

「コーターリップやダイヘッド／ローラー間などの今まで測れなかった手の届かない所の隙間を正確に測定」

高精度非接触隙間測定技術の紹介

ゾンデックス株式会社 代表取締役 松尾和彦

1. はじめに

弊社は2010年7月に輸入電子計測機器の卸販売及びそれに付帯する弊社独自の測定システムの設計・製造ならびに修理・校正・技術サポートを行う会社として創業。創業当時の主力製品である米国CAPACITEC（キャパシテック）社の高精度非接触隙間測定機器を取扱い現在はコンバーテック関連のみならず航空宇宙産業業界、自動車産業業界、電力発電機器業界、印刷業界、研究開発分野と幅広い業界に導入できるようになった。非接触隙間測定が求められる部位は高温、複雑な経路、手が届かないところ等従来のシックネスゲージやレーザー測定が出来ないところや測定者の感覚によるシックネスゲージ測定のバラツキを無くしたいという要望が多く、それにマッチした測定システムがキャパシテック社および弊社が開発した高精度非接触隙間測定システムである。

2. キャパシテック社について

キャパシテック社は1986年米国マサチューセッツ州エアー市で創業(図1)。創業者 Robert Foster 氏は大学院在学時代からボーイング社と航空機組立管理(隙間管理)装置の共同研究開発を手掛け「Gapman」(ギャップマン)第1世代を開発、その後航空機の組立管理・隙間管理現場用として「Gapman」第二世代の開発(図2)と航空機エンジンタービンブレード先端とケーシングの隙間管理システム「LGDAS」をGE社と共同開発した。金属隙間の高精度管理やタービンブレード隙間管理の技術が他の市場に認められ航空宇宙産業、自動車産業への展開を皮切りにコンバーティング業界や他の業界に拡大。現在では非接触隙間測定ハンディ機「Gapman」第三世代(日本ではGapmaster 3という型式)、航空機エンジンブレード隙間測定システム「LDWAS」(図3)、自動車ブレーキディスク摩耗測定システム「BWS」(図4)、スロットダイリップ隙間プロフィール測定システム「SDC」(図5)をリリース。



図1 キャパシテック社30周年



図2 Gapman (写真左から)
第一世代、第二世代、第三世代



図3 LGWAS システム
航空機エンジンブレード隙間測定



図4 BWS 自動車ブレーキディスク摩耗測定システム

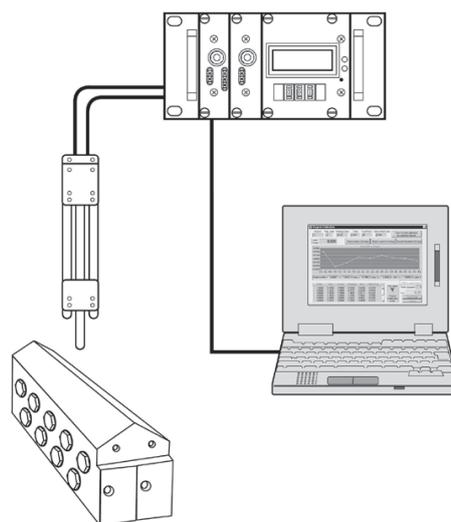
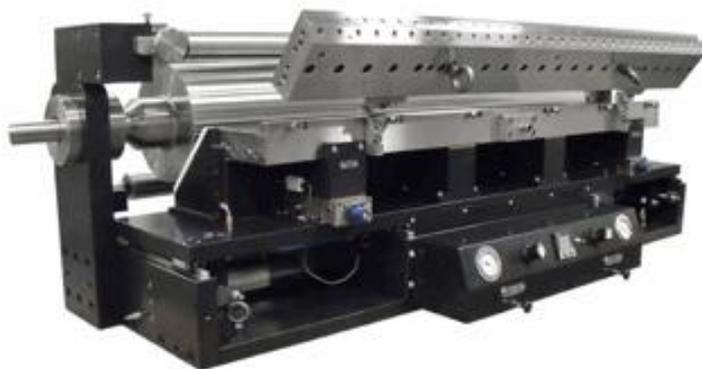


図5 SDC スロットダイリップ隙間プロフィール測定システム

3. コーターダイリップの高精度隙間プロファイル測定

フィルムやテープ製造におけるスロットダイのリップやダイヘッドとローラー間の隙間管理は、製品の品質に大きく影響するために重要な計測管理項目である。一般的にこの隙間管理は真値 $\pm 0.3\mu\text{m}$ 以下の精度で行われる事が望ましいが、実際には従来のシックネスゲージを用いて、測定者の手の感覚に依存した測定で管理がなされており、精度管理が課題である。

CAPACITEC「SDC」システムはスロットダイリップのプロファイル測定（ダイの長手方向リップの連続した隙間測定のパラメータ）を最大測定レンジの0.05%精度で行う。例えば0.15mmの隙間を最大レンジ0.5mmのセンサー（ワンドという名称）で測定すると、 $0.15\text{mm} \pm 0.25\mu\text{m}$ の精度でプロファイリングできる。

