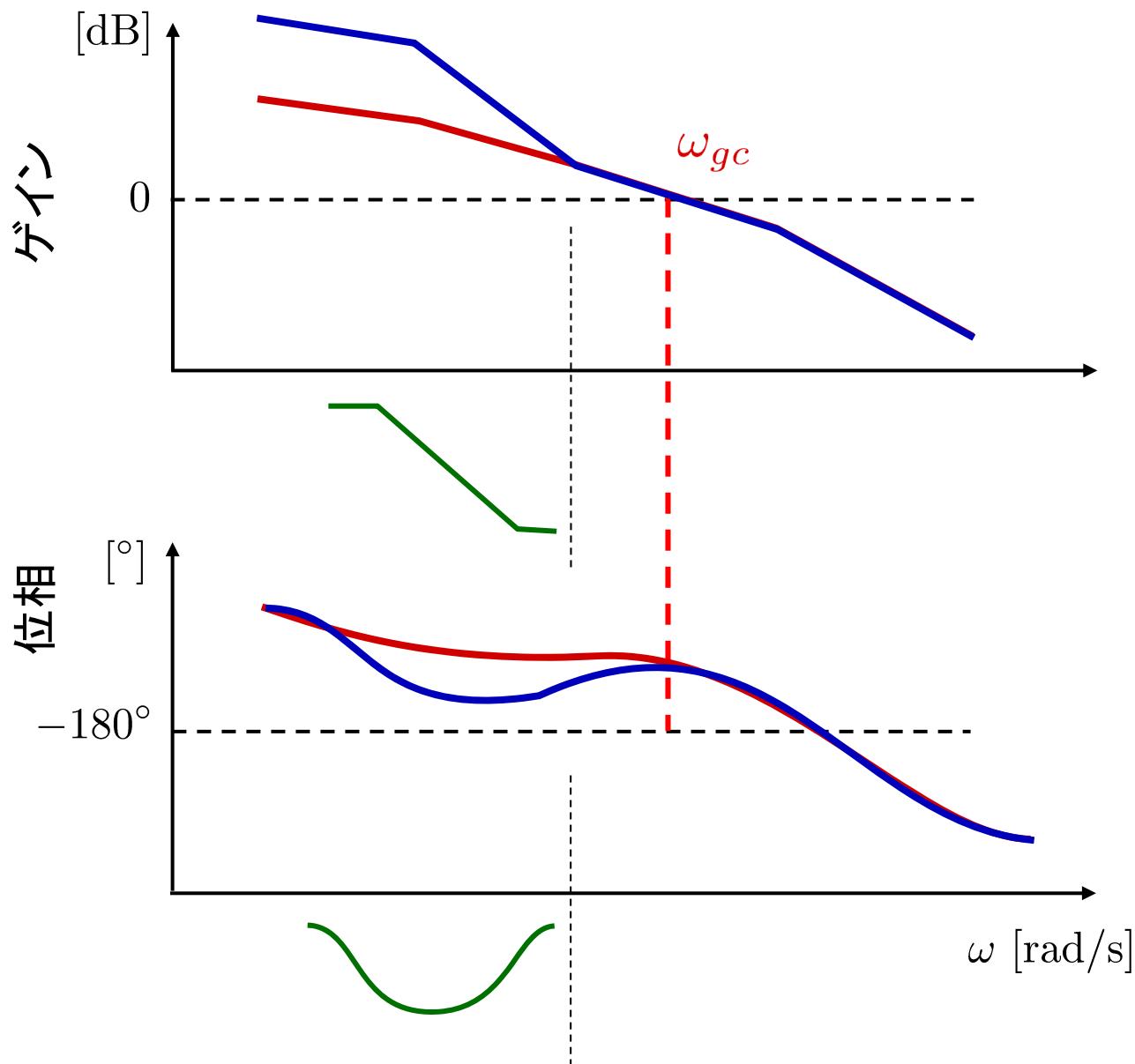


図8.10 位相遅れ補償のボード線図

[注] 位相遅れ:(安定性の劣化の原因)

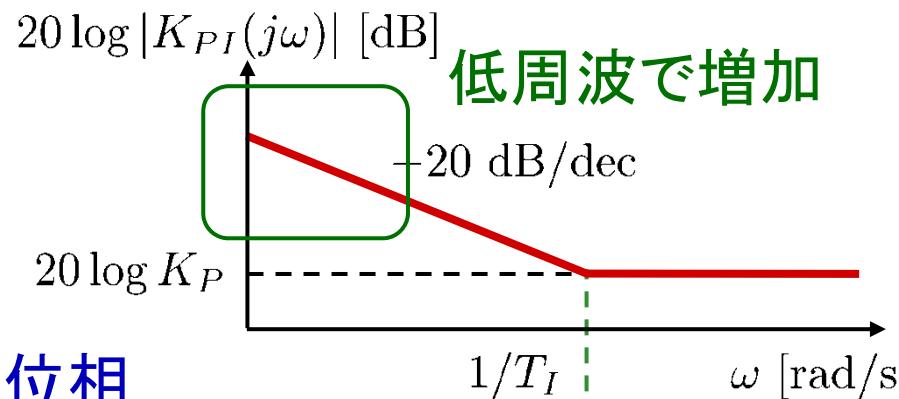


折点角周波数 $1/T$ を適切に



位相遅れ補償とPI制御の違い

ゲイン



位相

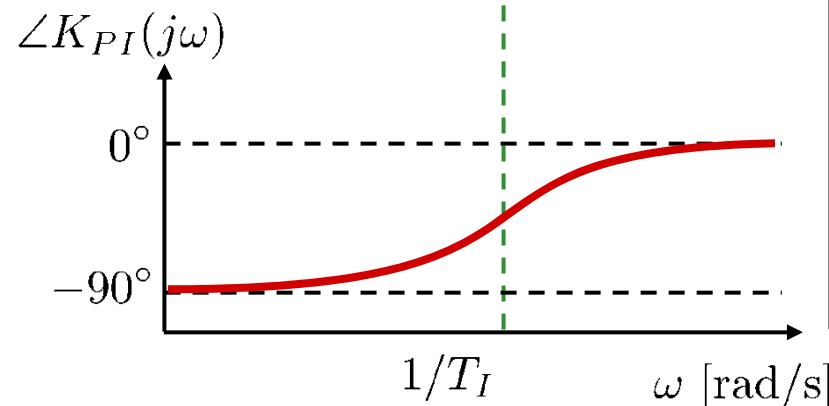
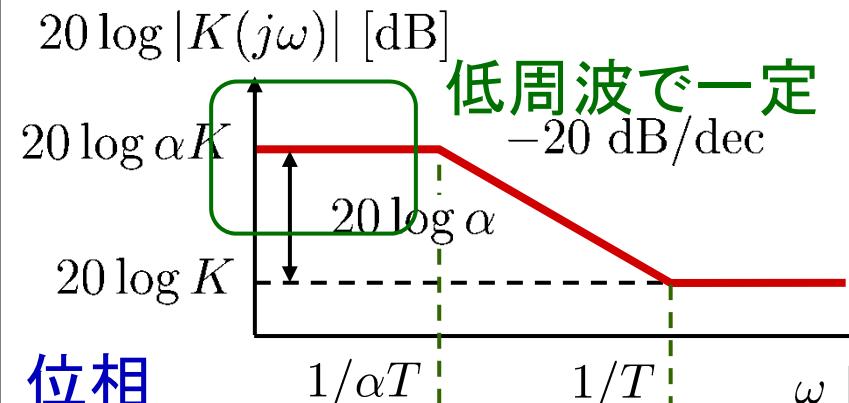


