

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2010-19694

(P2010-19694A)

(43) 公開日 平成22年1月28日(2010.1.28)

(51) Int.Cl.
G01N 11/16 (2006.01)F I
G O 1 N 11/16

テーマコード (参考)

B

審査請求 有 請求項の数 3 O L (全 13 頁)

(21) 出願番号 特願2008-180590 (P2008-180590)
(22) 出願日 平成20年7月10日 (2008.7.10)(71) 出願人 000132518
株式会社セコニック
東京都練馬区大泉学園町7丁目24番14号
(74) 代理人 100070323
弁理士 中畑 孝
(72) 発明者 三浦 ▲しん▼介
東京都練馬区大泉学園町7丁目24番14号 株式会社セコニック内

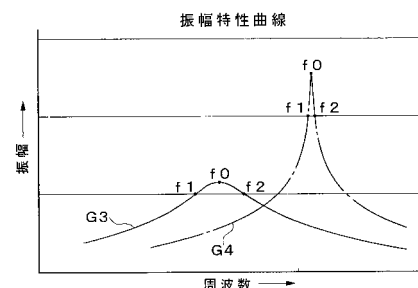
(54) 【発明の名称】 液体の粘性又は／及び弾性測定法

(57) 【要約】

【課題】低粘度から高粘度の測定液まで幅広くその粘弾性を的確に測定でき、更には該粘弾性から粘性又は弾性を的確に把握できる液体の粘性又は／及び弾性測定法を提供する。

【解決手段】検液子1の測定液内振動における振幅特性曲線上の共振周波数値(f_0)と、同振幅特性曲線上の共振周波数値(f_0)より低い低周波数値(f_1)と、同振幅特性曲線上の共振周波数値(f_0)より高い高周波数値(f_2)の3つの周波数値を測定し、測定液のインピーダンスの実数部を上記高周波数値(f_2)と低周波数値(f_1)を用いて演算すると共に、測定液のインピーダンスの虚数部を上記共振周波数値(f_0)を用いて演算し、該インピーダンスの実数部と虚数部から測定液の粘性値又は／及び弾性値を算出する。

【選択図】 図2



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

測定液内に検液子を浸着して振動せしめ測定液の粘性値又は γ 及び弾性値を測定する測定法において、上記検液子の測定液内振動における振幅特性曲線上の共振周波数値(f_0)と、同振幅特性曲線上の共振周波数値(f_0)より低い低周波数値(f_1)と、同振幅特性曲線上の共振周波数値(f_0)より高い高周波数値(f_2)の3つの周波数値を測定し、測定液のインピーダンスの実数部を上記高周波数値(f_2)と低周波数値(f_1)を用いて演算すると共に、測定液のインピーダンスの虚数部を上記共振周波数値(f_0)を用いて演算し、該インピーダンスの実数部と虚数部から測定液の粘性値又は γ 及び弾性値を算出することを特徴とする液体の粘性又は γ 及び弾性測定法。

10

【請求項 2】

測定液内に検液子を浸着して振動せしめ測定液の粘性値又は γ 及び弾性値を測定する測定法において、上記検液子の測定液内振動における振幅特性曲線上の共振周波数値(f_0)と、同振幅特性曲線上の共振周波数値(f_0)より低い低周波数値(f_1)と、同振幅特性曲線上の共振周波数値(f_0)より高い高周波数値(f_2)の3つの周波数値を測定し、測定液のインピーダンスの実数部と虚数部を上記共振周波数値(f_0)と低周波数値(f_1)と高周波数値(f_2)の3つの周波数値を用いて演算し、該インピーダンスの実数部と虚数部から測定液の粘性値又は γ 及び弾性値を算出することを特徴とする液体の粘性又は γ 及び弾性測定法。

20

【請求項 3】

上記低周波数値(f_1)と高周波数値(f_2)が上記測定液内振動における位相角特性曲線上の共振点に対して対称の位相角における周波数であることを特徴とする請求項 1 又は 2 記載の液体の粘性又は γ 及び弾性測定法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は測定液の粘弾性を適切に測定でき、更には該粘弾性から粘性又は弾性を適切に把握できるようにした液体の粘性又は γ 及び弾性測定法に係る。

【背景技術】

【0002】

特許文献 1 には、振動子(圧電素子等)を測定液中において共振せしめ、該共振周波数値より低い低周波数値(半値周波数 f_1) 或いは同共振周波数値より高い高周波数値(半値周波数 f_2) の何れか一方と、共振周波数の差から粘性値(粘度)を測定する方法が開示されている。

30

【0003】

他方特許文献 2 には、測定液内における検液子の振動から液体固有の粘弾性に起因して変化する周波数と振幅を検出し、該周波数と振幅から液体のインピーダンスを求め、該インピーダンスの実数部及び虚数部から粘性値と弾性値を求める液体の粘弾性測定法が開示されている。

