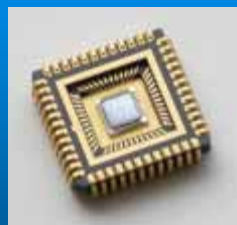


静電ジャイロ

—浮上・回転型MEMS慣性センサの開発と応用—



TOKIMEC

2008.02.29 海事センタービル

TOKIMEC



本社・技術センタービル

〒144-8551
東京都大田区南蒲田2-16-46
電話03-3732-2111(代表)
FAX03-3736-0261
創立：明治29年(1896年)5月1日
設立：昭和23年(1948年)12月21日
資本金：7,217,597,300円
代表者：取締役社長 勝木 英明
従業員：約 1,300名

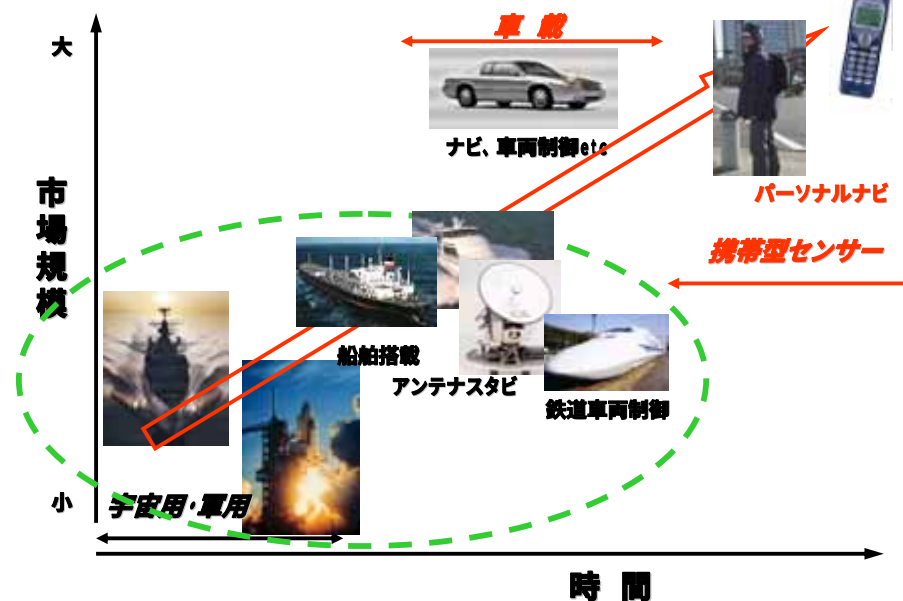
TOKIMEC

目次

1. ジャイロの開発動向
2. 静電浮上・回転型マルチ出力マイクロ慣性センサ
 - (1) 開発の背景
 - (2) 構造及び制御方式
3. マルチ出力慣性センサの応用例
4. デモンストレーション

TOKIMEC

慣性センサの応用分野



ジャイロ開発のトピックス

1851	Foucault	振り子による地球自転の検証
1861	Trouve	電氣的回転によるジャイロスコープの製作
1890	Bryan	ワイングラスの振動による回転検出
1908	Anschutz	ジャイロコンパスの発明（回転式ジャイロ）
1913	Sagnac	サニャック効果の発明
1918	東京計器製造所（現トキメック）	回転式ジャイロコンパス製造開始
1925	Nicholson	リング干渉計による地球自転の計測
1953	Sperry社	音叉型振動ジャイロ：GYROTORON発表
1960	Haiman	レーザの発明
1961	Heer	リングレーザジャイロの提案
1976	Vali	光ファイバジャイロの提案
1991	Draper.Lab.	Siマイクロジャイロの発表
1996	トキメック	浮上・回転型Siマイクロジャイロ提案
1999	トキメック	ローター浮上・回転に成功。（ディスクロータ）
2000	トキメック	ローター高速回転(10,000rpm)マルチ出力確認
2004	トキメック	小径リング型回転体プロタイプ完成。
2007	トキメック	浮上・回転型Si-MEMSジャイロ サンプル出荷開始。

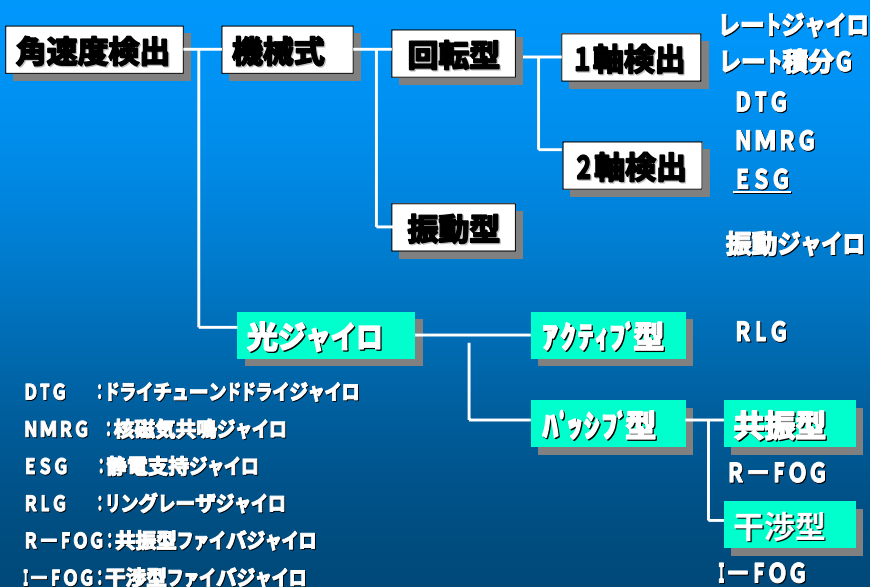
ジャイロ技術の変遷

機械式（回転式）

光ジャイロ（RLG、FOG）

MEMSジャイロ

ジャイロの分類



ジャイロ性能と応用分野



慣性センサの動向

ジャイロ

特殊なセンサ ⇒ 一般的センサ
軍用 ⇒ 民生用

加速度計

1軸加速度検出としてはほぼ完成
(サイズ、価格)

- ・小型・高精度化、多軸出力の要求
- ・「姿勢」出力の要求 (モーションセンサの要求)

MEMS技術の進展
による小型化

加速度計 ⇒ サーボ型の採用による高精度化
ジャイロ ⇒ 振動型以外の採用

MEMS技術の特徴 Micro Electro Mechanical System

MEMSの定義

- ・従来のものよりも **小さい**
μmオーダーのサイズにとらわれない。
- ・**ウェハー上に一括して製作する**
ウェハーはSiに限定しない。
- ・**機械的要素を電気的手段で動かす**

特長

- ・小型化、大量生産が容易
- ・低コストが容易

短所

- ・3次元構造体の製作が困難
- ・初期設備投資が必要

従来加工技術とMEMS技術の比較

1. 切削、穴あけ

・旋盤、ボール盤 → ・エッチング (ウェット、ドライ)

2. 接合

・溶接、接着 → ・陽極接合、拡散接合

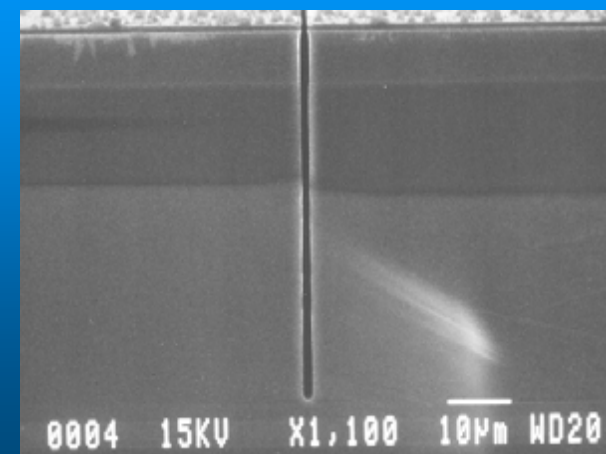
3. 治工具

・金型 → ・フォトリソ

従来加工: **削り取る**

MEMS技術: **付加する**

エッチング結果例 ハイアスペクトレシオエッチング



ドライエッチング装置



目次

1. ジャイロの開発動向
2. 静電浮上・回転型マルチ出力マイクロ慣性センサ
 - (1) 開発の背景
 - (2) 構造及び制御方式
3. マルチ出力慣性センサの応用例
4. デモンストレーション

