

蒸気乾き度センシングシステムの開発

A Real-Time, Wide-Range Method of Measuring Steam Quality

アズビル株式会社
技術開発本部

五所尾 康博
Yasuhiro Goshō

アズビル株式会社
技術開発本部

西野 義一
Giichi Nishino

アズビル株式会社
技術開発本部

田邊 志功
Shiko Tanabe

キーワード

蒸気, 乾き度, 近赤外光, 吸収

乾き度の測定により、工場における加熱工程や、ビルの暖房で使用される蒸気の省エネルギー化を実現することができる。また、蒸気を噴霧し加熱や乾燥を行う製造工程においては、蒸気の乾き度が重要な製造パラメータとなる。本論文では、近赤外光吸収技術を用いて、リアルタイム・ワイドレンジの蒸気乾き度センサの開発を行ったので報告する。

Measuring steam quality can help to increase the efficiency of industrial heating processes and air-conditioning systems. Furthermore, in various industrial applications that use steam for heating or drying, slight changes in steam quality greatly affect the manufacturing process. This article reports on the development of a real-time wide-range steam quality sensor, which makes use of near-infrared light absorption technology.

1. はじめに

乾き度の測定により、水蒸気の熱エネルギーの損失割合を知ることが可能となる。様々な水蒸気エネルギーを使用する場において熱エネルギーの損失を防ぐための各種手法が成されているが、具体的な効果については、水蒸気の熱エネルギーの損失割合を計測する必要がある。また、鉄鋼業および化学メーカー間などの隣接事業間での水蒸気の熱エネルギー需給においても、熱エネルギーの損失割合を知る必要がある。乾き度は、近年の省エネ改正法施行に伴い厳密なエネルギー削減量を知ることが必須となるであろうことから重要な測定因子といえる。

また、熱エネルギーの損失割合以外にも各種製造プロセスにとって乾き度の測定は重要である。例えば食品業界⁽¹⁾では、蒸し料理に代表される蒸気で直接加熱する工程があり、またゴムの加硫工程も含め乾き度の制御が必要となる。

2. 乾き度とは

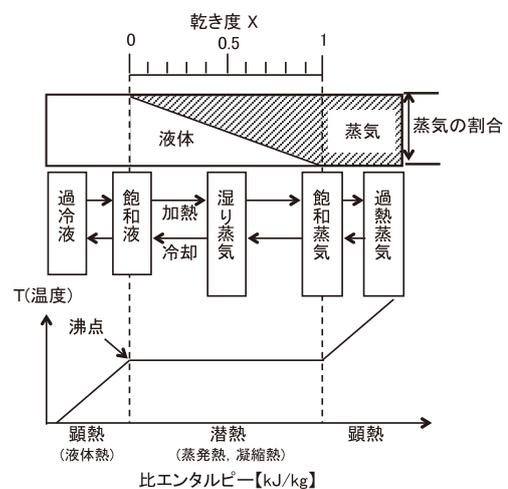


図1 乾き度の変化に伴う温度と比エンタルピー推移

乾き度と比エンタルピーの関係を図1に示す。水は沸点に達した後、比エンタルピー(単位質量あたりの熱エネルギー)

ギー)が上昇しても温度および圧力は全てが水蒸気になるまで一定である(図中の潜熱部に相当)。この時、水蒸気は気液二相が混在する湿り蒸気であり、この湿り蒸気全体に対する気相の蒸気の質量割合が乾き度である。従って、液体水が沸点に達し完全にガス化するまでの工程は潜熱増加領域であり、湿り蒸気の熱量を測る際、以下式より乾き度が分からない限り、比エンタルピーは求められない。

気相の水蒸気の質量を m_{vapor} 、液相の水の質量を m_{liquid} とすると、乾き度 x は次式で表される。

$$x = \frac{m_{vapor}}{m_{vapor} + m_{liquid}}$$

乾き度から湿り蒸気の比エンタルピー h を知ることができる。飽和水と飽和水蒸気の比エンタルピーを各々、 h' と h'' とし、次式で表される。

$$h = h'' \times x + h' \times (1 - x)$$

なお、 h' 、 h'' は蒸気の温度あるいは圧力が既知であれば蒸気表⁽²⁾より求められる。

3. 従来の乾き度計測方法

従来の乾き度計測方法(絞り熱量計)は、流路の一部に膨張タンクを繋ぎ、オリフィス板にて絞り、断熱膨張させることで過熱蒸気化させ、タンク内の圧力、温度より比エンタルピーを算出、断熱膨張前の比エンタルピーと等しいことから乾き度を算出する方法を利用したものである。