3-1 世界初の薄型ワンド（センサー）について

図6に薄型ワンドの写真と耐熱温度、図7にラインナップを紹介する。



図6 薄型ワンド 耐熱200°C、250°C及び300°C

最も薄いワンドは厚み0.12mm ($120\mu\text{m}$)である。ワンドの先端両面には距離を測定するセンサーの一部があり銅箔で製造される。ワンド自身の厚みと銅箔の厚みさらにラミネートの厚みが加わり現在の技術でできる最薄ワンドが0.12mmとなり、0.13mmから測定可能となる。

耐熱温度はワンドのサブストレートの材質やコート材料によって異なり、汎用で160°C、ポリイミドコートで200°C、カプトンコートで250°C、コート無しのセラミックワンドで300°Cとなる。

Size Key: Inch (mm) Ideal minimum gap = wand thickness + 0.0004" (0.01mm)

形状	代表的 厚み	実用 長さ	幅	代表的 フルスケール	お問合せ 図番
GPD-2 SERIES					
GPD-2(.0074)-A-150	0.007 -0.19	5.905 -150	0.551 (14.00)	0.04 -1	5509-7283
GPD-2(.013)-A-150	0.013 -0.33	5.905 (150)	0.551 (14.00)	0.04 (1.00)	5509-5982
GPD-2F(.016)-A-150	0.016 (0.41)	5.905 -150	0.551 (14.00)	0.04 (1.00)	5509-5840
GPD-2(.018)-A-150	0.018 (0.47)	5.905 -150	0.551 (14.00)	0.04 (1.00)	5509-6536
GPD-2(.020)-A-150	0.02 (0.51)	5.905 -150	0.551 (14.00)	0.04 (1.00)	5509-5952
GPD-2(.024)-A-150	0.024 (0.61)	5.905 -150	0.551 -14	0.04 (1.00)	5509-6452
GPD-2(.028)-A-150	0.028 -0.71	5.905 -150	0.551 -14	0.04 (1.00)	5509-6453
GPD-2(.031)-A-150	0.031 -0.79	5.905 -150	0.551 -14	0.04 (1.00)	5509-6480
GPD-2(.038)-A-150	0.038 -0.97	5.905 -150	0.551 (14.00)	0.04 (1.00)	5509-6523
GPD-2G-A-150	0.010 -0.25	5.905 -150	0.551 (14.00)	0.04 (1.00)	5509-5961
GPD-4 SERIES					
GPD-4F-A-350	0.016 -0.41	13.78 -350	0.551 -14	0.080 -2	5509-6990
GPD-4.5(.0075)-A-250	0.008 -0.19	9.843 -250	0.551 (14.00)	0.09 (2.25)	5509-7224
GPD-5 SERIES					
GPD-5G-A-150	0.009 -0.23	5.905 -150	0.551 (14.00)	0.100 -2.5	5509-5852
GPD-5F-A-200	0.016 -0.41	7.874 -200	0.551 -14	0.100 (2.50)	5509-5804
GPD-5G-A-200	0.009 (0.23)	7.874 -200	0.551 (14.00)	0.100 (2.50)	5509-6433
GPD-5F-A-500	0.016 -0.41	19.685 -500	0.551 (14.00)	0.100 (2.50)	5509-5906
GPD-5F-E-150	0.016 (0.41)	5.905 -150	0.551 (14.00)	0.100 (2.50)	5509-7022
GPD-5F-A-800	0.16 -0.4	31.496 -800	0.472 -12	0.1 -2.5	5509-8542
GPD-7 SERIES					
GPD-7F-A-200	0.016 -0.41	7.874 (200)	0.551 (14.00)	0.14 -3.5	5509-6977
GPD-7F-A-250	0.16 -0.4	9.843 -250	0.551 -14	0.14 -3.5	5509-8506

GPD-7F-A-500	0.16 -0.4	19.685 -500	0.551 -14	0.14 -3.5	5509-8505
GPD-10 SERIES					
GPD-10F-A-350	0.017 (0.43)	13.78 (350)	0.866 -22	0.200 -5	5509-6610
GPD-10F-A-150	0.16 -0.4	5.905 -150	1.062 -26.97	0.2 -5	5509-8677
GPD 20X30 SERIES					
GPD-20X30SP-A-800	0.039	31.5 -800	1.378 -35	0.472 -12	5509-5991
GPD-CUSTOM					
GPD-0.75x6G-A-150	0.009 (0.23)	5.905 (150)	0.551 (14.00)	0.047 -1.2	5509-6321
GPD-(3X1)I-A-225	0.006 -0.16	8.858 (225)	0.551 -14	0.038 -0.98	5509-7106
GPD-3-E+ (250°C)					
GPD-3(.038)-Eplus-150	0.038 -0.965	5.905 -150	0.551 -14	0.06 -1.5	5509-9208
GPD-3(.057)-Eplus-150	0.057 -1.45	5.905 -150	0.551 -14	0.06 -1.5	5509-9201
GPD-3(.085)-Eplus-150	0.085 -2.16	5.905 -150	0.551 -14	0.06 -1.5	5509-8670
GPD-3(.106)-Eplus-150	0.106 -2.69	5.905 -150	0.551 -14	0.06 -1.5	5509-8671
GPD-3(.126)-Eplus-150	0.126 -3.2	5.905 -150	0.551 -14	0.06 -1.5	5509-8672
GPD-3(.146)-Eplus-150	0.146 -3.71	5.905 -150	0.551 -14	0.06 -1.5	5509-8673