40

【特許文献 1】特許第 4 0 8 3 6 2 1 号公報

【特許文献 2】特許第 3 3 4 8 1 6 2 号公報

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0004】

然しながら上記特許文献 1 に係る粘度測定法は、半値周波数 f_1 或いは同 f_2 の一方と共振周波数の差から液体のインピーダンスの実数部を求めることにより粘性値を測定する発明であり、この発明の如くインピーダンスの実数部のみを用いる測定法では複素粘性の実数部のみしか求めることができず、そのため粘弾性の高い測定液の粘性値を正確に測定できないばかりか、液体の力学的特性を把握する上で必要な粘性値と弾性値の双方を測定することは不能である。

50

【 0 0 0 5 】

他方特許文献 2 の如く液体固有の粘弾性に起因する周波数と振幅から液体のインピーダンスを求める測定法では、即ち実数部を振幅に比例したセンサー出力電圧の逆数として捉える測定法では、測定液の粘度が高くなると振幅が小さくなるため、測定精度が悪化するという問題点を有している。

【課題を解決するための手段】

【 0 0 0 6 】

本発明は測定液の粘弾性を適切に測定でき、更には該粘弾性から粘性又は弾性を適切に把握できるようにした液体の粘性又は / 及び弾性測定法を提供するものである。

【 0 0 0 7 】

10

本発明は第一の測定法として、測定液内に浸着した検液子を圧電素子等から成る振動子の駆動源で振動せしめ、又は振動子そのものを検液子として測定液中に浸着し振動せしめることにより測定液の粘性値又は / 及び弾性値を測定する測定法において、上記検液子の測定液内振動における振幅特性曲線上の共振周波数値 (f_0) と、同振幅特性曲線上の共振周波数値 (f_0) より低い低周波数値 (f_1) と、同振幅特性曲線上の共振周波数値 (f_0) より高い高周波数値 (f_2) の 3 つの周波数値を測定し、測定液のインピーダンスの実数部を上記高周波数値 (f_2) と低周波数値 (f_1) を用いて演算すると共に、測定液のインピーダンスの虚数部を上記共振周波数値 (f_0) を用いて演算し、該インピーダンスの実数部と虚数部から測定液の粘性値又は / 及び弾性値を算出する方法を採る。

【 0 0 0 8 】

20

又本発明は第二の測定法として、上記検液子の測定液内振動における振幅特性曲線上の共振周波数値 (f_0) と、同振幅特性曲線上の共振周波数値 (f_0) より低い低周波数値 (f_1) と、同振幅特性曲線上の共振周波数値 (f_0) より高い高周波数値 (f_2) の 3 つの周波数値を測定し、測定液のインピーダンスの実数部と虚数部を上記共振周波数値 (f_0) と低周波数値 (f_1) と高周波数値 (f_2) の 3 つの周波数値を用いて演算し、該インピーダンスの実数部と虚数部から測定液の粘性値又は / 及び弾性値を算出する方法を採る。

【 0 0 0 9 】

好ましくは、上記低周波数値 (f_1) と高周波数値 (f_2) として、上記測定液内振動における位相角特性曲線上の共振点に対して対称の位相角における周波数を用いる。

30

【発明の効果】

【 0 0 1 0 】

本発明によれば、共振周波数値 (f_0) と低周波数値 (f_1) と高周波数値 (f_2) とを用い、インピーダンスの実数部と虚数部を求める上記測定法により、測定液が高粘度である場合でも、その粘弾性を的確に測定でき、更には該粘弾性から粘性又は弾性を的確に把握できる。

【発明を実施するための最良の形態】

【 0 0 1 1 】

以下、本発明を実施するための最良の形態を図 1 乃至図 4 に基づき説明する。

図 1 における G 1 は測定液中において振動する検液子 1 の振動周波数に対する振幅の遅れ角、即ち位相角の特性曲線である。

40

【 0 0 1 2 】

これに対し G 2 は同検液子 1 を空気中で振動させた場合の振動周波数に対する振幅の遅れ角、即ち位相角の特性曲線である。

【 0 0 1 3 】

図 2 における G 3 は測定液中で振動する検液子 1 の振動周波数に対する振幅の特性曲線である。

【 0 0 1 4 】

これに対し G 4 は同検液子 1 を空気中で振動させた場合の振動周波数に対する振幅の特性曲線である。

50

【 0 0 1 5 】

図 1 の位相角特性曲線 G 1 , G 2 における f_0 , f_1 , f_2 は、位相角 90° 、 $90^\circ - d$ 、 $90^\circ + d$ の夫々における周波数を示し、 f_0 は共振周波数、 f_1 は同共振周波数より低い周波数、 f_2 は同共振周波数より高い周波数である。

【 0 0 1 6 】

$-d$ は 90° からの減角度であり、 $+d$ は 90° からの増角度であり、例えば 90° に対し対称点にある 45° の角度を意味し、この場合、 $90^\circ - d = 45^\circ$ 、 $90^\circ + d = 135^\circ$ となる。

