

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号
特許第7549893号
(P7549893)

(45)発行日 令和6年9月12日(2024.9.12)

(24)登録日 令和6年9月4日(2024.9.4)

(51)国際特許分類		F I	
G 0 1 N	25/18 (2006.01)	G 0 1 N	25/18 J
G 0 1 N	25/16 (2006.01)	G 0 1 N	25/16 A
G 0 1 K	1/14 (2021.01)	G 0 1 N	25/18 D
G 0 1 K	17/20 (2006.01)	G 0 1 N	25/18 E
		G 0 1 K	1/14 L
		請求項の数	21 (全78頁) 最終頁に続く
(21)出願番号	特願2021-576264(P2021-576264)	(73)特許権者	521555557
(86)(22)出願日	令和2年6月30日(2020.6.30)		サーマセンス コーポレーション
(65)公表番号	特表2022-532435(P2022-532435 A)		THERMASENSE CORP.
(43)公表日	令和4年7月14日(2022.7.14)		アメリカ合衆国 ヴァージニア州 240
(86)国際出願番号	PCT/US2020/040266		60, ブラックスバーグ ナンバー31
(87)国際公開番号	WO2021/003140		1, スイート 1050, クラフト ド
(87)国際公開日	令和3年1月7日(2021.1.7)		ライブ 2200
審査請求日	令和4年6月27日(2022.6.27)		2200 Kraft Drive, S
(31)優先権主張番号	62/869,208		uite 1050 #311 Blac
(32)優先日	令和1年7月1日(2019.7.1)		ksburg, VA 24060, U
(33)優先権主張国・地域又は機関	米国(US)	(74)代理人	. S. A.
早期審査対象出願			110003281
前置審査		(72)発明者	弁理士法人大塚国際特許事務所
			ログハニザド, アリ, アール.
			アメリカ合衆国 ヴァージニア州 240
			最終頁に続く

(54)【発明の名称】 非侵襲的熱インタロゲーションのための装置、システム、及び方法

(57)【特許請求の範囲】

【請求項1】

表面及び内部領域を有する体積を有する物体の非侵襲的感知のためのシステムであって、非侵襲的センサであって、

1つ以上の熱流束センサ出力端子を有する熱流束センサと、

1つ以上の温度センサ出力端子を有する温度センサとを含み、

前記非侵襲的センサは、前記物体の前記表面上又はその近くに配置されるように適合され、前記物体の前記内部領域は、対応する内部パラメータと、内部温度分布とによって示される内部特性を有し、

前記熱流束センサは、前記熱流束センサに関連する較正定数、感度定数、較正曲線、又は感度曲線によって前記表面で前記物体から出る又は前記物体に入る熱伝達に関連する電圧を生成するように構成される、非侵襲的センサと、

前記1つ以上の熱流束センサ出力端子と、前記1つ以上の温度センサ出力端子とに結合された回路であって、

1つ以上の特定された時刻において、前記温度センサから、測定された温度信号を受信することと、

1つ以上の特定された時刻において、前記熱流束センサから、測定された熱流束信号を受信することと、

前記測定された温度信号と、前記測定された熱流束信号とに少なくとも基づいて、1つ以上の特定された時刻における前記内部特性のうちの1つ以上を示す推定された量を数

学的に決定することと、

1つ以上の特定された時刻における前記物体の前記内部特性を示す前記推定された量のうちの1つ以上を示す情報を生成することを行うための回路とを備えるシステム。

【請求項2】

請求項1に記載のシステムであって、前記回路は、

前記測定された温度信号と、前記測定された熱流束信号と、前記推定された量のうちの1つ以上と、1つ以上の残りの内部特性が存在する場合に残りの内部特性を示す1つ以上の量とに少なくとも基づいて、1つ以上の特定された時刻における計算されたセンサ温度を決定することと、

差を決定するために、前記計算されたセンサ温度を、前記測定された温度信号に基づく測定された温度と比較することを行うように構成される、システム。

10

【請求項3】

請求項2に記載のシステムであって、前記回路は、前記差を低減するように、前記内部特性のうちの1つ以上を示す前記推定された量を調整するように構成され、

前記差が閾値量未満であるか、又は他のように最小であると判定された場合に、前記内部特性を示す前記推定された量は最適に更新されたとみなされ、前記回路は、前記内部特性を示す前記最適に更新された推定された量を示す情報を生成するように構成される、システム。

【請求項4】

表面及び内部領域を有する体積を有する物体の非侵襲的感知のためのシステムであって、

第1の非侵襲的熱流束センサ - 温度センサ対と、

第2の非侵襲的熱流束センサ - 温度センサ対とを備え、

前記第1及び第2の非侵襲的熱流束センサ - 温度センサ対のそれぞれは、

1つ以上の熱流束センサ出力端子を有する熱流束センサと、

1つ以上の温度センサ出力端子を有する温度センサとを含み、

前記第1及び第2の非侵襲的熱流束センサ - 温度センサ対は、前記物体の前記表面上又はその近くの異なる位置に配置されるように適合され、異なる熱流束環境にさらされ、前記物体の前記内部領域は、対応する内部パラメータと、内部温度分布とによって示される内部特性を有し、

20

前記システムは、前記第1及び第2の非侵襲的熱流束センサ - 温度センサ対のそれぞれの前記1つ以上の熱流束センサ出力端子及び前記1つ以上の温度センサ出力端子に結合された回路であって、

30

1つ以上の特定された時刻において、前記第1の非侵襲的熱流束センサ - 温度センサ対の第1の温度センサから、第1の測定された温度信号を受信することと、

1つ以上の特定された時刻において、前記第1の非侵襲的熱流束センサ - 温度センサ対の第1の熱流束センサから、第1の測定された熱流束信号を受信することと、

1つ以上の特定された時刻において、前記第2の非侵襲的熱流束センサ - 温度センサ対の第2の温度センサから、第2の測定された温度信号を受信することと、

1つ以上の特定された時刻において、前記第2の非侵襲的熱流束センサ - 温度センサ対の第2の熱流束センサから、第2の測定された熱流束信号を受信することと、

40

1つ以上の特定された時刻における前記第1及び第2の非侵襲的熱流束センサ - 温度センサ対の前記温度センサからの前記測定された温度信号と、1つ以上の特定された時刻における前記第1及び第2の非侵襲的熱流束センサ - 温度センサ対の前記熱流束センサからの前記測定された熱流束信号とに少なくとも基づいて、1つ以上の特定された時刻における前記物体の前記内部特性のうちの1つ以上を示す推定された量を数学的に決定することと、

1つ以上の特定された時刻における前記物体の前記内部特性を示す前記推定された量のうちの1つ以上を示す情報を生成することを行うための回路を備えるシステム。

【請求項5】

請求項1乃至4の何れか1項に記載のシステムであって、前記回路は、特定された時刻

50

における前記内部特性のうちの1つ以上を示す推定された初期量、及び／又は特定された時刻における前記内部特性のうちの1つ以上を示す事前に決定された初期量を使用するように構成される、システム。

【請求項6】

請求項1乃至5の何れか1項に記載のシステムであって、前記回路は、前記温度センサと前記物体の前記表面との間の推定された熱接触抵抗に関連する1つ以上の効果を含むように構成される、システム。

【請求項7】

請求項1乃至6の何れか1項に記載のシステムであって、前記回路は、

前記測定された温度信号と、前記測定された熱流束信号と、前記内部特性のうちの1つ以上を示す決定された量とに少なくとも基づいて、1つ以上の特定された時刻における前記内部特性のうちの1つ以上を示す前記推定された量を決定するように構成される、システム。

【請求項8】

請求項1乃至7の何れか1項に記載のシステムであって、1つ以上の非N I T Iベース・デバイスをさらに備え、前記回路は、前記内部特性のうちの1つ以上を示す前記推定された量を決定するために、前記1つ以上の非N I T Iベース・デバイスの1つ以上の出力信号を利用するように構成される、システム。

【請求項9】

表面及び内部領域を有する体積を有する物体の表面上又はその近くに配置されるように適合された非侵襲的センサであって、前記物体の前記内部領域は、対応する内部パラメータと、内部温度分布とによって示される内部特性を有し、前記非侵襲的センサは、

非侵襲的熱流束センサ - 温度センサ対を備え、

前記非侵襲的熱流束センサ - 温度センサ対は、

前記物体の前記表面上又はその近くの位置について測定された熱流束信号を提供するための1つ以上の熱流束センサ出力端子を有する熱流束センサと、

前記物体の前記表面上又はその近くの位置について測定された温度信号を提供するための1つ以上の温度センサ出力端子を有する温度センサとを含み、

前記非侵襲的センサは、前記熱流束センサの熱状態と、前記温度センサの熱状態との間に不整合が存在しないように構成される、非侵襲的センサ。

【請求項10】

表面及び内部領域を有する体積を有する物体の表面上又はその近くに配置されるように適合された非侵襲的センサであって、前記物体の前記内部領域は、対応する内部パラメータと、内部温度分布とによって示される内部特性を有し、前記非侵襲的センサは、

第1の非侵襲的熱流束センサ - 温度センサ対と、

第2の非侵襲的熱流束センサ - 温度センサ対と、を備え、

前記第1の非侵襲的熱流束センサ - 温度センサ対は、

1つ以上の熱流束センサ出力端子を有する第1の熱流束センサと、

1つ以上の温度センサ出力端子を有する第1の温度センサとを含み、

前記第2の非侵襲的熱流束センサ - 温度センサ対は、

1つ以上の熱流束センサ出力端子を有する第2の熱流束センサと、

1つ以上の温度センサ出力端子を有する第2の温度センサとを含み、

前記第1及び第2の非侵襲的熱流束センサ - 温度センサ対は、前記物体の前記表面上又はその近くの異なる位置に配置されるように適合され、異なる熱流束環境にさらされる、非侵襲的センサ。

【請求項11】

請求項9又は10に記載の非侵襲的センサであって、前記内部特性のうちの1つ以上を示す推定された量の決定に利用するための1つ以上の出力信号を提供する1つ以上の非N I T Iベース・デバイスを備える、非侵襲的センサ。

【請求項12】

請求項 1 乃至 8 の何れか 1 項に記載のシステム又は請求項 9 乃至 11 の何れか 1 項に記載の非侵襲的センサであって、前記熱流束センサは、前記物体表面において前記熱流束センサを通じて発生する熱伝達を示す差動電圧を生成するように構成される、システム又は非侵襲的センサ。

【請求項 13】

請求項 12 に記載のシステム又は非侵襲的センサであって、前記差動電圧は、前記熱流束センサに関連する、校正定数、感度定数、校正曲線又は感度曲線によって、前記熱伝達に関連する、システム又は非侵襲的センサ。

【請求項 14】

請求項 1 乃至 8 の何れか 1 項に記載のシステム又は請求項 9 乃至 13 の何れか 1 項に記載の非侵襲的センサであって、前記熱流束センサは、作動サーモパイル技術、薄膜技術、又は 1 つ以上の熱電デバイスに基づく、システム又は非侵襲的センサ。

10

【請求項 15】

請求項 1 乃至 8 の何れか 1 項に記載のシステム又は請求項 9 乃至 14 の何れか 1 項に記載の非侵襲的センサであって、前記熱流束センサは、所与の熱抵抗にわたる温度差を示す電圧出力を提供するように直列に接続された 2 つ以上のサーモカップル接合部を含む、システム又は非侵襲的センサ。

【請求項 16】

請求項 1 乃至 8 の何れか 1 項に記載のシステム又は請求項 9 乃至 15 の何れか 1 項に記載の非侵襲的センサであって、前記温度センサは、サーモカップル、光ファイバ、半導体又はサーミスタ技術に基づく、システム又は非侵襲的センサ。

20

【請求項 17】

請求項 1 乃至 8 の何れか 1 項に記載のシステム又は請求項 9 乃至 16 の何れか 1 項に記載の非侵襲的センサであって、前記非侵襲的センサ、前記第 1 の非侵襲的熱流束センサ - 温度センサ対、又は前記第 2 の非侵襲的熱流束センサ - 温度センサ対を加熱及び／又は冷却するための 1 つ以上の外部熱デバイスをさらに備える、システム又は非侵襲的センサ。

【請求項 18】

請求項 17 に記載のシステム又は非侵襲的センサであって、前記 1 つ以上の外部熱デバイスは、測定された熱流束信号及び／又は測定された温度信号に向けて加熱及び／又は冷却するように構成される、システム又は非侵襲的センサ。

30

【請求項 19】

請求項 9 乃至 18 の何れか 1 項に記載の非侵襲的センサであって、前記非侵襲的センサは、前記物体の前記内部領域の前記内部特性のうちの 1 つ以上を決定するように構成されたシステムにおいて使用可能である、非侵襲的センサ。

【請求項 20】

請求項 9 乃至 19 の何れか 1 項に記載の非侵襲的センサであって、複数の熱流束センサ及び／又は複数の温度センサを含む、非侵襲的センサ。

【請求項 21】

請求項 1 乃至 8 の何れか 1 項に記載のシステムであって、前記回路は、1 つ以上の機械学習技術及び／又は 1 つ以上の熱数学的モデルを用いて、前記内部特性を示す前記推定された量のうちの 1 つ以上を数学的に決定するように構成される、システム。

40

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

関連出願の相互参照

本出願は、2019 年 7 月 1 日に提出された米国仮特許出願第 62 / 869, 208 号への優先権を主張し、この内容は参照により本書に組み込まれる。

【背景技術】

【0002】

温度センサ及び他の熱感知システムは、多くの異なる技術分野及び用途で重要である。

50

特に重要なのは、非侵襲的である温度センサ及び他の熱感知システムである。本出願における技術は、異なる産業にわたって、改良された信頼性、正確性、コスト、複雑性、サイズ、製造の容易さ、使用の容易さ、計算時間、必要とされる処理能力、応答時間、及び適用可能性を提供する非侵襲的熱インタロゲーション装置、システム、及び方法を対象とする。

【0003】

非侵襲的熱インタロゲーション（N I T I）は、熱感知を用いた非破壊試験及び監視を提供する。非侵襲的熱インタロゲーション（N I T I）は、表面温度信号と表面熱伝達（例えば熱流束）信号との同時組合せを用いて行われる。物体又はシステム表面上で同時に測定される場合に、表面温度及び表面熱流束信号は、物体又はシステムの内部領域の内部パラメータ（例えば、熱伝導率、密度、熱容量、対流係数、定常状態熱抵抗など）及び内部温度分布（例えば、内部温度プロファイル）を非侵襲的に決定するために使用されてもよい。物体又はシステムの内部温度分布は、典型的には内部パラメータの関数である。N I T Iを受ける物体又はシステム及び／又はN I T I用途に応じて、内部パラメータは異なりうる。内部パラメータ及び内部温度分布は、物体又はシステムの内部特性として規定される。

10

【0004】

N I T Iは、熱信号が存在する場合に常に物体又はシステムの非破壊試験及び監視を可能にするので、N I T Iは多くの多様な用途で利用されうる。十分な熱信号が存在しない場合に、これらは物体又はシステム表面で生成されうる。

20

【発明の概要】

【0005】

少なくともいくつかの例は、表面及び内部領域を有する体積を有する物体の非侵襲的感知のためのシステムを提供する。前記システムは、1つ以上の熱流束センサ出力端子を有する熱流束センサと、1つ以上の温度センサ出力端子を有する温度センサとを含む非侵襲的センサを備える。前記非侵襲的センサは、前記物体の前記表面上又はその近くに配置されてもよい。前記物体の前記内部領域は、対応する内部パラメータと、内部温度分布とによって示される内部特性を有する。前記1つ以上の熱流束センサ出力端子と、前記1つ以上の温度センサ出力端子とに結合された制御回路は、1つ以上の特定された時刻において、前記温度センサから、測定された温度信号を受信することと、前記1つ以上の特定された時刻において、前記熱流束センサから、測定された熱流束信号を受信することと、前記1つ以上の特定された時刻における前記測定された熱流束に基づいて、前記表面において前記物体から出る又は前記物体に入る熱伝達の大きさを決定することと、前記1つ以上の特定された時刻における前記内部パラメータのそれぞれについて値を決定することと、前記測定された温度信号と、前記測定された熱流束信号と、前記内部パラメータの前記値とに基づいて、前記1つ以上の特定された時刻における前記物体の前記内部領域の内部温度分布を決定することと、前記1つ以上の特定された時刻における前記物体の前記内部領域の前記内部温度分布を示す情報を生成することとを行うように適合される。

30

【0006】

少なくともいくつかの例は、表面及び内部領域を有する体積を有する物体の非侵襲的感知のためのシステムを提供する。前記システムは、1つ以上の熱流束センサ出力端子を有する熱流束センサと、1つ以上の温度センサ出力端子を有する温度センサとを含む非侵襲的センサを含む。前記非侵襲的センサは、前記物体の前記表面上又はその近くに配置されるように適合され、前記物体の前記内部領域は、対応する内部パラメータと、内部温度分布とによって示される内部特性を有する。前記1つ以上の熱流束センサ出力端子と、前記1つ以上の温度センサ出力端子とに結合された制御回路は、1つ以上の特定された時刻において、前記温度センサから、測定された温度信号を受信することと、前記1つ以上の特定された時刻において、前記熱流束センサから、測定された熱流束信号を受信することと、前記測定された温度信号と、前記測定された熱流束信号とに基づいて、前記1つ以上の特定された時刻における前記内部パラメータのうちの1つ以上について、推定された値を

40

50

決定することと、前記１つ以上の特定された時刻における前記内部パラメータについて決定された、前記推定された値のうちの１つ以上を示す情報を生成することとを行うように適合される。

【０００７】

すくなくともいくつかの例は、表面及び内部領域を有する体積を有する物体の非侵襲的感知のためのシステムを提供する。前記システムは、第１の非侵襲的熱流束センサ - 温度センサ対と、第２の非侵襲的熱流束センサ - 温度センサ対とを備える。前記第１及び第２の非侵襲的熱流束センサ - 温度センサ対のそれぞれは、１つ以上の熱流束センサ出力端子を有する熱流束センサと、１つ以上の温度センサ出力端子を有する温度センサとを含む。前記第１及び第２の非侵襲的熱流束センサ - 温度センサ対は、前記物体の前記表面上又はその近くの異なる位置に配置されてもよい。前記物体の前記内部領域は、対応する内部パラメータと、内部温度分布とによって示される内部特性を有する。前記第１及び第２の非侵襲的熱流束センサ - 温度センサ対のそれぞれの前記１つ以上の熱流束センサ出力端子及び前記１つ以上の温度センサ出力端子に結合された制御回路は、１つ以上の特定された時刻において、前記第１の非侵襲的熱流束センサ - 温度センサ対の前記温度センサから、第１の測定された温度信号を受信することと、前記１つ以上の特定された時刻において、前記第１の非侵襲的熱流束センサ - 温度センサ対の前記熱流束センサから、第１の測定された熱流束信号を受信することと、前記１つ以上の特定された時刻において、前記第２の非侵襲的熱流束センサ - 温度センサ対の前記熱流束センサから、第２の測定された熱流束信号を受信することと、前記１つ以上の特定された時刻における前記内部パラメータのそれぞれについて値を決定することと、前記１つ以上の特定された時刻における前記第１及び第２の非侵襲的熱流束センサ - 温度センサ対の前記温度センサからの前記測定された温度信号と、前記１つ以上の特定された時刻における前記第１及び第２の非侵襲的熱流束センサ - 温度センサ対の前記熱流束センサからの前記測定された熱流束信号と、前記１つ以上の特定された時刻における前記内部パラメータの前記値とに基づいて、前記１つ以上の特定された時刻における内部温度分布を決定することと、前記１つ以上の特定された時刻における前記内部温度分布を示す情報を生成することとを行うように構成される。

【０００８】

すくなくともいくつかの例は、表面及び内部領域を有する体積を有する物体の非侵襲的感知のためのシステムであって、第１の非侵襲的熱流束センサ - 温度センサ対と、第２の非侵襲的熱流束センサ - 温度センサ対とを備えるシステムを提供する。前記第１及び第２の非侵襲的熱流束センサ - 温度センサ対のそれぞれは、１つ以上の熱流束センサ出力端子を有する熱流束センサと、１つ以上の温度センサ出力端子を有する温度センサとを含む。前記第１及び第２の非侵襲的熱流束センサ - 温度センサ対は、前記物体の前記表面上又はその近くの異なる位置に配置されてもよい。前記物体の前記内部領域は、対応する内部パラメータと、内部温度分布とによって示される内部特性を有する。前記第１及び第２の非侵襲的熱流束センサ - 温度センサ対のそれぞれの前記１つ以上の熱流束センサ出力端子及び前記１つ以上の温度センサ出力端子に結合された制御回路は、１つ以上の特定された時刻において、前記第１の非侵襲的熱流束センサ - 温度センサ対の前記温度センサから、第１の測定された温度信号を受信することと、前記１つ以上の特定された時刻において、前記第１の非侵襲的熱流束センサ - 温度センサ対の前記熱流束センサから、第１の測定された熱流束信号を受信することと、前記１つ以上の特定された時刻において、前記第２の非侵襲的熱流束センサ - 温度センサ対の前記温度センサから、第２の測定された温度信号を受信することと、前記１つ以上の特定された時刻において、前記第２の非侵襲的熱流束センサ - 温度センサ対の前記熱流束センサから、第２の測定された熱流束信号を受信することと、前記１つ以上の特定された時刻における前記内部パラメータのそれぞれについて初期値を決定することと、前記１つ以上の特定された時刻における前記第１及び第２の非侵襲的熱流束センサ - 温度センサ対の前記温度センサからの前記測定された温度信号と、前記１つ以上の特定された時刻における前記第１及び第２の非侵襲的熱流束センサ - 温度センサ対の前記熱流束センサからの前記測定された熱流束信号と、前記１つ以上の特定された

10

20

30

40

50

時刻における前記内部パラメータの前記値とに基づいて、前記1つ以上の特定された時刻における前記物体の1つ以上の内部パラメータを決定することと、前記1つ以上の特定された時刻における前記物体の1つ以上の内部パラメータを示す情報を生成することとを行うように構成される。

【0009】

少なくともいくつかの例は、内部領域を有する体積を有する物体の表面上又はその近くに配置されてもよい非侵襲的センサを提供し、前記物体の前記内部領域は、対応する内部パラメータと、内部温度分布とによって示される内部特性を有する。前記非侵襲的センサは、前記物体の前記表面について測定された熱流束信号を提供するための1つ以上の熱流束センサ出力端子を有する熱流束センサと、前記物体の前記表面について測定された温度信号を提供するための1つ以上の温度センサ出力端子を有する温度センサとを含む非侵襲的熱流束センサ-温度センサ対を備える。前記熱流束センサ及び前記温度センサは、同じ熱条件にさらされるように構成される。

10

【0010】

少なくともいくつかの例は、表面及び内部領域を有する体積を有する物体の表面上又はその近くに配置されてもよい非侵襲的センサを提供する。前記非侵襲的センサは、第1の非侵襲的熱流束センサ-温度センサ対と、第2の非侵襲的熱流束センサ-温度センサ対とを備える。前記第1及び第2の非侵襲的熱流束センサ-温度センサ対のそれぞれは、1つ以上の熱流束センサ出力端子を有する熱流束センサと、1つ以上の温度センサ出力端子を有する温度センサとを含む。前記第1及び第2の非侵襲的熱流束センサ-温度センサ対は、前記物体の前記表面上又はその近くの異なる位置に配置されるように適合され、前記物体の前記内部領域は、対応する内部パラメータと、内部温度分布とによって示される内部特性を有する。

20

【0011】

本出願で提示される技術のさらなる側面、特徴、及び利点は、添付の図面と併せて読まれる例の以下の説明から明らかになるだろう。

【図面の簡単な説明】

【0012】

【図1】例示的な熱流束センサ実施形態による、厚さ t 、幅 W 、及び長さ H を有する熱流束センサの例を示す。

30

【0013】

【図2A】例示的な実施形態による、熱抵抗層を含む差動サーモパイルの断面を示す。

【0014】

【図2B】例示的な実施形態による、熱抵抗層を含み、製造がより容易でありうる差動サーモパイルの断面を示す。

【0015】

【図3】接合部にわたって熱流束が与えられ、熱フローが、接触スポットを通る伝導に一般に制限される例を示す。

【0016】

【図4】未知の内部特性を有する物体の表面上に配置された熱流束センサ及び温度センサを含み、ヒータ（外部熱デバイス）が熱流束センサ上に配置される例示的なCHFT+実施形態の断面を示す。

40

【0017】

【図5】未知の内部特性を有する物体の表面上に配置された熱流束センサ及び温度センサを含む例示的なCHFT-実施形態の断面を示す。

【0018】

【図6A】熱流束センサと、温度センサと、熱流束センサ及び温度センサ上の断熱片（すなわち、熱流束センサ-温度センサ対）とを含む例示的なCHFT-実施形態の断面を示す。

【0019】

50

【図 6 B】熱流束センサと、温度センサと、熱流束センサ及び温度センサ上の断熱片（すなわち、熱流束センサ－温度センサ対）とだけでなく周囲の物体エリアの一部を含む例示的な C H F T－実施形態の断面を示す。

【 0 0 2 0 】

【図 6 C】熱流束センサと、温度センサと、熱流束センサ及び温度センサ（すなわち、熱流束センサ－温度センサ対）上及びその周囲の断熱片とを含む例示的な C H F T－実施形態の断面を示す。

【 0 0 2 1 】

【図 7 A】熱流束センサと、温度センサと、外部熱デバイス（例えば、ヒータ）とを含む例示的な C H F T＋実施形態の断面を示す。

【 0 0 2 2 】

【図 7 B】熱流束センサと、温度センサと、熱流束センサ－温度センサ対に熱事象を提供する外部熱デバイス（例えば、ヒータ）とを含む例示的な C H F T＋実施形態の断面を示す。

【 0 0 2 3 】

【図 7 C】温度センサと、熱流束センサと、ヒータと、対応する出力端子とを含む例示的な C H F T＋実施形態を示す。

【 0 0 2 4 】

【図 7 D】熱流束センサと、温度センサと、外部熱デバイス（例えば、ヒータ）とを含み、温度センサが、熱流束センサと外部熱デバイスとの間に位置する例示的な C H F T＋実施形態の断面を示す。

【 0 0 2 5 】

【図 7 E】熱流束センサと、温度センサと、外部熱デバイス（例えば、ヒータ）とを含み、温度センサが熱流束センサ内に位置する例示的な C H F T＋実施形態の断面を示す。

【 0 0 2 6 】

【図 7 F】熱流束センサと、温度センサと、外部熱デバイス（例えば、ヒータ）とを含み、熱流束センサと温度センサとが基板によって断熱される例示的な C H F T＋実施形態の断面を示す。

【 0 0 2 7 】

【図 7 G】熱流束センサと、温度センサと、外部熱デバイス（例えば、ヒータ）とを含み、熱流束センサと温度センサとは基板によって断熱され、温度センサは熱的適合性材料によって囲まれる例示的な C H F T＋実施形態の断面を示す。

【 0 0 2 8 】

【図 8】C H F T－で N I T I を実行するための例示的な N I T I システムを示す機能ブロック図である。

【 0 0 2 9 】

【図 9】C H F T＋で N I T I を実行するための例示的な N I T I システムを示す機能ブロック図である。

【 0 0 3 0 】

【図 1 0】測定熱流束と、測定温度と、物体の内部パラメータの決定された値とを使用して、1つ以上の指定された時刻における物体の内部温度分布を含む、物体の1つ以上の内部特性を決定するための N I T I センサを含む、例示的な N I T I システムにおける制御回路によって実行される非限定的な例示的な手順を概説するフローチャートである。

【 0 0 3 1 】

【図 1 1】N I T I システム内の制御回路によって実行されるパラメータ推定方式のための例示的な手順を示すフロー図である。

【 0 0 3 2 】

【図 1 2】未知の内部特性を有する物体の表面上に配置された例示的な D U O (並列センサ対) C H F T＋(ヒータ付き) 実施形態の断面を示す。

【 0 0 3 3 】

10

20

30

40

50

【図13】各センサ・ノード上の異なる断熱性を有する例示的なD U O (並列センサ対) C H F T－実施形態の断面を示す。

【0034】

【図14】1つのC H F T－ノードが断熱性を組み込んでおり、他方が露出されている例示的なD U O (並列センサ対) C H F T－実施形態の断面を示す。

【0035】

【図15】1つのセンサ・ノードがC H F T＋を組み込み、1つがC H F T－を組み込む例示的なD U O (並列センサ・ノード) C H F T＋／－感知実施形態の断面を示す。

【0036】

【図16】いずれのセンサ・ノードも断熱性を有さない例示的なD U O (並列センサ対) C H F T－実施形態の断面を示す。

【0037】

【図17】物体の1つ以上の内部特性を決定するために2つの非侵襲的熱流束センサ－温度センサ対が並列に動作するN I T Iを実行するための例示的なN I T Iシステムを示す機能ブロック図である。

【0038】

【図18A】制御回路によって実行される差分ベースのデータ処理方法に関連する例示的な手順を示すフロー図である。

【0039】

【図18B】定常状態条件において制御回路によって実行される差分ベースのデータ処理方法に関連する例示的な手順の例を示すフロー図である。

【0040】

【図19A】制御回路によって実行される商ベースのデータ処理方法に関連する例示的な手順を示すフロー図である。

【0041】

【図19B】定常状態条件において制御回路によって実行される商ベースのデータ処理方法に関連する例示的な手順を示すフロー図である。

【0042】

【図20】物体の1つ以上の内部パラメータを決定するための2つの非侵襲的熱流束センサ－温度センサ対を使用する例示的なD U O N I T I実施形態のための非限定的で例示的な手順を概説するフローチャートである。

【0043】

【図21】物体の内部温度分布を決定するための2つの非侵襲的熱流束センサ－温度センサ対を使用する例示的なD U O N I T I実施形態のための非限定的で例示的な手順を概説するフローチャートである。

【0044】

【図22】組織における血液灌流（フロー）への例示の用途を示す。

【0045】

【図23】実験データと共に使用される場合の最適灌流（w）値を決定するためのパラメータ推定方式の能力を示すグラフである。

【0046】

【図24】例示的なC H F T＋血液灌流の実施形態について、計算された（出力）センサ温度曲線と測定された（入力）センサ温度との間の整合の例を示すグラフである。

【0047】

【図25】例示的なC H F T＋血液灌流の実施形態について、計算された（出力）センサ温度曲線と測定された（入力）センサ温度との間の不整合の例を示すグラフである。

【0048】

【図26】例示的な血液灌流用途における、時間にわたる内部パラメータに対する計算された（出力）センサ温度曲線の異なる感度を示すグラフである。

【0049】

10

20

30

40

50

【図27】 灌流擬似組織の灌流速度を測定するために使用される場合の、例示的なD U O C H F T + 実施形態及び例示的な周期的C H F T + 実施形態の結果を示すグラフである。

【0050】

【図28】 灌流擬似組織の中心温度を測定するために使用される場合の、例示的なC H F T + 実施形態（能動的温度測定）の結果を示すグラフである。

【0051】

【図29】 灌流擬似組織の中心温度を測定するために使用される場合の、例示的なC H F T - 実施形態（受動的温度測定）の結果を示すグラフである。

【0052】

【図30】 灌流擬似組織の中心温度を測定するために使用される場合の、例示的なC H F T + Z H F 実施形態（ゼロ熱流束温度測定）の結果を示すグラフである。

10

【0053】

【図31】 パイプ又は他の導管内を流れる流体に関連する1つ以上のパラメータを決定するための本技術の別の用途を示す。

【0054】

【図32】 銅パイプ内の流体フローに関する実験的測定値で開発された例示的な相関を示すグラフである。

【0055】

【図33】 実験データとともに使用された場合の最適対流係数（h）値の決定におけるパラメータ推定方式の能力を示すグラフである。

20

【0056】

【図34】 銅配管の実施形態における、例示的なC H F T + 流体フローについて、計算された（出力）センサ温度曲線と測定された（入力）センサ温度との間の整合の例を示すグラフである。

【0057】

【図35】 銅パイプ内の流体フローの内部温度を測定するために使用される場合の例示的なC H F T + 実施形態（能動的熱測定）の結果を示すグラフである。

【0058】

【図36】 銅パイプ内の流体フローの内部温度を測定するために使用される場合の例示的なD U O C H F T + / - 実施形態（1つのセンサ・ノードがヒータを有し、1つのセンサ・ノードが有さない）の結果を示すグラフである。

30

【0059】

【図37】 C P V C パイプ内の流体フローの内部温度を測定するために使用される場合の例示的なD U O C H F T + / - 実施形態（1つのセンサ・ノードがヒータを有し、1つのセンサ・ノードが有さない）の結果を示すグラフである。

【発明を実施するための形態】

【0060】

以下、いくつかの具体例について説明する。本発明は、これらの特定の例に限定されないことが理解されるだろう。

【0061】

40

以下の説明は、限定ではなく説明の目的で例示的な実施形態を記載する。しかし、当業者であれば、これらの特定の詳細とは別に、他の例示的な実施形態が採用されてもよいことを理解するだろう。場合によっては、不必要な詳細で説明を曖昧にしないように、周知の方法、インタフェース、回路、及びデバイスの詳細な説明が省略される。いくつかの図では、個々のブロックが示されている。当業者は、これらのブロックの機能が個々のハードウェア回路を使用して、適切にプログラムされたデジタル・マイクロプロセッサ又は汎用コンピュータと共にソフトウェア・プログラム及びデータを使用して、及び／又は特定用途向け集積回路（ASIC）を使用して、及び／又は1つ以上のデジタル信号プロセッサ（DSP）を使用して実施されてもよいことを理解するだろう。ソフトウェア・プログラム命令及び／又はデータは非一時的なコンピュータ可読記憶媒体、1つ以上のクラウド

50

、1つ以上のサーバに記憶されてもよく、命令がコンピュータ又は他の適切なプロセッサ制御によって実行される場合に、コンピュータ又はプロセッサは、これらの命令に関連付けられた機能を実行する。

【0062】

信号という用語は、本書では電氣的、電子的、電磁氣的、磁氣的、又は機械的（例えば、超音波信号）な形式で、1つの位置又は領域から別の位置又は領域にエネルギー及び／又は情報を伝達する任意の信号を包含するために使用される。信号は電気導体又は磁気導体によって、1つの位置又は領域から別の位置又は領域に伝導されてもよいが、信号という用語は、電氣的、電子的、電磁氣的、磁氣的、又は弾性的効果に起因して、非導電性領域を通じて伝達される光及び他の電磁的形式の信号及び他の信号も含む。信号は、アナログ信号とデジタル信号との両方を含む。アナログ電気信号は、電圧のような連続的に可変な物理量の形式の情報を含む。デジタル電気信号は、例えば電圧でありうる物理的特性の離散値の形式の情報を含む。