図8.3 PI 補償のボード線図

ゲイン



位相

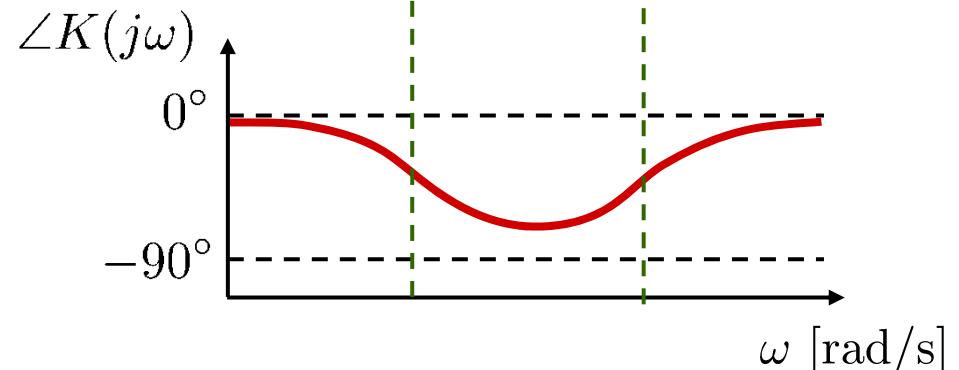


図8.10 位相遅れ補償のボード線図

位相進み補償

コントローラ

$$K(s) = K \frac{Ts + 1}{\alpha Ts + 1} \quad (\alpha < 1)$$

過渡特性の改善, 安定化

位相進み $\frac{1}{T} < \omega < \frac{1}{\alpha T}$

[注] 高周波ゲイン→大



ノイズ増幅

ロバスト安定性の劣化

位相が最も進む角周波数 $\omega_{\max} = \frac{1}{\sqrt{\alpha}T}$

位相進みの最大値 $\sin \phi_{\max} = \frac{1 - \alpha}{1 + \alpha} \Rightarrow \alpha = \frac{1 - \sin \phi_{\max}}{1 + \sin \phi_{\max}}$

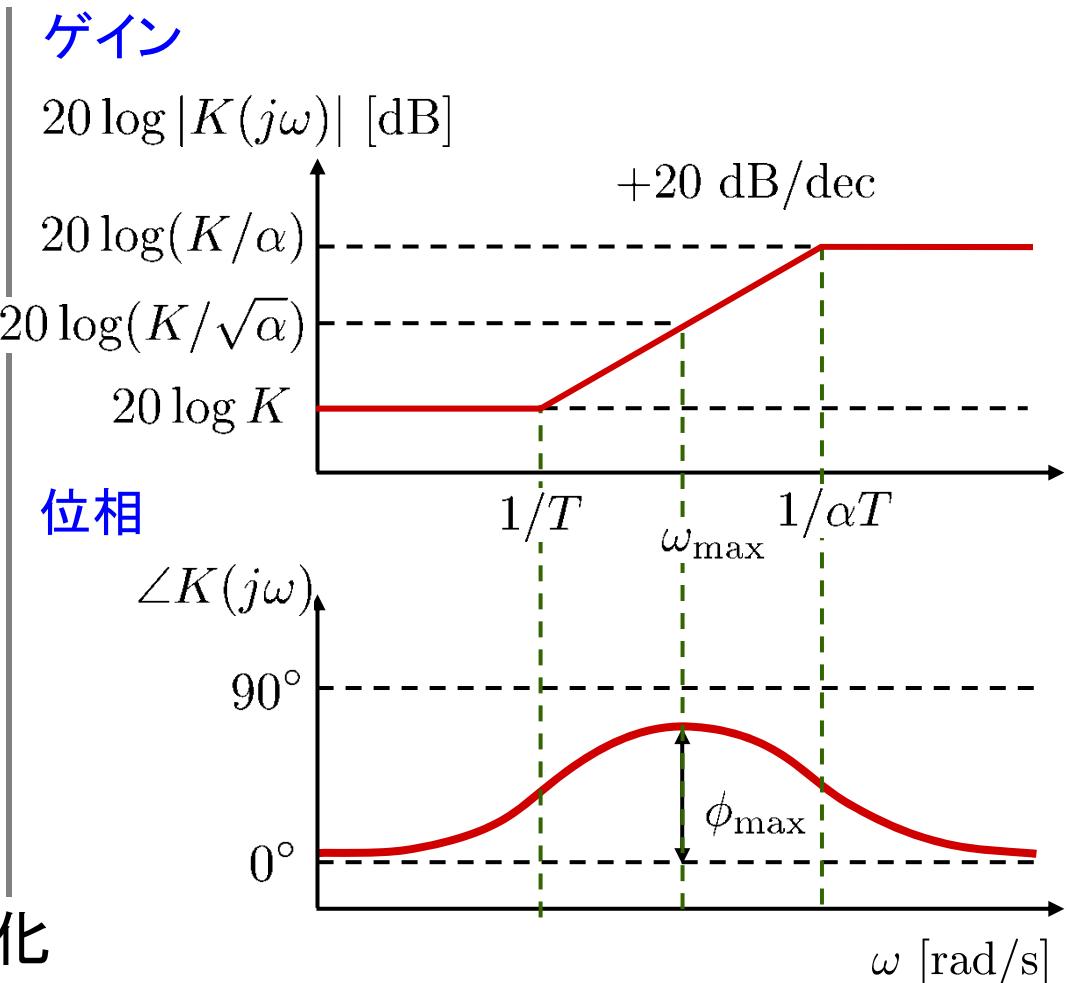
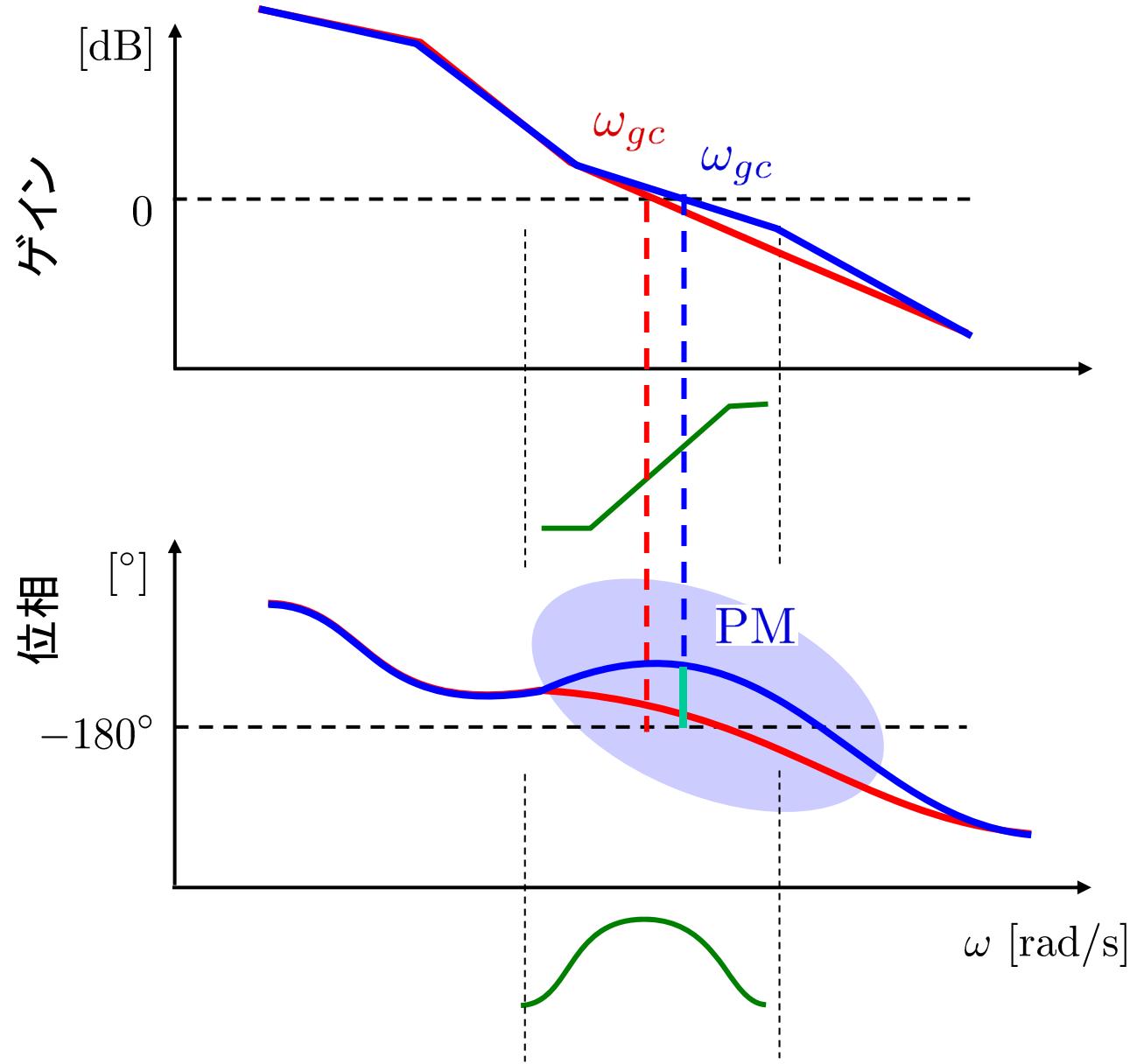


