

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号

特許第4731046号
(P4731046)

(45) 発行日 平成23年7月20日 (2011. 7. 20)

(24) 登録日 平成23年4月28日 (2011. 4. 28)

(51) Int. Cl.

F I

F O 2 C 9/00 (2006. 01)

F O 2 C 9/00

B

F O 1 D 25/00 (2006. 01)

F O 1 D 25/00

V

F O 1 D 25/30 (2006. 01)

F O 1 D 25/30

Z

F O 2 C 7/00 (2006. 01)

F O 2 C 7/00

B

G O 1 K 7/02 (2006. 01)

G O 1 K 7/02

E

請求項の数 10 外国語出願 (全 12 頁) 最終頁に続く

(21) 出願番号 特願2001-159776 (P2001-159776)
 (22) 出願日 平成13年5月29日 (2001. 5. 29)
 (65) 公開番号 特開2002-81327 (P2002-81327A)
 (43) 公開日 平成14年3月22日 (2002. 3. 22)
 審査請求日 平成20年5月27日 (2008. 5. 27)
 (31) 優先権主張番号 09/579231
 (32) 優先日 平成12年5月30日 (2000. 5. 30)
 (33) 優先権主張国 米国 (US)

(73) 特許権者 390041542
 ゼネラル・エレクトリック・カンパニー
 GENERAL ELECTRIC CO
 MPANY
 アメリカ合衆国、ニューヨーク州、スケネ
 クタデイ、リバーロード、1 番
 (74) 代理人 100137545
 弁理士 荒川 聡志
 (74) 代理人 100129779
 弁理士 黒川 俊久
 (72) 発明者 シモン・ラルフ・サンダーソン
 アメリカ合衆国、ニューヨーク州、クリフ
 トン・パーク、ホランデル・アパートメ
 ント・ナンバー4 2 エル番

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 改善されたタービン排気ガス温度測定のためのセンサ及び方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

タービン排気ダクト (1 7) を有するタービン (1 3) の排気ガス温度分布を測定するためのセンサ (3 0) であって、当該センサ (3 0) が前記タービン排気ダクト (1 7) に取付け可能な複数の分布勾配熱電対 (3 1) を備えており、前記分布勾配熱電対 (3 1) の各々が熱電係数の相異なる 2 種以上の材料から形成され、かつ当該センサが、前記分布勾配熱電対のそれぞれの長さに沿った物理的特性の変動を用いた分析装置によって標準的な排気ガス温度パターンのエイリアス信号を除去するためのフィルタ関数を定義する、センサ (3 0) 。

【請求項 2】

前記分布勾配熱電対 (3 1) の各々がリード線対 (3 2) 及び勾配線対を含み、前記リード線対 (3 2) の第 1 のものは第 1 の導電性材料から形成され、前記リード線対 (3 2) の第 2 のものは第 2 の導電性材料から形成され、前記勾配線対は第 1 の勾配線及び第 2 の勾配線を含み、前記第 1 の勾配線は前記リード線対 (3 2) の前記第 1 のものに接合された第 1 の末端 (3 3) を有すると共に第 2 の末端 (3 4) を終端としており、前記第 2 の勾配線は前記リード線対 (3 2) の前記第 2 のものに接合された第 1 の末端 (3 3) を有すると共に前記第 1 の勾配線の前記第 2 の末端に接合された第 2 の末端 (3 4) を終端としており、前記第 1 の勾配線はそれの前記第 1 の末端 (3 3) において前記第 1 の導電性材料のみから成ると共に、それの前記第 2 の末端 (3 4) において前記第 1 の導電性材料及び前記第 2 の導電性材料の量が同等となるまで徐々に変化する比率で前記第 1 の導電

10

20

性材料と前記第2の導電性材料との組合せから成っており、かつ前記第2の勾配線はそれの前記第1の末端(33)において前記第2の導電性材料のみから成ると共に、その前記第2の末端(34)において前記第1の導電性材料及び前記第2の導電性材料の量が同等となるまで徐々に変化する比率で前記第1の導電性材料と前記第2の導電性材料との組合せから成っている請求項1記載のセンサ(30)。

【請求項3】

当該センサが、複数の分布勾配熱電対(31)を備える、請求項1又は請求項2記載のセンサ(30)。

【請求項4】

当該センサが、複数の抵抗温度計を備える、請求項1記載のセンサ(30)。

10

【請求項5】

排気ダクト(17)を有するタービン(13)の排気ガス温度分布のスペクトル特性の帯域幅を制限するための方法において、ガスタービンの排気温度パターンの空間周波数を決定する工程と、空間周波数限界を設定する工程と、前記空間周波数のうちで前記空間周波数限界より高いものを除去するためのフィルタ関数を定義する工程と、前記フィルタ関数を生成する温度センサ系を前記タービンの前記排気ダクト(17)に設置する工程とを含む方法。

【請求項6】

前記タービン(13)が1基以上の燃焼器及び1基以上の冷却ノズル(14)を含む場合において、空間周波数を決定する前記工程が、前記1基以上の燃焼器の動作に関連した空間周波数変動を決定する工程と、前記1基以上の冷却ノズル(14)の動作に関連した空間周波数変動を決定する工程とを含む、請求項5記載の方法。