図7 薄型ワンドのラインナップ

リップやリップ奥の隠れギャップ（インクや溶剤溜りのギャップ）の測定も可能である。ワンド自体がフレキシブル（図8、図9）で奥まで挿入できる。どれくらい挿入したかはワンド側面にスケールが mm と inch で印刷されており目視で確認できる。



図8 フレキシブルなワンド

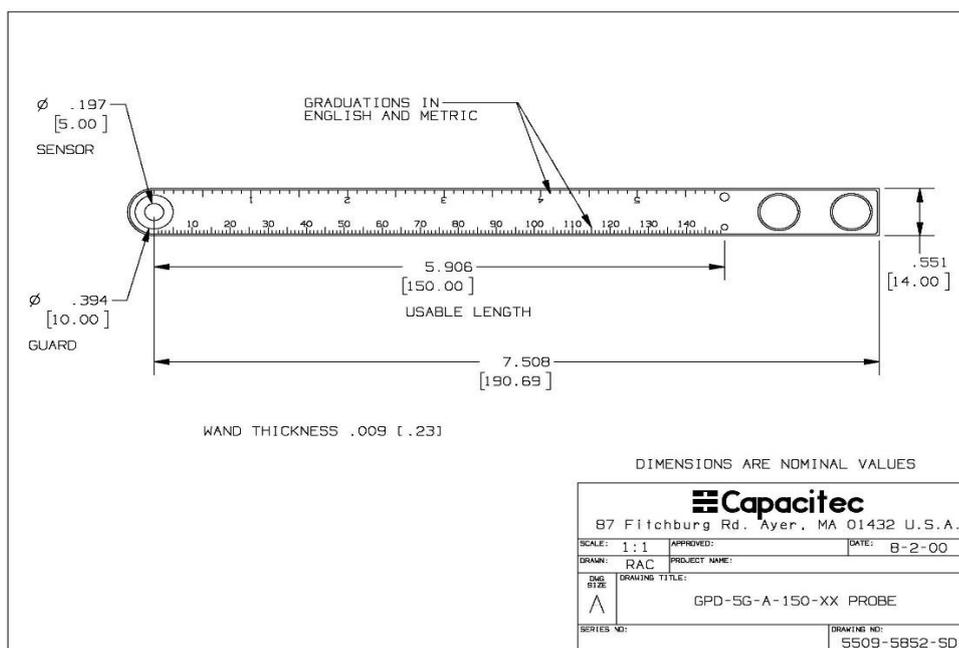


図9 汎用ワンド(GPD-5G-A-150型)の外観図

高温仕様のセンサーはワンド型ではなく、ボタン型やシリンダー型の形状になり、測定対象に対してセンサーが設置（埋込可能）できれば、最高 1000°C耐熱センサーがある。図10にシリンダー型センサーの一例を示す。

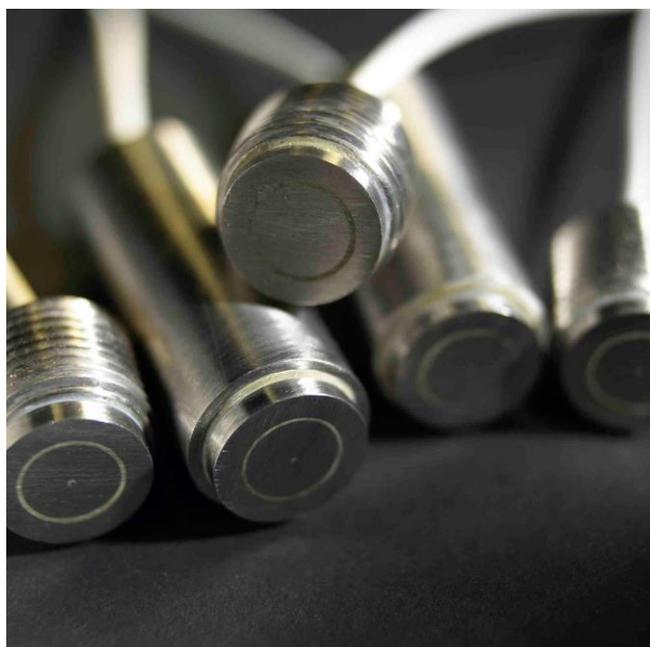


図10 シリンダー型センサー

計測システム構成は、測定用のセンサー（ワンド）、測定用アンプ及びワンドからアンプまでの専用ケーブルと至ってシンプルである。アンプラック背面から測定される隙間に比例した直流電圧が出力されるので、電圧計やPLC（プログラマブル・ロジック・コントローラ）で読み取れる。アンプは2入力タイプ（デュアルチャンネル）になっておりワンドは表裏それぞれにセンサーが付いて、1ワンド2センサー式であり2入力タイプのアンプが必要である。（ワンド先端に丸いセンシング部があり、ここで測定を行う）

