

---

IoT eラーニング

## 各種センサーの種類と仕組み③

(磁気センサー、ジャイロ스코プ、加速度センサー、GPS)

国立大学法人 琉球大学

---

## ● 磁気センサー

- 磁気センサーとは
- 磁気の強さと磁気センサー
- 磁気センサーの種類
- 電流磁気効果素子
- リードスイッチ
- ホール素子
- ホールIC
- MR素子
  - ・ MR素子の構造
  - ・ MR素子の主な用途
- 渦電流式近接センサー
  - ・ 渦電流式近接センサーの構造と原理
  - ・ 渦電流式近接センサーの種類
  - ・ 渦電流式近接センサーの応用例
- 差動トランス
- SQUID
  - ・ SQUIDの種類
  - ・ DC SQUIDの原理
  - ・ RF SQUIDの原理

## ● ジャイロスコープ

- ジャイロスコープとは
- ジャイロスコープの原理と種類
- ジャイロスコープの応用例

## ● 加速度センサー

- 加速度センサーとは
- 加速度センサーの原理と種類
- 各種加速度センサーの比較
- 加速度センサーの応用例

## ● GPS

- GPSとは
- GPSの原理
- GPSの応用例

## ● 磁気センサーとは

検出対象が磁気エネルギーであるセンサー。電磁誘導作用を応用したものと、電流磁気効果を応用したものがある。

### ➤ 電磁誘導作用

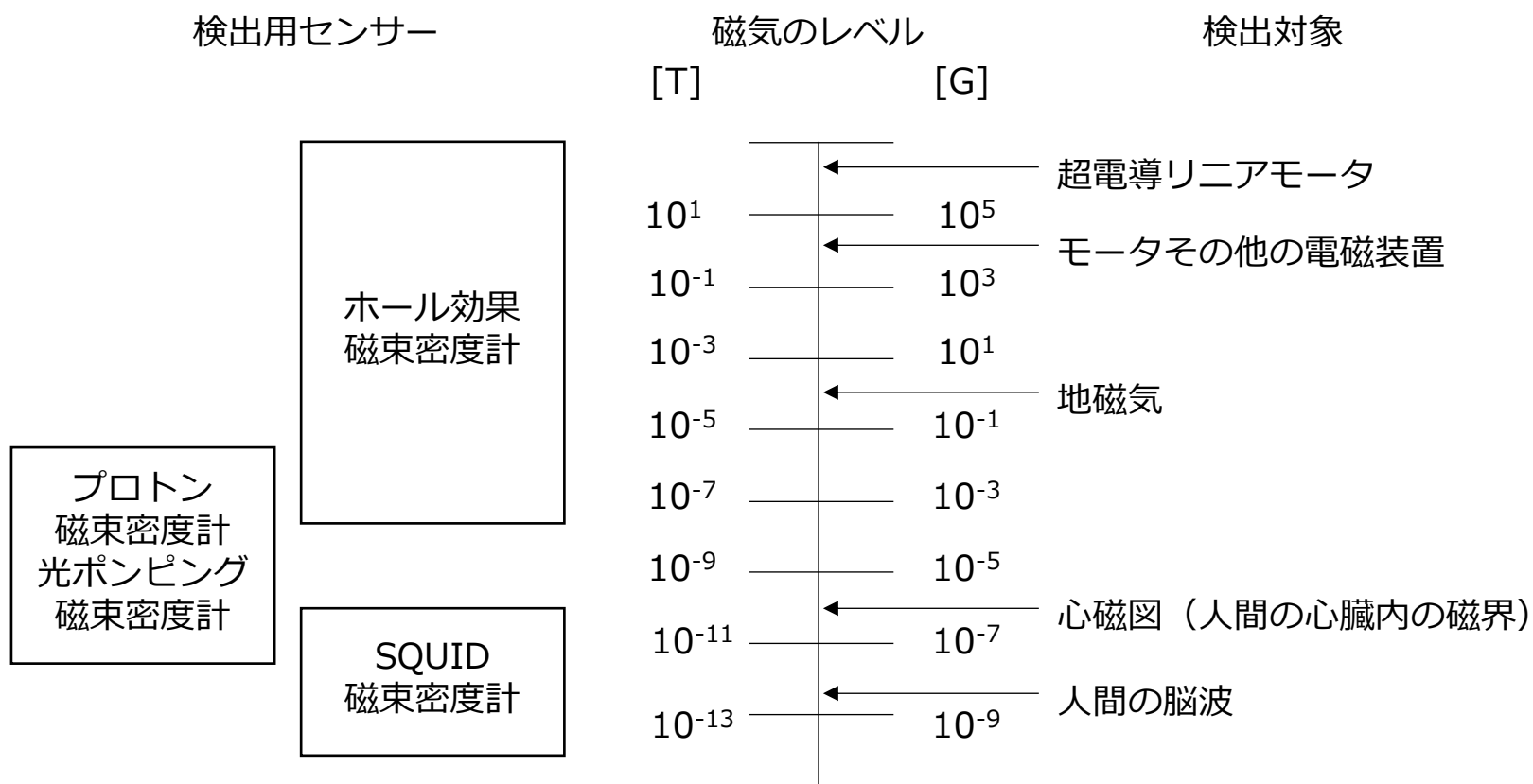
磁束（その場における磁場の強さと方向）が変動する環境下に置かれた導体に電位差（電圧）が生じる現象。磁束が変化しないと電位差が生じないので、電磁誘導作用を応用した磁気センサーでは、変化のない磁気を検出することはできない。

### ➤ 電流磁気効果

電流と磁気の相互間に生じる物理現象の総称を、電流磁気効果という。このうち、電流の流れている物体に対し、電流に垂直な方向に磁場をかけると、電流とも磁場とも直交する方向に起電力が生じる現象をホール効果という。また、この起電力をホール起電力という。このホール起電力を検知することで、磁気エネルギーを測定する。

## ● 磁気の強さと磁気センサー

磁気エネルギーのレベルは非常に幅広いため、1つの磁気センサーで全てに対応することはできない。以下は、磁気のレベルとそれに対応するセンサーの種類を整理したもの。



T : テスラ G : ガウス はともに磁界（磁束密度）の大きさの単位  
 $1[T] = 10^4[G]$

## ● 磁気センサーの種類

磁気センサーでは、電磁誘導作用を応用したものと、電流磁気効果を応用したものが一般的。この種のセンサーは、センシングエレメント、アンプ部、電源部、出力部、表示部などを内蔵したものが多い。