20

【請求項7】

前記温度センサ系が、タービン排気ダクトの周囲に等間隔で配置された複数のセンサを含む、請求項5記載の方法。

【請求項8】

前記空間周波数限界を設定する工程が、
タービン排気ダクトの周囲に配置されたセンサの数を同定する工程と、
前記センサの数を2で除してナイキスト限界を求める工程と、
前記空間周波数限界を前記ナイキスト限界未満の周波数として設定する工程と
を含む、請求項7記載の方法。

30

【請求項9】

前記複数のセンサの各々が分布勾配熱電対である、請求項7記載の方法。

【請求項10】

前記複数のセンサの各々が抵抗温度計である、請求項7記載の方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の背景】

本発明はタービンの排気ガス温度を測定するための装置に関するものであって、更に詳しく言えば、タービンの排気ガス温度分布の偏差を正確に測定するための方法及びセンサに関する。

40

【0002】

ガスタービン、蒸気タービン及びその他の形式のターボ機械を含めたタービンは、ステータ構造物及びロータ構造物を含んでいる。ステータ及びロータのそれぞれは、一般に、互いに離隔しかつステータとロータとの間の環状流路内に延びる1組以上の羽根を含んでいる。たとえばガスタービンにおいては、1組のステータ圧縮機羽根及び1組のロータ圧縮機羽根が協働して流路内に流入する空気を圧縮する。圧縮機羽根を越えると、流路内に燃料が噴射される。流路内の混合ノズルの作用により、予備混合段において燃料と圧縮空気とが混合される。かかる混合気が燃焼器段において点火される。燃焼生成物は膨張ガスであって、それはタービンの流路を通過して1組のステータタービン羽根及び1組のロータ

50

タービン羽根に接触する。流路内を移動する膨張ガスはロータタービン羽根を動かすように作用し、そしてそれらを回転させる。使用済みの燃焼生成物は排気ガスとしてタービンから流出し、そして排気ダクトによって大気中に導かれる。

【 0 0 0 3 】

排気ガスの温度は、効率的なタービン運転と関連する重要な運転及び制御パラメータである。通例、排気ガスの温度は排気ダクトの周囲に等間隔で配置された複数の熱電対を用いて測定される。収集された熱電対測定値からは平均排気ガス温度が計算され、そしてタービン運転の監視及び制御のために使用される。更にまた、個々の熱電対の間における温度の読みの偏差を観測することによって望ましくない運転条件や事象の発生が監視される。比較的小さい偏差は、タービンの局部領域に不均等な応力を生み出す運転の非効率を表わす証拠となる場合がある。大きい温度偏差は、迅速な対応を必要とする重大な異状を表わす証拠となる場合がある。

10

【 0 0 0 4 】

長時間のタービン運転にわたって熱電対出力から収集された統計的証拠は、一般に故障傾向を判定するために使用されてきた。かかる統計的な傾向分析は初期故障を検出するために有用な診断ツールであることが確認されている。測定された温度偏差は、(限定されるわけではないが)燃料ノズルの欠陥、燃焼器段ライナの亀裂、タービンのフレイムアウト、燃料/空気予備混合段の逆火、及び(又は)構造的な漏れを含む異状を検出するために使用されてきた。かかる異状はいずれも、タービン内に燃料及び(又は)空気が導入される速度に影響を及ぼすものであり、従ってそれらの検出は極めて重要である。

20

【 0 0 0 5 】

このような監視及び診断技術においては、熱電対によって検出するように意図されている異状のマスキングに原因する困難が生じる。詳しく述べれば、通例、熱電対は燃焼器ユニット、ステータ羽根及びロータ羽根の数、位置及び間隔によって規定された所定のパターンで排気ダクトの周囲に配置される。多くの場合、上記のごとき困難はエイリアシングとして知られる現象に帰因させることができる。一般的に述べれば、エイリアシングが起こるのは、サンプリングの間隔が様々な周波数で起こる事象同士を識別するのに十分でない場合である。すなわち、サンプリング速度がある周波数で起こる事象を検出するのに十分であっても、それより高い周波数で周波数で起こる事象を検出するためには十分でない場合がある。更に重要なことは、正常な高周波事象が低周波信号として現われ、それによって異常な低周波事象が覆い隠されてしまう場合があることである。

30

【 0 0 0 6 】

タービン排気ダクトに関して述べれば、正常に生じる排気温度パターンが低周波信号として現われる高周波信号を含む場合にエイリアシングが起こる。これが起こる限界は、タービン排気ダクトの周囲に配置された離散熱電対の数の関数である。すなわち、ダクト上のアレイを構成する熱電対の数は、上記のタービン部品によって規定される排気パターン中に存在する全ての空間周波数を分解するためには不十分である。それ故、排気パターン中の高い空間周波数成分はより低い空間周波数成分として誤って表現される(エイリアシング)。こうして生じたエイリアス信号は、関心の対象となり得る異状を含む2種以上の空間周波数パターンを表わす可能性のある曖昧なものである。そのため、重大な異状が検出されなくなることがある。1つの解決策は、より多くの熱電対を配置することである。