開発の背景

球型静電浮上ジャイロ

1960年代に米で開発

- ・現在最も**高精度**
- ・大型、高電圧
- ・耐衝撃性小
- ・球型ロータ

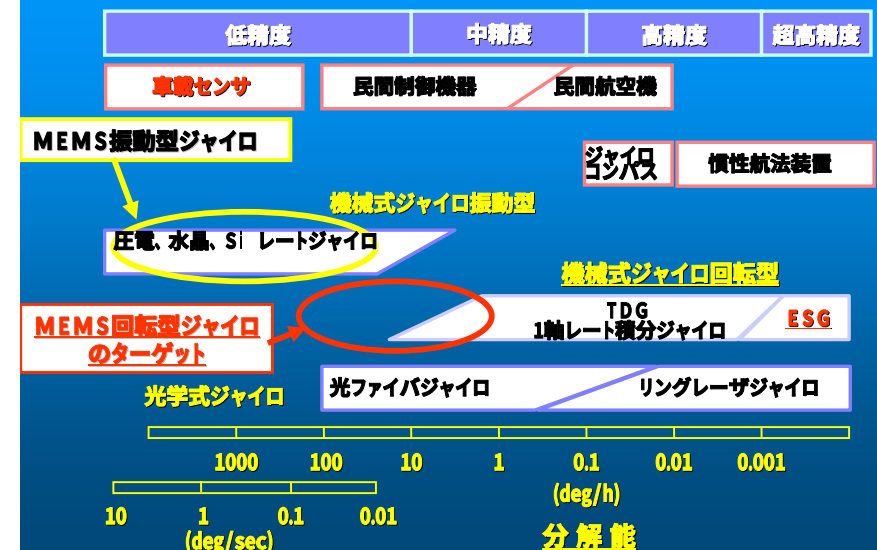
マイクロ静電浮上・回転型 マルチ出力慣性センサ

- ・**マルチ出力: 3軸加速度+2軸角速度**
- ・小型、軽量、低電圧
- ・高精度(機械的摩擦なし)
- ・安価

MEMS技術

- ・量産、安価
- ・小型、平面的

ジャイロ性能と応用分野

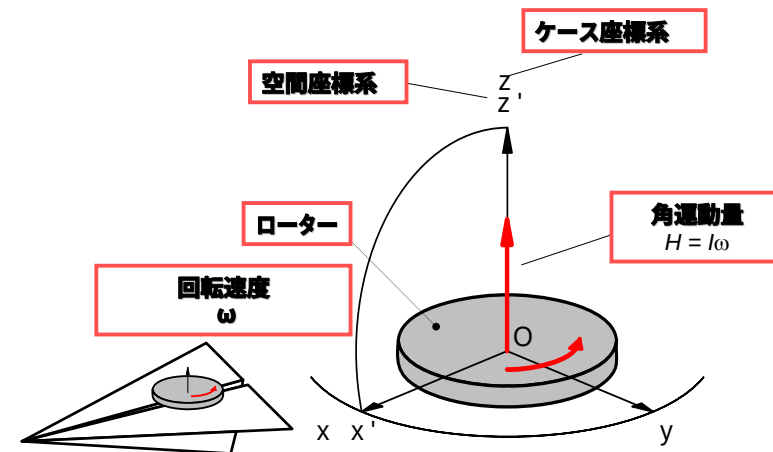


トキメックにおけるマイクロジャイロ開発

- 1993 MEMS慣性センサの基礎研究に着手**
1995 東北大学との共同研究に着手。(研究員派遣)
1996 浮上・回転型Siマイクロジャイロの原理を外部発表
1997～98 東北大学での共同研究、社内での制御技術の研究。
1999. 05 浮上・回転型Siマイクロジャイロの浮上回転、及び3軸加速度検出に成功を国際会議で発表
2000. 06 ミレニアムプロジェクトに採択。(文科省)
2000. 11 高速回転 (10,000rpm)、マルチパラメータ (3軸加速度, 2軸角速度) 同時検出に成功。
2001. 09 NEDO 実用化補助事業に採択。(経済産業省)
2001. 11 リングロータ型により、マルチパラメータ検出に成功。
2002. 06 プロトタイプ完成 (4mm直径ロータ)。
2004. 10 MESAG-1 プロトタイプ (1.5mmロータ) 完成。
2005. 09 応用物理学会論文賞受賞
2007. 03 MESAG-100サンプル出荷開始