磁気センサーには、光センサーのようにイメージセンサーとしての機能はないが、粉塵、オイルミストなどの発生する悪環境に強く、比較的シンプルな構成で、高性能なセンサーをつくることのできる、などの特徴がある。

以下は、磁気センサーの種類を整理したもの。電磁誘導作用、電流磁気効果を利用したもの以外にもあるが、用途はごく一部に限定される。

## ● 磁気センサーの種類

磁気現象（作用）	センサーの種類
電磁誘導作用	磁気ヘッド、カレント・トランス・タコジェネレータ、渦電流式近接センサー、マグネスケール、レゾルバ、磁気飽和素子、差動トランス、インダクトシン
電流磁気効果 （磁電変換作用）	磁気トランジスタ、ホール素子（ホールIC）、マグネットダイオード、磁気抵抗素子（半導体MR、強磁性体MR）
磁気吸引反発作用	リードスイッチ（リードリレー）、磁針（コンパス）、磁石、磁性流体（磁性粉体）
超伝導効果	SQUID（ジョセフソン装置）
核磁気共鳴	光ポンピング型、プロトン型
磁気・光作用	ジャイレータ（磁気バブルドメイン） （光ファイバを用いた光ファラデー効果）
磁気・熱作用	サーモ・フェライト、サーモスタット、温度リレー
磁歪現象 （弾性波利用）	磁歪線センサー

## ● 電流磁気効果素子

センシングエレメントに電子移動度（モビリティ）の大きい化合物半導体や強磁性体金属などを用いた磁電変換素子のこと。MR素子やホール素子などが代表例。応答特性が良く、静磁界の検出も可能。周波数特性は静磁界から数MHzまでに及び、さらに平坦な特性を示し、極めて使いやすい。但し、電流磁気効果素子に取り付ける集磁体の特性によって、周波数特性が低下する。

一方、電磁誘導方式では、磁束変化に対応してその出力も変化する。また、静磁界の検出ができない、などの欠点がある。電磁誘導方式でも磁気飽和型センサーを使うと静磁界の検出も可能になるが、高周波特性があまり良くないため、広範囲の磁界検出には不向き。

電流磁気効果素子 (磁電変換素子)	磁気抵抗効果素子 (MR素子)
	ホール素子
	ホールIC
	磁気ダイオード
	磁気トランジスタ
	その他

電流磁気効果素子の種類

## ● リードスイッチ

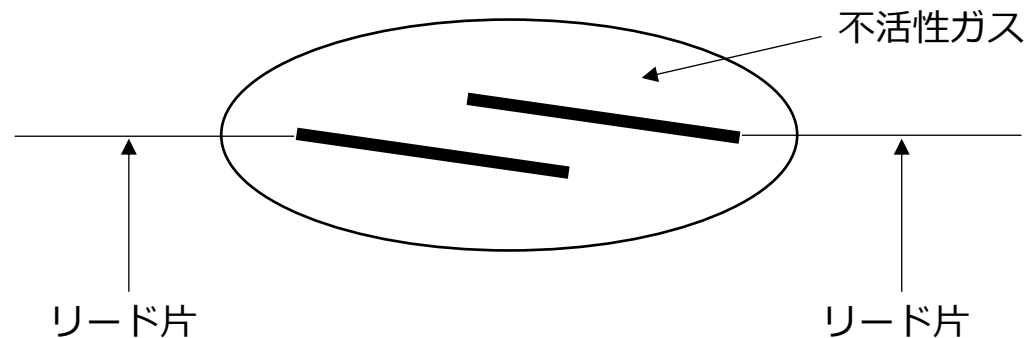
磁力でON、OFFを切り替えるスイッチ。

### ➤ リードスイッチの構造と原理

磁性体で構成された一組のリード片がガラス管内に封入されている。リード片どうしの間には隙間が空いており、外部から磁力が働くと、それに引かれてリード片が接触して電流が流れるようになる。接点部の活性化を防ぐためにガラス管内には窒素などの不活性ガスが充填されている。小型、長寿命、動作が高速、大量生産が容易で安価である、などの長所がある。

一方で、リードスイッチは接点容量が小さいため、大電流の開閉には何らかの増幅手段が必要。リードスイッチ単体では、一般に、0.3～1[A]程度の電流しか流せない。

用途としては、ドアが開くと自動でランプが点灯する倉庫や自動車の室内灯などがある。





## ● ホール素子

ホール効果を応用した磁気センサー。

### ➤ ホール効果

電流磁気効果の一種。電流の流れている物体に、電流と垂直な方向の磁界が働くと、電流とも磁界とも垂直な方向に起電力（ホール電圧）が働く。物体を流れている電流（ホール電流、バイアス電流とも）の大きさを $I_H$ [A]、磁束密度の大きさを $B$ [T]とすると、ホール電圧の大きさ $V_H$ [V]は、 $I_H$ が十分小さいという条件の下で近似的に $I_H$ と $B$ に比例する。

ホール電流 $I_H$ が一定のとき、ホール電圧 $V_H$ は磁束密度 $B$ に比例するので、磁束密度計などの計測用には都合が良い。但し、ホール電圧は一般にあまり大きくないので、必要に応じて増幅手段を用いる。

### ➤ ホール素子の応用例

磁束密度計、ハードディスク、フロッピーディスク、DVD、磁石スイッチ（近接センサー）、磁性材料の選別機、磁気式回転計（タコメーター）、ノートパソコンや携帯電話の開閉スイッチ、非接触式の直流電流センサー（電流プローブ）、各種磁気式エンコーダ、液面計のフロート、流量計、パチンコ玉のカウント、各種メカトロ製品の位置決め、NS磁極センサー、など

## ● ホールIC

ホール素子と増幅用のICを一体化したセンサーモジュール。ホール素子は出力電圧（ホール電圧）があまり大きくないので、そこに増幅手段を追加したもの。出力電圧を増幅するだけでなく、安定化電源や差動出力回路などが組み込まれている場合もある。

