

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第5213751号
(P5213751)

(45) 発行日 平成25年6月19日(2013.6.19)

(24) 登録日 平成25年3月8日(2013.3.8)

(51) Int.Cl.

G 0 1 H 3/00 (2006.01)

F I

G 0 1 H 3/00

A

請求項の数 10 (全 20 頁)

(21) 出願番号 特願2009-36094 (P2009-36094)
(22) 出願日 平成21年2月19日(2009.2.19)
(65) 公開番号 特開2010-190762 (P2010-190762A)
(43) 公開日 平成22年9月2日(2010.9.2)
審査請求日 平成23年11月1日(2011.11.1)

(73) 特許権者 000003285
千代田化工建設株式会社
神奈川県横浜市西区みなとみらい4丁目6
番2号
(74) 代理人 100109081
弁理士 三木 友由
(72) 発明者 林 慈朗
神奈川県横浜市神奈川区新浦島町1-1-
25テクノウェーブ100ビル 千代田ア
ドバンスト・ソリューションズ株式会社内
(72) 発明者 落合 孝之
神奈川県横浜市神奈川区新浦島町1-1-
25テクノウェーブ100ビル 千代田ア
ドバンスト・ソリューションズ株式会社内

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 音響減衰評価装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

音源と、その音源に接続された配管と、を含む系において、前記音源の音響エネルギーの距離減衰を評価する音響減衰評価装置であって、

前記配管内を流れる流体の物性に関する第1物性パラメータを取得する第1取得部と、

当該流体の物性に関する第2物性パラメータを取得する第2取得部と、

当該流体の物性に関する第3物性パラメータと、前記配管の構造のパラメータと、前記配管内の流速と、を取得する第3取得部と、

前記第1取得部で取得した前記第1物性パラメータを用いて、前記流体の熱伝導および粘性による音響エネルギーの距離減衰を評価するための第1減衰係数を導出する第1減衰係数導出部と、

前記第2取得部で取得した前記第2物性パラメータを用いて、前記流体の分子運動による音響エネルギーの距離減衰を評価するための第2減衰係数を導出する第2減衰係数導出部と、

前記第3取得部で取得した前記第3物性パラメータと、前記配管の構造のパラメータと、前記配管内の流速と、を用いて、前記配管内の圧力損失および構造物内の減衰による音響エネルギーの距離減衰を評価するための第3減衰係数を導出する第3減衰係数導出部と、

前記第1減衰係数導出部、前記第2減衰係数導出部および前記第3減衰係数導出部からそれぞれ導出された前記第1減衰係数、前記第2減衰係数および前記第3減衰係数を用いて全減衰係数を導出する全減衰係数導出部と、

10

20

前記全減衰係数導出部によって導出される前記全減衰係数に基づいて、前記配管の所定の位置における音響エネルギーを計算する減衰計算部と、を備えることを特徴とする音響減衰評価装置。

【請求項 2】

音響エネルギーに対して、前記配管の安全性の評価基準データを保持する評価基準保持部と、

前記減衰計算部によって計算された音響エネルギーから、前記評価基準保持部に保持された評価基準データを参照して前記配管の安全性を評価する評価部と、をさらに備えることを特徴とする請求項 1 に記載の音響減衰評価装置。

【請求項 3】

前記音源の音響エネルギーの周波数特性データを保持する周波数特性保持部と、

評価する音響エネルギーの周波数を設定する周波数設定部と、

前記周波数特性保持部に保持された周波数特性データを参照し、前記周波数設定部によって設定された周波数における、前記音源の音響エネルギーを取得して出力する初期値抽出部と、をさらに備え、

前記第 1 減衰係数導出部、前記第 2 減衰係数導出部、および前記第 3 減衰係数導出部のそれぞれは、前記周波数設定部によって設定された周波数を用いて前記第 1 減衰係数、前記第 2 減衰係数および前記第 3 減衰係数のそれぞれを導出し、

前記減衰計算部は、前記全減衰係数導出部によって導出される全減衰係数と、前記初期値抽出部によって出力される音響エネルギーと、に基づいて、前記周波数設定部によって設定された周波数における、前記配管の所定の位置における音響エネルギーを計算することを特徴とする請求項 1 に記載の音響減衰評価装置。

【請求項 4】

前記周波数設定部は、評価する音響エネルギーの周波数を複数設定し、

前記初期値抽出部は、前記周波数特性保持部に保持された周波数特性データを参照し、前記周波数設定部によって設定された複数の周波数のそれぞれに対応する、前記音源の音響エネルギーを取得して出力し、

前記第 1 減衰係数導出部、前記第 2 減衰係数導出部、および前記第 3 減衰係数導出部のそれぞれは、前記周波数設定部によって設定された複数の周波数のそれぞれを用いて前記第 1 減衰係数、前記第 2 減衰係数および前記第 3 減衰係数のそれぞれを導出し、

前記減衰計算部は、前記全減衰係数導出部によって導出される全減衰係数と、前記初期値抽出部によって出力される音響エネルギーと、に基づいて、前記周波数設定部によって設定された複数の周波数のそれぞれでの、前記配管の所定の位置における音響エネルギーを計算することを特徴とする請求項 3 に記載の音響減衰評価装置。

【請求項 5】

音響エネルギーに対して、前記配管の安全性の評価基準データを保持する評価基準保持部と、

前記減衰計算部によって計算された音響エネルギーから、前記評価基準保持部に保持された評価基準データを参照して前記配管の安全性を設定された周波数ごとに評価する評価部と、をさらに備えることを特徴とする請求項 4 に記載の音響減衰評価装置。

【請求項 6】

前記評価部は、安全性が最も低くなる周波数の評価結果を抽出することを特徴とする請求項 5 に記載の音響減衰評価装置。

【請求項 7】

前記音源は、流体が噴き出す噴出口であることを特徴とする請求項 1 から 6 のいずれかに記載の音響減衰評価装置。

【請求項 8】

前記第 3 減衰係数導出部では、

10

20

30

40

【数 1】

$$A_3 = \frac{2\pi f}{c} \sqrt{\frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + \frac{R^2}{4\pi^2 f^2}} - 1 \right)}$$

$$R = -\frac{\lambda}{2D\rho A} \mu$$

D : 配管径(m)

10

 μ : 等価線形質量流量(kg/s) λ : 管摩擦係数

f : 周波数(Hz)

 ρ : 流体密度(kg/m³)A : 配管断面積(m²)

c : 音速(m/s)

20

 A_3 : 第3減衰係数(1/m)

にしたがって前記第3減衰係数を計算することを特徴とする請求項1から7のいずれかに記載の音響減衰評価装置。

【請求項9】

前記減衰計算部では、

【数 2】

$$P(x) = P(0)e^{-A_T x}$$

 $P(x)$: 変動圧力(Pa)

30

 $P(0)$: $x=0$ における変動圧力(Pa)

x : 噴出口からの距離(m)

 A_T : 全減衰係数(1/m)

