

超小型データロガーによる高速運動体の実働計測

○木村正信 大澤正敬 須浪清一 服部治博 長沢裕二 (株式会社豊田中央研究所)
百々浩平 吉田倫生 (トヨタ自動車株式会社)
立木 宏 (マイクロリンクシステムズ有限会社) 今井 淳介 (株式会社NEAT)

In-situ measurement of High-speed Moving Parts with an Ultra-small Sized data Logger

○Masanobu Kimura Masataka Osawa Kiyokazu Sunami Haruhiro Hattori Yuji Nagasawa
(Toyota Central R&D Labs., Inc.)
Kohei Dodo Michio Yoshida (TOYOTA MOTOR CORPORATION)
Hiroshi Tsuiki (Microlink Systems Ltd.) Junsuke Imai (NEAT CO., LTD)

An ultra-small sized data logger has been developed to acquire data signals from the sensor attached to high-speed moving parts in engines, motors, transmissions, etc. With its superior installability, the data logger makes possible on-board measurement of moving parts which is simple, noise-robust and high-precision as compared with traditional one such as slip ring method and telemetry.

1. はじめに

中国、インドなど新興国の躍進による化石燃料のひっ迫やCO₂排出/地球温暖化問題など自動車を取り巻く環境が厳しさを増すなかで、動力源であるエンジンやモータ、動力を伝える変速機等をより効率良く作動させることが求められている。これら基幹要素の開発には、損失となっている要因を原理原則に基づいて解き明かし、改良を積み重ねていく必要がある。そこで重要になるのが高速で運動をする部材局所の温度や圧力、歪等の物理量であり、現象の理解、計算解析の検証にとって計測の役割は非常に大きい。しかし、これらの計測には、ごくわずかな隙間や部材間の狭小空間でしか与えられないため、センサや信号取り出し機構を組み込む実装には高度な技術を必要とする。一般に回転体や往復運動体から信号を取り出す方法としてはテレメータ¹⁾やスリップリング²⁾、リンク機構などがある。開放空間でのテレメータ計測は確立された技術と言えるが、閉じられた空間ではアンテナの取り回しの難しさや電波の断続による信号の連続取得ができない問題がある。また、スリップリングやリンク機構を計測対象に設置するためには、対象そのものの大幅な改造が必要であり、実機そのままの状態での計測には向かないことが多い。一方、不特定の軌跡で移動するものの計測、例えば動物の生態追跡³⁾や物流貨物の温度トレース⁴⁾に信号をデジタルデータとしてメモリに記録するデータロガーが用いられつつある。これらのロガーは小型軽量ではあるものの、サンプリング周期が秒オーダーあるいはそれ以上と遅く、機械機構の高速

な現象の計測には性能が不十分でそのまま適用はできない。サンプリング周波数が高いものも発表されているが⁵⁾、体格、重量とも大きく高速運動体への搭載は難しい。

そこで、超小型かつサンプリング性能を十分に引き上げた高性能データロガーを独自開発し、多くの計測対象に適用し、その有用性を実証した。

以下、開発した超小型データロガーの詳細とそれを応用した変速機実働時の内部計測について述べる。

2. 超小型データロガーの開発

開発にあたり以下の設計要件を設定し、これに基づいて基本設計を行った。

(1) 設計要件

前述したように、小型軽量化と高周波サンプリングが必須条件であるが、駆動電源としても小型・軽量の電池の利用が前提となるため、回路全体の省電力化が求められる。また、取得信号のS/N比向上のため、組み込むセンサアンプの設計にも工夫が必要となる。さらに、解析に必要とされる運動体の物理量は、単独情報というよりも絶対位置や相対位置関係において意味を持つことが多いため、位置情報信号を取り込む機能も必要となる。また、ロガーは、他の手段と比べてリアルタイム性や信号のモニター能力に劣る欠点があるが、状況によっては簡易的なモニター機能を備える必要もある。

なお、計測物理量としては、歪、温度、加速度、変位であり、計測環境としては、耐荷重(遠心G)400G以

上、最高使用温度 100℃以上としている。

(2) ロガーシステム

上記要件を考慮したロガーシステムの基本構成を図 1 に、ロガー本体と電池ユニットの外観を図 2、PC へのデータ転送・モニターシステムの外観を図 4 に示す。ロガー本体は、センサ用のアンプ、A/D 変換器、データ取り込み制御回路、不揮発性のフラッシュメモリ、トリガ検出用の光センサおよび通信回路から構成されている。

