

論説



Paper

風量変化を用いたタービンハウジング製品閉塞検査技術の開発

布施直紀*¹, 豊田和洋*², 岡田圭司*²

Development of an Inspection Equipment for Detecting Convex Defect in the Turbine Housings

Naoki Fuse, Kazuhiro Toyoda, and Keiji Okada

Synopsis

Quality assurance method for the inside of turbine housings in cast steel has been developed with air flow change passing the holes.

Because of the variation in shape of the housing, visual inspection had just been done manually so as to check the existence of defects such as blockage or stick out in the housing.

Principle of the method is utilizing a correlation with air flow and the size of the defects. It is possible to inspect the small turbine housing with twin-scrolled holes by using the new developed flow sensors utilizing MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) technics.

1. 緒 言

タービンハウジングなどのような鋳造製品は、形状の複雑化、寸法の高精度化、薄肉化が進んでいるものの、これらの検査手段は従来方法とあまり変わらないものであり、ライトガイド、内視鏡などを駆使した目視検査が主流となっている。したがって製品への高い品質要求レベルに対応するためには検査員の技量向上、検査工数増加などに依存しているのが現状である。上記の理由としては、鋳造製品特有の表面粗度の粗い状態、さらには立体的形状であることなどの要因により検査の自動化が難しいという技術的な制約と、鋳造製品は一般的に多品種でかつモデルライフが比較的短いことから検査自動化による設備費用が原価上昇に大きく反映されるというコスト的制約があるためである。

しかし、筆者らは上記のような背景を打開すべく、タービンハウジングの目視検査工程を徹底調査し、最も重要か

つ検査難易度の高い項目である『スクロール内面凸状欠陥検査』にターゲットを絞ることにより、開発課題を明確化し自動化検討をすすめてきた。その結果、自動化手段として、風量検出という新たな方式によるスクロール内面検査装置を安価に開発し、従来方法では困難であった複雑形状を有するスクロール内面の凸状欠陥の検査を可能とした。

本装置では、スクロール内部の空気を外部から吸引し、スクロール内の通風量がスクロール内面欠陥の寸法と相関を有することを利用している。通風量の測定手段としては MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 技術を使用した最新の小型風量センサを使用することにより、開口径の小さなツインスクロール構造の製品も検査可能とした。

2. スクロール内面検査の現状

2. 1 タービンハウジングの構造

タービンハウジング (Fig.1) は自動車などに搭載されているターボチャージャーの構成部品であり、Fig.2¹⁾ に示す

2006 年 6 月 12 日受付

* 1 大同特殊鋼(株)技術開発研究所 (Research & Development Lab., Daido Steel Co., Ltd.)

* 2 大同キャスティングス(株)品質保証室 (Quality Assurance Sect., Daido Castings Co., Ltd.)

ように、インペラ（タービンホイール）と呼ばれる回転体のケースである。エンジンから引き込まれた排気ガスは、スクロールと呼ばれる渦巻き状空孔部で加速されインペラに吹き当たる構造となっている。

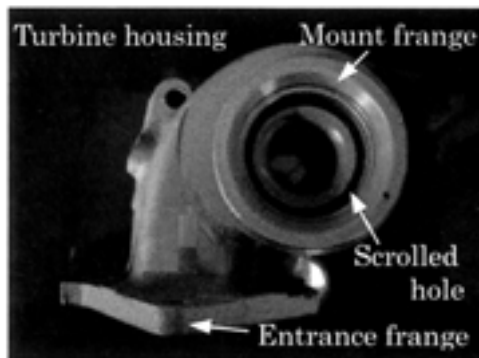


Fig.1. Example of turbine housing.

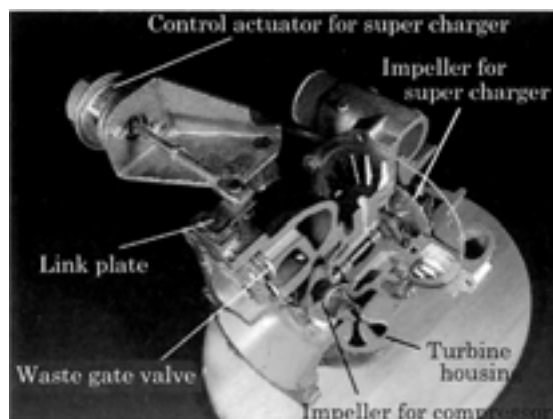


Fig.2. Turbo super charger¹⁾.