【 0 0 1 7 】

f_1 , f_2 は測定液内振動における位相角特性曲線上の共振点に対して対称の位相角における周波数であるものを適例として用いる。

10

【 0 0 1 8 】

これに対し図 2 の振幅特性曲線 G 3 , G 4 における f_0 , f_1 , f_2 は、上記位相角特性曲線 G 1 , G 2 の f_0 , f_1 , f_2 に対応する、同振幅特性曲線上の周波数であり、 f_0 は共振周波数、 f_1 は同共振周波数より低い周波数、 f_2 は同共振周波数より高い周波数である。

【 0 0 1 9 】

本発明に係る検液子 1 の振動装置としては、図 4 に示すように、測定液外で駆動される圧電素子又は電磁駆動装置から成る駆動源 2 の振動を振動伝達軸 3 を介して検液子 1 を振動（共振）させるもの、或いは前記特許文献 1 に示すように、圧電素子から成る振動子そのものを検液子 1 として測定液中に浸着して振動させるものの何れかである。

20

【 0 0 2 0 】

又図 3 に示すように、前者の検液子 1 内に圧電素子から成る駆動源 2 を内蔵し、検液子 1 を測定液中において振動せしめる場合を含む。

そして上記検液子 1 の振動モードとしては、図 3 A に示すように、軸線を中心に円方向振動させるもの、図 3 B に示すように、測定液中において横方向に振動させるもの等が用いられる。

【 0 0 2 1 】

本発明は上記の如く測定液内に振動子にて振動される検液子 1 を浸着し、測定液の粘性値又は η 及び弾性値を測定する測定法に係わり、その第一の測定法は、上記検液子 1 の測定液内振動における位相角特性曲線（図 1 の G 1）及び振幅特性曲線（図 2 の G 3）上の共振周波数値 f_0 と、同振幅特性曲線上の共振周波数値 f_0 より低い低周波数値 f_1 と、同振幅特性曲線上の共振周波数値 f_0 より高い高周波数値 f_2 の 3 つの周波数値を測定し、測定液のインピーダンスの実数部を上記高周波数値 f_2 と低周波数値 f_1 を用いて演算すると共に、測定液のインピーダンスの虚数部を上記共振周波数値 f_0 を用いて演算し、該インピーダンスの実数部と虚数部から測定液の粘性値又は η 及び弾性値を算出する。

30

【 0 0 2 2 】

又本発明に係る第二の測定法は、上記検液子 1 の測定液内振動における振幅特性曲線上の共振周波数値 f_0 と、同振幅特性曲線上の共振周波数値 f_0 より低い低周波数値 f_1 と、同振幅特性曲線上の共振周波数値 f_0 より高い高周波数値 f_2 の 3 つの周波数値を測定し、測定液のインピーダンスの実数部と虚数部を上記共振周波数値 f_0 と低周波数値 f_1 と高周波数値 f_2 の 3 つの周波数値を用いて演算し、該インピーダンスの実数部と虚数部から測定液の粘性値又は η 及び弾性値を算出する。

40

【 0 0 2 3 】

望ましくは前記の通り、上記低周波数値 f_1 と高周波数値 f_2 として、上記測定液内振動における位相角特性曲線 G 1 上の共振点に対して対称点に存する位相角における周波数を用いる。

【 0 0 2 4 】

換言すると、低周波数値 f_1 と高周波数値 f_2 として、上記測定液内振動における振幅特性曲線 G 3 上の共振点に対して同一振幅レベルに存する対称点における周波数を用いる

50

。

【 0 0 2 5 】

図 1、図 2 における位相角特性曲線 G 1 と G 2 の対比、並びに振幅特性曲線 G 3 と G 4 の対比から理解されるように、測定液中の共振周波数値 f_0 は空気中の同 f_0 より低周波になり、測定液中の高周波数値 f_2 と低周波数値 f_1 の差は空気中の同 f_2 と f_1 の差より大きくなる。

【 0 0 2 6 】

即ち、測定液の粘性が大きくなる程、共振周波数値 f_0 はより低周波側に移り、高周波数値 f_2 と低周波数値 f_1 の差はより大きくなる。

【 0 0 2 7 】

以下、本発明に係る上記第一、第二の液体の粘性又はノ及び弾性測定法を以下に述べる数式 1 乃至数式 4 7 を用いて更に説明する。

【 0 0 2 8 】

駆動信号に対する振動振幅の遅れを位相角 d_0 , d_1 , d_2 とする。 f_0 は共振点であるために $d_0 = 90$ 度である。 f_1 , f_2 において、 $d_1 = 90$ 度 - d 、 $d_2 = 90$ 度 + d とし、 f_0 , f_1 , f_2 の角周波数を ω_0 , ω_1 , ω_2 とする。 $\omega = 2\pi f$ である。