図8.13 位相進み補償
のボード線図



位相進み-遅れ補償

$$K(s) = K \underbrace{\left(\frac{T_1 s + 1}{\alpha_1 T_1 s + 1} \right)}_{\text{位相進み}} \underbrace{\left(\frac{\alpha_2 (T_2 s + 1)}{\alpha_2 T_2 s + 1} \right)}_{\text{位相遅れ}} \quad (\alpha_1 < 1, \alpha_2 > 1)$$

[注] 多段にしても良い

定常特性・過渡特性の改善

$+20 \log \alpha_2$ [dB]

位相進み: $\frac{1}{T_1} < \omega < \frac{1}{\alpha_1 T_1}$

[注] 位相遅れ, 高周波ゲイン

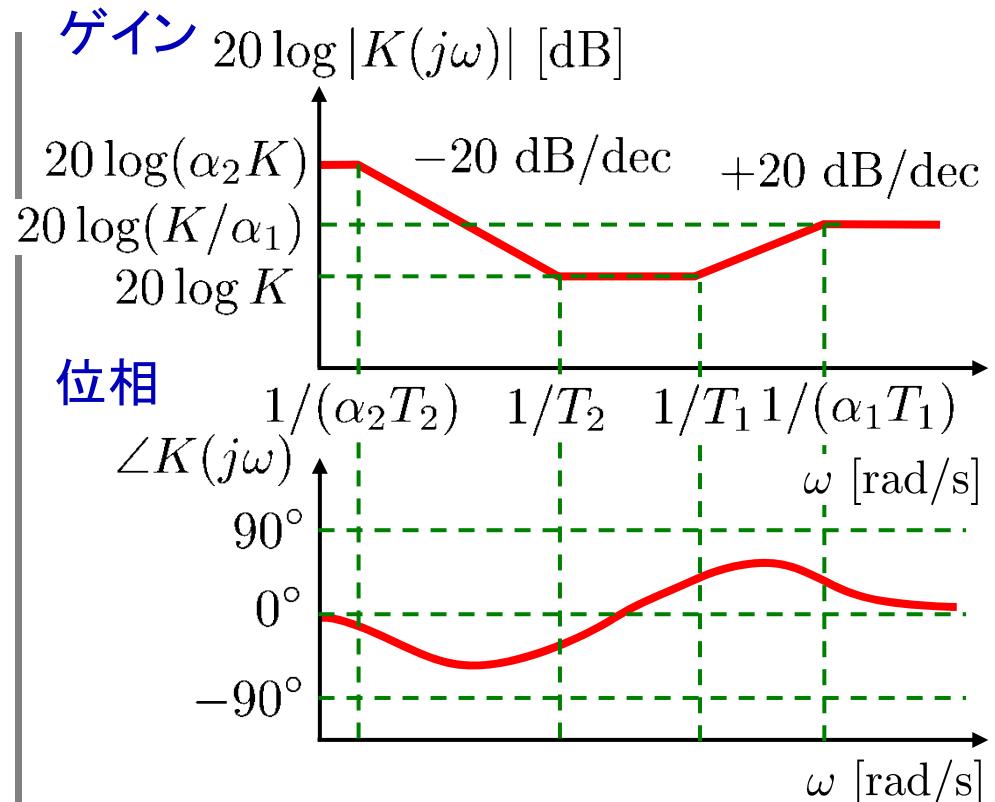
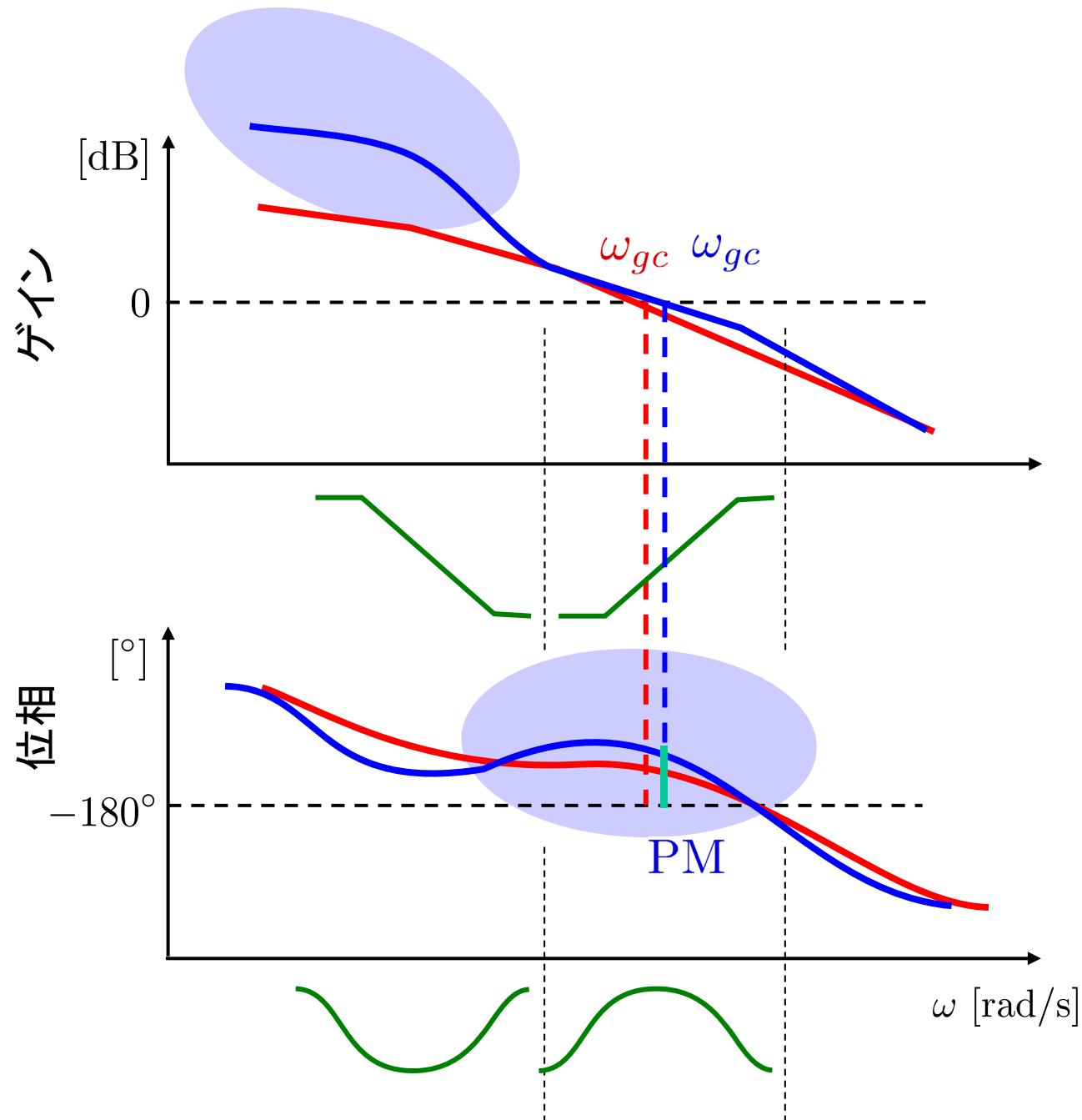