2. 2 欠陥によるエンジンへの影響

タービンハウジングのスクロール内部が閉塞した場合は、排気ガスが流れずエンジンの始動が不可能となり、また狭窄した場合は排気ガスの流れが悪くなることによりエンジン性能が低下するという致命的な影響がある。さらに、スクロール内部に異物などがあると、排気ガスの圧力によりその異物がインペラの羽根に当たり、衝撃でインペラを損傷させることもある。このようなことから、スクロール内部の欠陥は、稀にしか発生しないものの、発生した場合はエンジンの動作に直接影響を与えかねない重大な欠陥となるため、品質保証検査としては特に重要な項目となっている。

2. 3 欠陥の形態と従来の検査方法

スクロール内面に発生する欠陥としては、鑄造工程内で発生する欠陥と加工工程内で発生する欠陥の2種類に分類され、おののお Table 1 に示すように、中子折れ、切削屑残りなどがある。また閉塞欠陥、狭窄欠陥および切削屑残り欠陥の例を Fig.3 に示す。それら欠陥の検査手段としては、貫通、割れなどについては従来より水没、耐圧方式などのリークテストによる検査方法が確立されており、自動化も可能であったが、閉塞・狭窄欠陥および切削屑残り欠陥などの凸状欠陥の検査は前記方式では不可能であるため、目視による検査が従来より行われていた。しかし目視検査では検査員の技量、経験に依存する面が多く、さらにはタービンハウジング形状の複雑化が進むにつれ目視不可能な死角が多くなっていることから、欠陥の見逃しが発生することもある。このような課題を改善すべく、カメラ先端の指向を自由に制御可能な超小型 CCD 内視鏡カメラを複雑形状製品の検査に導入しているが、検査工数の大幅な増加の要因となっているのが実情である。

Table 1. Type of defects and inspection method.

Process of outbreak	Classification	The cause of generation	Present inspection method
Casting process	Blockage (Fig.3)	Hot steel flow into the gap when inner mold is broken or cracked	Inspection by human vision with • Light guide • CCD scope • Fiber scope
	Contraction (Fig.4)		
	Blow hole	Gas generation from outer mold or inner mold	• Leak testing in the water • Leak testing with compressed air
	Crack	Stress result in solidifying	
Lathe process	Scrap or shavings (Fig.5)	Scraps remaining	Inspection by human vision with • Light guide • CCD scope • Fiber scope

2. 4 検査自動化への課題

上記のような現状を見極め、検査自動化において解決すべき必須課題は下記のとおりであった。

- (1) スクロール内面の凸状欠陥を検出可能なこと
- (2) 複雑形状のため、目視不可能な死角部分をも検査可能であること
- (3) 検査員の技量、経験などに依存しない定量的な検査方法であること

3. 測定方式

3. 1 検出方案の検討

本装置では空気を伝達要素とした再現性に優れた検出方式を最終的に採用した。なお、他の要素を伝達手段とした方案による比較検討結果を Table 2 および以下に示す。電波および音波の伝達では検出信号のスペクトル解析による欠陥検出が煩雑であり、光の場合は複雑形状のためワークが健全品であっても伝達されない場合があった。

3. 2 測定原理

本検査装置の測定原理を Fig.4 に示す。タービンハウジング（以下、ワークと記述する）内部を通過する空気の風量が、スクロール内面の欠陥の有無によって変化することを利用しており、ワークが実際に自動車に搭載された場合の排気ガスの流れと同様に、入口フランジ（Entrance Frange）の開口部からスクロール内部を介して取付けフランジ（Mount Frange）に向かって空気を通風させる。通風は取付けフランジ開口部に装着したファンブロワによりワーク内部を吸引させることにより行い（Fig.5）、入口フランジの開口部に設置した風量センサにより通風量を測定する。このとき、スクロール内部に欠陥がない場合はほぼ一定の風量が測定されるが、欠陥があった場合は空孔断面積に対する欠陥面積割合（以下この割合のことを狭窄率と定義する）に応じた風量が測定される。閉塞・狭窄欠陥の発生形態および前述の Fig.3 に示したように、欠陥の形状は空孔内周に対しほぼ垂直方向となり、これは通風を妨

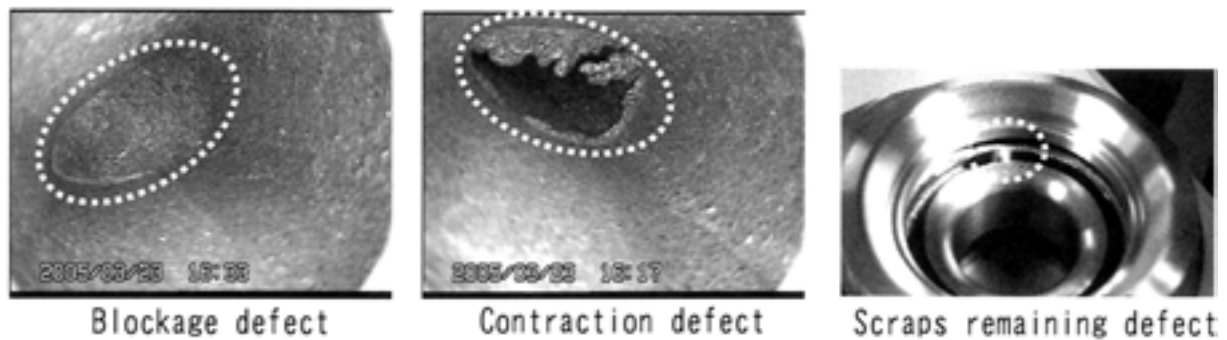


Fig.3. Example of defects.

Table 2. Evaluation of detecting methods.

