

ひずみ測定ブリッジ回路の 寄生容量影響の除去手法

群馬大学工学部 電気電子工学科

須永 浩誌 光野 正志 ○田浦 哲也 木村 圭吾

森村 直正† 岡野 晴樹†† 岩崎 正美††

宅野 弘行†† 鈴木 光正†† 小林 春夫

† : コンサルタント

†† : 東京測器研究所

発表内容

1. 研究背景・目的
2. ひずみ測定の調査
 - 2.1. ひずみ測定
 - 2.2. ひずみゲージによる荷重計の設計・試作・評価
3. 高精度交流型動ひずみ測定回路
 - 3.1. 現状の問題点の抽出
 - 3.2. 問題解決の提案
4. まとめ・今後の課題

発表内容

- ▶ 1. 研究背景・目的
- 2. ひずみ測定の調査
 - 2.1. ひずみ測定
 - 2.2. ひずみゲージによる荷重計の設計・試作・評価
- 3. 高精度交流型動ひずみ測定回路
 - 3.1. 現状の問題点の抽出
 - 3.2. 問題解決の提案
- 4. まとめ・今後の課題

研究背景

ユビキタス化に伴ってセンサの需要が増加

□センサ

□センサ回路

□センサネットワーク

□センサフュージョン

複数のセンサ機能の融合

人間の五感相互

研究目的

- 車載用等への適用により**センサ技術**が産業的・技術的に関心を集めている

GMR回転角
センサ



空気流量
センサ

圧力セン

高精度計測技術への挑戦！

- ・油圧制御用圧力センサ
- ・ターボ加給圧センサ
- ・大気圧センサ
- ・タイヤ圧センサ



- ・車両安定性制御
- ・ロールオーバー制御

- ・エアバッグ用加度センサ
- ・車両安定性制御
- ・サスペンション制御
- ・ナビゲーションシステム

研究目的

車載用等で実績を持つ
ひずみ測定技術に着目

その中でも評価の高い
交流型動ひずみ測定
について調査

交流型動ひずみ測定回路の高精度化の実現

発表内容

1. 研究背景・目的

2. ひずみ測定の調査



2.1. ひずみ測定

2.2. ひずみゲージによる荷重計の設計・試作・評価

3. 高精度交流型動ひずみ測定回路

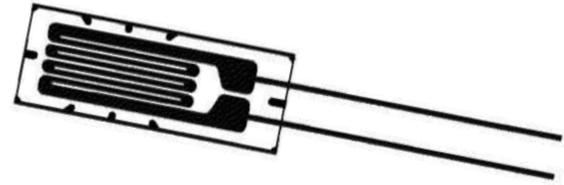
3.1. 現状の問題点の抽出

3.2. 問題解決の提案

4. まとめ・今後の課題

ひずみ測定とは

ひずみ計測にはひずみゲージセンサを用いる



ひずみゲージ:
物体の微小な伸び縮みを測定する**センサ**

性能

100万分の1の
分解能が要求される

ひずみゲージセンサ



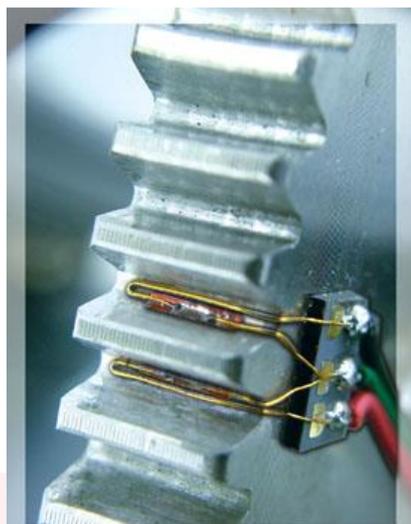
□ 薄い基板の上に箔型の抵抗体を形成

- a. 測定対象物にゲージを接着
- b. 物体の変形に伴いゲージの抵抗も変化
- c. 抵抗変化の測定によりひずみを検知

ひずみ測定の使用例

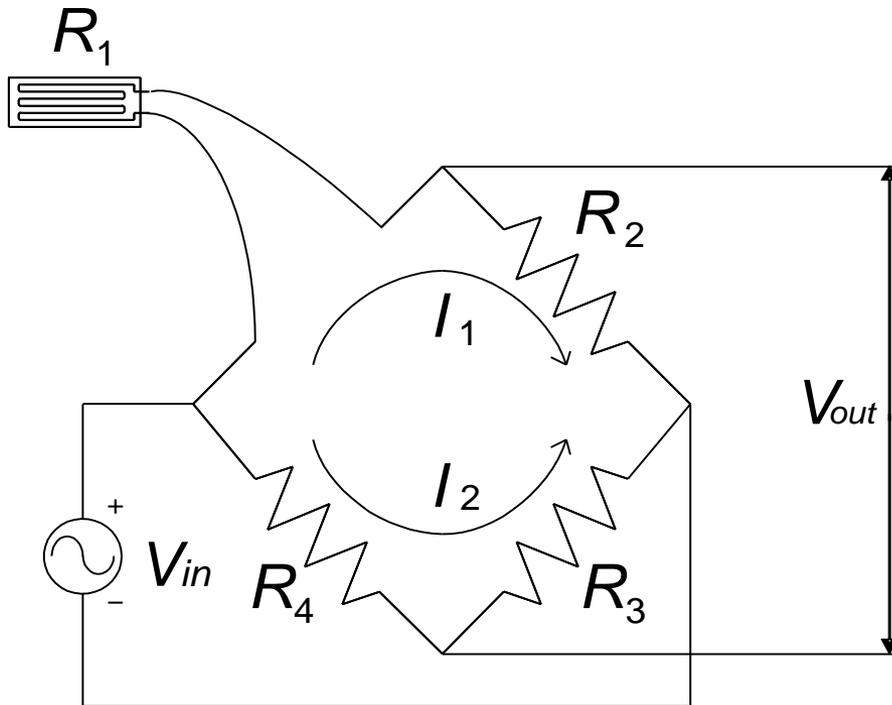
一般的に知られることは少ないが、様々な分野で活躍

- ◆自動車
 - ◆航空機
 - ◆建設・土木産業
 - ◆産業機械分野
- 等での実績を持つ



測定用センサ回路

- ホイートストンブリッジ回路にひずみゲージを用いる
- ゲージの抵抗変化を電気信号に変換してひずみ量を得る

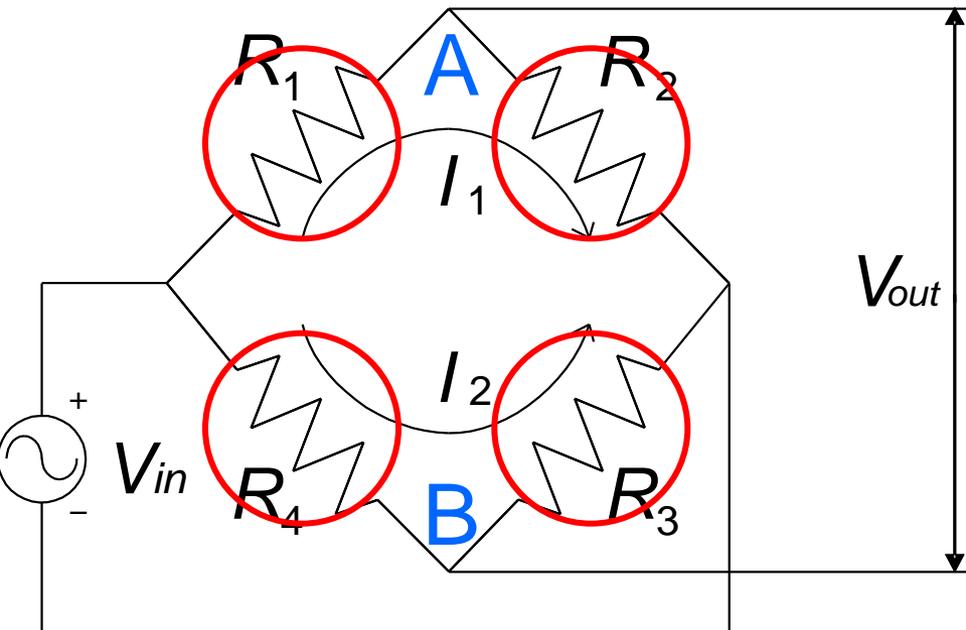


ホイートストンブリッジ回路

ひずみの表し方

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\Delta L}{L} = \text{マイクロストレイン}[\mu\varepsilon] \\ 1\mu\varepsilon = 1 \times 10^{-6} m/m = 1ppm \\ \text{(parts-per-million; 百万分率)} \end{array} \right.$$

ひずみ検出の原理



測定用途に応じて各抵抗辺に
ひずみゲージを用いる

ホイートストンブリッジ
出力電圧

$$V_{out} = \left(\frac{R_3}{R_3 + R_4} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) V_{in}$$