10

【0063】

構成要素、層、又は他の構造は、それが熱エネルギー（例えば、伝導、放射、及び／又は対流によって伝達される熱エネルギー）を1つの位置又は領域から別の位置又は領域へ十分に伝導し、他の位置又は領域における動作が熱エネルギーによって影響されうるならば、熱伝導性、すなわち熱的に伝導する。感知という用語は、物理的な刺激から情報を取得することを意味し、したがって、感知することは、検出、測定などの動作を含む。熱感知は、分子、原子、又は主題のより小さい成分の熱、温度、又はランダムな運動エネルギーのような熱刺激の感知である。熱センサは熱感知を行い、熱エネルギーに関連する信号を生成する電子デバイスである。熱エネルギーが情報を含むならば、熱センサ又は熱エネルギーを検出する熱センサの組合せは、情報を感知することができてよい。文脈に応じて、本出願で使用されるように、異なる形式及び／又はタイプの熱エネルギー及び関連する熱信号は、熱伝達、熱伝達送信号、温度、及び温度信号とみなされてもよい。

20

【0064】

文脈で別段に示されない限り、回路類及び回路という用語は、1つ以上の電子構成要素と一緒に、又は関連するように動作するのに十分な電気接続を有する構造を指す。ある場合には、回路の項目が複数の回路を含みうる。プロセッサを含む回路の項目は、時にはハードウェア構成要素とソフトウェア構成要素とに分けられてもよく、この文脈では、ソフトウェアは、プロセッサの動作を制御する、又は動作中にプロセッサによってアクセスされる、記憶されたデータを指し、ハードウェアは、データを記憶し、送信し、データ上で動作する構成要素を指す。回路は、その動作又は他の特性に基づいて記述されうる。例えば、制御動作を行う回路は制御回路と呼ばれることもあり、処理動作を行う回路は処理回路と呼ばれることもある。

30

【0065】

一般に、センサ、プロセッサ、及び他のこのような項目は、これらが自動的に又は部分的に自動的に動作されるシステムに含まれてもよい。システムという用語は、一緒に動作を実行できる2つ以上の部分又は構成要素の組合せを指す。システムは、その動作によって特徴付けられてもよい。

40

【0066】

集積構造とは、微細加工又は同様のプロセスによって製造された電気部品及び接続部を有する構造である。集積構造は例えば、これが製造された基板、又は別の適切な支持構造の表面又はその上にあってもよい。他の構成要素は、他のタイプのプロセスによって製造される個別の構成要素のような、集積構造を有する同じ支持構造上にあってもよい。

【0067】

熱ベースの感知及び監視は、典型的には温度センサ及び／又は温度信号のみで行われる。例えば、物体又はシステムの内部温度を決定するために、侵襲的温度プローブが、所定の関心深さに挿入される。一例では、パイプ又は導管内の内部フロー温度を測定するために、サーモウエルに挿入された侵襲的温度プローブが使用される。サーモウエルの配置は

50

典型的に、サーモウェルを内部流体フロー内に配置するために、パイプ又は導管表面が穿孔され、及び／又は他の方法で貫通される複雑な手順を必要とする。その後、温度センサ（例えば、サーモカップル、抵抗温度デバイス（RTD）、サーミスタ、温度計など）が、温度ウェル内に挿入され、そこで流体フローから保護される。サーモウェルの熱容量に起因して、その中の温度センサの応答時間は遅くなる。さらに、サーモウェル壁はパイプ又は導管から（又は導管に）熱を伝導しうるので、温度センサの精度は悪影響を受けるかもしれない。典型的には、流体フロー温度を測定するこのアプローチは、例えばパイプ又は導管の表面温度測定値を測定するよりも正確である。しかし、このような技術の侵襲的性質に起因して、これらの使用の前に多くの設計上の考慮が典型的に行われる。これらの設計上の考慮は多くの用途にとって複雑であり、費用がかかる可能性がある。例えば、サーモウェルの材料及び／又は設計特性は、用途及び広範な標準（例えば、米国試験材料協会（ASTM）標準）に準拠する必要性に基づいて異なりうる。さらに、サーモウェルの侵襲的性質は例えば、腐食及び／又は構造的応力及び振動を生じうる高エネルギー流体フローへの長時間の曝露に起因して、複雑な長期保守を結果として生じる。

【0068】

侵襲的プローブが物体及び／又はシステム内部温度測定のために使用される場合の別の熱ベースの感知の例は、中核体温測定である。例えば、ヘルスケアにおいて、リアルタイムの中核体温測定の正確な方法として利用され、受け入れられている現在の方法は例えば、食道、直腸、及び肺動脈ベースの温度測定である。これらの方法のすべては、体内の異なる位置に配置される侵襲的でしばしば不快なプローブを利用する。これらの侵襲的な性質のせいで、このような方法は、感染及び／又は他の合併症をもたらしうる。このような方法の侵襲的性質はまた、測定を行うことができる場所及び時間の範囲を制限する。例えば、侵襲的プローブは患者が麻酔又は他の類似の処置を受けていない限り、めったに使用されない。侵襲的プローブはまた、着用可能な技術又はデバイスには適していない。

【0069】

侵襲的内部温度測定技術の限界を前提として、代替的なアプローチは表面及び／又は他の外部温度読取値（例えば、周囲温度）に基づいて、物体又はシステムの内部温度測定を行うことでありうる。しかし、このアプローチは典型的に不正確な測定をもたらし、このような非侵襲的な温度測定値に基づいて内部温度測定値を決定する試みにおいて、複雑なハードウェア及びソフトウェア・システムを必要とするかもしれない。いくつかの実施形態では、物体又はシステム表面上又はその近傍、及び／又は物体又はシステムの表面上又はその近傍に配置されたデバイス内に複数の温度センサが使用されうる。さらに、1つ以上の熱較正構成要素（例えば、断熱片、正確な温度センサなど）が必要とされうる。これは、更に、入り組んだ及び／又は複雑な測定システムをもたらす。他の実施形態は、1つ以上の制御システム、1つ以上のヒータ、1つ以上のクーラ、及び／又は複数の温度センサを含んでもよい。これらの実施形態は例えば、内部温度測定のためのゼロ熱流束環境を生成し、決定するように設計されてもよい。このような非侵襲的アプローチは典型的に、特に変化する又は極端な熱条件において、遅く、不正確である。さらに、場合によっては、正確な内部温度測定のために、センサ及び／又はデバイスの配置は物体又はシステム表面上の特定の領域に限定されうる。例えば、中核体温測定に関して、センサ及び／又はデバイスの配置は身体上の特定の補助位置（例えば、腋窩又は前頭部）に限定されてもよい。さらに、ハードウェアの複雑さに起因して、実施形態は大きなフォームファクタに関連するかもしれない、その結果、多くの用途にとって不便である。例えば、中核体温測定に関して、大きなフォームファクタは、着用可能な用途には実用的ではない。非侵襲的な内部パイプ又は導管温度測定に関して、大きなフォームファクタは、特定の位置、例えば、パイプ表面と周囲の断熱材との間にセンサ及び／又はデバイスを取り付けることを妨げうる。最後に、このようなシステムの複雑さは、製造コストの増加とだけでなく、製造の困難性をもたらすことがある。

【0070】

他の熱ベースの感知用途は、風速測定を介して内部流体フローを決定するために温度ベ

ースの信号を使用してもよい。このアプローチは、確立された相関を介して測定温度信号に対応する流体フローの測定を行うために、内部プロービングを必要とする。反対に、熱分散流量計は、パイプ又は導管の表面上の温度センサを使用する非侵襲的システムであり、その間でヒータがパイプ／導管表面に熱エネルギーを提供する。加熱素子の前後に配置された温度センサ間の温度差は、内部流体フロー量と相関している。しかし、熱分散流量計は、断熱材で作られたパイプでは適切に機能しない。さらに、これらは、異なる条件で使用される場合、不正確さの影響を受けやすい。何故ならば、ヒータを介してパイプ又は導管に入る特定の量の熱エネルギー（すなわち、熱伝達）が不明であり、基礎となる仮定で推定されうるのみであるからである。したがって、熱分散流量計は、典型的には特定の条件及びユースケースのために較正される。

10

【0071】

表面及び／又は内部温度測定値を使用して、物体又はシステム表面熱伝達（例えば、熱流束）を予測（例えば、解析的に決定）するために、他の熱ベースの技術が使用されうる。このような技術は、予測された表面熱伝達（例えば、熱流束）及び表面又は内部温度信号に基づいて、物体又はシステムの内部特性を決定するためにさらに使用されてもよい。しかし、これらの技術は、測定された温度信号からの熱伝達（例えば、熱流束）を決定する際に必要とされる数学的積分に起因して、精度が悪い、分解能が低い、処理時間が長くなる、ノイズ増幅が生じるなどのような多くの制限を有しうる。

【0072】

例えば、物体又はシステムの内部特性を決定するために、物体又はシステムの決定された表面熱伝達（例えば、熱流束）が、測定表面熱伝達と（例えば、熱流束センサを介して）比較されてもよい。ここでも、温度測定値に基づく熱伝達（例えば、熱流束）予測の制限に起因して、物体又はシステムの内部特性のためのこのような技術を介して決定される値は不正確であり、用途のために実用的でない場合がある。さらに、このような技術が使用される場合、表面熱伝達が決定される測定温度（例えば、表面温度）と、物体又はシステムの測定熱伝達（例えば、表面熱流束）との間に不整合が存在しうる。例えば、不整合は、例えば熱流束センサを介して、物体又はシステム表面で測定された熱伝達（例えば、熱流束）が、表面温度センサの位置で生じる熱伝達（例えば、熱流束）と同じでない場合に生じうる。これは、例えば、熱流束センサが受ける同一の熱的（例えば、熱伝達及び／又は温度）条件を受けない、熱流束センサの近くに位置する表面温度センサによって引き起こされうる。他の例では、温度センサは熱流束センサの上又は近くに配置されるかもしれないが、熱流束センサ感知エリアの外側の位置に配置されるかもしれず、これによって、測定値の不整合も生じうる。同様の問題は例えば、熱流束センサ感知エリア上又はその近くに配置されるが、例えば、その設計（例えば、厚さ）及び／又は材料の結果として、熱流束センサと物体／システム表面との間の不十分な接触を引き起こす温度センサを使用する場合に生じうる。この例では、測定温度が表面温度の正確な表現ではなく、及び／又は測定熱伝達が物体／システム表面で何が起きているか、及び／又は温度センサによって経験されているかについて現実的ではないため、不整合が生じる。他の例では、熱流束センサ及び温度センサ及び／又はその周囲を構成するために使用される材料が十分に異なっているかもしれず（例えば、異なる熱抵抗値）、均一な熱条件に対して不均一な応答を生じるかもしれない。これもまた、熱流束センサ出力と温度センサ出力との間の不整合をもたらすかもしれない。

20

30

40

【0073】

別の例では、熱流束センサと物体／システム表面との間に適切な接触が確立される熱流束センサ感知エリア上に、例示的な薄い温度センサである薄膜サーモカップルが配置されうる。この場合、薄膜サーモカップル温度センサは、上述の例示的な問題（例えば、厚さに起因する不十分な接触）のいずれも生成せず、熱流束センサと同じ熱（例えば、熱伝達及び／又は温度）条件にさらされるが、熱エネルギーがサーモカップル材料及び／又は出力端子（例えば、サーモカップル・リード）を介してサーモカップル接合部に伝導される（すなわち、出るか入る）ことに起因して、測定温度が不正確である熱シャントを経験し

50

うる。このような場合、測定温度は、熱流束センサ感知エリアで、又はその近くで経験される実際の温度よりも低くも高くもなりうる。これらの非限定的かつ例示的な条件のすべては、熱ベースの感知技術を使用する場合、物体又はシステムの内部特性を正確に決定するための潜在的な問題である。

【0074】

熱ベースの感知技術における熱伝達（例えば、熱流束）測定値の使用に関する問題は、非効率性である。熱伝達は、従来、温度勾配の結果として理解され、説明されている。この従来のアプローチは非効率的で不正確な熱伝達（例えば、熱流束）測定技術、並びに熱伝達（例えば、熱流束）と温度との差の間の一般的な混乱をもたらすかもしれない。例えば、熱伝達を測定する1つの方法は、1つ以上の温度センサ、例えば、サーモカップル、RTD、負又は正の温度係数（NTC）センサ、サーミスタなどを、層状熱流束ゲージ、あるタイプの1次元平面（すなわち、平坦）ゲージを生成するために、何らかの種類の断熱材料（すなわち、熱抵抗層）のいずれかの側に使用してもよい。この例示的な方法では、断熱材料の両側の絶対温度の決定（例えば、平均）が測定され、これらの間の差異が、較正された、又は他のように決定された熱抵抗値を用いて、断熱材料を通して生じる熱伝達の量を判定するために使用される。別の例示的なアプローチでは、較正された断熱材料（すなわち、熱抵抗層）の両側（例えば、上部及び下部）にサーモカップルが配置され、サーモカップル対を形成することでありうる。サーモカップル対は、直列に接続された場合、サーモカップル対の出力が、熱抵抗層にわたる温度差、及び熱抵抗層を通して生じる熱伝達（例えば、熱流束）を示す（例えば、比例する）差動電圧となるように配置されてもよい。これらの例示的なアプローチは、遅く、不正確で、高コストで、多重較正を必要とし、製造が困難でありうる大きな熱流束デバイス（すなわち、熱流束チャンネル）をもたらさうる。

【0075】

熱ベースの感知技術における別の欠点は、熱接触抵抗を決定できないか、又は他のように考慮できないことである。これは、熱ベースの感知及び監視の精度に影響を及ぼさうる誤った表面温度測定値につながる。しかし、熱ベースのセンシングを実行する際の熱接触抵抗のモデル化及び／又は決定は、困難かつ不明瞭でありうる。これは、温度信号のみを用いて熱接触抵抗を決定すること及び／又は温度信号に基づいて熱伝達を予測する方法に関連する複雑さ及び不正確さに部分的に起因する。

【0076】

本出願に記載される技術はこれらの技術的問題を解決し、以下の例示的な技術的利点を与える。最も重要なことに、表面温度の大きさに加えて、本出願に記載される技術は、熱ベースの感知及び／又は監視ルーチン（すなわち、技術）の一部として、物体及び／又はシステム表面に出入りする熱伝達（例えば、熱流束）の大きさを提供する。この熱伝達（例えば、熱流束）の大きさは、異なる用途に対して異なりうる1つ以上の熱数学的モデルにおける直接入力及び／又は境界条件として使用される。入力及び／又は直接境界条件としての熱伝達（例えば、熱流束）の大きさは、正確かつロバストな熱感知及び監視（すなわち、インタロゲーション）技術を可能にする。

【0077】

本技術は、1つ以上の熱流束センサを介して熱伝達（例えば、熱流束）の測定を実行する。本出願の目的のために、熱流束センサという用語は、センサを通して流れる熱伝達（すなわち、熱エネルギー）の結果である差動電圧出力信号を使用して熱伝達（例えば、熱流束）を測定するように設計されたセンサを指す。熱伝達の測定の非限定的な例は、単位時間当たりの単位面積当たりの表面に出入りする熱エネルギーの量として規定される熱流束であり、 W/m^2 のSI単位で測定されうる。熱流束センサは典型的に、熱流束センサ差電圧出力信号を、それを通して生じる熱伝達（例えば、熱流束）に直接関連付ける較正定数（すなわち、感度値）を有する。較正定数は、センサ動作温度によって異なってもよく、その影響はセンサ動作温度に基づいて較正定数を特定する決定された較正曲線を介して考慮されうる。この出願に関連するように、熱流束センサと熱流束デバイス、熱流束

チャネルなどとの間の区別に留意することが重要である。熱流束センサは、典型的には薄く、その設計の結果として応答時間が速い。これは、精度の向上、より小さいフォームファクタ、及び他の熱伝達測定技術によって実現されない口バストな測定能力を含む、例示的な利点を提供する。

【0078】

さらに、本出願に記載された技術は、温度センサが熱流束センサに近接している（例えば、熱流束センサ感知エリアの隣、上、又は近くなど）かにかかわらず、物体又はシステムの測定温度（例えば、表面温度）と測定熱伝達（例えば、表面熱流束）との間に不整合が存在しないことを保証する（すなわち、熱流束センサ及び温度センサは、同じ熱条件にさらされる）。例えば、可能な場合に、熱流束センサと物体／システム表面との間の適切な接触を維持しながら、温度センサが熱流束センサ感知エリア上又はその近くに配置されてもよく、適用可能な場合には、構築に使用される材料の熱シャント及び／又は熱均質性に関連する可能な影響のために設計されてもよい。他の例示的な実施形態では、温度センサは、熱流束センサ及び／又は熱流束センサ感知エリアの上又は近く（例えば、それに隣接して）に配置されてもよく、熱流束センサと温度センサとの間の同じ熱（例えば、熱伝達及び／又は温度）条件を保証する材料によって囲まれ、及び／又はそれと接触してもよい。

【0079】

この出願における技術のもう1つの大きな利点は、温度センサと物体又はシステム表面との間の熱接触抵抗を容易かつ迅速に決定する能力である。これは、特に、熱接触抵抗の影響が無視できない及び／又は予測できない例示的な用途において、熱感知及び監視の精度及び有効性を改善する。

【0080】

本出願における技術の別の主要な利点は、非侵襲的であり使用が簡単であることである。例えば、侵襲的技術に必要とされる広範な設計考慮又は予防措置が必要とされない。さらに、本技術は、侵襲的が許容される用途に限定されるものではない。

【0081】

本出願における技術のさらなる利点は、最小の処理時間及び低減された処理電力が必要とされることを含む。この利点は、熱接触抵抗を決定する高速で精密化された方法を取り入れるだけでなく、熱流束境界条件を使用することに部分的に起因する。熱伝達（例えば、熱流束）測定のために設計されたセンサに対する較正ニーズの減少は別の利点である。例えば、この出願における技術は典型的に、熱流束センサを介した熱伝達測定のための1つの較正定数（すなわち、感度値）のみを必要とする。

【0082】

この出願の技術は、物体及び／又はシステムの1つ以上の内部特性を非侵襲的に決定するために、熱流束及び温度センサを同時に使用することに基づく。物体及び／又はシステムは、固体物に限定されず、例えば、流体（例えば、水、空気など）又は他の材質、例えば、冶金粉末、エポキシ、炭素繊維複合材料なども含む。簡単にするために、本出願で使用する物体という用語はシステムを含む。例えば、内部を流体が流れるパイプが物体となる。非侵襲的熱インタロゲーション（NIT I）という用語は、本書では、表面熱流束と表面温度測定との同時の組み合わせに基づくセンサ技術を指すために使用される。物体上に置かれると、NIT Iセンサは、表面熱伝達（例えば、熱流束）と表面温度信号との1つ以上の同時の組み合わせを測定し、これらは、デジタル形式に変換され、物体の1つ以上の内部特性を決定するために処理される。所与の測定について、本出願で 사용되는同時組み合わせという用語は、ある時間範囲内（すなわち、特定された量の時間内）で測定される1つ以上の表面熱伝達（例えば、熱流束）及び表面温度信号を指す。時間範囲は、単一の時刻（すなわち、特定された時刻）を含んでもよい。簡単にするために、本書で使用する特定された時間という用語は、時間範囲（すなわち、指定された量の時間）だけでなく、単一の時刻を含むものとして規定される。

【0083】

N I T I 技術の非限定的な用途は、物体（例えば、哺乳動物、非哺乳動物、肉、パイプ／導管、電力変圧器、材木／木材、壁、機械、バッテリーなど）の内部温度分布測定、物体（例えば、哺乳動物、非哺乳動物、肉、パイプ／導管、電力変圧器、材木／木材、壁、機械、電池など）の内部パラメータ測定、組織の血液灌流（フロー）測定、組織潰瘍の予防及び／又は監視、出血の検出及び／又は監視、震盪の検出及び／又は監視、組織の水分補給測定、代謝熱生成、運動選手の能力監視、カロリー消費の測定、睡眠監視、体内リズムの監視、哺乳動物の排卵の予測及び／又は検出、熱中症の監視及び／又は予防、鎌状細胞貧血の検出及び／又は監視、心臓血管の健康状態、皮膚弁及び／又は移植片の監視、疾患／病気予測、監視、及び／又は検出（例えば、アルツハイマー、パーキンソン、癌など）、パイプ及び／又は導管における流量測定、パイプ及び／又は導管内のエネルギー測定、パイプ／導管凍結防止、パイプ／導管解凍、H V A C 凍結／解凍検出、H V A C システム監視、H V A C 冷媒レベル監視、漏れ検出（例えば、パイプ／導管水漏れ、H V A C 冷媒漏れなど）、温水ヒータ監視、熱交換器監視、腐食検出及び／又は測定（例えば、パイプ／導管腐食など）、汚れ検出及び／又は測定（例えば、パイプ／導管汚れなど）、フローレベル検出、存在及び／又は動き検出、半導体ハードウェア監視、ヒートシンク性能監視、熱界面材料監視、熱抵抗測定、建物断熱測定、物体及び／又は材料（例えば、冶金粉末、エポキシ、炭素繊維複合材料など）の密度、熱容量、体積熱容量、熱伝導率、熱慣性、熱浸出率などの測定、水和／含水率測定、対流熱伝達係数測定、移流熱伝達係数測定、熱処置、熱安定性、熱処理、熱快適性、建物の熱性能、精密農業、スマートフォーム、食品加工、物体の凍結、物体の解凍、冶金処理、3 D 印刷、物体の品質制御、スマートビルディング、効率監視、物体の過熱防止、物体（例えば、機械、ギアボックス、コンプレッサ、ファン、電気機械システムなど）故障検出及び／又は予測／予防、高度な温度制御、電池性能監視（例えば、リチウムイオン電池の残量の健康状態など）、電池熱量測定、モノのインターネット（I o T）、ウェアラブル・センサ、予測分析、規範分析、記述分析、人工知能、及び研究開発を含むがこれらに限定されない。。

【0084】

本出願で使用されるように、物体の内部領域の内部温度分布（すなわち、内部温度分布）という用語は、1つ以上の特定された時刻における物体内の特定の深さでの単一の温度、1つ以上の特定された時刻における物体内の深さの関数としての複数の温度、1つ以上の特定された時刻における物体内の特定の深さでの単一の平均温度、1つ以上の特定された時刻における物体内の深さの関数としての複数の平均温度、1つ以上の特定された時刻における物体内の単一の最高又は最低温度、1つ以上の特定された時刻における物体内の複数の最高又は最低温度、1つ以上の特定された時刻における物体内の単一の最高又は最低平均温度、又は1つ以上の特定された時刻における物体内の複数の最高又は最低平均温度を含む。さらに、物体の内部領域の内部温度分布は、物体表面温度の大きさを含むように規定される。例えば、内部温度分布は、物体表面（すなわち、0の深さ（x））において、1つ以上の特定された時刻に評価されてもよい。

【0085】

本出願で使用されるように、物体の内部領域の内部パラメータ（すなわち、内部パラメータ）という用語は、物体の1つ以上の熱的、物理的、機械的などの特性を含む。例えば、物体の内部パラメータは、物体の熱伝導率、物体の密度、物体の熱容量、物体の体積熱容量、物体の熱拡散率、物体の熱慣性、物体の熱膨張率、物体の定常状態熱抵抗、物体の内部又は外部対流係数、物体の内部又は外部移流係数、物体の厚さ、物体の体積、物体の質量、物体の断面積、物体の多孔度、物体の状態（例えば、液体、固体、気体など）、物体の表面からの関心深さなどを含んでもよい。いくつかの内部パラメータは、内部パラメータの組み合わせ（例えば、2つ以上の内部パラメータの商及び／又は積）に基づいてもよい。さらに、N I T I 実施形態及び／又は用途のために、物体のすべての内部パラメータが利用され、及び／又は必要とされるわけではない。簡単にするために、本出願で使用されるような内部パラメータという用語は、物体に対して実行されるN I T I 実施形態に必要及び／又は所望される1つ以上の内部パラメータ（すなわち、対応する内部パラメータ

タ)を含む。

【0086】

N I T I センサの例示的な実施形態

N I T I のための例示的なセンサ実施形態（すなわち、N I T I センサ）は、1つ以上の熱流束センサ及び1つ以上の温度センサを含む。同じ熱（例えば、熱伝達及び／又は温度）条件にさらされ、1つ以上の特定された時刻に同時に測定を行う熱流束センサ及び温度センサは、熱流束センサ - 温度センサ対（すなわち、センサ対）と呼ばれる。N I T I センサはまた、N I T I のために意図された制御回路と共に使用される外部熱デバイスを含んでもよい。

【0087】

他の例示的なセンサ実施形態では、オプションの外部熱装置が、N I T I センサの片側に熱エネルギー源を生成し、これはN I T I センサを通して、測定が行われている物体に移動する。他の例示的な実施形態では、オプションの外部熱装置が、N I T I センサの片側に熱エネルギー・シンク（すなわち、ヒートシンク）を生成し、これは測定が行われている物体から、N I T I センサを通して、ヒートシンクへの熱伝達を引き起こす。外部熱デバイスは、N I T I が熱事象（加熱及び／又は冷却）を生成することを意図された制御回路と共に使用されるヒータ及び／又はクーラ（例えば、ペルチェ・デバイス）であってもよく、その結果、熱伝達（例えば、熱流束）及び温度信号の異なる同時組み合わせが物体表面で生成され、取得（例えば、測定）され、処理されうる。外部熱デバイスは、どのように（定常、周期、サイクルなど）動作してもよい。いくつかの例示的な実施形態では、外部熱デバイスは、時間にわたって物体表面における周期的な（例えば、正弦波の）温度及び／又は熱流束条件を提供するために使用されてもよい。さらなる例示的な実施形態は、物体の1つ以上の内部特性を決定するために、記載されたN I T I 技術のうちの1つ以上と共に位相角決定技術を使用する。

【0088】

典型的には、外部熱デバイスは、熱流束センサ - 温度センサ対の全体を包含するエリアに熱事象を提供するように適合され、少なくとも、熱流束センサ感知エリア全体が熱事象にさらされる。他の実施形態では、外部熱デバイスは、熱流束センサ - 温度センサ対の全体を包含するエリアだけでなく、熱流束センサ - 温度センサ対を囲む物体表面エリアに熱事象を提供するように適合されてもよい。他の例示的な実施形態では、外部熱デバイスは、複数の熱流束センサ - 温度センサ対に熱事象を提供してもよい。他の実施形態では、例えば、インタロゲーションを受ける物体が非平面（例えば、湾曲）表面を有する場合、外部熱デバイスは、周囲の物体表面ではなく、熱流束センサ - 温度センサ対を含むエリアに熱事象を提供するように設計されてもよい。

【0089】

他の例示的なセンサ実施形態では、物体とN I T I センサ表面との間で生じる熱伝達を排除するためにN I T I のために意図された制御回路と共に外部熱デバイスが使用されてもよい。例えば、外部熱デバイス（例えば、ヒータ）は、物体表面で熱（すなわち、熱エネルギー）を加えたり、除去したりすることができ、接触する物体とN I T I センサ表面との間に「ゼロ熱流束環境」を作り出すことができる。ゼロ熱流束環境において、N I T I センサの熱流束センサ構成要素は最小の電圧（例えば、「0」）を出力及び維持し、定常状態にある場合に、物体表面においてN I T I センサによって測定される対応する表面温度は、物体の内部領域の内部温度分布を示す。

【0090】

以下に記載される例示的なN I T I センサ及び／又はシステム実施形態に関して、C H F T + / - は、複合熱流束及び温度センサ（すなわち、熱流束センサ - 温度センサ対）を指し、+又は-はそれぞれ、N I T I のために意図される制御回路とともに使用される外部熱デバイス（例えば、ヒータ、ペルチェ・デバイスなど）を使用するか否かを示す。D U O N I T I は、複数の（例えば、2つの）N I T I センサ（例えば、C H F T + 又は C H F T - ）が並列に動作するN I T I センサ及び／又はシステム実施形態を指す。D U O

N I T I の例示的な実施形態は例えば、差分及び／又は商ベースのデータ処理方法を使用して、よりロバストな N I T I 測定を単純化し、かつ行うことができる。さらに、D U O C H F T + は、2 つ以上の並列な C H F T + 実施形態のみを利用する D U O N I T I の例示的な実施形態を指す。同様に、D U O C H F T - は、2 つ以上の並列な C H F T - 実施形態のみを利用する D U O N I T I の例示的な実施形態を指す。D U O C H F T + / - は、並列に動作する少なくとも 1 つの C H F T + の例示的な実施形態及び少なくとも 1 つの C H F T - の例示的な実施形態を利用する D U O N I T I の例示的な実施形態を指す。本出願に関連して、C H F T + 、C H F T - 、D U O C H F T + / - 、D U O C H F T + 、及び D U O C H F T - は異なる N I T I システムで利用されてもよい N I T I センサ実施形態の非限定的な例であり、このいくつかを以下に説明する。

10

【0091】

熱流束デバイス、熱流束チャネルなどが N I T I に使用されてもよいが、熱流束センサは先に説明した理由のために好ましい。様々な方法及び技術（例えば、薄膜技術、厚膜技術、サーモパイル技術、差動サーモパイル技術、熱電技術、ゼーベック効果技術、横断ゼーベック効果技術、突合せ溶接技術、マイクロエレクトロメカニカル・システム（M E M S）ベースの技術、ナノエレクトロメカニカル・システム（N E M S）ベースの技術、相補型金属酸化物半導体（C M O S）ベースの技術、付加的製造技術、スクリーン印刷技術、インクジェット技術、繊維センサ技術、巻有線技術、R T D ベースの技術、N T C ベースの技術、サーミスタ・ベースの技術、半導体ベースの技術など）を使用して製造されるあらゆる種類の熱流束センサ（すなわち、熱流束ゲージ、熱流束ゲージ、熱流束変換器、熱流量計、熱フロー計、熱フロー・ゲージ、熱フロー・ゲージなど）が N I T I に使用されてもよい。いくつかの例示的な実施形態では、1 つ以上の熱流束センサは、A S T M 標準 E 2 6 8 4 によって記載され、A S T M 標準 E 2 6 8 3 でさらに議論されるような差動サーモカップル技術に基づく。差動サーモパイルは、熱エネルギーを電気エネルギー（例えば、電圧及び／又は電流）に変換する受動的電子変換器の一種である。差動サーモパイルは通常、直列に、又はあまり一般的ではないが、並列に接続された複数のサーモカップルで構成される。典型的には、サーモカップル（すなわち、サーモカップル接合部）は、1 つ以上の材料（すなわち、熱抵抗層）の両側に配置される。個々のサーモカップル（すなわち、サーモカップル接合部）は、それらの接合点から、サーモカップル電圧出力が測定される点までの温度差を測定する。直列の場合、熱抵抗層の両側の 2 つのサーモカップル（すなわち、差動サーモカップル対又はサーモカップル対）の電圧出力は、典型的には熱抵抗層をわたる（例えば、通る）温度差、及び熱抵抗層を通して生じる熱伝達（例えば、熱流束）に関連する（例えば、比例する）差動電圧である。多くのサーモカップル対を直列に追加すると、差動電圧出力の大きさが増加し、その結果、熱流束センサの感度が高くなる。差動電圧出力は使用されるサーモカップル（すなわち、熱電）材料によっても影響される。したがって、熱抵抗層をわたる所定の温度差に対して、サーモカップル材料の中には、他のものよりも高い差電圧出力をもたらすものがある。従って、サーモカップル材料の選択は、熱流束センサ感度にも影響を及ぼす。同様に、熱抵抗層に使用される材料及び／又は厚さは、熱流束センサ感度並びに熱流束センサ応答時間に影響を及ぼしうる。差動サーモパイルは、1 つのサーモカップルで構築されてもよいし、少なくとも 2 つのサーモカップル接合部で構成されてもよいし、又は複数のサーモカップルで構成されてもよい。差動サーモパイルは、絶対温度を測定するのではなく、その代わりに、局所的な温度差又は温度勾配を示す（例えば、比例する）差動電圧出力を生成する。前述のように、この温度勾配は、差動サーモパイル及び／又は熱抵抗層を介して生じる熱伝達（例えば、熱流束）の結果であり、したがって、差動サーモパイル及び／又は熱抵抗層を介して生じる熱伝達（例えば、熱流束）の大きさを示す。

20

30

40

【0092】

熱伝達測定のための 1 つの例示的な差動サーモパイルは、正確な読み取り値及び高速応答時間（<< 1 秒）を有する薄い熱流束センサを作成するために、薄膜材料及びポリイミド（すなわち、熱抵抗層）を用いて構築される。別の例は、熱抵抗層内の 1 つ以上の導

50

電性スルーホール（すなわち、ビア）を介して構築される差動サーモパイルであってもよい。他の例は、差動サーモパイル技術に基づいているが、例えば、熱エネルギー・ハーベスティング（例えば、熱発電機（TEG））を介して熱エネルギーを電力に変換するように設計されているデバイスを含みうる。熱エネルギー・ハーベスティングに加えて、これらのデバイスは、デバイスを通して生じる熱伝達（すなわち、熱エネルギー）を示す（例えば、比例する）差動電圧を出力することを前提として、熱流束センサとして利用してもよい。しかし、異なる設計基準に起因して、現在のTEG技術は、熱流束センサ用途のために設計された差動サーモパイルと比較すると、しばしば高価であり、大きなフォームファクタを有する。したがって、このような装置を使用することは、遅い応答時間だけでなく、熱伝達（例えば、熱流束）測定の使用の困難及び／又は不正確さをもたらしうる。別の例は、ファブリック・ベースの熱流束センサであり、差動サーモパイルは、着用されるか又は例えば人体と接触するか、又は人体に近接するように設計されたファブリック又は他の材料内に構築される。

10

【0093】

簡単にするために、本出願で使用される熱流束センサによって測定される熱伝達の大きさは、 W/m^2 の単位を有する熱流束である。これは、NITI及び／又は関連するトピック（例えば、熱流束センサ設計、熱接触抵抗効果、データ処理方法など）のために使用されうる熱伝達の例示的かつ非限定的な大きさである。

【0094】

図1は、厚さ t 、幅 W 、及び長さ H を有する差動サーモパイル技術に基づく熱流束センサの例を示す。感知エリアは、幅 A 及び長さ B によって規定され、センサ出力は熱流束出力電圧リード（すなわち、出力リード）を含む。

20

【0095】

図2Aは、熱抵抗層を含む例示的な差動サーモパイルの断面を示し、 k は熱抵抗層の熱伝導率であり、 T_1 は高温温度接合であり、 T_2 は低温温度接合であり、 ΔT は T_1 と T_2 との間の温度差であり、熱抵抗層にわたる温度差に等しく、 ΔV は直列に接続されたサーモカップル対によって出力される差動電圧であり、 q の結果である ΔT を直接的に示し（例えば、比例し）、熱抵抗層を通して熱流束が生じる。サーモカップル対の個数が多ければ多いほど、熱流束センサ感度は大きくなる（所与の q に対して ΔV が大きくなる）。この例では、各温度接合部は、熱抵抗層を介して2つの異種の熱電材料（例えば、 M_1 及び M_2 ）を直列に接続することによって形成される。異種の熱電材料は、熱電電圧を発生させるために、異なるゼーベック係数を有する材料（例えば、銅とコンスタンタン、銅とニッケル、銅と銀、テルル化アンチモンとビスマス、正にドーピングされた材料と負にドーピングされた材料、 p 型半導体材料と n 型半導体材料など）を含んでもよい