Propagation elements	Result	Note
Acoustic wave	×	Difficult to analyze the spectrum of the wave
Light	×	Can not detect the light because of the complicated form of hole
Microwave	△	Only applicable to blockage
Air	○	Repeatability is exelent

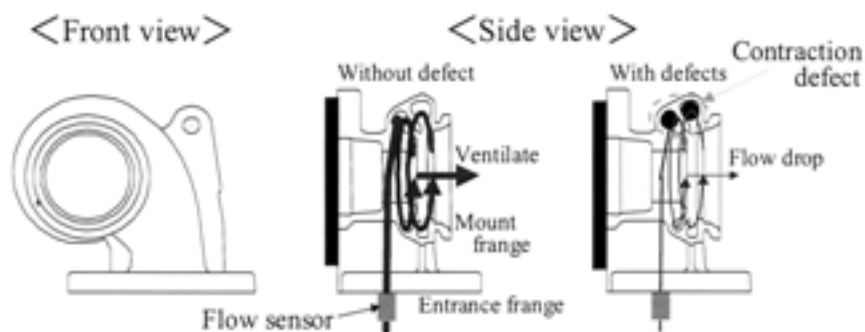


Fig.4. Principle of detection.

げる効果を有することから、狭窄率と風量測定値の相関関係を把握しておくことにより、欠陥のおおよその大きさを推定することができる。

3. 3 センサの選定および原理

本装置では風量検出手段として風量センサを使用している。風量センサの種類としては、従来より広く使われているバルクタイプのものと後述する MEMS 技術利用²⁾のものがある (Fig.6)。両者の基本的測定原理には大差はないが、バルクタイプセンサは測定ダイナミックレンジが大きく、安価であるという特徴がある。センサ選定時に比較検証したデータを Fig.7 に示す。測定には無欠陥ワークと狭窄欠陥ワークを使用し、無欠陥品の風量を基準としたと

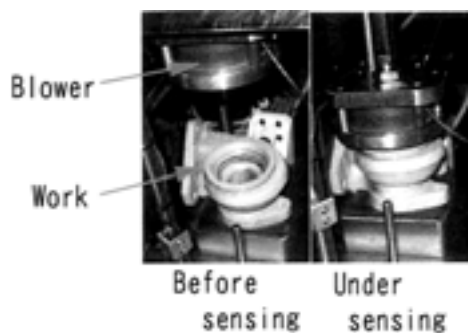


Fig.5. Sensing mechanism.

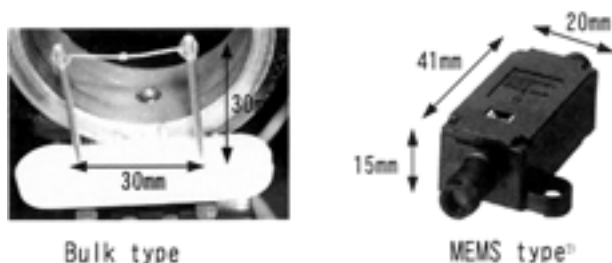


Fig.6. Out line of the Bulk & MEMS.

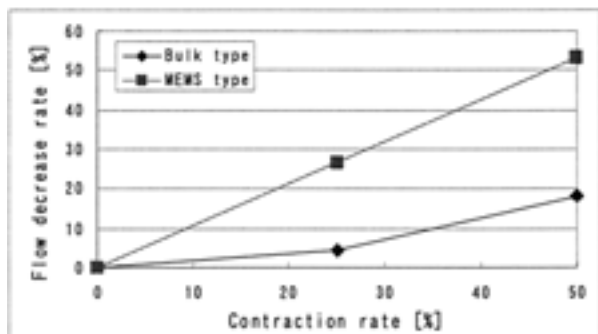


Fig.7. Comparison of the sensitivity between Bulk and MEMS.

きの欠陥品の検出風量がどれだけ減衰するか（以下、風量減衰率と定義する）を検証した。

本結果より、MEMS タイプセンサがバルクタイプセンサよりも検出感度が高いことが確認され、MEMS タイプの風量センサ（以下、本センサと記述する）を採用するに至った。本センサの特徴は MEMS 方式を採用しており、電子基板上にセンサ部を微細加工しているため非常に小型であり、スクロールが並列になったツインスクロール構造 (Fig.8) を有するタービンハウジング、開口部の小さな小型タービンハウジングを安定して測定することが可能である。本センサのおもな仕様²⁾を Table 3 に、構造図²⁾を Fig.9、原理図²⁾を Fig.10 に示す。Fig.10 より本センサ

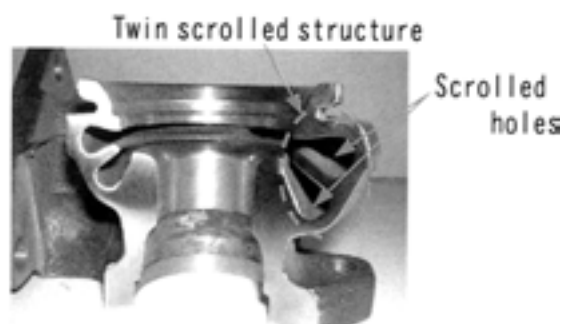


Fig.8. Cross section of the turbine housing with twin scrolled holes.