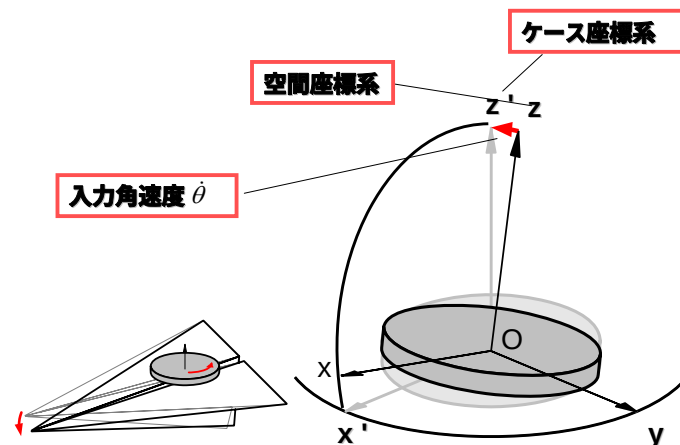
TOKIMEC

動作原理



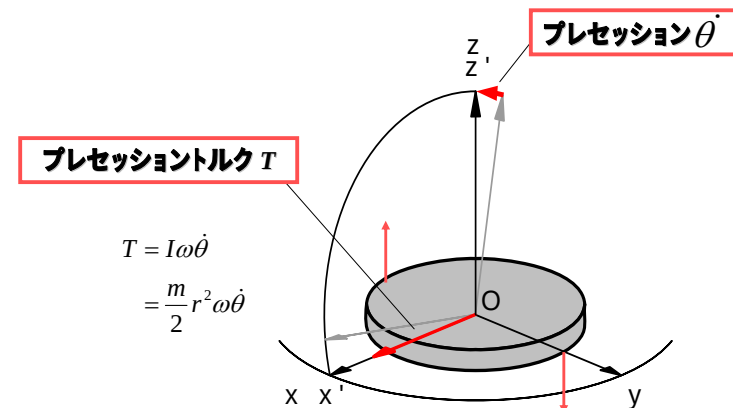
TOKIMEC

動作原理

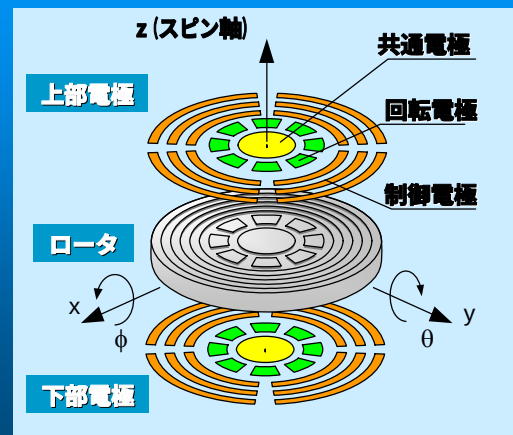


TOKIMEC

動作原理



静電浮上型マイクロ慣性センサ初期モデル

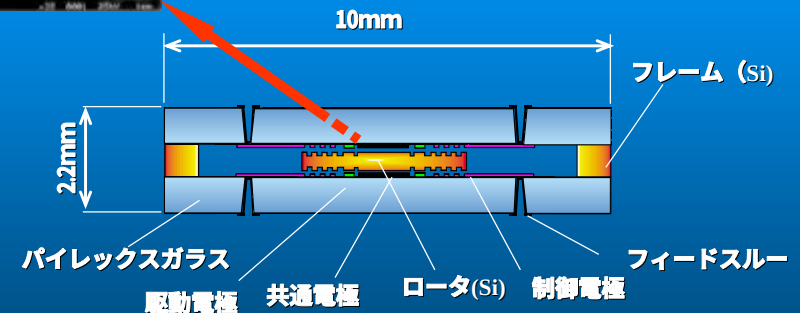


特長

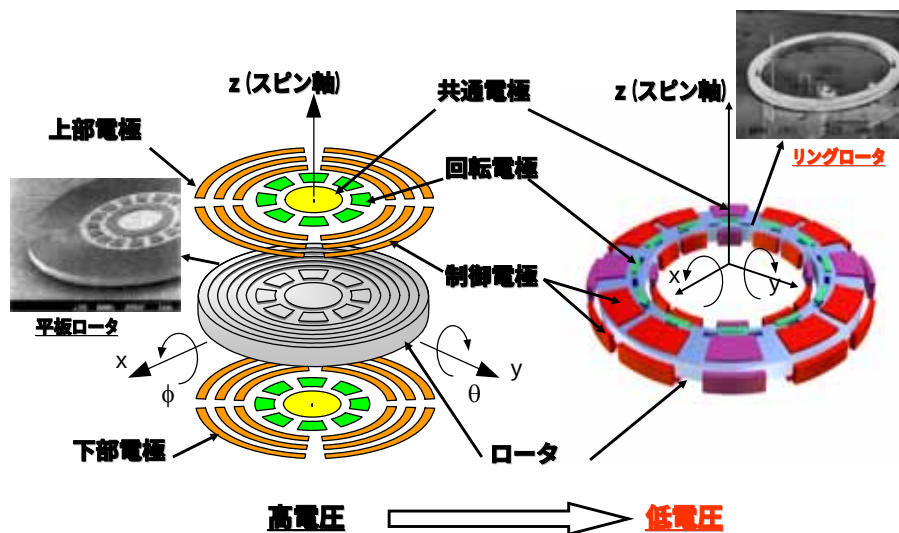
浮上・回転型の採用

高精度化、集積化の実現

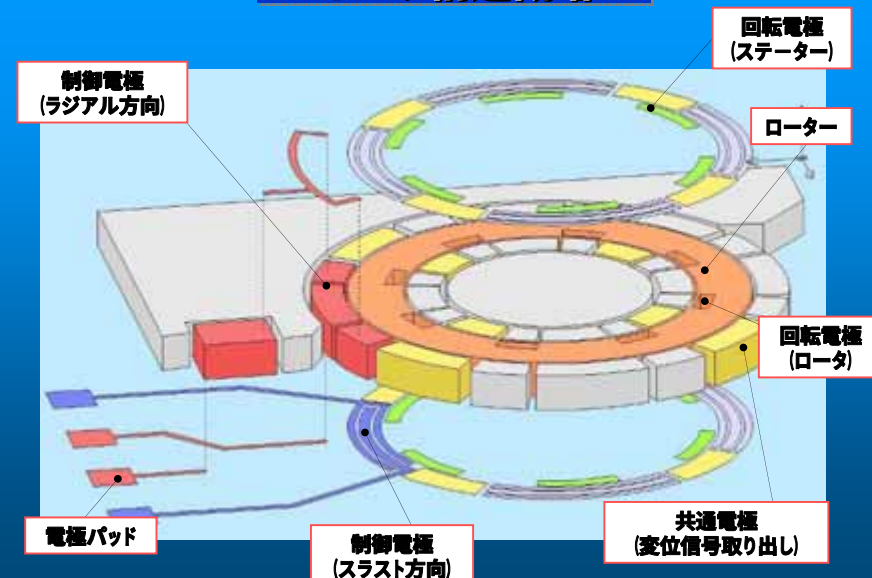
初期モデル概略構造 (ディスクロータ)