ホールICには、リニア出力タイプとスイッチングタイプの2種類がある。

### ➤ リニア出力タイプホールIC

ホール素子の出力をそのまま増幅して出力する。磁束の変化に対して出力がリニア。主に位置検出用に使用。

### ➤ スwitchingタイプホールIC

- ・ 交番検知

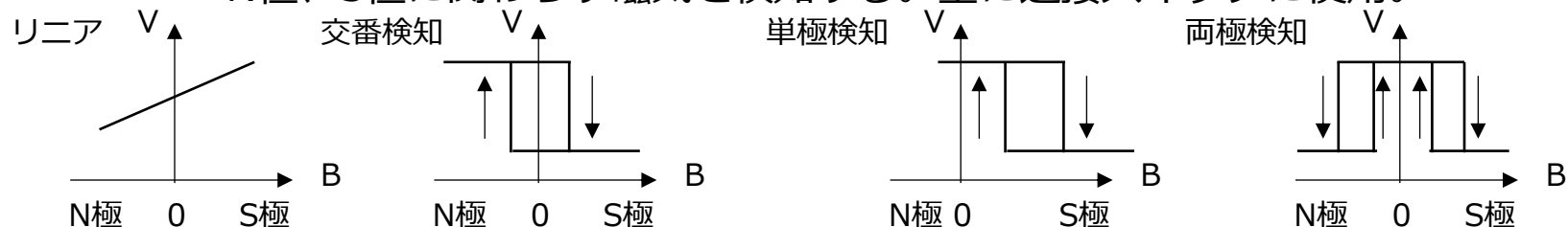
N極とS極の切り替わりを検知する。主にブラシレスモーターの磁極検知に使用。

- ・ 単極検知

N極またはS極の単極磁気を検知する。主に近接スイッチに使用。

- ・ 両極検知

N極、S極に関わらず磁気を検知する。主に近接スイッチに使用。



## ● MR素子

電流磁気効果を応用した磁気センサー。使用素材に化合物半導体を用いたもの（**半導体MR**）と、強磁性金属を用いたもの（**強磁性体MR**）とがある。いずれも磁界感度が低いいため、一般にはバイアス用磁石や高ゲインのアンプと併用されている。

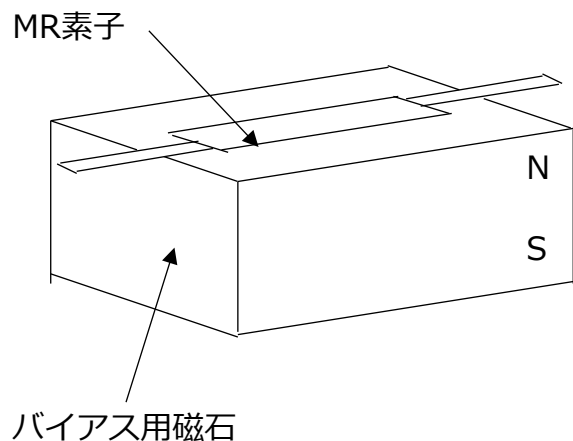
### ➤ MR素子の種類とその特徴

半導体MRは磁界をかけると内部抵抗が増加する。この性質を**正の磁気特性**という。これに対して強磁性体MRは、磁界をかけると内部抵抗が減少する。即ち、**負の磁気特性**を持つ。

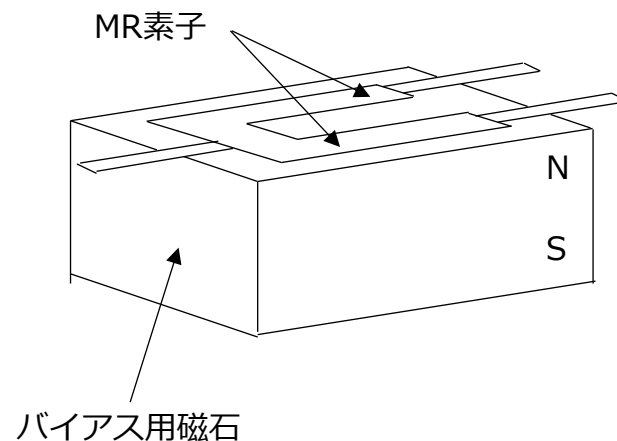
MR素子の種類	使用素材	磁気特性
化合物半導体MR	InSb（インジウム・アンチモン）	正の磁気特性
	NiSb（ニッケル・アンチモン）	
	InAs（インジウム・ヒ素）	
	GaAs（ガリウムヒ素）	
強磁性体金属MR	Ni（ニッケル）	負の磁気特性
	Ni-Co（ニッケル・コバルト）	
	Ni-Fe（パーマロイ）	

## ● MR素子の構造

MR素子は2端子で構成されているため、回路構成上、扱いやすい。一方で、低磁界での感度が低く、温度特性もあまり良くない。そのため、バイアス磁界を与える方法や素子の複合化によって、出力電圧や温度特性の改善が行われる。



バイアス用磁石を用いたMR素子



複合化とバイアス用磁石を用いたMR素子

バイアス磁界がない場合は、N極・S極に関わらず同一方向の抵抗変化となる。また、その出力変化は小さい。バイアス磁界を与えると、検出磁界にバイアス磁界が重なり、動作点がリニアな領域に移動する。動作点が移動することで磁界感度が高まり、検出磁極の極性が抵抗変化として現れる。

## ● MR素子の主な用途

MR素子は、バイアス磁界の利用や複合化によって、磁界に対する直線性が良く、温度安定性も高まる。その他、小型、軽量、低消費電力などの長所がある。そのため、様々な用途に用いられる。