【 0 0 2 9 】

空気中における f_0 , f_1 , f_2 における角周波数を夫々 ω_{00} , ω_{01} , ω_{02} とする。 ω_{00} , ω_{01} , ω_{02} は図 3 , 図 4 に示した振動装置固有の値であり、予め測定し、振動装置に設けてある処理装置のメモリー内に記憶させた定数である。処理装置は演算機能を持つ。

【 0 0 3 0 】

粘度 η 、密度 ρ の液体を検液子 1 により検液子 1 の共振角周波数 ω_0 数で振動させる。測定液の振動速度 v と測定液により発生する抵抗力 F の比、 F/v を測定液のインピーダンス Z と呼ぶ。

【 0 0 3 1 】

測定液に伝播する波動の振動速度 v を波動方程式の解として求めることができる。平面波近似で求めた振動速度 v により測定液のインピーダンス Z は数式 1 のように求めることができる。ここで S は検液子 1 の表面積に比例する定数であり、 j は虚数符号である。

【 数 1 】

$$Z = S \cdot \sqrt{j\omega \cdot \rho \cdot \eta}$$

【 0 0 3 2 】

上記数式 1 を ω_0 の近傍でマクローリン展開してインピーダンス Z を ω_0 で表すと、 ω_1 , ω_2 が ω_0 のごく近くにある時、測定液のインピーダンス Z は数式 2 となる。

【 数 2 】

$$Z = S \cdot \sqrt{j\omega_0 \cdot \rho \cdot \eta}$$

【 0 0 3 3 】

ω_1 , ω_2 が ω_0 と大きく異なっている時、測定液のインピーダンス Z は数式 3 となる。 ω は ω_0 , ω_1 , ω_2 の何れかである。

【 数 3 】

$$Z = S \cdot \sqrt{j\omega_0 \cdot \rho \cdot \eta} \cdot \frac{\omega + \omega_0}{2 \cdot \omega_0}$$

【 0 0 3 4 】

測定液が粘弾性体の時、測定液の粘度 η は複素数となり、数式 4 のように表すことができる。

10

20

30

40

【数 4】

$$\eta = \eta' - j \cdot \eta''$$

$$= \sqrt{\eta'^2 + \eta''^2} \cdot e^{-j\delta}$$

【0035】

複素粘度の位相角 δ を数式 5 のように定義する。

【数 5】

$$\tan \delta = \frac{\eta''}{\eta'}$$

10

【0036】

又複素粘度の絶対値 η_1 を数式 6 のように定義する。

【数 6】

$$\sqrt{\eta'^2 + \eta''^2} = \eta_1$$

【0037】

η_1 により数式 4 は数式 7 のように表すことができる。

【数 7】

$$\eta = \eta_1 \cdot e^{-j\delta}$$

20

【0038】

数式 1 乃至数式 7 は、第一と第二の液体の粘性又は η 及び弾性測定法に共通である。以下、数式 8 乃至数式 29 を用いて第一の測定法におけるインピーダンス Z の実数部 R と虚数部 X の演算について説明する。

【0039】

ω_1 , ω_2 が ω_0 のごく近傍の時、即ち 3 つの測定値における測定液のインピーダンス Z が略同一と見なされる時、該インピーダンス Z は数式 7 を数式 2 に代入して数式 8 , 数式 9 が求まる。

【数 8】

$$Z = S \cdot \sqrt{j\omega_0 \cdot \rho \cdot \eta_1} \cdot e^{-j\delta}$$

30

【数 9】

$$= S \cdot \sqrt{\omega_0 \cdot \rho \cdot \eta_1} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\delta}{2}\right) + j \cdot S \cdot \sqrt{\omega_0 \cdot \rho \cdot \eta_1} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\delta}{2}\right)$$

【0040】

インピーダンス Z の実数部 R と虚数部 X を数式 10 , 数式 11 で定義すると、インピーダンス Z は数式 12 のように表すことができる。

【数 10】

$$R = S \cdot \sqrt{\omega_0 \cdot \rho \cdot \eta_1} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\delta}{2}\right)$$

40

【数 11】

$$X = S \cdot \sqrt{\omega_0 \cdot \rho \cdot \eta_1} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\delta}{2}\right)$$

【数 12】

$$Z = R + j \cdot X$$

【0041】

50

検液子 1 の慣性モーメントを M 、捩れバネ常数を K 、捩れバネ常数の内部抵抗を r とする。

【 0 0 4 2 】

この検液子 1 を空気中で駆動力 $F = F_0 \cdot e^{j\omega t}$ で駆動した時、検液子 1 の変位を $\chi = \chi_0 \cdot e^{j\omega t}$ とする。変位は数式 1 3 に示す振動方程式で表すことができる。

【 数 1 3 】

$$-\omega^2 \cdot M \cdot x_0 + j \cdot \omega \cdot r \cdot x_0 + K \cdot x_0 = F_0$$

【 0 0 4 3 】

検液子 1 を測定液中に浸着すると、測定液のインピーダンス Z の実数部 R と虚数部 X は該振動装置に対して夫々抵抗の増加及び慣性モーメントの増加として作用する。 10