30

【0096】

図2Bは、2つの異種の熱電材料（すなわち、 M_1 及び M_2 ）並びに導電体（ M_3 ）を含む別の例示的な差動サーモパイルを示す。この例では、 M_3 は、熱抵抗層を介して M_1 及び M_2 を直列に接続するために使用される。例示的な差動サーモパイルのこの構成は、製造コストの低さ、より高い感度、より大きな設計自由度等を含む例示的な利点を有し、1つ以上の製造技術（例えば、MEMSベースの技術、NEMSベースの技術、CMOSベースの技術、付加ベースの技術等）を使用して実現されうる。他の例示的な実施形態では、製造がさらに単純化されてもよく、 M_3 が M_1 又は M_2 と同じ材料であるように設計される。

40

【0097】

2つの類似又は異種の金属材料を互いに押し付けることによってサーモカップル接合部が形成される場合、又は温度センサを物体表面に接触させた場合、接触表面の非平坦性及び粗さのために、公称表面積のわずかな割合しか実際には接触しない。接合部及び／又は接触している表面をわたって熱流束が課されるならば、熱のフロー（すなわち、熱エネルギー）は一般に、接触スポットを通る伝導に制限される。図3に示される例を参照されたい。接触スポットの数及びサイズが限られているため、実際の接触面積は見かけの接触面

50

積よりもかなり小さくなる。この制限された接触面積及びギャップの存在は、接触抵抗又は熱接触抵抗 (R_c) と呼ばれる熱抵抗を引き起こす。

【0098】

熱接触抵抗 (R_c) の存在は温度測定の高質に影響する。具体的には、例えば例示的な N I T I 実施形態の温度センサと物体表面との間の熱接触抵抗 (R_c) の存在は、不正確な温度読み取りを引き起こす。言い換えれば、物体の実際の表面温度は、例えば薄膜サーモカップル技術を介して、適切な接触及び熱分路設計が実現される場合でさえ、温度センサによって測定されるものとは異なる。この不正確さは、存在する熱接触抵抗 (R_c) の量 (典型的には一定) と、それを通して特定の時刻に発生する熱流束とに関連している。この関係は、数学的に以下のように表される。

$$T_{Surface}(t) = T_{Sensor}(t) - q_{Sensor}''(t) \times R_c'' \quad [1]$$

ここで、熱流束は、物体に入るときに正であると規定され、 t は、特定された時刻であり、 $q_{Sensor}''(t)$ は、特定された時刻における測定熱流束であり、 $T_{Sensor}(t)$ は、特定された時刻におけるセンサ測定表面温度 (すなわち、測定センサ温度、測定温度) であり、 $T_{Surface}(t)$ は、特定された時刻における実際の表面温度である。本出願に関連するように、文脈がそうでないことを示さない除き、例示的な N I T I センサ実施形態の温度センサと物体表面との間の熱接触抵抗 (R_c) は、N I T I センサと物体表面との間の熱接触抵抗と呼ばれてもよい。

【0099】

図 4 は、物体の内部領域に関連する未知の内部特性を有し、ヒータ (すなわち、外部熱デバイス) が熱流束センサ上に配置される、物体の表面上に配置された熱流束センサ及び温度センサを含む、例示的な C H F T + 実施形態を示す。この例では、熱流束センサは、物体の表面と接触する温度センサと接触する。ここでも、温度センサと物体表面との間の限定された接触面積は、温度センサと物体表面温度との間の熱抵抗を引き起こし、熱接触抵抗 (R_c) として示される。さらに、温度センサ上の層 (例えば、保護層、接着剤などの結果として) は、存在する熱接触抵抗 (R_c) の量に影響を与えうる (例えば、増加する)。熱流束 (q'') は、物体を指すベクトルとして示され、その方向に正であると規定される。したがって、式 [1] に示されるように、物体の実際の表面温度 ($T_{Surface}(t)$) は、温度センサからの測定温度 ($T_{Sensor}(t)$)、熱流束センサからの測定熱流束 ($q_{Sensor}''(t)$)、及び熱接触抵抗 (R_c) を使用して決定される。いくつかの例示的な実施形態では、式 [1] において「0」の値を仮定するために、熱接触抵抗 (R_c) を最小化する努力がなされてもよい。これは、例えば、接触面の間に熱伝導性接着剤を使用することによって行われてもよい。

【0100】

他の例示的な実施形態では、正確な実際の表面温度測定値 ($T_{Surface}(t)$) を得るために、熱接触抵抗 (R_c) についての推定値が決定 (例えば、測定する) される必要があってもよい。一部の場合に、推定された熱接触抵抗 (R_c) (すなわち、熱接触抵抗 (R_c) 値は無視できるかゼロであると判定されてもよい。他の場合に、推定された熱接触抵抗 (R_c) 値は、例えば、N I T I センサを取り付けるために使用される接着テープの製造仕様から、所定の仕様を使用して決定されてもよい。

【0101】

例示的な実施形態は、定常状態の環境で実施されるか過渡状態の環境で実施されるかにかかわらず、物体の正確な N I T I 測定を行うことができる。例示的な実施形態は、それぞれの熱数学的モデル (熱流束が入力である) において熱流束境界条件を利用し、これは温度ベースの境界条件よりもロバストで正確である。例示的な出力は、物体の内部領域の内部温度分布及び／又は物体の 1 つ以上の内部パラメータのような、物体の内部特性の正確な値を含む。

【0102】

図5を参照して、例示的なCHFTー実施形態は、未知の内部特性を有する物体の表面上に配置された熱流束センサ及び温度センサを含む。1つの例示的な用途は、発生する何らかの形成の外部熱事象が発生する状況、例えば、CHFTーがエンジン上に配置され、外部熱事象がエンジンによって生成され、放出される熱である状況である。別の用途は、CHFTーが人間又は他の動物、例えば運動する運動選手の身体に配置される場合である。この後者の例では、体の放熱とCHFTーの上を移動する気流との組み合わせは、外部熱事象に対応する。他の外部熱事象は、NITIEのために意図された制御回路と共に使用されないヒートランプ、ファン、ヒートシンク、日射、他の物体（例えば、金属板）との接触（すなわち、制御されない外部熱事象）などがソースとなる。

【0103】

例えば、小さな環境変化及び／又は他の外部刺激の結果として、熱流束ノイズ及び散発的信号が記録されるのを制限するために、断熱材（すなわち、断熱材の層又は断熱片）が、図6Aに示すように、CHFTーの上部に配置されてもよい。この断熱片はフィルタとして機能し、実質的な熱流束及び温度信号がCHFTーによって検出されることのみを可能にする。さらに、断熱片は、CHFTーを通して生じる熱流束の量を制御（すなわち、制限、増加等）するために使用されてもよい。断熱片の厚さ、材料、フォームファクタ、及びサイズは、他の要因の中でも、CHFTーが使用されている用途に依存する。一部の実施形態では、断熱材は、熱流束センサ及び／又は温度センサが取り付けられている基板又は材料内に埋め込まれてもよい。例えば、熱流束センサ及び／又は温度センサを配置し、それに電氣的に接続するために使用されるプリント回路基板（例えば、剛性及び／又は可撓性材料）内に、熱伝導率の低いエア・ギャップ又は他のエリアが設計されてもよい。

【0104】

図6Aは、断熱片が熱流束センサ - 温度センサ対の全体を覆うように適合された例を示す。他の例示的な実施形態では、図6Bに図示されるように、断熱片は、熱流束センサ - 温度センサ対を囲む物体表面エリアにも重なってもよい。図6Cに図示されるようないくつかの例示的な実施形態では、熱損失を最小にするために、熱流束センサ及び／又は温度センサを囲むように断熱片又は追加の断熱材が特定されてもよい。いくつかの例示的な実施形態では、断熱材料は、CHFTーを通して生じる熱流束の量を増強し増加するように設計された金属又は他の熱伝導材料を含みうる。図6A～図6Cに示される断熱材、フィルタリング、及び熱流束制御技術は、一部又はすべてのNITIEセンサ実施形態に対してオプションとして使用されてもよい。

【0105】

図7Aを参照して、例示的なCHFT+実施形態は、熱流束センサ、温度センサ、及びNITIEのために意図された制御回路と共に使用される外部熱デバイス、例えば、ヒータ、クーラ、流体フロー路、ファン、ヒートランプなどを含む。CHFT+実施形態は、外部熱事象が発生せず、ほとんどの場合、定常状態条件が維持される場合に特に有用である。しかし、これらは、制御されない外部熱事象が発生している状況でも使用してもよい。外部熱デバイスとともに、CHFT+は、過渡応答（つまり、異なる熱信号）を生成する制御された熱事象を生成できる。例えば、外部熱デバイスは、物体表面において周期的な熱事象を提供するために、ヒータ（すなわち、外部熱デバイス）電力を循環できる。必要に応じて、外部熱デバイスは、定常状態の条件を実現するように制御されうる。他の例示的な実施形態では、CHFT+は、2つ以上の外部熱デバイスを含んでもよい。例えば、必要に応じて熱ヒートソース及び熱ヒートシンクを生成するために、外部熱デバイスとしてヒータ及びペルチェ・クーラの両方が利用されてもよい。別の例として、熱加熱と冷却との両方を実現するために、外部熱デバイスとして単一のペルチェ・デバイスが使用されてもよい。図7Aでは、外部熱デバイスの例としてヒータが図示されている。この例では、ヒータ（つまり、外部熱デバイス）は熱流束センサ - 温度センサ対の全体だけでなく、熱流束センサ - 温度センサ対を囲む物体表面エリアを包含するエリアに熱事象を提供するように設計されている。図7Bでは別の例示的な実施形態が図示されており、ここではヒータ（例えば、外部熱デバイス）は、熱事象を熱流束センサ - 温度センサ対の全体のみを

包含するエリアに提供するように設計されている。例示的な C H F T + 実施形態の平面図が図 7 C に示されており、それは、出力リード（すなわち、出力端子接続）を有する温度センサ、出力リード（例示的な出力端子）を有する熱流束センサ、及び電力リード線（例示的な電力端子）を有するヒータ（例示的な外部熱デバイス）を含む。この例では、出力リード及び電源リードは、各構成要素の対応する出力端子に接続（例えば、はんだ付け）される。他の例示的な実施形態では、出力端子は、例えば剛性及び／又は可撓性プリント回路基板技術を使用することによって、表面実装又はスルーホール・デバイスのために設計された他の端子（例えば、導電性パッド）に接続されてもよい。他の例示的な C H F T + 実施形態では、ヒータは例えば、回路内の電源に直接接続する、制御された抵抗、形状、及び／又はサイズを有する配線パターンを介して、プリント回路基板内に構築されてもよい。このことは、このような設計の埋め込まれた態様を前提として、製造プロセスを容易にしてもよい。いくつかの例示的な N I T I センサ実施形態では、温度センサ出力リードのうちの 1 つ以上は、温度センサ抵抗（例えば、サーミスタ）に基づいて温度測定を行うために回路の一部として使用されてもよいグランド端子及び／又は基準抵抗に接続されてもよい。

【0106】

図 7 D に図示されるような他の例示的な実施形態では、温度センサは、物体表面と接触する熱流束センサ感知エリアの反対側に接して又は反対側の近くに配置されてもよい。これらの例示的な実施形態では、温度センサの出力は、図 7 A に構成された温度センサの出力と同じであると仮定されてもよい。これは、特に、熱流束センサがその設計（例えば、薄い厚さ、高い熱伝導率など）の結果として、無視できる熱抵抗を有する場合、及び／又はゼロ熱流束条件が生成される場合に当てはまる。他の例示的な実施形態では、熱流束センサの熱抵抗が無視できない例示的な実施形態について、熱流束センサの熱抵抗の 1 つ以上の影響は、温度センサと物体表面との間の熱接触抵抗の一部としてモデル化されてもよい。他の例示的な実施形態では、例えば、熱流束センサ接合部の数及び熱流束センサ感度が正確に既知である実施形態では、熱流束センサ出力は、熱流束センサと物体表面との間の温度を決定するために図 7 D の温度センサと出力が組み合わせられうるように、リアルタイムで熱流束センサにわたる温度差を決定するために使用されられてもよい。

【0107】

図 7 E に示されるような他の例示的な実施形態では、温度センサは、熱流束センサ及び／又は熱流束センサ感知エリア内に埋め込まれてもよい。

【0108】

図 7 F に示されるような他の実施形態では、熱流束センサ及び温度センサは、測定値の不整合を回避しながら、基板の両側に配置されてもよい。例えば、熱流束センサ及び温度センサは、熱流束センサ及び／又は熱流束センサ感知エリアが反対側の温度センサを包含するように、基板（例えば、フレキシブルプリント回路基板）の両側に位置合わせされてもよい。これは、例えば、基板の反対側にある温度センサの下又は上に熱流束センサを配置することによって実現されてもよい。これらの例示的な実施形態では、熱流束センサ及び／又は温度センサは、熱流束センサ及び温度センサを通る均一な熱エネルギー・フロー（例えば、熱フロー）を確実にするために、他の熱適合性材料（例えば、温度／又は熱流束センサに近い熱抵抗を有する材料）によってさらに囲まれてもよく、及び／又はこれに接触してもよい。例示的な実施形態が図 7 G に示される。

【0109】

図 7 D ～ 図 7 G に示される例示的な実施形態の非限定的な特徴は、オプションで、例示的な C H F T - 実施形態を含む任意の例示的な N I T I 実施形態で使用されてもよい。

【0110】

物体の 1 つ以上の内部特性を決定するための 1 つ以上の熱流センサ - 温度センサ対を有するシステム実施形態

図 8 は、C H F T - を使用して N I T I を実行する例示的な N I T I システムを示す。C H F T - は、温度センサ及び熱流束センサ（すなわち、熱流束センサ - 温度センサ対）

を含む。他の例示的な実施形態では、CHFT-は、2つ以上の温度センサ及び／又は2つ以上の熱流束センサ（例えば、複数の熱流束センサ-温度センサ対）を含んでもよい。温度センサ及び熱流束センサの互い及び物体に関する構成は例えば、図5及び図6A～図6Cのいずれかに例示されているようであってもよい。測定された温度センサ及び測定された熱流束センサのアナログ信号に対応する温度センサ及び熱流束センサからのアナログ信号出力は、適切な通信経路（例えば、導電体）を介して提供され、例えば、1つ以上のアナログ／デジタル変換器（ADC）、マイクロコントローラなどを含んでもよいデータ取得（DAQ）回路によってデジタル信号に変換される。DAQ回路は、測定された温度センサ及び測定された熱流束センサのデジタル信号を、適切な通信経路（例えば、導電体、無線信号など）を介して、以下により詳細に説明されるように処理するための制御回路に提供する。制御回路は、1つ以上の適切に構成されたコンピュータ、マイクロプロセッサ、DSP、FPGA、又は他のデータ・プロセッサを含んでもよい。制御回路の適切な構成は、ハードウェアで、ソフトウェアで、又は組み合わせて実装されてもよい。制御回路は、ディスプレイ、ネットワーク、クラウド・コンピュータ・システム、携帯電話のような通信デバイス、ウェアラブル技術などのような出力を含むか、又はそれと通信する。出力はまた、センサの有効化及び無効化、遠隔監視、測定開始／停止、データ・ロギング、温度制御、エネルギー制御、システム故障制御、予防保守制御、診断、システム性能、データ入力、データ表示、分析などのような1つ以上の制御動作のために使用されてもよい。

【0111】

図9は、CHFT+を使用してNITIを実行する例示的なNITIシステムを示す。CHFT-と同様に、CHFT+は温度センサ及び熱流束センサ（すなわち、熱流束センサ-温度センサ対）を含む。他の例示的な実施形態では、CHFT+は、2つ以上の温度センサ及び／又は2つ以上の熱流束センサ（例えば、複数の熱流束センサ-温度センサ対）を含んでもよい。加えて、CHFT+は、図示される抵抗ヒータのような外部熱デバイスを含む。温度センサ、熱流束センサ、及び外部熱デバイスの互い及び物体に関する構成は例えば、図7A～7Gのいずれかに例示されているようであってもよい。他の例示的な実施形態では、CHFT+は、2つ以上の外部熱デバイス（例えば、ヒータ及びクーラ）を含んでもよい。測定された温度センサ及び測定された熱流束センサのアナログ信号に対応する温度センサ及び熱流束センサからのアナログ信号出力は、適切な通信経路（例えば、導電体）を介して提供され、例えば、1つ以上のアナログ／デジタル変換器（ADC）、マイクロコントローラなどを含んでもよいデータ取得（DAQ）回路によってデジタル信号に変換される。DAQ回路は、測定された温度センサ及び測定された熱流束センサのデジタル信号を、適切な通信経路（例えば、導電体、無線信号など）を介して、以下により詳細に説明されるように処理するための制御回路に提供する。制御回路は、1つ以上の適切に構成されたコンピュータ、マイクロプロセッサ、DSP、FPGA、又は他のデータ・プロセッサを含んでもよい。制御回路の適切な構成は、ハードウェアで、ソフトウェアで、又は組み合わせて実装されてもよい。制御回路は、ディスプレイ、ネットワーク、クラウド・コンピュータ・システム、携帯電話のような通信、ウェアラブル技術などの出力を含むか、又はそれと通信する。出力はまた、センサの有効化及び無効化、遠隔監視、測定開始／停止、外部熱デバイス動作、データ・ロギング、温度制御、エネルギー制御、システム故障制御、予防保守制御、診断、システム性能、データ入力、データ表示、分析などのような1つ以上の制御動作のために使用されてもよい。この非限定的な例では、外部熱デバイスは、リレー（例示的なスイッチ）を使用して制御され、リレーはDAQからのリレー信号によって動作され、このリレーは次いで、制御回路からの入力に基づいて、リレー信号を提供する。

【0112】

図10は、測定された熱流束、測定された温度、及び物体の内部パラメータの決定された値を使用して、1つ以上の特定された時刻における物体の内部領域の内部温度分布を含む、物体の1つ以上の内部特性を決定するために、NITIセンサを含む、非限定的かつ

10

20

30

40

50

例示的な N I T I システムにおける制御回路によって実行される例示的な手順を概説するフローチャートである。測定された温度信号は、1つ以上の特定された時刻に、温度センサから制御回路によって受信される（ステップ S 1）。制御回路はまた、表面で物体を出る又は物体に入る熱伝達の大きさを生成するために、1つ以上の特定された時刻に測定された熱流束センサから、測定された熱流束信号を受信する（ステップ S 2）。制御回路は、ステップ S 3において、1つ以上の特定された時刻における内部パラメータの値を決定し、ステップ S 4において、測定された温度信号、測定された熱流束信号、及び内部パラメータの値に基づいて、1つ以上の特定された時刻における物体の内部領域の内部温度分布を決定する。制御回路は、1つ以上の特定された時刻における内部温度分布を示す情報を（例えば、出力のために）生成する（ステップ S 5）。制御回路はまた、ステップ S 6において、1つ以上の特定された時刻における内部パラメータの1つ以上を示す情報を（例えば、出力のために）生成する。制御回路は、オプションとしてステップ S 5の前にステップ S 6を実行してもよく、及び／又はオプションとしてステップ S 4、ステップ S 5、及び／又はステップ S 6を実行しなくてもよい。制御回路は、オプションとして、ステップ S 1の前にステップ S 2を実行してもよい。いくつかの例示的な実施形態では、制御回路は、オプションとして、ステップ S 2及び／又はステップ S 1の前にステップ S 3を実行してもよい。

10

【0113】

さらなる例示的な実施形態では、追加の手順が使用されてもよい。例えば、物体の熱数学的モデル（すなわち、熱モデル）が決定され、熱数学的解（すなわち、数学的解）について解くために、適切な初期条件及び境界条件が規定されてもよい。熱数学的モデル及び対応する熱数学的解は、より一般的な場合について熱伝達の文献において見出されてもよく、一方、より独特な場合についてのモデルは、導出され、解かれる必要がありうる。熱数学的モデルを導出及び／又は解くための種々の方法が使用されてもよく、これは分析方法、有限差分法、数値法などを含むが、これらに限定されない。熱数学的モデルは1次元熱伝達又は多次元熱伝達（例えば、2次元）に基づいてもよい。

20

【0114】

より正確で、ロバストで、一貫性のある N I T I のために、熱数学的モデルの境界条件は熱流束入力を有する物体に対する熱数学的解（例えば、内部温度分布）をもたらす表面熱流束境界条件を含むように規定される。N I T I センサは例えば、物体表面での熱流束センサを用いて、熱流束を直接測定するため、表面熱流束境界条件が使用されてもよい。従って、熱流束は、対応する熱数学的解（すなわち、数学的解）における熱流束入力をもたらす熱数学的モデル（すなわち、熱流束境界条件）に直接使用されうる。表1は、半無限固体（すなわち、半無限媒体）、例示的な物体及び熱伝達の文献における一般的な場合についての偏微分方程式（PDE）、適切な境界条件、及び初期条件を含む、詳細ではあるがなおも例示的である1次元熱数学的モデル（すなわち、熱モデル）を提供する。

30

表1：熱流束境界条件を有する半無限固体の熱モデル

40

50

PDE	$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$
境界条件	$-k \frac{\partial T}{\partial x} = q_{\text{Sensor}}''(t) \quad , \quad x = 0$ $T \rightarrow T_0 \quad , \quad x \rightarrow \infty$
初期条件	$T = T_0 \quad , \quad t = 0$
ここで、 k = 物体の熱伝導率 ρ = 物体の密度 C = 物体の比熱容量 α = 物体の熱拡散率 x = 物体表面からの深さ t = 時刻 T = 物体の内部温度分布(x及びtの関数) T_0 = 物体の初期温度	

10

20

【 0 1 1 5 】

半無限媒体（物体）の表面（ $x = 0$ ）で生じる一定のステップ熱流束入力に対して、表 1 の熱モデルの数学的解は次のように見出される。

$$T(x, t) = T_0 + \frac{2q_{\text{Sensor},0}'' \left(\frac{\alpha t}{\pi}\right)^{\frac{1}{2}}}{k} \exp\left(\frac{-x^2}{4\alpha t}\right) - \frac{q_{\text{Sensor},0}'' x}{k} \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}\right) \quad [2]$$

30

ここで、 $q_{\text{Sensor},0}''$ は、境界における一定のステップ熱流束入力である。

【 0 1 1 6 】

デュアメルを重ね合わせ法（例示的な数学的方法）を用いて、N I T I センサ出力の現実的な時間と共に変化する熱流束入力について式 [2] が導出されうる。

$$T_m(x, t_m) = T_0 + \sum_{j=1}^m (q_{\text{Sensor},j}'' - q_{\text{Sensor},j-1}'') \left(\frac{2 \left(\frac{\alpha(t_m - t_{j-1})}{\pi}\right)^{\frac{1}{2}}}{k} \exp\left(\frac{-x^2}{4\alpha(t_m - t_{j-1})}\right) - \frac{x}{k} \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha(t_m - t_{j-1})}}\right) \right) \quad [3]$$

40

ここで、 m はN I T I センサによって行われた m 番目の測定を示し、 $T_m(x, t_m)$ は、特定された時刻（ t_m ）に対応する m 番目の測定の深さ x における物体の内部温度を指す。この例では、式 [3] は、表 1 に特定された非限定的かつ例示的な熱モデルについて、熱数学的解、すなわち、物体の内部領域の内部温度分布の数式を表す。

【 0 1 1 7 】

式 [3] を表面（ $x = 0$ ）で評価し、

$$\alpha = \frac{k}{\rho C}$$

を実現する。

50

$$T_{Surface,m} = T_{Surface,0} + \sum_{j=1}^m (q_{Sensor,j}'' - q_{Sensor,j-1}'') \times \sqrt{t_m - t_{j-1}} \times \frac{2}{\sqrt{\pi} \sqrt{k\rho C}} \quad [4]$$

ここで、 $T_{Surface,m}$ は、表 1 でモデル化された例示的な物体の計算された表面温度である。この例において、式 [4] は定常状態条件 ($T_{Surface,0}$) における表面物体温度の関数であり、例えば、過渡的熱事象の前又は後に決定されることに留意されたい。式 [4] はまた、1 つ以上の特定された時刻における表面熱流束測定値 ($q_{Sensor,m}''$) と、物体熱伝導率 (k)、物体密度 (ρ)、及び物体比熱容量 (C) の積の平方根との関数である。物体のこの内部パラメータ ($\sqrt{k\rho C}$)

10

) は一般に、熱慣性 (すなわち、熱浸透率) と呼ばれる。

【0118】

式 [4] で決定されるような計算された物体表面温度は例えば、1 つ以上のパラメータ推定方式を含んでもよいデータ処理方法と共に使用されうる。1 つ以上の特定された時刻に測定された N I T I センサ出力値 (すなわち、熱流束及び温度) について、データ処理方法は、測定されたセンサ温度を、この例では式 [4] を使用する場合に見出された計算された表面温度に対して比較してもよい。とりわけ、これは、物体の対応する内部パラメータ、この場合、物体の熱慣性 (すなわち、熱浸透率) の内部パラメータ ($\sqrt{k\rho C}$)

20

) に対する推定値の決定を可能にする。

【0119】

他のデータ処理方法では、この例では物体熱伝導率 (k)、物体密度 (ρ)、及び物体比熱容量 (C) の内部パラメータに対する推定値が個々に決定されてもよい。例えば、上記の場合について、密度 (ρ) 及び比熱容量 (C) の所定の値が、教科書又は製造仕様書のような参照資料から決定されてもよく、データ処理方法が物体の熱慣性 (すなわち、熱浸透率) の推定値 ($\sqrt{k\rho C}$)

30

) 又は $k\rho C$ に基づいて、熱伝導率 (k) の推定値を決定することを可能にする。他の例では、式 [4] とは対照的に、物体の深さ (x) (例えば、 $x=0$) で評価された場合の各個々の内部パラメータを区別する、対応する熱数学的解とともに、異なる熱数学的モデルが開発されてもよい。これは、適切なデータ処理方法と共に使用される場合、各個々の内部パラメータ (例えば、 k 、 ρ 、 C 等) についての推定値の決定を可能にする。制御回路はまた、N I T I センサの精度を改善し、及び／又は用途を拡大するために、さらなるステップを実行してもよい。例えば、先に言及したように、測定されたセンサ温度は、温度センサと物体表面との間の熱接触抵抗 (R_{tc}) の存在に起因して、物体 (例えば、半無限固体) の実際の表面温度の大きさと同じではない。これにより、物体の実際の表面温度と測定されたセンサ温度との間に差が生じる。熱接触抵抗 (R_{tc}) は、N I T I センサの温度センサ上に層状になっていてもよい材料、並びにそれが物体表面にどれだけ良好に付着しているかに起因してもよい。物体表面の滑らかさ／粗さは、N I T I の総合的な精度と同様に、熱接触抵抗 (R_{tc}) にも影響を及ぼしうる。したがって、滑らかな表面が好ましい場合がある。センサを取り付けるための接着剤 (例えば、熱ペースト、感圧接着剤など) の使用もまた、熱接触抵抗 (R_{tc}) に影響を及ぼしうる。図 4 は、例示的な N I T I

40

50

実施形態に関連する熱接触抵抗（ R_c'' ）を示す。

【0120】

数学的には、測定されたセンサ温度と実際の表面温度とは式〔1〕によって関連付けられることができ、ここでは次のような指標形成で示される。

$$T_{Surface,m} = T_{Sensor,m} - q_{Sensor,m}'' \times R_c'' \quad [5]$$

ここで、熱流束は、物体に入るときに正であると規定される。

電気工学的アナロジーにおいて、熱接触抵抗（ R_c'' ）は、抵抗としてモデル化され、 $q_{Sensor,m}''$ は電流としてモデル化されてもよい。したがって、電流（ $q_{Sensor,m}''$ ）が抵抗（ R_c'' ）を流れると、電圧降下（差分）が生じる。ここで、電圧差はセンサ（すなわち、測定されたもの）と物体（すなわち、実際のもの）表面温度との間の温度差に類似している。

【0121】

場合によっては、センサを取り付けるために使用される材料に関連する熱影響も考慮する必要があるかもしれない。例えば、例えば実装材料の熱伝導率（ k ）、実装材料の密度（ ρ ）、及び実装材料の比熱容量（ C ）に関連する1つ以上の影響が、N I T Iに使用される熱数学的モデルに含まれ、考慮される必要があるかもしれない。

【0122】

より正確なN I T Iのために、熱接触抵抗（ R_c'' ）の影響が考慮されるべきである。式〔5〕とともに式〔4〕を使用すると、式〔6〕で計算されたセンサ温度の式が生成される。

$$T_{Calculated,m} = T_{Sensor,0} - q_{Sensor,0}'' \times R_c'' + \sum_{j=1}^m (q_{Sensor,j}'' - q_{Sensor,j-1}'') \times \sqrt{t_m - t_{j-1}} \times \frac{2}{\sqrt{\pi} \sqrt{k \rho C}} + q_{Sensor,m}'' \times R_c'' \quad [6]$$

【0123】

式〔4〕の代わりに、式〔6〕がデータ処理方法で使用されてもよく、例えば、物体の1つ以上の内部パラメータの推定値を決定するために、N I T Iセンサから出力される測定されたセンサ温度と比較されてもよい。これを行う1つの例示的で非限定的な方法は、パラメータ推定方式における最小化のための目的関数を規定することである。例示的な目的関数は、式〔7〕を用いて、センサ温度の2つの異なる大きさ間の二乗平均平方根誤差（RMSE）として規定されうる。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{M-1} \sum_{m=1}^{M-1} (T_{Sensor,m} - T_{Calculated,m})^2} \quad [7]$$

ここで、

$$T_{Calculated,m} = T_{Surface,m} + q_{Sensor,m}'' \times R_c'' \quad [8]$$

【0124】

したがって、式〔7〕は、次のように書き換えられうる。

10

20

30

40

50

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{M-1} \sum_{m=1}^{M-1} (T_{\text{Sensor},m} - (T_{\text{Surface},m} + q_{\text{Sensor},m}'' \times R_c''))^2} \quad [9]$$

ここで、Mはある期間（すなわち、1つ以上の特定された時刻）にわたるN I T Iセンサによって行われた測定の総数である。なお、実施形態によっては、式[7]及び式[9]に示されるように、必ずしも1の値から始まるとは限らない。同様に、実施形態によって、M-1の量が異なってもよい。例えば、M-1は、M-15又はMによって置き換えられうる。他の例示的な実施形態では、M-1は、m番目の測定後の特定された数の測定のための目的関数を規定するm+30、m+10、m+5などによって置き換えられてもよい。

他のデータ処理方法では、目的関数の導関数に基づく公式化（例えば、式[9]）が例えば、ゼロに等しく設定されてもよい。この条件を最良に満足する対応する内部パラメータ及び熱接触抵抗（ R_c'' ）の値は、決定された推定値である。

【0125】

反復された先行として、正確で実用的なN I T Iの主要な構成要素は、熱接触抵抗（ R_c'' ）決定である。いくつかの場合、例えば、低熱流束環境（例えば、ゼロ熱流束条件）又は他のように無視できる熱接触抵抗（ R_c'' ）条件では、熱接触抵抗（ R_c'' ）は無視されてもよいし、又は他のようにゼロの推定値を有すると決定されてもよい。しかし、多くの場合、これは正確な仮定ではない。これらの場合、熱接触抵抗（ R_c'' ）の推定値は例えば、以前の測定によって事前に決定されるか、データ処理方法の一部として（例えば、パラメータ推定方式を介して）決定されるか、又は他のように決定される（例えば、製造仕様によって予め決定される）必要があってもよい。

【0126】

熱接触抵抗（ R_c'' ）の推定値を決定する1つの方法は、パラメータ推定方式を含んでもよいデータ処理方法において、それを未知の変数として含めることである。計算されたセンサ温度と測定されたセンサ温度との間の最良の整合を生成する対応する内部パラメータ値と熱接触抵抗（ R_c'' ）値との組み合わせ、すなわち、最小の誤差は、決定された推定値（すなわち、最適な出力値）であるとみなされてもよい。

【0127】

例えば、上記で提示された一般的かつ例示的な半無限物体の場合について、

$$\sqrt{k\rho C}$$

について試みられた（例えば、推測された）各値について、異なる R_c'' 値のアレイも試みられ、式[6]に入力される。試行された

$$\sqrt{k\rho C}$$

及び R_c'' の値の各組み合わせについて、式[6]の結果（すなわち、計算されたセンサ温度）は、N I T Iセンサによって出力されるような測定されたセンサ温度と比較される。この比較は例えば、式[7]で規定されるもののような目的関数を介して行われてもよい。この例では、計算されたセンサ温度と測定されたセンサ温度との間の最良の整合を生成する内部パラメータ（例えば、

$$\sqrt{k\rho C}$$

）及び熱接触抵抗（ R_c'' ）に対して試みられた値の組み合わせ、すなわち、最小の誤差（

例えば、最小の R M S E 値) は、決定された推定値 (すなわち、最適な出力値) であるとみなされうる。しかし、この例示的なアプローチ (すなわち、ブルートフォース・データ処理方法) は、特により正確な結果が所望される場合、時間がかかるかもしれない。その結果、このアプローチは、N I T I 用途の大部分を非実用的にする。時間がかかるけれども、この技術は、温度ベースの境界条件を用いて見出された数学的解に基づくブルートフォース・データ処理法よりも、より正確で高速である。これは、温度ベースの境界条件の複雑さ及び限界の結果である。

【 0 1 2 8 】

別のアプローチは、最適化方式を介して、対応する内部パラメータ (例えば、 $\sqrt{k\rho C}$

10

) 及び熱接触抵抗 (R''_c) 値の推定値を決定することである。例えば、最適化方式は、例えば内部パラメータ値 (例えば、 $\sqrt{k\rho C}$

$\sqrt{k\rho C}$

) 及び熱接触抵抗 (R''_c) 値の非線形的に変化する組み合わせによって、目的関数 (例えば、式 [7]) を最小化するように設計されてもよい。このアプローチは、上述のブルートフォース・データ処理方法と比較した場合、より速い結果をもたらしうるが、それほど正確ではないかもしれない。