以下は、MR素子の主な用途の例。

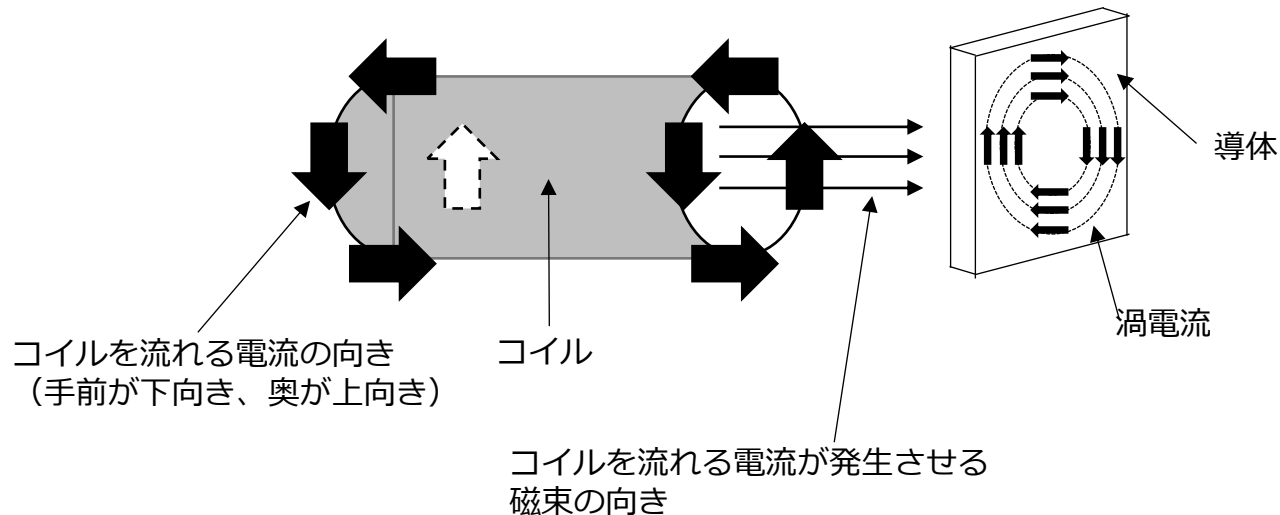
- 近接スイッチ（非接触スイッチ）
- 速度検出器（周波数ジェネレータ）
- 回転角検出器（インクリメンタル、アブソリュート、アブソインクリメンタルエンコーダ）
- 位置検出器、ポテンショメータ（リニア型、ロータリー型）
- パターン認識センサー（磁気インクを用いた印刷物の識別）
- 電子ロック装置（磁気カード、磁石キー、など）
- 磁気カードリーダー
- モータ（ロータ磁極、速度検出複合センサー）
- 薄膜磁気ヘッド
- 磁気測定器（超伝導磁気抵抗素子）

## ● 渦電流式近接センサー

渦電流を利用して、物体間の距離や厚さ、振動、回転体の偏心などを検出するセンサー。

### ➤ 渦電流

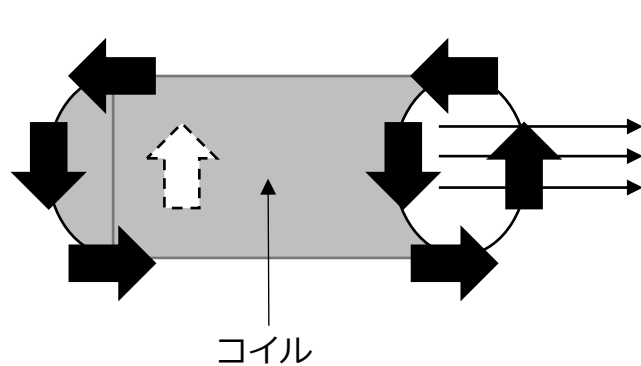
高周波電流が流れているコイルに導体が近づくと、導体に渦電流が流れる。



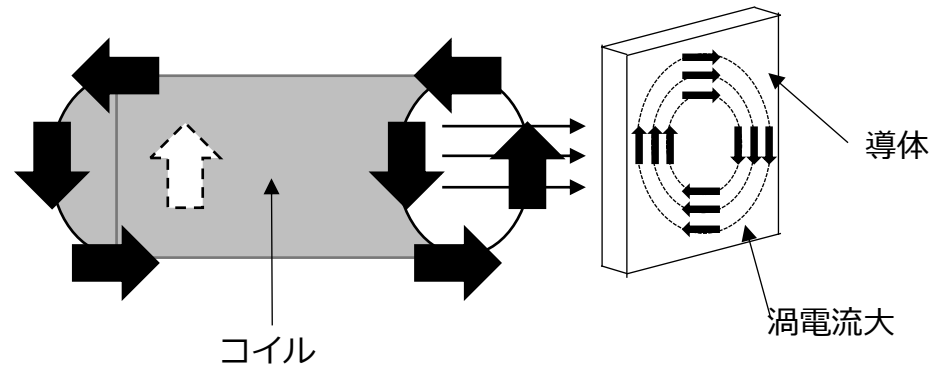
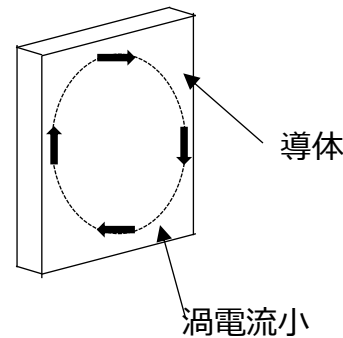
渦電流によって導体に磁束が発生し、その磁束によってコイルのインピーダンスが変化する。このインピーダンスの変化に着目して、コイルを検出器として利用し、物体間の距離を測定する。

## ● 渦電流式近接センサーの構造と原理

検出コイルに高周波電流を流すとき、検出対象となる導体と検出コイルとの距離が遠い場合は、導体に発生する渦電流の大きさは小さく、その影響は小さいため、検出コイルのインピーダンスの変化も小さい。一方、導体と検出コイルとの距離が近い場合は、導体発生する渦電流の大きさは大きく、その影響も大きくなり、検出コイルのインピーダンスの変化も大きい。この変化を、検出コイル側で検出する。



検出コイルと導体の距離が遠い場合



検出コイルと導体の距離が近い場合

## ● 渦電流式近接センサーの種類

渦電流式近接センサーでは、コイルのインピーダンス変化を電圧または周波数変化として捉える。この方法に、同調法、発振法、ブリッジ法、正帰還法などがある。これらは、使用目的や要求制度、価格などによって適宜使い分ける。

## ● 渦電流式近接センサーの応用例

渦電流式近接センサーを応用すると、食品内の異物を検知することができる。実際、渦電流式近接センサーは釘、針、金属片などに反応する。しかも、磁力線は食品内部を通過するので、内部にあるこれら異物を検出することが可能となる。

なお、より高価にはなるが、異物混入検査にはX線非破壊内部検査装置も使われる。渦電流式近接センサーは検出距離が短いが、X線非破壊内部検査装置は50cmほどの検出距離があり、分解能も高く、0.4mmくらいまでの異物（ガラスや小石なども含めて）を検知することができる。