図2は絞り熱量計の概略図である。

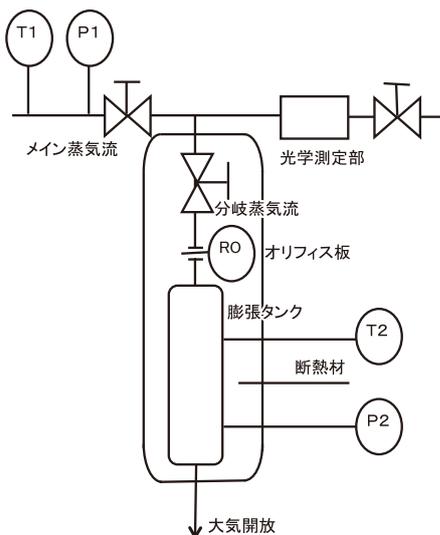


図2 絞り熱量計概略図

メイン蒸気流は分岐され、断熱膨張しメイン蒸気流の持つ比エンタルピーはそのまま保持される。膨張タンク内は過熱蒸気化し、同じ比エンタルピーを示す。

$$h = h'' \times x + h' \times (1 - x) = h_{heat} [(T2), (P2)]$$

h_{heat} は膨張タンク内の比エンタルピーである。この h_{heat} は蒸気表⁽²⁾(温度 $T2$ 、圧力 $P2$)より求められる。上式より、乾き度 x は次式で表される。

$$x = \frac{h_{heat} - h'}{h'' - h'}$$

この絞り熱量計の場合、大きな膨張タンクを有するため、過渡状態においては膨張タンクの温度が安定するまで測定できず、リアルタイムな測定ができないことおよび絞り時の圧力損失による精度低下、様々な様態を成す二相流を安定してオリフィスより取り出すことが困難などの課題があげられる。一般的にこの手法の場合、断熱膨張後に過熱蒸気にする必要があるため、0.9以下の乾き度は測定できない。⁽³⁾

また、測定時には蒸気を大気開放にて捨てることから、常時監視としての活用は不向きであり、無駄に蒸気を捨てずに、リアルタイムに精度よく乾き度を測定できる手法が求められている。

4. 測定原理

4.1 水と水蒸気の吸収波長について

図3⁽⁴⁾は水と水蒸気の吸光度を示したものである。

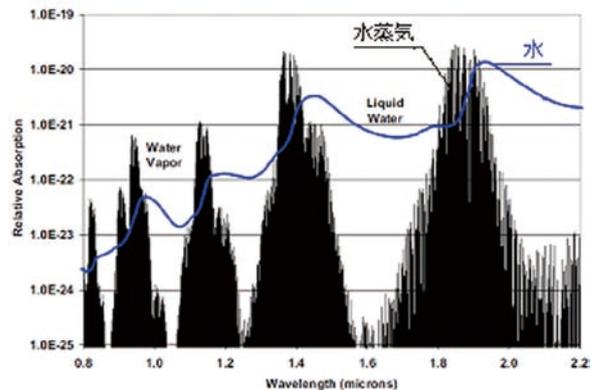


図3 水と水蒸気の吸光度比較

水と水蒸気では吸収波長が異なる。水と水蒸気の分子間相互作用の違いから、この様な結果となっている。気液二相の割合により水および水蒸気の吸光度の値が異なることを利用した、乾き度センシングシステムの開発を行った。

乾き度の測定は、光強度の測定から乾き度への変換まで、主に以下の4つのステップからなる。

- Step1. 蒸気の透過光強度測定
- Step2. 透過光強度を補正
- Step3. 補正した透過光強度を吸光度に変換
- Step4. 吸光度を乾き度に変換

詳細について以下に述べる。

4.2 透過光強度の測定と補正 (Step1,2)

Step1で蒸気の透過光強度を測定し、次のStep2でその透過光強度を補正する。Step2の詳細を以下に記す。基準光強度は設備固有の既知の値を用いる。

本測定装置の光源は水蒸気測定用、水測定用と補正用の3つの光源からなり、水蒸気測定用光源は水蒸気の吸光ピークのある波長帯のものを、水測定用光源は水の吸光ピークのある波長帯のものを、補正用光源は水蒸気や水を吸収しない波長帯のものを使用している。各光源で測定される光強度について、

基準光強度を I_{vapor0} , $I_{liquid0}$, I_{ref0}
 透過光強度を I_{vapor1} , $I_{liquid1}$, I_{ref1}
 補正光強度を I_{vapor1}' , $I_{liquid1}'$
 として補正光強度は次式で表される。

$$I_{vapor1}' = I_{vapor1} \times \left(\frac{I_{ref0}}{I_{ref1}} \right)$$

$$I_{liquid1}' = I_{liquid1} \times \left(\frac{I_{ref0}}{I_{ref1}} \right)$$

式 (1)

水の屈折や散乱の影響や、光学測定窓の汚れの影響を除去することが、この補正の目的である。

4.3 吸光度への変換方法 (Step3)