【 0 0 4 4 】

即ち内部抵抗 r と慣性モーメント M は夫々 $r + R$ 及び $M + X / \omega$ となり、数式 1 3 は数式 1 4 となる。

【 数 1 4 】

$$-\omega^2 \cdot \left(M + \frac{X}{\omega} \right) \cdot x_0 + j \cdot \omega \cdot (r + R) \cdot x_0 + K \cdot x_0 = F_0$$

【 0 0 4 5 】

数式 1 4 を変形して、検液子 1 の運動の駆動力 F に対する伝達関数 χ_0 / F_0 は数式 1 5 のように表現できる。 20

【 数 1 5 】

$$\frac{x_0}{F_0} = \frac{1}{-\omega^2 \cdot \left(M + \frac{X}{\omega} \right) + K + j \cdot \omega \cdot (r + R)}$$

【 0 0 4 6 】

$\omega_0^2 = K / M$ とおいて数式 1 5 の分母を有理化すると、数式 1 6 となる。

【 数 1 6 】

$$\begin{aligned} \frac{x_0}{F_0} &= \frac{1}{M} \cdot \frac{1}{\omega_0^2 - \omega^2 \cdot \left(1 + \frac{X}{\omega \cdot M} \right) + j \cdot \omega \cdot \frac{r + R}{M}} \\ &= \frac{1}{M} \cdot \frac{\omega_0^2 - \omega^2 \cdot \left(1 + \frac{X}{\omega \cdot M} \right) - j \cdot \omega \cdot \frac{r + R}{M}}{\left\{ \omega_0^2 - \omega^2 \cdot \left(1 + \frac{X}{\omega \cdot M} \right) \right\}^2 + \left(\omega \cdot \frac{r + R}{M} \right)^2} \end{aligned}$$

【 0 0 4 7 】

駆動力に対する検液子 1 の運動の遅れを表す位相角を D とする。 $\tan D$ は数式 1 7 となる。 40

【 数 1 7 】

$$\tan D = \frac{\omega \cdot \frac{r + R}{M}}{\omega_0^2 - \omega^2 \cdot \left(1 + \frac{X}{\omega \cdot M} \right)}$$

【 0 0 4 8 】

D を図 1 に示す位相角特性曲線における d_1 , d_2 , d_0 の 3 つの点の位相角とする。この 3 点の角周波数は夫々 ω_1 , ω_2 , ω_0 であるので、 (d_1, ω_1) 、 (d_2, ω_2) 、 (d_0, ω_0) となる。 50

ω_2)、 (d_0, ω_0) の 3 つの組で表される 3 つの式が数式 18 , 数式 19 , 数式 20 のようになる。

【数 18】

$$\tan d_1 = \frac{\omega_1 \cdot \frac{r+R}{M}}{\omega_{00}^2 - \omega_1^2 \cdot \left(1 + \frac{X}{\omega_1 \cdot M}\right)}$$

【数 19】

$$\tan d_2 = \frac{\omega_2 \cdot \frac{r+R}{M}}{\omega_{00}^2 - \omega_2^2 \cdot \left(1 + \frac{X}{\omega_2 \cdot M}\right)}$$

10

【数 20】

$$\omega_{00}^2 - \omega_0^2 \cdot \left(1 + \frac{X}{\omega_0 \cdot M}\right) = 0$$

【0049】

$d_1 = 90 - d$ 、 $d_2 = 90 + d$ であるので、 $\tan d_1 = \cot d$ 、 $\tan d_2 = -\cot d$ である。ここで $\cot d = 1/C$ と置く。このCを用いて数式18, 数式19, 数式20を書き換えると数式21, 数式22, 数式23となる。

20

【数 21】

$$\omega_{00}^2 - \omega_1^2 - \frac{X}{M} \cdot \omega_1 = C \cdot \omega_1 \cdot \frac{r+R}{M}$$

【数 22】

$$\omega_{00}^2 - \omega_2^2 - \frac{X}{M} \cdot \omega_2 = -C \cdot \omega_2 \cdot \frac{r+R}{M}$$

30

【数 23】

$$\omega_{00}^2 - \omega_0^2 - \frac{X}{M} \cdot \omega_0 = 0$$

【0050】

数式21, 数式22より数式24が得られる。

【数 24】

$$\omega_{00}^2 \cdot (\omega_2 - \omega_1) - (\omega_1^2 \cdot \omega_2 - \omega_1 \cdot \omega_2^2) = 2 \cdot C \cdot \omega_1 \cdot \omega_2 \cdot \frac{r+R}{M}$$

40

【0051】

数式24より $r + R / M$ が数式25のように求まる。

【数 25】

$$\frac{r+R}{M} = \frac{(\omega_2 - \omega_1) \cdot (\omega_{00}^2 + \omega_1 \cdot \omega_2)}{2 \cdot C \cdot \omega_1 \cdot \omega_2}$$