電池ユニットは図 3 に示す充電式リチウム電池を主に用い、回転バランスを整えるためのカウンターウェイトとしても機能するようになっている。

データ転送・モニターシステムは通信ユニットを介してロガーの作動条件設定や収録開始の制御を行うとともに、ロガーに取り込まれたデータを計測終了後 PC に転送してデータ収録を行う。ロガーと PC 間の通信方式としては、コネクタを介して有線で行う方式と無線で行う方式とを選択できる。有線方式では、計測対象のケースにロガーコネクタ部にアクセスする開口部の設置が必要となる。無線式では、停止位置近傍にアンテナを設置できることが必要とされる。

(3) ロガーシステム構成上の特徴

設計要件を具現化するために、以下に示す工夫を施している。

i) データ収録性能の最適化

技術的には A/D 変換の分解能を 20 ビット以上にすることも可能であるが、必要とする計測精度から分解能を 10~12 ビットに限定することで、A/D 変換回路の簡素化と高速化を両立した。また、収録時間も安易に長時間化はせず、メモリ容量を抑え、メモリチップの小型化を図っている。

ii) 高集積回路設計と低消費電力化

図 1 に示した基本構成において、データ取り込み制御回路部分を図 5 に示す 1 チップ型と素子分散型の二つのタイプを用意した。1 チップ型は A/D 変換回路内蔵の 1 チップ CPU を用いており、データ収録をシンプルかつ低コストで実現する。素子分散型は図 6 に示すように、高速動作が要求される信号サンプリング中のフラッシュメモリへのデータ格納動作を CPLD (プログラムロジック素子) で行い、ロガーの基本制御、データ転送など低速動作を CPU が担当するというように、機能を分散してそれぞれの負荷を低減することにより高速動作と低消費電力化を両立した。また、一つの大きな CPU で構成する 1 チップ型に比べ、小さな素子を複数使うため基板形状の自由度が高く、計測対象の取り付け空間に合わせた形状にすることができる。このタイプは厳しい計測環境へ対応するために、小型・軽

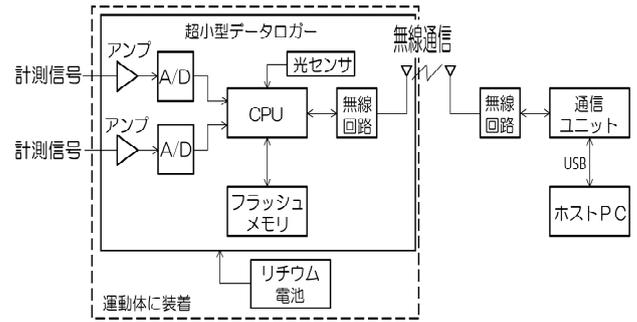


図1 データロガーの基本構成

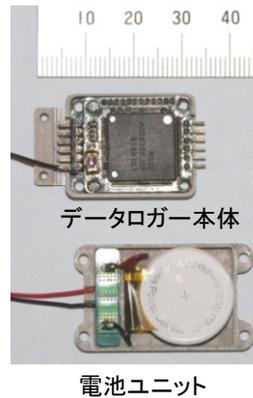


図2 データロガーの外観 (標準型)



図3 データロガーの標準電池



図4 データロガーの収録システム

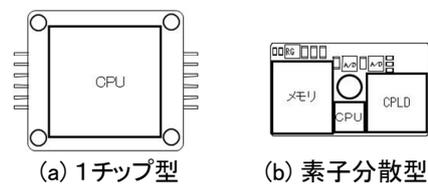


図5 データロガーの回路構成

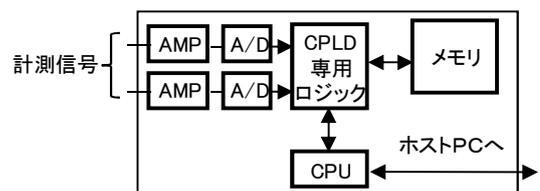


図6 機能分散による高速化、低消費電力化

量化だけでなく形状の柔軟性を持たせるために考案した方式である。

回路上の工夫とは別に待機時の省電力化を図るために、外部からのトリガ信号によるデータ収録機能を持たせる。待機状態ではごくわずかな電力消費で作動しており、電池の無駄な消耗を抑えることができる。

