

Control and Modulation

Ando Lab Basic Lecture

Ryosuke Sugimoto (JAXA/SOKENDAI)

2020/07/09

今日のトピック

- **制御**

 - 制御の目的

 - フィードバックループの考え方

 - 制御系の評価法

- **変復調**

 - 変復調の概念、目的

 - 共振器からのエラー信号取得

制御の目的

制御：ある物理量を目的の値に追従させる

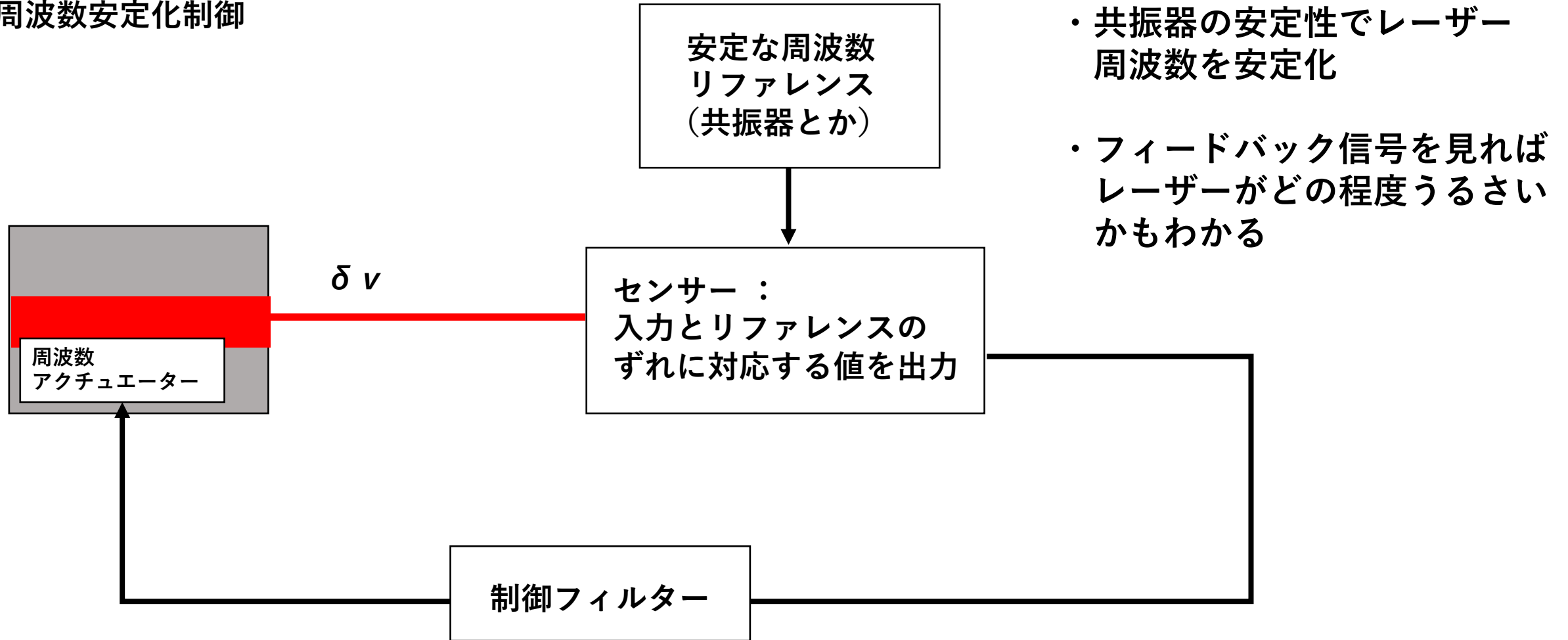
目的：一般にはいろいろ

我々の目的は主に

- **安定化**
- **ノイズ（信号）測定** ← **重力波も測れる**

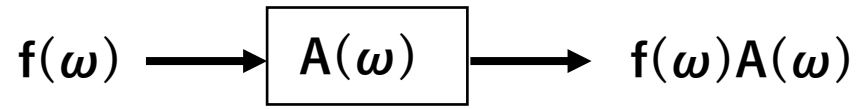
フィードバックループの考え方

周波数安定化制御



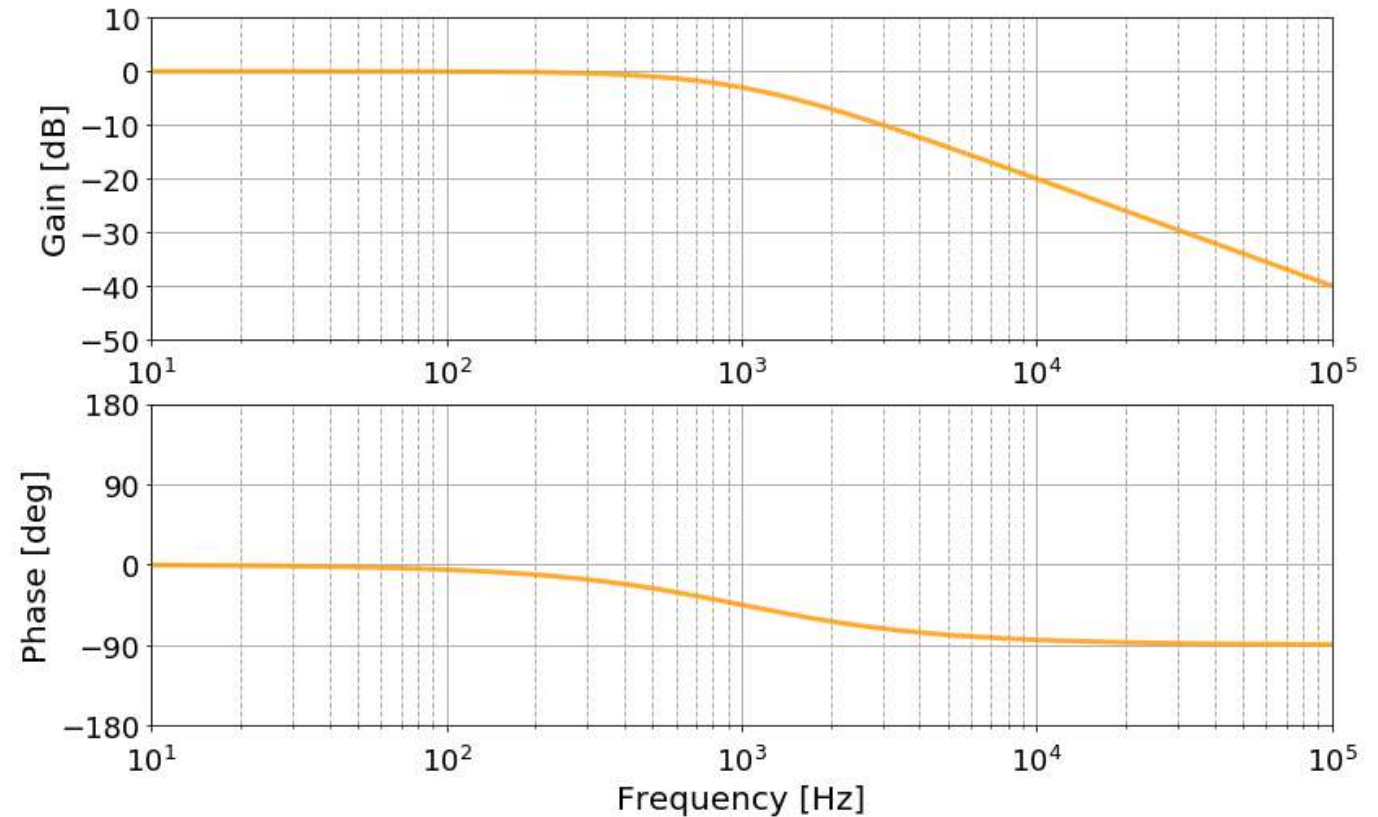