40

しかしながら、かかる解決策は实际的でない。

【 0 0 0 7 】

エイリアシング現象は信号処理分野において良く知られているが、ターボ機械の分野ではそれほどでない。しかしながら、この問題は排気ダクトの周囲に沿って互いに等間隔で配置されたN個の熱電対に関する若干の簡単な方程式を通して明確に理解することができる。排気ダクトの中心に対する熱電対nの位置は、式(1)に表わされた関係における方位角 θ_n によって定義される。

【 0 0 0 8 】

$$\theta_n = 2\pi n / N$$

式(1)

50

正弦波信号の周期的サンプリングを効果的に行うためには、関数 $x(\quad)$ によって一般的に表わされる分析すべき信号を分解し、そして一般式(2)に簡略化すればよい。式中、 A は信号の振幅、そして k はその空間周波数である。

【0009】

$$x(\quad) = A \cos(k \quad) \quad \text{式(2)}$$

N 個の離散位置のそれぞれにおいてサンプリングを行った場合、その結果は次のようになる。

【0010】

$$x(n) = A \cos(2 \quad k n / N) \quad \text{式(3)}$$

相異なる周波数 k_1 及び k_2 を有しかつ関数 $x_1(\quad)$ 及び $x_2(\quad)$ によって記述される2つのかかる空間的に周期的な成分に関しては、次のような2組の標本化測定値 $x_1(n)$ 及び $x_2(n)$ が得られる。

【0011】

$$x_1(n) = A \cos(2 \quad k_1 n / N) \quad \text{式(4)}$$

$$x_2(n) = A \cos(2 \quad k_2 n / N) \quad \text{式(5)}$$

この場合、相異なる信号のそれぞれは排気ダクト上の同じ位置においてサンプリングされたものである。 $m = \dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots$ (すなわち、任意の整数) に関して次式によって表わされる関係が満たされる場合、これら2組の標本化測定値 $x_1(n)$ 及び $x_2(n)$ は同一となることを代入によって証明することができる。

【0012】

$$k_1 - k_2 = m N \quad \text{式(6)}$$

このような状況下では、 N 個の熱電対アレイを用いて観測した場合、2つの信号は識別不可能である。

【0013】

実例を挙げて、この点を説明しよう。14基の燃焼器缶及び排気ダクトの周囲に配置された27個の熱電対を具備するガスタービンにおいては、排気パターンは14基の燃焼器缶の存在を表わす特徴を含んでいる。しかるに、サンプリングスプレッドが適切でないため、それらの特徴は正確に表現されない。基本波(1回転当り14)及び高調波(1回転当り28、42、...)の空間周波数は、それを越えると信号を一意的に表現することのできないナイキスト限界($27/2 = 13.5$)を越えている。 $k_1 = 14$ の基本波については、 $m = 1$ とすると式(6)から $k_2 = 13$ が得られる。すなわち、1回転当り ± 13.5 の観測可能な範囲内においては、14基の燃焼器缶から生じる信号は1回転当り13の空間周波数を有する位相のずれた信号として現われる。こうして生じたエイリアス信号の解釈は混乱をもたらす。

【0014】

第1高調波については、 $m = 1$ とすると式(6)から $k_1 = 28$ 及び $k_2 = 1$ が得られる。すなわち、この信号は1回転当り1の空間周波数を有するものとして観測される。このような信号は、タービンの環状流路内において実際に起こりかつやはり1回転当り1の基本空間周波数によって特徴づけられる任意の離散的な欠陥を覆い隠すのに十分な強さを有する可能性がある。

【0015】

従来の離散熱電対系を用いると信号のエイリアシングが起こることがわかる。その結果、熱的ひずみなどのごとき重大な事象が正常な排気温度パターンによって覆い隠され、そして排気ダクトの熱電対により検出されないままになることがある。従って、排気ガス温度分布及びそれに付随した偏差を表現するための技術が要望されている。そのような技術は、検出すべき異状を覆い隠すことのある正常パターンの空間周波数を決定するために使用することができる。すなわち、正常な温度パターンの空間周波数のエイリアシングを排除又は抑制するための方法が要望されている。また、エイリアシングを分解し、それによってタービン構造物の全体に関して正確な温度分布を提供するような感知装置も要望されている。

10

20

30

40

50

【 0 0 1 6 】

【 発明の概要 】

上記の要望を満たすため、本発明は改善されたタービン排気ガス温度測定のための方法及びそれに適した特定のタイプのセンサを提供する。本発明の方法は、排気ダクトを有するタービンの排気ガス温度分布のスペクトル特性の帯域幅を制限するためのものである。かかる方法は、先ずガスタービンの排気温度パターンの空間周波数を決定し、次いで空間周波数限界を設定する工程を含んでいる。かかる方法はまた、上記の空間周波数のうちで上記の空間周波数限界より高いものを除去するためのフィルタ関数を定義すると共に、該フィルタ関数を生成する温度センサ系をタービンの排気ダクトに設置する工程をも含んでいる。