ディスクロータからリングロータへ



センサ構造概略



より小さく、より低価格に

チップ寸法

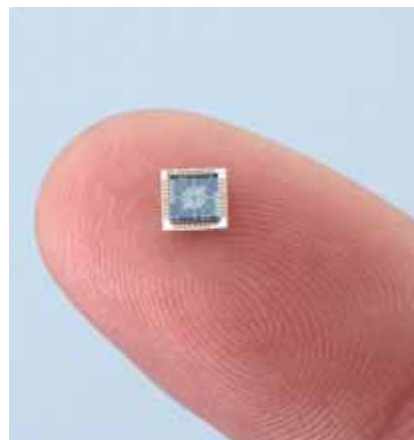
■ 4.3 mm × 4.3 mm × 1.0 mm

ロータ寸法

■ Diameter 1.5 mm
■ Width 150 μm
■ Thickness 50 μm

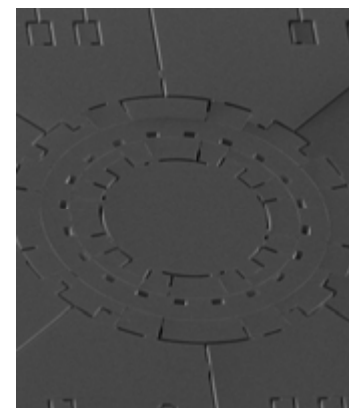
容量ギャップ

■ Radial gap 2.2 μm
■ Axial gap 3 μm

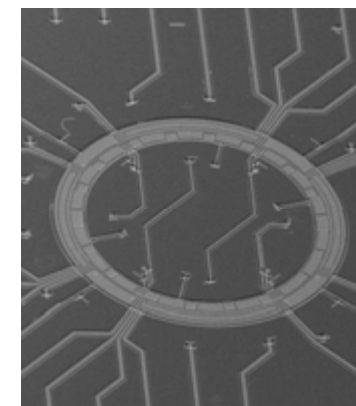


センサチップ

デバイス

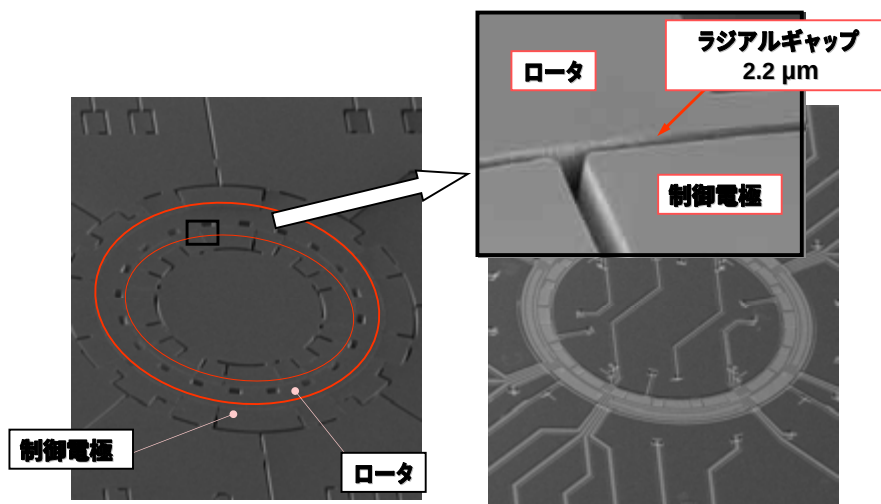


Si パターン



ガラスパターン

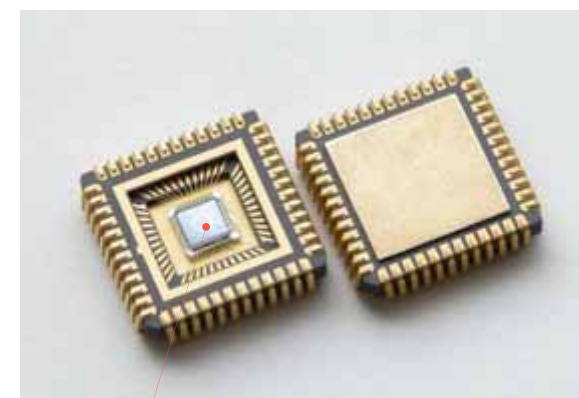
センサ構造概略



Si パターン

ガラスパターン

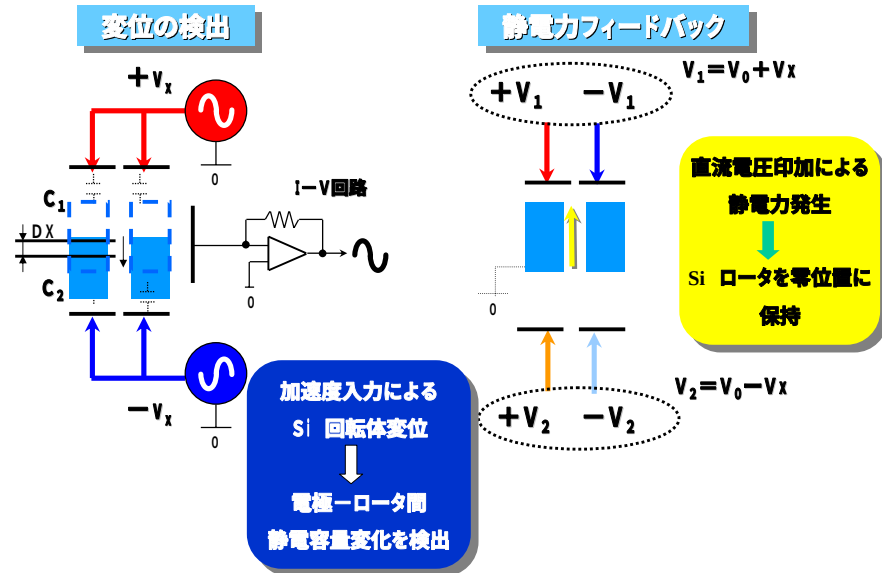
センサデバイス



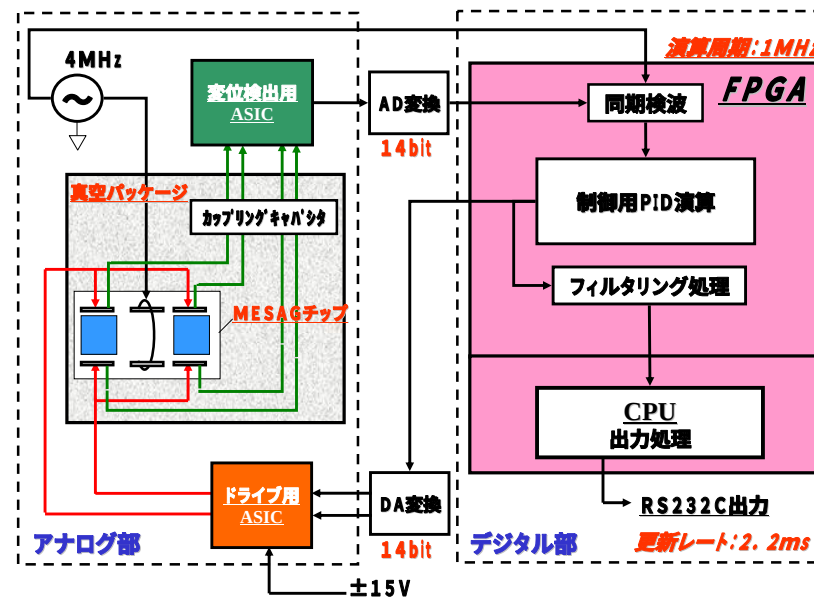
センサチップ

■ Packaging size
14mm × 14mm × 3mm

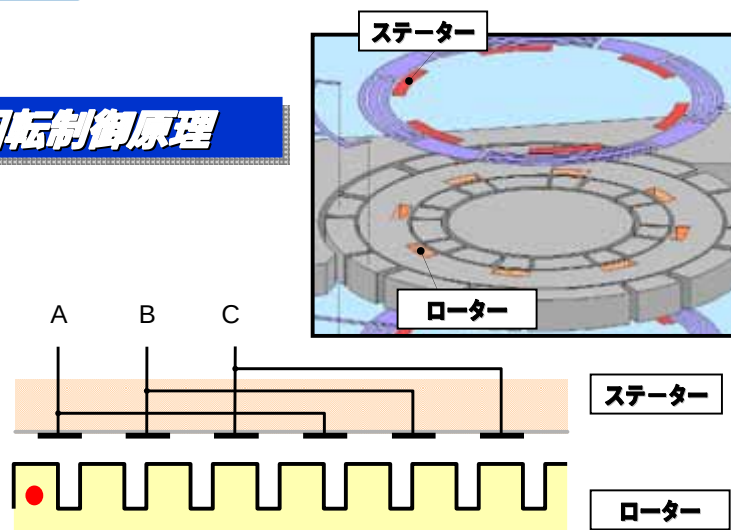
浮上制御原理



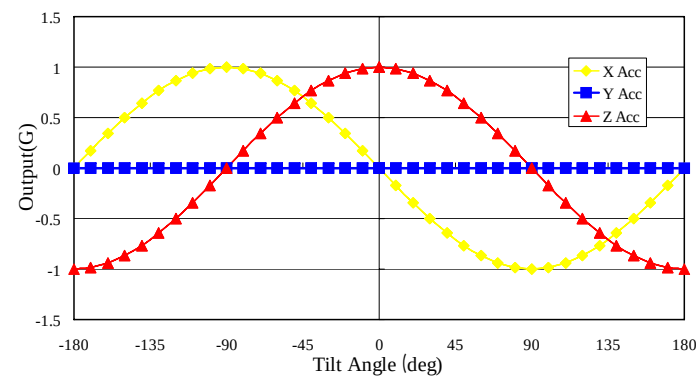
MESAG-100制御方式概略



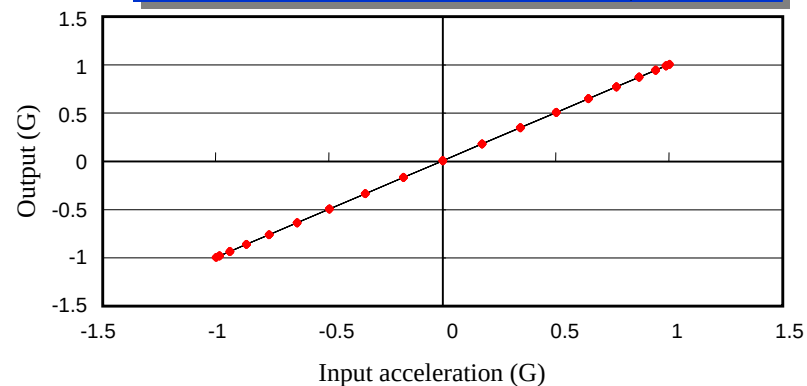
回転制御原理



MESAG-100入出力特性例(加速度)

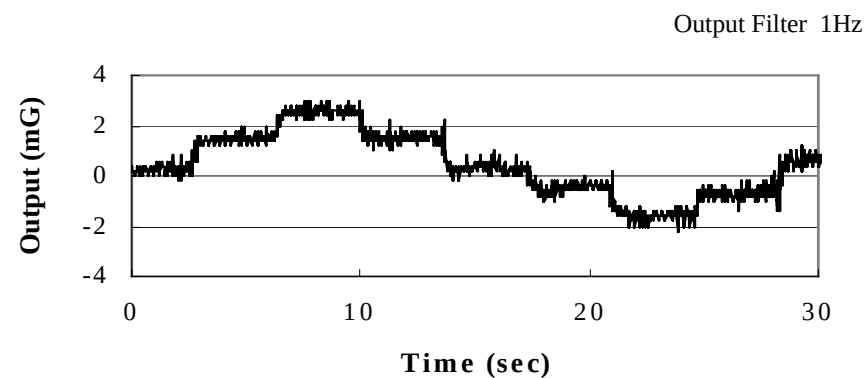


MESAG-100入出力特性例(加速度)



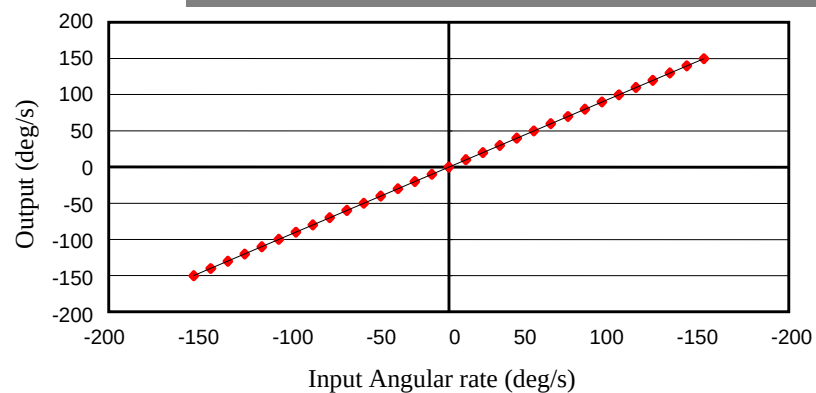
直線性 <0.1 % (±1G)

MESAG-100 加速度計傾斜試験



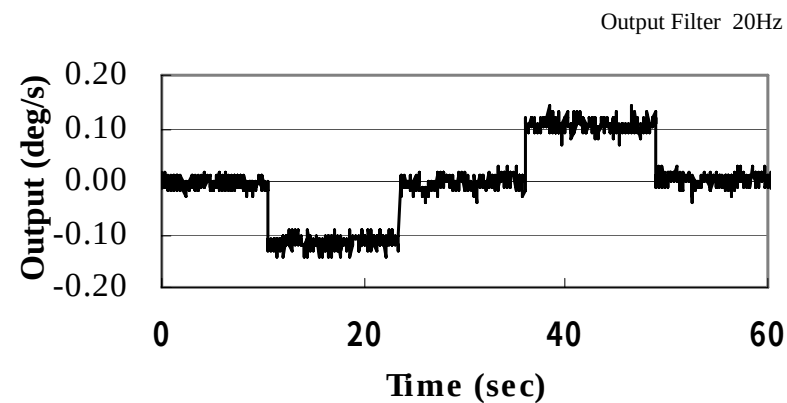
入力;1mG Step
(傾斜角 0.06deg)

MESAG-100入出力特性例(レート)



直線性 <0.05 % (± 150deg/s)