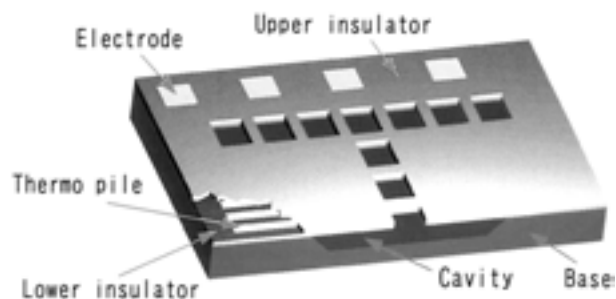


Fig.9. Structure of the flow sensor^{2),3)}.

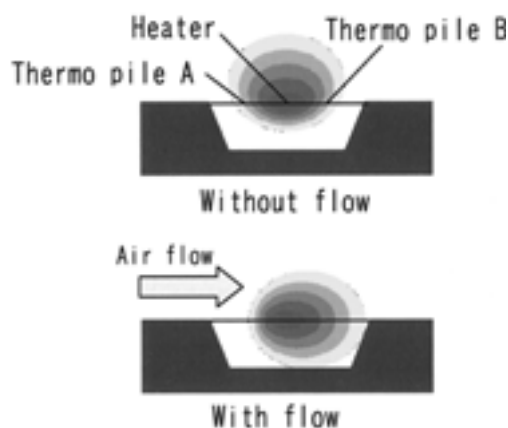


Fig.10. Principle of the flow sensor^{2),3)}.

内中央部にはヒータが、またその上流、下流にはそれぞれサーモパイルと呼ばれる測温体が設けられており、さらに温度補償のためにセンサ基板温度を測定する抵抗体が付加形成されている。

このとき、気体の流れがない場合、ヒータによって熱せられた気体の温度分布はヒータを中心として対称となるが、気体の流れがある場合はヒータの上流側が低く、下流側が高くなるため温度平衡状態が崩れてしまう。この上流と下流の温度差は、サーモパイル A とサーモパイル B の起電力の差として表され、この起電力差により流速を算出することが可能である。センサの流路断面積は一定であり、また、センサ流路の導入部に整流金網が配置されているため、流路断面の流速が比較的安定していることから、流速より容易に風量換算が可能である。また温度補償回路が内蔵されているため、周囲温度の変化に対しても高精度で安定した測定が可能である。本センサの風量と検出電圧との関係を Fig.11 に示す。特徴として非線形特性を有しており、風量の少ない領域においても感度の高い測定が可能である。

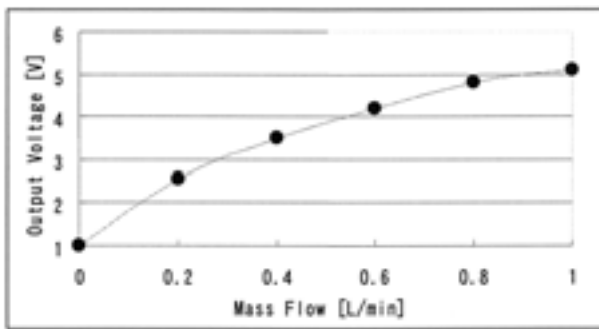


Fig.11. Characteristics of the flow sensor²⁾.

3. 4 通風方式による検出精度比較

本開発装置ではワーク内部に通風させる方法として、送風ではなく吸引方式を採用している。この理由について以下に記述する。

Fig.12, および, Table 4 に示すようなスリットが切り込まれた単純管状パイプを何種類か製作し、スリット部に遮蔽板を差し込むことにより人工的な狭窄状態を形成した。これら管状パイプに対し、管径にほぼ一致させた寸法のファンモータを一方の開口部に装着し、他の開口部に MEMS 風量センサを配置した。送風および吸引はファンモータの装着向きにより区別した。遮蔽位置を変化させたときの通風方式の違いによるバラツキ量を Fig.13 に示す。本結果より、吸引方式では遮蔽位置によるバラツキが小さいが、送風方式ではそのバラツキが大きいことがわかる。その原因は、送風方式の場合、遮蔽位置とセンサ位置によって変化する乱流を含む風量を直接測定しているのに対し、吸引方式ではパイプ外より取り入れた空気の流れを測定することから、パイプ内での乱流による影響が小さいものと考えられる。

上記結果より、送風方式よりも吸引方式のバラツキが小さいことから本装置では吸引方式を採用した。

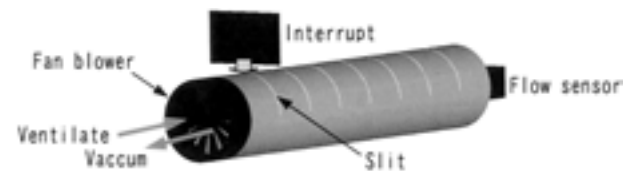


Fig.12. Example of the straight pipe with slits.

Table 3. Specifications of the flow sensor.

Items	Specifications
Input power	10.8 ~ 26.4 VDC
Output voltage	1 ~ 5 VDC (Non-Liner)
Consumed current	Max 15 mA (Vcc=12 ~ 24 VDC, Vss=0 V, 25 ℃)

Table 4. Dimension of pipes used in experiment.