【0052】

又数式23より X / M が数式26のように求まる。

【数 2 6】

$$\frac{X}{M} = \frac{\omega_{00}^2 - \omega_0^2}{\omega_0}$$

【0 0 5 3】

空気中においては ω_1 、 ω_2 、 ω_0 は夫々既知の常数 ω_{01} 、 ω_{02} 、 ω_{00} であり、振動装置から得られる信号を処理する処理装置のメモリー内に記憶させておく。

【0 0 5 4】

空気中では $R = 0$ 、 $X = 0$ であるので数式 2 5 は数式 2 7 となる。

【数 2 7】

10

$$\frac{r}{M} = \frac{(\omega_{02} - \omega_{01}) \cdot (\omega_{00}^2 + \omega_{01} \cdot \omega_{02})}{2 \cdot C \cdot \omega_{01} \cdot \omega_{02}}$$

【0 0 5 5】

数式 2 7 より明らかなように、 r / M は既知の常数である。数式 2 7 の r / M を用いると、実数部 R と虚数部 X を数式 2 8、数式 2 9により求めることができる。

【数 2 8】

$$R = \frac{M}{2 \cdot C} \cdot \frac{(\omega_2 - \omega_1) \cdot (\omega_{00}^2 + \omega_1 \cdot \omega_2)}{\omega_1 \cdot \omega_2} - r$$

20

【数 2 9】

$$X = M \cdot \frac{(\omega_{00} - \omega_0) \cdot (\omega_{00} + \omega_0)}{\omega_0}$$

【0 0 5 6】

以下、数式 3 0 乃至数式 3 3 を用いて第二の測定法におけるインピーダンス Z の実数部 R と虚数部 X の演算について説明する。

【0 0 5 7】

30

ω_1 、 ω_2 が ω_0 から大きく異なっている時、測定液のインピーダンス Z は数式 3 のように表される。装置の内部抵抗 r は充分小さく、無視できると考えられるので、数式 2 1、数式 2 2 は数式 3 0、数式 3 1 となる。

【数 3 0】

$$\omega_{00}^2 - \omega_1^2 - \frac{X}{M} \cdot \omega_1 \cdot \frac{\omega_1 + \omega_0}{2 \cdot \omega_0} = C \cdot \omega_1 \cdot \frac{\omega_1 + \omega_0}{2 \cdot \omega_0} \cdot \frac{R}{M}$$

【数 3 1】

$$\omega_{00}^2 - \omega_2^2 - \frac{X}{M} \cdot \omega_2 \cdot \frac{\omega_2 + \omega_0}{2 \cdot \omega_0} = -C \cdot \omega_2 \cdot \frac{\omega_2 + \omega_0}{2 \cdot \omega_0} \cdot \frac{R}{M}$$

40

【0 0 5 8】

数式 3 0、数式 3 1 より、実数部 R と虚数部 X は数式 3 2、数式 3 3 と求まる。

【数 3 2】

$$R = M \cdot \frac{\omega_{00} \cdot (\omega_2 - \omega_1) \cdot \{\omega_{00}^2 + \omega_1 \cdot \omega_2 + \omega_0 \cdot (\omega_1 + \omega_2)\}}{C \cdot \omega_1 \cdot \omega_2 \cdot (\omega_1 + \omega_2) \cdot (\omega_2 + \omega_0)}$$

【数 3 3】

$$X = M \cdot \frac{\omega_0^2 \cdot (\omega_1 + \omega_2) + 2 \cdot \omega_0^2 \cdot \omega_0 - \omega_1 \cdot \omega_2 \cdot (\omega_1 + \omega_2) - \omega_0^2 \cdot (\omega_1^2 + \omega_2^2)}{C \cdot \omega_1 \cdot \omega_2 \cdot (\omega_1 + \omega_2) \cdot (\omega_2 + \omega_0)}$$

【0 0 5 9】

以上に述べたように、第一の測定法においては測定液中で検液子 1 を振動させ、3 つの位相差 d_1 , d_2 , d_0 における 3 つの角周波数 ω_1 , ω_2 , ω_0 を測定し、上記処理装置によって測定液のインピーダンス Z の実数部 R を高周波数値 f_2 と低周波数値 f_1 を用いて数式 2 8 により演算し、測定液のインピーダンス Z の虚数部 X を共振周波数値 f_0 を用いて数式 2 9 により演算する。

10

【0 0 6 0】

又第二の測定法においては、測定液のインピーダンス Z の実数部 R 及び虚数部 X を、高周波数値 f_2 と低周波数値 f_1 と共振周波数値 f_0 を用いて数式 3 2 及び数式 3 3 により演算する。

【0 0 6 1】

以下、数式 2 8 , 数式 2 9 に基づき求められた実数部 R と虚数部 X から、液体の粘性又は / 及び弾性を測定する第一の測定法を数式 3 4 乃至数式 4 0 を用いて説明する。