フィードバックループの考え方

各部を伝達関数で表す ← 周波数応答を表す複素数
利得と位相に対する情報を持つ



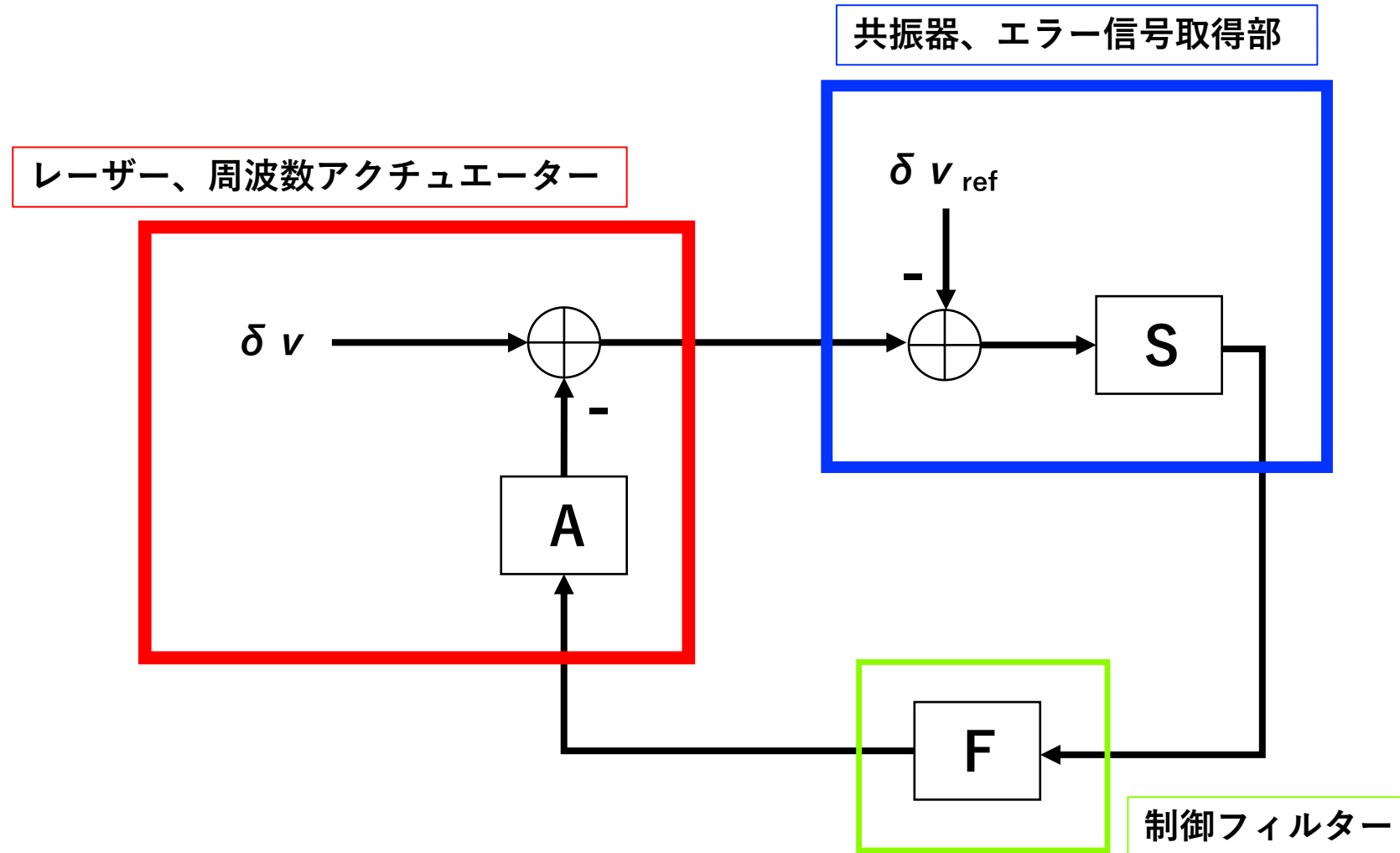
例：ローパスフィルター

$$A(\omega) = \frac{1}{1 + \frac{\omega}{\omega_c}i}$$



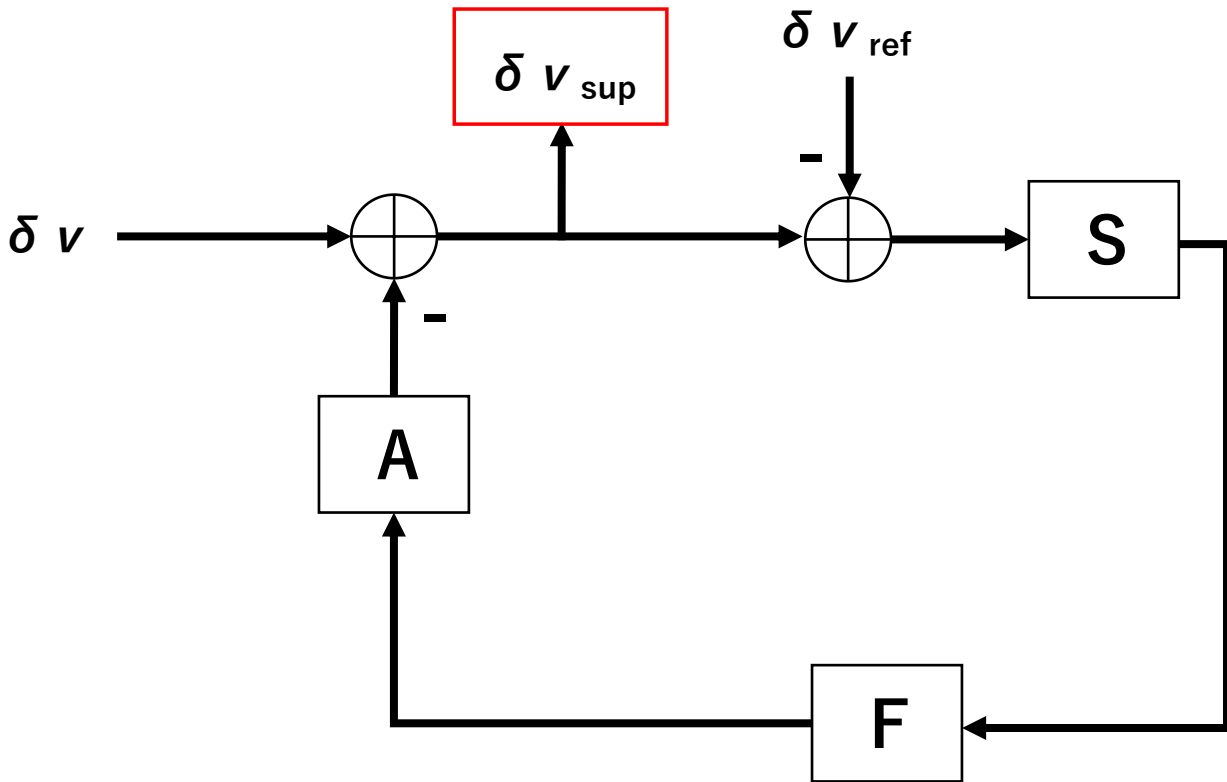
フィードバックループの考え方

周波数安定化ループを伝達関数で考える



フィードバックループの考え方

周波数安定化ループを伝達関数で考える



$$\delta v_{sup} = \delta v - (\delta v_{sup} - \delta v_{ref})SAF$$

$$\therefore \delta v_{sup} = \frac{1}{1+G} \delta v + \frac{G}{1+G} \delta v_{ref}$$