にしたがって前記配管の所定の位置における音響エネルギーを計算することを特徴とする請求項1から8のいずれかに記載の音響減衰評価装置。

【請求項10】

40

音源と、その音源に接続された配管と、を含む系において、前記音源の音響エネルギーの距離減衰を評価するコンピュータプログラムであって、

前記配管内を流れる流体の物性に関する第1物性パラメータを取得する機能と、

当該流体の物性に関する第2物性パラメータを取得する機能と、

当該流体の物性に関する第3物性パラメータと、前記配管の構造のパラメータと、前記配管内の流速と、を取得する機能と、

前記第1物性パラメータを用いて、前記流体の熱伝導および粘性による音響エネルギーの距離減衰を評価するための第1減衰係数を導出する機能と、

前記第2物性パラメータを用いて、前記流体の分子運動による音響エネルギーの距離減衰を評価するための第2減衰係数を導出する機能と、

50

前記第 3 物性パラメータと、前記配管の構造のパラメータと、前記配管内の流速と、を用いて、前記配管内の圧力損失および構造物内の減衰による音響エネルギーの距離減衰を評価するための第 3 減衰係数を導出する機能と、

前記第 1 減衰係数、前記第 2 減衰係数および前記第 3 減衰係数を用いて全減衰係数を導出する機能と、

前記全減衰係数に基づいて、前記配管の所定の位置における音響エネルギーを計算する機能と、をコンピュータに実現させることを特徴とするコンピュータプログラム。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

10

本発明は、音響エネルギーの減衰を評価する技術に関する。

【背景技術】

【0002】

製油所や LNG (Liquefied Natural Gas: 液化天然ガス)・ガスプラント等において、安全弁等の高差圧機器からの流体の噴き出しによる発生音に伴い、下流の配管系が音響的に励起されて振動し、破損する現象 (AIV: Acoustically Induced Vibration) が知られている (非特許文献 1 参照)。AIV の対策設計においては、配管内の各位置における音響パワーレベル (音響エネルギー) を算出する必要があり、そのためには、音源における発生音の音響エネルギーと配管内の音響減衰 (距離減衰) を評価する必要がある。

【先行技術文献】

20

【非特許文献】

【0003】

【非特許文献 1】Carucci, V.A. and Mueller, R.T., 1982, "Acoustically Induced Piping Vibration in High Capacity Pressure Reducing Systems", ASME Paper No.82-WA/PV P-8

【非特許文献 2】Oil Companies Materials Association, 「Acoustic Insulation of Pipes, Valves and Flanges」、Specification No.NWG-5、WILEY HEYDEN LIMITED、November 1982

【非特許文献 3】松田博行および葉山眞治、「往復動圧縮機と配管系の相互干渉を考慮した管内圧力脈動の計算方法 (第 1 報、定式化と簡単な実験)」、日本機械学会論文集 (C 編)、51 巻 463 号、p. 515 - 524、昭 60 - 3

30

【非特許文献 4】子安勝、騒音・振動 (上)、コロナ社

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0004】

流体が流れる配管内の音響減衰に関しては、例えば以下の式 (1) が規格 (非特許文献 2 参照) で用いられているものの、明確な物理モデルに基づいた詳細な評価手法が提案されておらず、流体の物性値や周波数特性、流速などのパラメータの影響は不明である。

【数 1】

$$\Delta A = 0.06 \times (L/D) \quad \dots \quad (1)$$

40

ΔA : 距離減衰 (dB)

L: 配管長さ (m)

D: 配管径 (m)

【0005】

したがって、結果として、過大な対策が必要とされることもあり、設備の経済設計ならびに信頼性向上の観点から、より信頼性の高い評価手法の構築が望まれていた。

【0006】

50

本発明はこうした課題に鑑みてなされたものであり、その目的は、配管内の音響エネルギーの減衰の予測精度を高めた音響減衰評価装置の提供にある。

【課題を解決するための手段】

【0007】

本発明のある態様は、音響減衰評価装置に関する。この音響減衰評価装置は、音源と、その音源に接続された配管と、を含む系において、音源の音響エネルギーの距離減衰を評価する音響減衰評価装置であって、配管内を流れる流体の物性に関する第1物性パラメータを取得する第1取得部と、流体の物性に関する第2物性パラメータを取得する第2取得部と、流体の物性に関する第3物性パラメータと、配管の構造のパラメータと、配管内の流速と、を取得する第3取得部と、第1取得部で取得した第1物性パラメータを用いて、流体の熱伝導および粘性による音響エネルギーの距離減衰を評価するための第1減衰係数を導出する第1減衰係数導出部と、第2取得部で取得した第2物性パラメータを用いて、流体の分子運動による音響エネルギーの距離減衰を評価するための第2減衰係数を導出する第2減衰係数導出部と、第3取得部で取得した第3物性パラメータと、配管の構造のパラメータと、配管内の流速と、を用いて、配管内の圧力損失および構造物内の減衰による音響エネルギーの距離減衰を評価するための第3減衰係数を導出する第3減衰係数導出部と、第1減衰係数導出部、第2減衰係数導出部および第3減衰係数導出部からそれぞれ導出された第1減衰係数、第2減衰係数および第3減衰係数を用いて全減衰係数を導出する全減衰係数導出部と、全減衰係数導出部によって導出される全減衰係数に基づいて、配管の所定の位置における音響エネルギーを計算する減衰計算部と、を備える。

【0008】

ここで「音響エネルギー」とは、音源で発生する音が有するエネルギーであってもよく、特に音源で発生する音の音波が有するエネルギーであってもよい。また、「音響エネルギー」は音圧であってもよい。

ここで「距離減衰」とは、エネルギー源からの距離の関数としての減衰であってもよい。

【0009】

この態様によると、配管内の流速を加味して音響エネルギーの距離減衰を評価できる。

【0010】

音響エネルギーに対して、配管の安全性の評価基準データを保持する評価基準保持部と、減衰計算部によって計算された音響エネルギーから、評価基準保持部に保持された評価基準データを参照して配管の安全性を評価する評価部と、をさらに備えてもよい。この場合、より精度良く配管の安全性を評価できる。

ここで「配管の安全性」とは、音響エネルギーによる振動によって所定の時間内に配管が破損する可能性であってもよい。また、配管の構造のパラメータが与えられたときに経験的に定められた音響エネルギーのしきい値との比較であってもよい。

【0011】

音源の音響エネルギーの周波数特性データを保持する周波数特性保持部と、評価する音響エネルギーの周波数を設定する周波数設定部と、周波数特性保持部に保持された周波数特性データを参照し、周波数設定部によって設定された周波数における、音源の音響エネルギーを取得して出力する初期値抽出部と、をさらに備えてもよい。第1減衰係数導出部、第2減衰係数導出部、および第3減衰係数導出部のそれぞれは、周波数設定部によって設定された周波数を用いて第1減衰係数、第2減衰係数および第3減衰係数のそれぞれを導出してもよい。減衰計算部は、全減衰係数導出部によって導出される全減衰係数と、初期値抽出部によって出力される音響エネルギーと、に基づいて、周波数設定部によって設定された周波数における、配管の所定の位置における音響エネルギーを計算してもよい。この場合、音響エネルギーの減衰を周波数ごとに評価できる。

ここで「周波数特性」とは、周波数スペクトルに分解した際の周波数成分であってもよい。

【0012】

周波数設定部は、評価する音響エネルギーの周波数を複数設定してもよい。初期値抽出部

10

20

30

40

50

は、周波数特性保持部に保持された周波数特性データを参照し、周波数設定部によって設定された複数の周波数のそれぞれに対応する、音源の音響エネルギーを取得して出力してもよい。第1減衰係数導出部、第2減衰係数導出部、および第3減衰係数導出部のそれぞれは、周波数設定部によって設定された複数の周波数のそれぞれを用いて第1減衰係数、第2減衰係数および第3減衰係数のそれぞれを導出してもよい。減衰計算部は、全減衰係数導出部によって導出される全減衰係数と、初期値抽出部によって出力される音響エネルギーと、に基づいて、周波数設定部によって設定された複数の周波数のそれぞれでの、配管の所定の位置における音響エネルギーを計算してもよい。