MESAG-100 レート検出例



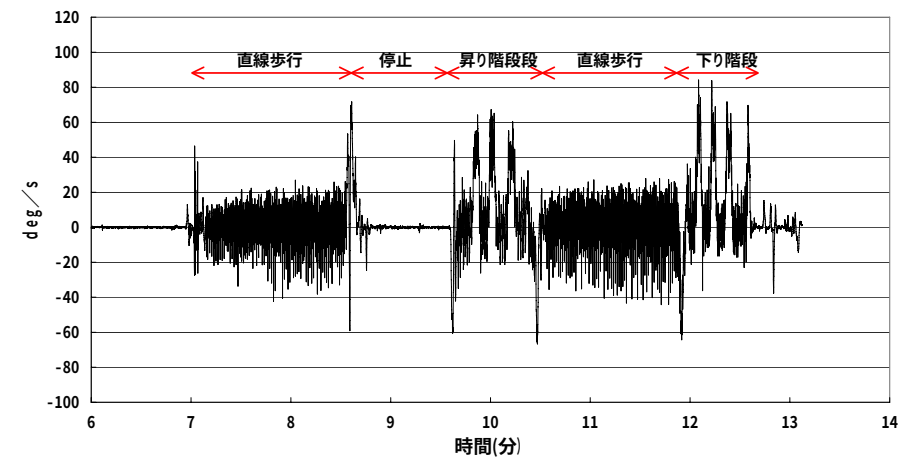
入力;0.1deg/s step

目次

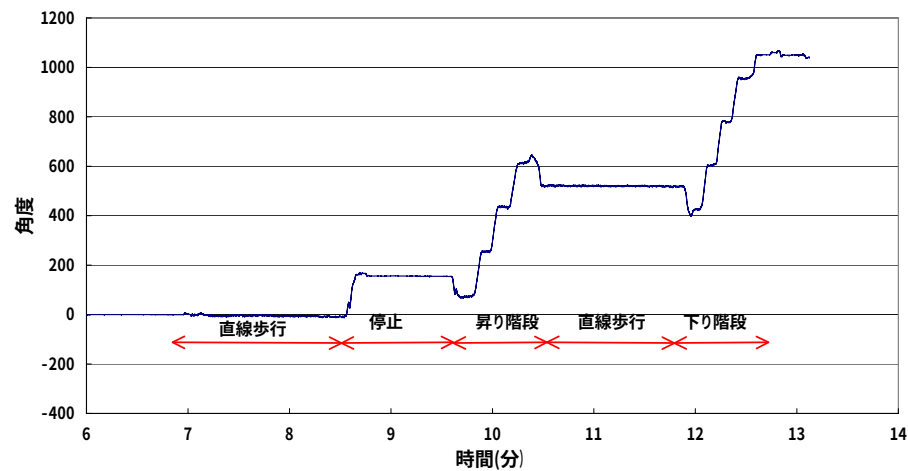
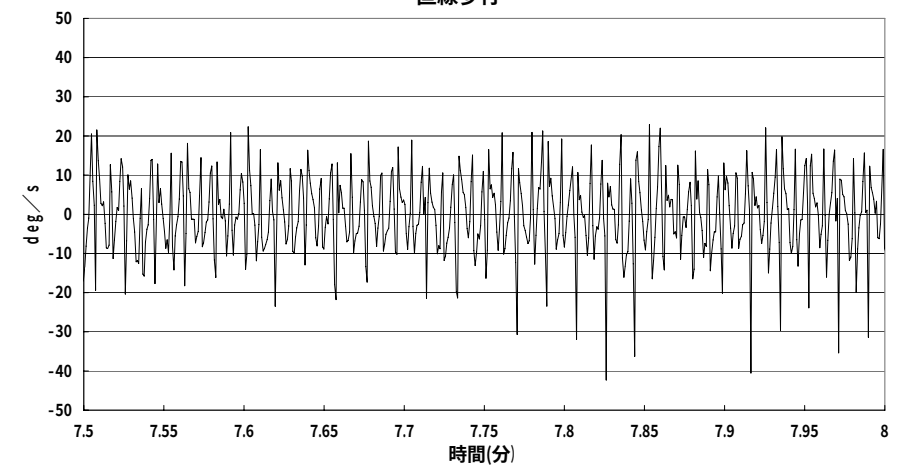
1. ジャイロの開発動向
2. 静電浮上・回転型マルチ出力マイクロ慣性センサ
 - (1) 開発の背景
 - (2) 構造及び制御方式
3. マルチ出力慣性センサの応用例
4. デモンストレーション

ウェアラブル使用例
屋内歩行&階段昇降

ヨーレート

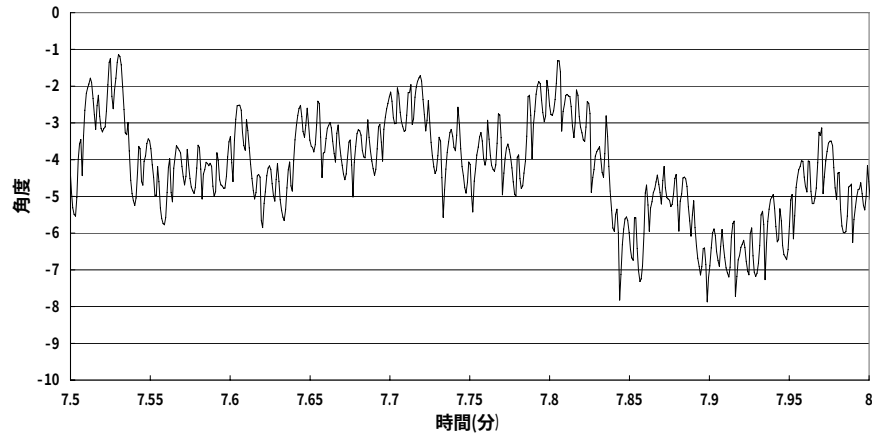
ウェアラブル使用例
屋内歩行&階段昇降

ヨー角(積分値:歩行開始時基準)

ウェアラブル使用例
屋内歩行&階段昇降ヨーレート
直線歩行

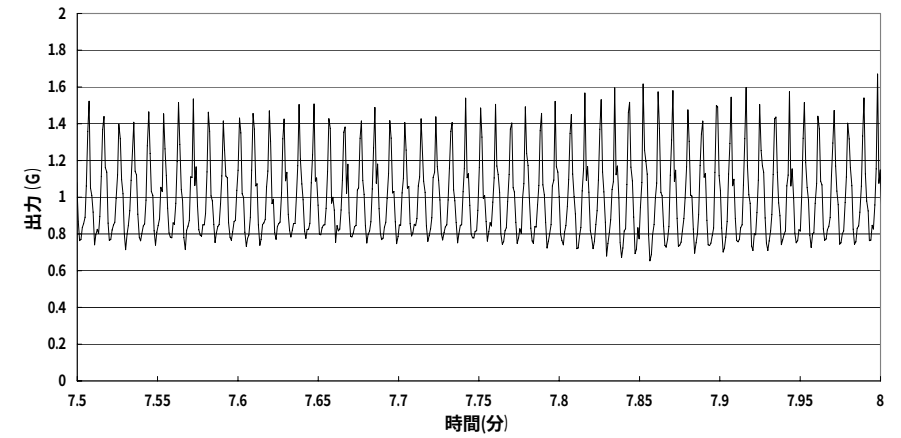
ウェアラブル使用例
屋内歩行 & 階段昇降

ヨー角(積分値) 直線歩行



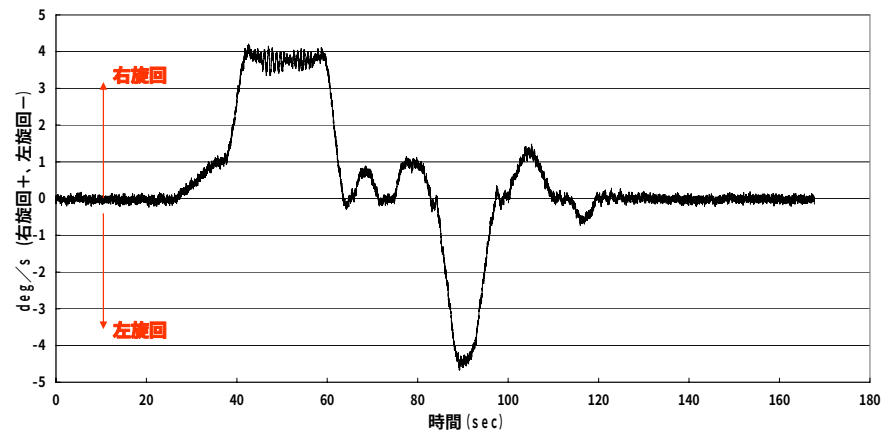
ウェアラブル使用例
屋内歩行 & 階段昇降

上下加速度 (直線歩行時)



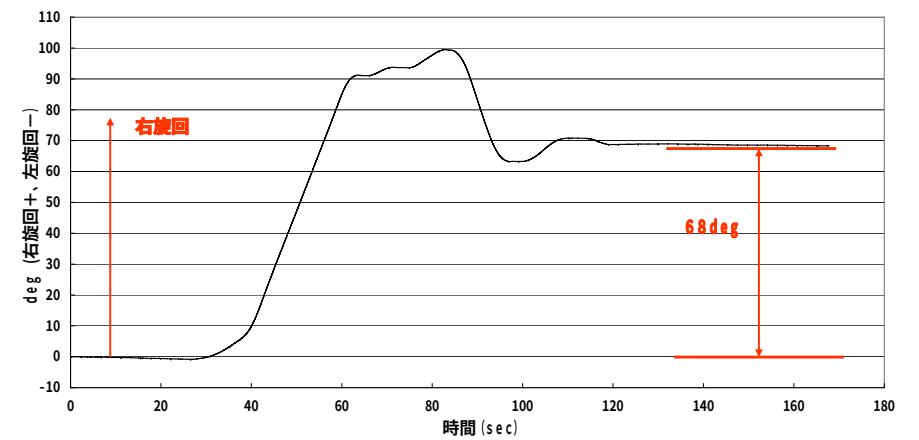
鉄道車両動揺計測例

ヨーレート (目黒A)