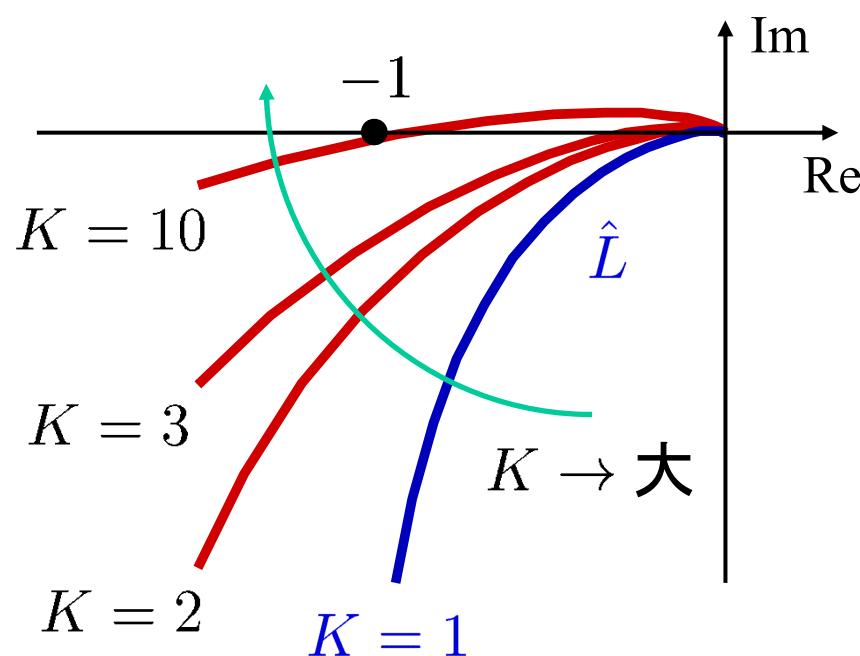
図 8.16 位相進み-遅れ補償
のボード線図



ベクトル軌跡で見る位相進み補償

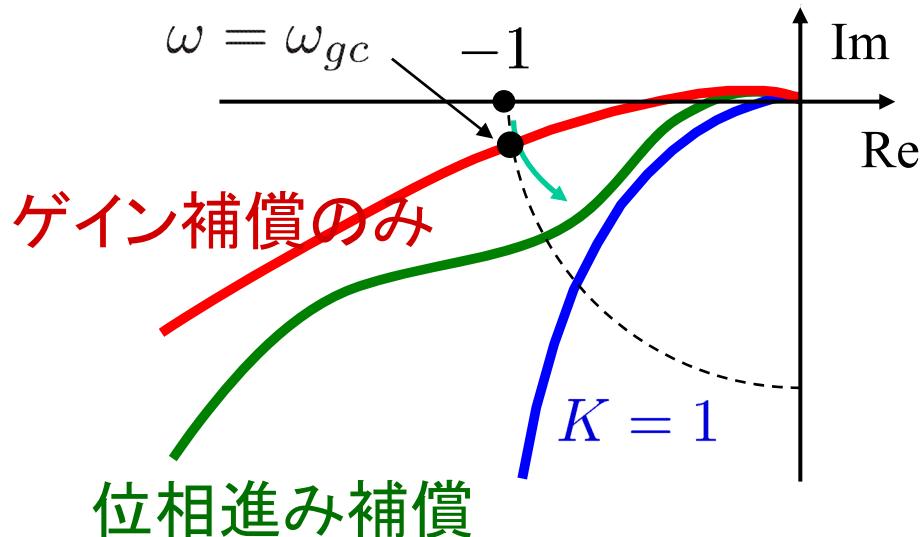
制御対象 $P(s)$

$$\hat{L} = PK \quad K : \text{ゲイン補償}$$



位相進み補償

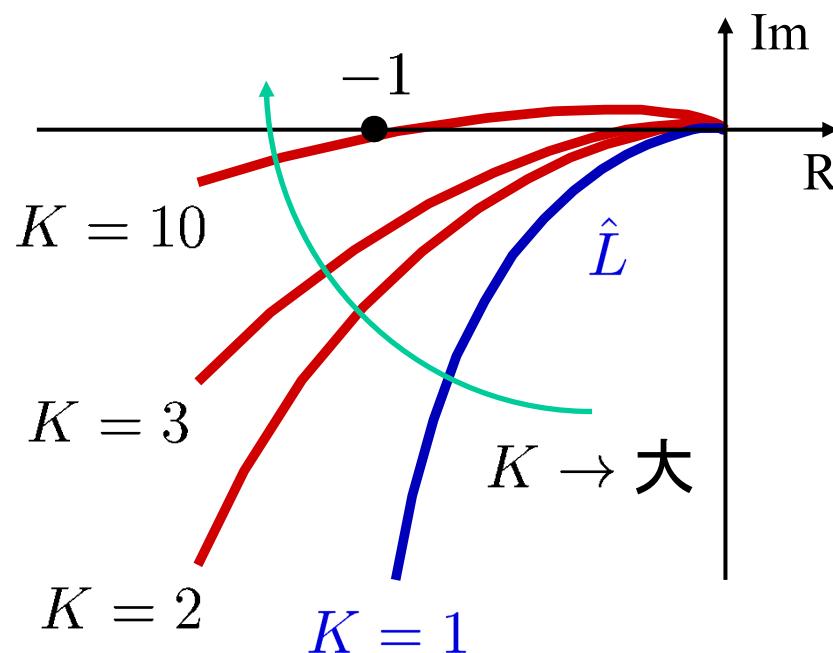
位相余裕を増加させる



ベクトル軌跡で見る位相遅れ補償