20

【 0 1 2 9 】

熱接触抵抗 (R''_c) の推定値を決定する新規なアプローチは、物体の内部特性に基づいてそれを決定 (例えば、計算) することである。これにより、処理時間が大幅に短縮され、この技術が多く用途に対してより実用的になる。このアプローチは、熱接触抵抗 (R''_c) が時間に関して一定であるという利点を利用する。したがって、任意の特定された時刻又は任意の所与の測定において、熱接触抵抗 (R''_c) は、先行又は後続の特定された時刻又は測定における熱接触抵抗 (R''_c) と等しい。数学的には、これは次のように表されうる。

$$R''_C = R''_{C_n} \quad [10]$$

30

ここで、 n は N I T I センサによって行われた n 番目の測定 (期間中の N 回の測定の合計) を示す。したがって、この非限定的な例のために、 $N = M$ である。さらに、 n の量は、実施形態に応じて異なってよい。例えば、 n は、 $n - 1$ 又は $n + 1$ によって置き換えられうる。

【 0 1 3 0 】

この一貫性を前提として、特定された時刻又は測定における熱接触抵抗 (R''_c) は、測定が行われている期間を通じての平均熱接触抵抗に等しく、次式で表現されうる。

$$R''_{C_n} = \frac{\sum_{n=1}^{N-1} R''_{C_n}}{N - 1} \quad [11]$$

40

【 0 1 3 1 】

さらに、式 [5] は、次のように再構成されうる。

$$R''_{C_n} = \frac{T_{Sensor,n} - T_{Surface,n}}{q''_{Sensor,n}} \quad [12]$$

【 0 1 3 2 】

50

式 [10]、式 [11]、式 [12] を組み合わせると次のようになる。

$$R_C'' = \frac{\sum_{n=1}^{N-1} \frac{T_{Sensor,n} - T_{Surface,n}}{q_{Sensor,n}}}{N-1} \quad [13]$$

【0133】

先に説明した例示的なデータ処理方法に関して、式 [13] を式 [9] に入力すると、パラメータ推定方式の例示的な目的関数は、次のようになる。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{M-1} \sum_{m=1}^{M-1} \left(T_{Sensor,m} - \left(T_{Surface,m} + q_{Sensor,m} \times \frac{\sum_{n=1}^{N-1} \frac{T_{Sensor,n} - T_{Surface,n}}{q_{Sensor,n}}}{N-1} \right) \right)^2} \quad [14]$$

例示的な実施形態に応じて、式 [14] に示すように、必ずしも1の値から始まるとは限らないことに留意されたい。同様に、 $N-1$ の量は、実施形態によって量が異なってもよい。例えば、 $N-1$ は、 $N-15$ 又は N に置き換えられうる。他の例示的な実施形態では、 $N-1$ は、 n 番目の測定後の特定された数の測定について式 [13] を規定する $n+30$ 、 $n+10$ 、 $n+5$ などに置き換えられてもよい。

式 [9] と比較すると、式 [14] の例示的な目的関数のこのバージョンは、熱接触抵抗 (R_C) とは大きく無関係である。熱接触抵抗 (R_C) に依存する唯一の用語は $T_{Surface,0}$ であり、式 [5] の結果として、 $T_{Sensor,0} - q_{Sensor,0} \times R_C$ のように規定される。多くの場合、 $q_{Sensor,0} \times R_C$ の量は無視できることに留意されたい。無視できない場合には、より良い設計が必要であり、 $q_{Sensor,0} \times R_C$ の量が考慮される必要がありうる。これを実現する例示的な方法は、このデータ処理方法例ではパラメータ推定方式を行う前に、熱接触抵抗 (R_C) の初期値を試みる（例えば、推測する）ことによる。試行された初期値にかかわらず、パラメータ推定方式は、内部パラメータについての正確な推定値だけでなく、熱接触抵抗 (R_C) についての正確な推定値を決定するだろう。

【0134】

データ処理方法の一部として、パラメータ推定方式において目的関数として式 [14] を使用すると、 NIT 測定を行うために必要な時間が大幅に短縮される。同等の精度のために、同じコンピュータを使用して、本発明者は、このデータ処理方法が同じデータ・セット（75秒のデータ - 1Hz サンプリング周波数）について上述したブルートフォース・アプローチに基づくデータ処理方法を利用する場合の約15分と比較して、1秒未満の処理時間で完了しうると判断した。

【0135】

最後に、別の非自明なアプローチは、所与の物体の内部パラメータ及び全体的な定常状態の熱抵抗 (R_{Total}) に基づいて、熱接触抵抗 (R_C) についての推定値を決定することである。この非限定的な例は、例示的な NIT 用途について以下に記載される。

【0136】

熱接触抵抗 (R_C) 決定のためのこれらのアプローチは、特定のデータ処理方法及び／又は NIT 技術に限定されないことに留意されたい。その代わりに、それらは、 NIT 及び／又は NIT 用途に利用されるデータ処理方法にかかわらず、熱接触抵抗 (R_C) 決定のための一般的な式及びアプローチとして使用されうる。

【0137】

図11は、物体の1つ以上の内部特性（すなわち、内部特性）及び物体と NIT センサ表面との間の推定熱接触抵抗 (R_C) を決定するために、制御回路によって実行される例示的なデータ処理方法のための非限定的な例示的な手順を示すフロー図である。この例では、データ処理方法はパラメータ推定方式を含む。1つ以上の特定された時刻における

物体の測定された表面温度（すなわち、測定されたセンサ温度）、1つ以上の特定された時刻における物体の測定された表面熱流束、1つ以上の特定された時刻における物体の内部パラメータの1つ以上のもの（例えば、 R'' （物体の定常状態熱抵抗）、 k 、 ρ 、 C 、 $\sqrt{k\rho C}$

など）の初期値、及び熱接触抵抗（ R'_c ）の初期値は、1つ以上の特定された時刻について計算されたセンサ温度を生成するために、計算されたセンサ温度式（例えば、式〔6〕）に入力される。この例では、1つ以上の特定された時刻についての計算されたセンサ温度と、1つ以上の特定された時刻についての測定されたセンサ温度との間で、差（例えば、誤差）が決定される。差は例えば、所定の閾値と比較され、閾値よりも大きい場合、その差は、内部パラメータ値及び熱接触抵抗（ R'_c ）値のうちの1つ以上を調整するために使用される。簡単にするために、1つ以上の調整された内部パラメータ値及び1つ以上の他の（すなわち、調整されていない）内部パラメータ値が、集散的に更新された値と呼ばれる。調整は、多くの異なる方法で行われてもよい。例えば、先行して使用された内部パラメータ及び熱接触抵抗（ R'_c ）値から生じる履歴差（例えば、誤差）におけるいかなる傾向又はパターンにかかわらず、内部パラメータ及び熱接触抵抗（ R'_c ）の1つ以上の後続値が使用されてもよい。他の例では、先行して使用された内部パラメータ及び熱接触抵抗（ R'_c ）値から生じる履歴差（例えば、誤差）に基づいて調整が行われうる。非限定的な例では、 k の値（例えば、 k_0 ）が100の差（すなわち、誤差）に関連し、 k （例えば、 k_1 ）のために使用されるより大きい値である次の値が200の誤差に関連する場合、制御回路は、 k_0 （ k_1 ）よりも大きい値を使用するときに増加する差（すなわち、誤差）を前提として、 k （ k_0 ）の元の値より小さい値を試みてよい。差が小さい値以下であるか、又は他のように最小であると見なされると、制御回路は、内部パラメータ及び熱接触抵抗（ R'_c ）に使用される対応する値が正確かつ最適な（すなわち、出力）推定値であると見なす。次いで、例えば、式〔3〕を使用することによって、制御回路は、物体の内部領域の内部温度分布を示す1つ以上の正確な値に対応する情報を（例えば、出力のために）生成する。さらに、所望であれば、制御回路は、 R'' 、 k 、 ρ 、 C 、 $\sqrt{k\rho C}$

のような物体の内部パラメータのうちの1つ以上のもの、及び熱接触抵抗（ R'_c ）を示す、正確な推定値（1つ以上）に対応する情報を（例えば、出力のために）生成する。

【0138】

今述べたアプローチは、物体の表面に配置されたNITEセンサから出力される熱流束及び温度信号を後処理することによって、熱事象にさらされてもよい間に、物体の内部パラメータ（例えば、 R'' 、 k 、 ρ 、 C 、 $\sqrt{k\rho C}$

など）、温度センサと物体表面との間の熱接触抵抗（ R'_c ）、物体の内部領域の内部温度分布（例えば、 $T_m(x, t_m)$ ）などを決定してもよい制御回路によって実行される非限定的で例示的な周期的NITEデータ処理方法である。CHFT+について、この熱事象は、例えば制御回路と共に使用される外部熱デバイスによって生成されうる。CHFT-について、例えばボディからの熱放散、エンジン・ブロック熱損失、対流冷却又は加熱等のような、制御回路と共に使用されない外部熱事象環境下で動作するように設計される。この手順は、制御回路によって非常に迅速に実行されうるので、熱流束及び温度信号が測定され、制御回路への入力として提供される際に、データ処理がリアルタイムで実行されうる。各追加の測定で、データ処理方法が再実行され、物体の内部領域の内部特性（すなわち、内部特性）の1つ以上についての値が決定され、例えば出力のための情報が生成

される。

【0139】

N I T I の他の方法（すなわち、技術）は、例えば熱数学的解（例えば、式 [3]）を、関心のある内部特性に応じて異なる形態に修正することによって実行されてもよい。熱数学的解及び対応する N I T I 方法の修正された構成の非限定的な例が、異なる用途について以下に提供される。これらの用途のそれぞれは、対応する熱数学的モデルを有する。一般に、使用される N I T I 用途及び手順に応じて、物体の 1 つ以上の内部特性の推定値を決定するために、異なるデータ処理方法が利用されてもよい。これらの方法のいくつかは、パラメータ推定方式を利用してもよく、一方、他のものはそうではなく、例えば、計算に基づいてもよい。

10

【0140】

他の例示的な実施形態では、物体の 1 つ以上の内部特性を（例えば、データ処理方法を介して）決定するために、例えば、熱数学的解（例えば、微分演算、積分演算など）に対して様々な数学的演算が実行されてもよい。

【0141】

物体の 1 つ以上の内部特性を決定するための 1 つ以上の並列熱流束センサ - 温度センサ対を有するシステム実施形態

複数の（少なくとも 2 つの）N I T I センサ（例えば、C H F T + 又は C H F T -）によって物体熱流束及び温度測定値を並列に取得する例示的な N I T I システム実施形態は、D U O N I T I 実施形態と呼ばれる。物体のより単純でよりロバストな N I T I を可能にすることに加えて、D U O N I T I 実施形態は、例示的な C H F T + 及び／又は例示的な C H F T - N I T I システム実施形態について上述した非限定的で例示的な N I T I システム実施形態及び／又は方法に関連しうる不確実性を排除する。

20

【0142】

並行して測定を行うために、例示的な D U O N I T I 実施形態における各 N I T I センサは、センサ・ノードとも呼ばれる各 N I T I センサ位置で生じる熱流束の量の差に対応する、各熱流束センサによって検出される異なる熱流束値を有するかもしれない。例示的な D U O N I T I 実施形態のこの態様は、差分熱流束環境と呼ばれる。この条件を実現するために、以下の例示的な実施形態が使用されてもよい。典型的には、差分熱流束環境の結果として、各センサ・ノード（すなわち、ノード）での温度測定値も異なる。

30

【0143】

例示的な D U O C H F T + 実施形態（複数の C H F T + ノード）を有する差分熱流束環境を作る 1 つの方法は、必要とされる差分熱流束環境を作るために、各 C H F T + 外部熱デバイス（例えば、ヒータ）が提供する熱エネルギーの量を異ならせることである。ヒータの場合、これは、例えば、各ヒータに供給される電圧を区別すること、各ヒータの電気抵抗を区別すること、各ヒータの電力密度を区別することなどによって実現されうる。図 12 は、例示的な D U O （並列 N I T I センサ・ノード）C H F T + （ヒータ付き）実施形態の断面を示す。この例示的な実施形態では、各 N I T I センサ（すなわち、センサ・ノード又はノード）は 1 つの熱流束センサ - 温度センサ対を含み、C H F T + ノードである結果として、ヒータ（すなわち、外部熱デバイス）を含む。

40

【0144】

外部熱デバイス（ヒータなど）がオプションでない場合、希望されない場合、又は使用されない場合、差分熱流束環境を作成する別の方法は、各センサ・ノードに異なる量の断熱材を配置することである。断熱材は、センサ・ノードを通して発生する熱流束の量を制御（すなわち、制限、増加等）するために使用されうる。異なる量の断熱材は、異なる断熱材厚さ及び／又は材料を介して実現されうる。断熱材は、センサ・ノードを通過して生じる熱伝達の量を増強し、増加するように設計された金属又は他の熱伝導性材料を含んでもよい。さらに、断熱材はフィルタとして作用し、実質的な熱流束及び温度信号が N I T I センサ（例えば、C H F T + 又は C H F T -）によって検出されることのみを可能にしてもよい。断熱材はまた、測定の質に影響を及ぼしうる外部損傷及び／又は外部刺激から N

50

ＩＴＩセンサを保護するために使用されてもよい。図１３は、差分熱流束環境を容易にするために、各センサ・ノード上の異なる量の断熱材を有する例示的なＤＵＯ（並列ＮＩＴＩセンサ・ノード）ＣＨＦＴー実施形態の断面を示す。ＮＩＴＩの例示的な実施形態では、センサ・ノードで使用される断熱材の特性は、１つ以上の物体内部特性の測定を行うために、既知である必要はなく、実験的に決定され、又は較正される必要もない。

【０１４５】

代替的に、例えば、信号ノイズが問題でない場合、１つのＣＨＦＴーノードが断熱材を組み込みつつ、他方のＣＨＦＴーノードが露出してもよい。この例示的な実施形態の断面が図１４に示される。

【０１４６】

図１５の別の実施形態は、１つのセンサ・ノードがＣＨＦＴ＋を組み込み、１つのセンサ・ノードがＣＨＦＴーを組み込むＤＵＯ　ＣＨＦＴ＋／－システムの断面を示す。

【０１４７】

ＤＵＯ　ＣＨＦＴーシステム断面のさらに別の例示的な実施形態が図１６に示される。この例示的な実施形態は、外部熱事象が個々のセンサ・ノードに固有である場合に適切でありうる。例えば、１つのセンサ・ノードがランプで加熱され、別のものはファンで冷却される。

【０１４８】

差分熱流束環境が作成される別の例示的な実施形態は、各熱流束センサ－温度センサ対に対して異なる熱抵抗を有する材料を使用することを含む。例えば、１つのセンサ・ノードが高熱抵抗の材料で作られた例示的なＮＩＴＩ実施形態（例えば、ＣＨＦＴー）を組み込み、１つのセンサ・ノードが低熱抵抗の材料で作られた例示的なＮＩＴＩ実施形態（例えば、ＣＨＦＴ＋）を組み込む。各センサ・ノードにおける全体的な熱抵抗のこの差によって、差分熱流束環境を実現することが可能になる。異なる熱抵抗は、例えば熱流束センサ及び／又は温度センサ（例えば、剛性及び／又は可撓性プリント回路基板、接着剤、基板など）と接着、接続、収容、及び／又は接触するために使用される１つ以上の材料内の導電性又は断熱性のビア／ギャップによって、例示的なＮＩＴＩ実施形態に導入されてもよい。他の例示的な実施形態では、１つのセンサ・ノードの熱流束センサ及び／又は温度センサが低い熱伝導率及び／又は特定された厚さの材料を使用して製造されてもよく、一方、別のセンサ・ノードの熱流束センサ及び／又は温度センサが高い熱伝導率及び／又は異なる特定された厚さの材料を使用して製造されてもよい。

【０１４９】

例示的なＤＵＯ　ＮＩＴＩ実施形態に組み込まれた１つ以上の並列センサ・ノードの結果として、上述の例示的なＣＨＦＴ＋及び例示的なＣＨＦＴー方法（センサ・ノードが独立して動作される場合）を実施することに加えて、信号測定及びデータ処理の革新的な方法が可能である。実証の目的で、一般的な、非限定的な、例示的な、差分及び商ベースのデータ処理方法が、差分熱流束環境で動作する場合のＤＵＯ　ＮＩＴＩシステムについてここで説明される。

【０１５０】

この例では、２つのＮＩＴＩセンサ・ノード（すなわち、センサ・ノード）は、所与の物体上に配置されるものとしてモデル化され、物体の内部特性はこの例では２つのセンサ・ノード位置で均一であると仮定される。この結果、各センサ・ノード（ノード１及び２）において、以下の例示的な独立した式が得られる。

$$T_{Sensor1,m} - q_{Sensor1,m}'' \times R_{C1}'' = T_{Internal} + R'' \times \left(q_{Sensor1,0}'' + \sum_{j=1}^m \Delta q_{Sensor1,j}'' \times \psi(t_m - t_{j-1}) \right) \quad [15]$$

10

20

30

40

50

$$T_{Sensor2,m} - q_{Sensor2,m}'' \times R_{C2}'' = T_{Internal} + R'' \times \left(q_{Sensor2,0}'' + \sum_{j=1}^m \Delta q_{Sensor2,j}'' \times \psi(t_m - t_{j-1}) \right) [16]$$

ここで、 $T_{Internal}$ は物体の内部温度（すなわち、内部温度分布）であり、 ψ は、1つ以上の特定された時刻における物体の過渡的な熱伝達影響を考慮する応答関数である。典型的には、 ψ は、各熱モデルに対して独立して導出され、1つ以上の内部パラメータに基づいてもよい。したがって、それは、典型的には所与のN I T I用途及び対応する熱モデルに固有である。いくつかの例示的なD U O N I T I実施形態では、1つ以上の特定された時刻における内部パラメータの1つ以上についての初期値は、応答関数（ ψ ）に関連する目的のために決定される必要があってもよい。これらの初期値は、（例えば、教科書、参照資料などから）予め決定されてもよく、（例えば、データ処理方法を介して）推定されてもよく、又は他のように決定されてもよい。いくつかの例示的な実施形態では、初期値は変更されず、1つ以上の特定された時刻にわたって一定に保たれる。他の例示的な実施形態では、初期値は、1つ以上の特定された時刻に更新されるか、他のように調整されてもよい。

10

定常状態では、式[15]と式[16]は次のように減少する：

$$T_{Sensor1,m} = T_{Internal,m} + q_{Sensor1,m}'' \times (R'' + R_{C1}'') [17]$$

20

$$T_{Sensor2,m} = T_{Internal,m} + q_{Sensor2,m}'' \times (R'' + R_{C2}'') [18]$$

【0151】

式[17]及び式[18]は、物体の過渡的な熱伝達影響を考慮する応答関数（ ψ ）を含まないことに留意されたい。したがって、それらは、典型的には特定のN I T I用途及び対応する熱モデルに限定されない。

【0152】

D U O N I T Iシステムのための一般的かつ例示的な差分ベースのデータ処理方法は式[15]と式[16]との間の差分を決定することを含み、これは、以下の結果をもたらす。

30

$$\begin{aligned} & (T_{Sensor1,m} - q_{Sensor1,m}'' \times R_{C1}'') - (T_{Sensor2,m} - q_{Sensor2,m}'' \times R_{C2}'') \\ &= R'' \times \left(q_{Sensor1,0}'' + \sum_{j=1}^m \Delta q_{Sensor1,j}'' \times \psi(t_m - t_{j-1}) \right) - R'' \times \left(q_{Sensor2,0}'' + \sum_{j=1}^m \Delta q_{Sensor2,j}'' \times \psi(t_m - t_{j-1}) \right) \end{aligned} [19]$$

再構成すると、

$$R'' = \frac{(T_{Sensor1,m} - q_{Sensor1,m}'' \times R_{C1}'') - (T_{Sensor2,m} - q_{Sensor2,m}'' \times R_{C2}'')}{q_{Sensor1,0}'' - q_{Sensor2,0}'' + \sum_{j=1}^m \Delta q_{Sensor1,j}'' \times \psi(t_m - t_{j-1}) - \sum_{j=1}^m \Delta q_{Sensor2,j}'' \times \psi(t_m - t_{j-1})} [20]$$

40

式[19]及び式[20]は、過渡効果が考慮され、2つのセンサ・ノードが並列に使用されるD U O N I T Iシステム差分ベースのデータ処理方法の例示的な汎用形式を表す。定常状態条件において、式[20]は、以下のように減少する。

$$T_{Sensor1,m} - T_{Sensor2,m} = q_{Sensor1,m}'' \times (R'' + R_{C1}'') - q_{Sensor2,m}'' \times (R'' + R_{C2}'') [21]$$

再構成すると、

50

$$R'' = \frac{(T_{Sensor1,m} - q_{Sensor1,m}'' \times R_{C1}'') - (T_{Sensor2,m} - q_{Sensor2,m}'' \times R_{C2}'')}{q_{Sensor1,m}'' - q_{Sensor2,m}''} \quad [22]$$

【 0 1 5 3 】

この例示的なデータ処理方法では、各センサ・ノードにおける熱接触抵抗（ R_{C1}'' 及び R_{C2}'' ）が既知である場合に、物体の内部パラメータに基づき、従ってそれを示す物体の定常状態熱抵抗（ R'' ）を求めるために、式〔20〕及び式〔22〕が使用されうる。したがって、所望であれば、1つ以上の他の内部パラメータについて値が決定される（例えば、事前に決定される、推定されるなど）場合に、物体の1つ以上の内部パラメータを決定するために、物体の定常状態熱抵抗（ R'' ）が使用されてもよい。これの非限定的な例が以下に示される。

10

【 0 1 5 4 】

センサ・ノード（ R_{C1}'' 及び／又は R_{C2}'' ）における熱接触抵抗についての推定値が未知である場合、これは、（例えば、上述の例示的なCHFT+又はCHFT-手順を介して）決定され、又は（例えば、所定の値を使用して）他のように決定されうる。

【 0 1 5 5 】

各センサ・ノード（ R_{C1}'' 及び R_{C2}'' ）における熱接触抵抗が無視できると推定される場合、式〔20〕は次のように減少し、

$$R'' = \frac{T_{Sensor1,m} - T_{Sensor2,m}}{q_{Sensor1,0}'' - q_{Sensor2,0}'' + \sum_{j=1}^m \Delta q_{Sensor1,j}'' \times \psi(t_m - t_{j-1}) - \sum_{j=1}^m \Delta q_{Sensor2,j}'' \times \psi(t_m - t_{j-1})} \quad [23]$$

20

式〔22〕は、次のように減少する。

$$R'' = \frac{T_{Sensor1,m} - T_{Sensor2,m}}{q_{Sensor1,m}'' - q_{Sensor2,m}''} \quad [24]$$

【 0 1 5 6 】

各センサ・ノードにおける熱接触抵抗が等しい場合（ $R_C'' = R_{C1}'' = R_{C2}''$ ）、式〔22〕は次のように減少する。

30

$$R''_{Total} = \frac{T_{Sensor1,m} - T_{Sensor2,m}}{q_{Sensor1,m}'' - q_{Sensor2,m}''} \quad [25]$$

ここで、 R''_{Total} は、物体の全定常状態熱抵抗であり、

$$R''_{Total} = R'' + R_C'' \quad [26]$$

【 0 1 5 7 】

40

DUO NITIシステムのための一般的かつ例示的な商ベースのデータ処理方法は、式〔15〕と式〔16〕との間の商を決定することを含み、これは、以下の結果をもたらす。

$$\frac{(T_{Sensor1,m} - q_{Sensor1,m}'' \times R_{C1}'') - T_{Internal}}{(T_{Sensor2,m} - q_{Sensor2,m}'' \times R_{C2}'') - T_{Internal}} = \frac{(q_{Sensor1,0}'' + \sum_{j=1}^m \Delta q_{Sensor1,j}'' \times \psi(t_m - t_{j-1}))}{(q_{Sensor2,0}'' + \sum_{j=1}^m \Delta q_{Sensor2,j}'' \times \psi(t_m - t_{j-1}))} \quad [27]$$

再構成すると、

50

$$T_{Internal,m} = \frac{(T_{Sensor2,m} - q_{Sensor2,m}'' \times R_{C2}'') \times (q_{Sensor1,0}'' + \sum_{j=1}^m \Delta q_{Sensor1,j}'' \times \psi(t_m - t_{j-1})) - (T_{Sensor1,m} - q_{Sensor1,m}'' \times R_{C1}'') \times (q_{Sensor2,0}'' + \sum_{j=1}^m \Delta q_{Sensor2,j}'' \times \psi(t_m - t_{j-1}))}{(q_{Sensor1,0}'' + \sum_{j=1}^m \Delta q_{Sensor1,j}'' \times \psi(t_m - t_{j-1})) - (q_{Sensor2,0}'' + \sum_{j=1}^m \Delta q_{Sensor2,j}'' \times \psi(t_m - t_{j-1}))} \quad [28]$$

式〔27〕及び式〔28〕は、過渡効果が考慮され、2つのセンサ・ノードが並列に使用されるDUO NITIシステム商ベースのデータ処理方法の例示的な汎用形式を表す。定常状態において、式〔27〕は、以下のように減少する。

$$\frac{(T_{Sensor1,m} - q_{Sensor1,m}'' \times R_{C1}'') - T_{Internal}}{(T_{Sensor2,m} - q_{Sensor2,m}'' \times R_{C2}'') - T_{Internal}} = \frac{q_{Sensor1,m}''}{q_{Sensor2,m}''} \quad [29]$$

10

再構成すると、

$$T_{Internal,m} = \frac{(T_{Sensor2,m} - q_{Sensor2,m}'' \times R_{C2}'') \times q_{Sensor1,m}'' - (T_{Sensor1,m} - q_{Sensor1,m}'' \times R_{C1}'') \times q_{Sensor2,m}''}{q_{Sensor1,m}'' - q_{Sensor2,m}''} \quad [30]$$

【0158】

この例示的なデータ処理方法では、各センサ・ノード（ R_{C1} 及び R_{C2} ）における熱接触抵抗が既知の場合、物体の内部温度分布（ $T_{Internal,m}$ ）を求めるために、式〔28〕及び式〔30〕が使用されうる。センサ・ノードにおける熱接触抵抗（ R_{C1} 及び／又は R_{C2} ）についての推定値が未知である場合、これは、（例えば、上述の例示的なCHFT+又はCHFT-手順を介して）決定され、又は（例えば、所定の値を介して）他のように決定されうる。

20

【0159】

各センサ・ノードにおける熱接触抵抗（ R_{C1} 及び R_{C2} ）が無視できると推定される場合、式〔28〕は次のように減少し、

$$T_{Internal,m} = \frac{T_{Sensor2,m} \times (q_{Sensor1,0}'' + \sum_{j=1}^m \Delta q_{Sensor1,j}'' \times \psi(t_m - t_{j-1})) - T_{Sensor1,m} \times (q_{Sensor2,0}'' + \sum_{j=1}^m \Delta q_{Sensor2,j}'' \times \psi(t_m - t_{j-1}))}{(q_{Sensor1,0}'' + \sum_{j=1}^m \Delta q_{Sensor1,j}'' \times \psi(t_m - t_{j-1})) - (q_{Sensor2,0}'' + \sum_{j=1}^m \Delta q_{Sensor2,j}'' \times \psi(t_m - t_{j-1}))} \quad [31]$$

30

式〔30〕は次のように減少する。

$$T_{Internal,m} = \frac{T_{Sensor2,m} \times q_{Sensor1,m}'' - T_{Sensor1,m} \times q_{Sensor2,m}''}{q_{Sensor1,m}'' - q_{Sensor2,m}''} \quad [32]$$

各センサ・ノードにおける熱接触抵抗が等しい場合（ $R_C = R_{C1} = R_{C2}$ ）、式〔32〕は、式〔30〕の形でもある。

【0160】

前述のように、例えば、差分及び商ベースのデータ処理方法の非限定的かつ例示的な過渡的形態は、応答関数（ ψ ）の存在を前提として、典型的に、各NITI用途及び熱モデルに固有である。しかし、例えば、非限定的かつ例示的な差分及び商ベースのデータ処理方法の定常状態形態が一般的であり、ほとんどすべてのNITI用途及び対応する熱モデルに適用可能である。

40

【0161】

図17は、物体の1つ以上の内部特性を決定するための並列熱流束センサ - 温度センサ対（すなわち、DUO NITIシステム）でNITIを実行するための例示的なNITIシステムを示す図である。（3つ以上のNITIセンサが使用されてもよいが）2つのNITIセンサ（それらを区別するために一方は「第1の」と呼ばれ、他方は「第2の」と呼ばれる）が示され、各NITIセンサ（例えば、CHFT+又はCHFT-）は温度

50

センサ及び熱流束センサ（すなわち、熱流束センサ - 温度センサ対）を含む。他の例示的な実施形態では、各 N I T I センサは、2 つ以上の温度センサ及び／又は 2 つ以上の熱流束センサを含んでもよい。各 N I T I センサについての温度センサ及び熱流束センサの互いに対する、別の N I T I センサに対する、及び物体に対する構成は、図 1 2 ～ 1 6 に示される非限定的で例示的ないずれかに図示されるものであってもよい。各 N I T I センサからの測定温度センサ及び測定熱流束センサのアナログ信号に対応する温度センサ及び熱流束センサからのアナログ信号出力は、適切な通信経路（例えば、導電体）を介して提供され、例えば、1 つ以上のアナログ・デジタル変換器（A D C）、マイクロコントローラなどを含んでもよいデータ取得（D A Q）回路によってデジタル信号に変換される。D A Q 回路は、測定された温度センサ及び測定された熱流束センサのデジタル信号を、適切な通信経路（例えば、導電体、無線信号など）を介して、上述及び後述のように処理するための制御回路に提供する。制御回路は、1 つ以上の適切に構成されたコンピュータ、マイクロプロセッサ、D S P、F P G A、又は他のデータ・プロセッサを含んでもよい。制御回路の適切な構成は、ハードウェアで、ソフトウェアで、又は組み合わせて実装されてもよい。制御回路は、ディスプレイ、ネットワーク、クラウド・コンピュータ・システム、携帯電話のような通信デバイス、ウェアラブル技術などのような出力を含むか、又はそれと通信する。出力はまた、センサの有効化及び無効化、遠隔監視、測定開始／停止、外部熱デバイス動作、データ・ロギング、温度制御、エネルギー・フロー制御、システム故障制御、予防保守制御、診断、システム性能、データ入力、データ表示、分析などのような 1 つ以上の制御動作のために使用されてもよい。この非限定的な例では、適用可能な場合（例えば、C H F T + ノードを使用する場合）、各外部熱デバイスは個々のリレー（すなわち、スイッチ）を使用して制御され、リレーは D A Q からのリレー信号によって動作され、このリレー信号は次いで、制御回路からの入力に基づいて、リレー信号を提供する。

【 0 1 6 2 】

図 1 8 A は、2 つの並列 N I T I センサ（それらを区別するために、一方は「第 1 の」と呼ばれ、他方は「第 2 の」と呼ばれる）を使用して、物体の 1 つ以上の内部パラメータ（すなわち、内部パラメータ）を決定するために、制御回路によって実行される差分ベースのデータ処理方法の例示的な手順を示すフロー図である。第 1 及び第 2 の N I T I センサのそれぞれにおける温度センサからの 1 つ以上の特定された時刻における測定された表面温度（すなわち、測定されたセンサ温度）と、第 1 及び第 2 の N I T I センサのそれぞれにおける熱流束センサからの 1 つ以上の特定された時刻における測定された表面熱流束とが、制御回路に入力される。1 つ以上の特定された時刻における 1 つ以上の内部パラメータ（例えば、 R'' 、 k 、 ρ 、 C 、

$$\sqrt{k\rho C}$$

など）についての初期値及び各センサ・ノードにおける熱接触抵抗（ R''_{c1} 及び R''_{c2} ）についての値も、制御回路に入力される。次いで、制御回路は、例えば式 [2 0] に基づいて、1 つ以上の特定された時刻における 1 つ以上の内部パラメータを決定する差分ベースのデータ処理方法を使用する。最後に、制御回路は、 R'' 、 k 、 ρ 、 C 、

$$\sqrt{k\rho C}$$

などのような物体の内部パラメータを示す 1 つ以上の正確な値に対応する情報を（例えば、出力のために）生成する。

【 0 1 6 3 】

図 1 8 B は、定常状態状態での 2 つの N I T I センサ（一方は「第 1」と呼ばれ、他方は「第 2」と呼ばれる）を使用して、物体の定常状態の熱抵抗（内部パラメータ）を決定するために、制御回路によって実行される差分ベースのデータ処理方法の例示的な手順を示すフロー図である。第 1 及び第 2 の N I T I センサのそれぞれにおける温度センサから

の1つ以上の特定された時刻における測定された温度（すなわち、測定されたセンサ温度）と、第1及び第2のN I T Iセンサのそれぞれにおける熱流束センサからの1つ以上の特定された時刻における測定された熱流束とが、制御回路に入力される。各センサ・ノードにおける熱接触抵抗（ $R_{\tau 1}$ 及び $R_{\tau 2}$ ）についての値も、制御回路に入力される。次いで、制御回路は、例えば式〔22〕に基づいて、1つ以上の特定された時刻における物体の定常状態の熱抵抗（内部パラメータ）を決定する差分ベースのデータ処理方法を使用する。最後に、制御回路は、物体の定常状態の熱抵抗を示す正確な値に対応する情報を（例えば、出力のために）生成する。さらに、所望であれば、制御回路は、物体の決定された定常状態熱抵抗、及び1つ以上の決定された（例えば、事前に決定された、推定された等）内部パラメータに基づいて、 k 、 ρ 、 C 、

$$\sqrt{k\rho C}$$

10

などのような物体の他の内部パラメータのうちの1つ以上を示す1つ以上の正確な値に対応する情報を（例えば、出力のために）生成してもよい。

【0164】

図19Aは、2つの並列N I T Iセンサ（それらを区別するために、一方は「第1」と呼ばれ、他方は「第2」と呼ばれる）を使用して、物体の内部領域の内部温度分布（すなわち、内部温度分布）を決定するために、制御回路によって実行される商ベースのデータ処理方法のための例示的な手順を示すフロー図である。第1及び第2のN I T Iセンサのそれぞれにおける温度センサからの1つ以上の特定された時刻における測定された温度（すなわち、測定されたセンサ温度）と、第1及び第2のN I T Iセンサにおける熱流束センサからの1つ以上の特定された時刻における測定された熱流束が、制御回路に入力される。1つ以上の特定された時刻における1つ以上の内部パラメータ（例えば、 R_{τ} 、 k 、 ρ 、 C 、

$$\sqrt{k\rho C}$$

20

など）についての値、及び各センサ・ノードにおける熱接触抵抗（ $R_{\tau 1}$ 及び $R_{\tau 2}$ ）の値も、制御回路に入力される。次いで、制御回路は、例えば式〔30〕に基づいて、1つ以上の特定された時刻における物体の内部領域の内部温度分布を決定する商ベースのデータ処理方法を使用する。最後に、制御回路は、物体の内部領域の内部温度分布を示す1つ以上の正確な値に対応する情報を（例えば、出力のために）生成する。