【0013】

評価部は、減衰計算部によって計算された音響エネルギーから、評価基準保持部に保持された評価基準データを参照して配管の安全性を設定された周波数ごとに評価してもよい。

10

【0014】

評価部は、安全性が最も低くなる周波数の評価結果を抽出してもよい。

【0015】

音源は、安全弁、オリフィス、差圧弁などの、流体が流れる差圧機器であってもよい。また音源は、スピーカやその他の音や脈動を発生する機器であってもよい。

【0016】

第3減衰係数計算部では、

【数2】

$$A_3 = \frac{2\pi f}{c} \sqrt{\frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + \frac{R^2}{4\pi^2 f^2}} - 1 \right)} \quad \dots \quad (2)$$

20

$$R = -\frac{\lambda}{2D\rho A} \mu \quad \dots \quad (3)$$

D：配管径(m)

μ ：等価線形質量流量(kg/s)

30

λ ：管摩擦係数

f：周波数(Hz)

ρ ：流体密度(kg/m³)

A：配管断面積(m²)

c：音速(m/s)

A_3 ：第3減衰係数(1/m)

40

にしたがって第3減衰係数を計算してもよい。

【0017】

減衰計算部では、

【数 3】

$$p(x) = p(0)e^{-A_T x} \quad \dots \quad (4)$$

$p(x)$: 変動圧力(Pa)

$p(0)$: $x=0$ における変動圧力(Pa)

x : 噴出口からの距離(m)

A_T : 全減衰係数(l/m)

10

にしたがって配管の所定の位置における音響エネルギーを計算してもよい。

【0018】

なお、以上の構成要素の任意の組み合わせや、本発明の構成要素や表現を装置、方法、システム、コンピュータプログラム、コンピュータプログラムを格納した記録媒体などの間で相互に置換したものもまた、本発明の態様として有効である。

【発明の効果】

【0019】

本発明に係る音響減衰評価装置によれば、音響エネルギーの減衰の予測精度を高めることができる。

20

【図面の簡単な説明】

【0020】

【図1】実施の形態に係る音響減衰評価装置が安全性を評価する系を示す概略図である。

【図2】実施の形態に係る音響減衰評価装置の機能および構成を示すブロック図である。

【図3】図2の音響減衰評価装置における一連の処理を示すフローチャートである。

【図4】音響減衰測定の実験系を示す概念図である。

【図5】実験データと、図2の音響減衰評価装置によって導かれたデータと、従来の方法によって導かれたデータと、の周波数依存性を示すグラフである。

【図6】実験データと、図2の音響減衰評価装置によって導かれたデータと、従来の方法によって導かれたデータと、の流速依存性を示すグラフである。

30

【図7】図2の音響減衰評価装置によって計算された対策距離と、従来の方法によって計算された対策距離と、の流速依存性を示すグラフである。

【発明を実施するための形態】

【0021】

以下、本発明を好適な実施の形態をもとに図面を参照しながら説明する。各図面に示される同一または同等の構成要素、部材、処理には、同一の符号を付するものとし、適宜重複した説明は省略する。また、各図面における部材の寸法は、理解を容易にするために適宜拡大、縮小して示される。また、各図面において本発明に係る各実施の形態を説明する上で重要ではない部材の一部は省略して表示する。

【0022】

40

図1は、実施の形態に係る音響減衰評価装置が安全性を評価する系を示す概略図である。実施の形態に係る音響減衰評価装置は、安全弁などの差圧弁2と、それに接続された高压側配管4および低压側配管6とを含む系において、空気やメタンなどの気体が高压側配管4から低压側配管6の向き8に差圧弁2を通して噴き出す際の音圧 p (Pa) の距離減衰を評価する。ここで距離減衰を評価する、とは、差圧弁から離れるにしたがって配管内でどの程度音圧が減衰するかを評価することである。つまり図1を参照すると、低压側配管6内で差圧弁2から距離 x だけ離れた位置の音圧 $p(x)$ は、差圧弁2での音圧 $p(0)$ と比べてどの程度減衰しているかが評価される。

図1に示されるような系は、たとえばプラントで安全弁からガスを噴き出す必要がある場合や、配管内にオリフィスが設置してある場合等に用いられる。

50

なお、音圧 p は音響エネルギーの大きさを示すので、音圧 p の減衰は音響エネルギーの減衰と等価と見ることができる。またここでは、低圧側配管 6 はその評価対象範囲に亘って一定の配管径 D (m) を有する場合を想定するが、配管径が変化する場合にも適用可能である。

【 0 0 2 3 】

さらに実施の形態に係る音響減衰評価装置では、差圧弁 2 に接続された低圧側配管 6 の音圧 p の減衰を、配管内の流速を加味して周波数ごとに評価する。その際、差圧弁 2 から噴き出す気体の熱伝導、粘性および分子運動による減衰だけでなく、圧力損失に起因する減衰を取り入れて計算する。これにより、より正確に音圧 p の減衰を評価できる。

【 0 0 2 4 】

図 2 は、実施の形態に係る音響減衰評価装置 1 0 0 の機能および構成を示すブロック図である。ここに示す各ブロックは、ハードウェア的には、コンピュータの CPU をはじめとする素子や機械装置で実現でき、ソフトウェア的にはコンピュータプログラム等によって実現されるが、ここでは、それらの連携によって実現される機能ブロックを描いている。したがって、これらの機能ブロックはハードウェア、ソフトウェアの組合せによっていろいろなかたちで実現できることは、当業者には理解されるところである。

【 0 0 2 5 】

音響減衰評価装置 1 0 0 は、記憶装置 1 0 と、第 1 取得部 2 0 と、第 2 取得部 2 2 と、第 3 取得部 2 4 と、第 1 減衰係数導出部 2 6 と、第 2 減衰係数導出部 2 8 と、第 3 減衰係数導出部 3 0 と、全減衰係数導出部 3 2 と、周波数設定部 3 4 と、初期値抽出部 3 6 と、減衰計算部 3 8 と、評価部 4 0 と、を備える。

【 0 0 2 6 】

記憶装置 1 0 は、周波数特性保持部 1 2 と、評価基準保持部 1 4 と、数式保持部 1 6 と、を含む。周波数特性保持部 1 2 は、差圧弁 2 から噴き出す気体の音圧 p の周波数特性データを保持する。特に周波数特性データは、差圧弁 2 での音圧 p (0) の各周波数成分 p (0 , f) を含む。

【 0 0 2 7 】

評価基準保持部 1 4 は、音圧 p に対する低圧側配管 6 の安全性の評価基準のデータを保持する。安全性の評価基準とは、低圧側配管 6 が音響エネルギーによる振動に耐えられるかの基準であり、ここでは特に所定の径と肉厚を有する配管が耐えうる音圧のしきい値 p_T を経験的に設定することで安全性を評価する。したがって、評価基準保持部 1 4 に保持される評価基準のデータは、配管径 D と肉厚 t の組み合わせごとにひとつ音圧のしきい値 p_T (D , t) を保持する。