iii) S/N比の向上

歪センサや温度センサである熱電対は微弱な信号であり外部からのノイズを受けやすい。このためロガー内部に信号増幅アンプを内蔵し、計測センサの直近でデジタルデータに変換しメモリに記録できるよう回路構成や基板配置の設計を行っている。また、図7に示すように信号に重畳するノイズ除去のため、増幅アンプの前段にパッシブノイズフィルタを、後段にアクティブノイズフィルタをそれぞれ設けている。

iv) 位置情報・外部同期機能

光センサはデータ収録の開始、停止のトリガとして機能するとともに、1ビットのデータとしても記録できるため、データロガーの位置情報、他の計測装置との同期情報として利用可能としている。

v) 簡易モニター機能

データ転送を無線方式で行うタイプについては、停止時にデータ転送を行う位置すなわちアンテナ設置位置近傍においては、ロガーとモニターシステムとのリアルタイム接続機能を保持させる。通信レートは消費電力抑制のためデータサンプリングレートよりも低く抑える。これにより間引かれた情報ではあるがモニタリングが可能となり、計測が正常に行われているかの確認には有効な手段となる。

(4) ロガーのバリエーション

前節の特徴を組み合わせる構成した3種類のロガーとその仕様を表1に示す。

標準型はデータ収集能力、耐環境性とも十分な性能を持ち、多くの用途に用いることができる。

小型タイプは、搭載性やデータ転送の便宜性、さらには計測中のモニター機能が必要とされる用途向けである。標準型に対してデータ収録チャンネルと収録容量を抑制し、かつデータ取り込み制御回路に素子分散型を用いて省電力化を図っている。

超小型タイプは、小型タイプ以上に搭載性を徹底して優先したものである。データ収録チャンネルを最小の1chとし、A/Dの分解能、収録容量とも抑えることにより、標準型と比べて質量を1/5、体格を1/10にしている。

電源用電池としては、容量、大きさの異なる充電式リチウム電池を用途に合わせて選択するとともに、150°Cまで使用可能な高温型一次電池の利用も可能と

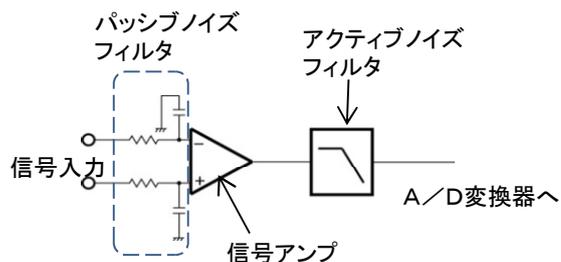


図7 ノイズフィルタの構成

表1 データロガーシステムのバリエーション

	標準型	小型	超小型
	多用途	多入力	1ch入力
入力信号	電圧、歪、温度	電圧、歪	電圧、温度(熱電対)
入力チャンネル数	2ch~6ch	2ch(16ch拡張可)	1ch
分解能	12bit	12bit	10bit
サンプリング周波数	10Hz~100kHz	10Hz~100kHz	1Hz~1kHz
メモリ容量	64MB	32MB	4MB
収録時間	160sec~400h	80sec~200h	6min~30h
最高使用温度	120°C	100°C	100°C
データ転送方式	有線	無線	無線
回路構成	1チップ型	素子分散型	1チップ型
本体寸法	20 X 25 X 5mm	20 X 2.5 X 5mm	19 X 5.5 X 2.5mm
本体質量	5g	3.5g	1g
消費電力	140mA	120mA	20mA
外観			