【0165】

図19Bは、定常状態条件の2つの並列N I T Iセンサ（それらを区別するために、一方は「第1」と呼ばれ、他方は「第2」と呼ばれる）を使用して、物体の内部領域の内部温度分布（すなわち、内部温度分布）を決定するために、制御回路によって実行される商ベースのデータ処理方法の例示的な手順を示すフロー図である。第1及び第2のN I T Iセンサのそれぞれにおける温度センサからの1つ以上の特定された時刻における測定された温度（すなわち、測定されたセンサ温度）と、第1及び第2のN I T Iセンサのそれぞれにおける熱流束センサからの1つ以上の特定された時刻における測定された熱流束が、制御回路に入力される。各センサ・ノードにおける熱接触抵抗（ $R_{\tau 1}$ 及び $R_{\tau 2}$ ）の値も、制御回路にも入力される。次いで、制御回路は、例えば式〔32〕に基づいて、1つ以上の特定された時刻における物体の内部領域の内部温度分布を決定する商ベースのデータ処理方法を使用する。最後に、制御回路は、物体の内部領域の内部温度分布を示す1つ以上の正確な値に対応する情報を（例えば、出力のために）生成する。

30

40

【0166】

図20は、並列N I T Iセンサ・ノード（すなわち、D U O N I T Iシステム）に基づくN I T Iセンサを含む非限定かつ例示的なN I T Iシステムにおいて制御回路によって実行される例示的な手順と、1つ以上の特定された時刻に物体の1つ以上の内部パラ

50

メータを決定するための差分ベースのデータ処理方法とを概説するフローチャートである。1つ以上の特定された時刻に、第1の非侵襲的熱流束センサ - 温度センサ対の温度センサから、制御回路によって、第1の測定された温度信号が受信される（ステップS7）。1つ以上の特定された時刻に表面で物体から出る又は物体に入る熱伝達の大きさを決定するために、1つ以上の特定された時刻に、第1の非侵襲的熱流束センサ - 温度センサ対の熱流束センサから、制御回路によって、第1の測定された熱流束信号が受信される（ステップS8）。1つ以上の特定された時刻に、第2の非侵襲的熱流束センサ - 温度センサ対内の温度センサから、制御回路によって、第2の測定された温度信号が受信される（ステップS9）。1つ以上の特定された時刻に表面で物体から出る又は物体に入る熱伝達の大きさを決定するために、1つ以上の特定された時刻に測定された第2の非侵襲的熱流束センサ - 温度センサ対の熱流束センサから、制御回路によって、第2の測定された熱流束信号が受信される（ステップS10）。制御回路は、1つ以上の特定された時刻における内部パラメータのそれぞれについて初期値を決定する（ステップS11）。次いで、制御回路は、1つ以上の特定された時刻における第1及び第2の非侵襲的熱流束センサ - 温度センサ対の温度センサからの測定された温度信号と、1つ以上の特定された時刻における第1及び第2の非侵襲的熱流束センサ - 温度センサ対の測定された熱流束信号と、1つ以上の特定された時刻における内部パラメータの初期値とに基づいて、1つ以上の特定された時刻における物体の内部パラメータの1つ以上を決定する（ステップS12）。制御回路は、1つ以上の特定された時刻における物体の内部パラメータのうちの1つ以上を示す情報を（例えば、出力のために）生成する（ステップS13）。制御回路によって実行される後続の手順では（すなわち、1つ以上の将来の特定された時刻に）、制御回路は、ステップS12で以前に（すなわち、1つ以上の特定された時刻に）決定された内部パラメータの1つ以上のものの値に基づいて、ステップS11における内部パラメータの1つ以上についての初期値を決定してもよい。さらに、制御回路は、ステップS7～ステップS11を任意の順序で実行してもよく、手順のこの非限定的な例で指定される順序に限定されない。定常状態条件では、制御回路は、オプションとしてステップS11を実行しなくてもよく、及び／又はステップS12において内部パラメータの初期値を使用しなくてもよい。さらに、制御回路は、第1の非侵襲的熱流束センサ - 温度センサ対の温度センサと物体の表面との間の熱接触抵抗に関連する1つ以上の影響、及び／又は第2の非侵襲的熱流束センサ - 温度センサ対の温度センサと物体の表面との間の熱接触抵抗に関連する1つ以上の影響を決定し、考慮するステップを実行してもよい。

【0167】

図21は、並列NITIセンサ・ノード（すなわち、DUO NITIシステム）に基づくNITIセンサを含む非限定的かつ例示的なNITIシステムにおいて制御回路によって実行される例示的な手順と、1つ以上の特定された時刻に物体の内部領域の内部温度分布を決定するための商ベースのデータ処理方法とを概説するフローチャートである。1つ以上の特定された時刻に、第1の非侵襲的熱流束センサ - 温度センサ対の温度センサから、制御回路によって、第1の測定された温度信号が受信される（ステップS14）。1つ以上の特定された時刻に表面で物体から出る又は物体に入る熱伝達の大きさを決定するために、1つ以上の特定された時刻に、第1の非侵襲的熱流束センサ - 温度センサ対の熱流束センサから、制御回路によって、第1の測定された熱流束信号が受信される（ステップS15）。1つ以上の特定された時刻に、第2の非侵襲的熱流束センサ - 温度センサ対内の温度センサから、制御回路によって、第2の測定された温度信号が受信される（ステップS16）。1つ以上の特定された時刻に表面で物体から出る又は物体に入る熱伝達の大きさを決定するために、1つ以上の特定された時刻に測定された第2の非侵襲的熱流束センサ - 温度センサ対の熱流束センサから、制御回路によって、第2の測定された熱流束信号が受信される（ステップS17）。制御回路は、1つ以上の特定された時刻における内部パラメータのそれぞれについて値を決定する（ステップS18）。次いで、制御回路は、1つ以上の特定された時刻における第1及び第2の非侵襲的熱流束センサ - 温度センサ対の温度センサからの測定された温度信号と、1つ以上の特定された時刻における第1

及び第2の非侵襲的熱流束センサ - 温度センサ対の測定された熱流束信号と、1つ以上の特定された時刻における内部パラメータの値とに基づいて、1つ以上の特定された時刻における物体の内部領域の内部温度分布を決定する（ステップS19）。制御回路は、1つ以上の特定された時刻における物体の内部領域の内部温度分布を示す情報を（例えば、出力のために）生成する（ステップS20）。さらに、制御回路は、ステップS14～ステップS18を任意の順序で実行してもよく、手順のこの非限定的な例で指定される順序に限定されない。定常状態条件では、制御回路は、オプションとしてステップS18を実行しなくてもよく、及び／又はステップS19において内部パラメータの値を使用しなくてもよい。さらに、制御回路は、第1の非侵襲的熱流束センサ - 温度センサ対の温度センサと物体の表面との間の熱接触抵抗に関連する1つ以上の影響、及び／又は第2の非侵襲的熱流束センサ - 温度センサ対の温度センサと物体の表面との間の熱接触抵抗に関連する1つ以上の影響を決定し、考慮するステップを実行してもよい。

10

【0168】

並列NITIセンサ・ノードに基づくNITIセンサを含む、非限定的かつ例示的なNITIシステムにおいて制御回路によって実行されるさらなる例示的な手順は、複数のデータ処理方法を含んでもよい。例えば、NITIシステムは、物体の1つ以上の内部パラメータを決定（例えば、計算）するための差分ベースのデータ処理方法と、物体の内部領域の内部温度分布を決定（例えば、計算）するための商ベースのデータ処理方法との両方を含んでもよい。NITIシステムは例えば、後に又は同時に複数のデータ処理方法を実行してもよい。他の例示的な実施形態では、データ処理方法は、1つ以上の内部特性を決定するために、複数のデータ処理方法の組み合わせに基づいてもよい。

20

【0169】

例示的なDUO NITI実施形態は、所定の熱流束及び温度条件を維持するために、制御回路を利用してもよい。例えば、制御回路は、外部熱デバイス（例えば、ヒータ）に供給される電力を調整することによって、定常状態条件を維持するために使用されうる。他の例示的な実施形態では、制御回路は、1つのセンサ・ノードで生じる熱流束の量及び／又は温度を規制して、別のセンサ・ノードで生じる熱流束及び／又は温度の一定の倍数にしてもよい。

【0170】

同様の条件は、制御回路なしでさらに実現されてもよい。例えば、各センサ・ノードで生じる熱流束又は温度を、例えば、別のセンサ・ノードの一定の倍数に規制するために、各センサ・ノード上の所定量の断熱材が使用されてもよい。

30

【0171】

センサ・ノードで発生する熱流束及び／又は温度が例えば、一定の倍数（Y）によって関連付けられるこのような環境を作るとは、DUO NITIシステム及びデータ処理方法のさらなる単純化を可能にする。

【0172】

例えば、制御回路及び／又は断熱材が、各センサ・ノードで生じる熱流束の間に以下の関係

$$Y \times q_{\text{Sensor1},m}'' = q_{\text{Sensor2},m}'' \quad [33]$$

40

を維持するために使用される場合、
式[27]は、次のように書き換えられ、

$$\frac{(T_{\text{Sensor1},m} - q_{\text{Sensor1},m}'' \times R_{C1}'') - T_{\text{Internal}}}{(T_{\text{Sensor2},m} - Y \times q_{\text{Sensor1},m}'' \times R_{C2}'') - T_{\text{Internal}}} = \frac{(q_{\text{Sensor1},0}'' + \sum_{j=1}^m \Delta q_{\text{Sensor1},j}'' \times \psi(t_m - t_{j-1}))}{(Y \times q_{\text{Sensor1},0}'' + \sum_{j=1}^m Y \times \Delta q_{\text{Sensor1},j}'' \times \psi(t_m - t_{j-1}))} \quad [34]$$

これは以下に簡略化される。

50

$$T_{Internal,m} = \frac{Y \times (T_{Sensor1,m} - q_{Sensor1,m}'' \times R_{C1}'') - (T_{Sensor2,m} - Y \times q_{Sensor1,m}'' \times R_{C2}'')}{(Y - 1)} \quad [35]$$

各センサ・ノードにおける無視できるか等しい熱接触抵抗（ R_c ）を仮定して、

$$T_{Internal,m} = \frac{Y \times T_{Sensor1,m} - T_{Sensor2,m}}{(Y - 1)} \quad [36]$$

この例では、式 [35] 及び式 [36] は、時間にわたる過渡的な熱伝達効果（例えば、応答関数（ ψ ）を介する）及び／又は物体の内部パラメータを考慮することなく、所与の物体の簡略化されたリアルタイム内部温度（ $T_{Internal,m}$ ）測定に使用されうる。

【0173】

例示的な用途

ここで、N I T I の異なる例示的な用途及び方法について、例示的な実施形態が説明される。これらの例のいくつかは、本発明者によって行われた試験に基づく実験データ結果を含んでいる。これは、用途又は方法の網羅的なリストであることを意味するものではなく、代わりに、N I T I が使用されうる方法の例を示す。さらに、例示的な N I T I 方法は以下に列挙される用途及び／又は例示的な実施形態に限定されず、異なる用途及び／又は例示的な実施形態のために使用されてもよく、及び／又はこれに基づいてもよい。

【0174】

実験データの結果は、差動サーモパイル技術に基づく1つ以上の熱流束センサと、薄膜サーモカップル技術に基づく1つ以上の温度センサとを含む例示的な N I T I センサの実施形態に基づいている。しかし、使用される熱流束センサ又は温度センサ（例えば、R T D 温度センサ、光ファイバ温度センサ、N T C 温度センサ、サーミスタ、サーモパイルなど）のタイプに関係なく同様の結果が得られてもよい。

【0175】

血液灌流測定用途

1つの用途は、図22に描写される例示的な実施形態に示されるような、組織における血液灌流（フロー）である。N I T I センサ（C H F T +）は、組織と接触するように示される。組織（すなわち、物体）は、血液灌流（ w ）、組織熱伝導率（ k ）、組織密度（ ρ ）、及び組織熱容量（ C ）を含む複数の内部パラメータを含む。組織の深さ（ x ）が増加することにつれて、組織の内部温度分布（ T ）はコア血液温度（ T_{Core} ）に近づく。この例示的な用途では、生体組織の大部分が血液で構成されていることを前提として、コア血液温度（ T_{Core} ）は、コア組織温度に等しい（すなわち、これと熱平衡にある）と仮定される。

組織における血液灌流の影響を含む生体熱伝達のための例示的な熱数学的モデルが以下の表2に説明される。

表2：熱流束境界条件を有する組織のための熱数学的モデル（ペンズ生物 - 熱方程式に基づく）

PDE	$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - w(T - T_{Core})$
境界条件	$-k \frac{\partial T}{\partial x} = q_{Sensor}''(t), \quad x = 0$ $T \rightarrow T_{Core}, \quad x \rightarrow \infty$
初期条件	$T = T_{Initial}(x), \quad t = 0$

10

20

30

40

50

【 0 1 7 6 】

表 2 の熱数学的モデルの解（内部温度分布（ T ））は、組織表面（ $x = 0$ ）で評価された場合に、以下ようになる。

$$T_{Tissue,m} = T_{Tissue,0} + \sum_{j=1}^m \Delta q_{Sensor,j}'' \times \frac{1}{k} \sqrt{\frac{\alpha}{w}} \times \text{Erf} \left(\sqrt{w(t_m - t_{j-1})} \right) \quad [37]$$

ここで、初期の組織表面温度は以下であり、

$$T_{Tissue,0} = T_{Core} + q_{Sensor,0}'' \times \frac{1}{k} \sqrt{\frac{\alpha}{w}} \quad [38]$$

熱流束は、組織に入るときに正であると規定される。

【 0 1 7 7 】

N I T I センサ出力に関して、かつ N I T I センサと組織表面との間の熱接触抵抗（ R''_c ）の影響を含む式 [37] を書き換えると、以下が得られる。

$$T_{Tissue,m} = T_{Sensor,0} - q_{Sensor,0}'' \times R''_c + \sum_{j=1}^m \Delta q_{Sensor,j}'' \times \frac{1}{k} \sqrt{\frac{\alpha}{w}} \times \text{Erf} \left(\sqrt{w(t_m - t_{j-1})} \right) \quad [39]$$

ここで、

$$\frac{1}{k} \sqrt{\frac{\alpha}{w}} = \sqrt{\frac{1}{k \rho C w}}$$

は組織の定常状態熱抵抗（ R'' ）である。

この非限定的な例では、コア血液温度（ T_{Core} ）が時間と共に一定であり、変化しないと仮定される。しかし、コア血液温度（ T_{Core} ）が一定でない場合、影響は、内部パラメータ（例えば、血液灌流（ w ））の変更に関連する影響とは区別されてもよい。これは、このような変化から生じる 1 つ以上の影響の差に起因する。例えば、いくつかの場合に、血液灌流（ w ）の変化に関連する影響は、例えばこの例では式 [39] の非線形表現の結果である表面温度変化を介して実現されうる。しかし、コア血液温度（ T_{Core} ）の変化に関連する影響は、例えばこの例では、式 [38] と式 [39] との組み合わせで見出される線形表現の結果である表面温度変化を介して実現されうる。線形影響と非線形影響との差は、異なる基礎原因（例えば、コア血液温度（ T_{Core} ）又は内部パラメータの変化）間の区別及び差別化を可能にする。さらに、この非限定的な例におけるように、コア血液温度（ T_{Core} ）が一定であると仮定するのとは対照的に、経時的に変化するコア血液温度（ T_{Core} ）を考慮するために、他の熱数学的モデルが導出されてもよい。

【 0 1 7 8 】

血液性能－パラメータ推定実施形態を用いた周期的測定

周期的なデータ処理方法と共に使用される例示的な N I T I センサ実施形態（例えば、C H F T + 又は C H F T -）について、式 [39] は、血液灌流（ w ）、コア血液（すなわち、組織）温度（ T_{Core} ）、及び／又は N I T I センサと組織表面との間の熱接触抵抗（ R''_c ）の内部パラメータを決定するために、パラメータ推定方式において使用されてもよい。これは、1 つ以上の熱流束センサ－温度センサ対セクションを有する N I T I システムの実施形態で例として提示された一般的なケースに類似しているが、異なる N I T I 用途のための異なる熱モデルを有する。この例では、組織熱伝導率（ k ）、組織密度（ ρ ）、及び組織熱容量（ C ）の内部パラメータについての所定の一定値が使用される。この例示的な用途で最小化されるべき目的関数の以下である。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{M-1} \sum_{m=1}^{M-1} (T_{Sensor,m} - T_{Calculated,m})^2} \quad [40]$$

ここで、

$$T_{Calculated,m} = T_{Tissue,m} + q_{Sensor,m}'' \times R_C'' \quad [41]$$

10

であり、

$$R_C'' = \frac{\sum_{n=1}^{N-1} \frac{T_{Sensor,n} - T_{Tissue,n}}{q_{Sensor,n}}}{N-1} \quad [42]$$

である。

【 0 1 7 9 】

例示的な C H F T + 実施形態例（ヒータ付き）は、擬似組織内に制御された水灌流及び温度環境を作り出すことができる生体組織シミュレータで試験された。このシミュレータは、ファントム組織システム又はファントムと呼ばれる。異なる流量（灌流レート）で、C H F T + が擬似組織上に置かれ、以下のように測定された。

20

- 10 秒の定常状態データが記録された。
- ヒータを約 6.5 秒間作動させ、表面熱流束及び表面温度信号を介して C H F T + によって測定されるような組織の過渡的な熱応答を生じさせた。
- データの全体は、1 秒未満でパラメータ推定方式を含む周期的データ処理方法を介して処理され、その結果、灌流（w）、コア水温（T_{core}）、及び C H F T + と擬似組織表面との間の熱接触抵抗（R_c''）が出力された。

表 3：周期的パラメータ推定データ処理方法を用いた例示的な血液灌流 C H F T + 実施形態の結果

30

流量 ($\frac{cc}{min}$)	灌流・ $w(\frac{ml_B/s}{ml_T})$			温度・ $T_{Core}(^{\circ}C)$		$R_C''(^{\circ}C \frac{m^2}{W})$
	CHFT+	ファントム	差	CHFT+	ファントム	
10	0.0237	0.0185	21.94 %	32.83	32.92	0.000206
15	0.0360	0.0347	3.61 %	32.12	31.93	0.000205
20	0.0533	0.0524	1.69 %	33.03	33.23	0.000254
25	0.0810	0.0709	12.47 %	30.24	30.48	0.000218

40

【 0 1 8 0 】

表 3 を見ると、例示的な C H F T + 実施形態を用いた灌流（w）についての推定値は、15 cc/分及び 20 cc/分の流量についてのファントム C F D モデル（すなわち、ファントム）と密接に呼応している。10 cc/分及び 25 cc/分は、それぞれ 21.94 % 及び 12.47 % の差を被る。これは、本発明者が実験データ収集を行っていた際に、10 cc/分及び 25 cc/分の流量を維持することが困難であったためと考えられる。これらの流量を設定する場合、しばしば、ファントム・モデルと比較すると、流量が予想よりも大きくスキューし、流量測定値が高くなる結果となる。血液灌流の単位は、

$$\frac{ml_B/s}{ml_T}$$

50

として規定され、組織の体積（例えば、組織のミリメートル）を通る血液流量（例えば、毎秒ミリリットルのブロー・フロー）の大きさが提供されることに留意されたい。ファントム組織システムで試験されたこれらの例示的な実施形態では、血液灌流が代わりに灌流として指定され、血液流量は代わりに水流量である。

【0181】

いくつかの例示的な実施形態では、血液灌流（ w ）の単位が S^{-1} にさらに低減されてもよい。他の例示的な実施形態では、血液灌流（ w ）の単位は、組織の所与の塊（例えば、100グラム）を通る血流流量の大きさを提供するために、密度値と組み合わせられてもよい。

【0182】

さらに、灌流（ w ）の推定値は、流量が増加することにつれて増加する。加えて、熱接触抵抗（ R_{tc} ）は、予想されるように、実験測定全体を通してその一貫性を意味する比較的一定である。灌流水の推定コア温度（ T_{core} ）は、ファントム内の水中ビーズ・サーモカップルを用いて記録された灌流水温（ T_{water} ）とよく整合する。最大の差は、 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ / 分で生じる約 $0.24\text{ }^{\circ}\text{C}$ であった。

【0183】

このデータ処理方法で使用されるパラメータ推定方式が実験データと共に使用される場合に最適な灌流（ w ）値を決定する能力を実証するために、 $15\text{ cc}/\text{分}$ の場合について、式 [40]（すなわち、 $RMSE$ ）の例示的な目的関数と、灌流（ w ）との間の関係が図23に表示される。図23のグラフは、この関係が 0.0360 s^{-1} の灌流（ w ）値において大域的最小値を有することを示す。これは、表3に示されるように、 $15\text{ cc}/\text{分}$ の場合についての灌流の推定値に対応する。

【0184】

$15\text{ cc}/\text{分}$ の場合について、図24は、計算された（出力）センサ温度曲線と測定された（入力）センサ温度曲線との間の整合の例を示すグラフである。2つの温度曲線の間の整合は、式 [41] を介して計算された（出力）センサ温度曲線を構築するために使用される内部パラメータ値（ k 、 ρ 、 C 、 w ）及び熱接触抵抗（ R_{tc} ）値が、組織（すなわち、物体）内で発生する実際の値と同じであることを示す。不正確な値は、例えば図25に示されるように、不十分な整合をもたらす。

【0185】

先に述べたように、この例では、組織熱慣性（

$$\sqrt{k\rho C}$$

）の内部パラメータを決定するために、上記の灌流測定のために実行される例示的なデータ処理方法において、組織熱伝導率（ k ）、組織密度（ ρ ）、及び組織熱容量（ C ）についての所定の値が一定の値として入力された。組織熱慣性を決定するための別の方法は例えば、データ処理方法の一部としての1つ以上のパラメータ推定方式によるものである。

【0186】

組織熱慣性を推定する1つの例示的な方法は、行われる表面測定の異なる期間について異なる目的関数を規定することであってもよい。これは、計算された（出力）センサ温度曲線が経時的に異なる内部パラメータ感度を有し、従って、各内部パラメータ（例えば、

$$\sqrt{k\rho C}$$

及び w ）の影響が区別されうるために可能である。これにより、内部パラメータ値が個別に推定されてもよい。図26は、内部パラメータに対する計算された（出力）センサ温度曲線のこの異なる感度を示す。具体的には、初期期間中の組織熱伝導率（ k ）、組織密度（ ρ ）、及び組織熱容量（ C ）の積に対する感度がより高く、一方、血液灌流（ w ）に対する感度は最初に最小であるが、時間とともに増加する。したがって、例えば、パラメー

タ推定方式を含んでもよいデータ処理方法では、 $k \rho C$ の推定値を決定するように設計された目的関数が初期期間を含むように規定されてもよく、一方、 w の値を決定するように設計された目的関数が後の期間を含むように規定されてもよい。さらに、目的関数は、同時に又は所定の順序で（例えば、交互に）動作するように規定されてもよい。

【0187】

組織熱伝導率（ k ）、組織密度（ ρ ）、及び組織熱容量（ C ）を決定するための別の例示的な方法は、組織熱伝導率（ k ）、組織密度（ ρ ）、及び組織熱容量（ C ）の所定の値を使用する場合に、血液灌流（ w ）値が決定された後に、それらを計算することである。例えば、組織熱伝導率（ k ）、組織密度（ ρ ）、及び組織熱容量（ C ）の内部パラメータについての所定の値を使用して、最適な血液灌流（ w ）値が決定されると、 $k \rho C$ の量は、例えば式〔43〕を使用して計算されうる。

$$k\rho C = \frac{1}{w} \left(\frac{\sum_{j=1}^m \Delta q_{\text{Sensor},j}'' \times \text{Erf}(\sqrt{w(t_m - t_{j-1})})}{T_{\text{Sensor},m} - q_{\text{Sensor},m}'' \times R_C'' - T_{\text{Sensor},0} + q_{\text{Sensor},0}'' \times R_C''} \right)^2 \quad [43]$$

ここで、右辺の血液灌流（ w ）は、組織熱伝導率（ k ）、組織密度（ ρ ）、及び組織熱容量（ C ）の所定の（すなわち、以前の）値を使用する場合に決定される最適な血液灌流（ w ）値である。

例えば式〔43〕に基づく方法は、例えば組織熱伝導率（ k ）、組織密度（ ρ ）、及び組織熱容量（ C ）の積を決定するために、種々の方法において使用されうる。例えば、単一又は複数のインデックス（ m ）で測定が行われうる。複数のインデックスの場合、結果として得られる値の平均が、例えば、決定された値とみなされてもよい。所望であれば、 $k \rho C$ についてより最近に決定された値が、以前に決定された値を更新し、血液灌流（ w ）値を再推定するために使用されてもよい。このルーチンが多く実行されるほど、組織熱慣性（

$$\sqrt{k\rho C}$$

）及び血液灌流（ w ）の決定された値はより正確になりうる。この非限定的で例示的なN I T I方法は、一部又はすべてのN I T Iの実施形態及び／又は用途に使用されてもよい。

【0188】

血液灌流－パラメータ推定を用いたリアルタイム測定実施形態

例示的な血液灌流－パラメータ推定実施形態を使用する周期的測定では、制御回路によるデータ処理がすべての測定が行われた後に始まる。このように、上記の実験的ファントム試験では、約75秒ごとに周期的に測定値が出力された。これに代えて、N I T Iセンサと組織表面との間の血液灌流（ w ）、コア血液温度（ T_{Core} ）、及び／又は熱接触抵抗（ R_c ）のリアルタイム出力を提供するために、N I T Iセンサ（例えば、CHFT+又はCHFT-）データがリアルタイムで処理されてもよい。時間が経つにつれて、パラメータ推定方式を含むデータ処理方法によってリアルタイムに処理される表面熱流束及び表面温度曲線に、より多くのデータ・ポイントが追加され、これは1秒未満で値を出力する。

【0189】

血液灌流－パラメータ推定なしのリアルタイム測定実施形態

式〔39〕は、以下のように再構成されうる。

$$\sqrt{\frac{1}{k\rho C w}} = \frac{T_{\text{Tissue},m} - (T_{\text{Sensor},0} - q_{\text{Sensor},0}'' \times R_C'')}{\sum_{j=1}^m \Delta q_{\text{Sensor},j}'' \times \text{Erf}(\sqrt{w(t_m - t_{j-1})})} \quad [44]$$

ここで、

10

20

30

40

50

$$T_{Tissue,m} = T_{Sensor,m} - q_{Sensor,m}'' \times R_C'' \quad [45]$$

である。

式 [44] と式 [45] とを組み合わせると、

$$w = \left[k\rho c \left(\frac{(T_{Sensor,m} - q_{Sensor,m}'' \times R_C'') - (T_{Sensor,0} - q_{Sensor,0}'' \times R_C'')}{\sum_{j=1}^m \Delta q_{Sensor,j}'' \times \text{Erf}(\sqrt{w(t_m - t_{j-1})})} \right)^2 \right]^{-1} \quad [46]$$

10

となる。

【0190】

NITIセンサ（例えば、CHFT+又はCHFT-）と組織表面との間の熱接触抵抗（ R_C'' ）が既知であり、組織熱伝導率（ k ）、組織密度（ ρ ）、及び組織熱容量（ c ）についての典型的な値が入力される場合、式 [46] は、血液灌流（ w ）の典型的な値が右辺に入力されるときにリアルタイム血液灌流測定のために使用されてもよい。いくつかの例示的な実施形態では、例えば血液灌流（ w ）の変化が関心対象である場合、 $T_{Sensor,0} - q_{Sensor,0}'' \times R_C''$ の量は1つ以上の特定された時刻に仮定されうる。他の例示的な実施形態では、 $T_{Sensor,0} - q_{Sensor,0}'' \times R_C''$ の量は、例えば追加の温度センサを使用することによって決定されてもよく、その出力は組織表面及び／又はコア（すなわち、内部）組織温度を示す。

20

【0191】

左辺の計算された血液灌流（ w ）値は正確ではないが、正確な定量的及び／又は定性的測定には依然として十分である。さらに、最も正確な結果のために、右辺の血液灌流（ w ）の典型的な値は、式 [46] を介して計算された最も最近の値及び／又は正確な値を反映するように更新されてもよい。他の方法では、右辺及び左辺の血液灌流（ w ）についての値を同時に決定して、正確な定量的測定を提供してもよい。これは、右辺に典型的な血液灌流（ w ）値を入力する必要性を省略してもよい。熱接触抵抗（ R_C'' ）値が未知である場合、それは（例えば、上記のNITI手順を介して）決定されうるか、又は他のように決定され、考慮されうる。一部の場合に、熱接触抵抗（ R_C'' ）は無視できると推定されてもよい。

30

【0192】

さらに、定常状態条件では、式 [46] は以下のように減少する。

$$w = \left[k\rho c \left(\frac{(T_{Sensor,m} - q_{Sensor,m}'' \times R_C'') - (T_{Sensor,0} - q_{Sensor,0}'' \times R_C'')}{q_{Sensor,m}'' - q_{Sensor,0}''} \right)^2 \right]^{-1} \quad [47]$$

式 [47] もはや、右辺の典型的な血液灌流（ w ）値を必要としない。定常状態条件は、外部熱デバイス（例えば、ヒータ、クーラなど）を介して組織表面で生じる熱流束及び／又は温度を規制する制御回路を含む種々の方法で実現されうる。

40

【0193】

血液灌流-DUO NITIセンサ実施形態

第1及び第2の並列NITIセンサ・ノード（各ノードが熱流束センサ-温度センサ対を有する）を使用する場合の例示的なDUO NITIセンサ実施形態について、2つの独立した方が形成される。

$$T_{Sensor1,m} - q_{Sensor1,m}'' \times R_{C1}'' = T_{Core} + q_{Sensor1,0}'' \times \frac{1}{k} \sqrt{\frac{\alpha}{w}} + \sum_{j=1}^m \Delta q_{Sensor1,j}'' \times \frac{1}{k} \sqrt{\frac{\alpha}{w}} \times \text{Erf} \left(\sqrt{w(t_m - t_{j-1})} \right) \quad [48]$$

50

$$T_{Sensor2,m} - q_{Sensor2,m} \times R_{C2}'' = T_{Core} + q_{Sensor2,0} \times \frac{1}{k} \sqrt{\frac{\alpha}{w}} + \sum_{j=1}^m \Delta q_{Sensor2,j} \times \frac{1}{k} \sqrt{\frac{\alpha}{w}} \times \text{Erf} \left(\sqrt{w(t_m - t_{j-1})} \right) \quad [49]$$

【0194】

例示的な差分ベースのデータ処理方法を使用すると、式[48] - 式[49]は以下を生じる。

$$w = \left[k\rho c \left(\frac{(T_{Sensor1,m} - q_{Sensor1,m} \times R_{C1}'') - (T_{Sensor2,m} - q_{Sensor2,m} \times R_{C2}'')}{(q_{Sensor1,0} - q_{Sensor2,0} + \sum_{j=1}^m \Delta q_{Sensor1,j} \times \text{Erf}(\sqrt{w(t_m - t_{j-1})}) - \sum_{j=1}^m \Delta q_{Sensor2,j} \times \text{Erf}(\sqrt{w(t_m - t_{j-1})}))} \right)^2 \right]^{-1} \quad [50]$$

10

【0195】

この過渡式は、DUO NITIセンサ構成の結果であり、右辺の組織熱伝導率(k)、組織密度(ρ)、組織比熱容量(C)、及び血液灌流(w)についての典型的な値を入力する場合に、コア血液温度(T_{Core})にかかわらず、リアルタイムの血液灌流(w)測定を可能にする。

【0196】

左辺の計算された血液灌流(w)値は正確ではないが、依然として非常に近く、正確な定量的及び／又は定性的測定には十分である。さらに、最も正確な結果のために、血液灌流(w)の典型的な値は、式[50]を介して計算された最も最近の及び／又は正確な値を反映するように更新されてもよい。他の方法では、右辺及び左辺の血液灌流(w)についての値を同時に決定して、正確な定量的測定を提供してもよい。これは、右辺に典型的な血液灌流(w)値を入力する必要性を省略してもよい。

20

【0197】

各NITIセンサ(例えば、CHFT+又はCHFT-)と組織表面との間の熱接触抵抗(R_{c1}及びR_{c2})の推定値は、(例えば、上記のNITI手順を介して)決定されるか、又は他のように決定される。一部の場合に、熱接触抵抗(R_{c1}及び／又はR_{c2})は無視できると推定されてもよい。

【0198】

定常状態では、式[50]が以下のように減少する。

30

$$w = \left[k\rho c \left(\frac{(T_{Sensor1,m} - q_{Sensor1,m} \times R_{C1}'') - (T_{Sensor2,m} - q_{Sensor2,m} \times R_{C2}'')}{(q_{Sensor1,m} - q_{Sensor2,m})} \right)^2 \right]^{-1} \quad [51]$$

ここで、典型的な血液灌流(w)値もはや右辺で必要とされない。定常状態条件は、外部熱デバイス(ヒータ、クーラなど)を介して組織表面で生じる熱流束及び／又は温度を規制する制御回路を含む種々の方法で実現される。

【0199】

図27は、30cc/分、20cc/分、及び10cc/分の異なる流量でファントム上の擬似組織の灌流(w)を測定するために使用される場合の例示的なDUO CHFT+実施形態の結果を示すグラフである。このグラフは、例示的なDUO CHFT+実施形態が最初に30cc/分(〜0.035

40

$$\frac{ml_B/s}{ml_T}$$

の灌流(w)速度)でオンにされた場合に、ファントム上の擬似組織の灌流(w)を決定できることを示す。その後、約10分後、例示的なDUO CHFT+実施形態は、ファントム流量が10cc/分(〜0.020

50

$$\frac{ml_B/s}{ml_T}$$

の灌流（w）速度）に調整され、その後、20cc/分（～0.027

$$\frac{ml_B/s}{ml_T}$$

の灌流（w）速度）に増加される際に、灌流（w）の変化をリアルタイムで決定し、実験測定は、約10分後に終了する。リアルタイムでの例示的なDUO CHFT+方法の正確さ及び呼応を示すために、灌流測定のための異なる例示的なNITI方法（CHFT+周期的）もまた、各特定された流量での灌流速度を決定するために使用される。2つの大きな間の呼応は、組織の灌流（w）速度を決定する際の両方の方法の有効性を示す。

【0200】

組織測定用途の水和

上記の血液灌流測定のための例示的な方法及び実施形態のすべてはまた、これらの例示的な方法において規定されるような組織の定常状態熱抵抗（R''）である

$$\sqrt{\frac{1}{kpcw}} = \frac{1}{k} \sqrt{\frac{\alpha}{w}},$$

を決定するために使用されう。組織の定常状態の熱抵抗（R''）は、組織水和の正確で信頼性のある指標であってもよい。例えば、相関は、例えば組織の定常状態の耐熱性に基づいて、組織の水和及び脱水レベルを測定するための手段として開発され、使用されう。血液灌流（w）又は他の内部パラメータを示す独立した値もまた、組織の水和及び脱水レベルを測定するために使用されてもよい。