図11にアンプ写真を示す。



図11 計測アンプラック表面

計測アンプラック裏面

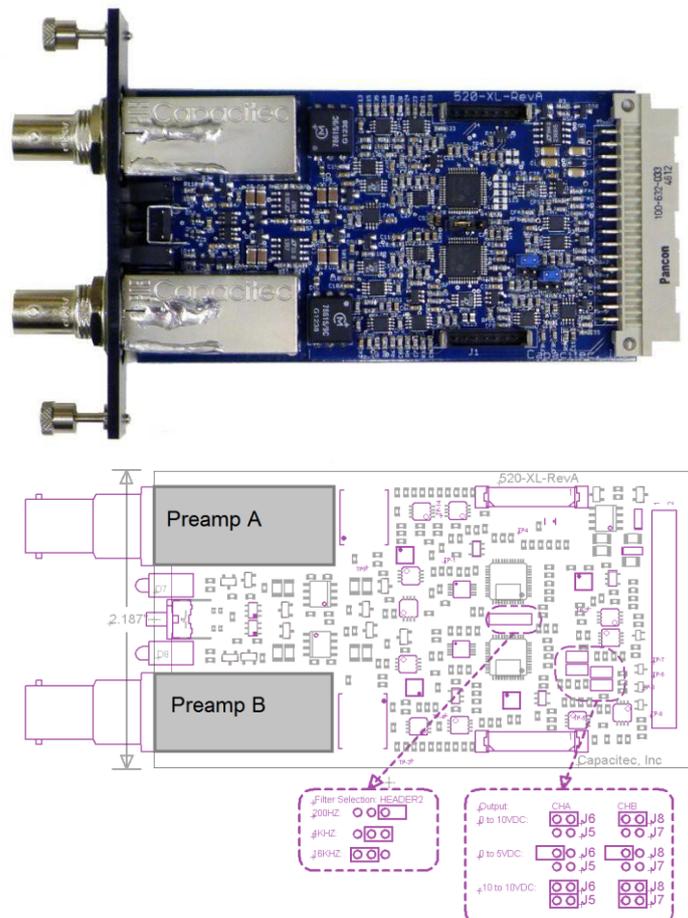


図12 計測アンプのモジュールと出力・LPF設定

計測アンプは計測される信号に重畳するノイズを除去できるように LPF (低域通過フィルター) を搭載している。図 1 2 にアンプモジュールと設定を示す。

LPF は 200Hz、4kHz、16kHz から選択できる。自動車ブレーキディスク摩耗試験等高速度で回転または移動する測定対象を測定する際には 16kHz の LPF を選択する。通常は 4kHz の設定で使用する。また出力信号 (ラック背面の BNC 端子から出力) は、0 - 5 Vdc、0 - 10 Vdc、±10 Vdc の選択ができる。

3-3 計測専用ソフトウェア (Bargrafx)

専用の計測ソフトウェア (商品名 : Bargrafx) を用いた測定ではリップ隙間プロファイルをリアルタイムに表示する。

図 1 3 にリップ隙間の定点測定の概要、図 1 4 にリップ隙間プロファイルの連続測定のグラフ (結果) を示す。

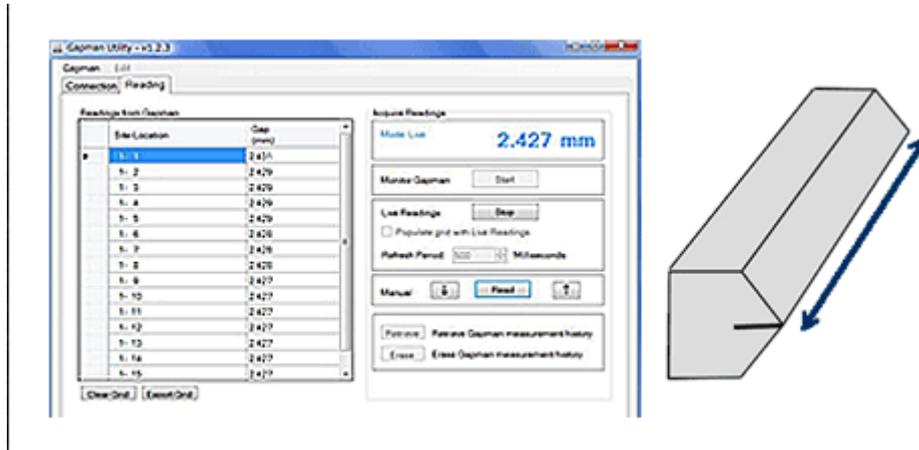


図 1 3 リップ隙間の定点測定 (例)