表2 データロガーの適用事例

適用対象	適用事例	計測センサ	使用データロガー	最高回転数 [rpm]
エンジン	エンジンピストン温度計測	CA熱電対	多用途温度タイプ	6000(往復動)
	ピストンランド圧力計測	半導体圧力センサ	多用途歪タイプ	6000(往復動)
無段変速機	ベルト作用力計測	抵抗線歪ゲージ	多用途歪タイプ	2000(楕円運動)
	プーリ振動計測	圧電型加速度センサ	多用途電圧タイプ	2,000
有段自動変速機	ギヤトルク計測	抵抗線歪ゲージ	1ch電圧タイプ	6,000
	プラネタリ部荷重計測	抵抗線歪ゲージ	1ch電圧タイプ	6,000
	プラネタリ部温度計測	CA熱電対	1ch温度タイプ	6,000
モータ	ロータ磁石温度計測	CC熱電対	多用途電圧タイプ	6,000
	ロータ巻線温度計測	CA熱電対	多用途電圧タイプ	6,000
	ロータ応力計測	抵抗線歪ゲージ	多用途電圧タイプ	20,000

している。また、充電もコネクタ接続とともに電磁誘導による非接触給電ができるタイプも組み合わせることができる。

4. 超小型データロガーによる計測事例

表2に適用事例を示す。エンジン、モータ、変速機と使用環境が異なる対象に合わせて実装面でも工夫を施し、計測を可能としている。例えば交番電磁場下での利用となるモータでは、ロガー本体は磁場の影響を受けないものの、センサとロガー間でノイズを拾うためアンプ前段にノイズ除去フィルタを加えることでS/N比を確保している。

以下、具体的な事例として無段変速機（以下 CVT）と有段自動変速機（以下 AT）における計測について紹介する。

(1) CVTにおける計測

ベルト式 CVT は図8に示す金属ベルトと可動式の二つのプーリからなる。油圧力により可動するプーリに挟まれたベルトが二つのプーリ間を楕円状に回転し、プーリに掛る半径を変化させることにより、動力伝達と変速を行う。ベルト自体は図9に示すように多数のエレメントをリングで束ねた構造になっている。

CVTの性能は図9に示すベルト内のエレメントとリングの相互作用、ベルトとプーリとの相互作用により決まるため、ベルト要素間の作用力や変形、またプーリとの作用力を詳細に把握することが必要となる。このため、①エレメントの作用力を歪ゲージにより、②ベルトからプーリに作用する力を加速度センサにより計測している。図10、11に歪ゲージを貼付けたエレメントとロガー、電池ユニットとの配線と搭載方法を示す。ベルトへの実装は、図10に示すようなエレメント2枚分の厚みを持つ専用エレメントにロガーと電池ユニットを搭載している。ロガーと電池ユニットの位置は、計測エレメントに影響を与えないように一定の間隔を持たせて配置している。また、各エレメントをつなぐリード線はベルトの動きに応じてエレメント間隔が長短変化するのでそれに応じた最適な長さを求め、配線している。実験計測は、変速機本体では密閉空間となり計測エレメントの交換が不可能となるため、箱形に改造した専用の試験装置を用いている。位置情報としての光源を駆動プーリ側に配置している。図12にロガーとアナログテレメータによるエレメント曲げ歪計測の比較を示す。計測回転数は800rpmである。テレメータでは常時通信を確保しなければならないが、使用した試験装置内ではアンテナのセッティングが十分にできず通信不良の区間がある。このため部分的にノイズが大きく計測できていないところがあるが、超小型データロガーでは良好に計測ができている。図13に、本ベルトの動力伝達様式を示す特徴的な計測結果を示す。ここでの金属ベルト伝動様式は張力を利用した一般的なものとは異なる。駆動側プーリでベルトが