Model No.	①	②	③	④
Diameter [mm]	φ 40	φ 30	φ 20	φ 10
Length [mm]	200	200	200	200
Interval between slits [mm]	50	50	25	25

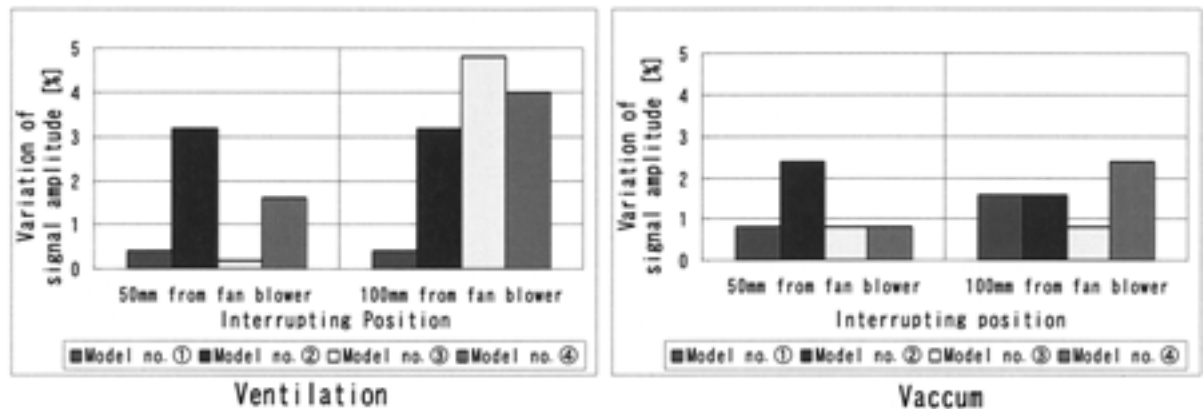


Fig.13. Comparison of variation between ventilation method and vaccum method.

3. 5 バイアス風量^{3), 4)}

一般的な空孔内部を通過する空気の流れを考えた場合、空孔内部の流れが層流となるか乱流となるかは以下のようなレイノルズ数の値によっておおよそ判別できる。

$Re = Ud/\nu$ (d : 空孔の直径, U : 断面平均流速, ν : 動粘性係数)

一方、タービンハウジングのような複雑形状かつスクロール内壁面の表面粗度が比較的粗いもの考えた場合は上記のような単純式では定量的な計算できないものの基本的な考え方は同様である。したがって、ファンプロウによって健全製品のスクロール内部より吸引させる風量（以下、本稿ではこれをバイアス風量と定義する）が多くなるにしたがって、内部で乱流が発生し易くなる。乱流の発生は風量測定においてバラツキが大きくなる要因となるため、この観点においてはバイアス風量は小さいことが望ましい。しかし、バイアス風量を小さくすると風量センサによる検出値も小さくなるため、他のバラツキ要因の割合が大きくなり、信号強度とノイズ強度の比 (S/N) が悪化する可能性がある。そこで、前述のスリットパイプをモデルとしたときのレイノルズ数を算出しバイアス風量の設定範囲を想定した。使用したスリットパイプの内径は $\phi 20\text{mm}$ で、長さは 200mm である。ここで空気の動粘性係数を $1.502 \times 10^{-5} [\text{m}^2/\text{s}]$ とし、断面平均流速を $1 [\text{m/s}]$ とすると、レイノルズ数はおよそ 666 となるため、Fig.14 に示す実験結果³⁾ より比較的大きな乱流の発生があるものと推測される。さらに実際のスリットパイプを使用したときのバイアス風量とバラツキの関係についての実験結果を Fig.15 に示す。本結果においてもバイアス風量を大きくするとバラツキが大きくなることから、バイアス風量を小さくすると乱流の発生が低減されることは確かである。

また、実際のワークにおけるバイアス風量と検出感度の関係について調査した。Fig.16 に結果を示す。本実験で使

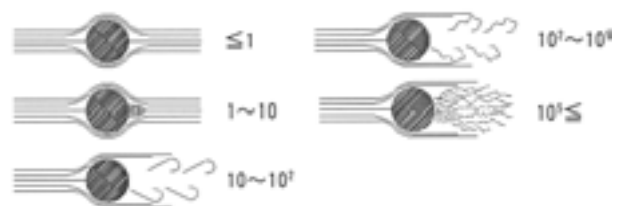
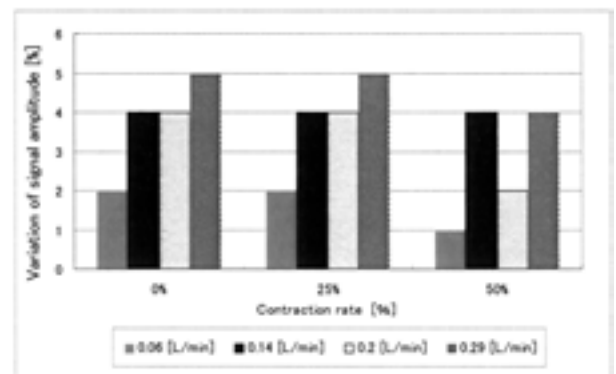
Fig.14. Reynolds number vs. flow condition⁴⁾.