10

【 0 0 1 7 】

改善された排気ガス温度測定を達成するためのセンサ装置は、適切なフィルタ関数を生み出す。かかる装置の一例は、タービン排気ダクトに取付け可能な複数の分布勾配熱電対から成るセンサである。この場合、分布勾配熱電対の各々は熱電係数の相異なる２種以上の材料から形成され、そしてかかるセンサが標準的な排気ガス温度パターンのエイリアス信号を除去するためのフィルタ関数を定義する。

【 0 0 1 8 】

本発明それ自体及び先行技術に対するその利点は、添付の図面を参照しながら以下の詳細な説明を読むことによって自ずから明らかとなる。

【 0 0 1 9 】

20

【 好適な実施の態様の詳細な説明 】

本発明の内容は、前記特許請求の範囲内に詳細に記載されかつ明確に規定されている。とは言え、本発明は添付の図面を参照しながら以下の説明を考察することによって最も良く理解できよう。なお、図面全体を通じ、同じ構成要素は同じ参照番号によって表わされている。

【 0 0 2 0 】

図１は、タービンエンジン１０の一部分の略図である。とりわけ、タービンエンジン１０は圧縮空気を燃焼器部分１１に供給する圧縮機（図示せず）を含んでいる。燃焼器部分１１においては、圧縮空気が燃料入口１２からの燃料と混合されかつ点火されることによって高温の燃焼ガスが生成する。かかるガスは、円周方向に沿って互いに離隔した複数のタービンステータノズル１４からの冷却用空気と共に、下流側に流れてタービン１３に達する。タービン１３は、タービンエンジン１０の中心軸線の回りで回転し得るようにして車軸１６に取付けられた羽根車から半径方向に沿って外方に延びかつ円周方向に沿って互いに離隔した複数の羽根（たとえば、タービン羽根１５）を含んでいる。高温の燃焼ガスが排気ダクト１７に移動する際、それはタービン羽根１５に接して膨張することによって羽根車を回転させる。このようなガスの膨張はまた圧縮機に連結された車軸１６をも回転させるが、車軸は発電機やプロペラのごとき負荷設備にも連結されることがある。

30

【 0 0 2 1 】

勿論、タービンエンジン１０の特定の寸法や能力に応じ、図示された各種の部品が幾つも存在することがある。本発明のスペクトル分析技術を説明するため、タービンエンジン１０の運転の特定の側面が詳細に考察される。詳しく述べれば、以下の解析例においては、タービンエンジン１０を通る流体の流れの諸成分、たとえば燃焼ガスの流れ１８、冷却用空気の流れ１９及び排気ガスの流れ２０が考察される。

40

【 0 0 2 2 】

通常、質量保存かつ等エンタルピー混合方程式を用いれば、経路に沿って質量が保存されるという仮定の下では、タービンエンジン１０に関連する各々の流管は次のような２つの式によって簡単な一次元の項で表わすことができる。

【 0 0 2 3 】

$$\begin{aligned} m_{\text{exhaust}}() &= m_{\text{combustor}}() + m_{\text{cool}}() \\ &= m_{\text{turbine}}() \end{aligned}$$

式(7)

50

$$m_{\text{turbine inlet}}() h_{\text{turbine inlet}}() \\ = m_{\text{combustor}}() h_{\text{combustor}}() + m_{\text{cool}}() h_{\text{cool}}() \text{ 式(8)}$$

式中、質量流量は単位時間当たりかつタービン 10 内の環状流路の単位面積当りの値である。
 $h_{\text{turbine inlet}}()$ はタービン 10 の周囲における方位角、 $h_{\text{combustor}}()$ は燃焼器 11 からの流出パターンのエンタルピー、 $m_{\text{cool}}()$ はタービン 10 のステータ羽根からの周期的冷却流量、そして h_{cool} は圧縮機 12 からの排出冷却材のエンタルピーである。 $h_{\text{combustor}}()$ は、次のような簡単な式によってその成分に分解し得ることに注意すべきである。

【0024】

$$h_{\text{combustor}}() = h_{\text{combustor}} + h_{\text{combustor}}() \text{ 式(9)}$$

式中、 $h_{\text{combustor}}$ は空間的に平均化された燃焼器排気のエンタルピーであり、そして $h_{\text{combustor}}()$ は(限定されるわけではないが)缶、スワラなどのごとき燃焼器構成要素によって起こされる空間エンタルピー変動を表わす。

【0025】

タービンエンジン 10 を通る多方流れパターンは、流路内における複数の様々な成分によって起こされることが知られている。かかる流れに関連したエンタルピーは、式(10)によって特性表示することができる。式中、 p は添字によって識別される特定の流れ成分に関連した圧力である。

【0026】

$$h_{\text{exhaust}}() = h_{\text{turbine inlet}}() * \\ (p_{\text{exhaust}}/p_{\text{combustor}})^{-1/} \text{ 式(10)}$$

本発明の目的にとっては、排気温度パターンの空間スペクトルを分解するという点で $h_{\text{exhaust}}()$ に関する解が重要である。式(8)及び(9)を結合して処理すると共に、 $m_{\text{cool}}()/m_{\text{combustor}}$ が 1 より遥かに小さいものと仮定すれば、次の式を求めることができる。