図8 ベルト式CVTの原理

図9 金属ベルトの構造

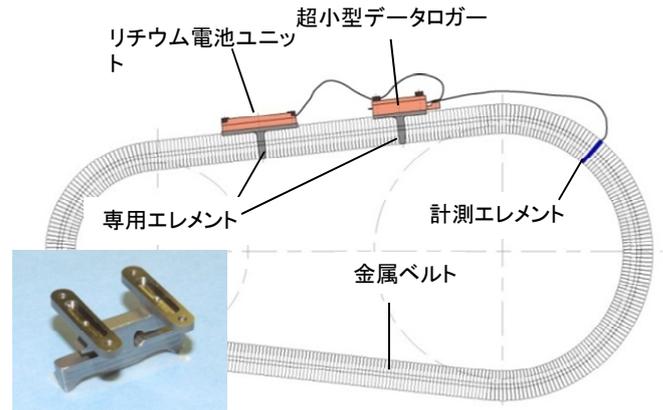


図10 ロガーの金属ベルトへの装着

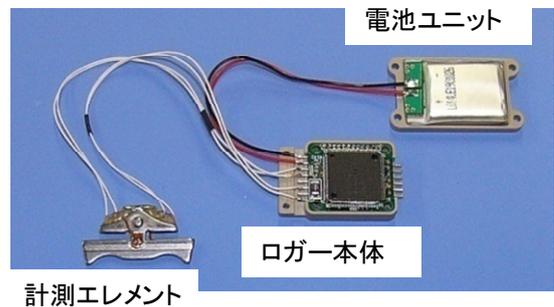


図11 ロガーと歪計測エレメントの配線

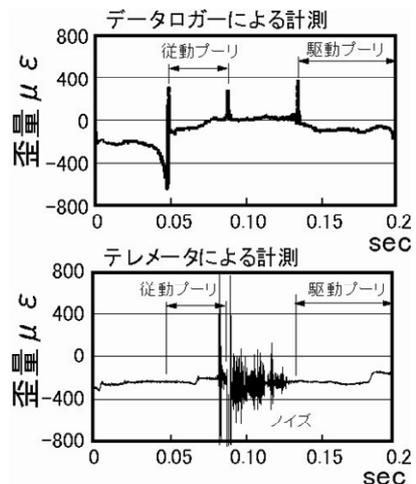


図12 ロガーとテレメータの比較
(エレメント曲げ歪計測)

プーリから挟まれた状態で回転方向に押され、ベルト内部でエレメント間の圧縮力が発生することで、従動側プーリに動力が伝えられるプッシュ式である。図から、駆動プーリの出口側でプーリからベルトが押されることでエレメント間の圧縮力が高まり、弦部を圧縮力を保ったまま通過し、従動プーリ内で圧縮力が出口に向かって解放されることで動力が伝達されていることが分かる。図はベルト2周分のデータを連続して示しているが、再現性が良好で、ノイズの無い精度の高い計測データを得ることができる。

図14にプーリ部振動現象を捉えるために、プーリ側面に複数の加速度センサとロガーを実装した状況を示す。振動現象はプーリを支える軸受、ケースの影響も受けるため、変速機本体と箱形専用試験機の両方で計測を行い比較評価を行っている。センサ、ロガー、電池ユニットの実装では、ケースと干渉しないようにプーリに溝加工を施し装着を可能としている。加速度センサ情報は、ベルトとの相対位置関係、すなわちベルト走行軌道上で入口、出口のどこに位置するかで整理するため、光トリガ光源を、加速度センサがプーリ入口にきたときにデータロガーの光センサが受光するように、プーリに近接させて試験機内部に配置している。

図15にプーリ部の振動レベルを示す。駆動/従動ともにプーリの出入口で振動レベルが大きいことがはじめて計測され、振動発生メカニズムの解明へと繋がっている。このように、ロガーにより従来方法では困難であった計測を実現し、ベルト内およびプーリとの相互作用のメカニズムの考察に基づいた各部形状の改良により、ベルト性能の向上を果たしている。

(2)AT内のトルク計測

第2の適用事例として、ATギヤトレイン内のトルク計測について述べる。ATの内部は図16に示すように、遊星歯車を組み合わせたギヤトレインと変速段を選択するための締結要素であるクラッチ、ブレーキからなる。近年は市街地走行、高速走行双方の燃費向上の観点から多段化が進み要素数の増加が不可避となっているが、一方で動力損失の一因ともなっている。このため、損失要因の解析が必要となるが、ギヤトレインやクラッチの集積度が高いため、内部に計測デバイスを組み込むことは非常に困難である。そこで、狭小部位への搭載が可能な超小型タイプを用い、ギヤトレイン間のトルクを計測することに挑んだ。計測部位は、図16に示した遊星歯車間にある中間ギヤ部のトルクで、中間ギヤに貼付した歪ゲージにより検出する。図17に計測部位と歪ゲージの貼り付け状態を示す。