制御対象 $P(s)$

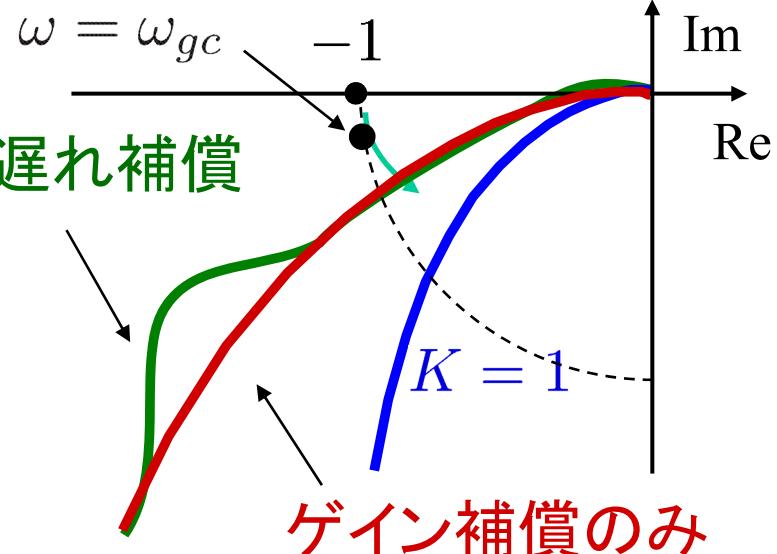
$$\hat{L} = PK \quad K : \text{ゲイン補償}$$



位相遅れ補償

ゲインを増加させるために
安定性に関係ない低周波で
位相を遅らせる

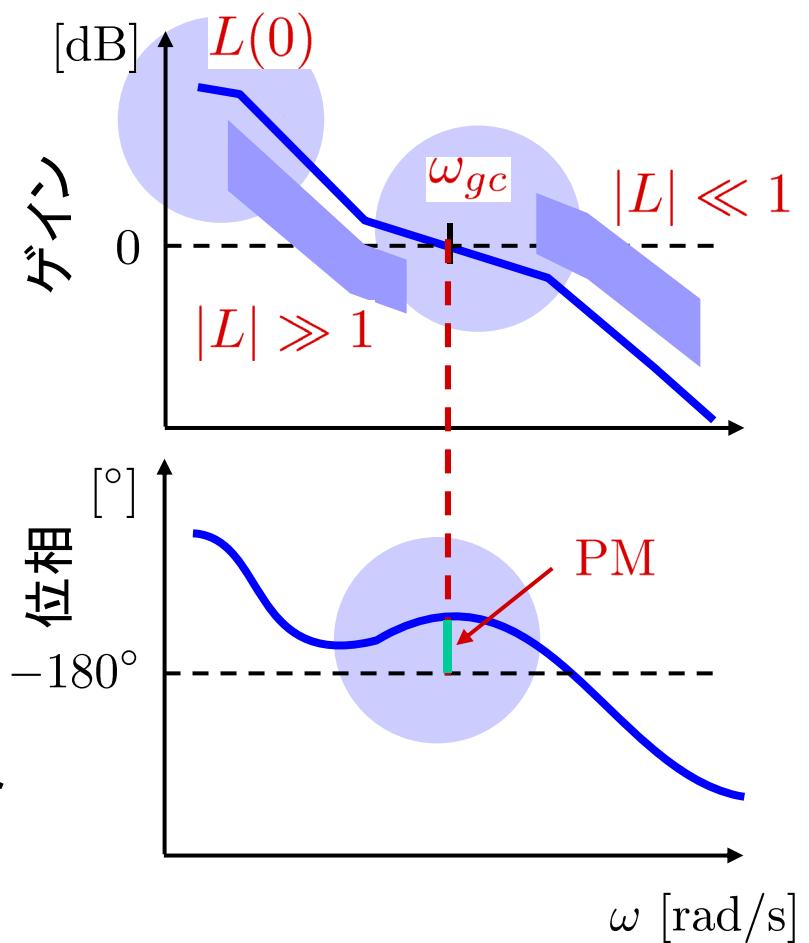
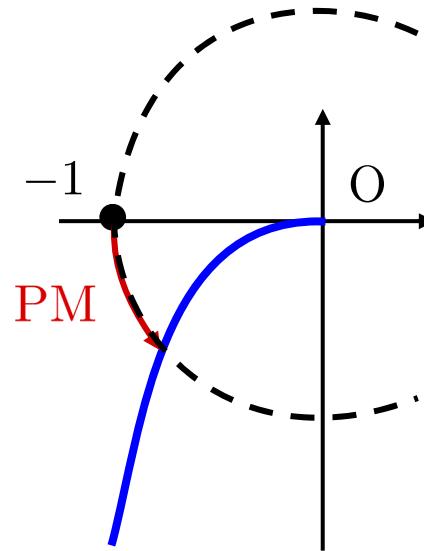
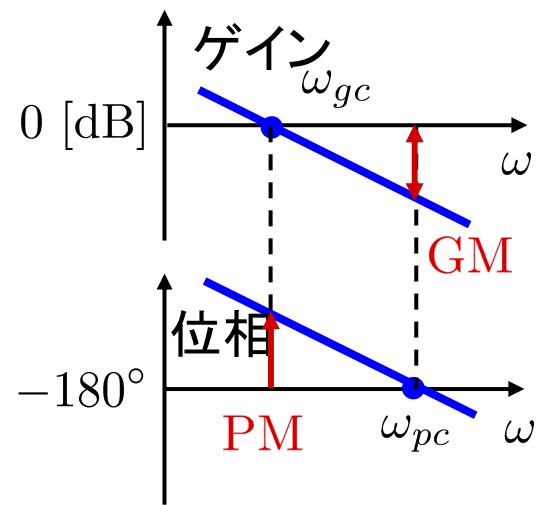
位相遅れ補償