【0201】

組織のコア温度測定用途

式[37]と式[38]とを組み合わせると、以下となる。

$$T_{Tissue,m} = T_{Core} + q_{Sensor,0}'' \times \frac{1}{k} \sqrt{\frac{\alpha}{w}} + \sum_{j=1}^m \Delta q_{Sensor,j}'' \times \frac{1}{k} \sqrt{\frac{\alpha}{w}} \times \text{Erf} \left(\sqrt{w(t_m - t_{j-1})} \right) \quad [52]$$

NITIセンサ出力に関する式[52]を書き直し、NITIセンサと組織表面との間の熱接触抵抗（R''_c）の影響を含めると、以下となる。

$$T_{Sensor,m} - q_{Sensor,m}'' \times R_C'' = T_{Core} + q_{Sensor,0}'' \times \frac{1}{k} \sqrt{\frac{\alpha}{w}} + \sum_{j=1}^m \Delta q_{Sensor,j}'' \times \frac{1}{k} \sqrt{\frac{\alpha}{w}} \times \text{Erf} \left(\sqrt{w(t_m - t_{j-1})} \right) \quad [53]$$

再構成して、T_{Core}が時間の経過とともに変化する値に依存することを認識すると（測定インデックス（m））、以下になる。

$$T_{Core,m} = T_{Sensor,m} - q_{Sensor,m}'' \times R_C'' - q_{Sensor,0}'' \times \frac{1}{k} \sqrt{\frac{\alpha}{w}} - \sum_{j=1}^m \Delta q_{Sensor,j}'' \times \frac{1}{k} \sqrt{\frac{\alpha}{w}} \times \text{Erf} \left(\sqrt{w(t_m - t_{j-1})} \right) \quad [54]$$

【0202】

式[54]は、コア組織温度（T_{Tissue,m}）測定のための例示的な式であり、以下の例示的な実施形態において使用される。これらの例示的な実施形態のいくつかについて、組織熱伝導率（k）、組織密度（ρ）、組織比熱容量（C）、NITIセンサと組織表面との間の熱接触抵抗（R''_c）、及び／又は血液灌流（w）の値が決定される必要がある。これは例えば、これらの値を（例えば、先に記載したCHFT+又はCHFT-方法を介して）決定することによって、又は例えば、所定の値（例えば、教科書からの値）を使用す

ることによって行われてもよい。

【0203】

組織のコア温度-CHFT+(能動的溫度測定)実施形態

CHFT+実施形態は、NITIを実行するために使用されうる熱事象（すなわち、熱伝達）を生成するために、ヒータのような統合された外部熱デバイスを使用する。コア組織温度($T_{Core,m}$)測定のために、ヒータは任意の方式（定常、周期的、循環的など）で動作してもよく、この例では、式[54]は、血液灌流(w)、組織熱伝導率(k)、組織密度(ρ)、組織熱容量(C)、及び推定された熱接触抵抗(R_c)の値が右辺に入力される場合、コア組織温度($T_{Core,m}$)を正確に、かつリアルタイムで出力する。これらの値は例えば、データ処理方法（例えば、パラメータ推定方式を含む）を使用することによって決定されてもよく、他のように決定され、考慮されてもよい。いくつかの場合に、熱接触抵抗(R_c)は無視できると推定されてもよい。必要ではないが、走行、接触などのような外部刺激からの誤った信号を防止するために、CHFT+を断熱材料で覆うことが有益であってもよい。

10

【0204】

図28は、2cc/分の流量でファントム上の擬似組織のコア温度($T_{Core,m}$)を測定するために使用される場合の、例示的なCHFT+実施形態（統合されたヒータを有する）の結果を示すグラフである。このグラフでは、例示的なCHFT+実施形態は、表面温度条件にかかわらず、ファントム上の擬似組織のコア温度($T_{Core,m}$)（すなわち、測定（内部））を決定できることが示されている。具体的には、統合されたヒータがオンになった結果、最初は表面温度が上昇する。その後、ある期間の後、外部ファン（すなわち、熱外乱）が例示的なCHFT+実施形態に吹き付けられた結果として、表面温度が低下する。周囲の熱条件におけるこれらの突然かつ予想外の変化にかかわらず、例示的なCHFT+実施形態は、擬似組織の中心温度($T_{Core,m}$)を、ファントム内及び擬似組織の下に配置された内部プローブと密接に呼応して測定する。

20

【0205】

組織のコア温度-CHFT-(受動的溫度測定)実施形態

CHFT-実施形態は、NITIを行うために、例えば、哺乳類からの身体熱放散のような外部熱事象を使用する。外部熱事象にさらされる場合、例えば、式[54]は、血液灌流(w)、組織熱伝導率(k)、組織密度(ρ)、組織熱容量(C)、及び推定された熱接触抵抗(R_c)の値が右辺に入力される場合、コア組織温度($T_{Core,m}$)を正確に、かつリアルタイムで出力する。これらの値は例えば、データ処理方法（例えば、パラメータ推定方式を含む）を使用することによって決定されてもよく、他のように決定され、考慮されてもよい。いくつかの場合に、熱接触抵抗(R_c)は無視できると推定されてもよい。必要ではないが、走行、接触などのような外部刺激からの誤った信号を防止するために、CHFT-を断熱材料で覆うことが有益であってもよい。

30

【0206】

図29は、2cc/分の流量でファントム上の擬似組織のコア温度($T_{Core,m}$)を測定するために使用される場合の、例示的なCHFT-実施形態の結果を示すグラフである。このグラフでは、例示的なCHFT+実施形態は、表面温度条件にかかわらず、ファントム上の擬似組織のコア温度($T_{Core,m}$)（すなわち、測定（内部））を決定できることが示されている。具体的には、表面温度は最初は安定しているが、例示的なCHFT-実施形態及び擬似組織に空気を吹き付けるために、外部ファン（すなわち、熱外乱）が循環される（すなわち、オン及びオフにされる）。周囲の熱条件におけるこれらの突然かつ予想外の変化にかかわらず、例示的なCHFT-実施形態は、擬似組織の中心温度($T_{Core,m}$)を、ファントム内及び擬似組織の下に配置された内部プローブと密接に呼応して測定する。

40

【0207】

組織のコア温度-CHFT+(周期的測定)実施形態

上記の組織のコア温度測定のための例示的なリアルタイムの方法及び実施形態に加えて

50

、N I T I センサ（例えば、C H F T + 又は C H F T - ）は、異なる定常状態条件で動作する場合に、コア組織温度（ T_{Core} ）の周期的な測定を行うために使用されうる。例えば、以下を用いてコア組織温度（ T_{Core} ）を決定するために、熱事象（ $T_{Sensor,END}$ 、 $q_{Sensor,END}$ ）の間、この後、又はこの終わりに、熱事象（ $T_{Sensor,0}$ 、 $q_{Sensor,0}$ ）の前の定常状態測定値が定常状態測定値と比較されてもよい。

$$T_{Core} = \frac{T_{Sensor,0} \times q_{Sensor,END} - T_{Sensor,END} \times q_{Sensor,0}}{q_{Sensor,END} - q_{Sensor,0}} \quad [55]$$

【0208】

C H F T + 及び／又は C H F T - の例示的な実施形態は、両方とも、経時的に異なる定常状態条件にさらされうる。しかし、C H F T + 実施形態は、異なる定常状態条件を生成するために使用されてもよい1つ以上の外部熱デバイスの動作制御が向上することに起因して好ましい。

【0209】

コア温度－C H F T + (ゼロ熱流束温度測定) 実施形態

制御回路を使用して、例示的なC H F T + 実施形態は、組織とセンサ表面との間に熱伝達が生じないゼロ熱流束環境、すなわち、熱流束センサによって測定されるように、熱が組織に入らないか、又は組織から出ないゼロ熱流束環境（最小電圧出力、すなわち、「ゼロ」）を生成するために使用されてもよい。定常状態条件において、ゼロ熱流束環境は式 [54] を以下のように単純化する。

$$T_{Core,m} = T_{Sensor,m} \quad [56]$$

ここで、測定されたセンサ温度（ $T_{Sensor,m}$ ）は、組織のコア温度（ $T_{Core,m}$ ）と等しい。

【0210】

この方法の利点は、一旦定常状態のゼロ熱流束環境が得られると、内部パラメータ値（例えば、血液灌流（ w ）、組織熱慣性（

$$\sqrt{k\rho C}$$

）など）及び熱接触抵抗（ R_c ）からコア組織温度（ $T_{Core,m}$ ）測定が独立していることである。このような定常状態条件を実現するために必要な時間の量は、測定されたセンサ温度（ $T_{Sensor,m}$ ）出力によって決定されるように、使用される例示的な実施形態に依存して変化し、N I T I 技術を利用しない既存のゼロ熱流束技術の共通の制限である。定常状態のゼロ熱流束環境が得られるまで、例示的なN I T I ゼロ熱流束温度測定実施形態は、コア組織温度（ $T_{Core,m}$ ）の正確な測定を行うために、例示的な組織のコア温度測定のための能動的な温度測定のような他の例示的な実施形態を利用してもよい。

【0211】

図30は、2 c c / 分の流量でファントム上の擬似組織のコア温度（ $T_{Core,m}$ ）を測定するために使用される場合の、例示的なC H F T + ゼロ熱流束（Z H F）実施形態の結果を示すグラフである。このグラフは、例示的なC H F T + Z H F の実施形態が表面温度条件にかかわらず、遅延なく、ファントム上の擬似組織のコア温度（ $T_{Core,m}$ ）を決定できることを示す。具体的には表面温度が擬似組織コア温度（ $T_{Core,m}$ ）を示す出力を実現するのに約8分かかるが、例示的なC H F T + Z H F 実施形態は、ファントム内及び組織の下に配置された内部プローブと比較した場合、開始からの擬似組織のコア温度（ $T_{Core,m}$ ）を密接に呼応して測定する。

【0212】

コア温度－D U O N I T I (デュアル温度測定) 実施形態

第 1 及び第 2 の並列 N I T I センサ・ノード（各ノードが熱流束センサ - 温度センサ対を有する）を使用する場合の例示的な D U O N I T I 実施形態では、以下の 2 つの独立した式が形成される。

$$(T_{Sensor1,m} - q_{Sensor1,m}'' \times R_{C1}'') - T_{Core,m} = \frac{1}{k} \sqrt{\frac{\alpha}{w}} \left(q_{Sensor1,0}'' + \sum_{j=1}^m \Delta q_{Sensor1,j}'' \times \text{Erf} \left(\sqrt{w(t_m - t_{j-1})} \right) \right) \quad [57]$$

$$(T_{Sensor2,m} - q_{Sensor2,m}'' \times R_{C2}'') - T_{Core,m} = \frac{1}{k} \sqrt{\frac{\alpha}{w}} \left(q_{Sensor2,0}'' + \sum_{j=1}^m \Delta q_{Sensor2,j}'' \times \text{Erf} \left(\sqrt{w(t_m - t_{j-1})} \right) \right) \quad [58]$$

10

【 0 2 1 3 】

商ベースのデータ処理方法を使用して、式 [5 7] / 式 [5 8] は以下を生じる。

$$\frac{(T_{Sensor1,m} - q_{Sensor1,m}'' \times R_{C1}'') - T_{Core,m}}{(T_{Sensor2,m} - q_{Sensor2,m}'' \times R_{C2}'') - T_{Core,m}} = \frac{(q_{Sensor1,0}'' + \sum_{j=1}^m \Delta q_{Sensor1,j}'' \times \text{Erf}(\sqrt{w(t_m - t_{j-1})}))}{(q_{Sensor2,0}'' + \sum_{j=1}^m \Delta q_{Sensor2,j}'' \times \text{Erf}(\sqrt{w(t_m - t_{j-1})}))} \quad [59]$$

再構成して、以下が得られる。

$$T_{Core,m} = \frac{(T_{Sensor2,m} - q_{Sensor2,m}'' \times R_{C2}'') \times (q_{Sensor1,0}'' + \sum_{j=1}^m \Delta q_{Sensor1,j}'' \times \text{Erf}(\sqrt{w(t_m - t_{j-1})})) - (T_{Sensor1,m} - q_{Sensor1,m}'' \times R_{C1}'') \times (q_{Sensor2,0}'' + \sum_{j=1}^m \Delta q_{Sensor2,j}'' \times \text{Erf}(\sqrt{w(t_m - t_{j-1})}))}{(q_{Sensor1,0}'' + \sum_{j=1}^m \Delta q_{Sensor1,j}'' \times \text{Erf}(\sqrt{w(t_m - t_{j-1})})) - (q_{Sensor2,0}'' + \sum_{j=1}^m \Delta q_{Sensor2,j}'' \times \text{Erf}(\sqrt{w(t_m - t_{j-1})}))} \quad [60]$$

20

【 0 2 1 4 】

この過渡式は D U O N I T I 構成の結果であり、右辺の組織熱伝導率（k）、組織密度（ρ）、組織比熱容量（C）、及び血液灌流（w）についての典型的な値を入力する場合に、リアルタイムのコア組織温度（T_{Core,m}）測定を可能にする。

【 0 2 1 5 】

各 N I T I センサ・ノード（例えば、C H F T + 又は C H F T -）と組織表面との間の熱接触抵抗（R_{c1} 及び R_{c2}）の推定値は、（例えば、上記の N I T I 手順を介して）決定されうるか、又は他のように決定され、考慮されうる。いくつかの場合に、熱接触抵抗（R_{c1} 及び / 又は R_{c2}）が無視できると推定されてもよい。

30

【 0 2 1 6 】

定常状態条件において、及び R_c R_{c1} R_{c2} 又は R_{c1} 及び / 又は R_{c2} が無視できると推定される場合、式 [6 0] は以下のように減少する。

$$T_{Core,m} = \frac{T_{Sensor2,m} \times q_{Sensor1,m}'' - T_{Sensor1,m} \times q_{Sensor2,m}''}{q_{Sensor1,m}'' - q_{Sensor2,m}''} \quad [61]$$

ここで、組織熱伝導率（k）、組織密度（ρ）、組織比熱容量（C）、及び血液灌流（w）の典型的な値は、右辺でもはや必要とされない。定常状態条件は、外部熱デバイス（例えば、ヒータ、クーラなど）を介して組織表面で生じる熱流束及び / 又は温度を規制する制御回路を含む種々の方法で実現されうる。

40

【 0 2 1 7 】

パイプ・パラメータ決定用途

図 3 1 は、パイプ又は他の導管内を流れる流体に関連する 1 つ以上の内部パラメータを決定するための N I T I 技術の別の用途を示す。この例では、ヒータが使用されるが（例示的な C H F T + 実施形態）、他の例ではヒータ（すなわち、外部熱デバイス）はオプションである。

【 0 2 1 8 】

表面熱流束にさらされる場合、内部フローを伴うパイプ又は他の導管（例えば、銅パイ

50

プ) の例示的な熱数学的解は以下である。

$$T_{Pipe,m} = T_{Pipe,0} + \sum_{j=1}^m \left(\frac{q_{Sensor,j}'' - q_{Sensor,j-1}''}{h} \right) (1 - e^{-\left(\frac{t_m - t_{j-1}}{\tau}\right)}) \quad [62]$$

ここで、初期パイプ表面温度は以下である。

$$T_{Pipe,0} = T_{Fluid} + \frac{q_{Sensor,0}''}{h} \quad [63]$$

10

ここで、熱流束はパイプ／導管に入るときに正であると規定され、 $\tau = \rho C \delta / h$ はパイプ／導管の熱時定数（すなわち、時定数）であり、 ρ はパイプ／導管の密度であり、 C はパイプ／導管の比熱容量であり、 δ はパイプ／導管の壁厚であり、 h はパイプ／導管の内部対流熱伝達係数（すなわち、対流係数）であり、パイプ／導管の内部流量（すなわち、流量）に関連し、 T_{Pipe} はパイプ／導管表面温度であり、 T_{Fluid} はコア（すなわち、内部）流体温度である。

【 0 2 1 9 】

式 [6 2] を N I T I センサ出力に関して書き換え、N I T I センサとパイプ／導管表面の間の熱接触抵抗 (R_c'') の影響を含めると、以下が得られる。

20

$$T_{Pipe,m} = T_{Sensor,0} - q_{Sensor,0}'' \times R_c'' + \sum_{j=1}^m \left(\frac{q_{Sensor,j}'' - q_{Sensor,j-1}''}{h} \right) (1 - e^{-\left(\frac{t_m - t_{j-1}}{\tau}\right)}) \quad [64]$$

ここで、 $1/h$ は対流内部流量の定常状態の熱抵抗 (R'') である。

【 0 2 2 0 】

式 [6 2] 及び式 [6 4] は、熱伝導率が高い材料で作られたパイプ又は導管に対して有効である。P V C のような他の材料については、異なる熱モデル及び対応する解が開発される必要があってもよい。また、熱伝導率が高い材料のために、他の熱モデル及び解が開発されてもよい。

30

【 0 2 2 1 】

この例では、流量 ($\dot{v}$

) が大きいほど、対流熱伝達率 (h) が大きくなる。低い（例えば、層流）流量でない限り、 $\dot{v}$

と h との関係は典型的には線形ではなく、したがって、2 つの変数間の相関関数が望まれる。この相関関数は例えば、実験的試験によって見出されうる。C H F T + が 0 . 0 5 インチ (0 . 0 0 1 2 7 m) の壁厚を有する 3 / 4 インチ (0 . 0 1 9 0 5 m) 内径 L 型銅パイプ上で動作された場合に実験的に見出された相関の一例は以下である。

40

$$h = 1035.2 \left[\frac{W}{m^2 - ^\circ C} \left(\frac{min}{gal} \right)^{0.2137} \right] \dot{v}^{0.2137} \quad [65]$$

再構成すると、以下になる。

$$\dot{v} = 1 * 10^{-14} \left[\frac{gal}{min} \left(\frac{m^2 - ^\circ C}{W} \right)^{4.6475} \right] h^{4.6475} \quad [66]$$

50

【0222】

したがって、対流係数（ h ）と流量（ $\dot{v}$ ）

）との間の相関の例示的な汎用形式は以下であってもよい。

$$h = Z \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \left(\frac{\text{min}}{\text{gal}} \right)^P \right] \dot{v}^P \quad [67]$$

ここで、 Z 及び P は相関値である。

使用される数学的技術（例えば、対数関数、指数関数など）に応じて、他の形式の相関が開発されてもよい。

【0223】

図32は、実験的測定値で例示的な相関がどのように開発されうるかを示すグラフである。この例では、相関は、異なる流量で行われた測定についての実験結果をプロットすることによって見出される。異なる流量で十分な数の測定が行われると、測定された対流係数（ h ）を流量（ $\dot{v}$ ）

）に関連付ける、又はその逆の相関（すなわち、式）を見出すために最良適合曲線（例えば、トレンド線）が使用されうる。

【0224】

他の例示的な実施形態では、対流熱伝達係数（ h ）を流量（ $\dot{v}$ ）

）に、又はその逆に関係付ける相関関数及び／又は他の方法は、機械学習方法（例えば、ニューラル・ネットワークなど）を使用して決定されてもよい。

【0225】

パイプ用途－パラメータ推定を用いた周期的測定実施形態

周期的なデータ処理方法を有する例示的なNITセンサ実施形態（例えば、CHFT+又はCHFT-）について、式[64]は対流係数（ h ）、コア（すなわち、内部）流体温度（ T_{Fluid} ）、及び／又はNITセンサとパイプ／導管表面との間の熱接触抵抗（ R''_c ）の内部パラメータを決定するために、パラメータ推定方式において使用されてもよい。これは、例えば1つ以上の熱流束センサ－温度センサ対セクションを有するが、異なるNIT用途のための異なる熱モデルを有する例示的なNITシステム実施形態についての例として提示された一般的な場合と同様である。この例では、パイプ密度（ ρ ）、パイプ熱容量（ C ）、パイプ壁厚（ δ ）の内部パラメータについて所定の一定値が使用された。この例では、パイプ製造業者の仕様から所定の値が得られた。この例の用途で最小化されるべき例示的な目的関数は以下である。

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{M-1} \sum_{m=1}^{M-1} (T_{\text{Sensor},m} - T_{\text{Calculated},m})^2} \quad [68]$$

ここで、

$$T_{\text{Calculated},m} = T_{\text{Pipe},m} + q_{\text{Sensor},m}'' \times R''_c \quad [69]$$

であり、

$$R_C'' = \frac{\sum_{n=1}^{N-1} \frac{T_{Sensor,n} - T_{Pipe,n}}{q_{Sensor,n}}}{N-1} \quad [70]$$

である。

【0226】

例示的なCHFT+実施形態（ヒータ付き）は、0.05インチ（0.00127m）の壁厚を有する3／4インチ（0.01905m）内径L型銅パイプ上で、異なる流量及び温度で水を流しながら試験された。CHFT+はパイプ表面に取り付けられ、以下のよう

10

- 10秒の定常状態データが記録された。
- ヒータが約65秒間オンになり、その結果、表面熱流束及び表面温度信号を介してCHFT+によって測定されるパイプ壁の過渡的な熱応答が生じた。
- データの全体は、1秒未満のパラメータ推定方式を含む周期的データ処理法を介して処理され、その結果、対流係数（h）、コア水温（ T_{Fluid} ）、及びCHFT+とパイプ表面との間の熱接触抵抗（ R_c ）の出力が得られた。

【0227】

対流係数（h）が決定されると、それは、流体質量流量及び速度（例えば、 kg/s 及び m/s ）に関連する流量を決定するために、相関式（例えば、式[66]）において使用される。結果が以下の表4に示される。

20

表4：パイプ・パラメータ決定の結果（周期的パラメータ推定を有する例示的なCHFT+実施形態）

30

40

50

流量 ($\frac{gal}{min}$)	h ($\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$)	τ (s)	R''_c ($^\circ C \frac{m^2}{W}$)	RMSE ($^\circ C$)	CHFT+推定流量 ($\frac{gal}{min}$)
1	838	5.22	0.000331	0.126	0.9
	829	5.27	0.000327	0.134	0.9
	825	5.30	0.000334	0.134	0.9
	826	5.29	0.000331	0.143	0.9
	826	5.29	0.000334	0.137	0.9
	826	5.29	0.000329	0.041	0.9
4	1378	3.17	0.000329	0.041	3.9
	1385	3.16	0.000329	0.038	4.0
	1377	3.17	0.000329	0.043	3.9
	1366	3.20	0.000328	0.041	3.7
	1388	3.15	0.000328	0.037	4.0
	1401	3.12	0.000331	0.036	4.2
7	1588	2.75	0.000331	0.023	7.5
	1585	2.76	0.000328	0.023	7.4
	1583	2.76	0.000329	0.024	7.4
	1594	2.74	0.000328	0.021	7.6
	1589	2.75	0.000331	0.022	7.5
	1599	2.73	0.00033	0.023	7.8
10	1687	2.59	0.000332	0.020	10.0
	1695	2.58	0.000333	0.021	10.2
	1690	2.59	0.000331	0.021	10.0
	1688	2.59	0.000333	0.023	10.0
	1683	2.60	0.000331	0.022	9.8
	1682	2.60	0.000331	0.025	9.8
13	1786	2.45	0.000332	0.019	13.0
	1796	2.43	0.000331	0.019	13.3
	1808	2.42	0.000331	0.020	13.7
	1794	2.44	0.000329	0.019	13.2
	1794	2.44	0.000329	0.020	13.2
	1800	2.43	0.00033	0.020	13.5
16	1869	2.34	0.000329	0.019	16.0
	1864	2.35	0.00033	0.020	15.8
	1863	2.35	0.000331	0.021	15.8
	1857	2.35	0.00033	0.020	15.6
	1863	2.35	0.000331	0.025	15.8
	1857	2.35	0.00033	0.021	15.6

【 0 2 2 8 】

実験データと共に使用された場合にこのデータ処理方法で使用するパラメータ推定方式が最適対流係数（ h ）値を決定する能力を実証するために、式〔 6 8 〕の例示的な目的関数（すなわち、 $R M S E$ ）と $10 \text{ gal} / \text{分}$ の場合についての対流係数（ h ）との間の関係が図 3 3 に示される。図 3 3 のグラフは、 1690

$$\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

の対流係数（ h ）値において、この関係が大域的最小値を有することを示す。これは、表

4に記載されているように、10

$$\frac{W}{m^2C}$$

の場合についての推定値に対応する。

【0229】

10

$$\frac{W}{m^2C}$$

10

の場合について、図34は、計算された（出力）センサ温度曲線と測定された（入力）センサ温度曲線との間の整合の例を示すグラフである。2つの温度曲線の間の整合は、式[69]を介して計算された（出力）センサ温度曲線を構築するために使用される内部パラメータ値（ h 、 ρ 、 C 、 δ ）及び熱接触抵抗（ R''_c ）値がパイプ（すなわち、物体）内で発生する実際の値と同じであることを示す。

【0230】

この例では、前述のとおり、パイプ密度（ ρ ）、パイプ熱容量（ C ）、パイプ壁厚（ δ ）の所定値は、銅配管の製造者仕様を用いて決定され、パイプ・パラメータ決定のために行われた例示的なデータ処理方法において、一定値として入力された。この例ではデータ処理方法の一部としてこれが決定されたが、推定された熱接触抵抗（ R''_c ）について値も事前に所定値として入力されてもよく、なおも同様の結果を実現しうる。この例示的な実施形態では、熱接触抵抗（ R''_c ）についての所定の値が正確であるか否かに関わらず、熱接触抵抗（ R''_c ）の所定の値における何らかの不正確さの影響が、その後に展開される相関によって補償されるため、流量（

20

$\dot{v}$

）の結果の出力は正確であってもよい。

【0231】

熱接触抵抗（ R''_c ）を規定し、決定する別の方法は、熱伝達係数 U の全体的な規定を使用することによる。ここで、

30

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h} + R''_c \quad [71]$$

U （すなわち、物体の全定常状態熱抵抗）は、いくつかの方法によって決定されうる。1つの例示的な方法は例えば、定常状態条件（例えば、熱事象の前、後、又は終了時）で行われる測定を使用することであり、例えば以下である。

$$U = \frac{q''_{Sensor,END}}{T_{Sensor,END} - T_{Fluid,END}} \quad [72]$$

40

【0232】

したがって、熱接触抵抗（ R''_c ）は、

$$R''_c = \frac{T_{Sensor,END} - T_{Fluid,END}}{q''_{Sensor,END}} - \frac{1}{h} \quad [73]$$

のように規定してもよく、

式[70]の代わりに代入される。式[73]を利用するために、典型的には $T_{Fluid,END}$ の値が決定される必要がある。 $T_{Fluid,END}$ （すなわち、 $T_{Fluid,m}$ ）決定するいくつかの

50

例示的な方法が以下に記載される。他の例示的な実施形態では、例えば、 $T_{\text{Fluid},m}$ は、断熱されうる表面実装温度センサを使用して、仮定されるか、又は他のように決定されてもよい。

【0233】

Uを決定する別の例示的な方法は、異なる定常状態条件（例えば、熱事象の前、終了時、又は後）で行われる測定を使用することである。

$$U = \frac{q_{\text{Sensor},\text{END}}'' - q_{\text{Sensor},0}''}{T_{\text{Sensor},\text{END}} - T_{\text{Sensor},0}} \quad [74]$$

10

ここで、 $q_{\text{Sensor},\text{END}}''$ 及び $T_{\text{Sensor},\text{END}}$ は、熱事象の終了時に定常状態条件で行われる熱流束及び表面温度の測定値を表す。

式[74]は、異なる定常状態条件を必要とし、これは、例えば、例えば外部熱デバイスを介して熱事象が生成される前及び後に測定を行うことによって取得されうることに留意されたい。

【0234】

式[74]及び式[71]を使用して、

$$R_C'' = \frac{T_{\text{Sensor},\text{END}} - T_{\text{Sensor},0}}{q_{\text{Sensor},\text{END}}'' - q_{\text{Sensor},0}''} - \frac{1}{h} \quad [75]$$

20

【0235】

また、対流熱伝達率（h）と熱接触抵抗（ R_C'' ）とを区別することなく、パラメータ推定方式及び流量（ $\dot{v}$ ）

）相関を含むデータ処理方法が実行されてもよい。代わりに、データ処理方法は例えば、式[76]に示されるように、全体的な熱伝達係数（U）を使用して表される熱的解に基づいてもよい。

$$T_{\text{Calculated}_U,m} = T_{\text{Sensor},0} + \sum_{j=1}^m \frac{(q_{\text{Sensor},j}'' - q_{\text{Sensor},j-1}'')}{U} (1 - e^{-\left(\frac{t_m - t_{j-1}}{\tau}\right)}) \quad [76]$$

30

ここで、 $T_{\text{Calculated}_U,m}$ は、全体の熱伝達係数（U）を用いた場合に見出される計算された（出力）温度曲線である。さらに、この例示的な実施形態における例示的な目的関数は、以下であってもよい。

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{M-1} \sum_{m=1}^{M-1} (T_{\text{Sensor},m} - T_{\text{Calculated}_U,m})^2} \quad [77]$$

40

この方法は、推定された熱接触抵抗（ R_C'' ）が最小であるか、他のように無視できると推定される場合に特に有用である。

【0236】

パイプ用途－パラメータ推定を使用したリアルタイム測定実施形態

例示のパイプ用途－パラメータ推定を使用した周期的測定実施形態では、制御回路によるデータ処理は、すべての測定が行われた後に開始される。よって、上記の実験パイプ試験では、測定値が約75秒ごとに周期的に出力された。NITEセンサ（例えば、CHF

50

T +又はCHFT-) データは代替的に、対流係数 (h)、コア流体温度 (T_{Fluid})、及び／又はNITセンサとパイプ／導管表面との間の熱接触抵抗 (R_c) のリアルタイム出力を提供するために、リアルタイムで処理されてもよい。時間が経つにつれて、より多くのデータ・ポイントが、パラメータ推定方式を含むデータ処理方法によってリアルタイムに処理される表面熱流束及び表面温度曲線に追加され、1秒未満で値を出力する。

【0237】

パイプ用途－パラメータ推定を使用しないリアルタイム測定実施形態

式 [64] は、以下のように再構成されうる。

$$\frac{1}{h} = \frac{T_{Pipe,m} - (T_{Sensor,0} - q_{Sensor,0}'' \times R_c'')}{\sum_{j=1}^m \Delta q_{Sensor,j}'' \times (1 - e^{-\left(\frac{t_m - t_{j-1}}{\tau}\right)})} \quad [78] \quad 10$$

ここで、

$$T_{Pipe,m} = T_{Sensor,m} - q_{Sensor,m}'' \times R_c'' \quad [79]$$

式 [78] と式 [79] を組み合わせると、

$$h = \frac{\sum_{j=1}^m \Delta q_{Sensor,j}'' \times (1 - e^{-\left(\frac{t_m - t_{j-1}}{\tau}\right)})}{(T_{Sensor,m} - q_{Sensor,m}'' \times R_c'') - (T_{Sensor,0} - q_{Sensor,0}'' \times R_c'')} \quad [80] \quad 20$$

【0238】

NITセンサ (例えば、CHFT+又はCHFT-) とパイプ／導管表面との間の熱接触抵抗 (R_c) が既知である場合、熱時定数 (τ) についての典型的な値が右辺に入力されるとき、式 [80] は、リアルタイム対流係数 (h) 測定のために使用されてもよい。前述のように、熱時定数 (τ) は対流係数 (h) の関数である。したがって、対流係数 (h) についての典型的な値が決定される必要がある。いくつかの例示的な実施形態では例えば、対流係数 (h) の変化に関心がある場合、T_{Sensor,0} - q_{Sensor,0}'' × R_c の量は、1つ以上の特定された時刻に仮定されてもよい。他の例示的な実施形態では、T_{Sensor,0} - q_{Sensor,0}'' × R_c の量は例えば、追加の温度センサを使用することによって決定されてもよく、その出力はパイプ表面及び／又はコア (すなわち、内部) 流体温度を示す。

【0239】

左辺の計算された対流係数 (h) 値は厳密ではないが、正確な定量的及び／又は定性的測定にはなおも十分であろう。さらに、最も正確な結果のために、熱時定数 (τ) に関連するように、右辺の対流係数 (h) の典型的な値は、式 [80] を介して計算された最新の及び／又は正確な値を反映するように、時間の経過とともに更新されてもよい。他の方法では、右辺及び左辺の対流係数 (h) についての値が同時に決定されてもよく、正確な定量的測定を提供する。これは、右辺に典型的な対流係数 (h) 値を入力する必要性を省略してもよい。熱接触抵抗 (R_c) 値が未知である場合、それは、(例えば、上記のNIT手順を介して) 決定されうるか、又は他のように決定され、考慮されうる。いくつかの場合に、熱接触抵抗 (R_c) は無視できると推定されてもよい。

【0240】

決定された対流係数 (h) 値を式 [80] から相関式 (例えば、式 [66]) に入力すると、対応する流量 (

ψ

) 値がリアルタイムで生じる。

【0241】

さらに、定常状態条件では、式 [8 0] が以下のように減少する。

$$h = \frac{q_{Sensor,m}'' - q_{Sensor,0}''}{(T_{Sensor,m} - q_{Sensor,m}'' \times R_C'') - (T_{Sensor,0} - q_{Sensor,0}'' \times R_C'')} \quad [81]$$

式 [8 0] はもはや右辺の典型的な熱時定数 (τ) 値を必要としない。定常状態条件は、外部熱デバイス (例えば、ヒータ、クーラ等) を介して表面で生じる熱流束及び／又は温度を規制する制御回路を含む種々の方法で実現される。

【 0 2 4 2 】

式 [7 6] についても同様の再構成が行われてもよく、全体の熱伝達係数 (U) が利用され、

$$U = \frac{\sum_{j=1}^m \Delta q_{Sensor,j}'' \times (1 - e^{-\left(\frac{t_m - t_{j-1}}{\tau}\right)})}{T_{Sensor,m} - T_{Sensor,0}} \quad [82]$$

が得られ、定常状態条件において、

$$U = \frac{q_{Sensor,m}'' - q_{Sensor,0}''}{T_{Sensor,m} - T_{Sensor,0}} \quad [83]$$