トルクに対する十分な歪感度を得るため、中間ギヤは

入力回転数1500rpm, 変速比=1, 入力トルク150Nm

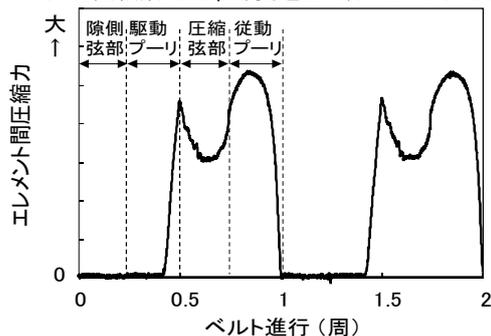


図13 高回転でのCVTベルト歪計測例 (エレメント間圧縮力計測)

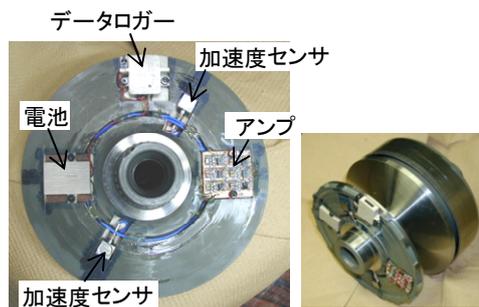


図14 CVTプーリへのロガー搭載

入力回転数1000rpm, 変速比=1, 入力トルク50Nm

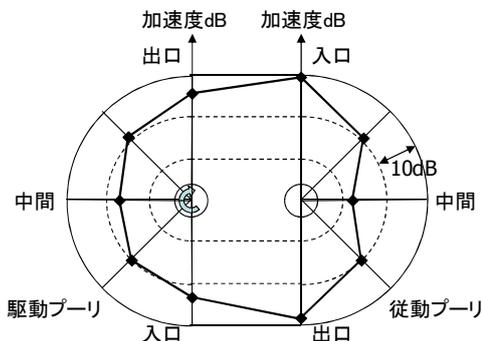


図15 CVTプーリでの加速度計測例

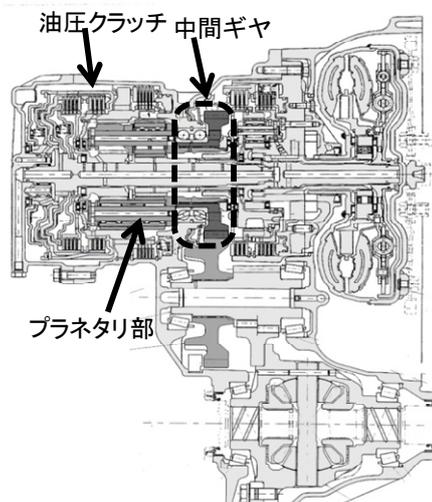


図16 実機AT構造図

内部を円周状に削り込んでいる。計測システムの構成を図18に示す。ロガーがギヤトレイン内部に組み込まれることで二次電池の充電が困難となるため、回転側と固定側に設けたコイルによる電磁誘導式の非接触の給電デバイスを付加している。なお、給電は常時可能ともなるがノイズ発生の弊害があり、S/N比確保のために二次電池充電に用途を限定している。ロガーと給電システムの実装空間として、歪感度を得るために削り込んだ円周状部分を活用している。

図19に歪計測の実波形を示す。歪が大きな振幅を伴う周期性を持つのは、ギヤかみ合い位置による歪量の変化が現れていることを意味している。歪量の時間平均化値とトルクと関係を同図に示すが、比例関係が成立していることが分かる。これによりこの計測システムがトルク計として成立することを確認した。図20に内部損失計測の一例として、プラネタリギヤ部損失の回転数依存性を示す。このように、損失要因解析に有用なデータを取得することができ、高効率ATの設計につながっている。

6. あとがき

開発したロガーは他の方式に比べ、小型軽量であること、取扱いが簡便で取付自由度が高いこと、そしてノイズの影響を受けにくいことなど多くの特長をもつ。計測対象によって、テレメータやスリップリングが有効な場合もあるが、表2に示した多くの適用事例は開発したロガーを用いて初めて計測が可能となり、これまで解き明かせなかった現象を明らかにすることができた。現在、本ロガーは本報告で述べた事例以外にも様々な計測対象に適用実績を残しつつあり、今後より広く普及が進むことにより、技術革新を支える礎となるものと確信する。