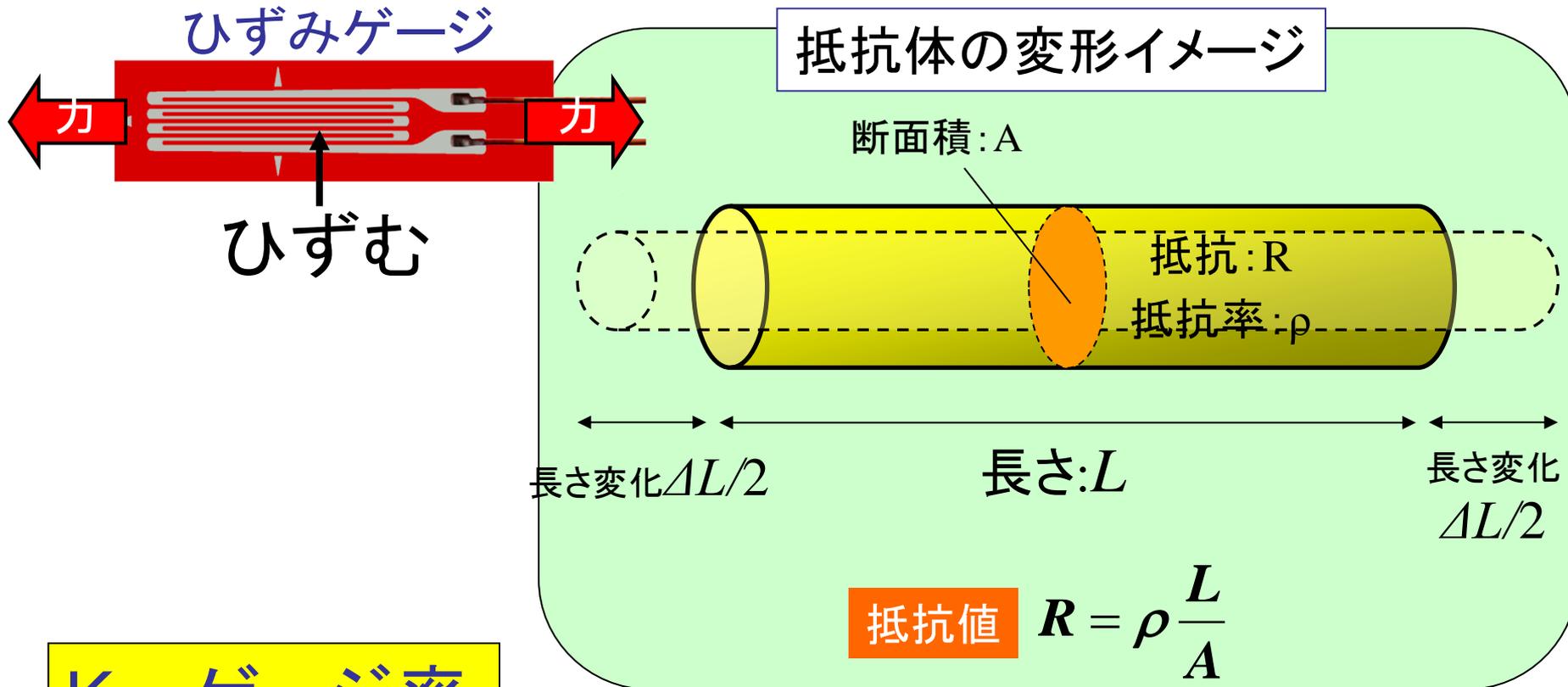
平衡条件

$$R_1 R_3 = R_2 R_4 \text{ のとき } V_{out} = 0$$

初期条件

- ゲージ抵抗が変化すると平衡が崩れる
- AB間に電位差が生じ、そこからひずみ量を得る

ひずみ



K : ゲージ率

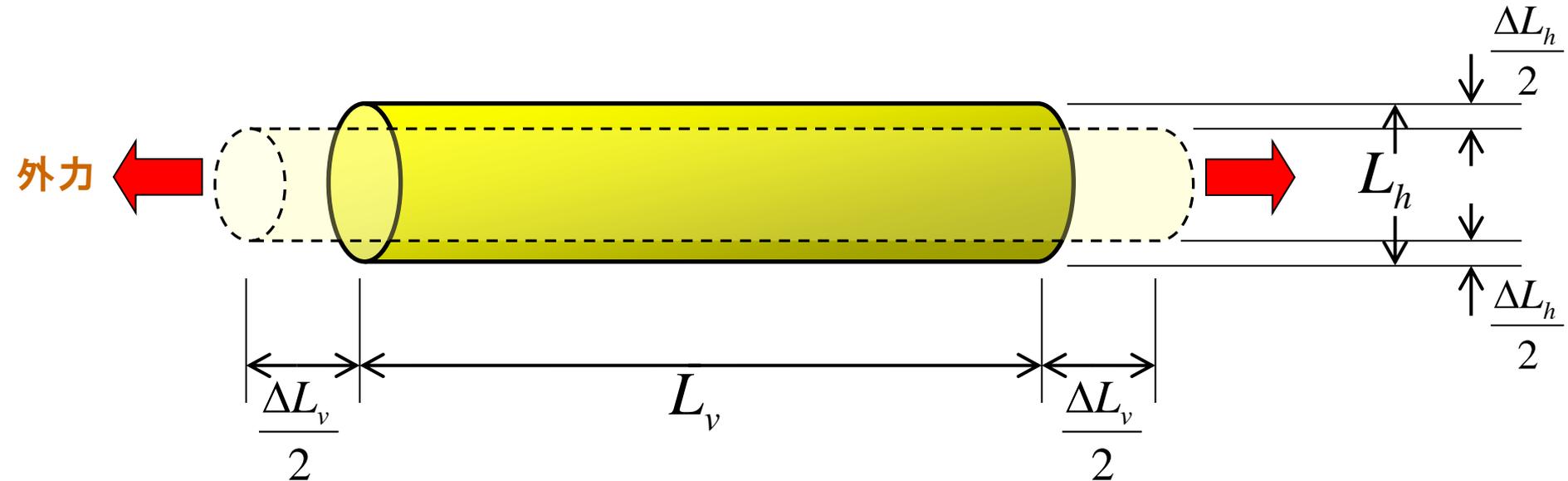
金属の場合: 2~4.5

(通常は2で計算)

半導体の場合: 150以上

$$\boxed{\text{ひずみ } \varepsilon} = \frac{\Delta L}{L} = \frac{1}{K} \cdot \frac{\Delta R}{R}$$

ポアソン比 (縦・横ひずみ比)



縦ひずみ $\varepsilon_v = \frac{\Delta L_v}{L_v}$

横ひずみ $\varepsilon_h = \frac{\Delta L_h}{L_h}$

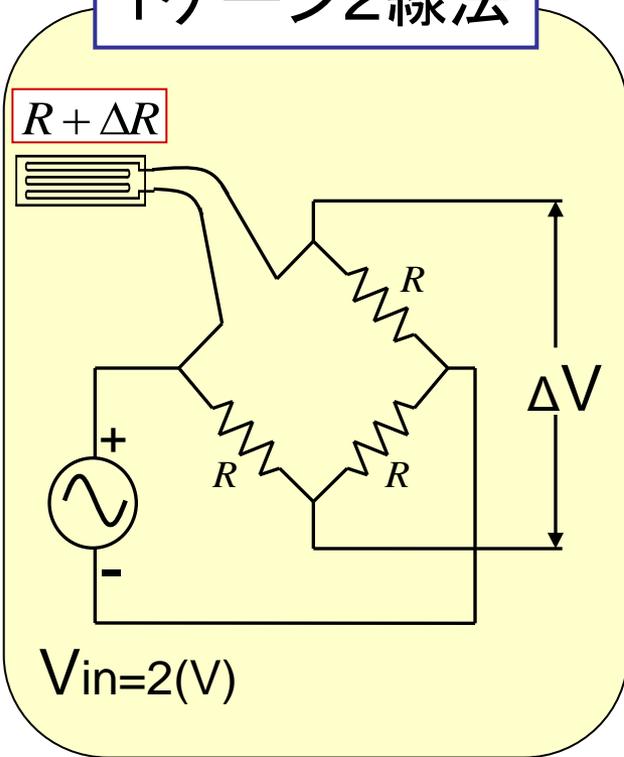
ポアソン比 $\sigma = \frac{\varepsilon_h}{\varepsilon_v}$

金属の場合0.3
通常この値で計算

ゲージ率Kとポアソン比 σ は物質による定数

測定用ブリッジ回路の基本構成

1ゲージ2線法



(一般的にはゲージ率2.00、入力電圧2.00V)

$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$ 、
としたとき、出力電圧 ΔV は一般式より

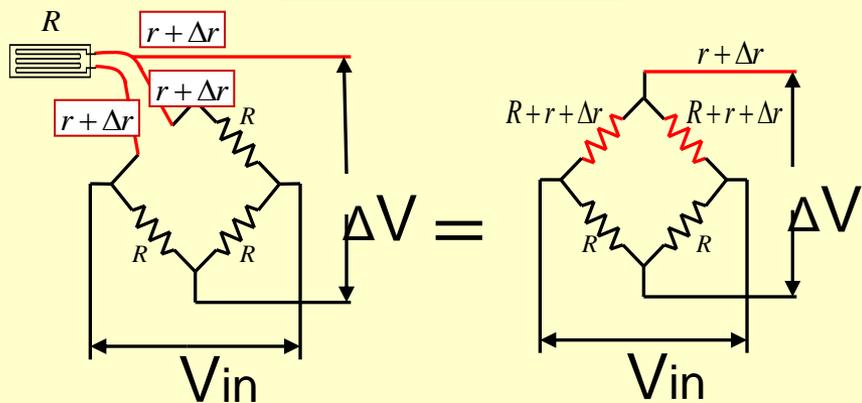
$$\Delta V = \frac{\Delta R}{2R + \Delta R} = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{2 + \frac{\Delta R}{R}} \quad \dots (1)$$

$$\frac{\Delta R}{R} = K \cdot \varepsilon \quad \text{より} \quad \Delta V = \frac{2\varepsilon}{2 + 2\varepsilon} \quad \dots (2)$$

$$(2) \text{式より} \quad \varepsilon = \frac{\Delta V}{1 - \Delta V} \quad \Delta V \ll 1(V) \quad \text{のとき} \quad \varepsilon \doteq \Delta V$$

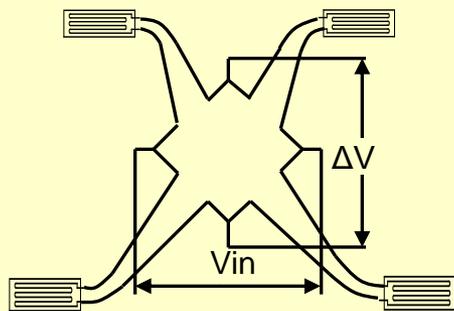
測定用途に応じた様々な結線方法

1ゲージ3線法



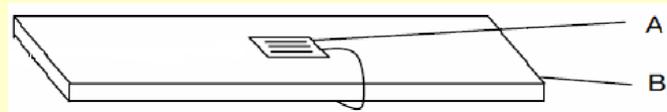
温度補償可能

4ゲージ法

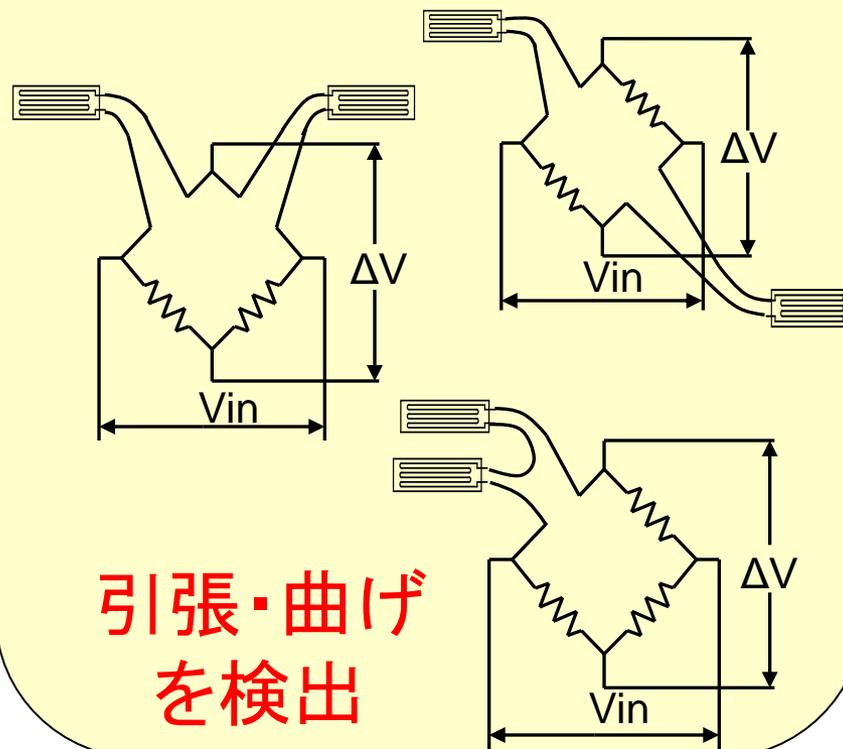


最も感度が良い

2ゲージ法



物体の両面にゲージを貼る



引張・曲げ
を検出

発表内容

1. 研究背景・目的

2. ひずみ測定の調査

2.1. ひずみ測定

▶ 2.2. ひずみゲージによる荷重計の設計・試作・評価

協力: 富士電機システムズ

3. 高精度交流型動ひずみ測定回路

3.1. 現状の問題点の抽出

3.2. 問題解決の提案

4. まとめ・今後の課題

目的

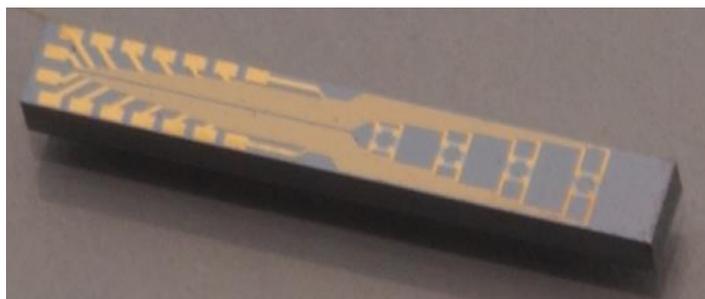
- 荷重計の設計・試作により、ひずみゲージを用いたセンサシステムの一般原理を調査
[設計・試作等は富士電機システムズの協力]
- 出力リニアリティの評価
- ひずみゲージの特性を知る

半導体ひずみゲージの一般原理

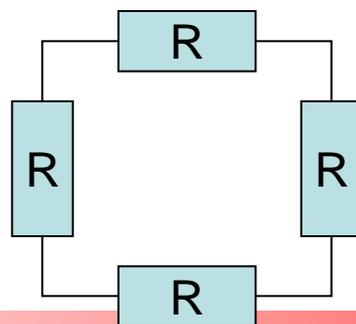
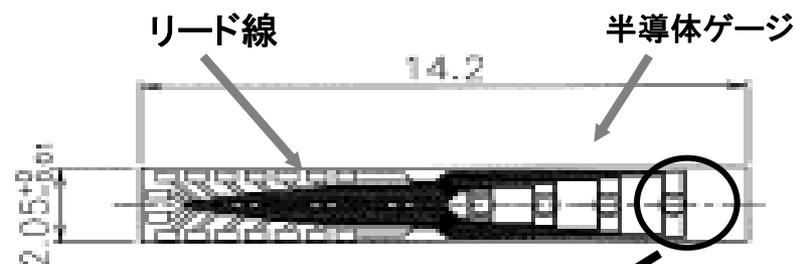
荷重計には半導体ひずみゲージを使用