【Key Points】

- 定常特性:
低周波ゲイン $L(0)$ を大きくとる
- 速応性:
ゲイン交差周波数 ω_{gc} を高くする
- 減衰特性:
位相余裕 PM を確保する

[復習] 位相余裕



【Key Points】

(交差周波数付近)

ゲインの傾きが急 (-40 dB/dec 以下)

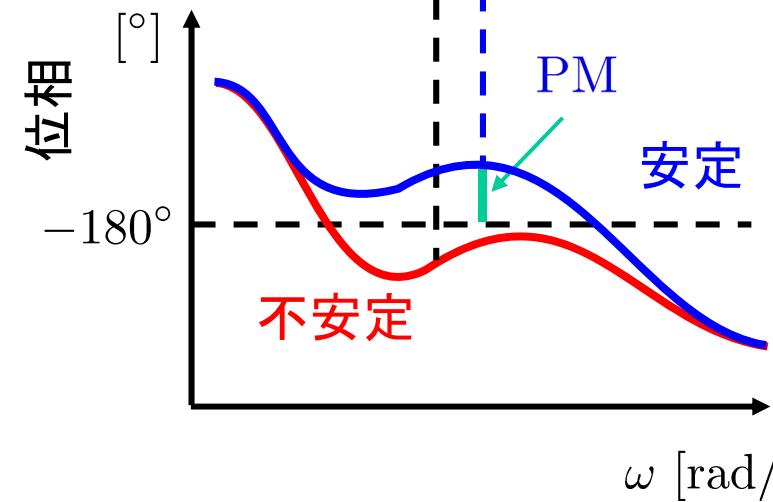
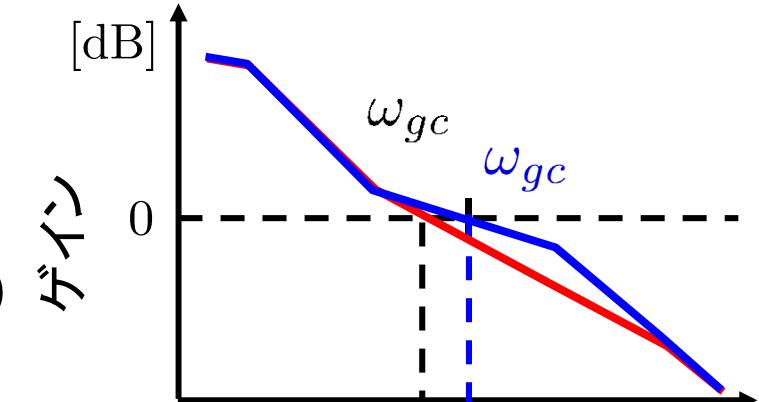
- • ゲインと位相の関係 (sec. 5.4)
• 最小位相系

好ましくない位相遅れ

$$\begin{cases} -20 \text{ dB/dec} \rightarrow -90^\circ \\ -40 \text{ dB/dec} \rightarrow -180^\circ \end{cases}$$

不安定

緩やかなゲインの傾き (-20 dB/dec)



【Key Points】

(低周波域)