【0027】

$$h_{\text{turbine}}()/h_{\text{combustor}} = 1 + h_{\text{combustor}}()/h_{\text{combustor}} \\ - (h_{\text{combustor}} - h_{\text{cool}})/h_{\text{combustor}} * m_{\text{cool}}()/m_{\text{combustor}} \\ - m_{\text{cool}}() h_{\text{combustor}}()/m_{\text{combustor}} h_{\text{combustor}} \\ + \text{より高次の項} \text{ 式(11)}$$

次に、関数 $f_{\text{cool}}()$ 及び $f_{\text{pattern}}()$ に従って温度パターン及び冷却変動を特徴づけることができる。ここで、 $f_{\text{cool}}()$ はノズル冷却及びその流れの単位振幅によって起こされる空間変動を定義する。すなわち、それは冷却ノズルの数、それらの間隔などに関連した空間周波数を定義する。また、関数 $f_{\text{pattern}}()$ は燃焼器流れ及びその流れの単位振幅によって起こされる空間変動を定義する。すなわち、それは燃焼器缶の数、それらの間隔などに関連した空間周波数を定義する。これらの一般関数を用いてガス流の円周方向変動を特徴づけることにより、次の式が得られる。

【0028】

$$m_{\text{cool}}()/m_{\text{combustor}} \\ = (m_{\text{cool}}/m_{\text{combustor}})(1 + f_{\text{cool}}()) \text{ 式(12)}$$

$$h_{\text{combustor}}()/h_{\text{combustor}} \\ = (h_{\text{combustor}}/h_{\text{combustor}}) f_{\text{pattern}}() \text{ 式(13)}$$

式(10)～(13)を考慮に入れば、次の式(14)はタービンの排気ガス温度分布に関する本発明のモデルを表わす。

【0029】

$$h_{\text{exhaust}}() = (p_{\text{exhaust}}/p_{\text{combustor}})^{-1/} [1 - (h_{\text{combustor}} \\ - h_{\text{cool}})/h_{\text{combustor}})(m_{\text{cool}}/m_{\text{combustor}}) + (1 - m_{\text{cool}}/ \\ m_{\text{combustor}})(h_{\text{combustor}}/h_{\text{combustor}}) f_{\text{pattern}}() \\ - ((h_{\text{combustor}} - h_{\text{cool}})/h_{\text{combustor}})(m_{\text{cool}}/m_{\text{combustor}}) \\ f_{\text{cool}}() - m_{\text{cool}}/m_{\text{combustor}})(h_{\text{combustor}}/h_{\text{combustor}}) \\ f_{\text{cool}}() f_{\text{pattern}}() + \text{より高次の項}] \text{ 式(14)}$$

式(14)は、タービン排気ダクト17からの排気ガス流20の温度パターンに影響を及ぼすタービンエンジン10の部品と相関関係を有する1組の項を与える。表1には、式(14)の項及び排気ダクトの温度パターンの特定の空間周波数を規定するタービン部品がまとめて示されている。

【0030】

【表1】

表 1

項	位 数	空間周波数
1	1	0
$(h_{\text{combustor}} - h_{\text{cool}}) / h_{\text{combustor}}$	$m_{\text{cool}} / m_{\text{combustor}}$	0
$(1 - m_{\text{cool}} / m_{\text{combustor}}) * f_{\text{pattern}}$	$\Delta h_{\text{combustor}} / h_{\text{combustor}}$	$n_{\text{cans}}, 2n_{\text{cans}}, 3n_{\text{cans}}, \dots$
$((h_{\text{combustor}} - h_{\text{cool}}) / h_{\text{combustor}}) * f_{\text{cool}}$	$m_{\text{cool}} / m_{\text{combustor}}$	$n_{\text{nozzles}}, 2n_{\text{nozzles}}, 3n_{\text{nozzles}}, \dots$
$f_{\text{cool}} f_{\text{pattern}}$	$m_{\text{cool}} \Delta h_{\text{combustor}} / m_{\text{combustor}} h_{\text{combustor}}$	$n_{\text{nozzles}} \pm n_{\text{cans}}, n_{\text{nozzles}} \pm 2n_{\text{cans}}, n_{\text{nozzles}} \pm 3n_{\text{cans}}, \dots$

【0031】

表1中の第1項は、平均燃焼器排気温度に関連している。第2項は、ステータノズルからの気流の平均冷却効果に関連している。第3項は、タービンの中心線を基準とする燃焼器缶からの流れに関連した空間周波数に関するスペクトル温度信号及びその高調波の振幅である。第4項は、タービンの中心線を基準とするステータノズルからの流れに関連した空間周波数に関するスペクトル温度信号及びその高調波の振幅である。最終項は、燃焼器缶及びノズルからの流体の流れの混合によって生じる非線形性に由来する側波帯を表わしている。14基の燃焼器缶及び48基のノズルを具備した機械に関するスペクトルを図4に示す。27個の熱電対を使用した場合、13.5のナイキスト限界を越える全ての高周波成分はエイリアシングを受け、従って測定されたスペクトルの解釈を著しく混乱させる。