半導体ひずみゲージ

応力によって抵抗値が変化し、
加わった力を電気信号に変換する素子



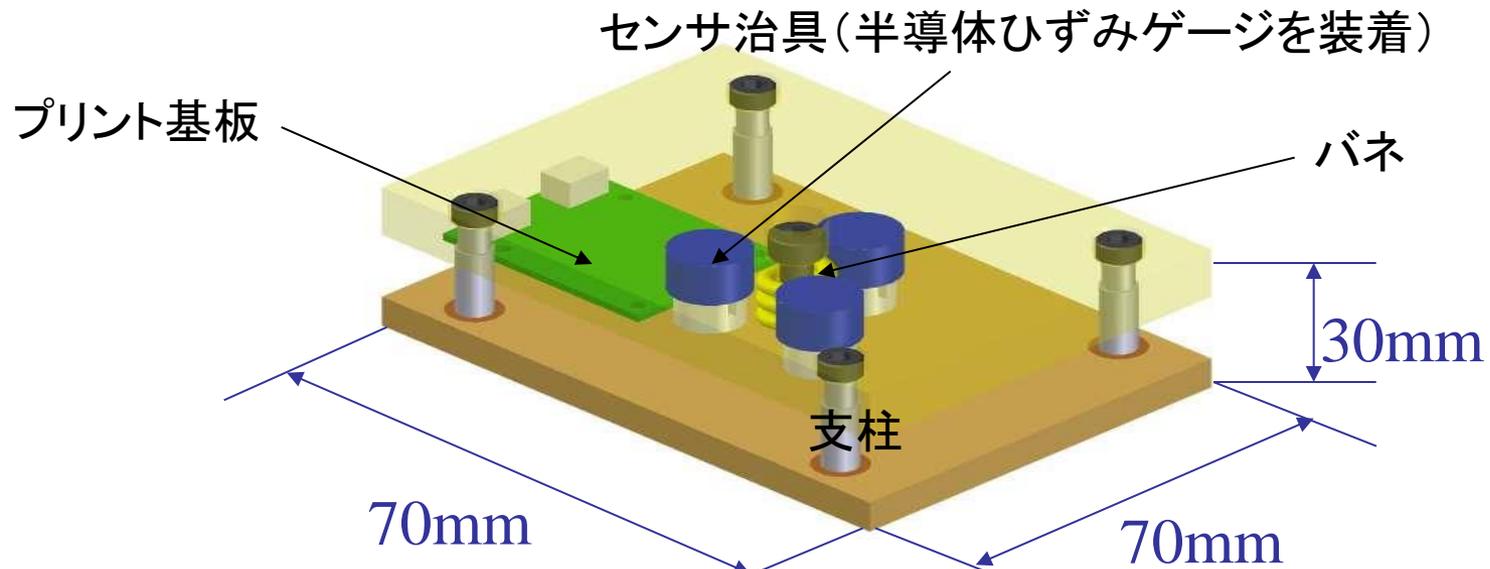
半導体ひずみゲージ
センサ



4ゲージ法

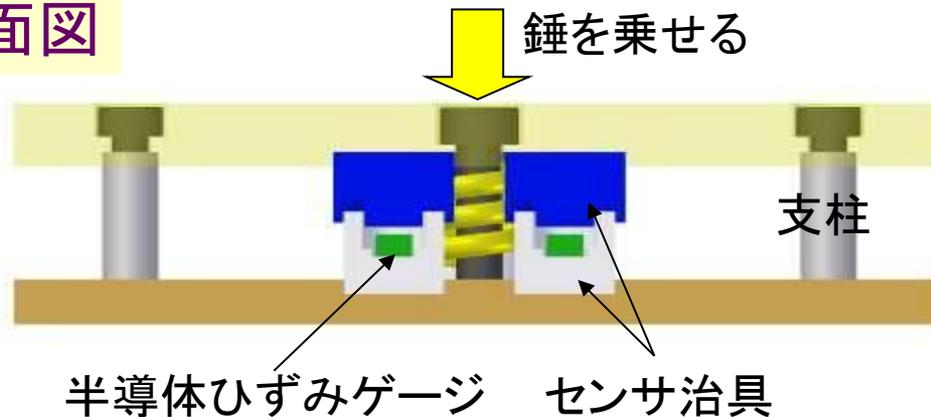
ひずみゲージセンサ: 富士電機システムズ

半導体ひずみゲージを用いた荷重計の設計

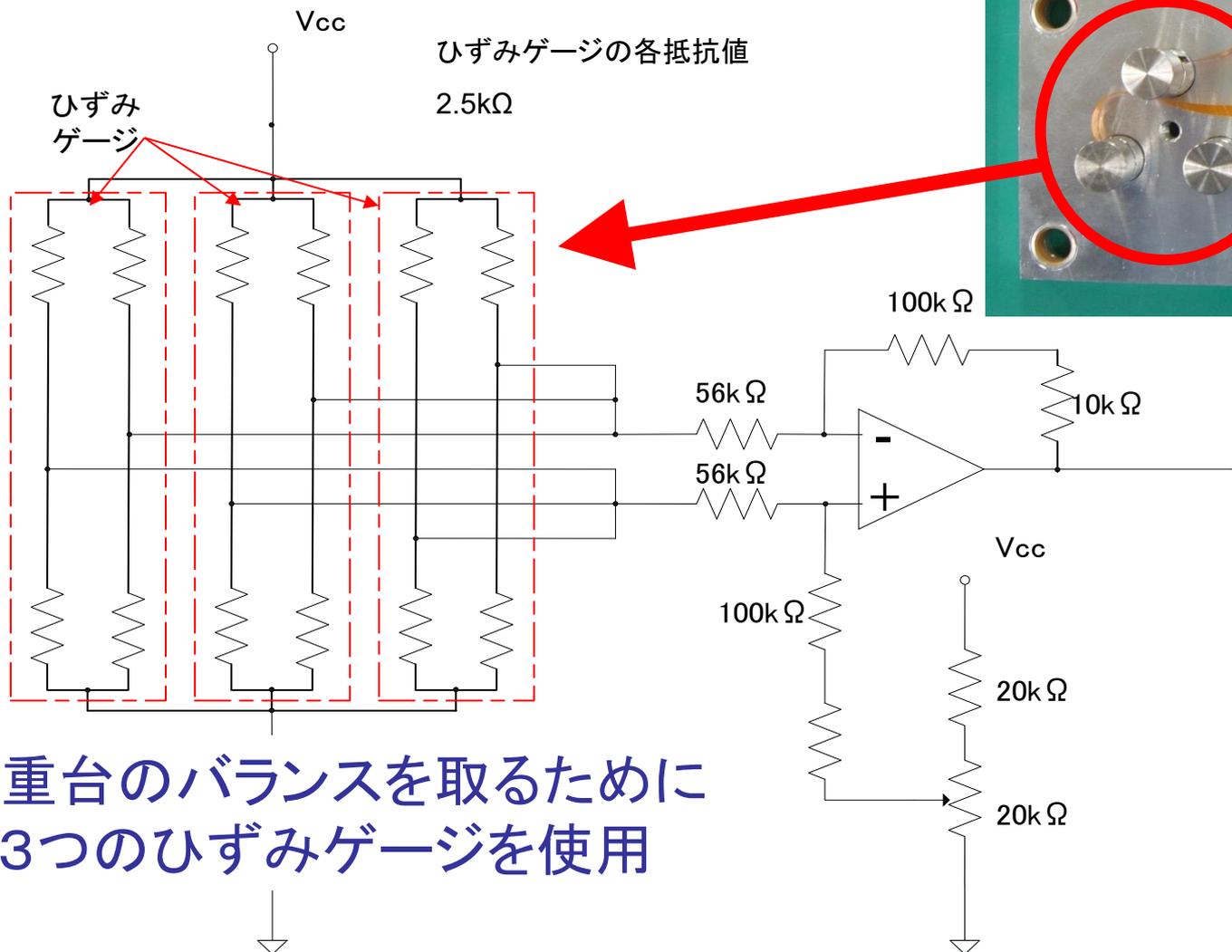
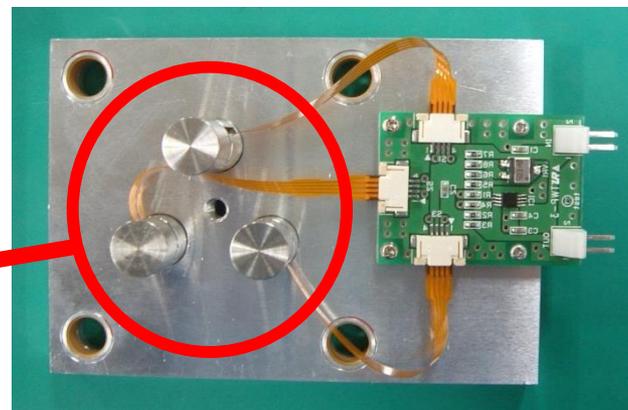