$$\approx \delta v_{ref} \quad (\text{when } G \gg 1)$$

$G \equiv SAF$ ← オープンループ伝達関数

Gに対する要求

- ・ 必要な帯域で十分なサプレッション
- ・ ループを安定に（発振しない）

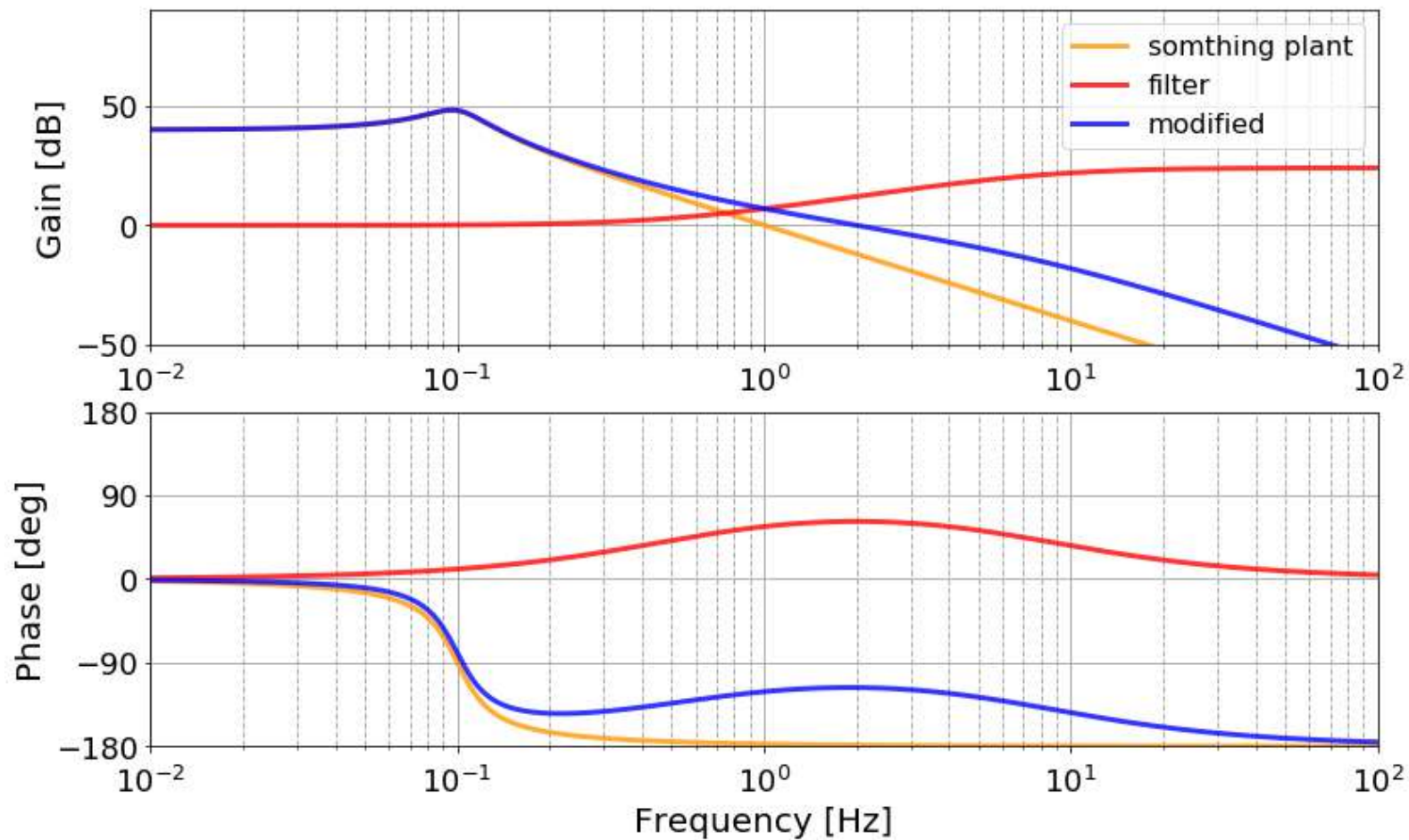
UGFで位相が -180° 回っていると不安定

→ ナイキスト安定判別法を参照

S、Aは大体決まってるのでFを設計して要求を満たすループを作る

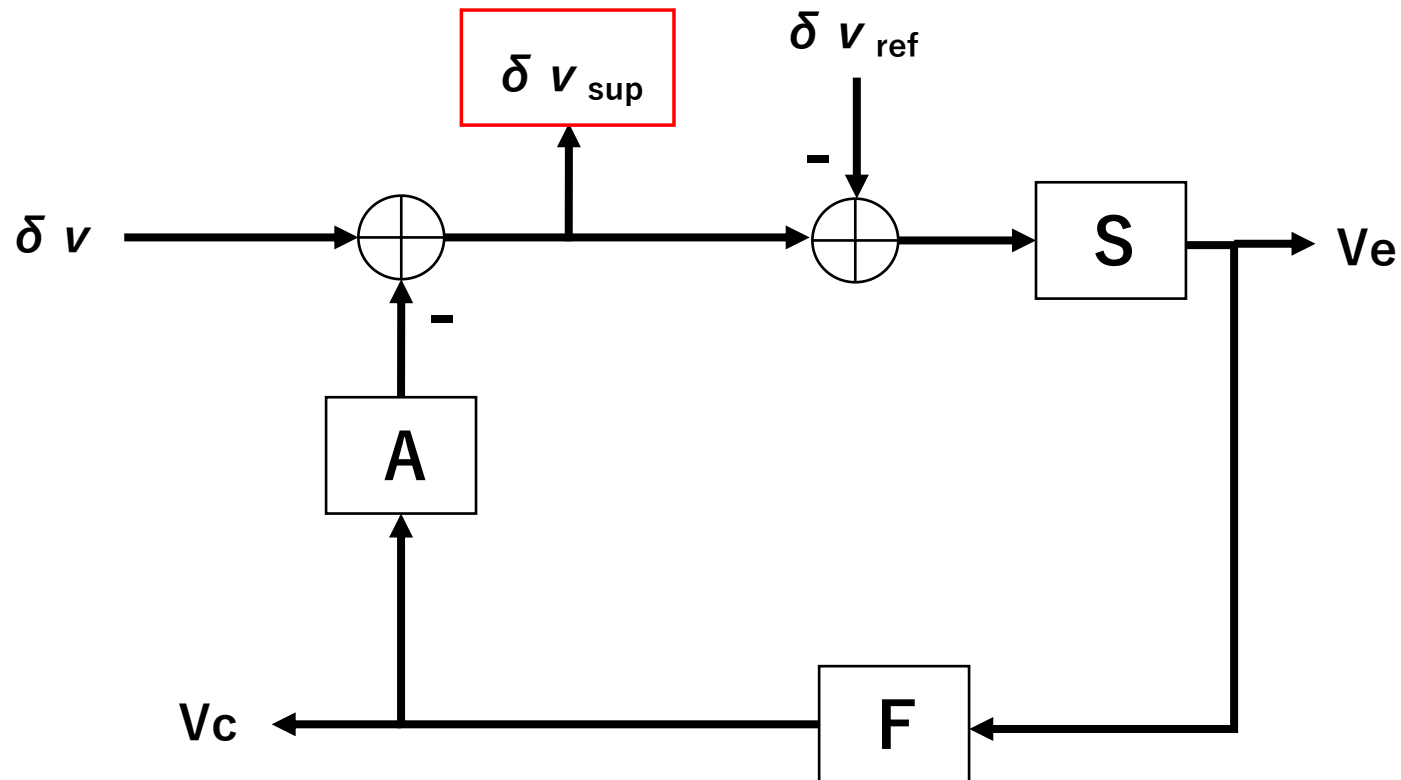
フィードバックループの考え方

安定性に関する一例



制御系の評価法

δv_{sup} が本当に安定化されてるか確認したい



すぐに測れるのは