ランベルト・ベールの法則により、光の物質による吸光度 A は、基準光強度 I_0 、透過光強度 I_1 を用いて次式で表される。

$$A = -\ln \left(\frac{I_1}{I_0} \right) = \varepsilon \times C \times l$$

式 (2)

※ ε :モル吸光係数 C :モル濃度 l :光路長
 物質の吸光の概念図を図4に示す。

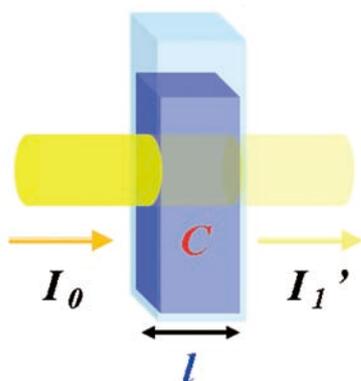


図4 物質の吸光の概念図

吸光度 A はモル濃度 C と光路長 l に比例するため、湿り蒸気内の気相の水蒸気成分と液相の水の成分の変化を捉えることができる。

水蒸気測定用光源と水測定用光源から得られる各吸光度 A_1 , A_2 は次式で表される。

$$A_1 = -\ln \left(\frac{I_{vapor1}'}{I_{vapor0}} \right)$$

$$A_2 = -\ln \left(\frac{I_{liquid1}'}{I_{liquid0}} \right)$$

式 (3)

4.4 乾き度への変換方法 (Step4)

通常、蒸気という場合、気相の水蒸気と液相の水が混合し共存状態にある湿り蒸気を指す。近赤外の波長領域800~2500nmにおいて気体蒸気と液体の水の吸光スペクトルは重なり合っている。

吸光スペクトルの概念図を図5に示す。

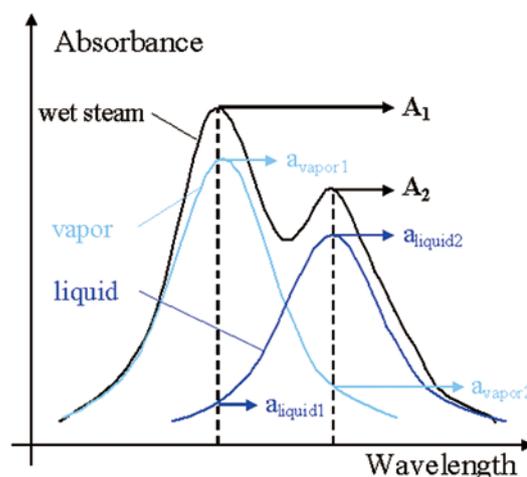


図5 吸光スペクトルの概念図

水蒸気測定用光源より得られる吸光度 A_1 の内、気体分の吸光度を a_{vapor1} 、液体分の吸光度を $a_{liquid1}$ とし、水測定用光源より得られる吸光度 A_2 の内、気体分の吸光度を a_{vapor2} 、液体分の吸光度を $a_{liquid2}$ として各々の吸光度は次式で表される。

$$A_1 = a_{vapor1} + a_{liquid1}$$

$$A_2 = a_{vapor2} + a_{liquid2}$$

式 (4)

湿り蒸気内の気相の水蒸気成分と液相の水の成分が変化した時、気体分と液体分の各スペクトルは相似的に変化するため次式で表される吸光度比は一定と見なせる。

$$\alpha = \frac{a_{vapor1}}{a_{vapor2}} \quad \beta = \frac{a_{liquid1}}{a_{liquid2}}$$

式 (5)

また、吸光度 a_{vapor2} , $a_{liquid2}$ は各々、気体と液体の質量(∞ モル濃度 \times 光路長)に比例する値であることから、乾き度 x は次式で表される。

$$x = \frac{m_{vapor}}{m_{vapor} + m_{liquid}} = \frac{a_{vapor2}}{a_{vapor2} + k \times a_{liquid2}}$$

式 (6)

※ k :モル吸光係数比

さらに式(4)と(5)を参照し、乾き度 x は測定より得られる吸光度 A_1, A_2 を用いた次式で表される。

$$x = \frac{A_1 - \beta \times A_2}{(1 - k) \times A_1 + (k \times a - \beta) \times A_2} \quad \text{式 (7)}$$