である。

【 0 2 4 3 】

パイプ用途－DUO NITI センサ実施形態

第 1 及び第 2 の並列 NITI センサ・ノード (各ノードが熱流束センサ - 温度センサ対を有する) を使用する場合の例示的な DUO NITI センサ実施形態の場合、2 つの独立した式が形成される。

$$T_{Sensor1,m} - q_{Sensor1,m}'' \times R_{C1}'' = T_{Fluid} + q_{Sensor1,0}'' \times \frac{1}{h} + \sum_{j=1}^m \left(\frac{q_{Sensor,j}'' - q_{Sensor,j-1}''}{h} \right) (1 - e^{-\left(\frac{t_m - t_{j-1}}{\tau}\right)}) \quad [84]$$

$$T_{Sensor2,m} - q_{Sensor2,m}'' \times R_{C2}'' = T_{Fluid} + q_{Sensor2,0}'' \times \frac{1}{h} + \sum_{j=1}^m \left(\frac{q_{Sensor,j}'' - q_{Sensor,j-1}''}{h} \right) (1 - e^{-\left(\frac{t_m - t_{j-1}}{\tau}\right)}) \quad [85]$$

【 0 2 4 4 】

例示的な差分ベースのデータ処理方法を使用すると、式 [8 4] ～式 [8 5] は、

$$h = \frac{\left(q_{Sensor1,0}'' - q_{Sensor2,0}'' + \sum_{j=1}^m \Delta q_{Sensor1,j}'' \times (1 - e^{-\left(\frac{t_m - t_{j-1}}{\tau}\right)}) - \sum_{j=1}^m \Delta q_{Sensor2,j}'' \times (1 - e^{-\left(\frac{t_m - t_{j-1}}{\tau}\right)}) \right)}{(T_{Sensor1,m} - q_{Sensor1,m}'' \times R_{C1}'') - (T_{Sensor2,m} - q_{Sensor2,m}'' \times R_{C2}'')} \quad [86]$$

となる。

【 0 2 4 5 】

この過渡式は DUO NITI センサ構成の結果であり、右辺の対流係数 (h) の関数である熱時定数 (τ) について典型的な値を入力すると、コア流体温度 (T_{Fluid}) に関係なく、リアルタイムの対流係数 (h) 測定を可能にする。

【 0 2 4 6 】

左辺の計算された対流係数 (h) の値は厳密ではないが、正確な定量的及び／又は定性的測定にはなおも十分であろう。さらに、最も正確な結果のために、熱時定数 (τ) に関連するように、右辺の対流係数 (h) の典型的な値は、式 [8 6] を介して計算された最

新の及び／又は正確な値を反映するように、時間の経過とともに更新されてもよい。他の方法では、右辺及び左辺の対流係数（ h ）についての値が同時に決定されてもよく、正確な定量的測定を提供する。これは、右辺に典型的な対流係数（ h ）値を入力する必要性を省略してもよい。

【0247】

各NITIセンサ・ノード（例えば、CHFT+又はCHFT-）とパイプ／導管表面との間の熱接触抵抗（ R''_{c1} 及び R''_{c2} ）の推定値は、（例えば、上述のNITI手順を介して）決定され、又は他のように決定され、考慮されうる。いくつかの場合に、熱接触抵抗（ R''_{c1} 及び／又は R''_{c2} ）は無視できると推定されてもよい。

【0248】

定常状態条件では、式[86]は以下のように減少する。

$$h = \frac{(q''_{Sensor1,m} - q''_{Sensor2,m})}{(T_{Sensor1,m} - q''_{Sensor1,m} \times R''_{C1}) - (T_{Sensor2,m} - q''_{Sensor2,m} \times R''_{C2})} \quad [87]$$

ここで、典型的な熱時定数（ τ ）値はもはや右辺では必要とされない。定常状態条件は、外部熱デバイス（例えば、ヒータ、クーラなど）を介して各センサ・ノードの表面で発生する熱流束及び／又は温度を規制する制御回路を含む様々な方法で維持されてもよい。

【0249】

ヒータを有する1つのセンサ・ノード（CHFT+）とヒータを有さない別のセンサ・ノード（CHFT-）とを有する例示的なDUO CHFT+/-実施形態が、0.05インチ（0.00127m）の壁厚を有する3/4インチ（0.01905m）の内径L型銅パイプ上で、異なる流量及び温度でそれを通して流れる水とともに試験された。DUO CHFT+/-装置がパイプ表面に取り付けられ、例示的なCHFT+実施形態並びにインライン流量計に対して測定値が比較された。

表5：例示的なDUO CHFT+/-実施形態の結果

流量計	CHFT+	DUO CHFT+/-
流量 ($\frac{gal}{min}$)	流量 ($\frac{gal}{min}$)	流量 ($\frac{gal}{min}$)
4.0	3.8	3.9
7.0	7.3	7.5
10.0	9.8	10.4
13.0	13.1	12.9
16.0	15.9	15.6

【0250】

式[76]についても同様の再構成が可能であり、全体の熱伝達係数（ U ）が利用され、

$$U = \frac{(q''_{Sensor1,0} - q''_{Sensor2,0} + \sum_{j=1}^m \Delta q''_{Sensor1,j} \times (1 - e^{-\frac{(t_m - t_{j-1})}{\tau}}) - \sum_{j=1}^m \Delta q''_{Sensor2,j} \times (1 - e^{-\frac{(t_m - t_{j-1})}{\tau}}))}{T_{Sensor1,m} - T_{Sensor2,m}} \quad [88]$$

となり、定常状態で：

$$U = \frac{q''_{Sensor1,m} - q''_{Sensor2,m}}{T_{Sensor1,m} - T_{Sensor2,m}} \quad [89]$$

となる。

【0251】

流量（

ψ

）、及びコア流体温度（ T_{Fluid} ）に加えて、このN I T I用途（すなわち、パイプ・パラメータ決定）は、パイプ内部のフローによって伝達される熱エネルギー、

ψ

及び T_{Fluid} の関数を決定できてもよい。

【0252】

腐食／汚損検出用途

上記のパイプ・パラメータ決定のための例示的な方法及び例示的な実施形態のすべては、 h 又は U を決定し、これはその後、流量（

ψ

）を決定するために相関関数に入力される。また、時間にわたるパイプ／導管の腐食又は汚損の発生を決定するために、 h 又は U の値を独立して監視するが使用されてもよい。これは、パイプ内で発生する所与の量の流量を前提として、 h 又は U の値が一定でなければならないからである。腐食又は汚損が生じると、値が変化し始め、したがって、腐食又は汚損が検出されうる。例えば、高い熱伝導率材料で作られたパイプ／導管の熱時定数（ τ ）を監視することも同様の能力をもたらす。例えば、この例示的な用途では、熱時定数（ τ ）は、密度（ ρ ）、比熱容量（ C ）、及び壁厚（ δ ）を含むパイプ／導管特性の関数である。これらの特性の値は、結果的にパイプ／導管の熱時定数（ τ ）に影響を及ぼす腐食又は汚損によって影響される。

【0253】

パイプ又は導管の内部温度測定用途

式[62]と式[63]とを組み合わせると、以下になる。

$$T_{Pipe,m} = T_{Fluid} + \frac{q''_{Sensor,0}}{h} + \sum_{j=1}^m \left(\frac{q''_{Sensor,j} - q''_{Sensor,j-1}}{h} \right) (1 - e^{-\left(\frac{t_m - t_{j-1}}{\tau}\right)}) \quad [90]$$

式[90]をN I T Iセンサ出力に関して、かつN I T Iセンサとパイプ／導管表面との間の熱接触抵抗（ R''_C ）の影響を含めて書き換えると、以下になる。

$$T_{Sensor,m} - q''_{Sensor,m} \times R''_C = T_{Fluid} + \frac{q''_{Sensor,0}}{h} + \sum_{j=1}^m \left(\frac{q''_{Sensor,j} - q''_{Sensor,j-1}}{h} \right) (1 - e^{-\left(\frac{t_m - t_{j-1}}{\tau}\right)}) \quad [91]$$

再構成して、 T_{Fluid} が時間の経過とともに変化する値に依存することを認識すると（測定インデックス（ m ））、以下になる。

$$T_{Fluid,m} = T_{Sensor,m} - q''_{Sensor,m} \times R''_C - \frac{q''_{Sensor,0}}{h} - \sum_{j=1}^m \left(\frac{q''_{Sensor,j} - q''_{Sensor,j-1}}{h} \right) (1 - e^{-\left(\frac{t_m - t_{j-1}}{\tau}\right)}) \quad [92]$$

【0254】

式[92]は、高い熱伝導率（例えば、銅）を有するパイプ又は導管におけるコア流体温度（ $T_{Fluid,m}$ ）測定のための例示的な式であり、以下の例示的な実施形態において使用される。これらの例示的な実施形態のいくつかについて、対流係数（ h ）、N I T Iセンサとパイプ／導管表面との間の推定熱接触抵抗（ R''_C ）、及び／又は熱時定数（ τ ）の値を決定される必要がある。これは、例えば、これらの値を（例えば、先に記載したC H F T + 又はC H F T − 方法を介して）決定することによって、又は所定の値（例えば、教科

書からの値)を入力することによって行われてもよい。

【0255】

式〔76〕と共に以下と同様の例示的な実施形態が使用されてもよく、対流係数 (h) 及び N I T I センサとパイプ／導管表面との間の熱接触抵抗 (R_{tc}) の組み合わせの代わりに全体の熱伝達係数 (h) が利用される。

【0256】

パイプ内部温度－C H F T＋(能動的溫度測定) 実施形態

C H F T＋実施形態は、N I T I を実施するために使用されうる熱事象（すなわち、熱伝達）を生成するために、ヒータのような統合された外部熱デバイスを使用する。コア流体温度 ($T_{Fluid,m}$) 測定に関して、ヒータが任意の方法（定常、周期、循環など）で動作してもよく、この例では、式〔92〕は、対流係数 (h)、熱時定数 (τ)、及び推定熱接触抵抗 (R_{tc}) についての値が右辺に入力された場合に、コア流体温度 ($T_{Fluid,m}$) を正確かつリアルタイムに出力する。これらの値は、例えばデータ処理方法（例えば、パラメータ推定方式を含む）を使用することによって決定されてもよく、又は他のように決定され、考慮されてもよい。いくつかの場合に、熱接触抵抗 (R_{tc}) は無視できると推定されてもよい。必要ではないが、周囲の変化、接触などのような外部刺激からの誤った信号を防止するために、C H F T＋を断熱材料で覆うことが有益であってもよい。

【0257】

表6は、0.05インチ (0.00127m) の壁厚で3/4インチ (0.01905m) の内径のL型銅パイプのコア流体温度 ($T_{Fluid,m}$) を、異なる流量で測定するために使用された場合の、コア流体温度測定 ($T_{Fluid,m}$) の測定が時間にわたって平均化される例示的なC H F T＋実施形態（統合されたヒータ付き）からの実験結果を提供する。

表6：内部パイプ温度の例示的なC H F T＋実施形態の結果

10

20

30

40

50

流量 ($\frac{gal}{min}$)	CHFT+ 出力 (°C)	T _{Fluid} 測定 (°C)	\Delta T (°C)
1	24.76	24.86	0.10
	24.98	25.09	0.11
	25.18	25.30	0.12
	25.42	25.52	0.10
	25.62	25.73	0.11
	25.85	25.95	0.10
4	22.28	22.41	0.13
	22.45	22.58	0.13
	22.75	22.86	0.11
	22.95	23.10	0.15
	23.25	23.31	0.06
	23.70	23.84	0.14
7	22.65	22.68	0.03
	22.86	22.91	0.05
	23.14	23.19	0.05
	23.40	23.46	0.06
	23.77	23.85	0.08
	24.12	24.17	0.05
10	25.46	25.58	0.12
	25.66	25.76	0.10
	29.24	29.27	0.03
	29.63	29.69	0.06
	29.89	29.86	0.03
	30.34	30.32	0.02
13	25.47	25.61	0.14
	25.65	25.77	0.12
	25.86	25.99	0.13
	26.04	26.13	0.09
	26.25	26.40	0.15
	26.51	26.66	0.15
16	26.24	26.42	0.18
	26.38	26.49	0.11
	26.51	26.60	0.09
	26.68	26.79	0.11
	26.83	27.01	0.18
	27.02	27.19	0.17

【0258】

図354は、15 gal / 分で流体フローを受ける0.05インチ（0.00127m）の壁厚を有する内径3/4インチ（0.01905m）のL型銅パイプのコア流体温度（T_{Fluid,m}）を測定するために使用される場合の、（統合され制御されたヒータを有する）例示的なCHFT+実施形態の結果を示すグラフである。このグラフでは、例示的なCHFT+実施形態が、表面温度条件に関係なく、パイプのコア流体温度（T_{Fluid,m}）を決定できることが示されている。具体的には、この例では、統合されたヒータがオンになった結果、表面温度は時間とともに上昇する。時間にわたって表面温度のこの一貫した増加にかかわらず、例示的なCHFT+実施形態は、パイプ内部及びパイプ・フロー内に配置された内部プローブに密接に呼応して、銅パイプ内のコア流体温度（T_{Fluid,m}）を測定する。

【0259】

パイプ内部温度－CHFT－（受動的溫度測定）実施形態

C H F Tー実施形態は、N I T Iを実行するために、環境へのパイプ熱放散のような外部熱事象を使用する。例えば、外部熱事象にさらされる場合、式〔92〕は、対流係数(h)、熱時定数(τ)、推定熱接触抵抗(R''_c)についての値が右辺に入力されたときに、コア流体温度($T_{Fluid,m}$)を正確かつリアルタイムに出力する。これらの値は、例えばデータ処理方法(例えば、パラメータ推定方式を含む)を使用することによって決定されてもよく、他のように決定され、考慮されてもよい。いくつかの場合に、熱接触抵抗(R''_c)は無視できると推定されてもよい。必要ではないが、周囲の変化、接触などの外部刺激からの誤った信号を防止するために、C H F Tーを断熱材料で覆うことが有益であってもよい。

【0260】

パイプ内部温度ーC H F T+(周期的測定)実施形態

上記のパイプ又は導管の内部温度測定についての例示的なリアルタイム方法及び例示的な実施形態に加えて、N I T Iセンサは、異なる定常状態条件で動作している場合にコア流体温度(T_{Fluid})の定期的な測定を行うために使用されうる。例えば、以下を使用してコア流体温度(T_{Fluid})を決定するために、熱事象($T_{Sensor,0}$ 、 $q''_{Sensor,0}$)の前の定常状態測定値が、熱事象の間、後、又は終了時の定常状態測定値($T_{Sensor,END}$ 、 $q''_{Sensor,END}$)と比較されうる。

$$T_{Fluid} = \frac{T_{Sensor,0} \times q''_{Sensor,END} - T_{Sensor,END} \times q''_{Sensor,0}}{q''_{Sensor,END} - q''_{Sensor,0}} \quad [93]$$

【0261】

C H F T+及び／又はC H F Tの例示的な実施形態は、両方とも、時間にわたって異なる定常状態条件にさらされうる。しかし、異なる定常状態条件を生成するために使用されてもよい1つ以上の熱事象デバイスの動作制御が向上することに起因して、C H F T+の例示的な実施形態が好ましい。

【0262】

パイプ内部温度ーC H F T+(ゼロ熱流束)寸法

制御回路を使用して、例示的なC H F T+実施形態は、パイプとセンサ表面との間に熱伝達が生じないゼロ熱流束環境、すなわち、熱流束センサによって測定される際にパイプに熱が入ることも出ることもないゼロ熱流束環境(最小電圧出力、すなわち、「ゼロ」)を作り出すために使用されてもよい。

【0263】

定常状態条件において、ゼロ熱流束環境は式〔92〕を以下ように単純化する。

$$T_{Fluid,m} = T_{Sensor,m} \quad [94]$$

ここで、測定されたセンサ温度($T_{Sensor,m}$)は、コア流体温度($T_{Fluid,m}$)に等しい。この方法の利点は、定常状態のゼロ熱流束環境が得られると、内部パラメータ値(例えば、対流係数(h)、熱時定数(τ)など)及び熱接触抵抗(R''_c)からコア流体温度($T_{Fluid,m}$)測定が独立していることである。定常状態のゼロ熱流束環境が得られるまで、コア流体温度($T_{Fluid,m}$)の正確な測定を行うために、パイプ又は導管測定の内部温度についての能動的溫度測定の実施形態のような他の実施形態が利用されてもよい。このような定常状態条件を実現するために必要な時間の量は、測定されたセンサ温度($T_{Sensor,m}$)出力によって決定されるため、使用される例示的な実施形態に依存して変化し、N I T I技術を利用しない既存のゼロ熱流束技術の共通の制限である。定常状態のゼロ熱流束環境が得られるまで、例示的なゼロ熱流束溫度測定の実施形態は、コア流体温度($T_{Fluid,m}$)の正確な測定を行うために、パイプ内部温度測定についての例示的な能動的溫度測定の実施形態のような他の例示的なN I T I実施形態を利用してもよい。

【0264】

パイプ内部温度ーD U O N I T I(デュアル溫度測定)実施形態

第 1 及び第 2 の並列 N I T I センサ・ノード（各ノードが熱流束センサ・温度センサ対を有する）を使用する場合の D U O N I T I センサ実施形態について、高い熱伝導率を有する材料で作られたパイプ／導管上に配置される場合に、2つの独立した式が形成される。

$$(T_{Sensor1,m} - q_{Sensor1,m}'' \times R_{C1}'') - T_{Fluid,m} = \frac{1}{h} \left(q_{Sensor1,0}'' + \sum_{j=1}^m \Delta q_{Sensor1,j}'' \times (1 - e^{-\frac{(t_m - t_{j-1})}{\tau}}) \right) \quad [95]$$

$$(T_{Sensor2,m} - q_{Sensor2,m}'' \times R_{C2}'') - T_{Fluid,m} = \frac{1}{h} \left(q_{Sensor2,0}'' + \sum_{j=1}^m \Delta q_{Sensor2,j}'' \times (1 - e^{-\frac{(t_m - t_{j-1})}{\tau}}) \right) \quad [96]$$

10

商ベースのデータ処理方法を使用すると、式 [95] / 式 [96] は、

$$\frac{(T_{Sensor1,m} - q_{Sensor1,m}'' \times R_{C1}'') - T_{Fluid,m}}{(T_{Sensor2,m} - q_{Sensor2,m}'' \times R_{C2}'') - T_{Fluid,m}} = \frac{\left(q_{Sensor1,0}'' + \sum_{j=1}^m \Delta q_{Sensor1,j}'' \times (1 - e^{-\frac{(t_m - t_{j-1})}{\tau}}) \right)}{\left(q_{Sensor2,0}'' + \sum_{j=1}^m \Delta q_{Sensor2,j}'' \times (1 - e^{-\frac{(t_m - t_{j-1})}{\tau}}) \right)} \quad [97]$$

を生じる。

20

再構成すると、

$$T_{Fluid,m} = \frac{(T_{Sensor2,m} - q_{Sensor2,m}'' \times R_{C2}'') \times \left(q_{Sensor1,0}'' + \sum_{j=1}^m \Delta q_{Sensor1,j}'' \times (1 - e^{-\frac{(t_m - t_{j-1})}{\tau}}) \right) - (T_{Sensor1,m} - q_{Sensor1,m}'' \times R_{C1}'') \times \left(q_{Sensor2,0}'' + \sum_{j=1}^m \Delta q_{Sensor2,j}'' \times (1 - e^{-\frac{(t_m - t_{j-1})}{\tau}}) \right)}{\left(q_{Sensor1,0}'' + \sum_{j=1}^m \Delta q_{Sensor1,j}'' \times (1 - e^{-\frac{(t_m - t_{j-1})}{\tau}}) \right) - \left(q_{Sensor2,0}'' + \sum_{j=1}^m \Delta q_{Sensor2,j}'' \times (1 - e^{-\frac{(t_m - t_{j-1})}{\tau}}) \right)} \quad [98]$$

となる。

【0265】

この過渡式は D U O N I T I 構成の結果であり、右辺の対流係数（h）及び熱時定数（τ）についての典型的な値を入力する場合に、リアルタイムのコア流体温度（T_{Fluid,m}）測定を可能にする。

30

【0266】

各 N I T I センサ・ノード（例えば、C H F T + 又は C H F T -）とパイプ／導管表面との間の熱接触抵抗（R_{tc1}及びR_{tc2}）についての推定値は、（例えば、上述の N I T I 手順を介して）決定され、又は他のように決定され、考慮されうる。いくつかの場合に、熱接触抵抗（R_{tc1}及び／又はR_{tc2}）は無視できると推定されてもよい。

【0267】

定常状態条件において、R_{tc} R_{tc1} R_{tc2}又はR_{tc1}及びR_{tc2}が無視できると推定される場合、式 [98] は以下のように減少する。

$$T_{Fluid,m} = \frac{T_{Sensor2,m} \times q_{Sensor1,m}'' - T_{Sensor1,m} \times q_{Sensor2,m}''}{q_{Sensor1,m}'' - q_{Sensor2,m}''} \quad [99]$$

40

ここで、対流係数（h）及び熱時定数（τ）についての典型的な値は、右辺ではもはや必要とされない。これは、定常状態条件にある場合に、パイプ／導管材料、壁厚などにかかわらず、パイプ又は導管に式 [99] が使用されうることを意味する。定常状態条件は、外部熱デバイス（例えば、ヒータ、クーラなど）を介して組織表面で生じる熱流束及び／又は温度を規制する制御回路を含む種々の方法で実現されうる。

【0268】

図 36 は、15 gal / 分で流体フローを受ける壁厚 0.05 インチ（0.00127 m）を有する内径 3 / 4 インチ（0.01905 m）L 型銅パイプの内部温度を測定する

50

ために使用される場合の例示的なD U O C H F T + / - 実施形態（ヒータを有する1つのセンサ・ノード及び無しの1つのセンサ・ノード）の結果を示すグラフである。この例では、散発的な熱伝達及び温度信号が測定の高質に影響を与えないようにするために、両方のセンサ・ノードが断熱材で覆われた。この例は、定常状態条件及び過渡条件の両方で行われた。グラフに示されるように、例示的なD U O C H F T + / - 実施形態と（パイプ内部及びパイプ・フロー内に配置される）内部プローブとの間には、密接な呼応が存在する。

【0269】

図37は、50gal/分で流体フローを受ける0.218インチ（0.0055372m）の壁厚を有する1.939インチ（0.0492506m）内径のスケジュール80CPVCパイプの内部温度を測定するために使用される場合の例示的なD U O C H F T + / - 実施形態（ヒータを有する1つのセンサ・ノード及び無しの1つのセンサ・ノード）の結果を示すグラフである。この例では、両方のセンサ・ノードが断熱材で覆われていなかった。この例は、正確な測定を行うためにパイプの内部パラメータが必要とされない定常状態条件で実施された。グラフに示されるように、例示的なD U O C H F T + / - 実施形態と（パイプ内部及びパイプ・フロー内に配置される）内部プローブとの間には、密接な呼応が存在する。しかし、センサ・ノードを断熱材で覆わない結果として、より散発的な測定値が存在する。

【0270】

様々な例示的な実施形態が詳細に示され、説明されてきたが、特許請求の範囲はいかなる特定の実施形態又は例に限定されない。さらに、上記の例示的な実施形態は、物体の1つ以上の内部特性を決定するために、熱数学的モデルに基づく解析解と組み合わせた熱信号（例えば、熱伝達及び温度信号）を使用する。他の例示的な実施形態は、物体表面で測定された熱信号に基づいて物体の1つ以上の内部特性を決定するために、経験的方法、機械学習方法（例えば、ニューラル・ネットワーク）、回帰ベースの方法、人工知能ベースの方法、移動平均ベースの方法などを含むがこれらに限定されない他の方法を利用してもよい。

【0271】

他の例示的な実施形態では、物体の内部領域の1つ以上の内部特性を決定するために、N I T I 技術と併せて、他の非N I T I ベースのデバイスの出力が使用されてもよい。例えば、パイプ内の流量を決定するために、表面に取り付けられたN I T I センサと共に、パイプ内の内部温度プローブの出力が使用されてもよい。

【0272】

本出願では、「構成される」という用語は、装置の構成要素が、規定された動作を実行可能である構成を有することを意味するために使用される。「構成」はまた、ハードウェア又はソフトウェアの相互接続の配置又は方法を指してもよい。例えば、装置は、規定された動作を提供する専用ハードウェアを有してもよく、あるいはプロセッサ又は他の処理デバイスが機能を実行するようにプログラムされてもよい。「構成される」は、規定された動作を提供するために、装置構成要素がいかなる方法でも変更される必要があることを意味しない。

【0273】

上記の説明のいずれも、任意の特定の部材、ステップ、範囲、又は機能が必須であることを暗示するものとして解釈されるべきではない。当業者に公知である上述の実施形態の部材に対するすべての構造的及び機能的均等物は、参照により本書に組み込まれ、包含されることが意図される。さらに、この明細書における実施形態、特徴、構成要素、又はステップが公衆に捧げられることは意図されていない。

【0274】

添付の図面を参照して例示的な実施形態が本書で詳細に説明されたが、本発明はこれらのまったく同じ実施形態に限定されず、添付の特許請求の範囲から逸脱することなく、様々な変更及び修正を当業者によって実施できることを理解されたい。