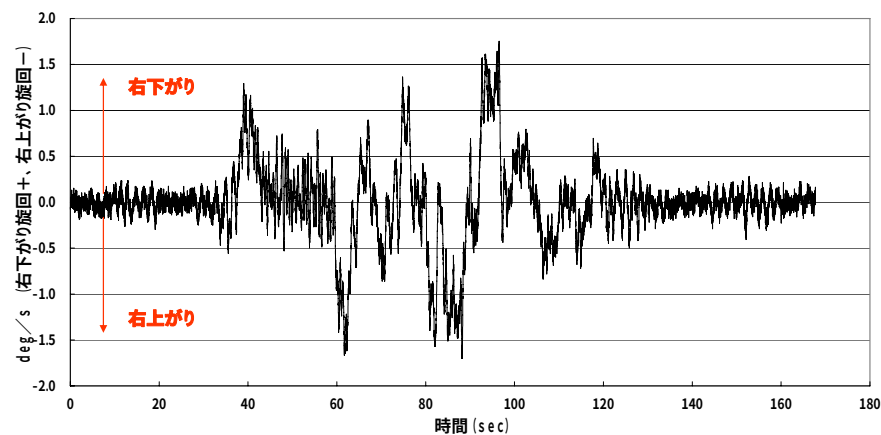
鉄道車両動揺計測例

ヨー角 (積分) (目黒A)



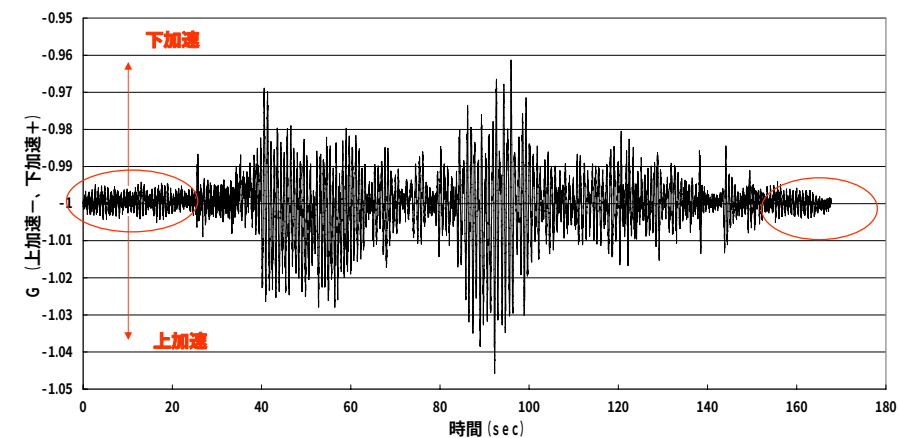
鉄道車両動揺計測例

ロールレート (目黒A)



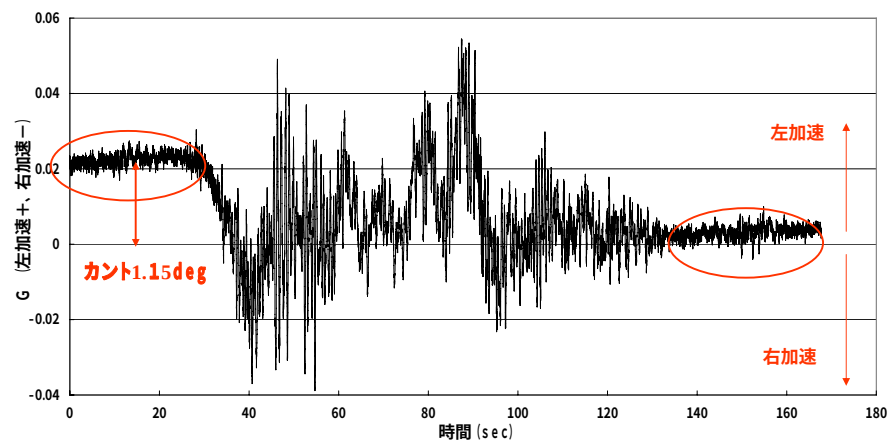
鉄道車両動揺計測例

上下加速度 (目黒A)



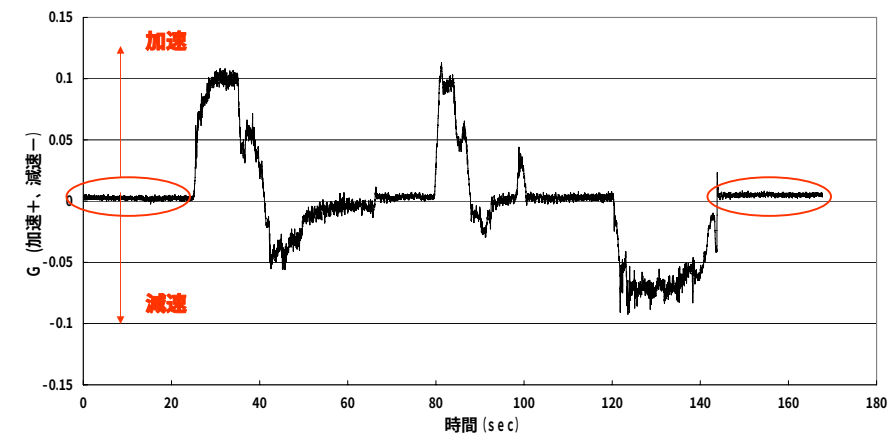
鉄道車両動揺計測例

左右加速度 (目黒A)

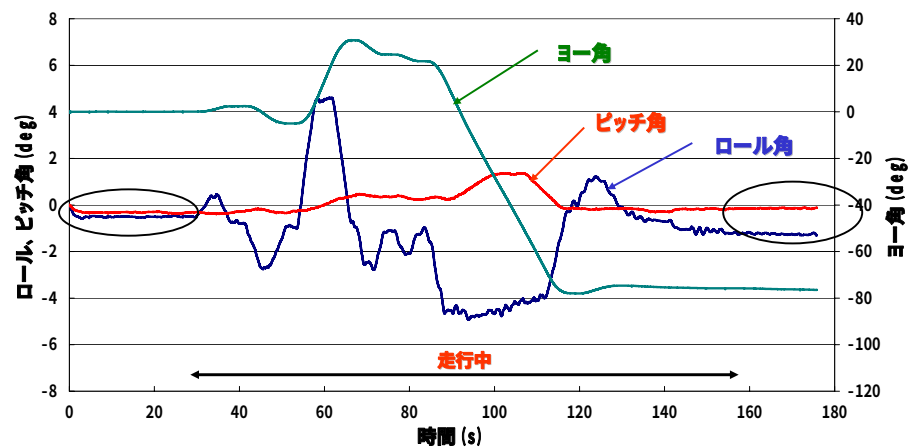


鉄道車両動揺計測例

前後加速度 (目黒A)



鉄道車両動揺計測例

東京メトロ東西線営業車両
白金台→目黒 姿勢

まとめ

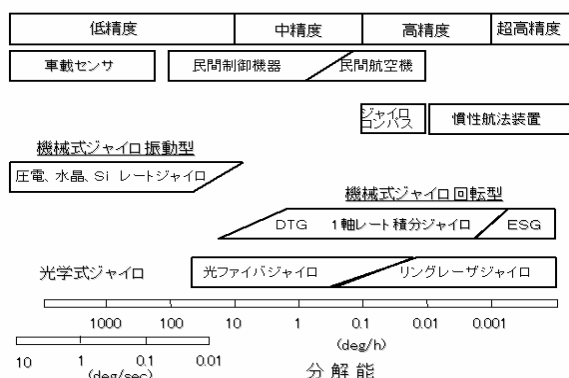
- ・マイクロ慣性センサは自動車用をドライビングフォースとして、低コスト化・精度向上が進んでおり、今後も新たな用途に向けて、高機能化、高精度化、信頼性の向上等が図られる。
- ・ジャイロに関しては、振動型が主流であるが、高精度化の要求により異なった形式のジャイロが開発されつつある。
- ・今後はジャイロ、加速度計を集積したデバイスが登場すると考えられ、真の意味でマイクロ慣性センサシステムの応用が加速されると予想される。

静電ジャイロ ー浮上・回転型MEMS慣性センサの開発と応用ー

(株) トキメック研究開発センタ
ME S A G 事業推進部 中村 茂

1. はじめに [2] [3]

ジャイロセンサは150年以上の歴史を持ち、機械式をはじめ光式まで各種原理に基づく方式・構造のものが提案・実用化されている。それら多数の方式のジャイロはその性能により各分野で使い分けられている。(表1)



表ー1 各種ジャイロと応用分野

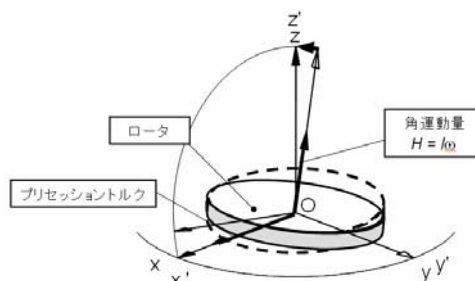
各種ジャイロセンサの内、機械式では静電支持ジャイロ (ESG) が最も高精度である。精度が低くても良い用途には主として「振動ジャイロ」が使われている。MEMS技術を用いた「マイクロジャイロ」はほぼ全てがこの「振動ジャイロ」に分類される形式である。[1]