なお、安全性の評価基準としては、音響系 - 構造系の連成解析によって得られる評価基準などの他の評価基準を用いてもよい。

【 0 0 2 8 】

数式保持部 1 6 は、後述する式 (5)、式 (6)、式 (7)、式 (8)、式 (1 7) を保持する。

【 0 0 2 9 】

第 1 取得部 2 0 は、第 1 減衰係数 A_1 を導出するための第 1 物性パラメータを取得する。第 1 物性パラメータは、差圧弁 2 から噴き出す気体の物性に関するパラメータであり、音速 c (m / s) と、定圧比熱 c_p ($J / kg \cdot K$) と、比熱比 γ と、熱伝導度 k ($W / m \cdot K$) と、密度 ρ (kg / m^3) と、粘性係数 η ($Pa \cdot s$) と、を含む。

【 0 0 3 0 】

第 2 取得部 2 2 は、第 2 減衰係数 A_2 を導出するための第 2 物性パラメータを取得する。第 2 物性パラメータは、差圧弁 2 から噴き出す気体の物性に関するパラメータであり、分子の緩和周波数 f_r ($1 / s$) を含む。

【 0 0 3 1 】

第 3 取得部 2 4 は、第 3 減衰係数 A_3 を導出するための第 3 物性パラメータと、配管の構造のパラメータと、配管内の流速 V (m / s) と、を取得する。第 3 物性パラメータは

10

20

30

40

50

、差圧弁 2 から噴き出す気体の物性に関するパラメータであり、音速 c (m / s) と、密度 ρ (kg / m^3) と、その他等価線形質量流量 μ (kg / s) を導くために必要なパラメータを含む。等価線形質量流量 μ については、非特許文献 3 を参照されたい。配管の構造のパラメータは、低压側配管 6 の構造に関するパラメータであり、配管断面積 A (m^2) と、配管径 D と、管摩擦係数 λ と、を含む。

なお、それぞれの取得部は対応するパラメータを記憶装置 10 の所定の場所から取得してもよいし、音響減衰評価装置 100 の外部から図示しない入力装置を経て取得してもよい。

【 0032 】

周波数設定部 34 は、評価する音圧 p の周波数 f を設定する。音響減衰評価装置 100 のユーザは、あるひとつの周波数での音響エネルギーの減衰を評価したい場合は、その周波数を周波数設定部 34 に登録する。すると周波数設定部 34 は、その周波数を後述する第 1 減衰係数導出部 26、第 2 減衰係数導出部 28、第 3 減衰係数導出部 30 および初期値抽出部 36 に対して設定する。ユーザが複数の周波数での音響エネルギーの減衰を評価したい場合は、その複数の周波数を周波数設定部 34 に登録する。すると周波数設定部 34 は、後述する減衰計算部 38 からの周波数変更信号に基づいて複数の周波数をひとつひとつ設定してゆく。

【 0033 】

第 1 減衰係数導出部 26 は、第 1 取得部 20 で取得した第 1 物性パラメータおよび周波数設定部 34 で設定された周波数 f を用いて、気体の熱伝導および粘性による音圧 p の距離減衰に対応する第 1 減衰係数 A_1 を導出する。第 1 減衰係数 A_1 は、

$$A_1 = \frac{4\pi^2 f^2}{\rho c^3} \left(\frac{4}{3} \eta + \frac{\gamma - 1}{c_\rho} k \right) \quad \dots \quad (5)$$

c : 音速(m/s)

c_ρ : 定圧比熱($J/kg \cdot K$)

γ : 比熱比

k : 熱伝導度($W/m \cdot K$)

ρ : 密度(kg/m^3)

η : 粘性係数($Pa \cdot s$)

f : 周波数(Hz)

で表現される数式に基づき導出してもよい。この数式の導出については非特許文献 4 を参照されたい。また、第 1 減衰係数導出部 26 は第 1 減衰係数 A_1 のルックアップテーブルを有し、そこから第 1 減衰係数 A_1 を導出してもよい。第 1 減衰係数導出部 26 は数式保持部 16 から式 (5) を読み込む。

【 0034 】

第 1 減衰係数導出部 26 は図示しない第 1 演算手段と、図示しない第 2 演算手段と、を含む。第 1 演算手段は、式 (5) のうち f^2 以外の部分を演算してその結果を第 2 演算手段へ出力する。第 2 演算手段は、第 1 演算手段の出力と、 f^2 とを掛け合わせて第 1 減衰係数 A_1 として出力する。この場合、一度ある周波数において第 1 演算手段が f^2 以外の部分を演算してしまえば、その結果を他の周波数での第 1 減衰係数 A_1 を導出する際にも再利用することができ、第 1 減衰係数 A_1 の導出を高速化できる。

【 0035 】

第2減衰係数導出部28は、第2取得部22で取得した第2物性パラメータおよび周波数設定部34で設定された周波数 f を用いて、気体の分子運動による音圧 p の距離減衰に対応する第2減衰係数 A_2 を導出する。第2減衰係数 A_2 は、

【数5】

$$A_2 = \frac{Mf_r}{1 + \left(\frac{f_r}{f}\right)^2} \quad \dots \quad (6)$$

M ：定数(s/m)

f_r ：分子の緩和周波数(1/s)

10

で表現される数式に基づき導出してよい。なお、この数式の導出については非特許文献4を参照されたい。第2減衰係数導出部28は数式保持部16から式(6)を読み込む。

【0036】

第2減衰係数導出部28は図示しない第3演算手段と、図示しない第4演算手段と、を含む。第3演算手段は、式(6)の分子を演算してその結果を第4演算手段へ出力する。第4演算手段は、式(6)の分母を演算し、その結果で第3演算手段の出力を除して第2減衰係数 A_2 として出力する。この場合、一度ある周波数において第3演算手段が式(6)の分子を演算してしまえば、その結果を他の周波数での第2減衰係数 A_2 を導出する際にも再利用することができ、第2減衰係数 A_2 の導出を高速化できる。

20

【0037】

第3減衰係数導出部30は、第3取得部24で取得した第3物性パラメータと、配管の構造のパラメータと、配管内の流速 V と、周波数設定部34で設定された周波数 f と、を用いて、低圧側配管6内の圧力損失による音圧 p の距離減衰に対応する第3減衰係数 A_3 を導出する。第3減衰係数 A_3 は、

【数6】

$$A_3 = \frac{2\pi f}{c} \sqrt{\frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + \frac{R^2}{4\pi^2 f^2}} - 1 \right)} \quad \dots \quad (7)$$

30

$$R = -\frac{\lambda}{2D\rho A} \mu \quad \dots \quad (8)$$

D ：配管径(m)

μ ：等価線形質量流量(kg/s)

λ ：管摩擦係数

A ：配管断面積(m²)

A_3 ：第3減衰係数(1/m)

40

で表現される数式に基づき導出される。第3減衰係数導出部30は数式保持部16から式(7)および式(8)を読み込む。

【0038】

第3減衰係数導出部30は図示しない第5演算手段と、図示しない第6演算手段と、を

50

含む。第 5 演算手段は、式 (8) を演算して R を求め、それを第 6 演算手段へ出力する。第 6 演算手段は、第 5 演算手段が出力する R を用いて式 (7) を演算し、その結果を第 3 減衰係数 A_3 として出力する。

【 0 0 3 9 】

以下式 (7) および式 (8) の導出方法を説明する。

低圧側配管 6 内の圧力損失に起因した第 3 減衰係数 A_3 は、音波の支配方程式から導出される。低圧側配管 6 内を伝搬する音波 (圧力脈動) は以下に示す支配方程式によって記述される。