【0032】

燃焼器缶、冷却ノズル及びそれらの関連部品の効果の関数としてスペクトル周波数の特性を決定するため本発明において開発された方法を使用すれば、有効な温度センサを決定することができる。詳しく述べれば、本発明の分散勾配熱電対系30が図2に略示されている。かかる系30は、分析機器(図示せず)に電気信号を伝達するための接続リード線32を有する複数の互いに離隔した勾配熱電対31を含んでいる。熱電対31は、従来の離散熱電対配置と同様にしてタービン排気ダクト17の周囲に配置されていることが好ましい。所望のフィルタ関数に従い、勾配熱電対31は排気ダクト17の周囲において互いに離隔していることもあれば、1つ以上の位置において重なり合っていることもある点に注意すべきである。使用される熱電対31の数は、特定のタービン特性、とりわけ検出すべき空間周波数に依存する。更にまた、勾配熱電対系30はエイリアシングの問題に対処するための様々な選択肢の1つである。もう1つの選択肢としては、以下に記載される抵抗温度計が挙げられる。

【 0 0 3 3 】

本発明の分散勾配熱電対系 3 0 の重要な一面は、図 3 に示された勾配熱電対 3 1 の構造にある。それらは、相異なる熱電係数を有する材料の複合物として形成することができる。各々の勾配熱電対 3 1 は、2 種以上のかかる材料の混合物から形成される。更にまた、各々の勾配熱電対 3 1 はその長さに沿って材料の混合比を変化させながら形成される。すなわち、たとえば、一方の接続リード線 3 2 の組成物を材料 A とする。それに接合された熱電対線の末端 3 3 は、1 0 0 % の材料 A から成っている。第 2 の接続リード線 3 2 は材料 B から形成され、そしてそれに接合された他方の熱電対線の末端は 1 0 0 % の材料 B から成っている。熱電対線に沿って末端 3 4 に向かった場合、第 1 の熱電対線中では基礎材料 A に添加される材料 B の量が徐々に増加している一方、第 2 の熱電対線中では基礎材料 B に添加される材料 A の量が徐々に増加している。末端 3 4 においては、両方の熱電対線は公称 5 0 % ずつの材料 A 及び B から成る同一の組成を有するように構成されている。勿論、熱電係数の相異なる様々な材料を様々な比率で使用することにより、熱電対の長さに沿って所望のフィルタ関数を生み出す選択可能な出力を与える熱電対 3 1 を得ることができる。互いの材料に対して連続的に変化する適切な溶解度を有し、従って熱電係数の平滑な変化を生み出すものであれば、標準的な熱電対材料を使用することができる。

10

【 0 0 3 4 】

熱電係数の相異なる材料をこのように構成すれば、所望の特性を持ったセンサが得られる。各々の勾配熱電対 3 1 の長さに沿った温度差の変化は、リード線 3 2 との接合部において感知される起電力 E_{AB} に対する寄与の差を生み出す。2 種の材料 A 及び B を使用した場合、このような寄与の差 ($d E_{AB}$) は熱電対線に沿ったその点に存在する材料の組成における各材料の熱電係数間の差に比例する。このことは、式 (15) によって特徴づけることができる。式中、「 α 」は材料の局所熱電係数、「 x 」は熱電対の長さに沿った特定の位置、「 L 」は勾配熱電対の長さ、「 T 」は局所温度、そして添字「 a 」及び「 b 」は 2 本の熱電対線を表わす。

20

【 0 0 3 5 】

$$E_{AB} = [\alpha_a(x) - \alpha_b(x)] (dT(x)/dx) dx \quad \text{式 (15)}$$

一例として、末端 3 3 及び 3 4 の間に材料組成の勾配が存在し、従って熱電係数の差に下記のような勾配が生み出されるものと仮定しよう。

【 0 0 3 6 】

$$\alpha_a(x) - \alpha_b(x) = (\alpha_a(0) - \alpha_b(0)) (1 - x/L) \quad \text{式 (16)}$$

熱電対線は末端 3 3 (すなわち、 $x = 0$) において 1 0 0 % の材料 A 及び B からそれぞれ成っているから、 $\alpha_a(0) = \alpha_A$ かつ $\alpha_b(0) = \alpha_B$ 、あるいは $\alpha_a(x) - \alpha_b(x) = \alpha_{AB} (1 - x/L)$ (ただし、 $\alpha_{AB} = \alpha_A - \alpha_B$) となる。式 (15) に式 (16) を代入し、そして部分毎に展開すれば、式 (17) が得られる。

30

【 0 0 3 7 】

$$E_{AB} = \alpha_{AB} * (1/L) T(x) - T(0) dx \quad \text{式 (17)}$$

式 (17) は、各々の勾配熱電対 3 1 がその全長 L に沿って暴露される空間的に平均化された温度差に応答することを明確に表わしている。なお、延長線 3 2 及び (又は) 冷接点を熱電対 3 1 に追加することにより、(それを測定しさえすれば) 冷接点温度に対する平均温度値を生成させ得ることに留意すべきである。