センサとプリント基板はフレキシブルケーブルで接続

荷重計側面図



荷重計回路図設計



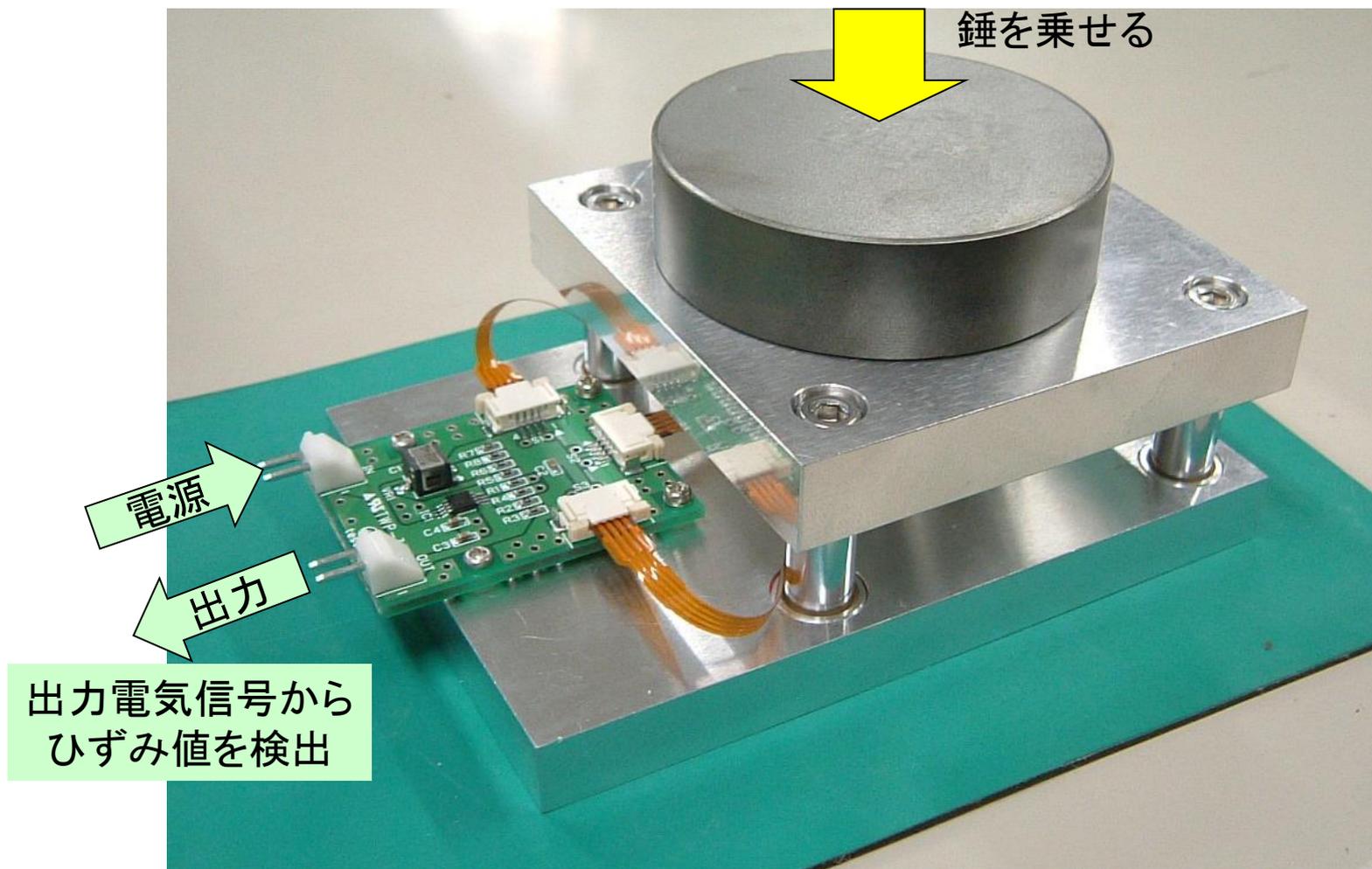
ひずみゲージの各抵抗値

2.5k Ω

ひずみ
ゲージ

荷重台のバランスを取るために
3つのひずみゲージを使用

試作した荷重計による測定風景

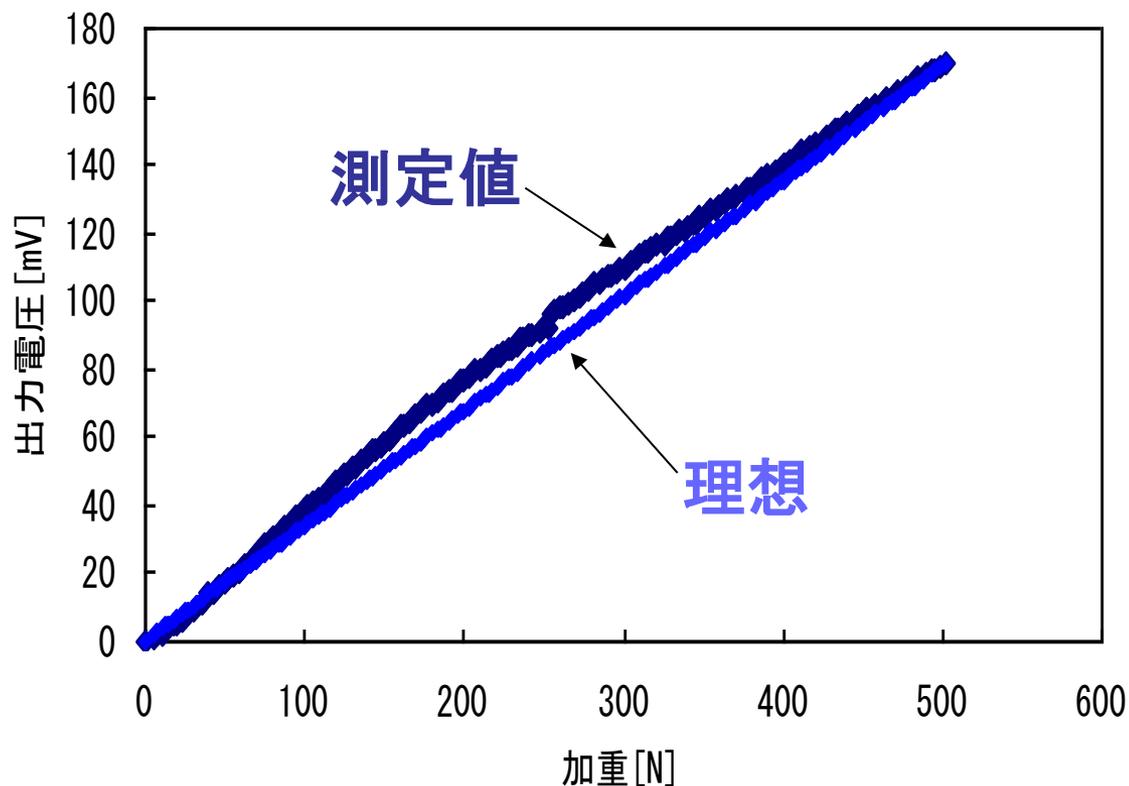


ひずみゲージの特性

直線性のばらつき



- ・機構部品の遊びの影響
- ・加重点の位置ずれの影響
- ・接着剤の影響



発表内容

1. 研究背景・目的

2. ひずみ測定の調査

2.1. ひずみ測定

2.2. ひずみゲージによる荷重計の設計・試作・評価

3. 高精度交流型動ひずみ測定回路

▶ 3.1. 現状の問題点の抽出

3.2. 問題解決の提案

4. まとめ・今後の課題

ひずみ測定法

ひずみ測定

時間の経過に対して変化
しないとみなせるひずみ

時間とともに変化
するひずみ

静ひずみ測定

動ひずみ測定

建造物の経時変化の測定

建造物の地震観測

交流型測定法

直流型測定法

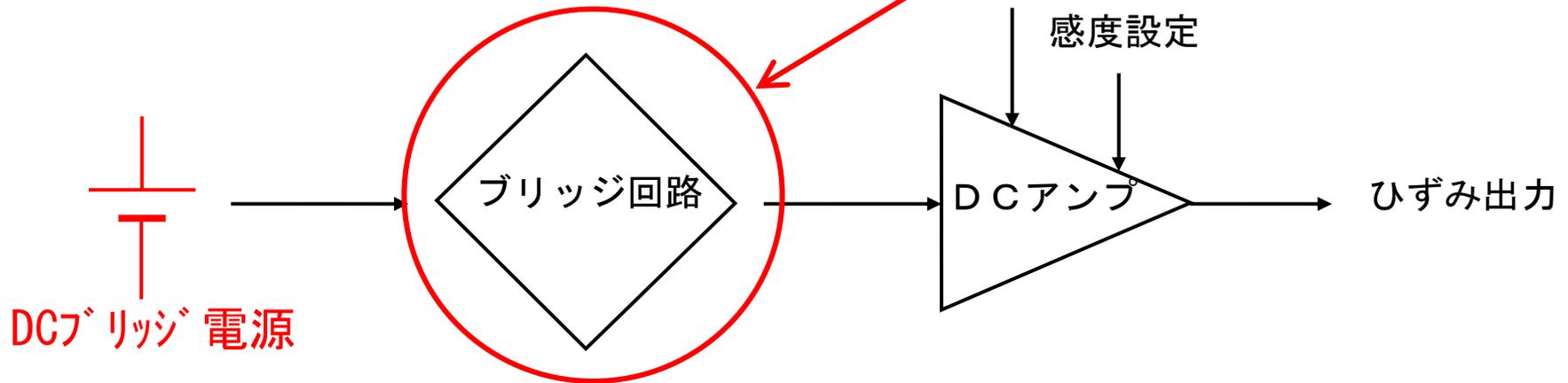
直流型動ひずみ測定法

- 寄生容量の影響はない
- 抵抗バランスのみ考慮すればいい

ブリッジを平衡させる

抵抗バランス

感度設定



- 熱起電力、1/fノイズ、低周波ノイズの影響が大きい

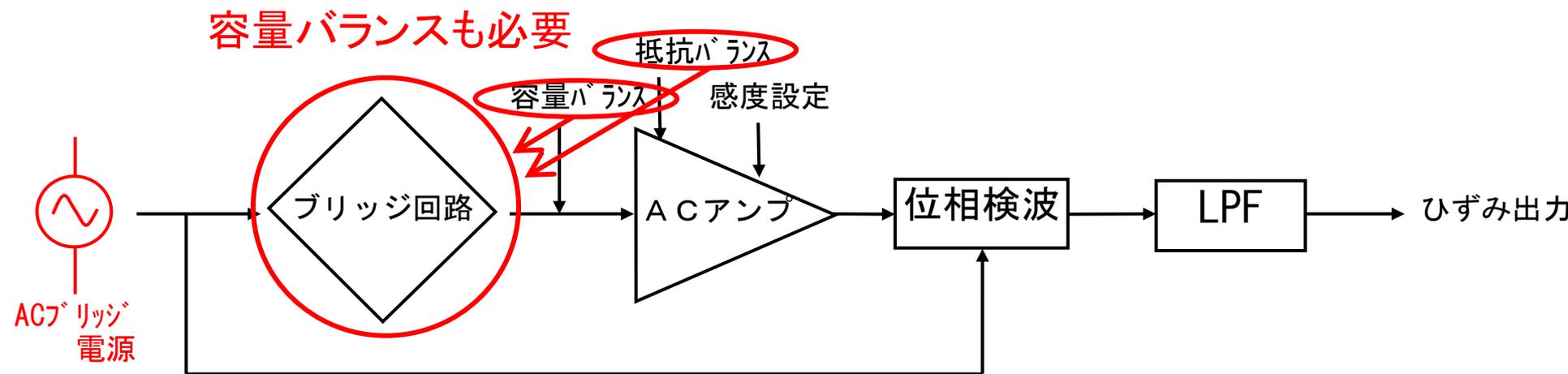


高精度化が困難

交流型動ひずみ測定法

使用メリット

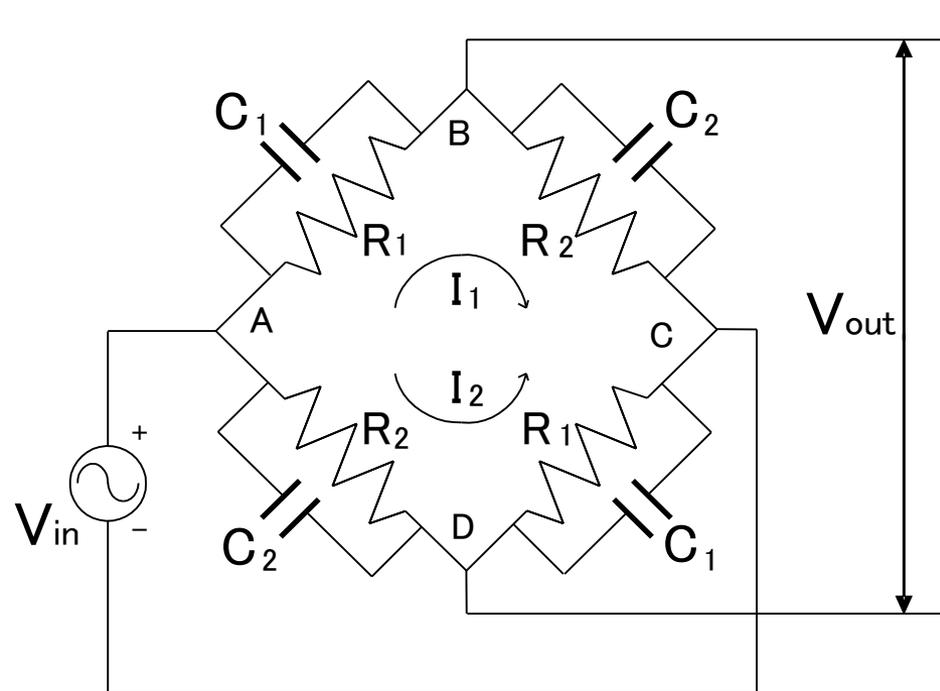
低周波ノイズの影響がなく、高安定、高精度



➡ 寄生容量が問題となる!

寄生容量の影響の解析

導出式



$$V_{out} = \left(\frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} - \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2} \right) V_{in}$$

$$Z_1 = \frac{R_1}{1 + j\omega C_1 R_1}$$

$$Z_2 = \frac{R_2}{1 + j\omega C_2 R_2}$$

時定数 $T_1 = R_1 C_1$ 、 $T_2 = R_2 C_2$

$$V_{out} = \left(\frac{R_2^2 - R_1^2 + \omega^2 (T_1^2 R_2^2 - T_2^2 R_1^2) + 2j\omega R_1 R_2 (T_1 - T_2)}{(R_2 + R_1)^2 + \omega^2 (T_1 R_2 + T_2 R_1)^2} \right) V_{in}$$

出力電圧への影響

$$V_{out} = \left(\frac{R_2^2 - R_1^2 + \omega^2 (T_1^2 R_2^2 - T_2^2 R_1^2) - 2j\omega R_1 R_2 (T_1 - T_2)}{(R_2 + R_1)^2 + \omega^2 (T_1 R_2 + T_2 R_1)^2} \right) V_{in}$$

$$T_1 = R_1 C_1, T_2 = R_2 C_2$$

実数部

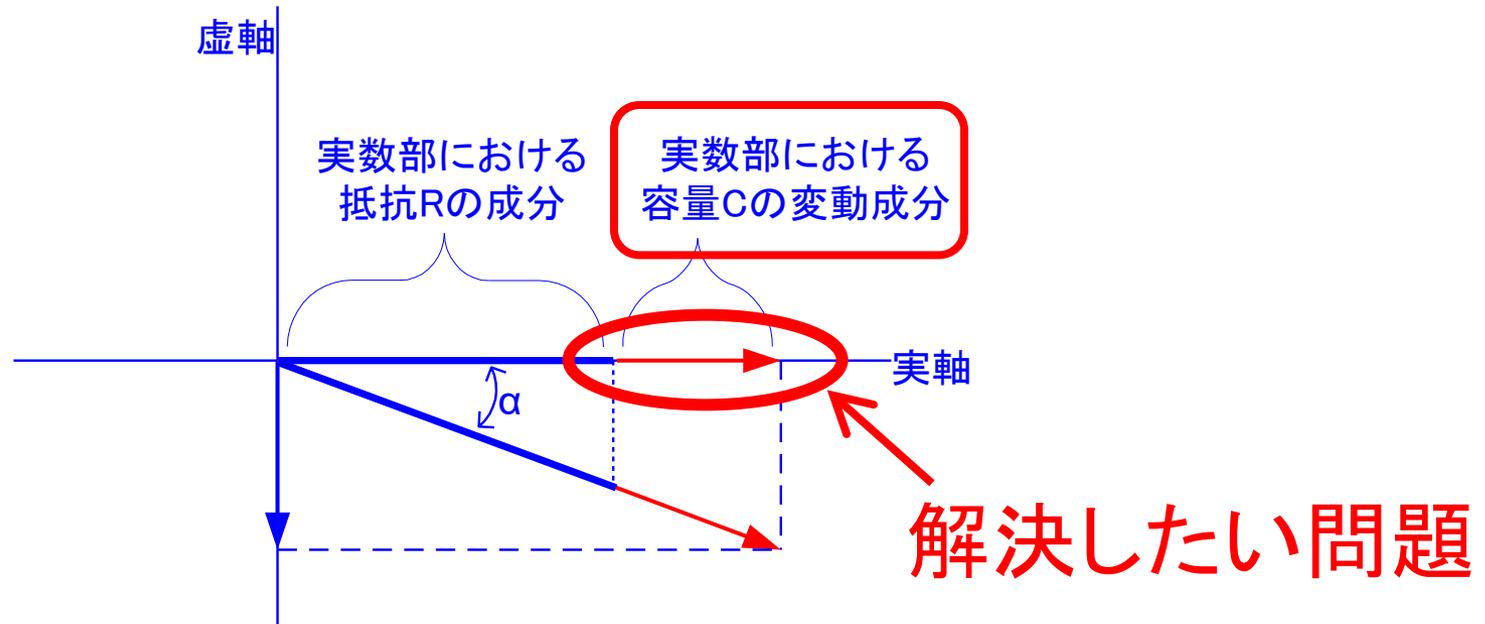
経時変化、温度変化
により変動してしまう

$$V_{CR} = \left(\frac{R_2^2 - R_1^2 + \omega^2 (T_1^2 R_2^2 - T_2^2 R_1^2)}{(R_2 + R_1)^2 + \omega^2 (T_1 R_2 + T_2 R_1)^2} \right) V_{in}$$