【 数 7 】

$$\frac{\partial m}{\partial t} = -A \frac{\partial p'}{\partial x} - Rm \quad \dots \quad (9)$$

10

$$\frac{\partial p'}{\partial t} = -\frac{c^2}{A} \frac{\partial m}{\partial x} \quad \dots \quad (10)$$

$$R = -\frac{\lambda}{2D \rho A} \mu \quad \dots \quad (8)$$

m : 変動質量流量(kg/s)

20

p' : 変動圧力(Pa)

x : 距離(m)

t : 時間(s)

式 (9) は流体の運動方程式であり、式 (1 0) は連続の式である。式 (9) 右辺第二項が低圧側配管 6 内の圧力損失による減衰を表す。R は等価線形質量流量 μ を用いて式 (8) により与えられる。

式 (9) および式 (1 0) より、変動質量流量 m を消去し、変動圧力 p' の関数として整理すると、低圧側配管 6 内の圧力脈動は以下の式で記述される。

30

【数 8】

$$\frac{\partial^2 p'}{\partial x^2} + k' p' = 0 \quad \dots (11)$$

$$k' = \frac{\omega}{c} \sqrt{1 + j \frac{R}{\omega}} = \alpha + j \beta \quad \dots (12)$$

$$\alpha = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + \frac{R^2}{\omega^2}} + 1 \right)} \quad \dots (13)$$

$$\beta = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + \frac{R^2}{\omega^2}} - 1 \right)} \quad \dots (14)$$

$$R = -\frac{\lambda}{2D\rho A} \mu \quad \dots (8)$$

10

$$(\omega = 2\pi f)$$

20

式 (1 1) において圧力の時間変化を $e^{-j\omega t}$ で表すと、式 (1 1) の解は以下の式で与えられる。

【数 9】

$$p' = p'_0 e^{-\beta x + j\alpha x - j\omega t} \quad \dots (15)$$

p'_0 : $x=0$ における変動圧力(Pa)

30

したがって低圧側配管 6 内を x 方向に伝搬する音波の距離減衰は β によって評価できることが判る。即ち、第 3 減衰係数 $A_3 = \beta$ と評価できる。なお、式 (8)、式 (1 4) より β は低圧側配管 6 内の摩擦による損失によって評価することができる。

【 0 0 4 0 】

ここで、流速 V が 0 でない、つまり低圧側配管 6 内を気体が行くことを考慮すればより正確に音圧 p の減衰を評価できる、という本発明者の気づきに基づき第 3 減衰係数 A_3 が導入されたという点に注意すべきである。

【 0 0 4 1 】

全減衰係数導出部 3 2 は、第 1 減衰係数導出部 2 6、第 2 減衰係数導出部 2 8 および第 3 減衰係数導出部 3 0 からそれぞれ導出された第 1 減衰係数 A_1 、第 2 減衰係数 A_2 および第 3 減衰係数 A_3 を足し合わせて全減衰係数 A_T を導出する。つまり $A_T = A_1 + A_2 + A_3$ によって全減衰係数 A_T を導出する。

40

【 0 0 4 2 】

初期値抽出部 3 6 は、周波数特性保持部 1 2 に保持された、差圧弁 2 での音圧 $p(0)$ の各周波数成分を参照し、周波数設定部 3 4 によって設定された周波数 f に対応する周波数成分 $p(0, f)$ を取得して出力する。ここで周波数設定部 3 4 によって設定された周波数 f に対応する周波数成分が周波数特性保持部 1 2 に保持されていればそれを取得して出力する。

【 0 0 4 3 】

50

また周波数設定部 3 4 によって設定された周波数 f に対応する周波数成分がない場合は、周波数成分が周波数特性保持部 1 2 に保持されている周波数のうちから、周波数設定部 3 4 によって設定された周波数 f の前後 2 つの周波数、たとえば f_1 と f_2 ($f_1 < f < f_2$) を決定する。そしてその 2 つの周波数 f_1 、 f_2 に対応する周波数成分 $p(0, f_1)$ 、 $p(0, f_2)$ を取得し、それを基に周波数設定部 3 4 によって設定された周波数 f に対応する周波数成分 $p(0, f)$ を導出して出力する。これはたとえばその 2 つの周波数 f_1 、 f_2 に対応する 2 つの周波数成分 $p(0, f_1)$ 、 $p(0, f_2)$ 間を線形近似することで実現されてもよい。これは数式を用いると、

【数 1 0】

$$p(0, f) = p(0, f_1) + \frac{p(0, f_2) - p(0, f_1)}{f_2 - f_1} (f - f_1) \quad \dots \quad (16)$$

10

と表現される。

【0 0 4 4】

減衰計算部 3 8 は、全減衰係数導出部 3 2 によって導出される全減衰係数 A_T と、初期値抽出部 3 6 によって出力される音圧の周波数成分 $p(0, f)$ と、に基づいて、周波数設定部 3 4 によって設定された周波数 f での、低压側配管 6 の音圧を差圧弁 2 からの距離 x の関数として計算する。そしてその計算結果を評価部 4 0 に出力する。音圧 $p(x, f)$ は、

20

【数 1 1】

$$p(x, f) = p(0, f) e^{-A_T x} \quad \dots \quad (17)$$

で表現される数式に基づいて計算される。減衰計算部 3 8 は数式保持部 1 6 から式 (17) を読み込む。

【0 0 4 5】

また、減衰を計算したい周波数が複数ある場合は、減衰計算部 3 8 は周波数設定部 3 4 に対して、別の周波数を選ばせるための周波数変更信号を送出する。そして複数の周波数の全てが選択され、最後の周波数での減衰の計算が終了すると、減衰計算部 3 8 は評価部 4 0 にその計算結果を出力する。

30

【0 0 4 6】

評価部 4 0 は、減衰計算部 3 8 によって計算された音圧 $p(x, f)$ から、評価基準保持部 1 4 に保持された評価基準のデータを参照して低压側配管 6 の安全性を評価する。ユーザはあらかじめ評価部 4 0 に対して低压側配管 6 の配管径 D および肉厚 t を登録しておく。評価部 4 0 はその配管径 D および肉厚 t に対応する音圧のしきい値 $p_T(D, t)$ を評価基準のデータから抽出する。

【0 0 4 7】

まず、周波数設定部 3 4 がひとつの周波数を設定する場合を説明する。評価部 4 0 は、周波数設定部 3 4 によって設定された周波数 f での音圧 $p(x, f)$ を適切に規格化した後に、抽出した音圧のしきい値 $p_T(D, t)$ と比較する。そして $p_T(D, t)$ と規格化後の $p(x, f)$ とが等しくなる距離を対策距離 x_t (m) として図示しない表示装置に出力する。式 (17) から音圧 $p(x, f)$ は x の単調減少関数であるので、対策距離 x_t は、差圧弁 2 から対策距離 x_t までの低压側配管 6 には補強が必要であることを示す。

40

【0 0 4 8】

次に、周波数設定部 3 4 が複数の周波数を設定する場合は、その複数の周波数のそれぞれについて上述のようにして対策距離 x_t を導出する。そしてその中から最も長い対策距離 x_{tmax} を抽出し、図示しない表示装置に出力する。