Fig.15. The dependence of variation of signal amplitude on contraction rate.

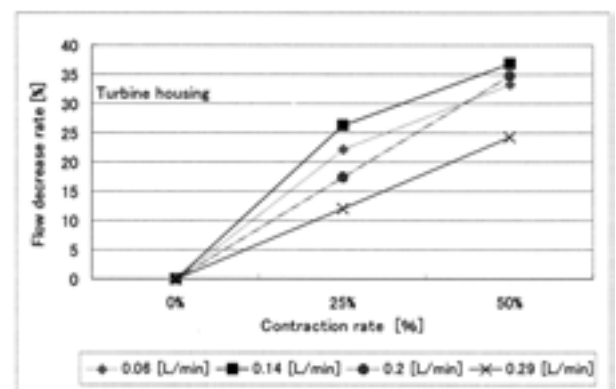


Fig.16. The dependence of flow decrease rate on contraction rate.

用したワーク形状においては、バイアス風量が 0.14 L/min の場合、最も感度が高かった。センサ検出感度を高めるためにはバイアス風量がある程度小さくすることが望ましく、本結果は、3.3 にて述べた風量センサの特性を考慮しても妥当といえる。

以上の結果より本装置では、バイアス風量を 0.1 L/min 程度に設定し、バラツキが比較的小さく高い検出感度を得ることを可能とした。

4. 測定誤差^{3), 4)}

本装置では風量センサによる風量を測定しているが、その測定値にはいくつかの要因によるバラツキが含まれている。このバラツキ量は欠陥検出性能に対し大きく影響を与えるため、定量的に把握する必要がある。考えられる要因としては、(1) 外乱要因、(2) センサ特有の要因、(3) ワーク寸法個体差 などである。以下では、これらの要因によるバラツキ量の程度を検証した。

4. 1 外乱要因

外乱要因として考えられるのは、センサ周囲の空気の乱れ、測定環境温度、ワーク温度などである。

4. 1. 1 周囲の空気の乱れ

センサ周囲の空気の乱れを発生させる手段としてエアコンを使用し、同一ワークによるエアコンの ON、OFF および遮蔽板の有無による測定への影響を調査した。遮蔽板とは、エアコンからの風が直接センサおよびセンサ周囲に当たらないようにするためのものである。Fig.17 に実験結果を示す。本結果より、センサ周囲の空気の乱れ、揺らぎは再現性に大きく影響を与えることが判明した。なお、遮蔽板によりセンサ周囲を囲みセンサを外気から隔離し、フィルタを装備したエアタンクなどから空気をワークに供給することにより、周囲の空気の乱れの影響を低減可能である。

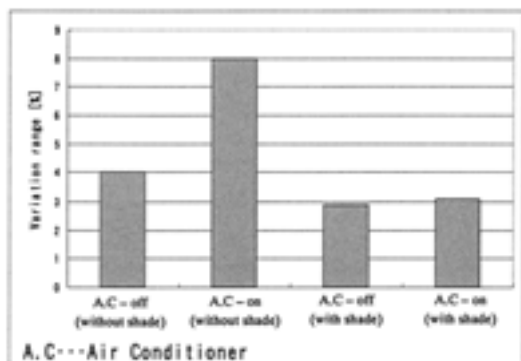


Fig.17. Variation by disorder of surrounding air.

4. 1. 2 周囲温度による影響

前述した風量センサの測定原理より、センサ周囲の温度が急激に変化しなければ、環境温度による測定誤差は小さい。実際の測定環境においても急激に温度変化の起こる可能性は極めて低く、実験結果でも、測定環境温度のみの要因と考えられる測定ばらつきは見られなかった。

4. 1. 3 ワーク温度による影響

室内実験にて、ワークを過熱させたときの測定への影響を調査した結果、ワーク温度と周囲温度との差が非常に大きい場合、ワークスクロール内に空気の揺らぎが発生するとともに通風による冷却効果により乱流が発生し、測定バラツキが大きくなる。しかし、実際の測定環境におけるワーク温度は室温程度であるため、本要因によるバラツキはほとんどないものと考えられる。

4. 2 センサ要因によるバラツキ量

本装置で使用した風量センサの、同一製品の測定による繰返し精度 (N=10) は 1 % 以内であることが確認されている。

4. 3 ワーク寸法個体差によるバラツキ量の推定

センサを外気から隔離し、フィルタを装備したエアタンクにより空気を吸引させる実験方法にて、欠陥のない 80 個の同一品番の健全ワークに対し風量測定を実施した。このときの風量減衰率 (測定値の平均値に対する各ワークの風量測定値の割合) を Fig.18 に示す。本結果より、ワーク寸法個体差、センサ要因など、すべての要因を含んでいるものと推測できるバラツキ幅はおおよそ 3 % であることが確認された。ここで、外乱要因によるバラツキはほぼ無視できると考え、前述のセンサ要因としてのバラツキ幅 1 % を考慮した場合、ワーク寸法個体差による風量測定のバラツキ幅はおおよそ 2 % 程度であると推定できる。

一方、ワークの寸法バラツキは $\pm 0.1 \text{ mm}$ 以内であり、実際の開口部の面積に対してこのバラツキを適用すると

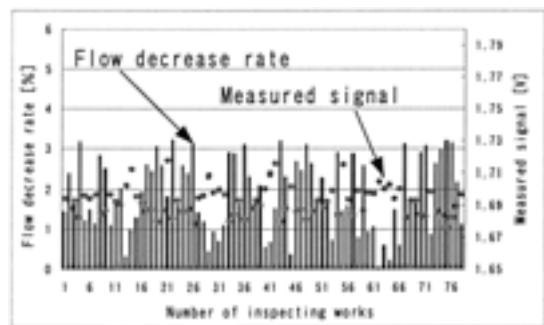


Fig.18. Variation in flow decrease rate including all factors.