トキメックで開発したセンサは角速度検出の原理として、ジャイロセンサとしては最も高精度な「静電支持ジャイロ: ESG」と同一の方式を採用している。

Si製のリング型回転体(直径1.5mm)を静電力で浮上させ、非接触で高速回転(74,000rpm以上)させることにより2つの軸回りの角速度を検出し、同時にロータを支持する力から3方向の加速度をも検出可能な「マルチ出力慣性センサ」である。

2. 回転型慣性センサの動作原理

浮上回転型慣性センサの原理、特に角速度(レート)検出の原理は船舶用ジャイロコンパス等で広く使われてきた「機械式回転型ジャイロ」と同一である。(図1)



図ー1 回転型ジャイロセンサの原理

高速回転している回転体の回転軸と直交する軸回りに角速度が入力されると、回転体とケースの間に傾斜変位が生じる。フィードバック制御により、回転体を常にケースのゼロ位置に保持するようトルク(プレセッショントルク)がフィードバックされる。このトルクは以下のように、入力角速度に比例することからフィードバックトルクを計測することにより角速度検出が可能になる。

回転体の慣性能率を I 、回転速度を ω 、入力角速度を $\dot{\theta}$ とすると、プレセッショントルク T は次式であらわされる。

$$T = I\omega\dot{\theta} \quad (1)$$

本形式のセンサは(1)式からわかるように、回転体の慣性能率を大きく、回転速度を大きくすることで性能向上が可能であり、マイクロジャイロセンサの場合は「回転速度を大きく」することで対処している。図1のように回転軸(z軸)に直交する軸は2軸(x、y軸)あることから、本センサは2軸角速度センサと動作することが可能になる。又、回

転体を常にケースのゼロ位置に保持するよう制御していることから、3軸加速度計としても動作し、1台で2軸（x、y軸）回りの角速度と3方向（x、y、z方向）の加速度、合計5つのパラメータを同時に計測することが可能になる。

3. センサの構造

図2にセンサの構造を示す。

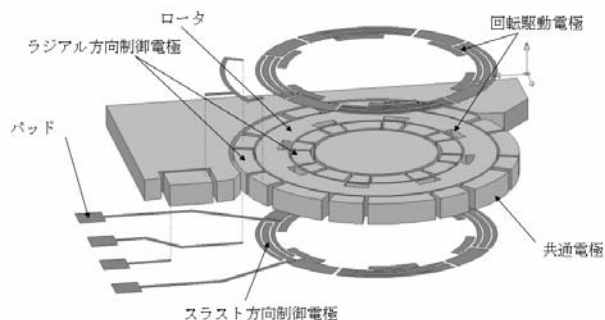


図-2 静電浮上回転型慣性センサの構造

本センサはガラス／シリコン／ガラスの3層構造で構成されている。リング型回転体の周りに制御用電極が配置され、回転体との間で変位検出及び静電駆動のためのコンデンサを形成している。

ラジアル方向制御の電極は回転体と同一のシリコンウェハーで構成されており、スラスト方向制御及び回転駆動用電極は上下のガラス基板上にパターンニングされている。

リング型回転体は外径1.5mm、厚さ $50\mu\text{m}$ である。上下のガラス基板の電極と回転体とのギャップは約 $3\mu\text{m}$ 、ラジアル方向制御用電極と回転体との間は約 $2.5\mu\text{m}$ のギャップになっている。

写真1が実際のセンサチップ、写真2がパッケージに入れた例である。

直径1.5mmのリング型回転体を内蔵するセンサチップは4.3mm□、厚さ1mmである。

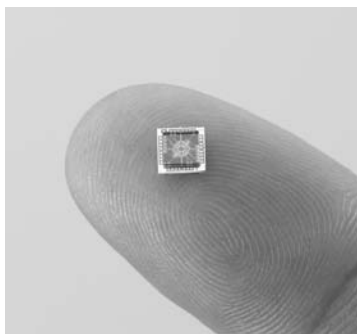


写真1 センサチップ

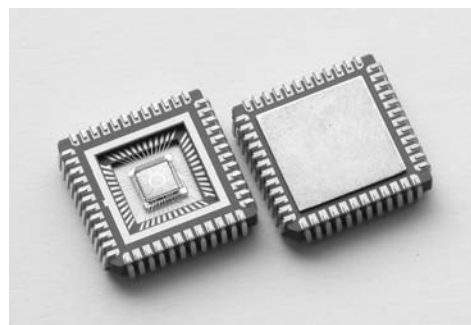


写真2 センサパッケージ

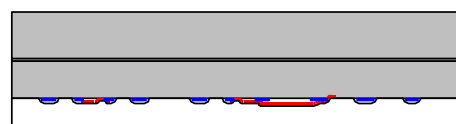
4. センサの製作方法

本センサは以下のようにMEMS技術の標準的なプロセスで製作される。

- (1) パイレックスガラス上にスラスト方向のギャップを構成する部分をウェットエッチングで形成し、メタル電極をパターンニングする。



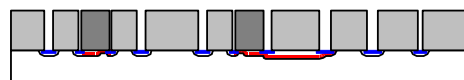
- (2) SOIウェハーと(1)のガラスウェハーを陽極接合する。(一回目)



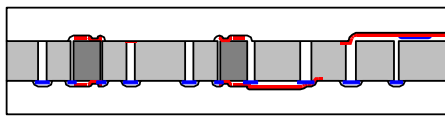
- (3) SOIウェハーの支持層を除去する。



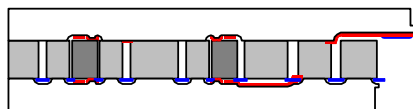
- (4) DeepRIEにより、ロータ、ラジアル方向制御用電極、回転駆動用電極等の部分を形成する。



(5) ガラス／シリコンの2層構造に(1)で製作したガラスと同様のガラスを陽極接合し、3層構造のウェハを形成する。



(6) デバイスを切断・分離する。



以上のように、単純なプロセスで製作可能であり、低コストセンサの製作を実現できる

5. 性能

5. 1 加速度計性能

本センサクラスの加速度計はセンサを傾斜させ重力加速度の入力を変化させて行うのが一般的である。

図-3にY軸周りにセンサを回転させた(X、Z軸に $\pm 1G$ を入力)結果を示す。多軸出力加速度計として動作していることがわかる。図-4はX軸方向の加速度入力と出力の関係を示したものであり、 $\pm 1G$ の範囲で良好な直線性を示していることがわかる。

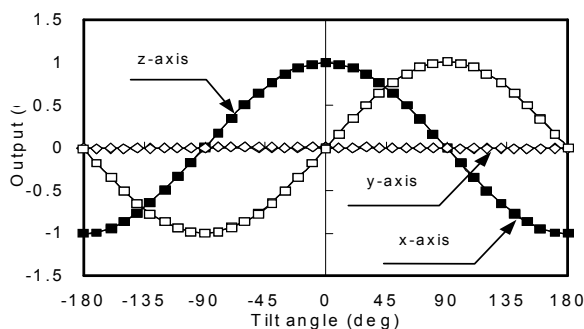


図-3 傾斜試験結果

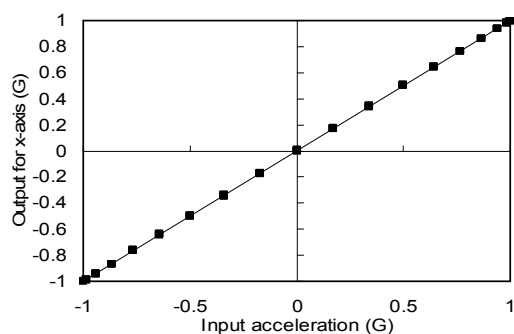


図-4 入出力特性

図-5は低加速度入力(1mG ステップ@ 0.06deg)時の出力であり、0.5 mG以下の分解能を持っていることがわかる。

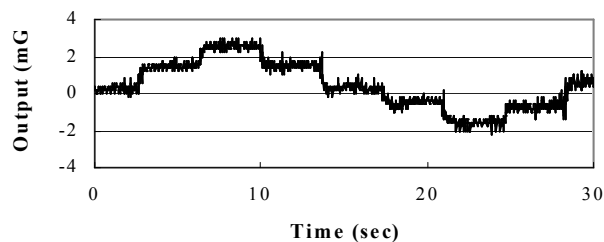


図-5 低加速度入力時

5-2 ジャイロ性能

ジャイロセンサとしての性能評価はターンテーブルを使用して行う。図-6は $\pm 150 \text{ deg/s}$ での入出力特性、図-7は $\pm 0.1 \text{ deg/s}$ 入力での出力特性である。良好な分解能と直線性を示している。