【0 0 4 9】

50

以上の構成による音響減衰評価装置 100 の動作を説明する。図 3 は、音響減衰評価装置 100 における一連の処理を示すフローチャートである。

第 1 取得部 20、第 2 取得部 22 および第 3 取得部 24 はそれぞれ取得すべきパラメータを取得する (S202)。周波数設定部 34 は評価する音圧の周波数 f を設定する (S204)。第 1 減衰係数導出部 26 は第 1 減衰係数 A_1 を導出する (S206)。第 2 減衰係数導出部 28 は第 2 減衰係数 A_2 を導出する (S208)。第 3 減衰係数導出部 30 は第 3 減衰係数 A_3 を導出する (S210)。全減衰係数導出部 32 は全減衰係数 A_T を導出する (S212)。初期値抽出部 36 は設定された周波数 f に対応する周波数成分 $p(0, f)$ を音圧の初期値として取得する (S214)。減衰計算部 38 は、全減衰係数 A_T と、音圧の初期値 $p(0, f)$ と、に基づいて、音圧 p の減衰を計算する (S216)。減衰計算部 38 は、周波数を変更する必要がある場合 (S218 の Y) は、周波数設定部 34 に対して別の周波数を設定するよう指令を出すと共に処理を周波数設定ステップ (S204) に返す。周波数を変更する必要がある場合 (S218 の N) は、評価部 40 は音圧 p の減衰の計算結果に基づいて、配管の安全性を評価する (S220)。

【0050】

以下に本実施の形態に係る音響減衰評価装置 100 を用いた評価結果と、実験データとの比較を示す。

【0051】

図 4 は、音響減衰測定の実験系 300 を示す概念図である。実験系 300 は、タンク 302 と、仕切弁 304 と、オリフィス 306 と、低圧側配管 308 と、複数のセンサ 310 と、を備える。タンク 302 には所定の圧力で気体が充填される。仕切弁 304 が開くと、タンク 302 に充填された気体がオリフィス 306 を通過する。この際オリフィス 306 から音が発生する。また、オリフィス 306 を通過する気体の流速はタンク 302 の圧力および低圧側配管 308 に取り付けられた図示しない複数の流量計によって制御される。したがってオリフィス 306 は開いた状態の差圧弁をシミュレートしている。

低圧側配管 308 の複数の位置に取り付けられた音圧センサ 310 により、オリフィス 306 が発する音の音圧を測定する。この測定された音圧から音圧の減衰を計算して実験データとした。

【0052】

本実施の形態に係る音響減衰評価装置 100 では、実験系 300 で使用された気体の物性パラメータおよび配管の構造のパラメータを用いて音圧の減衰を評価した。

【0053】

図 5 は、実験データと、本実施の形態に係る音響減衰評価装置 100 によって導かれたデータと、従来の方法によって導かれたデータと、の周波数依存性を示すグラフである。ここで気体の流速は一定の値に固定される。図 5 の実線は実験データをフィットして得られたフィット曲線である。縦軸は配管の長さ 1 (m) あたりの減衰 (dB/m) を示す。横軸は 1/3 オクターブバンドの中心周波数 (Hz) を示す。

【0054】

実験データのデータ点を求める際には、まず周波数を 1/3 オクターブバンドに分割する。そして実験データを基にひとつの 1/3 オクターブバンド内で減衰を計算し、その計算結果を平均化して 1/3 オクターブバンドの中心周波数に割り当てる。この処理を全ての 1/3 オクターブバンドについて繰り返すことでデータ点が得られる。本実施の形態に係る音響減衰評価装置 100 によって導かれたデータ、および従来の方法によって導かれたデータについても同様である。

なお、従来の方法とは、上述の非特許文献 2 による計算である。

【0055】

図 5 から分かるとおり、低周波数領域 ($< 1250 \text{ Hz}$) においては音響減衰評価装置 100 は従来の方法と比較して精度良く音圧、つまり音響エネルギーの減衰が予測できることが分かる。また、高周波数領域 ($> 1250 \text{ Hz}$) においては音響減衰評価装置 100 は周波数が高くなるにつれて減衰が大きくなるという傾向を予測している。これに対して

実験データもまたそのような傾向を示している。したがって、音響減衰評価装置 100 は高周波数領域においても音響エネルギーの減衰の周波数特性が評価できていると言える。

【0056】

また、従来の方法では実験データと比べてより高い減衰を予測している。つまり、従来の方法で計算された減衰の値を採用して配管を設計した場合、予測していたほどには音響エネルギーの減衰がおこらず、配管が音響振動に耐えきれない可能性がある。しかしながら本実施の形態に係る音響減衰評価装置 100 を用いると実験データと遜色ない予測値が得られるので、より安全性を高めた配管設計が可能となる。

【0057】

図 6 は、実験データと、本実施の形態に係る音響減衰評価装置 100 によって導かれたデータと、従来の方法によって導かれたデータと、の流速依存性を示すグラフである。縦軸は配管の長さ 1 (m) あたりの減衰 (dB/m) を示す。横軸は平均マッハ数を示す。平均マッハ数とは、平均流速を音速で除した値である。実験においては低圧側配管 308 の複数の位置で計測される流速の平均値を平均流速としている。音響減衰評価装置 100 および従来の方法では流速の設定値を平均流速としている。実験、音響減衰評価装置 100 および従来の方法のいずれにおいても周波数に関しては、流速がある値のときに 100 (Hz) - 2000 (Hz) で得られる周波数ごとの減衰の計算結果を平均化し、その平均化された減衰を流速に割り当てた。

【0058】

従来の方法ではそもそも流速を加味していないので、減衰は平均マッハ数によらず一定となる。それに対して図 6 から分かるとおり、音響減衰評価装置 100 は減衰の流速依存性を精度良く予測できる。特に実験データでは、流速の増加に伴い減衰が増加することが示されているが、音響減衰評価装置 100 はこの特性を再現している。

【0059】

図 7 は、本実施の形態に係る音響減衰評価装置 100 によって計算された対策距離と、従来の方法によって計算された対策距離と、の流速依存性を示すグラフである。縦軸は対策距離 (m) を示す。横軸は平均マッハ数を示す。音響減衰評価装置 100 での計算では気体としてメタンを用いた。

【0060】

従来の方法では流速を加味していないので、対策距離は平均マッハ数によらず一定となる。それに対して本実施の形態に係る音響減衰評価装置 100 では、図 6 でも示されたとおり、減衰の流速依存性が予測できる。したがって、図 7 に示されたとおり流速によって異なる対策距離を提案することができる。プラントの緊急脱圧系配管における平均マッハ数は通常 0.3 から 0.4 程度であるが、この平均マッハ数の範囲では、音響減衰評価装置 100 を用いれば対策距離を従来の方法の場合と比べておよそ 20 % 削減できることが分かる。つまりより正確に音響エネルギーの減衰を予測することができるので、補強の過剰部分を削減することができる。

【0061】

このように本実施の形態に係る音響減衰評価装置 100 によれば、図 5 および図 6 から分かるとおり、従来の方法と比べて配管内の音響エネルギーの減衰をより精度良く予測できる。これにより配管の設計技術がより高度化される。

【0062】

また、評価部 40 は音響エネルギーの減衰の計算結果から対策距離を決定して出力する。したがって、音響減衰評価装置 100 のユーザは、従来の方法と比べてより精度の高い減衰の予測に基づいた配管の補強範囲を知ることができる。これにより無駄な補強を減らすことができる。