## ● 差動トランス

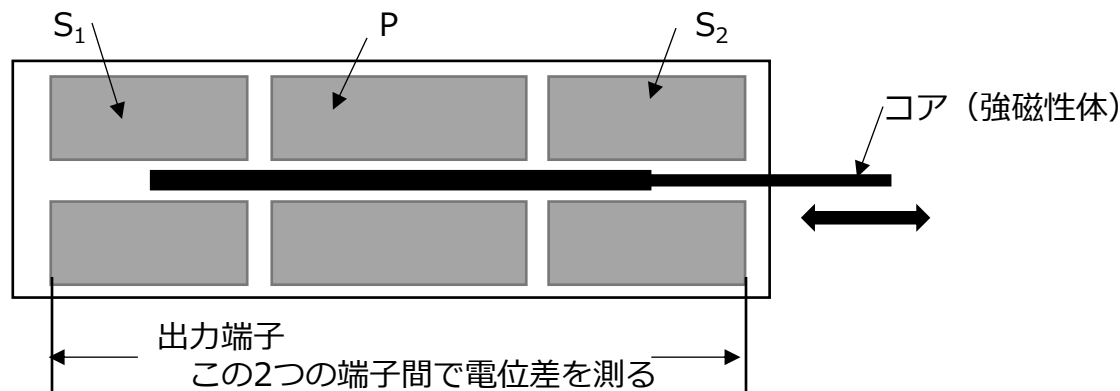
電磁誘導作用を応用したもので、数mm程度の微小変位の検出に利用される。

### ➤ 差動トランスの構造と原理

差動トランスは、1次コイル (P) を中央に、その左右に2次コイル ( $S_1$ 、 $S_2$ ) を配置し、中心に可動部のコアが挿入されている。1次コイルPに励磁用高周波電流を流し、その出力を2次コイルで検出する。

2つの2次コイルは互いにその出力を相殺するように接続されているので、 $S_1$ と $S_2$ の出力が等しいときは、出力端子に信号電圧は現れない。この状態が、コアの変位0に対応する。

コアが左右いずれかの方向に移動すると、それに対応して出力電圧も変化するので、その変化量を距離に換算することでコアの移動量を測定できる。検出範囲は数十mm程度。

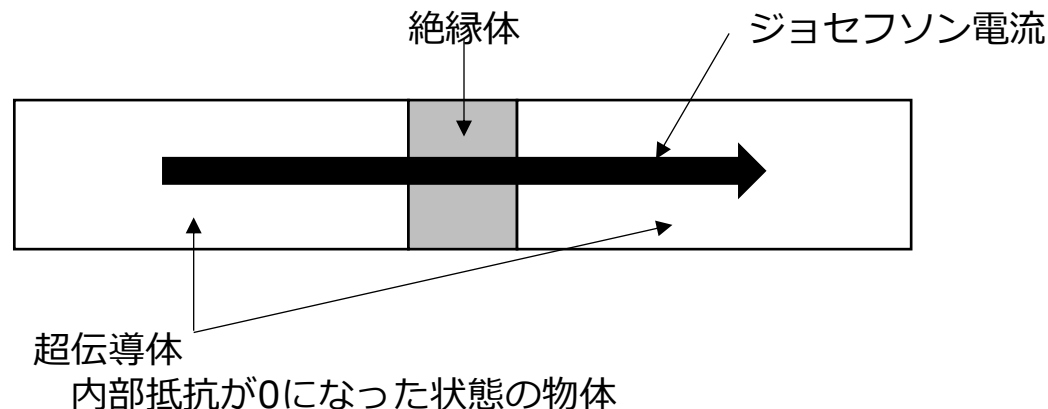


## ● SQUID (スクイッド)

SQUID (Super Conducting Quantum Interface Device) は、超伝導リングにジョセフソン接合を1個または複数個配列した磁気センサー。極めて微弱な磁界 ( $10^{-7}$ [T]～ $10^{-14}$ [T]) の検出が可能。

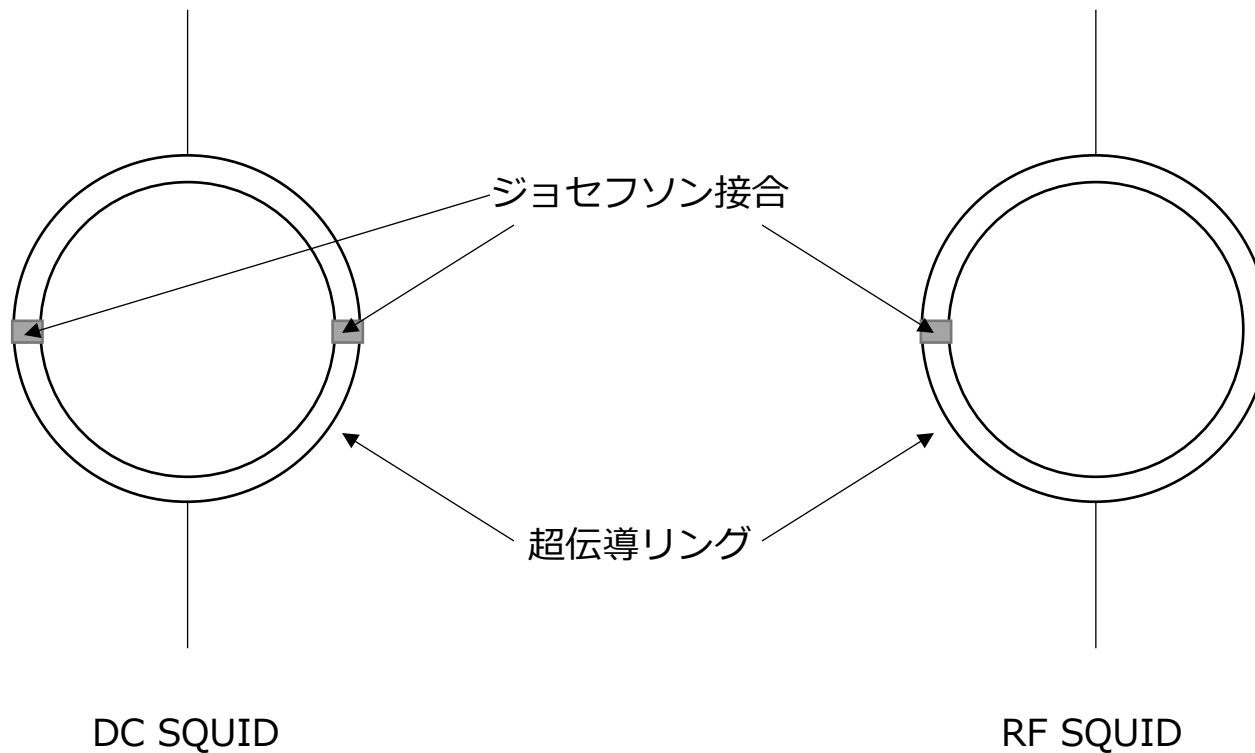
### ➤ ジョセフソン接合

2つの超伝導体の間に薄い絶縁体を挟んで接合したもの。通常、絶縁体には電流が流れないが、絶縁体の層（障壁層）が極めて薄い場合に、超伝導体間に電流が流れる。この現象を**ジョセフソン効果**といい、流れる電流を**ジョセフソン電流**という。ジョセフソン電流は、電圧は0のまま流れる。