40

【 0 0 3 8 】

系 3 0 を構成する勾配熱電対 3 1 のアレイは、タービンの標準部品の高調波に関連した高周波信号の振幅を抑制するように働くフィルタリング系を提供する。これは次のように理解することができる。2 周期関数 $T(\theta)$ によって記述されるガスタービンの排気温度パターンを考察しよう。この場合、 θ はタービンの周囲における方位角であり、そして $T(\theta + 2\pi) = T(\theta)$ である。空間フィルタ関数 $F(n)$ を有する排気パターンセンサは、測定温度 $M(n)$ を生じる。 $T(n)$ 、 $F(n)$ 及び $M(n)$ は、たたみこみ $M(n) = \int_{-\infty}^{\infty} T(\theta) F(n - \theta) d\theta$ を介して互いに関係している。フーリエ変換のたたみこみ特性に基づけば、 $M(n) = F(n) T(n)$ である。式中、 n は空間周波数であり、また M 、 F 及び T はそれぞれ

50

M、F及びTのフーリエ変換である。

【0039】

図2に示された本発明の勾配熱電対の作用は式(17)によって表わされるが、この場合のフィルタ関数は $|F(n)| > 1/n_{\text{thermocouples}}$ に関して $F(n) = 0$ となり、また $|F(n)| < 1/n_{\text{thermocouples}}$ に関して $F(n) = n_{\text{thermocouples}}/2$ となる。本発明の分布勾配熱電対系に関連したフィルタ関数に関する標準フーリエ変換は、式(18)で示される。式中、 n は空間周波数(回転 $^{-1}$)である。

【0040】

$$F(n) = n_{\text{thermocouples}}/n * \sin(n/n_{\text{thermocouples}}) \quad \text{式(18)}$$

満足すべき結果は、 $n_{\text{thermocouples}}$ が燃焼器缶の数に等しくなるように選ばれた場合に得られる。このような熱電対の数は、前述のごとき現行の技術に比べて顕著に少ない数であることに注意されたい。こうして得られたフィルタスペクトルを図5に示す。ここで、ナイキスト限界は $n_{\text{thermocouples}}/2$ であることに注意されたい。式(18)及び図5から認められる通り、この構成においては優勢な信号(燃焼器缶スペクトルの基本波及び高調波)は完全に拒絶されている。冷却ノズルに関連する残りの高周波成分の振幅も顕著に減少している。たとえば、48基のノズル、14基の燃焼器缶、及び14個の熱電対31を具備したタービン10に関しては、典型的なパターンの信号振幅は $|F(n=48)| = (14/48 * \sin(48 * \pi/14)) = 0.09$ の倍率で減少している。このように、予想される高周波成分の全てが顕著に減衰している。従って、ナイキスト限界より低い周波数へのエイリアシングが起こっても、それらは真正の離散的な燃焼器欠陥によって引起こされた低周波信号を覆い隠すことがない。

【0041】

当業者は、それ以外のフィルタ関数を開発することもできよう。本発明の目的は、典型的なタービン構造物に関連したスペクトルパターンを認識すると共に、本来ならば検出すべき欠陥を覆い隠すことのある高周波の基本波及び高調波を除去するためのフィルタ機構を提供するような方法及び少なくとも1種の推奨される装置を提供し、しかも測定素子の数を顕著に増加させることなしにそれを達成することにある。図2の勾配熱電対系30はかかる装置の一例である。相異なる材料の比率及びそれらに対応した熱電係数を操作することにより、勾配熱電対系30の特定のフィルタ特性を適宜に調整することができる。

【0042】

抵抗温度計を使用することにより、別の効果的なフィルタ関数を得ることもできる。抵抗温度計系は、図2に示された勾配熱電対系30に関して記載されたものと同じやり方でタービン排気ダクト17の周囲に配置することができる。熱電係数の相異なる2種以上の材料から形成されるのではなく、かかる系を構成する各抵抗温度計は線又は巻線パッケージから成る。かかる抵抗温度計は、第1の末端Aと第2の末端Bとの間におけるその長さLに沿った任意の1点xにおいて、式 $R(x) = R_0 + \alpha(T(x) - T_0)$ に従って温度に依存する抵抗率 α を有している。式中、 R_0 は基準温度 T_0 における抵抗率、そして α は抵抗率の温度係数である。式(19)は、一定の横断面積Aを有する抵抗温度計の両端間における抵抗を表わしている。その結果、かかる抵抗温度計はタービンの典型的なスペクトルパターンの強度を顕著に低下させる別のフィルタ関数を提供する。

【0043】

$$R_{AB} = R_0(L/A) + (\alpha/A) * \int_A^B T(x) - T_0 dx \quad \text{式(19)}$$

抵抗温度計の横断面積及びその他の特性を操作すれば、一層複雑なフィルタ関数を得ることもできる。

【0044】

以上、タービン排気ダクト温度のスペクトルパターンの特性を決定するための方法を記載した。更にまた、スペクトル周波数の帯域幅を制限するため温度測定値の分析中にフィルタ関数を導入するように設計された2つのタイプのセンサも記載した。このようにすれば、タービン排気ガス温度分布の偏差から観測し得る比較的小規模の構造的異状が、正常に生じる排気ガス温度パターンに関連したエイリアス信号によって覆い隠されることがない

。本発明の特定の実施の態様のみを記載したが、前記特許請求の範囲において規定された本発明の精神及び範囲から逸脱することなしに様々な変更態様が可能であることは当業者にとって自明であろう。