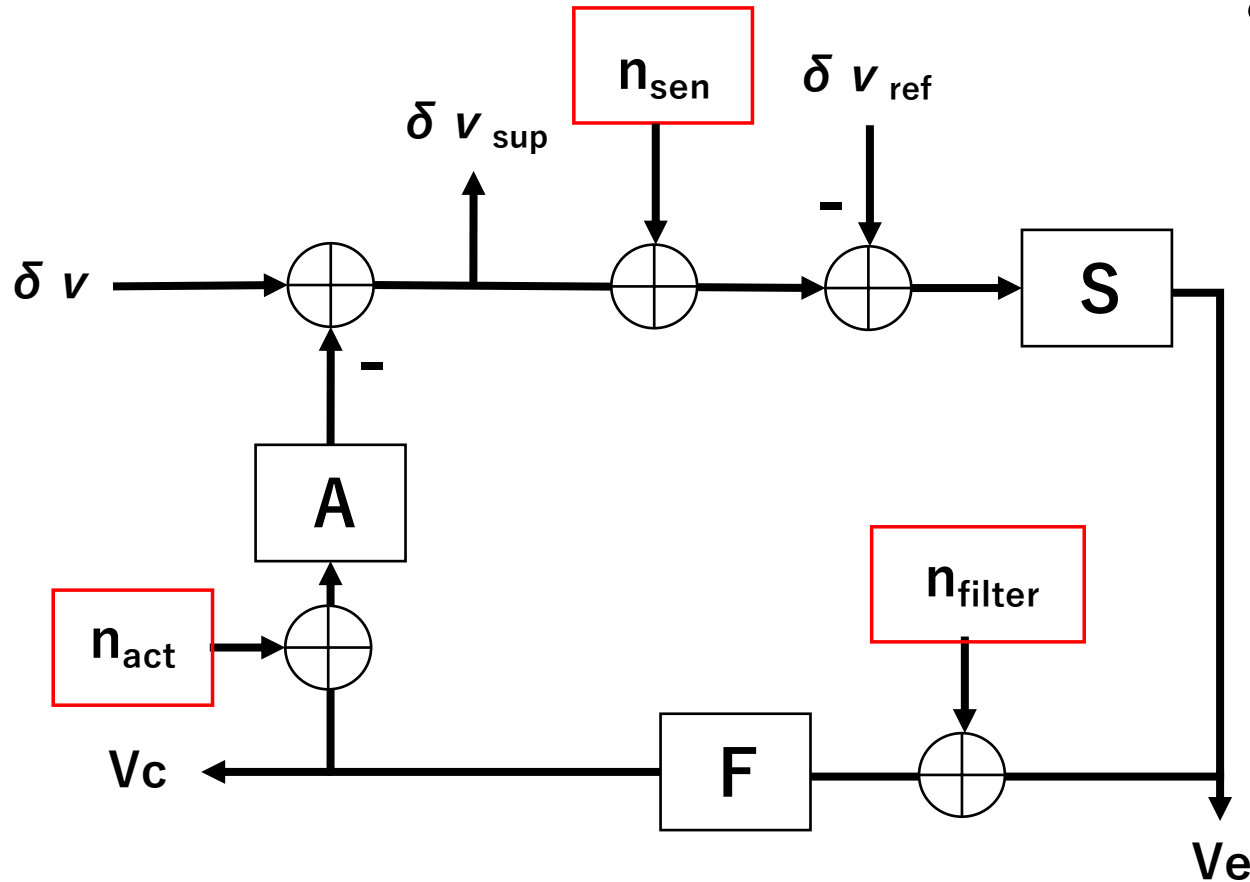
V_e (誤差信号)、 V_c (制御信号)

単に V_e/S で良いのか?

制御系の評価法

実際には・・・

各部からノイズが混入

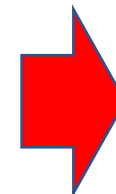


これらを考慮すると

$$\delta v_{sup} = \frac{1}{1+G} (\delta v - An_{act} - AFn_{filter}) + \frac{G}{1+G} n_{sen}$$

一方、 V_e/S は

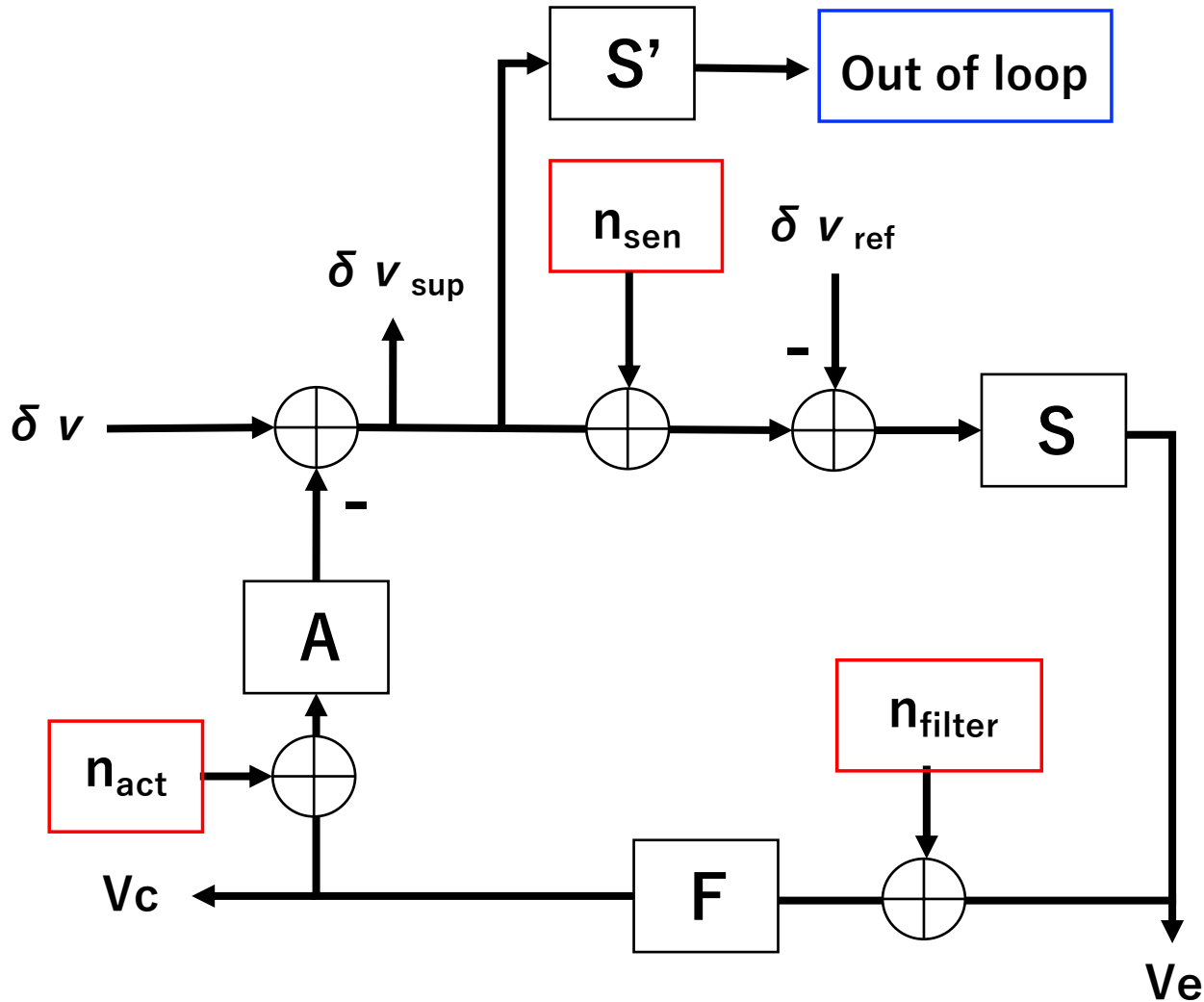
$$\frac{V_e}{S} = \frac{1}{1+G} (\delta v - An_{act} - AFn_{filter} + n_{sen})$$