【図面】

【図 1】

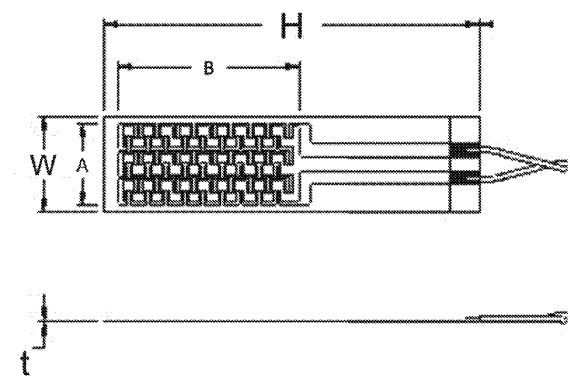


FIG. 1

【図 2 A】

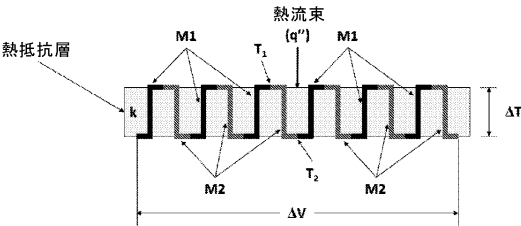


FIG. 2A

10

【図 2 B】

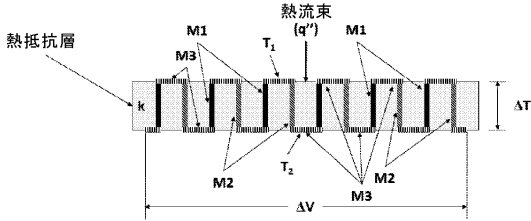


FIG. 2B

【図 3】

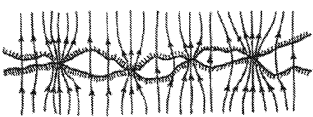


FIG. 3

20

30

40

50

【図 4】

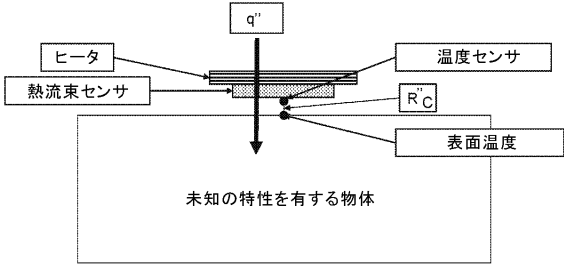


FIG. 4

【図 5】

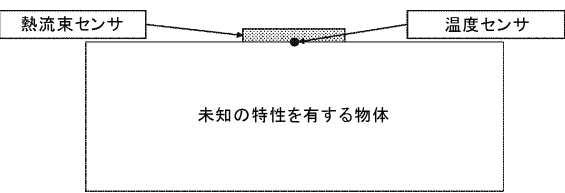


FIG. 5

10

【図 6 A】

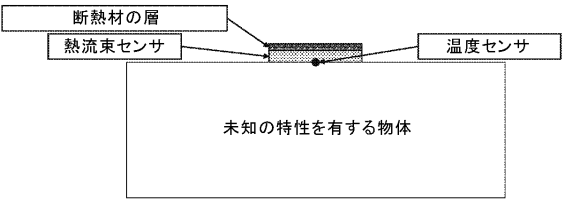


FIG. 6A

【図 6 B】

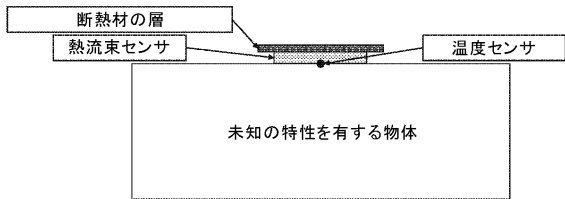


FIG. 6B

20

【図 6 C】

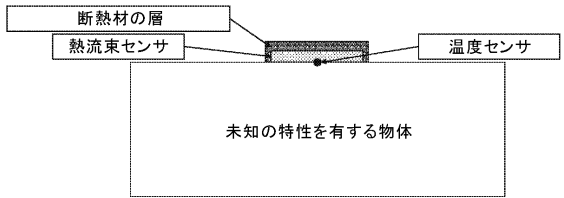


FIG. 6C

【図 7 A】

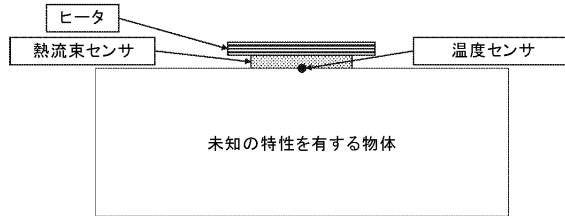


FIG. 7A

30

40

50

【図 7 B】

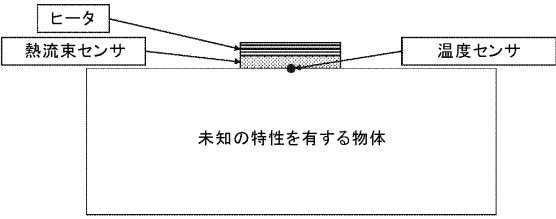


FIG. 7B

【図 7 C】

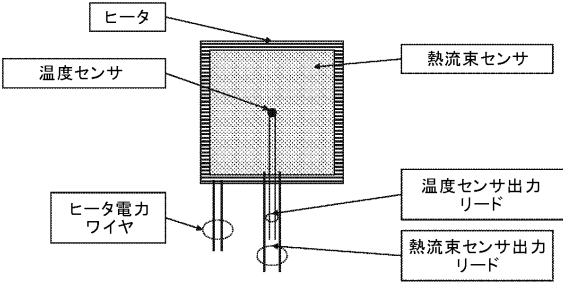


FIG. 7C

【図 7 D】

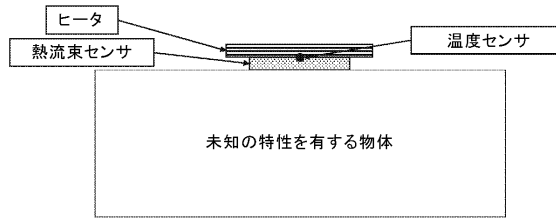


FIG. 7D

【図 7 E】

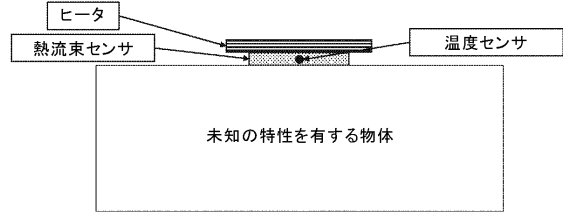


FIG. 7E

【図 7 F】

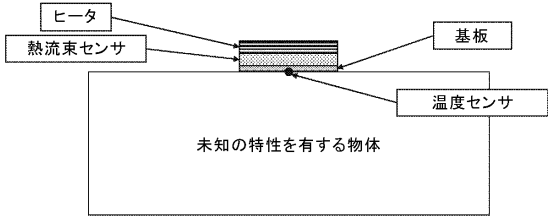


FIG. 7F

【図 7 G】

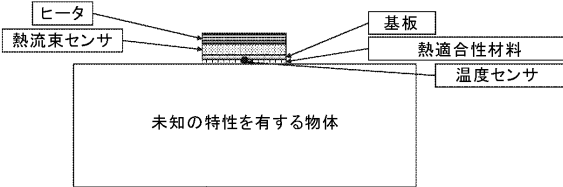


FIG. 7G

10

20

30

40

50

【圖 8】

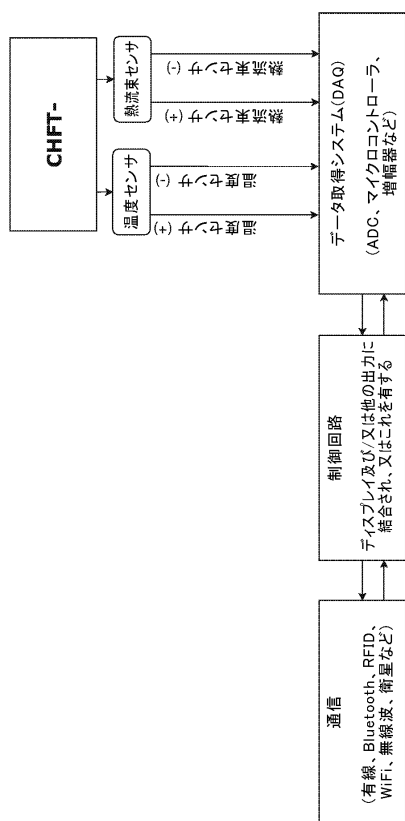


FIG. 8

【図 9】

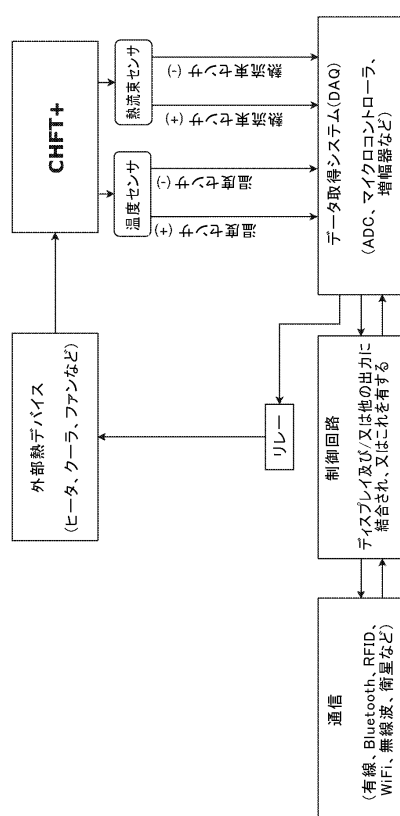


FIG. 9

【図 10】

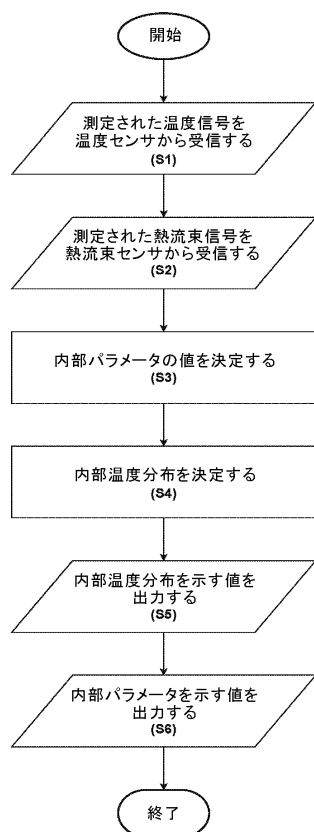


FIG. 10

【図 1 1】

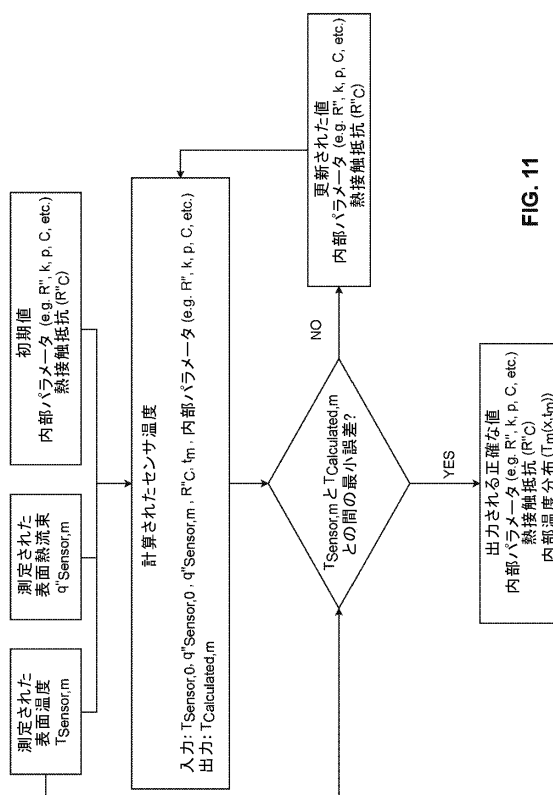


FIG. 11

【図 1 2】

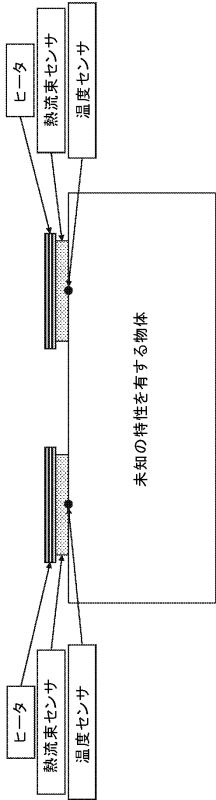


FIG. 12

【図 1 3】

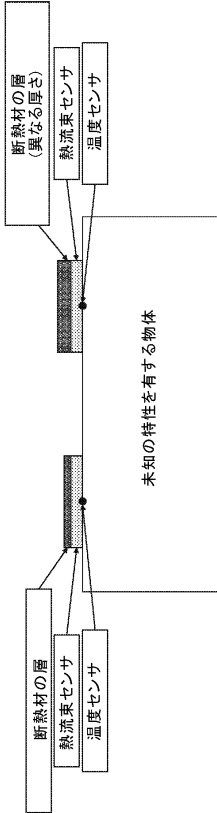


FIG. 13

【図 1 4】

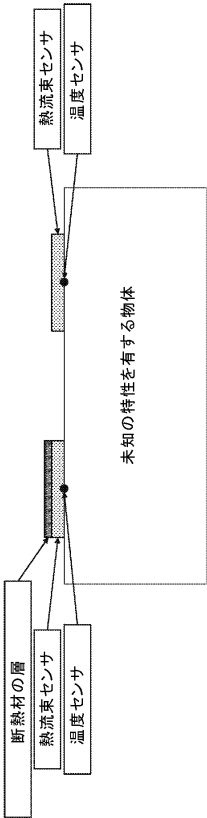


FIG. 14

【図 1 5】

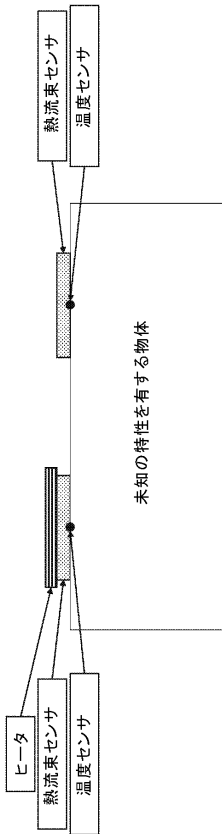


FIG. 15

10

20

30

40

50

【図 16】

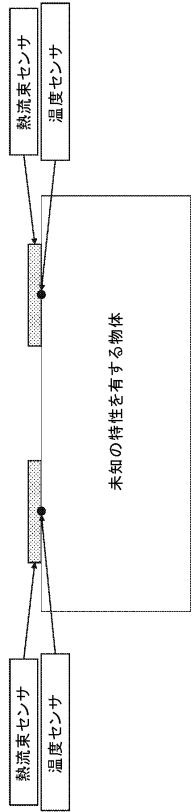


FIG. 16

【図 17】

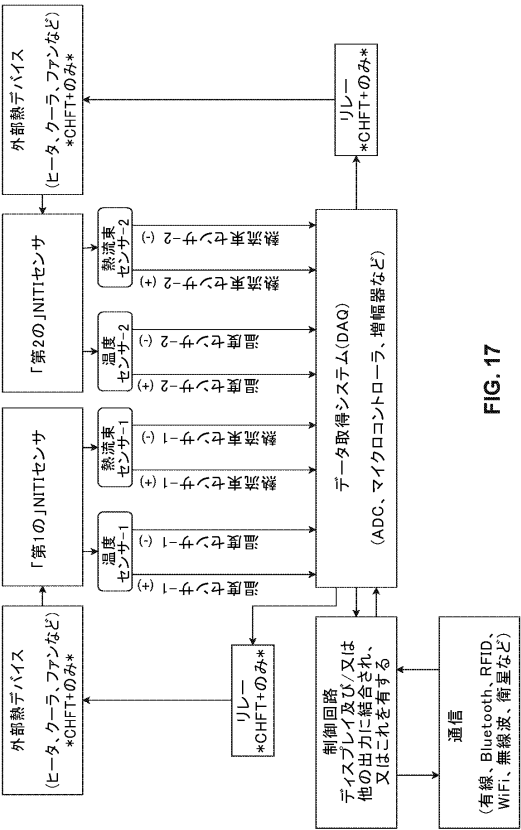


FIG. 17

【図 18 A】

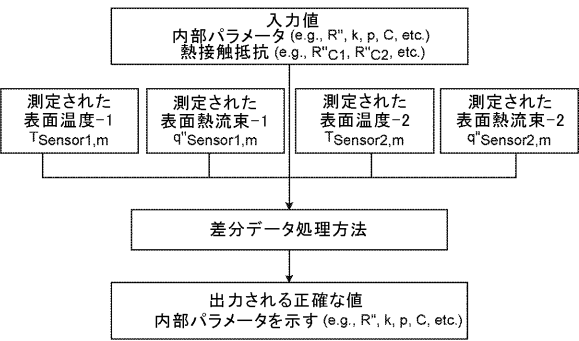


FIG. 18A

【図 18 B】

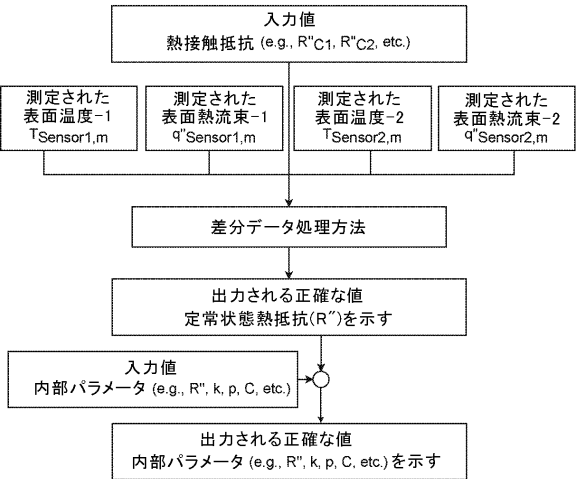


FIG. 18B

【図 19 A】

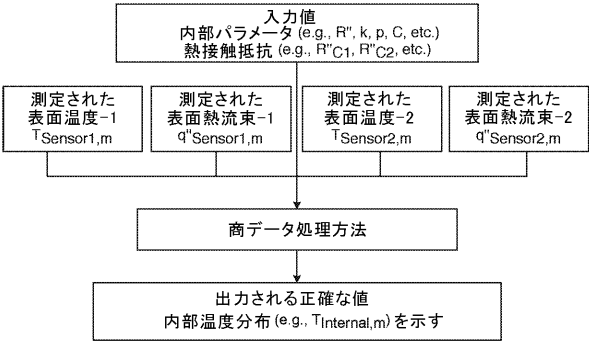


FIG. 19A

【図 19 B】

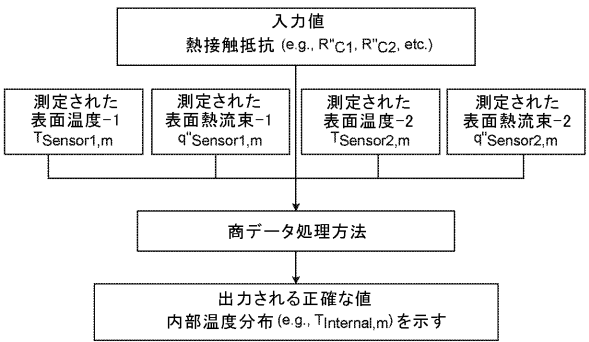


FIG. 19B

【図 20】

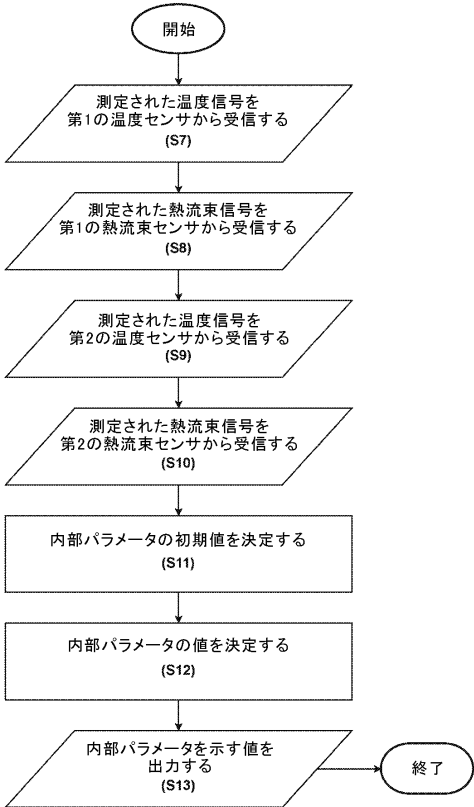


FIG. 20

【図 21】

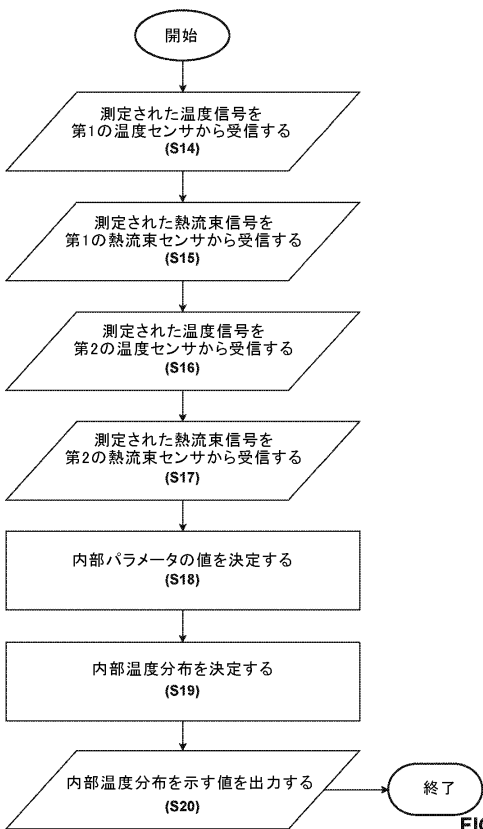


FIG. 21

10

20

30

40

50

【図 2 2】

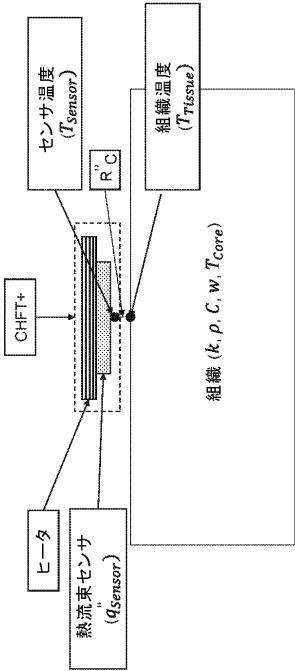


FIG. 22

【図 2 3】

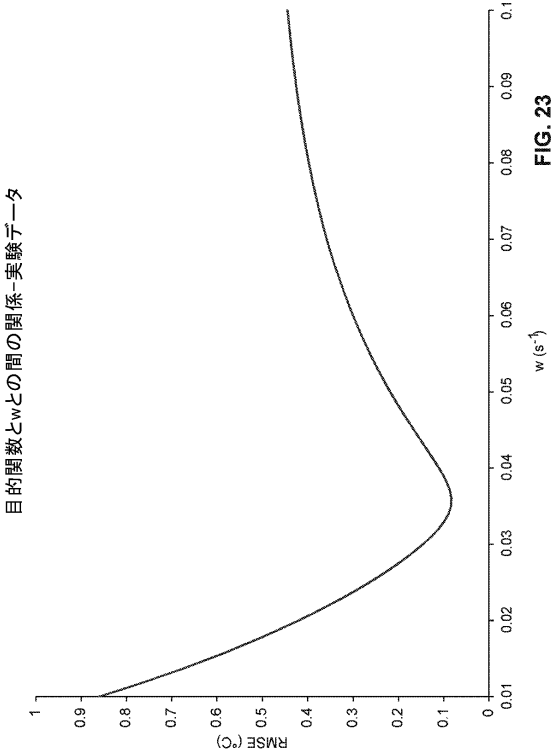


FIG. 23

目的関数とwとの関係-実験データ

【図 2 4】

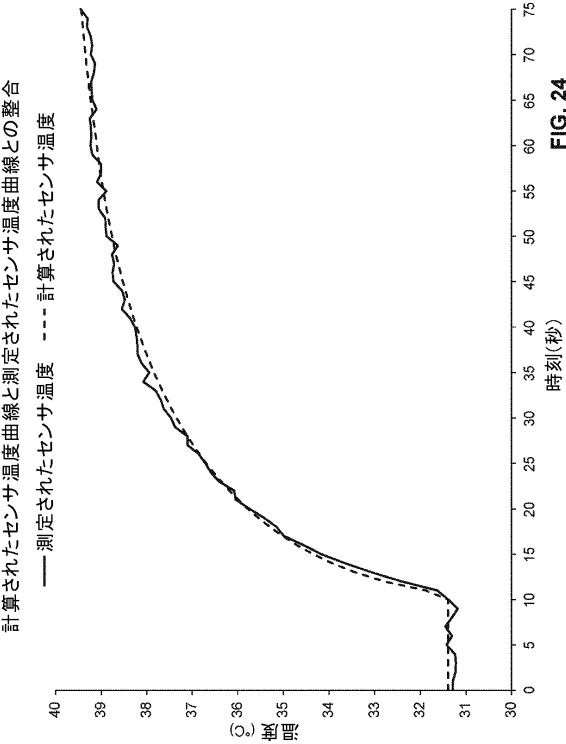


FIG. 24

【図 2 5】

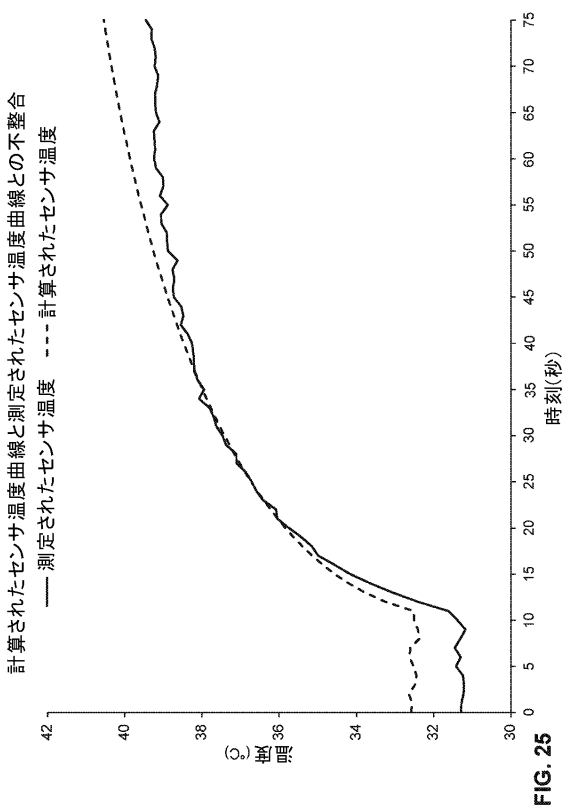


FIG. 25

計算されたセンサ温度曲線と測定されたセンサ温度曲線との不整合

—— 測定されたセンサ温度 ---- 計算されたセンサ温度

【図 26】

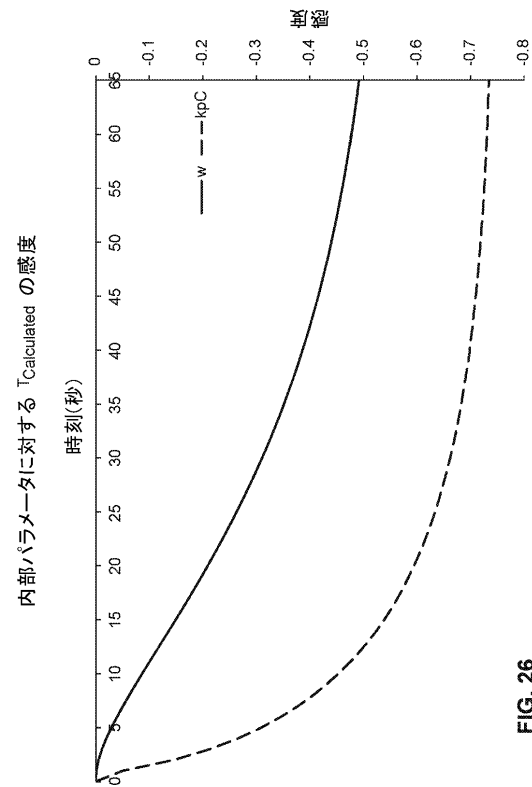


FIG. 26

【図 27】

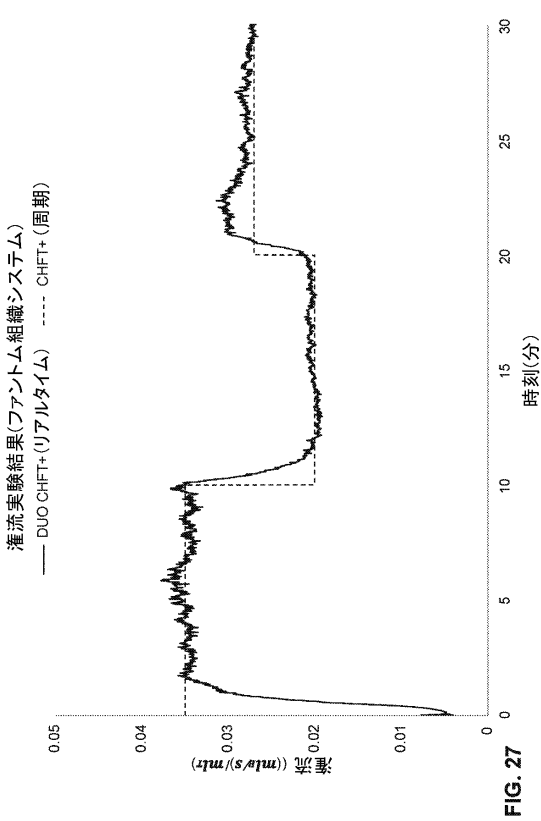


FIG. 27

【図 28】

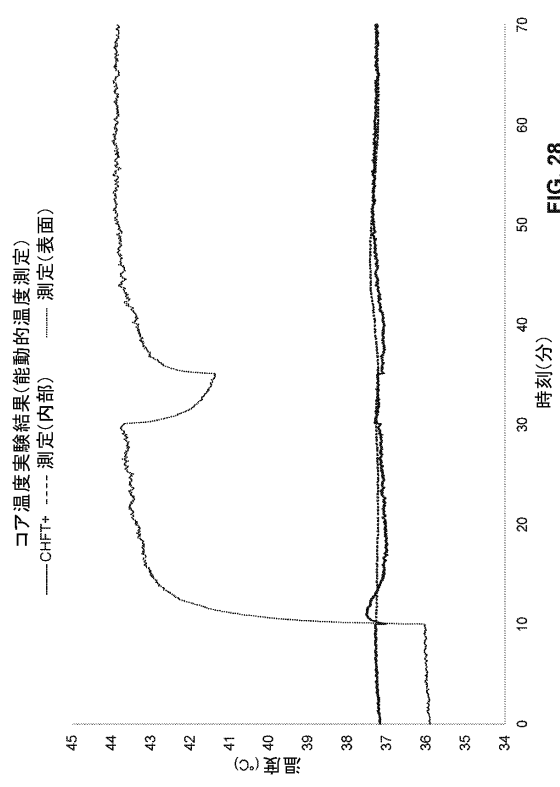


FIG. 28

【図 29】

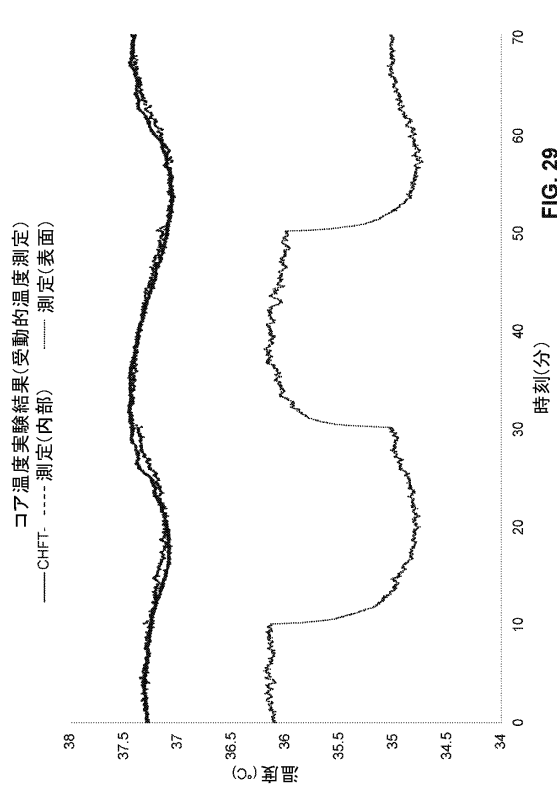
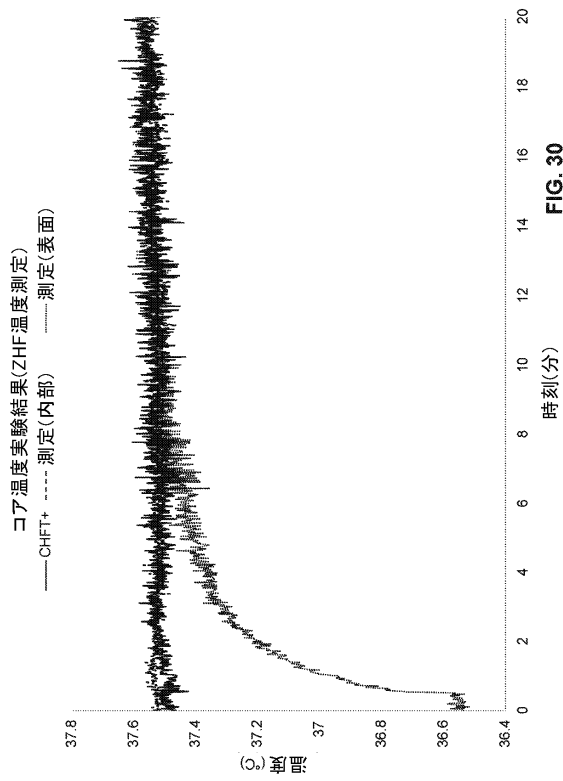
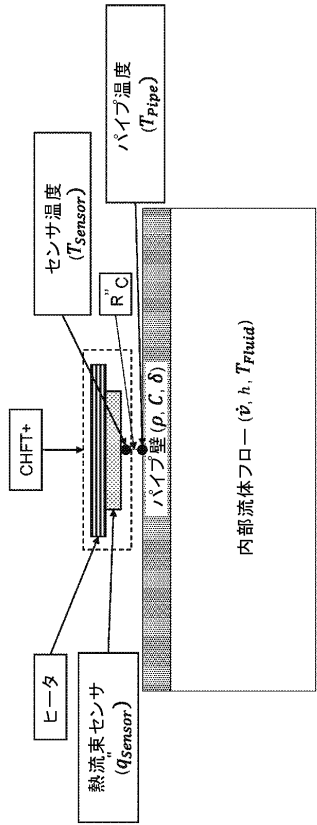


FIG. 29

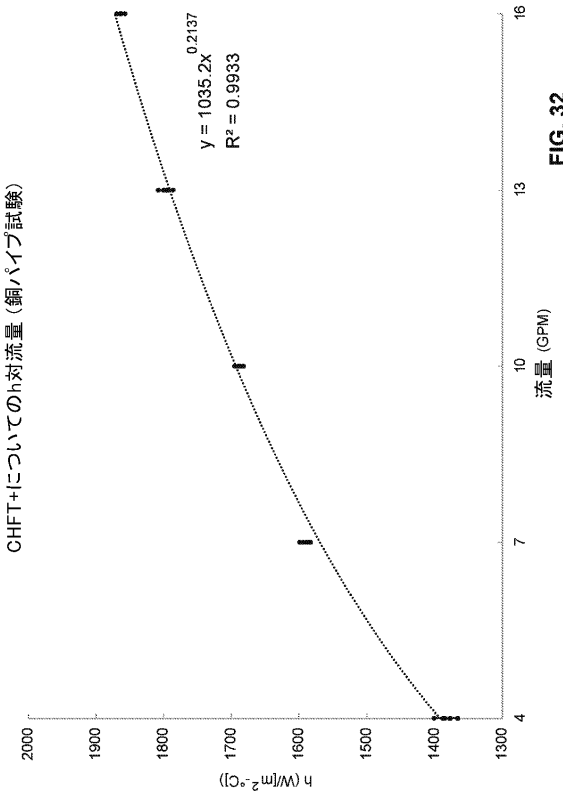
【図 3 0】



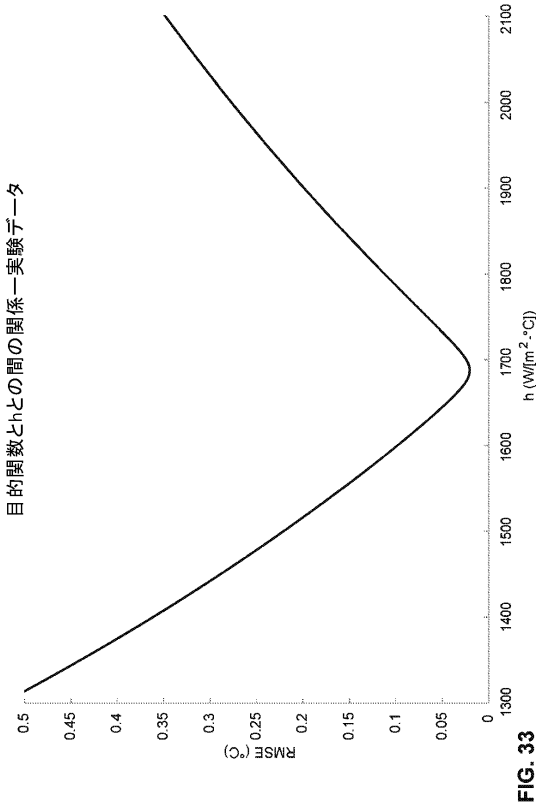
【図 3 1】



【図 3 2】



【図 3 3】



10

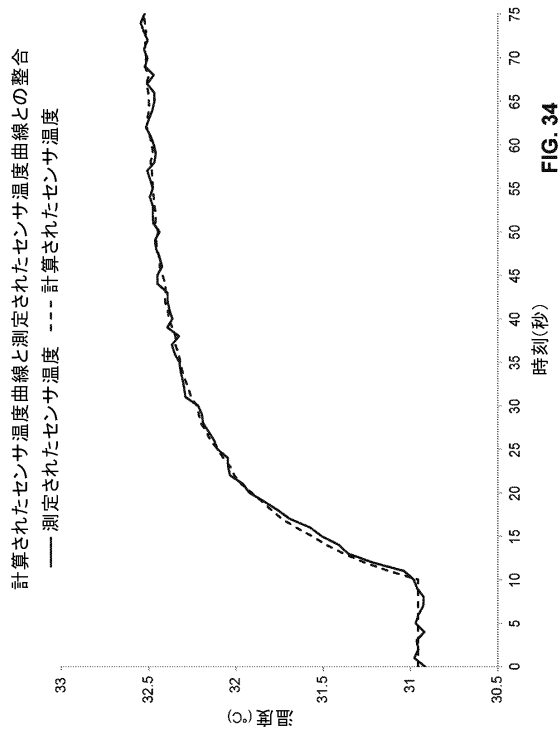
20

30

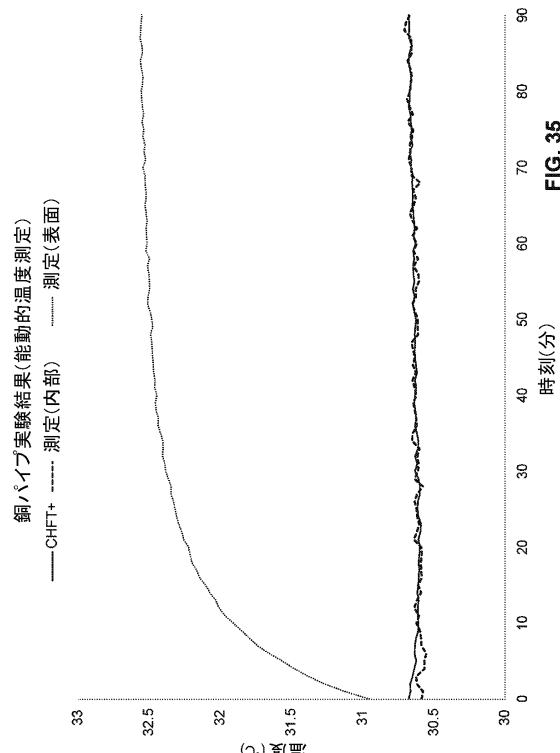
40

50

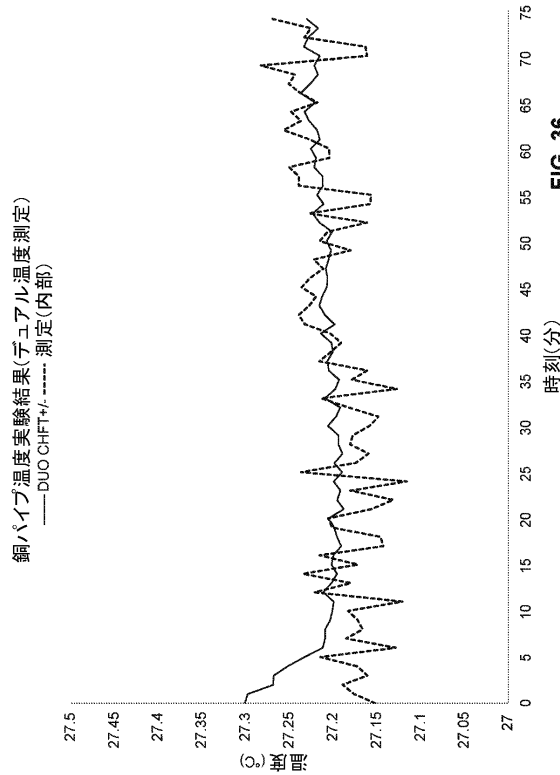
【図 3 4】



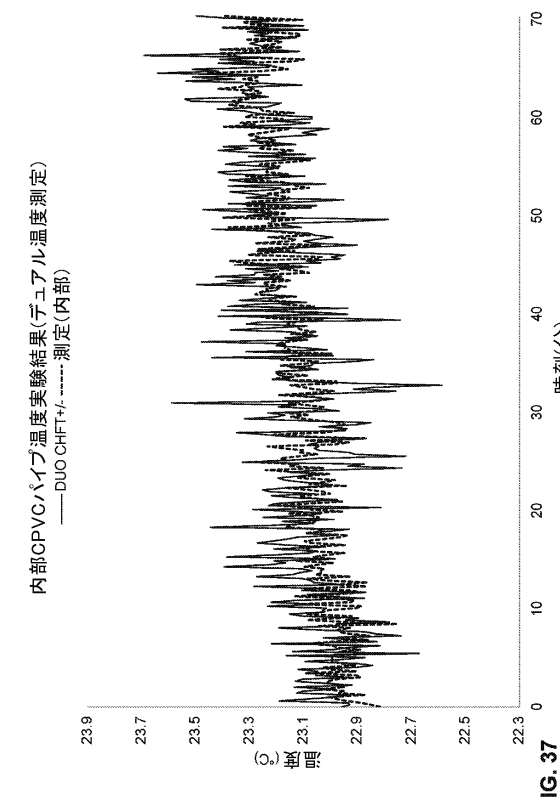
【図 3 5】



【図 3 6】



【図 3 7】



10

20

30

40

50

フロントページの続き

(51)国際特許分類

F I
G 0 1 K 17/20

6 0 , ブラックスバーク ナンバー 3 1 1 , スイート 1 0 5 0 , クラフト ドライブ 2 2 0 0

審査官 前田 敏行

(56)参考文献

国際公開第 2 0 1 8 / 1 8 0 8 0 0 (W O , A 1)
米国特許出願公開第 2 0 1 7 / 0 0 4 9 3 9 7 (U S , A 1)
特開 2 0 0 2 - 3 7 2 4 6 4 (J P , A)
米国特許第 0 6 2 7 8 0 5 1 (U S , B 1)
特開 2 0 1 6 - 1 6 1 4 1 5 (J P , A)
特開 2 0 1 7 - 1 2 0 2 2 4 (J P , A)

(58)調査した分野

(Int.Cl., D B 名)
G 0 1 N 2 5 / 1 8
G 0 1 N 2 5 / 1 6
G 0 1 K 1 / 1 4
G 0 1 K 1 7 / 2 0