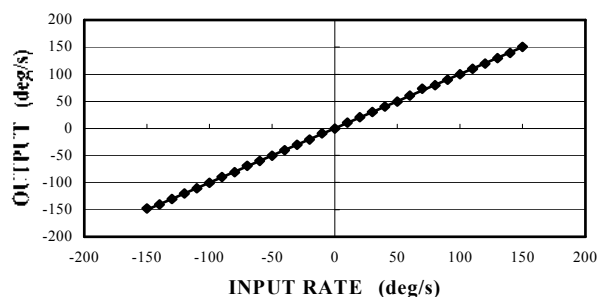


図-6 角速度入出力特性

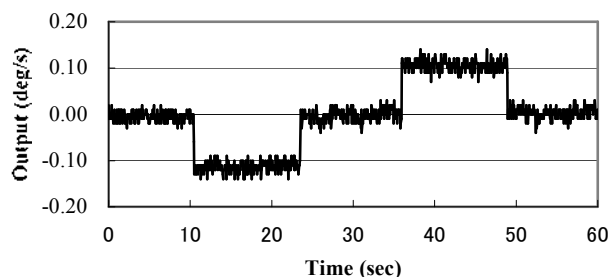


図-7 低角速度入力時

6. まとめ

表2に概略性能の一覧を示す。2軸角速度・3軸加速度のマルチ出力を可能にするのみならず、各パラメータに関してもMEMS技術を用いて製作された慣性センサとして最高レベルの性能である。

表2 センサ性能概略

項 目		
回転体寸法		1.5mm×50μm(H)×150μm(w)
ギャップ		2.5μm (ラジアル)
		3.0μm (スラスト)
回転数		74,000 (rpm)
計測範囲	角速度	±150 deg/s
	加速度	±49m/s ²
感 度	角速度	0.01deg/s LSB
	加速度	1.96×10 ⁻³ m/s ² LSB
直 線 性	角速度	0.05% (±150 deg/s)
	加速度	0.1% (±1G)
雑音	角速度	0.002 deg/s/√Hz
	加速度	30μG/√Hz

参考文献

- 1) N. Yazdi, F. Ayadi and K. Najafi, "Micromachined Inertial Sensors" Proc. IEEE, Vol 86, No 8. 1998
- 2) K. Fukatu, T. Murakoshi, and M. Esashi
"Electrostatically Levitated Micro Motor for Inertial Measurement System" Tech. Dig. 10th Int. Conf. Solid-State Sensor and Actuators (Transducers99) Sendai 1999 pp1558
- 3) T. Murakoshi, K. Fukatu, S. Nakamura, and M. Esashi "Electrostatically Levitated Rotational Ring-Shaped Gyro/Accelerometer for Inertial Measurement System" Symposium Gyro Technology 2002 Stuttgart, Germany



実寸大
W100×D70×H30 mm

マイクロ慣性センサ MESAG-100は、MEMS(マイクロマシニング)技術を使用して製作された、世界初の回転型のマルチ出力マイクロ慣性センサです。

シリコンから作られたリング状の回転体（直径1.5mm）を静電力で浮上・高速回転させることにより、3方向の加速度と2つの軸回りの角速度を同時に計測することが可能です。

MESAG（登録商標）
Micro Electrostatically Suspended Accelerometer Gyro
マイクロ静電支持加速度計／ジャイロの略

特長

2軸角速度、3軸加速度のマルチ出力が可能。
MEMS技術により、小型・高性能かつ低価格を実現。
機械的支持部が無く、高精度、長寿命。
姿勢計測システムへの応用が容易。

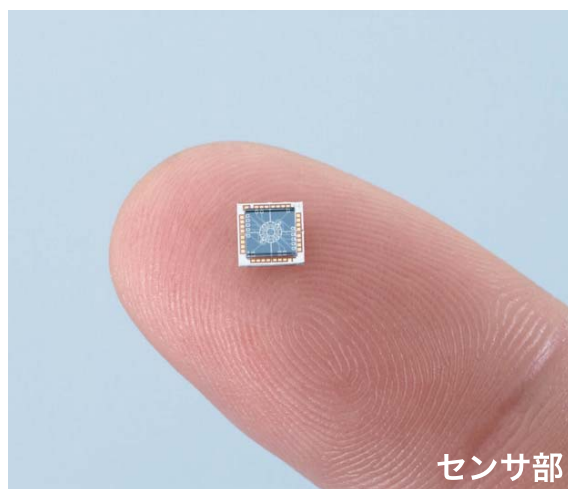
主な用途

自動車関連

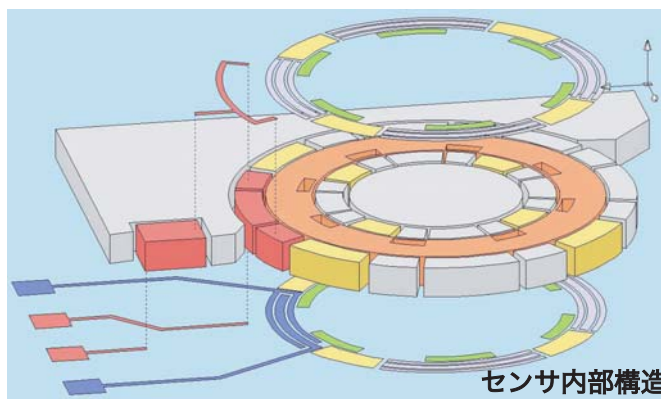
ITS用センサ（含カーナビゲーション）、
車両制御、ロールオーバー検出 等

各種姿勢検出・制御

アンテナスタビライザ、鉄道車両、船舶、
土木・建設機械等 各種姿勢制御。
ゲーム、ロボット、携帯情報端末、福祉機器等
各種姿勢検出



センサ部



センサ内部構造

主な仕様

定格			
計測パラメータ		2軸角速度 3軸加速度	
供給電圧	V	12	
動作温度	℃	- 20 ～ +55	
寸法	mm	100×70×30	取り付け部含まず
起動時間	s	20 以下	回転上昇時間 ※1
出力形式		デジタル (RS232C)	データ更新時間 2.2 ms

角速度 (X, Y 2軸)			
測定範囲	deg/s	±150	※2
感度	deg/s LSB	0.01	
出力雑音	deg/s/√Hz	0.01	
直線性	% FS	< 0.03	
オフセット温度特性	deg/s p-p	2	全温度範囲
加速度感度	deg/s/G	< 0.05	
加速度 (X, Y, Z 3軸)			
測定範囲	m/s ²	± 49	± 5G
感度	m/s ² LSB	1.96×10^{-3}	0.2mG LSB
出力雑音	m/s ² /√Hz	1.47×10^{-3}	150μG/√Hz
直線性	%	< 0.15	±9.8m/s ² (±1G)
オフセット温度特性	m/s ² p-p	0.295	30mG p-p 全温度範囲
他軸感度	%	< 0.2	

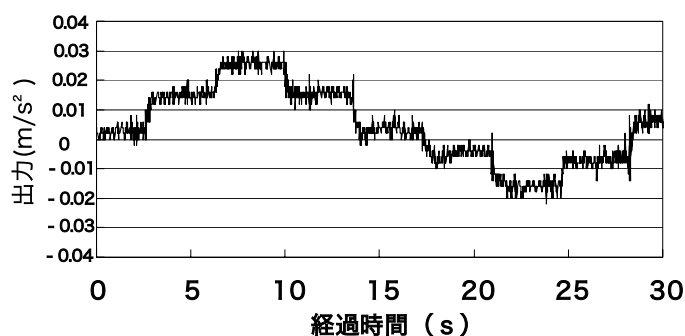
※1：回転上昇中にもセンサ出力は可能です。 但し、規定の精度ではありません。

※2：2軸角速度、3軸加速度の全てが入力された場合であり、低加速度入力時は角速度の測定範囲は広がります。

商品の仕様およびデザインは予告無く変更する場合があります。

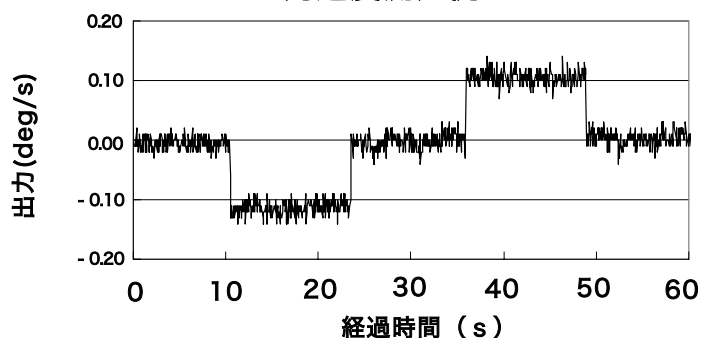
センサ出力例

加速度測定例



低加速度入力 9.8×10^{-3} m/s² ステップ (0.06deg傾斜)

角速度測定例



低角速度入力 ±0.1 deg/s

株式会社 トキメック

研究開発センタ MESAG事業推進部

〒144-8551 東京都大田区南蒲田2-16-46

電話 03-3739-6995 FAX 03-3731-5263