制御ループで n_{sen} は抑圧できない

また、 V_e/S では n_{sen} まで下がって見える
これが下がっても本当は n_{sen} 大きいかも

制御系の評価法



正しい評価にはループ外の客観的なセンサーが別に必要
→ out of loop

これに対し V_e/S を in loop と呼ぶ

センシングノイズを如何に下げることが大切

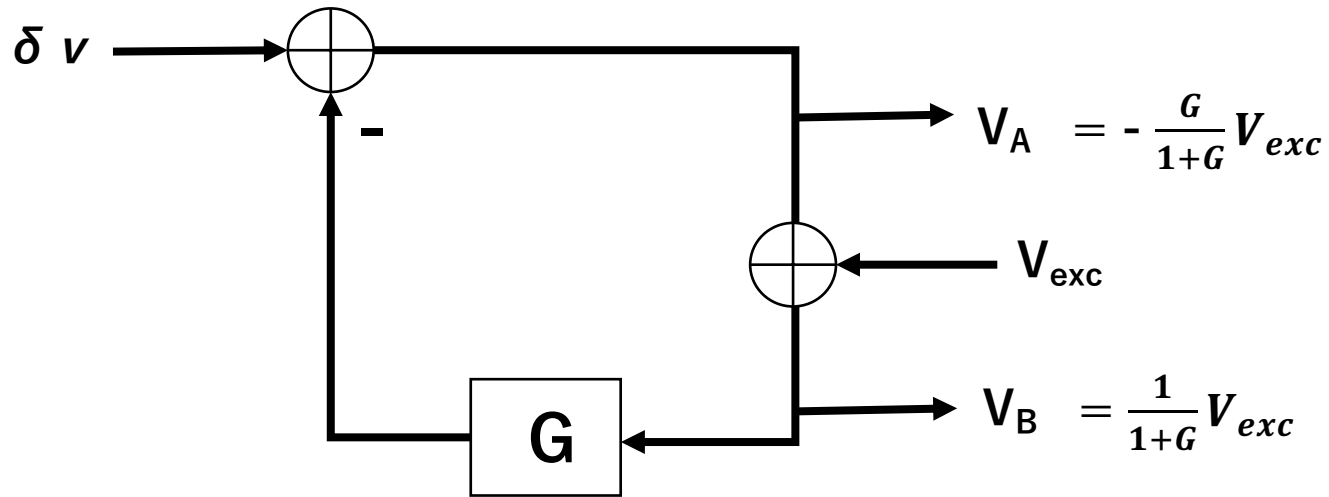
また、フィードバック量からのノイズも見積もれる

$$V_c A = \frac{G}{1+G} (\delta v + n_s + A n_{act}) + \frac{1}{1+G} n_f F A$$

↑
一般的に小さい

制御系の評価法

オープンループ伝達関数の測定

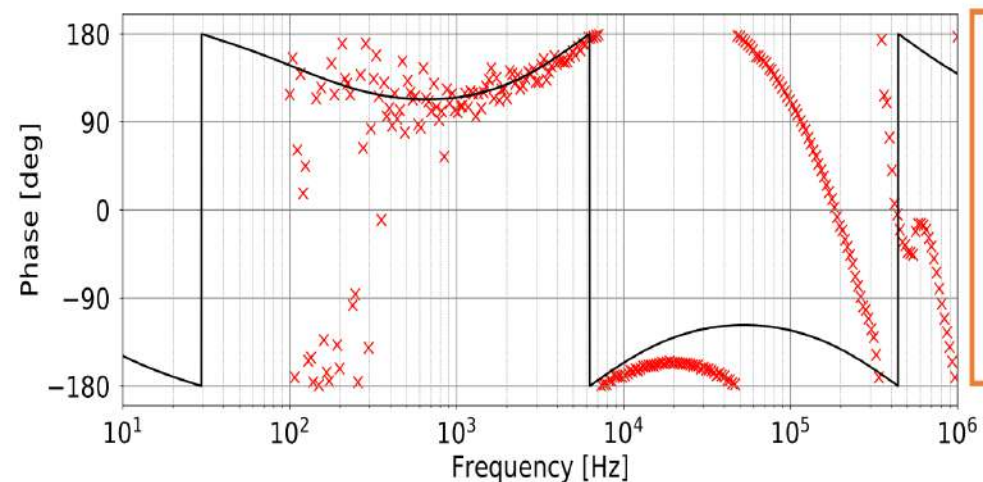
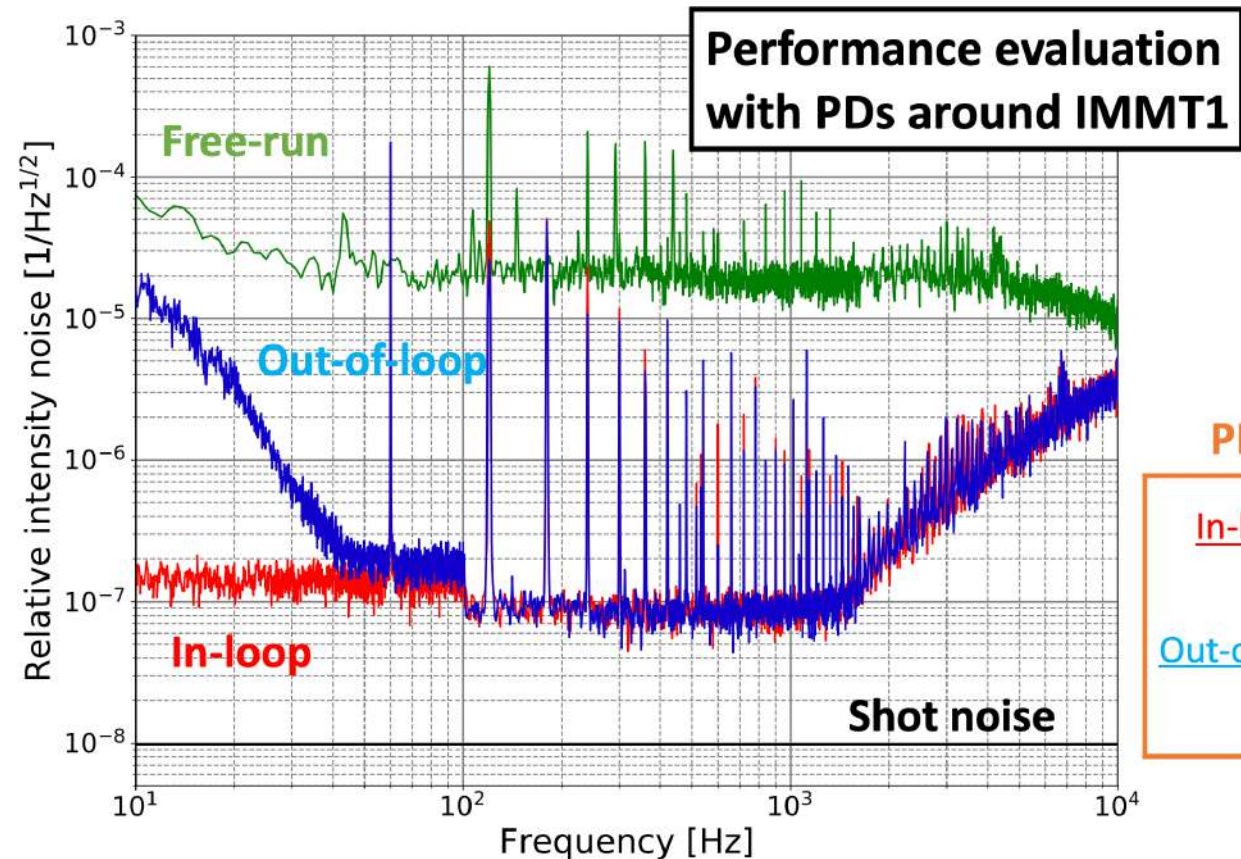
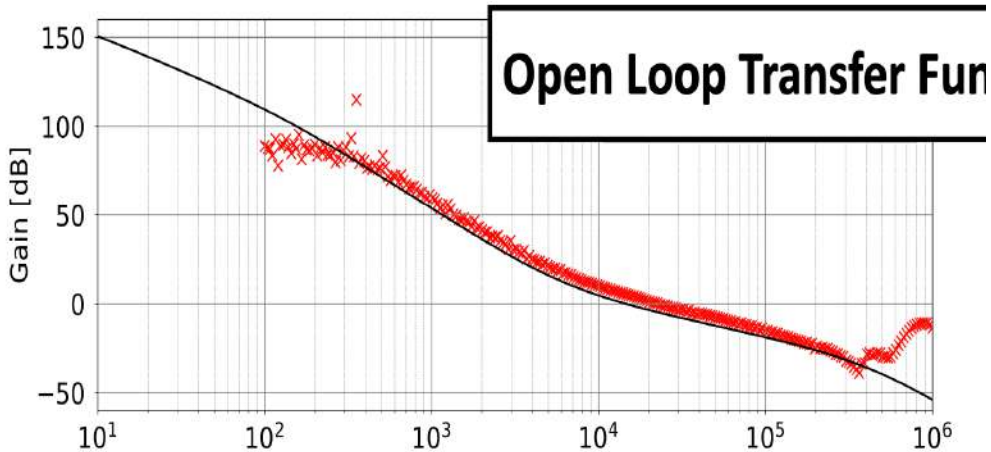


適当な信号を入力しその前後で比を取る

$$V_A/V_B = -G$$

制御系の評価法

例: KAGRA 強度安定化
(T Yoshioka 2019)