おおよそ±1.5%程度の面積バラツキになることから、開口部を通過する流量で考えた場合も同程度のばらつきになることが推測される。

4. 4 バラツキ量把握まとめ

上記の結果より、各要因によるバラツキ把握量を Table 5 にまとめるが、合計ばらつきは3%以内である。

4. 5 欠陥検出性能の見極め

試験材として異なる深さのスリットを中子に入れて鋳造し人工欠陥品を製作した。人工欠陥品および自然欠陥品により狭窄率と風量減衰率との相関を調査した結果を Fig.19 に示す。前項の結果より、ワークの風量測定バラツキ幅が3%程度であると推測されたことから、これを本結果にて考慮した場合、Fig.19 より3%を超える狭窄率を有する欠陥を確実に検出可能と考える。

5. 検査装置の構成

Fig.20 に開発したスクロール内面検査装置（以下、本装置と記す）の外観図を、Fig.21 に装置構成を示す。本装置は、ワーク内に通風させるための機構部およびその制御を行うプログラマブルコントローラと、風量センサにて測定したデータを取込み演算し、良否の判定を行うパーソナルコンピュータから構成されている。

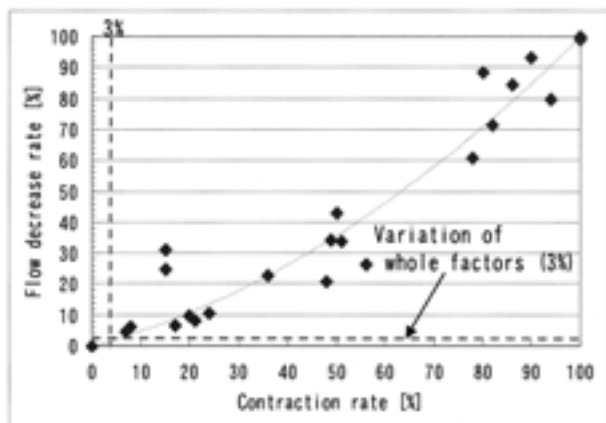


Fig.19. Relationship between contraction rate and flow decrease rate.

ワークに空気を通風させるための手段としてはファンブロー（シロッコファン）を使用しており、入力電圧によって回転数を可変可能である。ワーク測定時の通風量は多くても 0.5 L/min 程度である。一方、本装置設置場所は鋳物製造工場内あるいは切削加工工場内であり、周囲の雰囲気は粉塵もしくはオイルミストが舞っている状態である。このような雰囲気の空気を直接ワークに供給し風量センサで測定すると、センサ内に粉塵もしくはオイルが付着

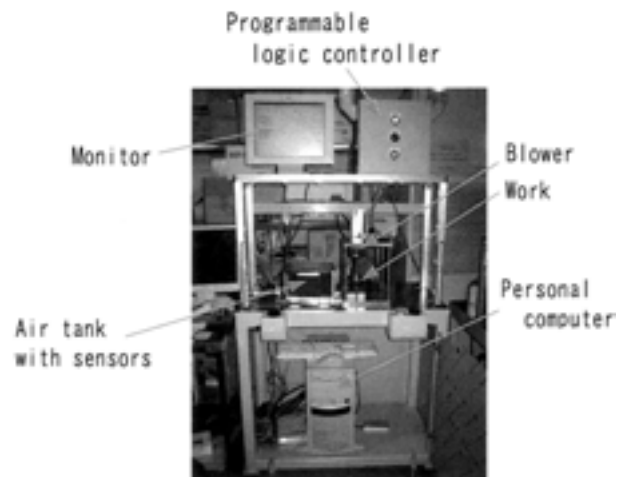


Fig.20. Outward of the new developed inspection equipment.

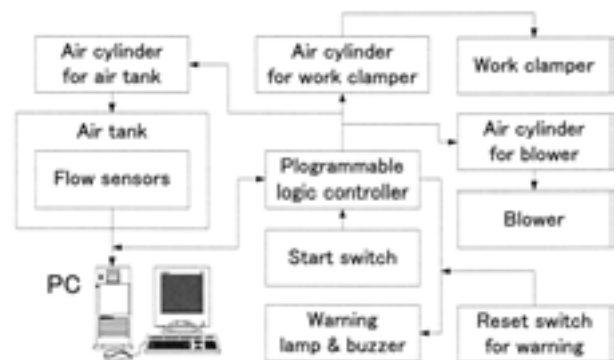


Fig.21. Schematic diagram of the inspection equipment.