虚数部

$$V_{CI} = \left(\frac{2\omega R_1 R_2 (T_1 - T_2)}{(R_2 + R_1)^2 + \omega^2 (T_1 R_2 + T_2 R_1)^2} \right) V_{in}$$

実数部での寄生容量の影響



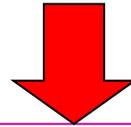
実数部にも容量の影響がブリッジ出力の変動とがわかった

$$V_{CR} = \left(\frac{R_2^2 - R_1^2 + \omega^2 (T_1^2 R_2^2 - T_2^2 R_1^2)}{(R_2 + R_1)^2 + \omega^2 (T_1 R_2 + T_2 R_1)^2} \right) V_{in}$$

感度変化

交流型動ひずみ測定の問題点

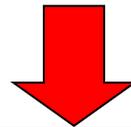
動ひずみ測定



- 経時変化・温度変化
- 寄生容量の値が変動

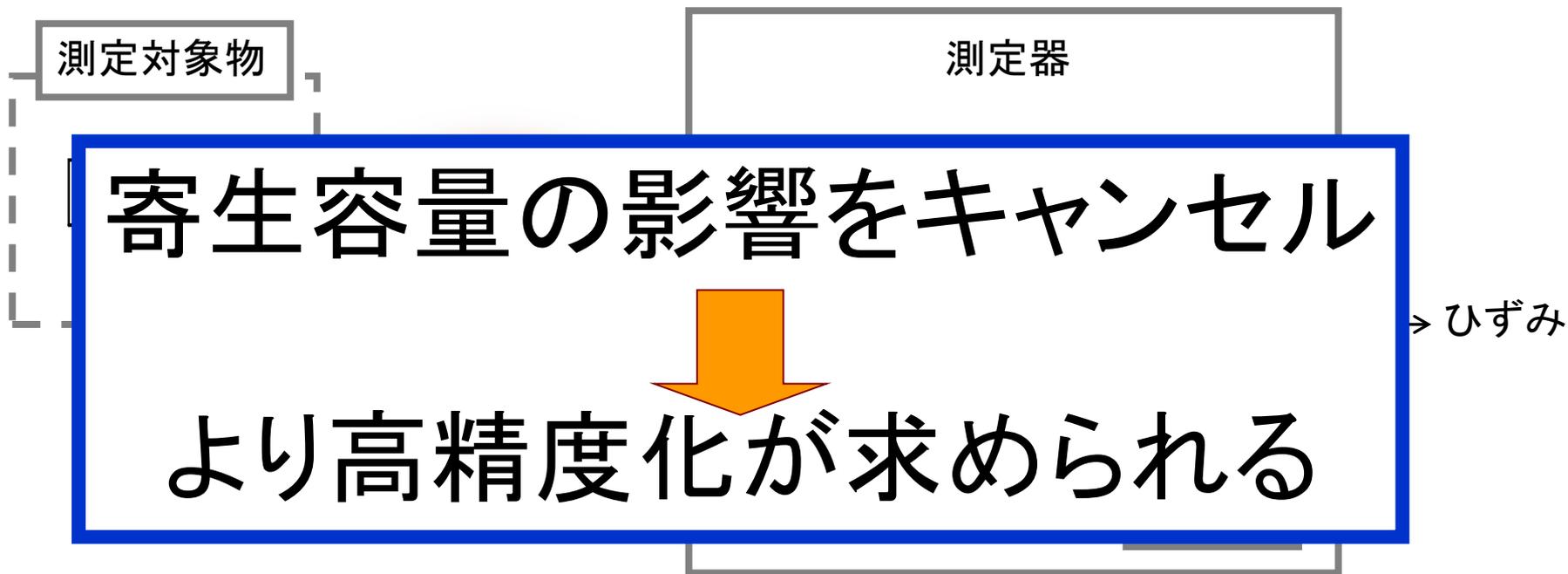
長いケーブルを使用するアプリケーション

→寄生容量の影響が大きい



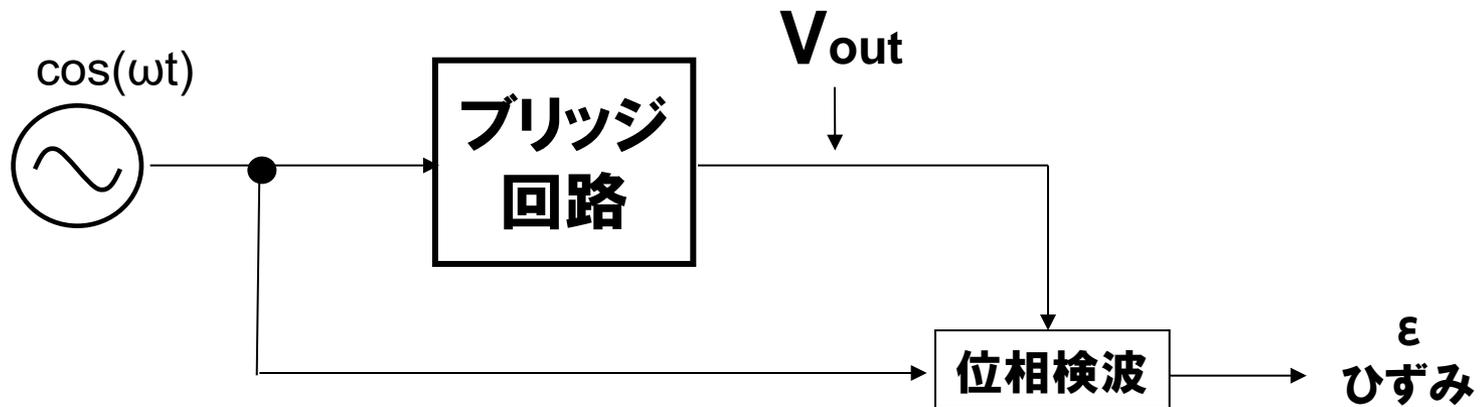
ひずみを高精度測定する際に無視できない問題

長いケーブルを使用するアプリケーション

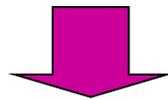


- ブリッジ回路内に長いケーブルが存在する場合
- ブリッジ回路内の問題なので
後段回路での誤差補正が非常に難しい

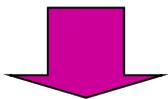
従来の交流型動ひずみ測定法



従来法: 実数部のみを位相検波



実数部における容量の問題は従来法では解決できない



新たな方式を提案

発表内容

1. 研究背景・目的

2. ひずみ測定の調査

2.1. ひずみ測定

2.2. ひずみゲージによる荷重計の設計・試作・評価

3. 高精度交流型動ひずみ測定回路

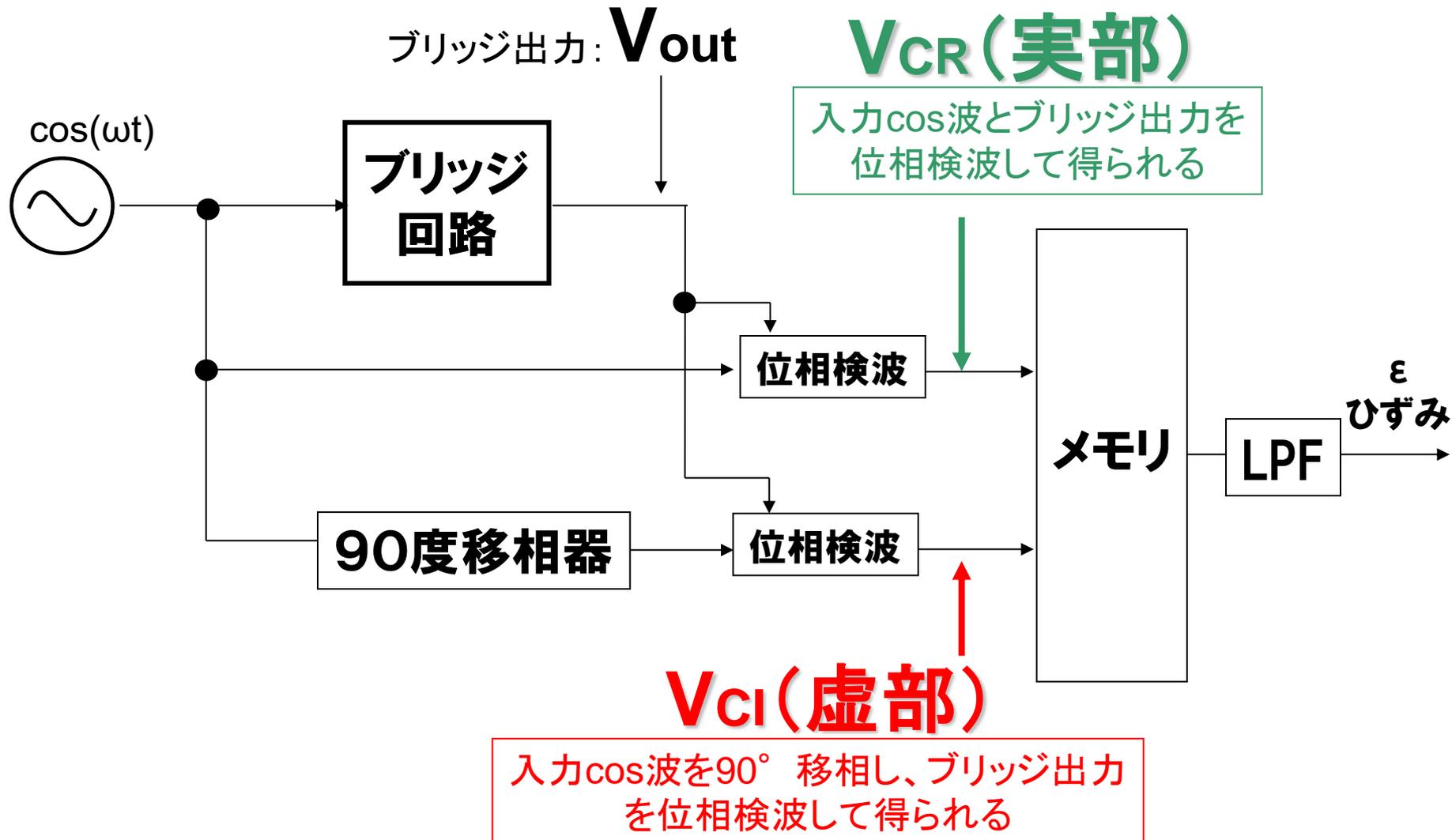
3.1. 現状の問題点の抽出

 3.2. 問題解決の提案

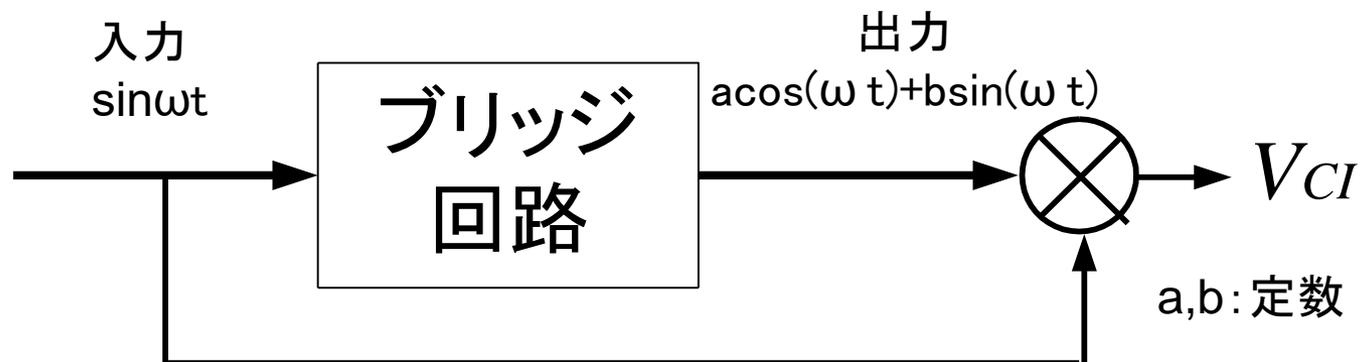
4. まとめ・今後の課題

提案1:
直交位相検波法

直交位相検波

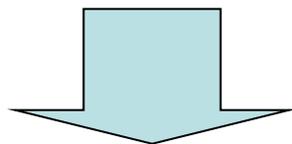


位相検波の理論式