## ● SQUIDの種類

SQUIDには、超伝導リングに臨界電流の等しいジョセフソン接合が2つある**直流SQUID** (DC SQUID) と、ジョセフソン接合が1つの**交流SQUID** (RF SQUID) とがある。

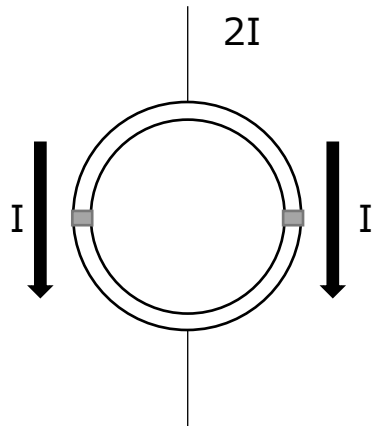


### ※臨界電流

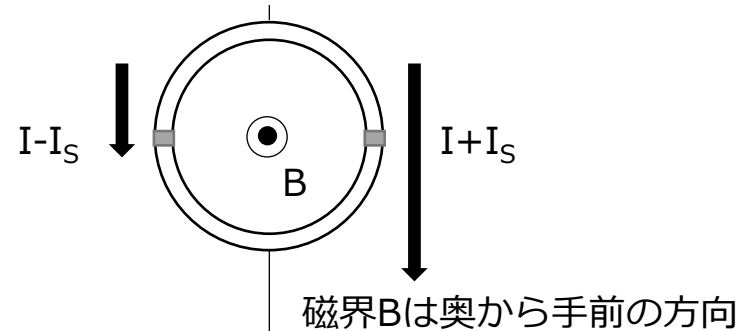
超伝導体に流すことのできる電流の最大値、またはその値の電流。臨界電流を超える電流が流れると内部抵抗が生じて常伝導に遷移する。

## ● DC SQUIDの原理

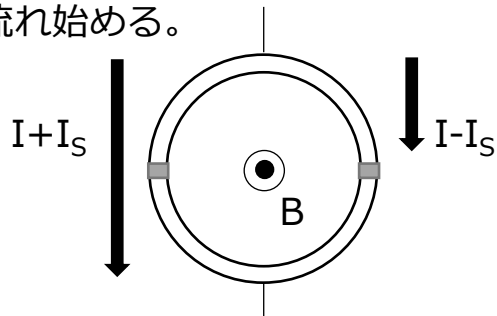
- ①外部磁界がない場合、電流 $I$ は超伝導リングの2つの分岐に等しく流れる。



- ②外部磁界を印加すると、外部磁界を打ち消す方向に遮蔽電流 $I_S$ がリングを流れ始める。どちらかのジョセフソン接合で電流が臨界電流を超えると、接合に電圧がかかり始める



- ③外部磁界 $B$ を大きくしていき、磁束量子 $\Phi_0$ の半分 $\Phi_0/2$ を超えた場合、リングの穴を通過する磁束を妨げるよりも大きさが $\Phi_0$ になった方が安定するため、遮蔽電流は逆向き（磁束を強める方向）に流れ始める。



- ④このように、遮蔽電流の反転が、外部磁界が $\Phi_0$ の半整数倍になる度に繰り返される。そのため、周期 $\Phi_0$ で接合に働く電圧が周期運動をするので、この信号を計測することで磁界の変化を検知することができる。

### ※磁束量子

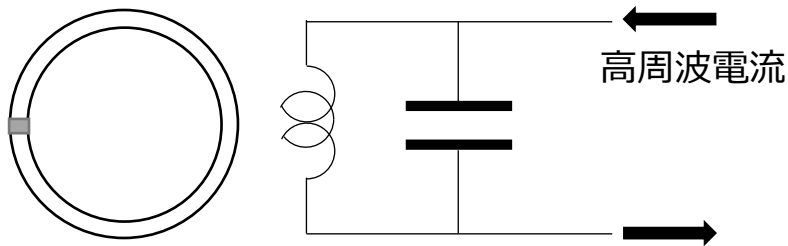
超伝導体のリングを貫く磁束は、

$$\Phi_0 = 2.07 \times 10^{-15} [\text{Wb}]$$

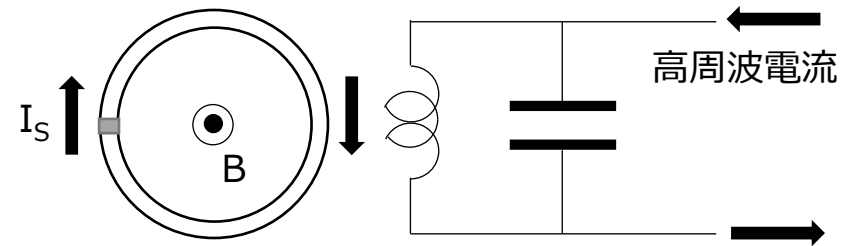
の整数倍の値のみとることができる。この $\Phi_0$ を磁束量子という。

## ● RF SQUIDの原理

①RF SQUIDは、超伝導リングと、それと共鳴させる共鳴タンク回路から構成される。共鳴タンク回路には高周波電流が流れている。

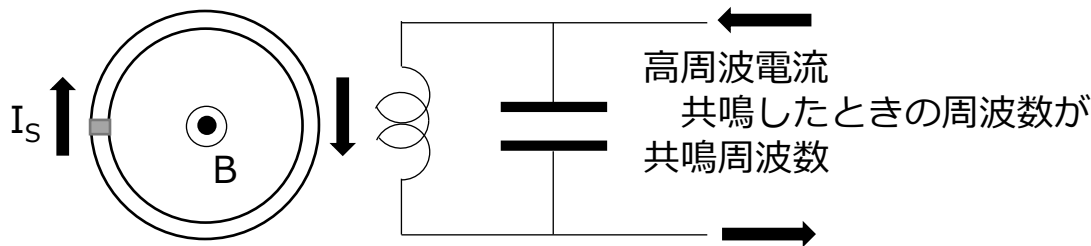


②外部磁界を印加すると、外部磁界を打ち消す方向に遮蔽電流 $I_s$ がリングを流れ始める。



磁界 $B$ は奥から手前の方向

③すると、リングと共鳴タンク回路との共鳴条件（共鳴タンク回路の共鳴周波数）が変化する。この共鳴周波数を計測することで、磁界の変化を検知することができる。



## ● ジャイロ스코ープとは

角速度を検出するセンサー。回転していることや回転方向も検知することができる。「ジャイロセンサー」ともいう。

### ➤ (参考) 角速度

単位時間あたりに回転する角度を表したもの。単位は[deg/s] (= degree per second)、[°/s]、[rad/s]など。1周を360°で表す度数法を用いた場合は[deg/s][°/s]、(弧の長さ) / (半径) で角度を表す弧度法を用いた場合は[rad/s]となる。