【0 0 6 2】

数式 1 0 及び数式 1 1 から複素粘度の位相角 δ を数式 3 4 により演算する。

【数 3 4】

20

$$\delta = \frac{\pi}{2} - 2 \cdot \arctan\left(\frac{X}{R}\right)$$

【0 0 6 3】

又数式 1 0 , 数式 1 1 より $R^2 + X^2 = S^2 \cdot \omega_0 \cdot \rho \cdot \eta_1$ なので、数式 2 8 , 数式 2 9 で求めた R , X を用いて、複素粘度の絶対値 η_1 を数式 3 5 により演算する。

【数 3 5】

$$\eta_1 = \frac{R^2 + X^2}{S^2 \cdot \omega_0 \cdot \rho}$$

30

【0 0 6 4】

数式 3 4 より求まる複素粘度の位相角 δ 及び数式 3 5 より求まる複素粘度の絶対値 η_1 より、複素粘度 η を数式 3 6 により演算する。

【数 3 6】

$$\begin{aligned} \eta &= \eta_1 \cdot e^{-j\delta} \\ &= \eta_1 \cdot \cos \delta - j \cdot \eta_1 \cdot \sin \delta \\ &= \eta' - j \cdot \eta'' \\ &= \eta' - j \cdot \frac{G'}{\omega_0} \end{aligned}$$

40

【0 0 6 5】

数式 3 6 から複素粘度 η の実数部 η' を数式 3 7 により演算する。

【数 3 7】

$$\eta' = \eta_1 \cdot \cos \delta$$

【0 0 6 6】

複素粘度 η の虚数部 η'' を数式 3 8 により演算する。

【数 3 8】

$$\eta'' = \eta_l \cdot \sin \delta$$

【0 0 6 7】

複素弾性率 G の実数部 G' を数式 3 9 により演算する。

【数 3 9】

$$G' = \omega_0 \cdot \eta_l \cdot \sin \delta$$

【0 0 6 8】

複素弾性率 G の虚数部 G'' を数式 4 0 により演算する。

10

【数 4 0】

$$G'' = \omega_0 \cdot \eta_l \cdot \cos \delta$$

【0 0 6 9】

以下、数式 3 2 , 数式 3 3 に基づき求められた実数部 R と虚数部 X から、液体の粘性又は / 及び弾性を測定する第二の測定法を数式 4 1 乃至数式 4 7 を用いて説明する。

【0 0 7 0】

インピーダンス Z が数式 3 で表される時も、共振周波数値におけるインピーダンス Z の実数部 R と虚数部 X は数式 1 0 及び数式 1 1 で表される。数式 1 0 及び数式 1 1 から複素粘度の位相角 δ を数式 4 1 により演算する。

20

【数 4 1】

$$\delta = \frac{\pi}{2} - 2 \cdot \arctan \left(\frac{X}{R} \right)$$

【0 0 7 1】

又数式 1 0 , 数式 1 1 より $R^2 + X^2 = S^2 \cdot \omega_0 \cdot \rho \cdot \eta_l$ なので、数式 3 2 , 数式 3 3 で求めた R , X を用いて複素粘度の絶対値 η_l を数式 4 2 により演算する。

【数 4 2】

$$\eta_l = \frac{R^2 + X^2}{S^2 \cdot \omega_0 \cdot \rho}$$

30

【0 0 7 2】

数式 4 1 より求まる複素粘度の位相角 δ 及び数式 4 2 より求まる複素粘度の絶対値 η_l より、複素粘度 η を数式 4 3 により演算する。

【数 4 3】

$$\begin{aligned} \eta &= \eta_l \cdot e^{-j\delta} \\ &= \eta_l \cdot \cos \delta - j \cdot \eta_l \cdot \sin \delta \\ &= \eta' - j \cdot \eta'' \\ &= \eta' - j \cdot \frac{G'}{\omega_0} \end{aligned}$$