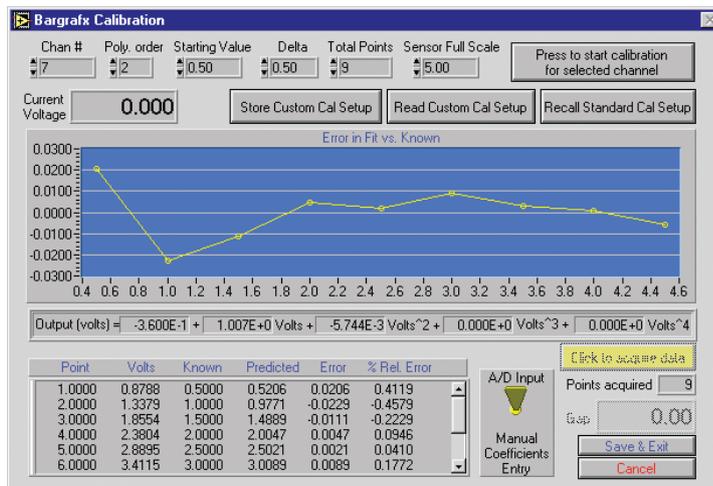


図 1 4 リップ隙間プロファイルの連続測定のグラフ (結果)

図14の結果は一例で示しており実際の真値ではない。実際は使用するワンドで決まる最大測定レンジの0.05%精度となる。Gapman (Gapmaster 3) ハンディー機では最大レンジの0.5%となる。繰返し測定精度(同一測定位置で位置制御の誤差をゼロとした場合)は、 $\pm 0.005\%$ となり、最大レンジ0.5mmのワンドでは繰返し測定精度は $\pm 25\text{nm}$ という驚異の高精度が実現できる。

しかし実際は、繰返し測定でのセンサー位置決め精度がナノ単位で困難なため、本システムの繰返し測定精度(繰返し誤差)は、ワンドやセンサーの保持治具の制御精度で決まる。

3-4 隠れギャップや垂直(切込み)ギャップの測定

ワンドのフレキシブル性を生かし、従来の測定技術では成し得なかった部位の測定が可能である。図15にその一例を示す。

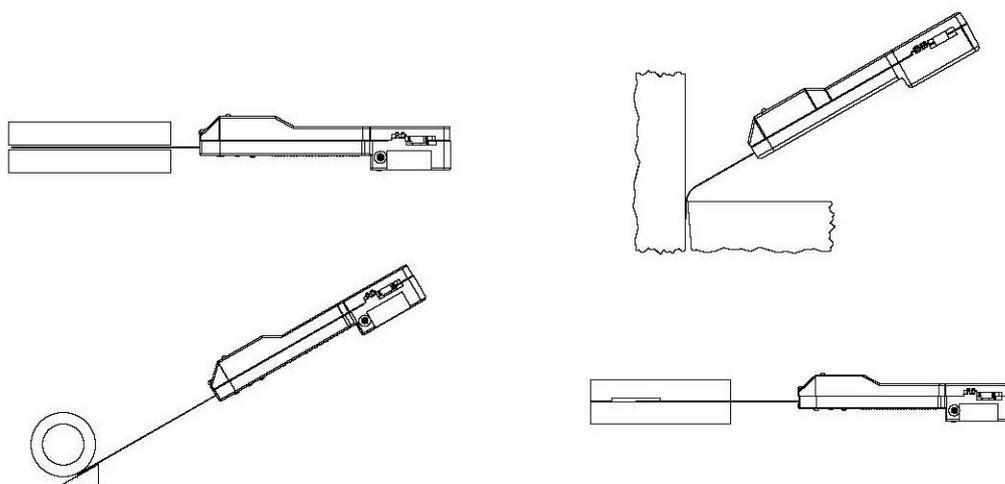


図15 隠れギャップや垂直(切込み)ギャップの測定

図15では奥行きギャップのプロファイル測定、垂直(切込み)ギャップ測定、ロール対平面、ロール対エッジ、ロール対ロール、エッジ対エッジ等の測定および隠れギャップの測定の例を図示す。

このようにフレキシブルなワンドにより今まで測定出来なかった部位の測定が可能になる。ロール隙間やテーパー隙間等平面以外の隙間に対してはあらかじめ対象となる隙間のモックアップ(試作)を用意してワンドと計測アンプのペアで校正を行い、アンプ内にその係数をメモリする。平面隙間に対する校正は容易に行うことができ、スペーサーと標準ゲージで標準隙間を形成し、その値をワンドとアンプのペアで校正を行い、アンプ内にメモリする。

3-5 技術仕様

技術仕様を図16に示す。スロットダイのリップ隙間やダイ先端とロール隙間等の測定にはシリンダー型センサーではなく、ワンド型センサーを使用する。

モデル名	520XLデジタルアンプ	220SLアナログアンプ	Gapmaster 3 ハンディー
最大レンジ	センサー外径とほぼ同じ	センサー外径とほぼ同じ	センサー外径の 2 / 3
リニアレンジ	センサー直径の 2 / 3	センサー直径の 2 / 3	センサー直径の 1 / 2
最小レンジ	フルスケールの0.1%	フルスケールの0.1%	フルスケールの0.1%
直線性	0.05% (FS,※1)	0.2% (FS,※1)	0.5% (FS,※1)
帯域幅	200Hz, 4kHz, 16kHz	200Hz, 4kHz, (12kHz,※2)	20Hz
分解能	38nm, ※3	20nm, ※3	1 μm
繰返し精度	1.28 nm, ※4	0.1 nm, ※4	0.05% (FS)
温度ドリフト	80ppm / °C	80ppm / °C	100ppm / °C
アナログ出力	0-10V, 0-5V, ±10V, ※5	0-10V, 0-5V, ±10V, ※5	オプション
耐熱温度	ワンド型：最大300°C シリンダ型：最大1000°C	ワンド型：最大300°C シリンダ型：最大1000°C	ワンド型：最大300°C シリンダ型：最大1000°C