$360^\circ = 2\pi \text{ rad}$  ( $\pi$ は円周率) である。

向きを考える場合は、基準とする軸から反時計回りが正の向きとなる。

## ● ジャイロ스코ープの原理と種類

ジャイロ効果を利用する**回転型**、コリオリの力を利用する**振動型**と**ガス型**、光学的な干渉(サニャック効果)を利用した**光学式**のものがある。

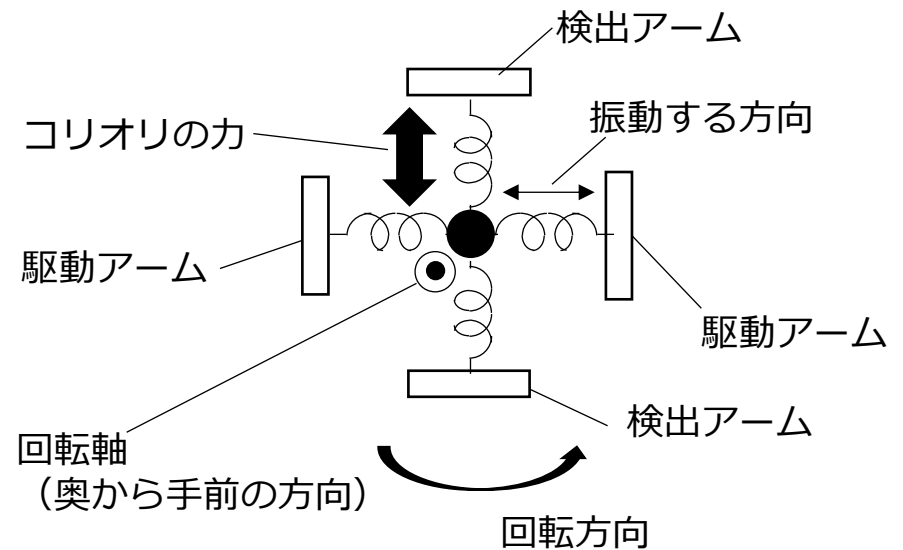
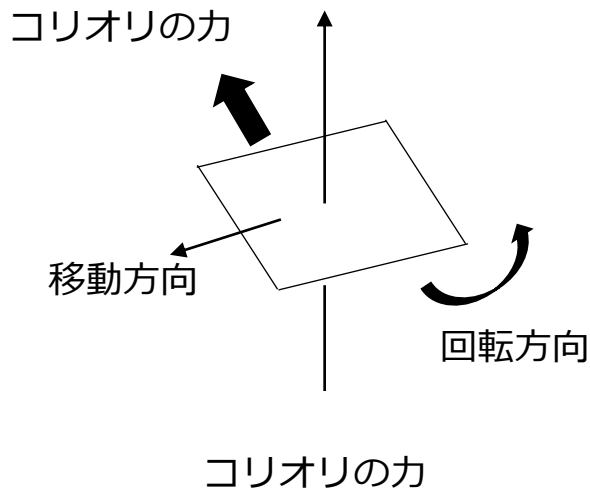
### ➤ 回転型ジャイロ스코ープ

回転しているコマは、外部から回転面を傾けるような力が働くと、元の状態を維持するための慣性力が生じる(ジャイロ効果)。この慣性力を検出することで、外力によって発生した物体の角速度を検出する。大きなコマを利用すると分解能や安定性が増すが、大きく重くなるのが欠点。また、コマを回すために消費電力が大きく、ベアリングのメンテナンスも必要になる。

## ● ジャイロスコープの原理と種類

### ➤ 振動型ジャイロスコープ

移動している物体に回転を加えると、移動方向とも回転軸とも直交する方向に慣性力を受ける。この慣性力を**コリオリの力**という。振動型ジャイロスコープは、駆動アームを振動させておき、素子が回転することで発生するコリオリの力によって検出アームに生じる振動を検出することで、角速度を計測する。



振動型ジャイロスコープの原理  
(イメージ図は一例)