【図面の簡単な説明】

【図 1】 ガスタービンの高温ガス流路の簡略断面図である。

【図 2】 本発明に係わる 1 組の勾配熱電対を取付けたタービン排気ダクトの簡略端面図である。

【図 3】 本発明に係わる勾配熱電対の略図である。

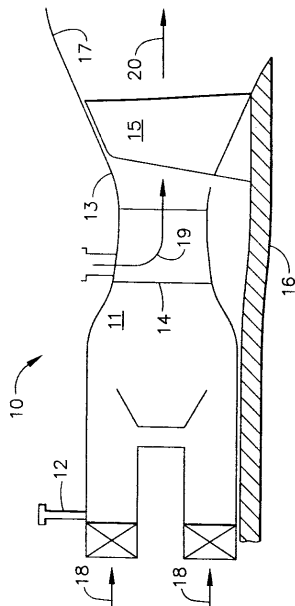
【図 4】 離散状態の熱電対を用いて測定された基本波及び高調波の空間周波数のスペクトル出力密度を示すグラフである。

【図 5】 本発明の勾配熱電対に関連したフィルタ関数の典型的な振幅応答を応答空間周波数に対して示すグラフである。

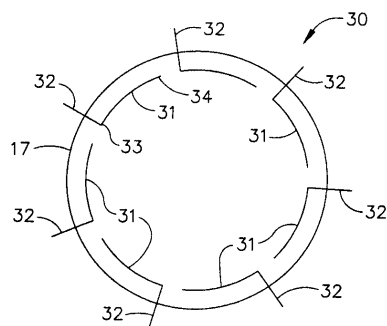
【符号の説明】

- 10 タービンエンジン
- 11 燃焼機部分
- 13 タービン
- 14 冷却ノズル
- 15 タービン羽根
- 16 車軸
- 17 排気ダクト
- 30 分布勾配熱電対系
- 31 勾配熱電対
- 32 接続リード線
- 33 末端
- 34 末端

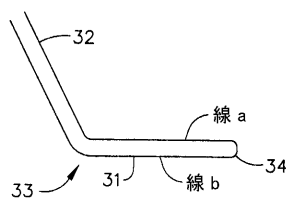
【図 1】



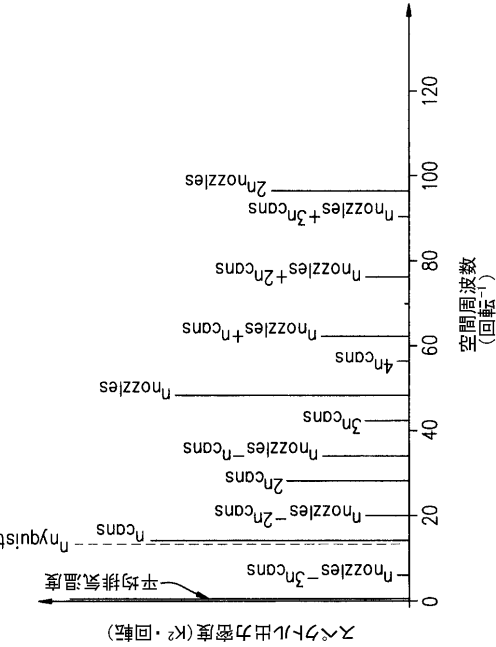
【図 2】



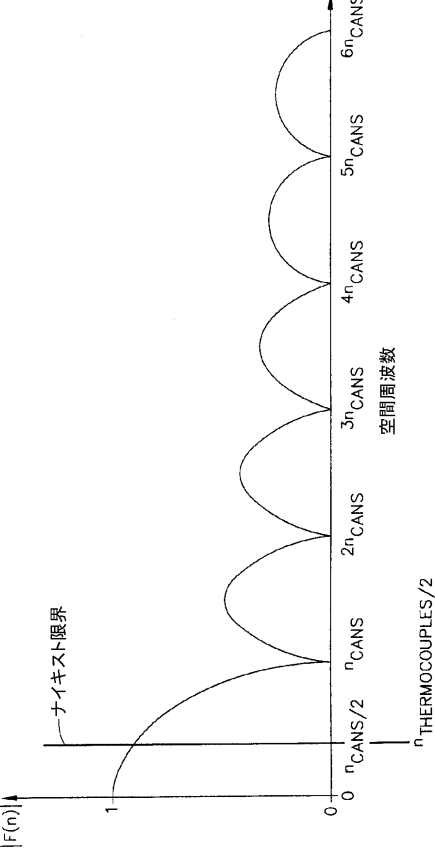
【図 3】



【図 4】



【図 5】



フロントページの続き

(51)Int.Cl. F I
G 0 1 K 13/02 (2006.01) G 0 1 K 13/02

審査官 藤原 弘

(56)参考文献 米国特許第05106203(US,A)
欧州特許出願公開第0869375(EP,A2)
米国特許第02698872(US,A)
欧州特許出願公開第0989393(EP,A2)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

F01D 25/00
F01D 25/30
F02C 7/00
F02C 9/00
G01K 7/02
G01K 13/02