Unity Gain Frequency

~20 kHz

Phase margin

~25 deg

今日のトピック

- **制御**

 - 制御の目的

 - フィードバックループの考え方

 - 制御系の評価法

- **変復調**

 - 変復調の概念、目的

 - 共振器からのエラー信号取得

変復調の概念、目的

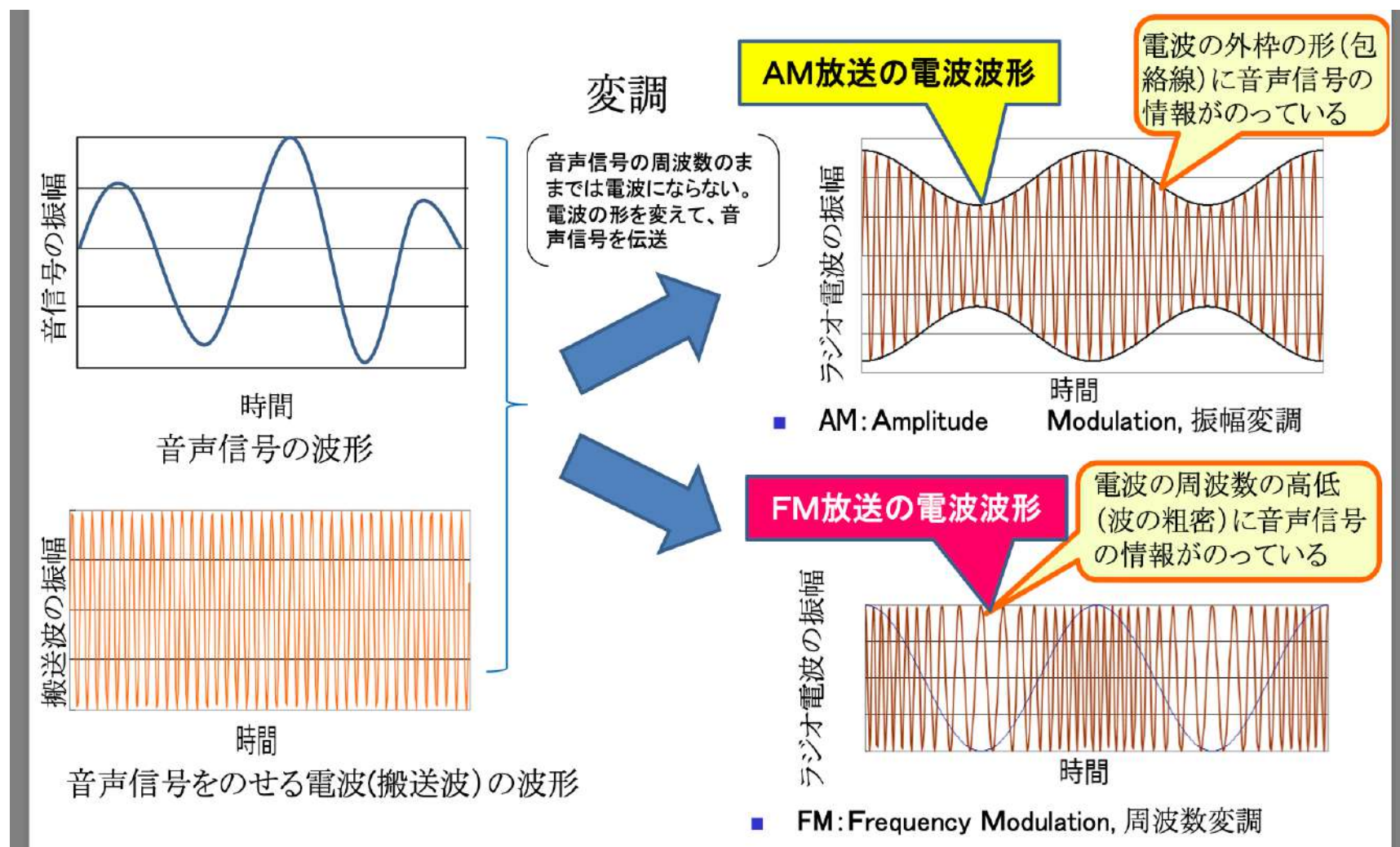
変調：何かの物理量を変化させる

光や電気信号の場合、振幅、周波数、位相・・・

通信では音声帯域の情報の送受信など

光学実験の場合だとエラー信号の取得などに使う