開ループゲイン $|L|$ を大きく



偏差定数 K_p, K_v が大

定常偏差 : 小 $\frac{1}{1 + K_p}, \frac{1}{K_v}$

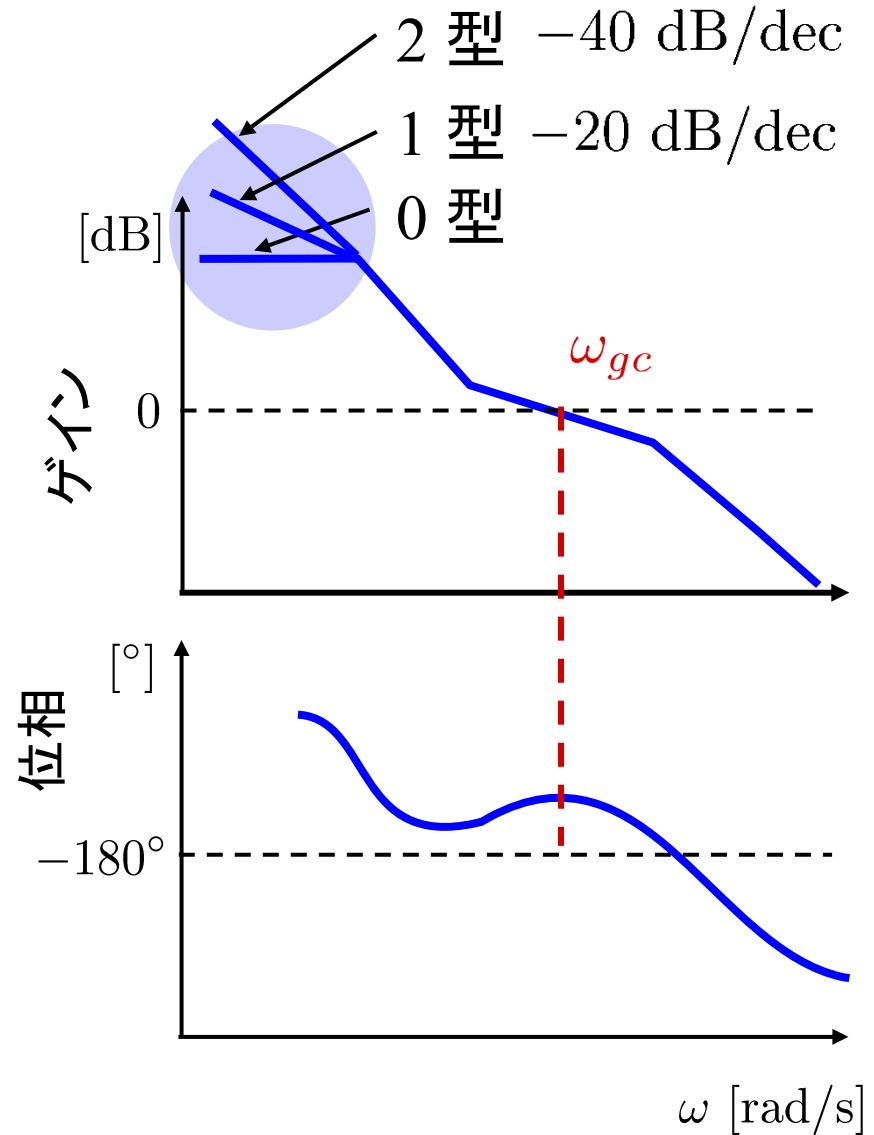
目標値

ステップ状 → 1型 ($1/s$ を含む)

→ -20 dB/dec

ランプ状 → 2型 ($1/s^2$ を含む)

→ -40 dB/dec

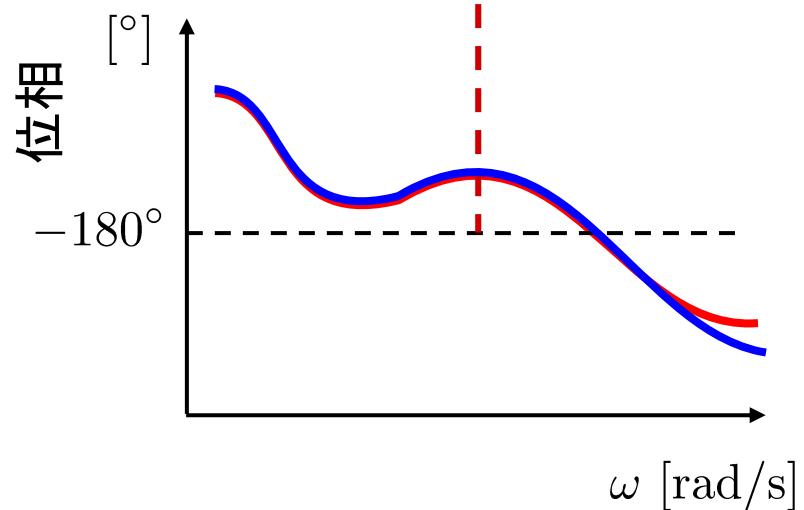
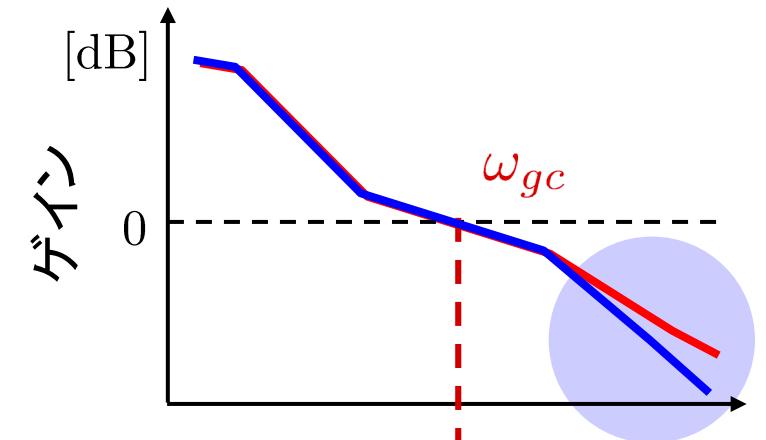


【Key Points】

(高周波域)