参考文献

1)MANNER社テレメータシステム
<http://www.matsui-corp.co.jp/pdf/mannercompany-new.pdf>

2)ミシガン社スリップリング
<http://www.michsci.com/Products/sliprings/slip.htm>

3)Bridget J.M .Stutchbury, Scott A.Tarof, Tyler Done, Elizabeth Gow, Patrick M.Kramer, John Tautin. James W.Fox, Vsevolod Afanasyev
 Tracking Long-Distance Songbird Migration by Using Geolocators
 VOL 323 SCIENCE 13 FEBRUARY 2009

4)日置電機 温度ロガー <http://hioki.jp/3650/index.html>

5) 日置電機データロガー
http://www.graphtec.co.jp/site_instrument/dl/index.html

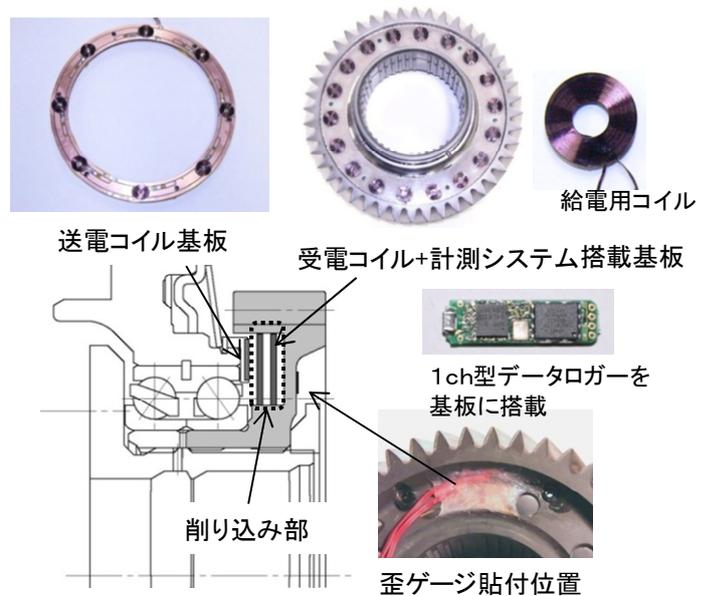


図17 中間ギヤトルク計測方法

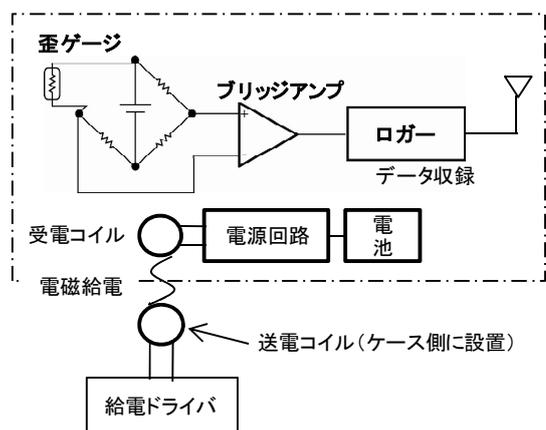


図18 ギヤトルク計測システム

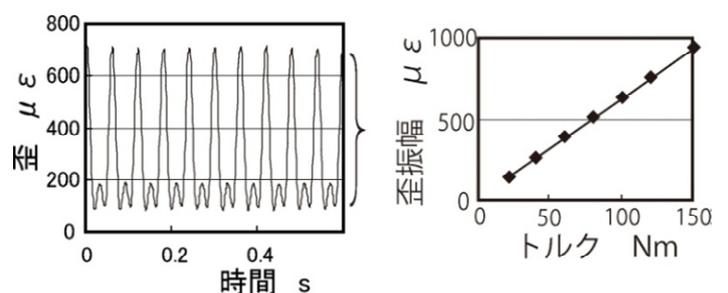


図19 歪時間軸波形とトルク-歪量特性

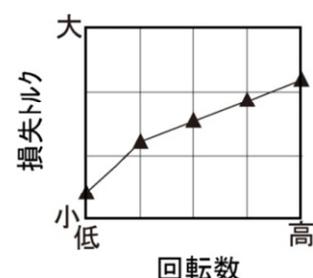


図20 損失トルク計測結果