変復調の概念、目的



総務省HPより引用

変復調の概念、目的

光における変調素子の例

振幅 : AOM

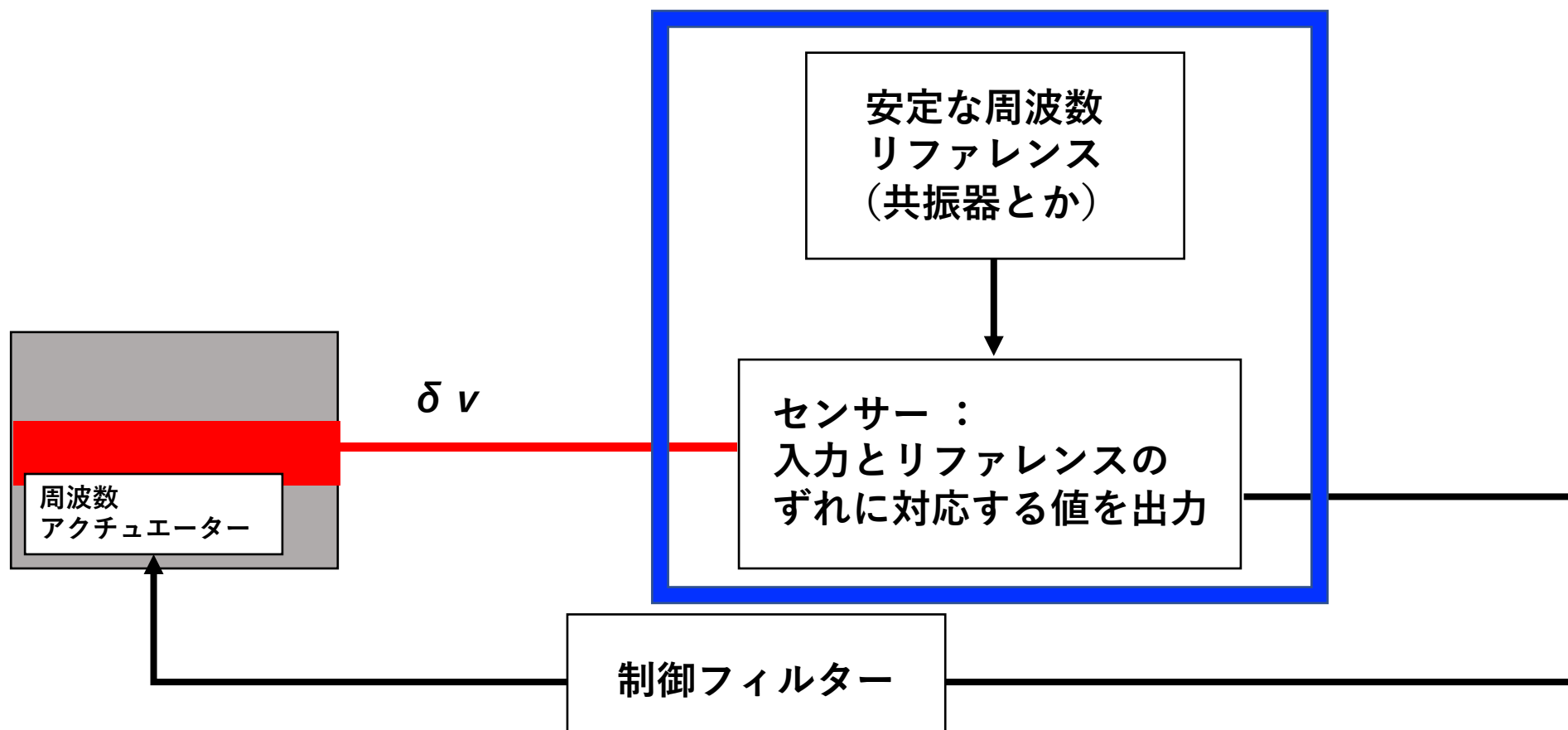
周波数 : AOM、レーザー内部共振器、回折格子

位相 : EOM

変復調の概念、目的

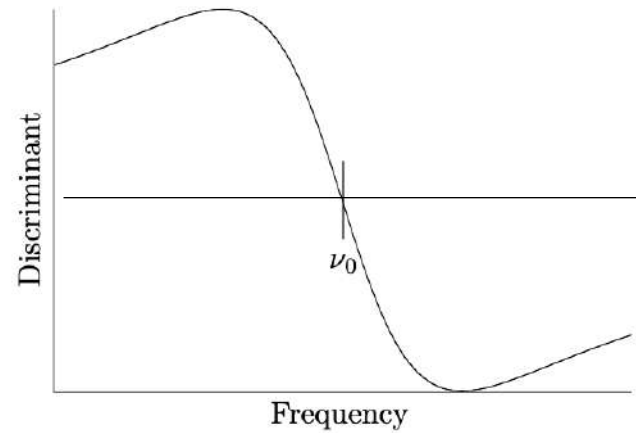
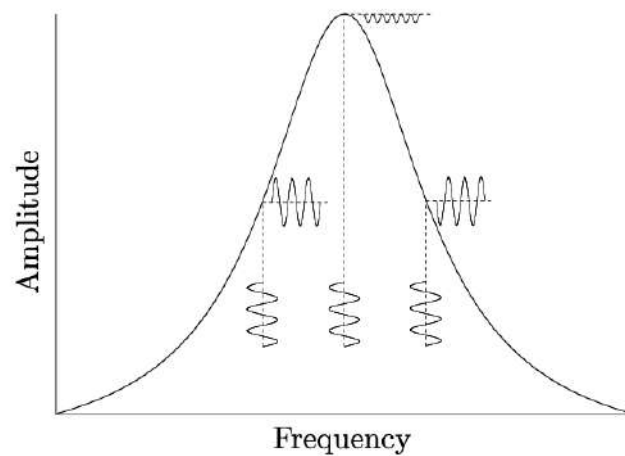
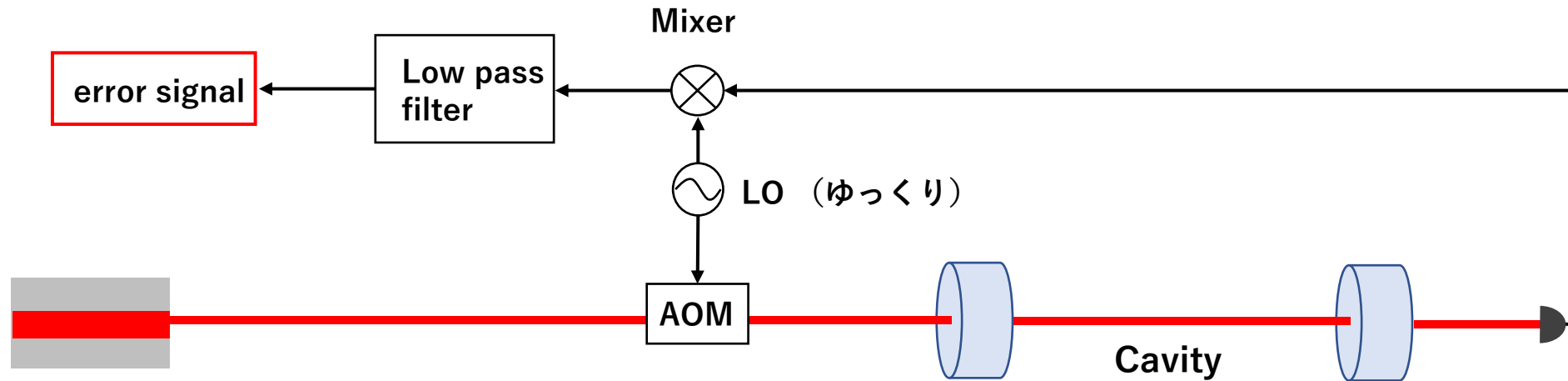
目的：共振器の制御