Table 5. Variation of measurement.

Factor	Range of variation	Notes
Surrounding air flow	Almost 0 %	The sensor is isolated by air tank
Surrounding temperature	Almost 0 %	From -10 °C in winter to 30 °C in summer
Work temperature	Almost 0 %	Small difference of temperature between works and room
Repeatability of sensor	Almost 1 %	
Individual difference by size of works	Within 2 %	Dimensional permission of the works are within ± 0.1 mm
Total	Within 3 %	Including whole factors

し測定精度が悪化するとともに、センサ故障の原因となる。そこで、フィルタ（スポンジフィルタおよび HEPA フィルタの 2 段）を装着したエアタンク（容積およそ 4 L）を設置し、本タンクからワークに清浄度の高い空気を供給可能ようにした。前記フィルタは共に一定期間での洗浄あるいは交換が必要である。

6. 装置稼動状況および課題

現在、本装置は客先出荷直前の最終検査工程に導入され稼動中である。検査例を Fig.22 に示す。本例では、検出状況確認のため、マシニング加工直後の製品をバリ取り工程を介さずに検査したため、通常よりもはるかに切削屑残り欠陥の検出率が多くなっている。閾値を 5 % に設定した場合の NG 検出品の欠陥原因の例を本図中に示す。切削屑残り欠陥については、現在どの程度の大きさまで検出できるかを定量検証中であるが、切削屑の形態として螺旋構造であることから、鋳造欠陥の検出性能よりは低いものと考ええる。

7. 結 言

風量検出方式によるスクロール内面検査技術を開発した。本検査装置の導入により、これまで目視検査のみに依存していたスクロール内の凸状欠陥検査が定量的に判断できるようになり、一層の信頼性を有するものとなった。また、目視検査の最大の弱点である“見逃し”，“誤認識”などを撲滅し、エンジンの破壊あるいは故障に至るような欠陥の客先流出を阻止することが可能となった。一方、複

雑形状製品の死角部の検査も可能となり、検査員の検査工数軽減にも寄与すると考えられる。さらに別品種の製品検査では本体計測部は共通とし、各製品の開口部に合わせた治具に交換することにより検査が可能である。

なお、本技術のような風量検出を利用した検査方法は、安価かつ高性能な手段として幅広い適用が期待されている。

最後に、本開発において多大なご協力をいただいた大同特殊鋼(株)技術開発研究所および大同キャスティングス(株)の関係諸氏、ならびに風量センサについて技術的な面でご助言をいただいたオムロン(株)柳光氏に謝意を表します。

(文 献)

- 1) 大同精密工業(株):自動車関連部品 カタログ.
- 2) オムロン(株):MEMSフローセンサ カタログ.
- 3) 藤原敏光, 野添悟史, 上田直重:OMRON TECHNICS, 151, 3, 199.
- 4) 上運天昭司:「マイクロフローセンサ」を用いた流量計測, 山武(株), Savemation Review, 19(2001).

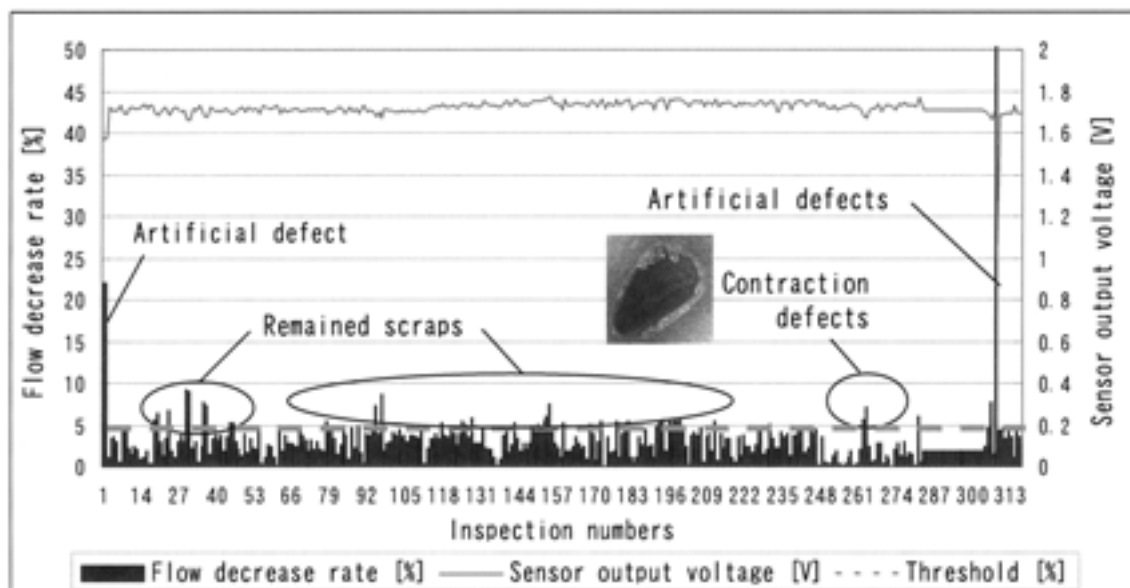


Fig.22. State of working.