$$V_{CR} = \cos(\omega t) \times [a \cos(\omega t) + b \sin(\omega t)]$$

$$= \frac{a}{2} + \frac{a}{2} \cos 2\omega t + \frac{b}{2} \sin 2\omega t$$

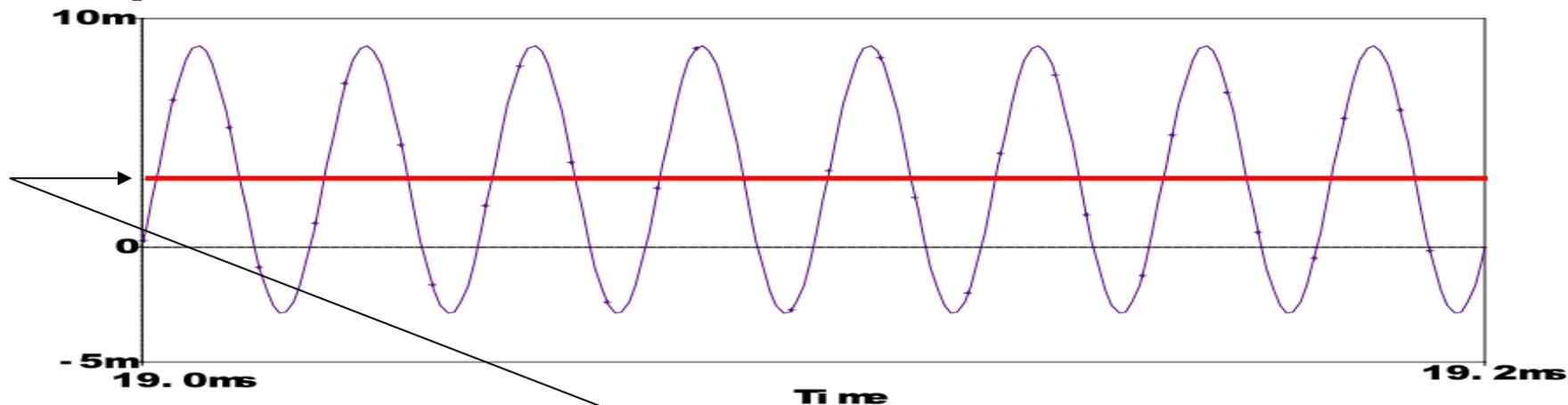


LPFでカットするとDC成分のみ残る

$$V_{CR} = \frac{a}{2}$$

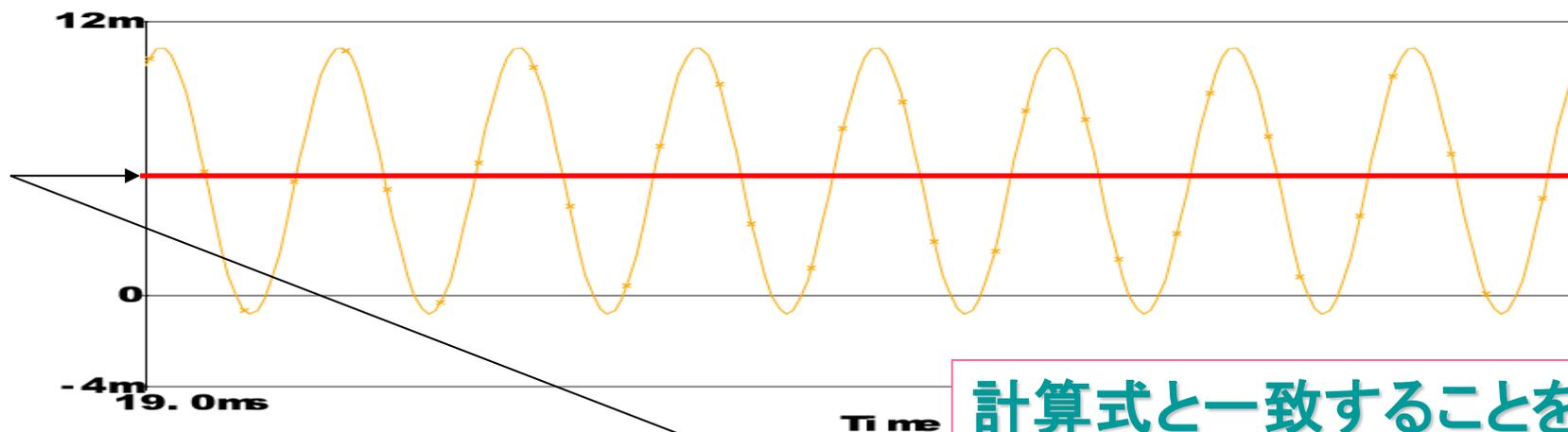
$$V_{CI} \text{も同様にしてLPFを通すと} \rightarrow V_{CI} = \frac{b}{2}$$

spice によるシミュレーション波形



V_{CR}波形

a/2 DC成分の値

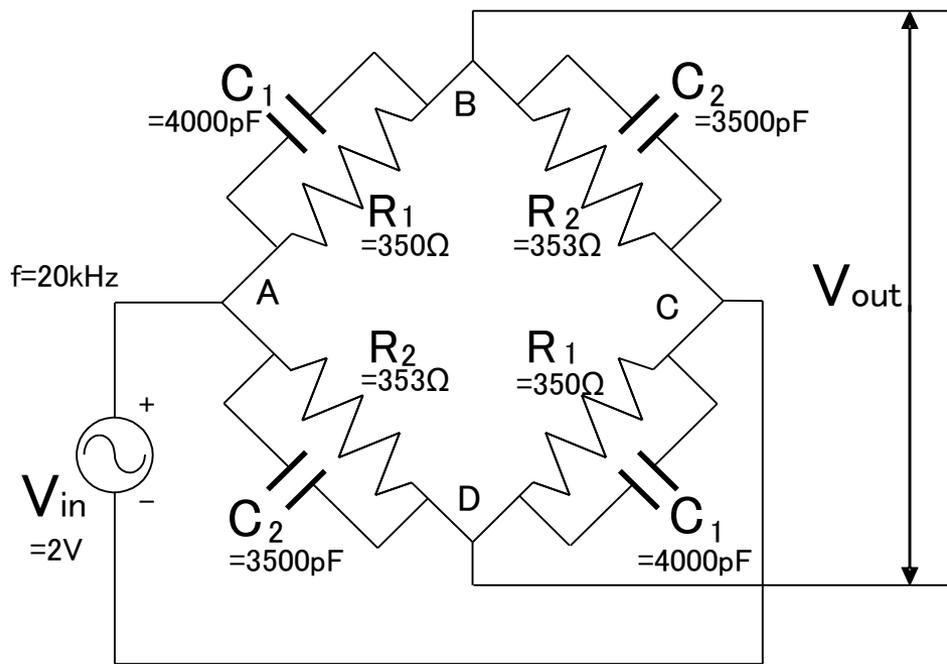


V_{ci}波形

計算式と一致することを確認

b/2 DC成分の値

シミュレーションによる解析の検証



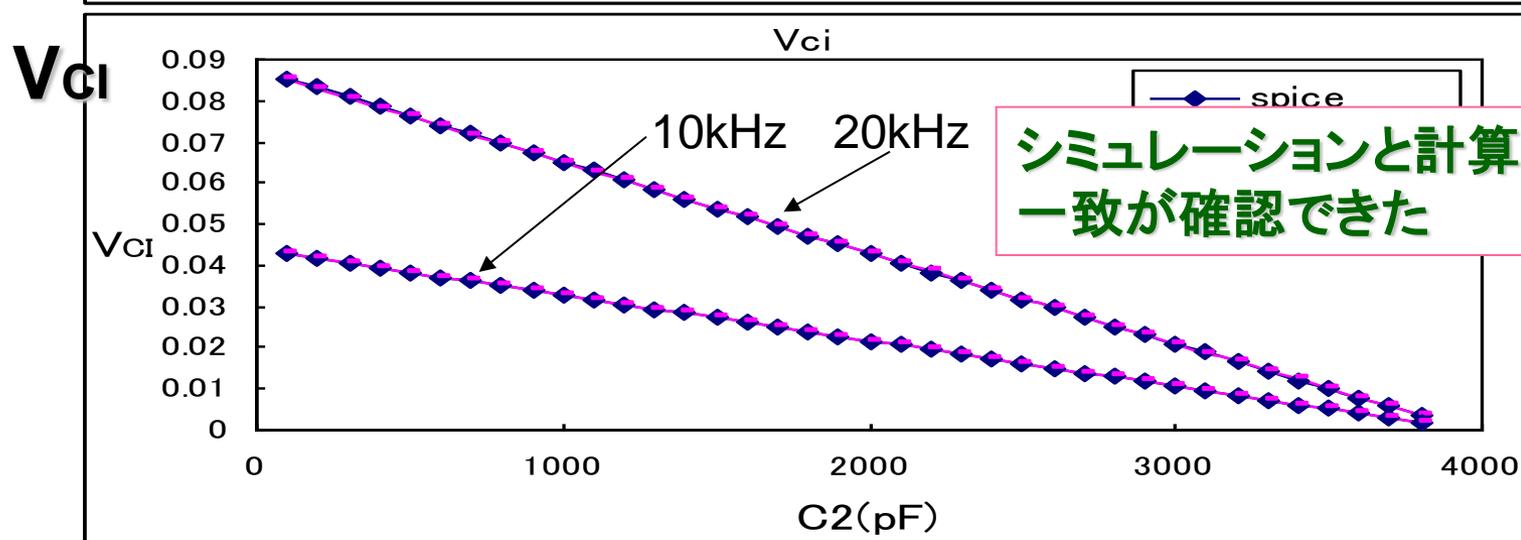
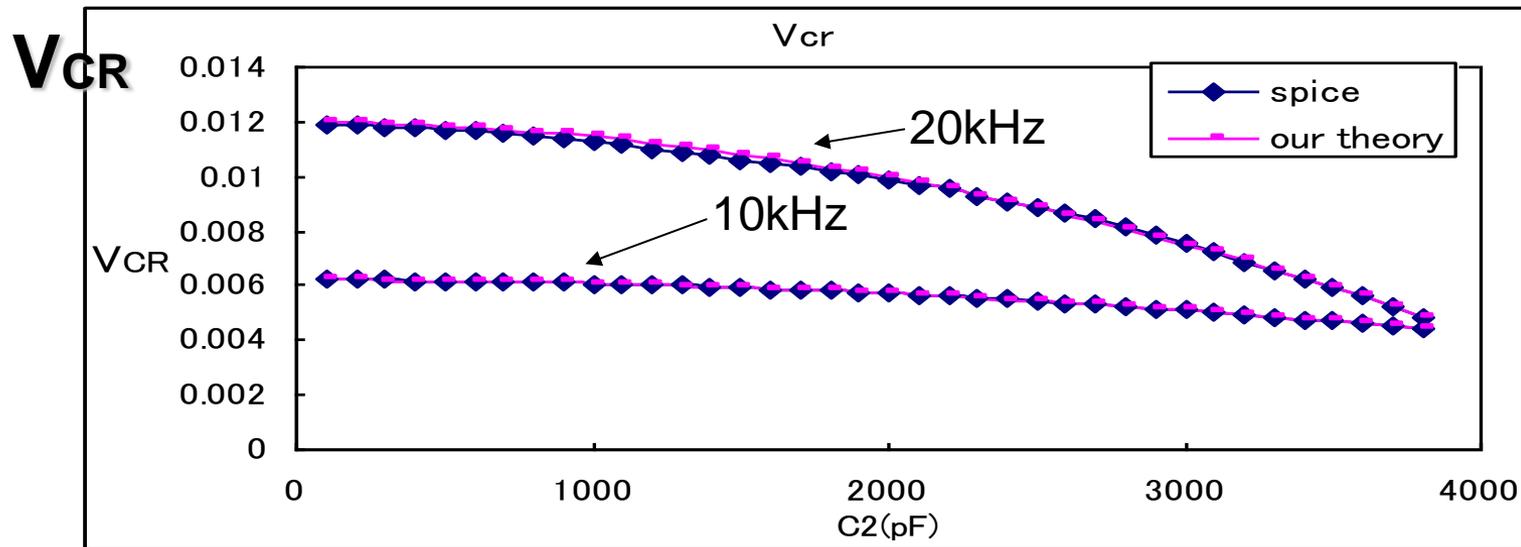
$$R_1 = 350\Omega, R_2 = 353\Omega$$

$$C_1 = 4000 pF, C_2 = 3500 pF$$

$$f = 20kHz, V_{in} = 2V$$

を与えC2の値を変化させる
パラメトリック解析を行った

C2を変化させた時のVcr, Vci特性

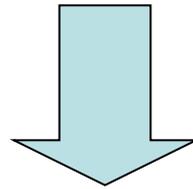


シミュレーションと計算結果の一致が確認できた

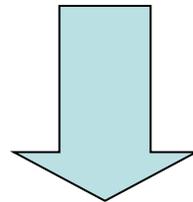
提案2:
分周器を用いた位相検波

実際の測定

提案1ではひずみの値が考慮されていない



実際の測定環境で影響するパラメータを考慮する
(ε :ひずみ 定数[K :ゲージ率 σ :ポアソン比])



ε :ひずみを導出する

実際の測定での式

導出式

$$V_{out} = \left(\frac{R_2^2 - R_1^2 + \omega^2 (T_1^2 R_2^2 - T_2^2 R_1^2) + 2j\omega R_1 R_2 (T_1 - T_2)}{(R_2 + R_1)^2 + \omega^2 (T_1 R_2 + T_2 R_1)^2} \right) V_{in}$$

ε : ひずみ 定数 [K : ゲージ率 σ : ポアソン比]