→ そのために共振点からのズレに比例した（＝線形な）信号が欲しい



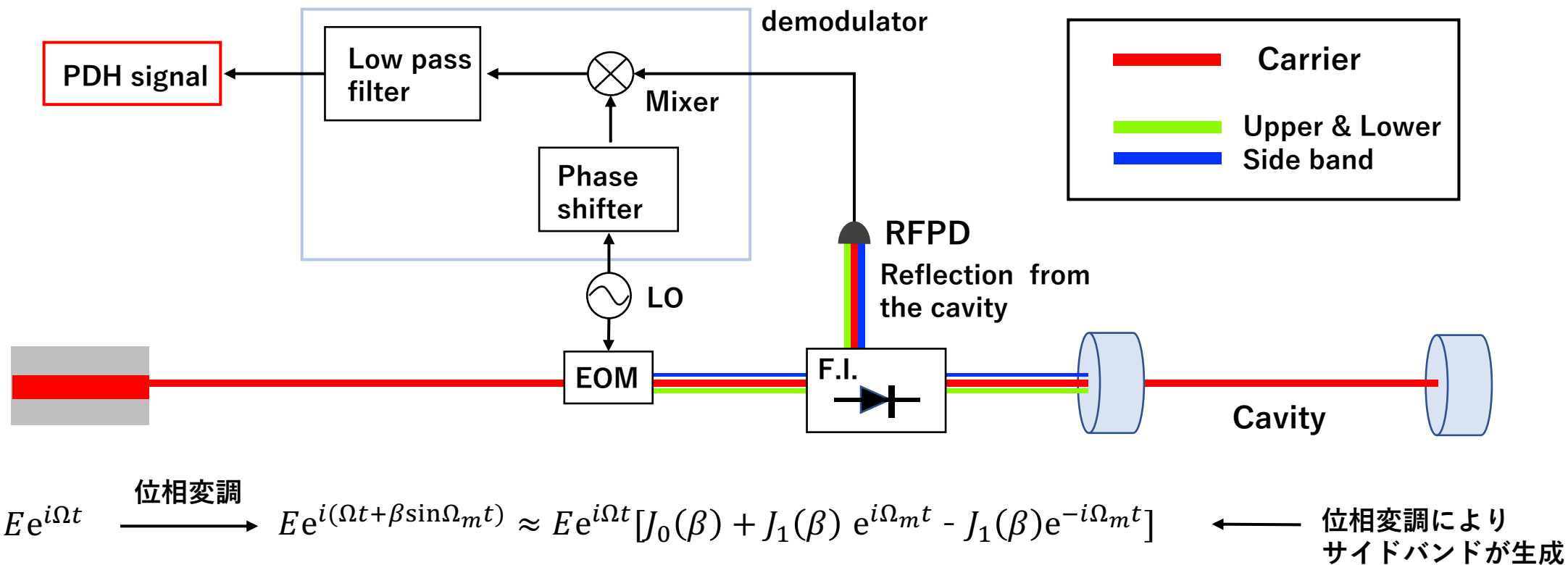
変共振器からのエラー信号取得

方法1：周波数を振って透過光の変化度合いを見る（微分を取る）



変共振器からのエラー信号取得

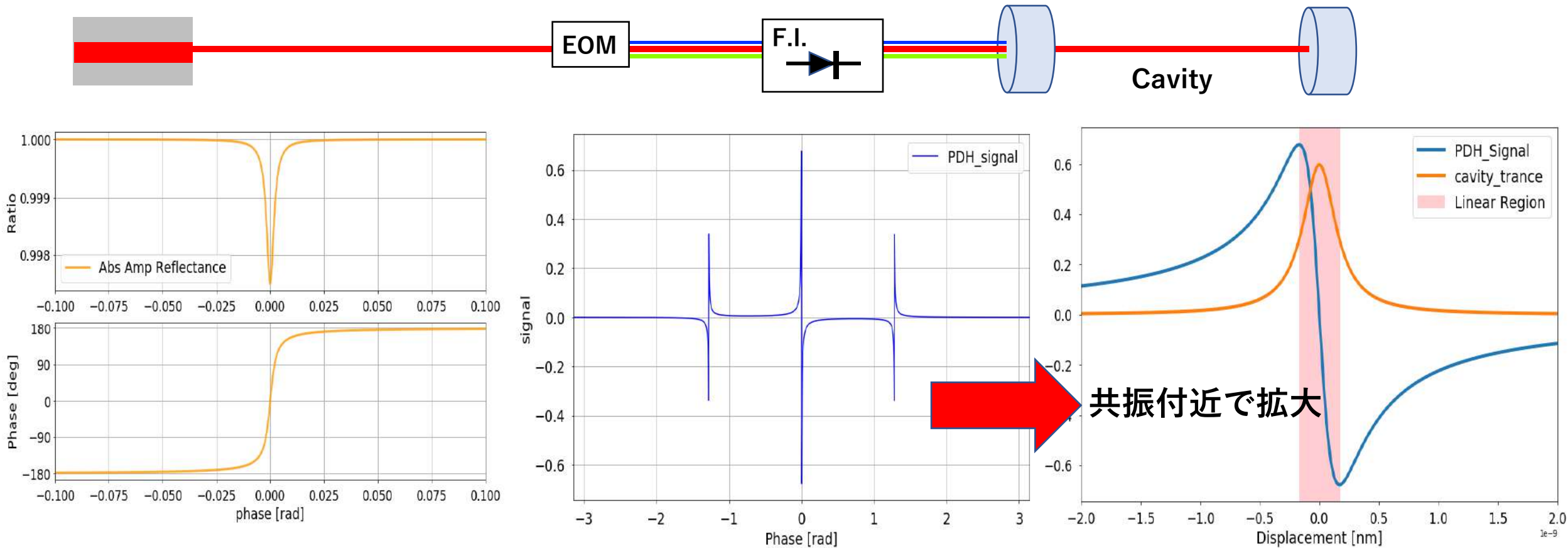
方法2：位相変調によるサイドバンドとキャリアの比較 (PDH法)



PDH signal (at near resonant) $\propto \text{Im}[r(\Omega)]$ (in-phase)

変共振器からのエラー信号取得

方法2：位相変調によるサイドバンドとキャリアの比較 (PDH法)



その他エラー取得法（いずれも変調は使わないが）：偏光解析法、肩ロック

参考文献

Warren Nagoumey 「Quantum Electronics for Atomic Physics」

干渉計制御：河邊さんD論、安東さん修論、D論、宗宮さんノート

PDH法：道村さんノート、和泉さん修論

偏光法：道村さん修論

制御論の教科書：いろいろ