※1 FS=フルスケール、但しリニアレンジの範囲内

※2 オプション

※3 プローブHPC-150E-A-L2-1-B使用、2.5mmレンジ、200HzLPF

※4 プローブHPC-150E-A-L2-1-B使用、250 μmレンジ、200 HzLPF時

※5 選択

図 1 6 技術仕様 520XL デジタルアンプ、220SL アナログアンプ、Gapmaster3 ハンディー

3-6 静電容量式隙間測定の測定原理

静電容量式隙間測定の測定原理は、図 1 7 に示す通り、平行した金属隙間に静電容量式センサーを両面に配置したワンドを挿入すると隙間 L は、ワンド厚み A と距離 $d+d'$ の和である。

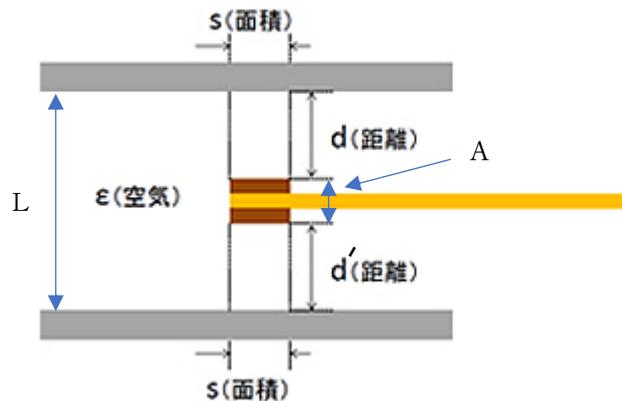


図 1 7 静電容量式隙間測定の測定原理

2枚の金属に電圧をかけると、導体は+と-に帯電する。その帯電する現象を静電容量と言い、一般に C (Capacitance) と表される。ここで以下の関係式が成り立つ。

$$C = \epsilon \times S / d$$

ここで静電容量：C、センサー－金属間の媒体（空気）の誘電率： ϵ 、金属の表面積：S、金属間距離：dとする。

上式には磁界の透磁率 μ が無いいため磁界の影響を受けないことがわかる。

通常、 ϵ 、Sは一定。測定距離dが大きくなるとCが小さくなる反比例関係を用いて距離を測定する。静電容量の検出はセンサーと測定対象物間で発生した静電容量Cに応じた電圧をアンプで増幅し、測定レンジに合わせた0－10Vdcの電圧を出力する。他の原理を用いたセンサーと比べてCapacitex社の静電容量センサーの優位性は、磁場の影響を受けず、耐熱性に優れている点である。また不利な点は導体でなければ測定できない点であるが、これについてはステンレスシムバネ式で接触型としたセンサー（図18）を利用して可能である。

Gapmaster3ハンディー型はA+d+d'をディスプレイにリアルタイム表示するので現場では電卓や換算表の必要がなく簡易に正確に隙間が測定できる。

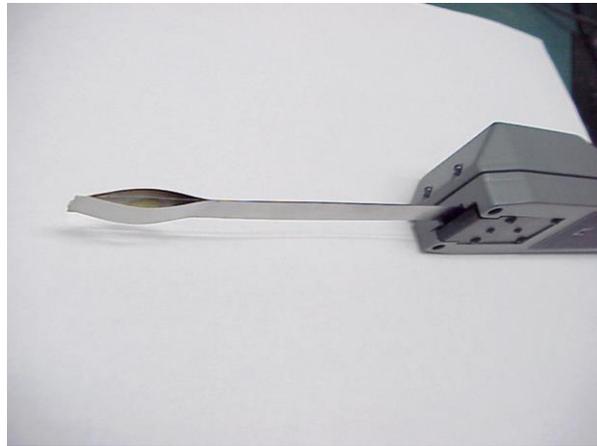


図18 ステンレスシムバネ式で接触型としたセンサー

3-7 ロール対ロールやエッジギャップでの最小値の測定

ロール対ロールの隙間最小値やエッジ対エッジ又はロールでの隙間最小値の測定は、従来のシクネスゲージで正確に求めるにはかなりの熟練を要し、測定の毎に異なる値が出て測定誤差が大きくなる。数回～10回程度測定しバラツキや平均値から真値を計算する方法を取るが、時間がかかり現場では困難を極める。