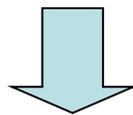
$$R_1 = R(1 + K\varepsilon), \quad R_2 = R(1 - L\varepsilon), \quad L = K\sigma$$

$$V_{out} = \left(\frac{K\varepsilon(1 + \sigma) \{ K\varepsilon(\sigma - 1) + 2 \} + \omega^2 \{ T_1^2 (1 - K\sigma\varepsilon)^2 - T_2^2 (1 + 2K\varepsilon)^2 \} + 2j\omega(T_1 - T_2)(1 + K\varepsilon)(1 - K\sigma\varepsilon)}{\{ 2 + K\varepsilon(1 - \sigma) \}^2 + \omega^2 \{ T_1 + T_2 + K(T_2 - \sigma T_1)\varepsilon \}^2} \right) V_{in}$$

ひずみ ε の値を考慮した出力電圧式

寄生容量キャンセルアルゴリズム

$$V_{out} = \left(\frac{K\varepsilon(1+\sigma)\{K\varepsilon(\sigma-1)+2\} + \omega^2 \{T_1^2(1-K\sigma\varepsilon)^2 - T_2^2(1+2K\varepsilon)^2\} + 2j\omega(T_1-T_2)(1+K\varepsilon)(1-K\sigma\varepsilon)}{\{2+K\varepsilon(1-\sigma)\}^2 + \omega^2 \{T_1+T_2+K(T_2-\sigma T_1)\varepsilon\}^2} \right) V_{in}$$



実数項

$$V_{CR} = \left(\frac{K\varepsilon(1+\sigma)\{K\varepsilon(\sigma-1)+2\} + \omega_1^2 \{T_1^2(1-K\sigma\varepsilon)^2 - T_2^2(1+2K\varepsilon)^2\}}{\{2+K\varepsilon(1-\sigma)\}^2 + \omega_1^2 \{T_1+T_2+K(T_2-\sigma T_1)\varepsilon\}^2} \right) V_{in}$$

虚数項

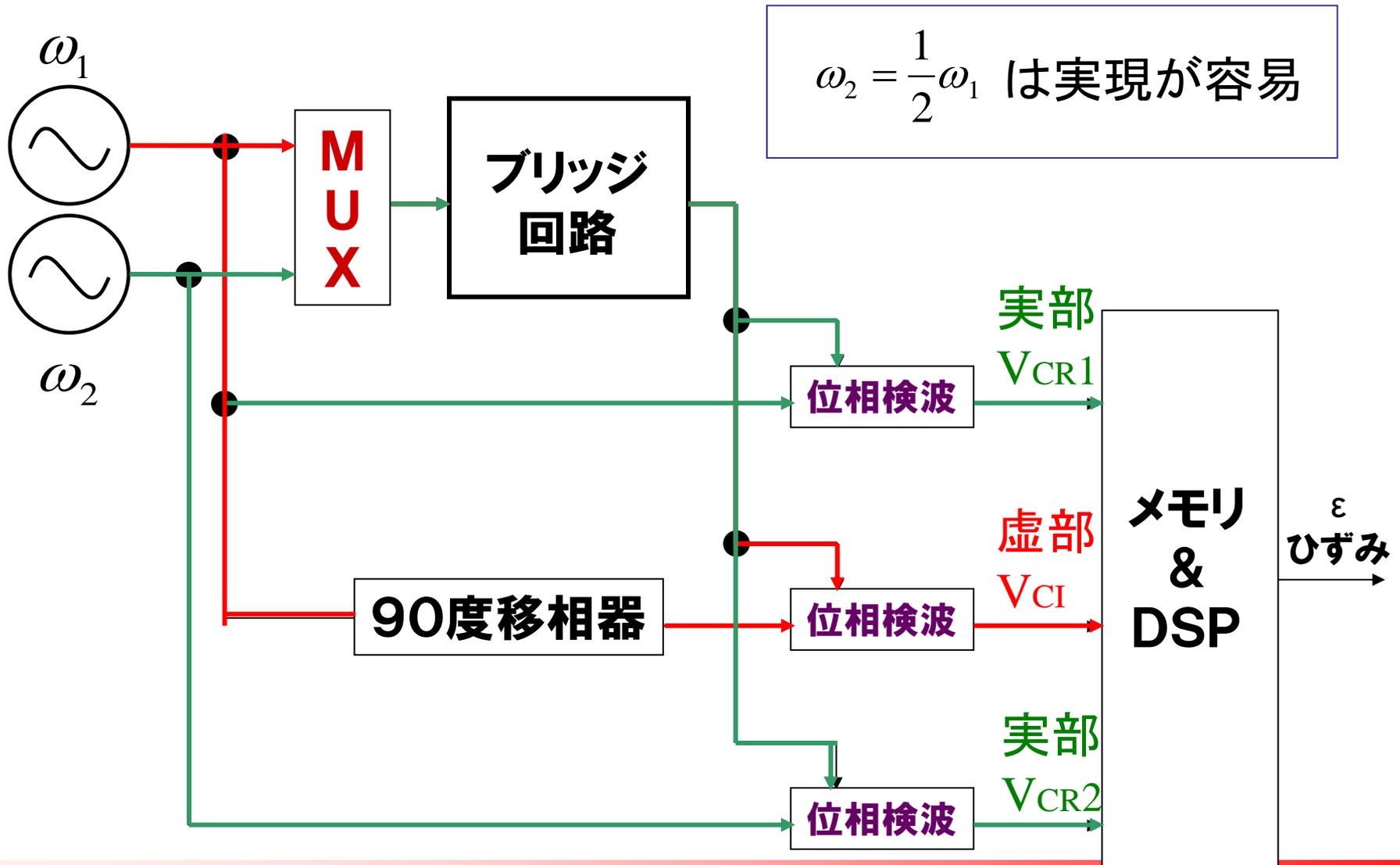
$$V_{CI} = \left(\frac{2\omega_1(T_1-T_2)(1+K\varepsilon)(1-K\sigma\varepsilon)}{\{2+K\varepsilon(1-\sigma)\}^2 + \omega_1^2 \{T_1+T_2+K(T_2-\sigma T_1)\varepsilon\}^2} \right) V_{in}$$

未知の値は ε 、 T_1 、 T_2

求めたいのは**ひずみ ε**

→3つの連立方程式を作り ε を導出

提案するブロック図



位相検波後の出力電圧

実部($\omega 1$)

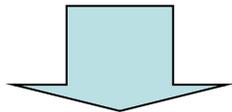
$$V_{CR1} = \left(\frac{K\varepsilon(1+\sigma)\{K\varepsilon(\sigma-1)+2\} + \omega_1^2 \{T_1^2(1-K\sigma\varepsilon)^2 - T_2^2(1+2K\varepsilon)^2\}}{\{2+K\varepsilon(1-\sigma)\}^2 + \omega_1^2 \{T_1+T_2+K(T_2-\sigma T_1)\varepsilon\}^2} \right) V_{in}$$

虚部($\omega 1$)

$$V_{CI} = \left(\frac{2\omega_1(T_1-T_2)(1+K\varepsilon)(1-K\sigma\varepsilon)}{\{2+K\varepsilon(1-\sigma)\}^2 + \omega_1^2 \{T_1+T_2+K(T_2-\sigma T_1)\varepsilon\}^2} \right) V_{in}$$

実部($\omega 2$)

$$V_{CR2} = \left(\frac{K\varepsilon(1+\sigma)\{K\varepsilon(\sigma-1)+2\} + \omega_2^2 \{T_1^2(1-K\sigma\varepsilon)^2 - T_2^2(1+2K\varepsilon)^2\}}{\{2+K\varepsilon(1-\sigma)\}^2 + \omega_2^2 \{T_1+T_2+K(T_2-\sigma T_1)\varepsilon\}^2} \right) V_{in}$$



3つの方程式より ε を導くことができる

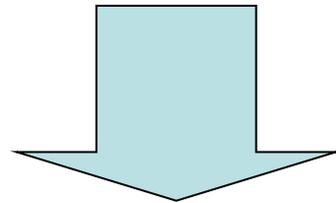
ひずみ ε 導出式

ε^2 の項は微小なので無視して計算

$$\varepsilon = \frac{\omega_1^2 (T_1^2 - T_2^2) + 2(V_{CR1}/V_{CI})\omega_1 (T_2 - T_1)}{2\omega_1 (V_{CR1}/V_{CI})K (T_1 - T_2 + T_2\sigma - T_1\sigma) - 2K(1 + \sigma) + 2\omega_1^2 K (T_1^2\sigma + 2T_2^2)}$$

$$K = 2, \sigma = 0.3, \omega_1 = 40\pi \times 10^3, V_{CR1} = 0.0049, V_{CI} = 0.0036, V_{CR2} = 0.0044$$

の値を用いて算出



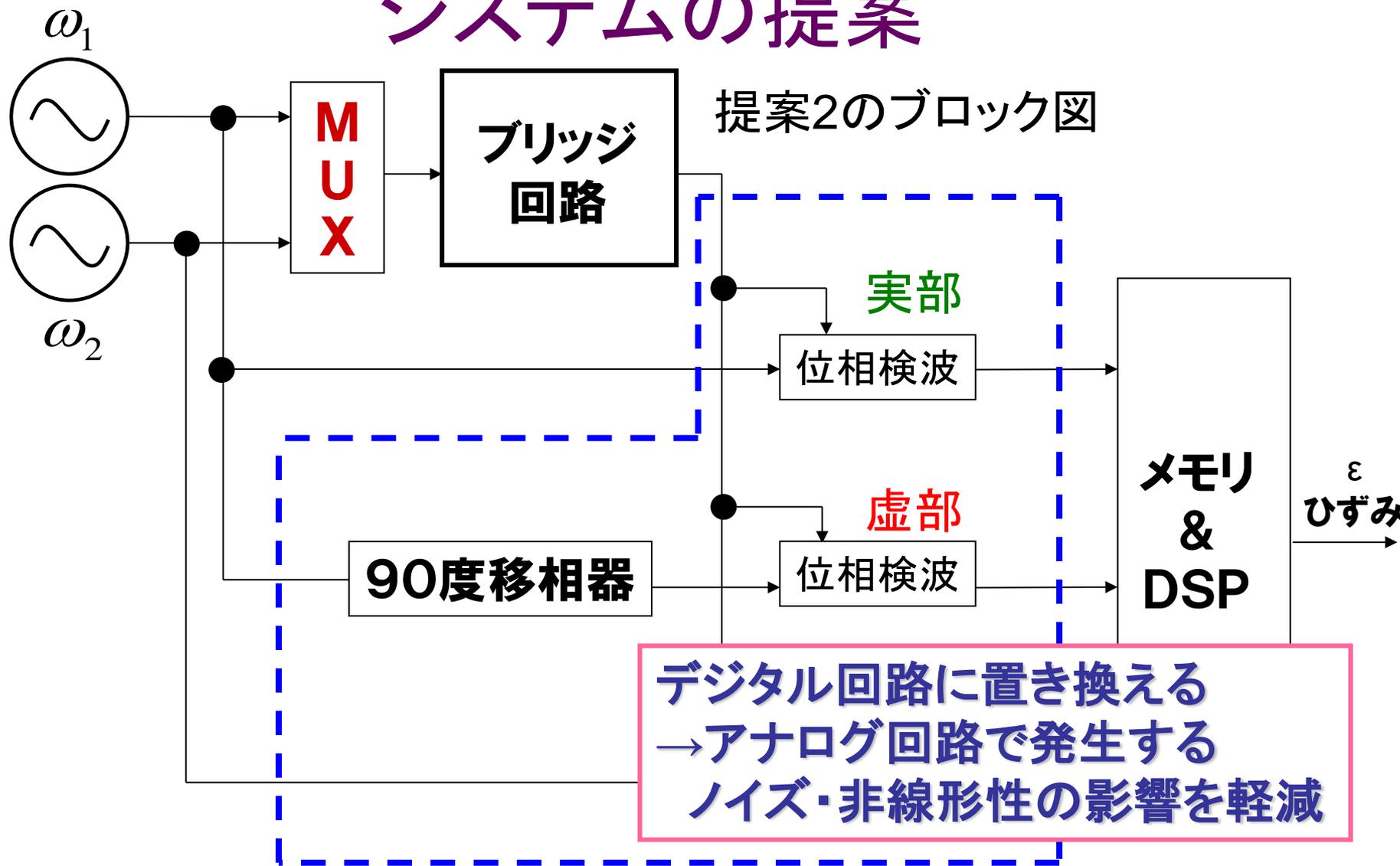
$$\varepsilon \cong 3500 \times 10^{-6}$$