【0063】

また、音圧 p の減衰を導出するに当たり、低圧側配管 6 内の圧力損失による音圧 p の距離減衰に対応する第 3 減衰係数 A_3 を導入する。ここで第 3 減衰係数 A_3 の式 (7) から分かるとおり第 3 減衰係数 A_3 は流速 V に依存する量である。したがって、図 6 および

10

20

30

40

50

図 7 から分かるとおり、音響減衰評価装置 100 は音響エネルギー減衰の流速依存性を評価でき、予測の精度が高まる。

【0064】

また、音響減衰評価装置 100 は周波数ごとに音響エネルギーの減衰を導出する。したがって、減衰の度合いは周波数によって異なるという点を考慮した減衰の予測が可能となる。これにより図 5 に示されるとおり予測の精度が高まる。特に図 5 で説明したとおり、配管設計の安全性が高まる。

【0065】

また、評価部 40 は対策距離を周波数ごとに求めてその中から最も長い対策距離を出力する。したがって差圧弁での音響エネルギーの周波数特性や減衰の周波数特性に応じた対策距離を提案できる。これはたとえば音響エネルギーのオーバーオール値が同じで周波数特性が異なる 2 つの差圧弁がある場合に、従来の方法ではどちらに対しても同じ対策距離しか提案できなかった。しかしながら本実施の形態に係る音響減衰評価装置 100 では、それぞれの周波数特性に基づいてそれぞれにより適した異なる対策距離を提案できる。

10

【0066】

以上、実施の形態に係る音響減衰評価装置 100 の構成と動作について説明した。これらの実施の形態は例示であり、それらの各構成要素や各処理の組み合わせにいろいろな変形例が可能で、またそうした変形例も本発明の範囲にあることは当業者に理解されるところである。

すなわち、減衰モデルは噴き出し音のみでなく、スピーカやその他のあらゆる音源に適用可能である。ガスが流れる配管内で音を伝える際の減衰を評価したりするだけでなく、流量計などから発生する圧力脈動の減衰の評価にも適用可能である。

20

【0067】

実施の形態では、周波数設定部 34 はユーザによって登録された周波数を設定する場合について説明したが、これに限られず、たとえば記憶装置 10 に保持された、設定すべき周波数の表に基づいて周波数を設定してもよい。

【0068】

実施の形態では、差圧弁 2 での音圧 $p(0)$ の各周波数成分が与えられる場合について説明したが、これに限られない。たとえば初期値抽出部 36 は音圧 p の初期値として差圧弁 2 での音圧 $p(0)$ を出力してもよい。また、減衰計算部 38 は全減衰係数 A_T を複数の周波数で平均してもよい。そして音圧 $p(0)$ および平均化された全減衰係数 A_T と、に基づいて、低压側配管 6 の音圧を差圧弁 2 からの距離 x の関数として計算してもよい。この場合、周波数で平均化された全減衰係数 A_T は周波数に依存しないので、差圧弁 2 での音圧 p の周波数成分が不明でオーバーオール値としての音圧 $p(0)$ しか分からない場合でも音圧の減衰を評価できる。

30

【0069】

実施の形態では、音響エネルギーの周波数成分や減衰係数を周波数ごとに求めたが、これに限られない。たとえば、それらを周波数のバンドごとに求めてもよい。

【0070】

実施の形態では差圧弁 2 から気体が噴き出す場合について説明したが、これに限られず、液体や、広くは流体であってもよい。

40

【0071】

実施の形態では、低压側配管 6 が直管である場合について説明したが、これに限られない。実施の形態に係る音響減衰評価装置 100 で説明された減衰の評価手法は、たとえば低压側配管にエルボ等の折曲部やティー等の分岐部がある場合にも応用できる。

【0072】

以上、実施の形態にもとづき本発明を説明したが、実施の形態は、本発明の原理、応用を示しているにすぎないことはいうまでもなく、実施の形態には、請求の範囲に規定された本発明の思想を逸脱しない範囲において、多くの変形例や配置の変更が可能であることはいうまでもない。

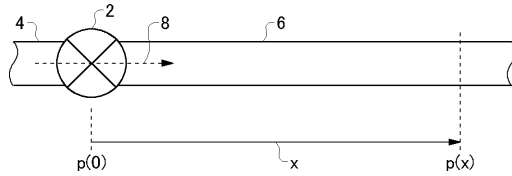
50

【符号の説明】

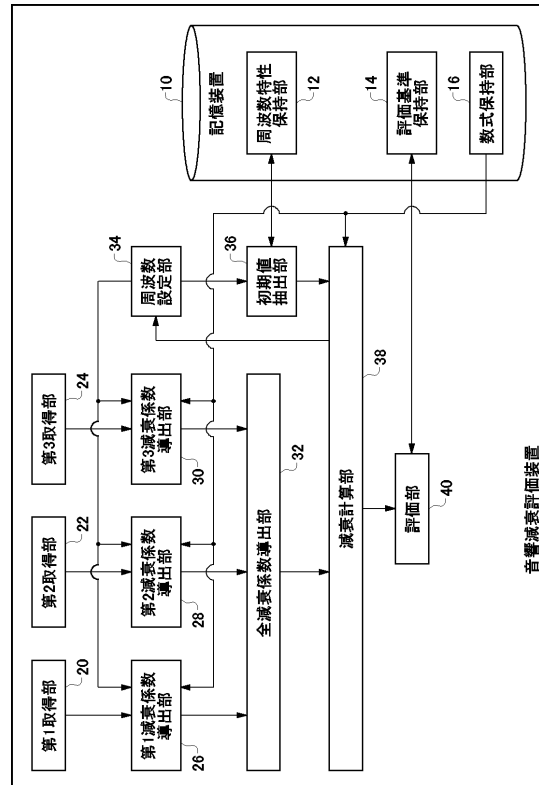
【 0 0 7 3 】

1 0 記憶装置、 1 2 周波数特性保持部、 1 4 評価基準保持部、 2 0 第 1 取得部、 2 2 第 2 取得部、 2 4 第 3 取得部、 2 6 第 1 減衰係数導出部、 2 8 第 2 減衰係数導出部、 3 0 第 3 減衰係数導出部、 3 2 全減衰係数導出部、 3 4 周波数設定部、 3 6 初期値抽出部、 3 8 減衰計算部、 4 0 評価部、 1 0 0 音響減衰評価装置、 3 0 0 実験系、 A_1 第 1 減衰係数、 A_2 第 2 減衰係数、 A_3 第 3 減衰係数、 A_T 全減衰係数、 V 流速、 f 周波数、 x_t 対策距離、 p 音圧。