非接触静電容量式隙間測定器での測定では、ワンド型センサーを用いてロール対ロールの隙間最小値やエッジ対エッジ又はロールでの隙間最小値を測定する。520XLや220SLのアンプ出力がある場合は、電圧計やBargrafx専用ソフトウェアで最小値を検出させればよいが、Gapmaster3ハンディーではディスプレイの表示を見ながら最小値を探すのは少々困難である。

図19にロール対ロール隙間を測定する例を示す。



図 1 9 にロール対ロール隙間を測定

Gapmaster3 ハンディー機で、ロール対ロールの隙間最小値やエッジ対エッジ又はロールでの隙間最小値の測定は、本体内部にプログラムを持たせており、それを呼出して操作する。

図 2 0 にロール対ロール等隙間の自動測定画面を示す。

Gapmaster3 本体には最小値自動測定のプログラムがあり、ロール対ロール等隙間にワンド型センサーを数回（図 2 0 では 3 回）挿入して最小値を表示させる。

1 回の挿入で最小値を測定するが、挿入角度により真値とは異なる値を出す可能性がある。従って数回測定してその最小値を求めるものである。

図 2 0 では 1 回目 0.0500inch、2 回目 0.1794inch、3 回目 0.0498inch となり、最小値は 0.0498inch である。

このようにとても簡単にロール対ロール等の最小値を求めることができる。エッジ対エッジ又はロールでの隙間最小値の求め方も同様である。



図 2 0 ロール対ロール等隙間の自動測定

3-8 ホール（穴）プロファイリング

静電容量式センサーを利用した応用プローブとして図 2 1 に示す。円柱状（青い部分）の内部に極小静電容量センサーを最大 48 センサー埋込み、測定対象の穴径を 4 直径 6 段瞬時に測定してプロファイリング（マッピング）することができる。これは主に航空機関係部品のリベット穴径のプロファイラーとして利用される。

極小センサーペアで1つの直径が測定できる。円筒の円周に8センサーを配列すると4直径が同時測定できる。また長さ方向（穴の深さ方向となる）にそれを6段配列できるので合計24直径が同時測定できる。

このホール径プロファイラーはカウンターシンクやテーパ状の穴でも対応できる。

測定された各直径データはソフトウェアで処理され、ホール径プロファイリングデータとして確認でき、穴の中心線が傾いていないか評価できる。

測定精度は穴径+150 μm の測定レンジで $\pm 10 \mu\text{m}$ である。

ボア径も測定ができ、ボア内径プロファイリングができる。



図2 1 ホール（穴）径プロファイラー

4. 航空機業界や自動車業界での使用例

4-1 航空機業界での使用例

航空機産業では民間機、軍用機ともに組立工程で様々な部位で高精度な隙間管理が要求される。特に機体と主翼部分の接合や主翼上面と下面の接合はリベットで締めるが、リベット締め前の隙間管理やリベット穴径のクリアランス管理等高精度な測定要求がある。Gapmaster3 ハンディー式測定器やシリンダー型センサーとデジタルアンプの組合せシステムで実現している。図2 2は測定現場（組立工程現場）の写真である。また図2 3に要求される測定部位を示す。



図2 2 測定現場（組立工程現場）



図2 3 要求される測定部位



図 2 4 カーボン複合材 (CFRP) 間の隙間測定

図 2 4 にカーボン複合材 (CFRP) 間の隙間測定例を示す。Gapmaster3 ハンディー型はリアルタイムに測定値を表示し、中央の赤いボタンを押して測定値を本体内部にメモリー (最大 1000 測定点) する。本体はバッテリーで動作するので現場ではケーブルレスで測定し、内部にメモリーして、現場から事務所へ戻ってから PC へ値をダウンロードし、簡単に隙間を管理することができる。オプションで Bluetooth 無線チップを搭載できるのでワイヤレスで PC へデータを送信することも可能である。