ロール・オフ特性：

$-40 \sim -60 \text{ dB/dec}$ 以下



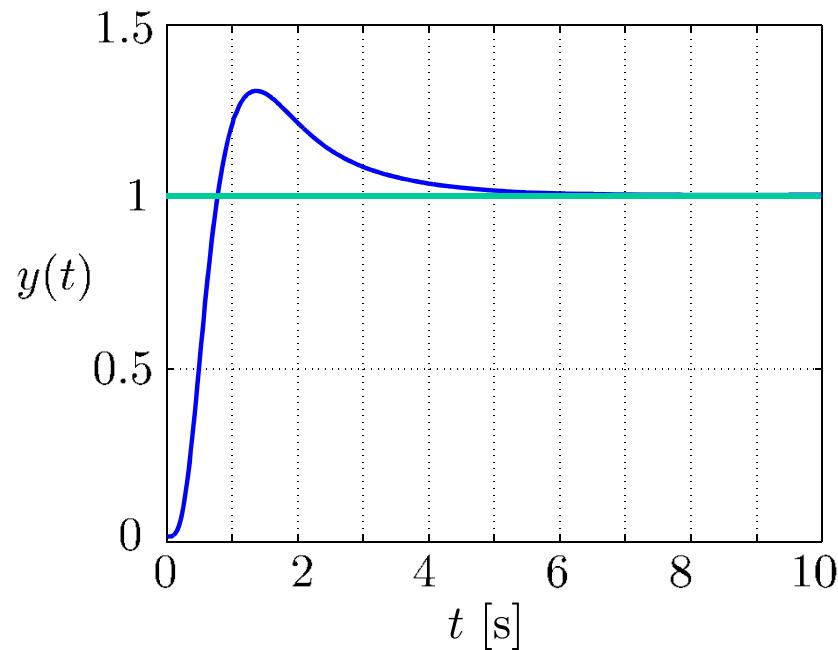
付録

[例 8.5] ロール・オフフィルタ

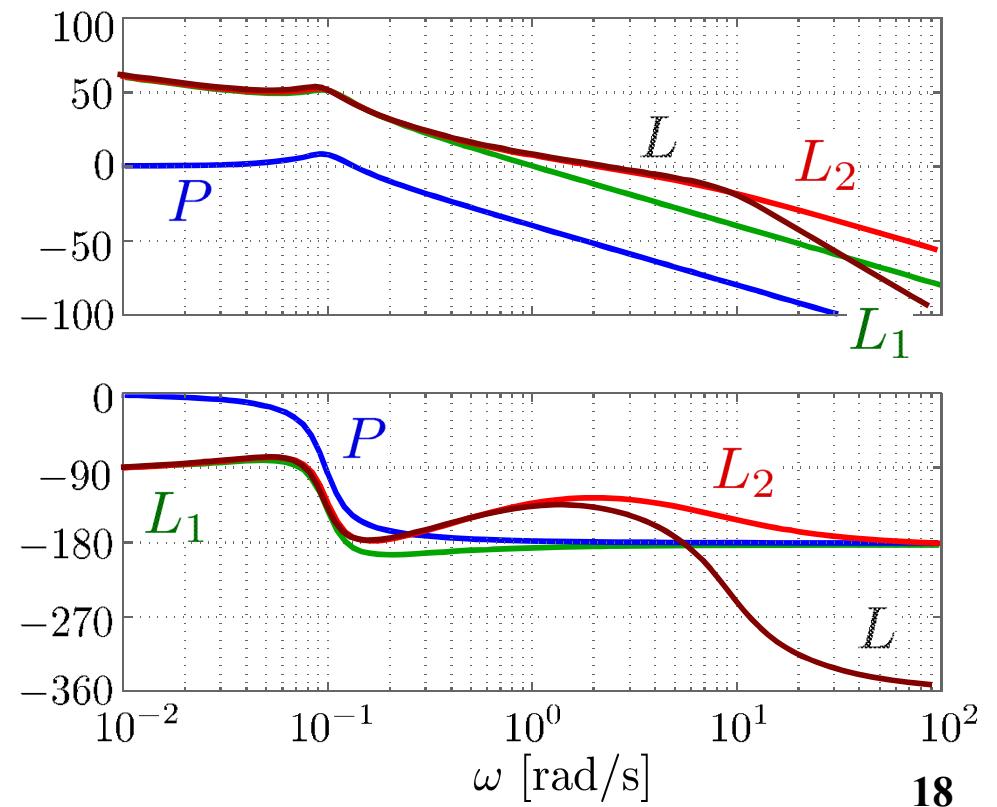
$$K(s) = K_{LL}(s) \times \frac{10}{s^2 + 10s + 100} = \frac{143000(s + 0.1)(s + 0.53)}{s(s + 7.52)(s^2 + 10s + 100)}$$

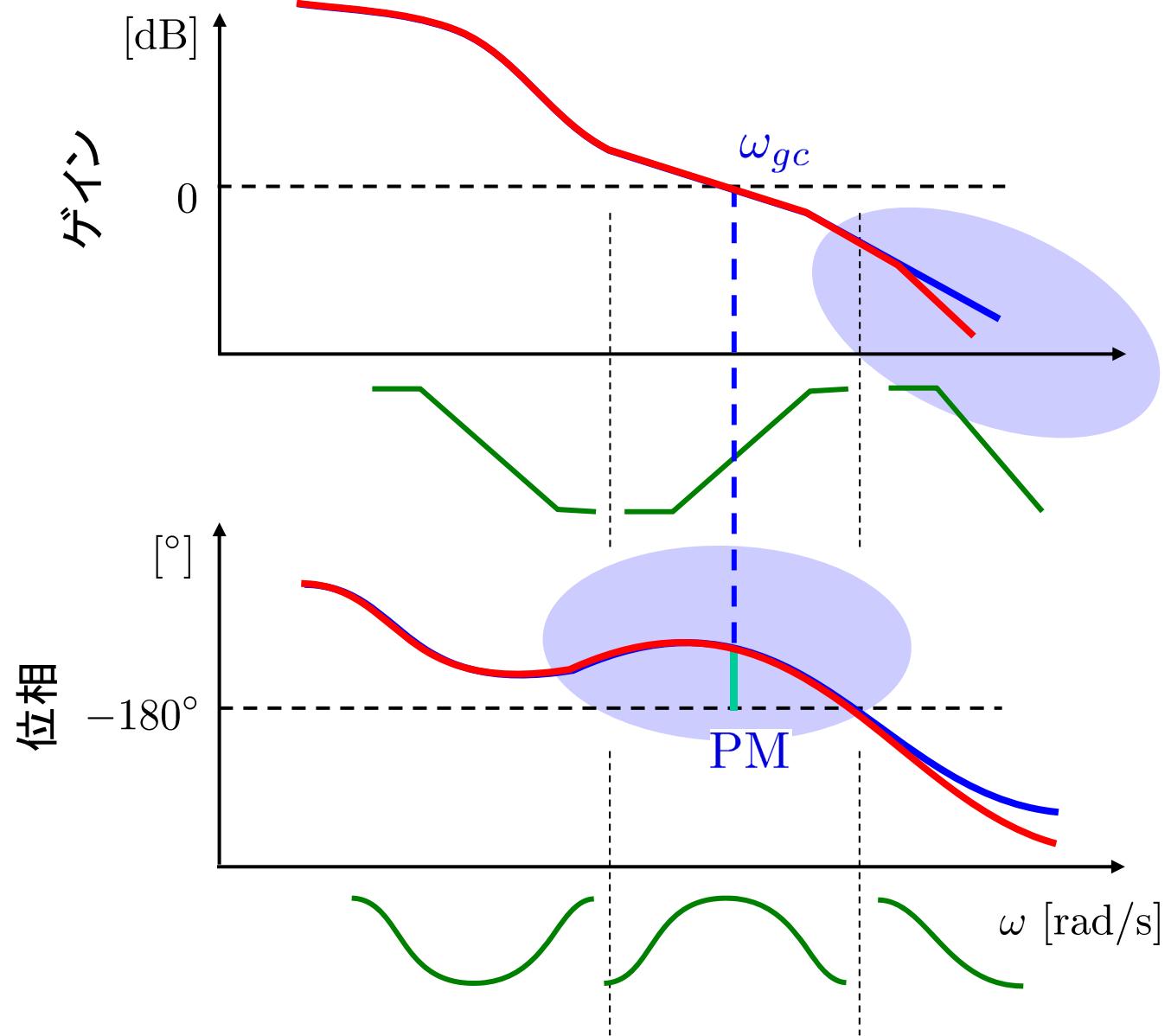
ロール・オフ特性

$$L = PK$$



ゲイン [dB]





実際の制御対象：

$$\tilde{P}(s) = \frac{0.01}{s^2 + 0.04s + 0.01} \cdot \frac{15^2}{\underline{s^2 + 2 \times 0.01 \times 15s + 15^2}}$$

振動モード

a) 位相進みー遅れ補償: K_{LL}

$$K_{LL}(s) = \frac{1430(s + 0.1)(s + 0.53)}{s(s + 7.52)}$$

b) ロール・オフ特性を有する

位相進みー遅れ補償: K

$$K(s) = K_{LL}(s) \times \frac{10}{s^2 + 10s + 100}$$

第8章：フィードバック制御系の設計法

8.3 位相進み-遅れ補償による制御系設計

キーワード：ループ整形，位相遅れ補償，
位相進み補償

学習目標：ループ整形の考え方を理解する。位相遅れ補償，位相進み補償による制御系設計を習得する。