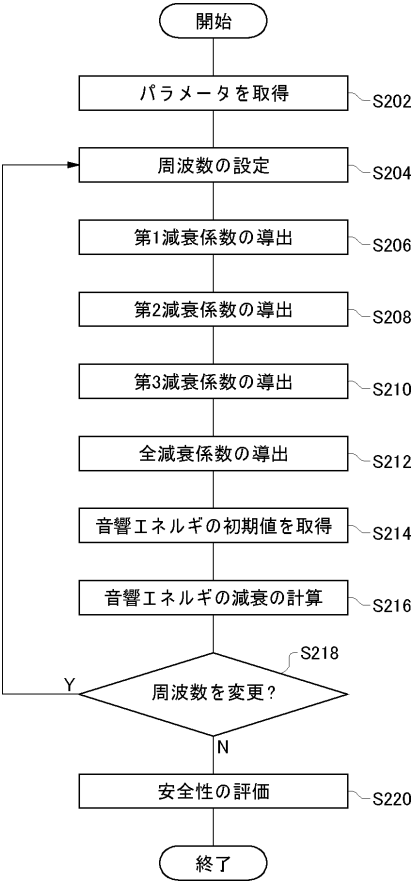
【図 1】



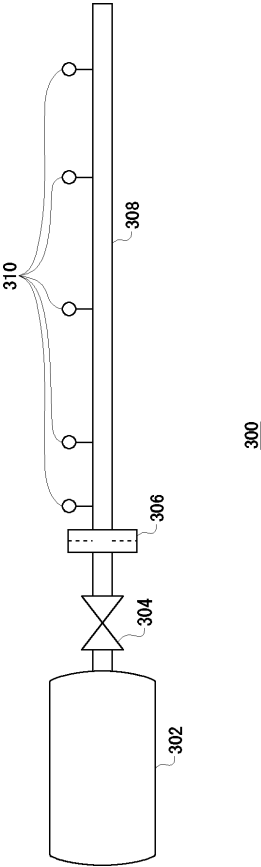
【図 2】



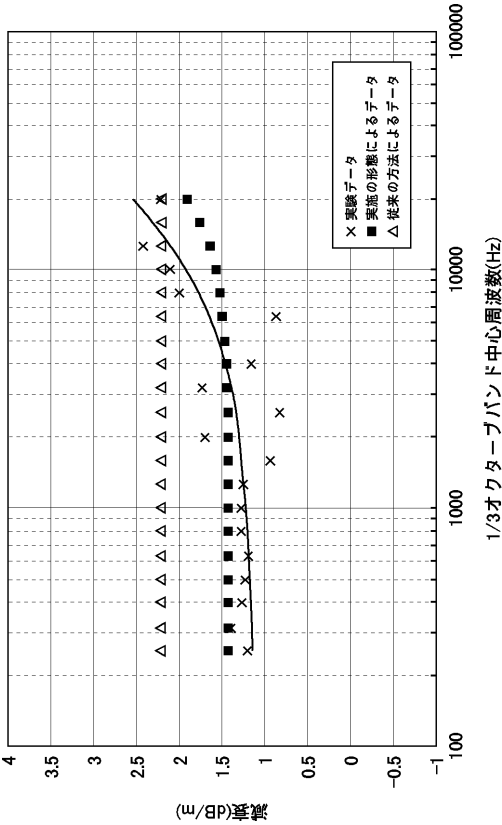
【図3】



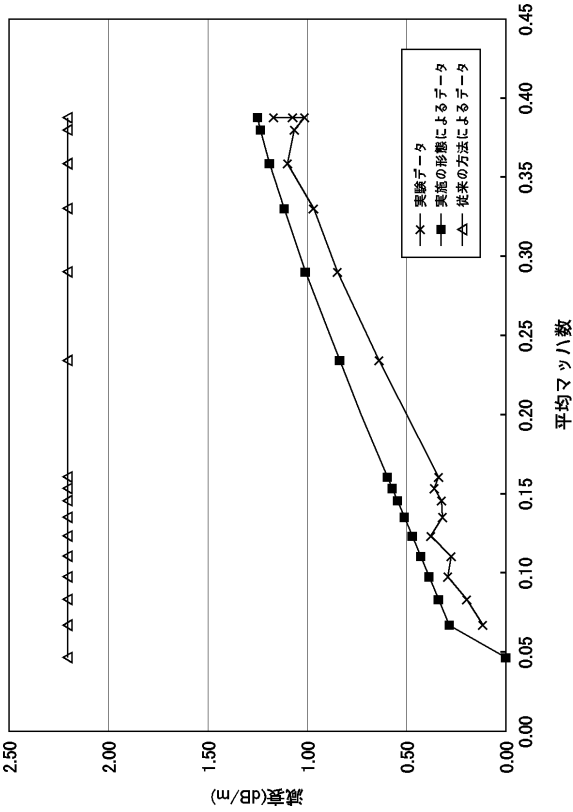
【図4】



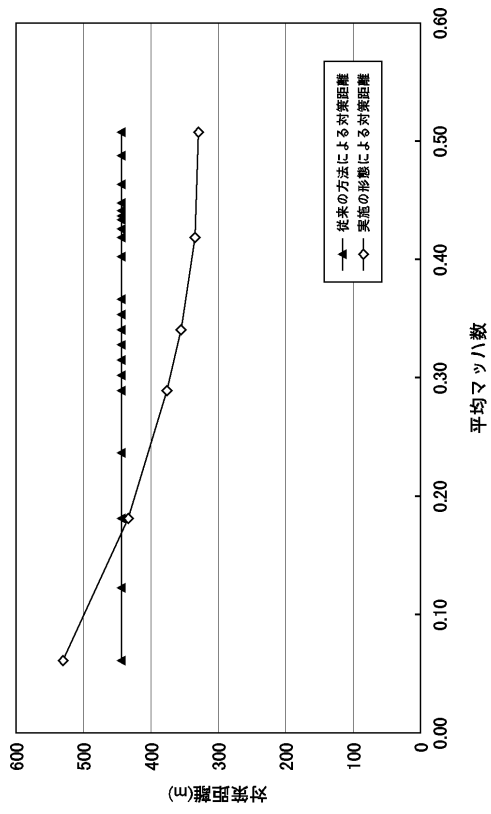
【図5】



【図6】



【図 7】



フロントページの続き

(72)発明者 前田 俊

神奈川県横浜市神奈川区新浦島町 1 - 1 - 25 テクノウェーブ 100ビル 千代田アドバンス・ソリューションズ株式会社内

(72)発明者 西口 誠人

神奈川県横浜市神奈川区新浦島町 1 - 1 - 25 テクノウェーブ 100ビル 千代田アドバンス・ソリューションズ株式会社内

審査官 秋田 将行

(56)参考文献 特開 2003 - 050156 (JP, A)

特開 2006 - 064598 (JP, A)

米国特許第 5711350 (US, A)

林慈朗、日置輝夫、磯部博司、配管内に配設されたオリフィス発生音に関する研究、日本機械学会第 14 回環境工学総合シンポジウム 2004 講演論文集、2004 年 7 月 11 日、pp.26-29

林慈朗、金子成彦、遠心圧縮機による配管内圧力脈動に関する研究（第 2 報、運転条件が減衰特性に及ぼす影響に関する検討）、日本機械学会論文誌（C 編）、2008 年 3 月、Vol.74, No.739, pp.650-657

林慈朗、金子成彦、遠心圧縮機による配管内圧力脈動に関する研究（第 3 報、配管系に接続されたドラム内の圧力脈動に関する検討）、日本機械学会論文誌（C 編）、2008 年 9 月、Vol.74, No.745, pp.2162-2170

M. P. Norton, A. Pruiti, Universal Prediction Schemes for Estimating Flow-Induced Industrial Pipeline Noise and Vibration, Applied Acoustics, 1991 年, Vol.33, pp. 313-336

Kenan Yakut, Bayram Sahin, Flow-induced vibration analysis of conical rings used for heat transfer enhancement in heat exchangers, APPLIED ENERGY, 2004 年 7 月, Vol.78, No.3, pp.273-288

(58)調査した分野(Int.Cl., DB 名)

G01H 1/00 - 17/00