40

【0 0 7 3】

数式 4 3 から複素粘度 η の実数部 η' を数式 4 4 により演算する。

【数 4 4】

$$\eta' = \eta_l \cdot \cos \delta$$

【0 0 7 4】

複素粘度 η の虚数部 η'' を数式 4 5 により演算する。

50

【数 4 5】

$$\eta'' = \eta_l \cdot \sin \delta$$

【0 0 7 5】

複素弾性率 G の実数部 G' を数式 4 6 により演算する。

【数 4 6】

$$G' = \omega_0 \cdot \eta_l \cdot \sin \delta$$

【0 0 7 6】

複素弾性率 G の虚数部 G'' を数式 4 7 により演算する。

10

【数 4 7】

$$G'' = \omega_0 \cdot \eta_l \cdot \cos \delta$$

【0 0 7 7】

以上の通り、上記検液子 1 の測定液内振動における位相角特性曲線（図 1 の G_1 ）及び振幅特性曲線（図 2 の G_3 ）上の共振周波数値 f_0 と、同振幅特性曲線上の共振周波数値 f_0 より低い低周波数値 f_1 と、同振幅特性曲線上の共振周波数値 f_0 より高い高周波数値 f_2 の 3 つの周波数値を測定し、測定液のインピーダンスの実数部を上記高周波数値 f_2 と低周波数値 f_1 を用いて演算すると共に、測定液のインピーダンスの虚数部を上記共振周波数値 f_0 を用いて演算し、該インピーダンスの実数部と虚数部から測定液の粘性値又は / 及び弾性値を算出する第一の測定法と、上記検液子 1 の測定液内振動における振幅特性曲線上の共振周波数値 f_0 と、同振幅特性曲線上の共振周波数値 f_0 より低い低周波数値 f_1 と、同振幅特性曲線上の共振周波数値 f_0 より高い高周波数値 f_2 の 3 つの周波数値を測定し、測定液のインピーダンスの実数部と虚数部を上記共振周波数値 f_0 と低周波数値 f_1 と高周波数値 f_2 の 3 つの周波数値を用いて演算し、該インピーダンスの実数部と虚数部から測定液の粘性値又は / 及び弾性値を算出する第二の測定法により、低粘度から高粘度の測定液まで幅広くその粘弾性を的確に測定でき、更には該粘弾性から粘性又は弾性を的確に把握できる。

20

【0 0 7 8】

よって、特許文献 1 の如くインピーダンスの実数部のみを用いる測定法における問題点、即ち複素粘性の実数部と虚数部を求めることができない、そのため粘弾性の高い測定液の粘性値を正確に測定できない、液体の力学的特性を把握する上で必要な粘性値と弾性値の双方を測定することは不能である等の問題点を有効に解決する。

30

【0 0 7 9】

又特許文献 2 の如く液体固有の粘弾性に起因する周波数と振幅から液体のインピーダンスを求める測定法、即ち実数部を振幅に比例したセンサー出力電圧の逆数として捉える測定法における、測定液の粘度が高くなると振幅が小さくなるため、測定精度が悪化するという問題点を有効に解決することができる。

【図面の簡単な説明】

【0 0 8 0】

40

【図 1】検液子を測定液内で振動させた場合の位相角特性曲線である。

【図 2】同振幅特性曲線である。

【図 3】A, B は測定液内に浸着される検液子内に駆動源を内蔵した振動装置における検液子の振動モードを夫々示す斜視図。

【図 4】測定液外に設けられた駆動源により検液子を振動させる振動装置とその振動モードを夫々示す斜視図

【符号の説明】

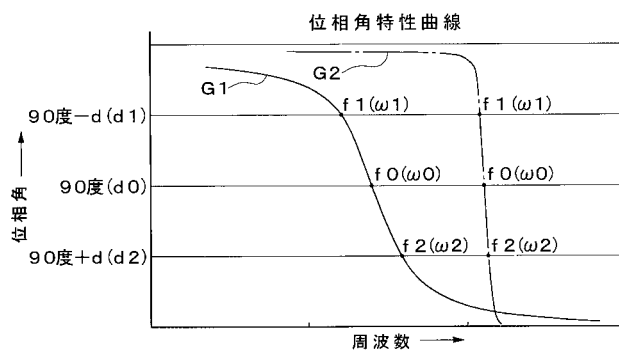
【0 0 8 1】

1 ... 検液子、2 ... 駆動源、3 ... 振動伝達軸、 f_0 ... 共振周波数値、 f_1 ... 共振周波数より低い低周波数値、 f_2 ... 共振周波数より高い高周波数値、 G_1 ... 空気中の位相特性曲線

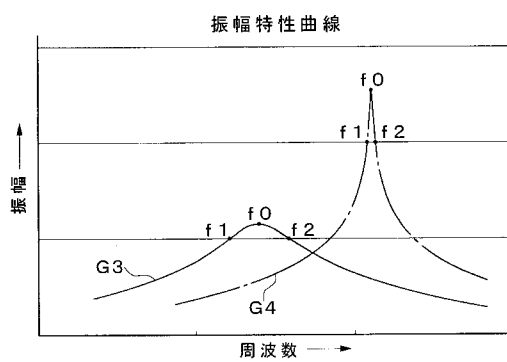
50

、G 2 ... 測定液中の位相特性曲線、G 3 ... 空気中の振幅特性曲線、G 4 ... 測定液中の振幅特性曲線。

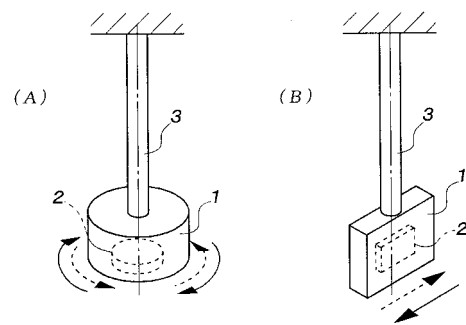
【 図 1 】



【 図 2 】



【 図 3 】



【 図 4 】