図 2 5 は航空機エンジンの点検清掃再組立て時のギャップ (ブレード先端とケーシング間) を測定システムである。

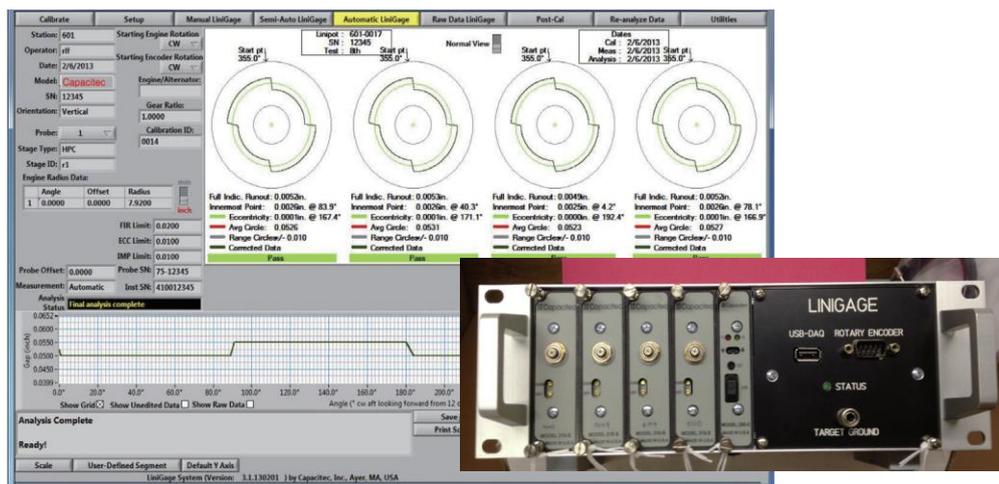


図 2 5 航空機エンジンリビルド偏心度試験

4-2 自動車産業界での使用例

自動車産業界でも様々な部位の隙間管理が行われている。一例にブレーキディスクの摩耗試験を示す(図26)。

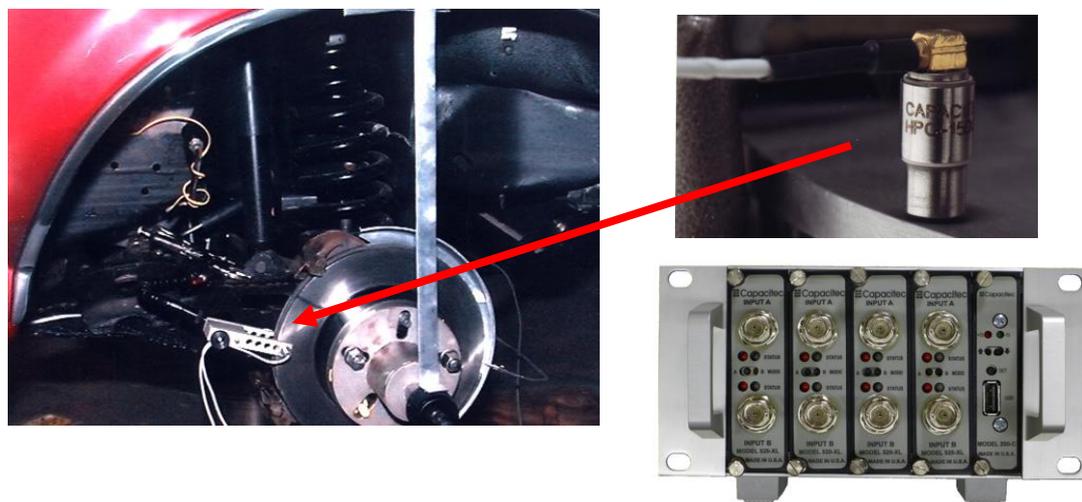


図26 ブレーキディスクの摩耗試験

ブレーキディスクやパッドは、高速走行時のフルブレーキで600°C以上にも達する。シャーシダイナモで車輪を回転させて高速走行(回転)を再現させてフルブレーキによる摩耗やコーニング(反り)を本システムで検査する。

また本システムや Gapmaster3 ハンディー型でトランクを閉めた時のギャップやフィルターギャップ等様々な隙間を測定・管理することができる。図27に車体に要求される隙間管理部位を示す。

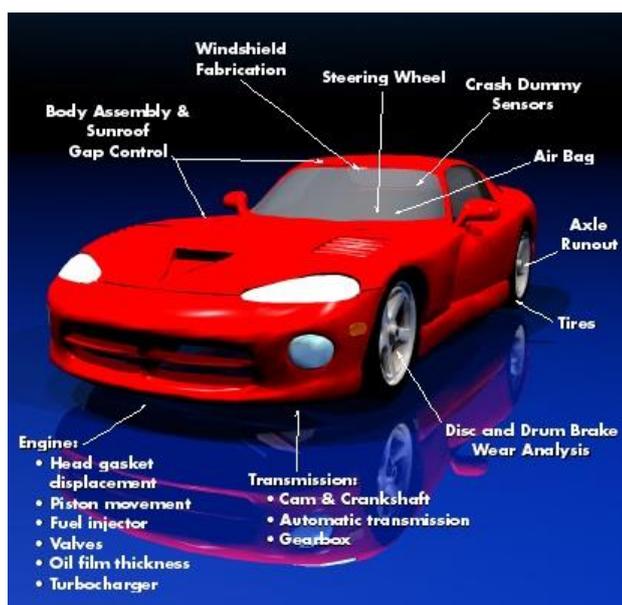


図27 自動車車体に要求される隙間管理部位

5. おわりに

非接触隙間測定は、静電容量式、うず電流式、レーザー変位式、空気圧変化式とあるが、測定できる範囲（レンジ）の広さ、センサー自身の薄さ、センサーの耐熱温度、測定精度、環境（強磁界、高圧力等）変化に対する安定性の点から評価すると静電容量式が最も良いという事になる。静電容量式の非接触隙間測定システムの設備導入価格は、レーザー変位式の次に高額なものであるが、測定システムの扱いやすさや測定精度の高さから導入しやすいシステムである。

また Capacitec 社ワンド（センサー）はフレキシブルで自在に曲げられるので、隠れギャップやテーパーギャップ、複雑な侵入経路奥のギャップ等、今まで測定できなかった部位の測定が容易に行える。隙間測定管理のニーズに合った高精度測定システムと言える。

問合せ：tech@sondecx.co.jp

著作：松尾和彦