## ● ジャイロスコープの原理と種類

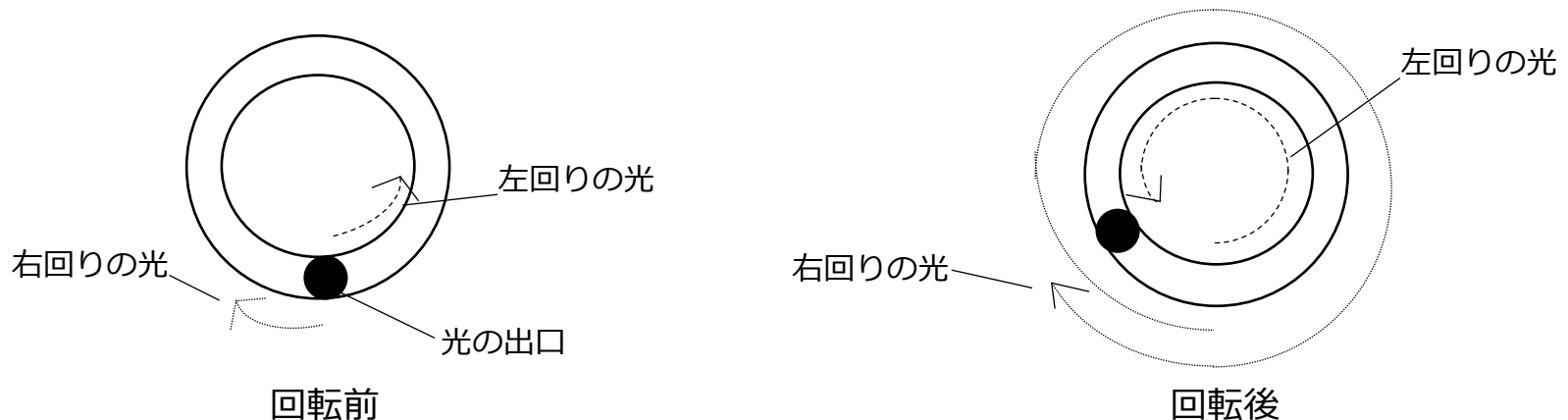
### ➤ ガス型ジャイロスコープ

流路中にガスを流すと、コリオリの力によってガスの流れが変化する。この変化を検出することで角速度を測定する。構造は簡単だが、分解能や安定性の面で他より劣る。

### ➤ 光学式ジャイロスコープ

回転する観測者から見た現象には、時間のズレが移動経路に依存して生じるというサニャック効果を用いたもの。

より直感的に言えば、回転している円板の縁にある経路を光が通るとき、円盤の回転方向と同方向に進む光と反対方向に進む光とでは光の移動距離に差（光路差）が生じる。このため、光が入射してから出口に達するまでの時間に、2つの光で差が生じる。この差を計測することで、回転の角速度が求められる。





## ● ジャイロ스코ープの応用例

- カーナビゲーションシステム
- ゲームコントローラ
- 携帯電話・スマートフォン
- カメラの手ぶれ補正機能
- 車体制御

# 加速度センサー

## ● 加速度センサーとは

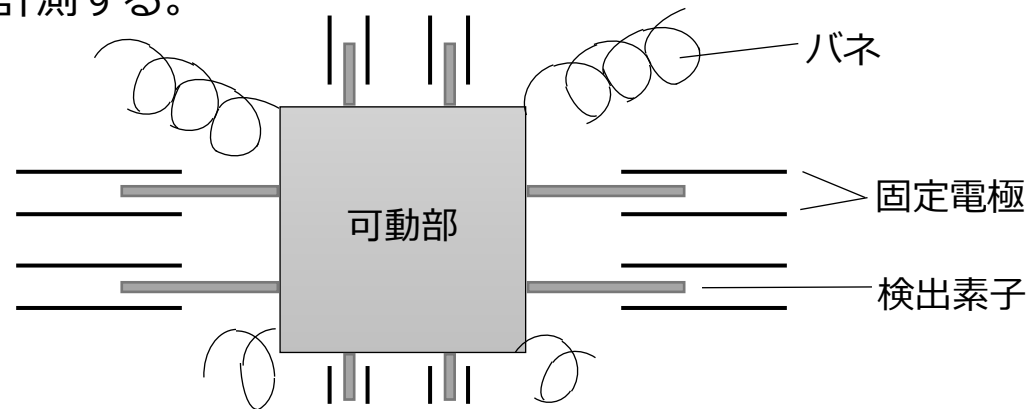
加速度を検出するセンサー。重力や振動、衝撃を検知することができる。

## ● 加速度センサーの原理と種類

加速度センサーは、機械要素部品や電子回路を単一の基板上に集積するMEMSという技術を用いて作られている。このMEMSによって、半導体を使った超小型の加速度センサーが作れるようになった。このようなMEMS型加速度センサーは、静電容量検出方式、ピエゾ抵抗方式、熱検知方式の3種類に分かれる。

### ➤ 静電容量検出方式

加速度を静電容量の変化によって検知する。4つのバネに支えられた中央の可動部があり、その周囲に検出素子がある。基板上には可動部の各素子を挟むように2本1組の素子があり、2本組みの素子間を可動部の素子が動くことで静電容量が変化する。その変化から加速度を計測する。



## ● 加速度センサーの原理と種類

### ➤ ピエゾ抵抗方式

バネ部分にピエゾ抵抗素子を取り付け、素子の歪み（電圧の変化）を検知して加速度を計測する。

#### ・（参考）ピエゾ抵抗効果

一般に、物質の結晶に力を加えると抵抗値が変化する。これをピエゾ抵抗効果という。シリコンはピエゾ効果による抵抗値の変化が大きいため、ピエゾ抵抗素子の材料として使われる。また、ピエゾ抵抗素子は圧力センサーとしても使われる。

### ➤ 熱検知方式

ガスを充填した微小空間内に4つの温度センサーを用いたチップを配置したもの。チップの中央にヒーターがあり、ガスを加熱する。加速度が生じると微小空間内のガス分布が変動するので、これを温度センサーで検知する。

## ● 各種加速度センサーの比較

	静電容量検出方式	ピエゾ抵抗方式	熱検知方式
特徴	センサ素子部はガラスやシリコン等の安定した物質で構成される。	比較的構造が単純で、素子からの出力が大きい。	可動部を持たないので衝撃に強い。
精度	安定した物質で構成されるので、特に温度特性に優れる。	原理・構造要因により温度特性の直線性や感度の直線性にやや劣る。共振周波数が低い場合は、外部振動による影響を受けることがある。	常温ノイズは比較的低いが、感度の温度特性が低い。原理要因により、測定周波数帯域が狭い。

## ● 加速度センサーの応用例

- 地震計
- 歩数計
- スマートフォン・タブレット（画面の向き検出）
- ゲームコントローラ
- ハードディスクの振動検知
- ロボットの姿勢制御
- ドローンの姿勢制御、慣性航法

## ● GPSとは

上空にある複数のGPS衛星からの信号をGPS受信機で受け取り、受信者が自身の現在位置を取得するシステム。Global Positioning System（全地球測位システム）。

## ● GPSの原理

電波の速度が光速と同じ約30万km/sで一定速度で進むという性質を利用して測位する。GPS衛星と受信機とに正確な時計があるという仮定の下で、送信時刻（測定値）と受信時刻との差がわかれば、それに光速をかけることでその距離がわかる。緯度、経度、高度の3つのデータを測定するために、3基以上のGPS衛星からの電波を受信する。実際にはGPS受信機の時計があまり正確でない場合が多く、精度を高めるために4基以上のGPS衛星からの電波を用いることが一般的。現在、アメリカが運用している約30基のGPS衛星を用いると、精度は約10mになる。

### ➤ 準天頂衛星「みちびき」

「日本版GPS」とも呼ばれる、準天頂衛星「みちびき」の本格運用が2018年に始まる。現在は1号～4号の4基が打ち上げられており、2023年を目途に7基体制となる。これが本格運用されると、誤差は数cmのレベルになる。

## ● GPSの応用例

- カーナビゲーションシステム
- レーダー探知機
- 携帯用GPS機器
- 腕時計
- PDA、携帯電話、スマートフォン、タブレット、ノートPC
- デジタルカメラ