金属の一般的なひずみ ε は1000~6000 $\mu\varepsilon$

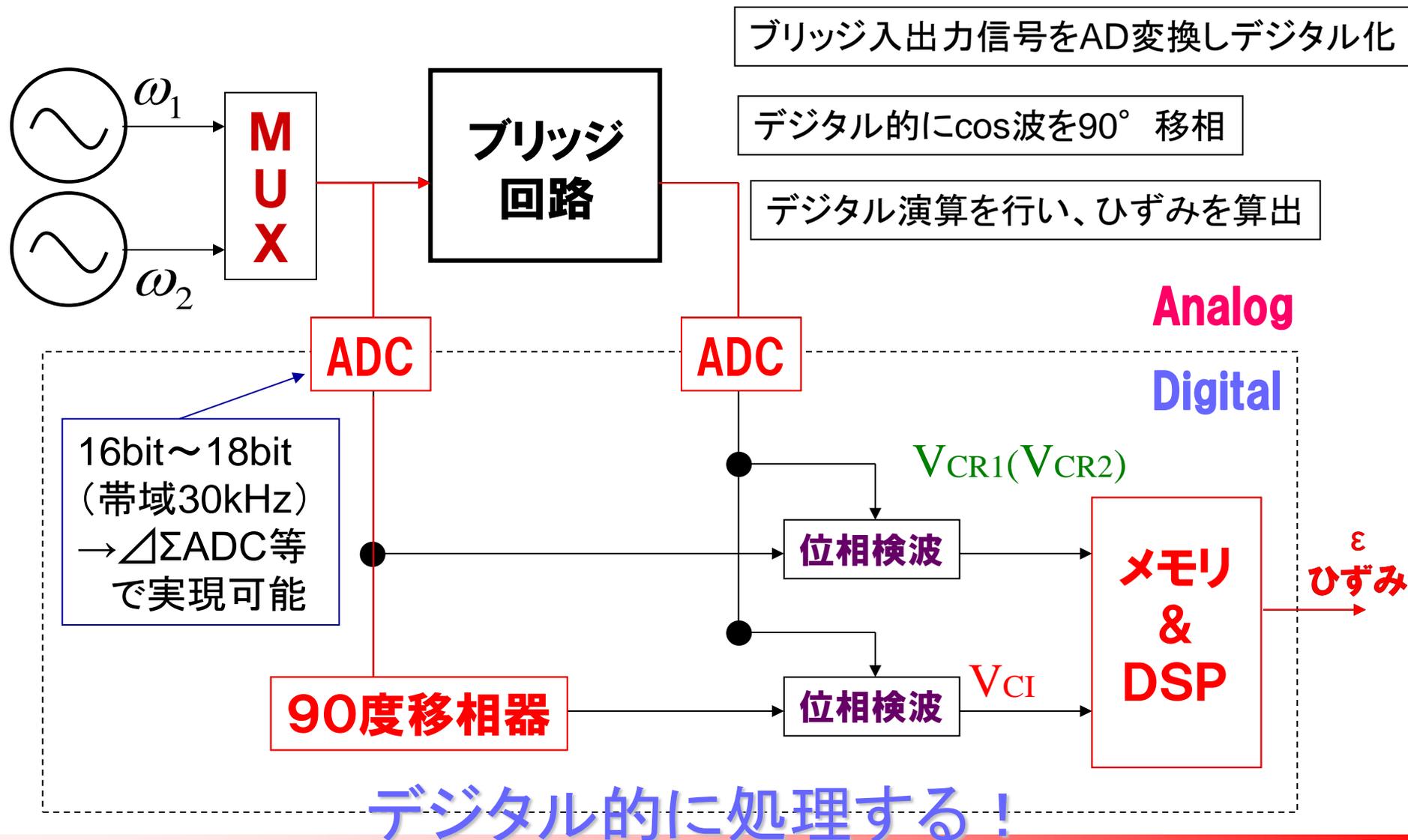
現実的な値の算出に成功

提案3:
デジタル的にひずみを
検出するシステム

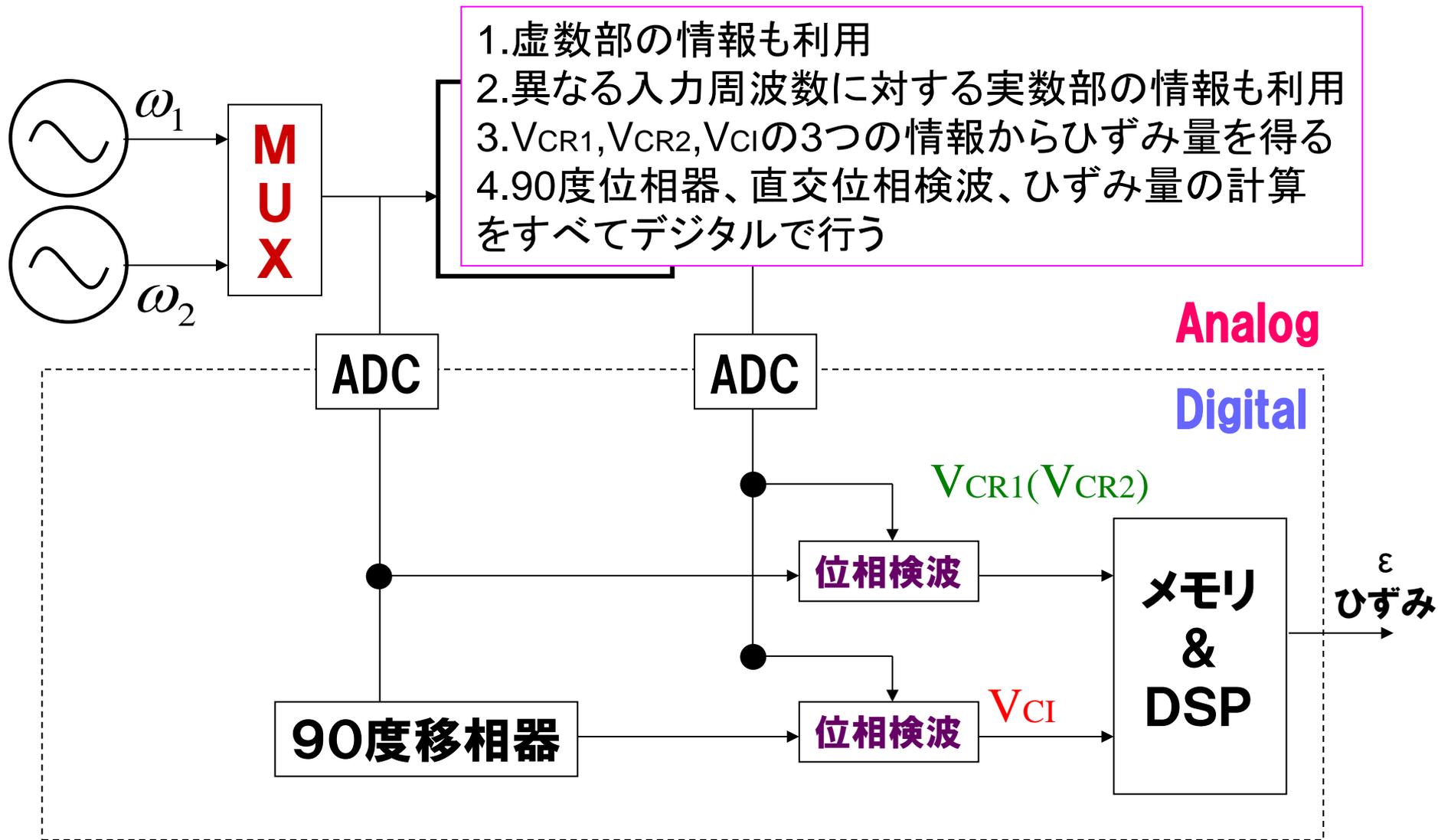
デジタル的にひずみを検出する システムの提案



デジタルひずみ検出システム



デジタルひずみ検出システム

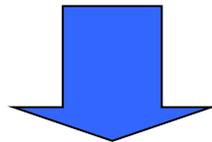


提案方式の利点

ブリッジ回路の入出力信号→AD変換器→デジタル演算



アナログ演算の場合のノイズ、ドリフト、非線形性の影響を
除去可能



後段の回路をデジタル的に扱う
ことにより...

◇小規模で実現可能

◇高精度な動ひずみ測定が実現可能

発表内容

1. 研究背景・目的

2. ひずみ測定の調査

2.1. ひずみ測定

2.2. 荷重計設計・試作・評価

3. 高精度交流型動ひずみ測定回路

3.1. 現状の問題点の抽出

3.2. 問題解決の提案

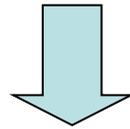
▶ 4. まとめ・今後の課題

まとめ

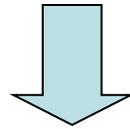
- ひずみ測定の調査
 - 既存の理論の調査
 - 試作、設計、評価により、一般原理を調査
- 動ひずみ測定高精度化への新たな問題点抽出
- 問題点改善方式を提案
 - 1.寄生容量の影響の解析
 - 2.寄生容量キャンセル方式の提案
- デジタル的にひずみを検出するシステムを提案

今後の課題

デジタルひずみ検出システムの実現



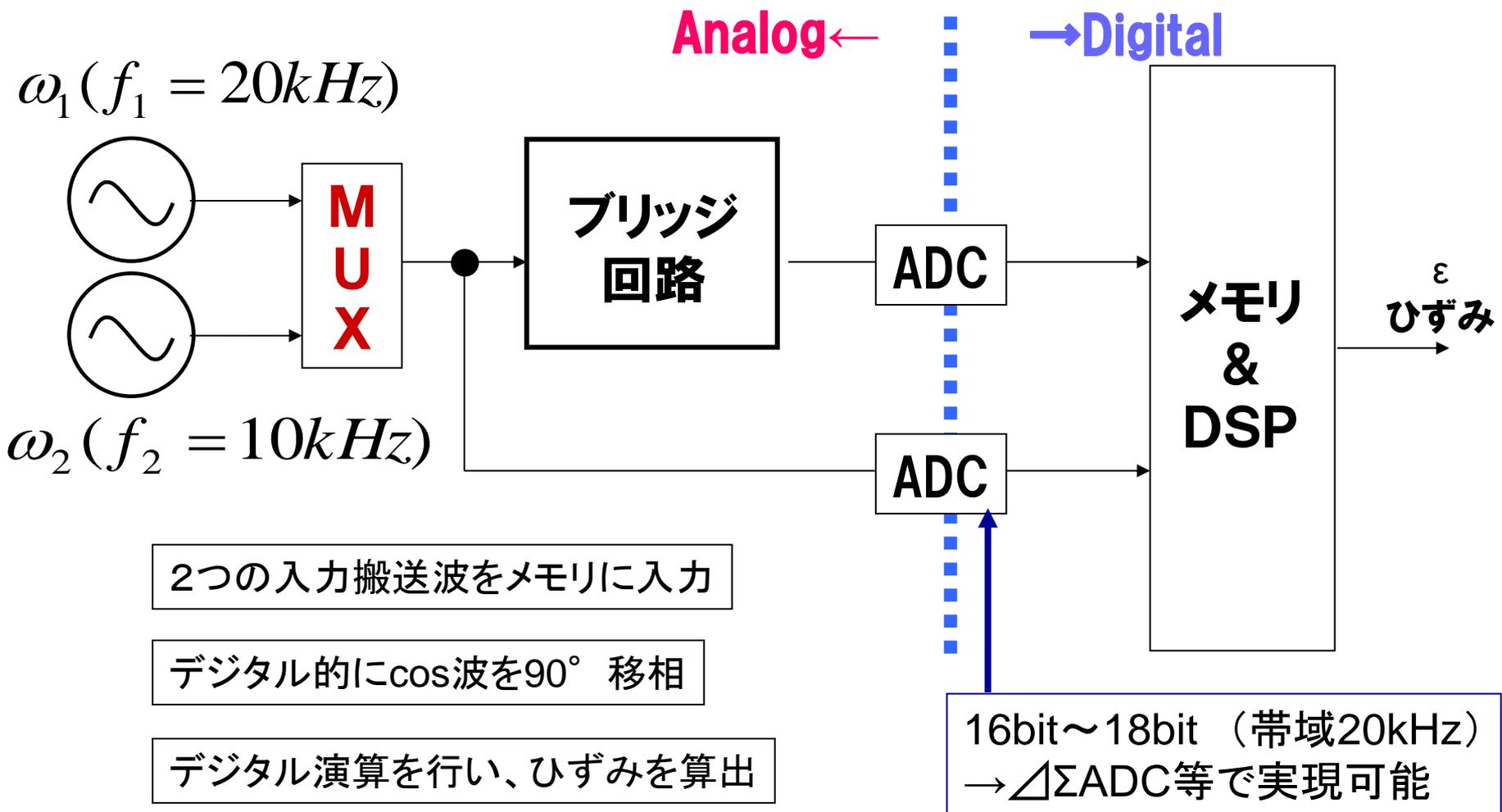
- ハードウェアの開発
- プログラムの開発、演算



実際の測定の
寄生容量及び、ひずみ値との検証

終わり

デジタルひずみ検出システム



デジタル的に処理する！

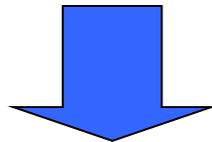
提案方式の利点

ブリッジ回路の入出力信号→AD変換器→デジタル演算



アナログ演算の場合のノイズ、ドリフト、非線形性の影響を
除去可能

- 直交位相検波のため、入力余弦波から正弦波をデジタル的に構成すればアナログの90度位相シフト回路の非理想特性の問題回避が可能
- 直交位相検波のときの乗算および低域通過フィルタリングもデジタルで行う



高精度な動ひずみ測定が実現可能