上記より得られる乾き度は、光吸収手法により直接気相の水蒸気と液相の水量を測定しているため、過渡状態においてもリアルタイムで測定することができる。

5. 蒸気実験設備

実験設備の外観を図6に示す。本設備で蒸気の圧力、流量、乾き度を制御し、各蒸気水準における透過光を測定する。



図6 蒸気実験設備の外観

5.1 設備の構成

蒸気実験設備の主な構成要素の一覧を表1に示す。

表1 蒸気実験設備の構成一覧

分類	対象	構成要素 (製品名・型番)
制御	圧力	バルブ1 New10-Ⅲ (ACT010)
	流量	バルブ2 New10-Ⅲ (ACT010)
	乾き度	セパレータ
		ヒータ
		冷却水配管
測定	圧力	圧力計 Bravolight (PTG60G)
	温度	温度計
	流量	蒸気流量計 1, 2 STEAMcube (MVC30A)
		蒸気流量計 1, 2 STEAMcube (MVC30A)
	乾き度	光学測定装置

蒸気実験設備の概念図を図7に示す。

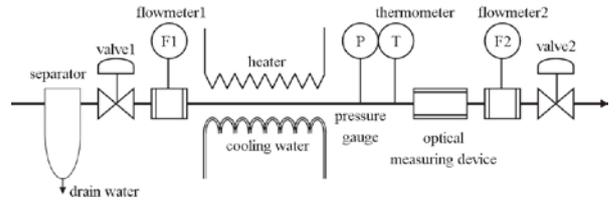


図7 蒸気実験設備の概念図

蒸気実験設備の制御部ではセパレータで湿り蒸気の液相分を除去した後、バルブ1, 2で蒸気の圧力と流量を制御し、ヒータあるいは冷却水配管で蒸気配管を加熱・冷却することで、蒸気の乾き度を制御する。

蒸気実験設備の測定部では制御された蒸気の圧力、温度及び流量を各々、圧力計、温度計と流量計で測定する。乾き度については流量計1, 2を用いた測定と光学測定装置を用いた測定を行う。

光学測定装置の外観を図8に示す。本装置を蒸気配管中のサイトグラス箇所に設置し、乾き度の測定を行う。



図8 光学測定装置の外観

光学測定箇所および装置の概念図を図9に示す。

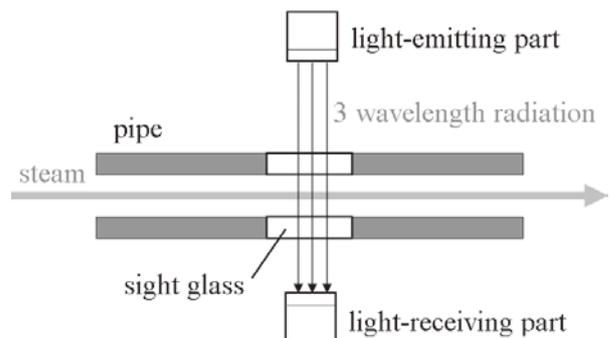


図9 光学測定箇所および装置の概念図

発光部からの3波長の光がサイトグラスおよび水蒸気を透過し、その透過光強度を受光部で測定する構成である。

本光学測定装置の大きさは、発光部・受光部共に約8cm角と小型で、蒸気配管のサイトグラス部分に外側より簡易に取り付け、光学調整を行うことができる設計となっている。

5.2 乾き度の指標

光学測定装置の測定値を評価するため、蒸気流量計の測定値から算出した値を乾き度の指標としている。

まず、セパレータによって蒸気流量計1の直前で液相分が除去されるため、この点における湿り蒸気の乾き度を1と見なすことができる。これ以降の配管移送中に蒸気の一部が凝縮し液相になるため、蒸気流量計2の測定値は小さくなる。

蒸気流量計1および蒸気流量計2の測定値を各々、 F_1 、 F_2 とすると乾き度 x は次式で表され、乾き度の指標とされている。

$$x = \frac{F_2}{F_1} \quad \text{式 (8)}$$

6. 実験結果

6.1 実験条件

蒸気の圧力、流量、乾き度を制御し、各蒸気水準において乾き度の測定を実施した。蒸気水準の一覧を表2に示す。

表2 蒸気水準の一覧

圧力 (MPa)	流量 (kg / hr)	乾き度
0.50	30	標準→冷却→加熱
	50	標準→冷却→加熱
	70	標準→冷却→加熱
0.75	30	標準→冷却→加熱
	70	標準→冷却→加熱

乾き度の制御に関し、「冷却」は乾き度制御部に設置した配管に冷却水を流すことで蒸気配管を冷却した状態を表し、「加熱」は乾き度制御部に設置したヒータで蒸気配管を加熱した状態を表す。「標準」は加熱も冷却もしていない状態を表す。乾き度の値は、「冷却」<「標準」<「加熱」となる。

尚、「加熱」の際は光学測定箇所において液相の水がなくなるまで配管の温度を上昇させているため、この状態における乾き度を1としている。また、一部の蒸気水準では、その再現性を確認するため繰返し測定を行った。

6.2 結果

実験結果を図10に示す。横軸は、蒸気流量の比から求めた乾き度 F_1/F_2 を表し、縦軸は、光学測定値から求めた乾き度を表す。

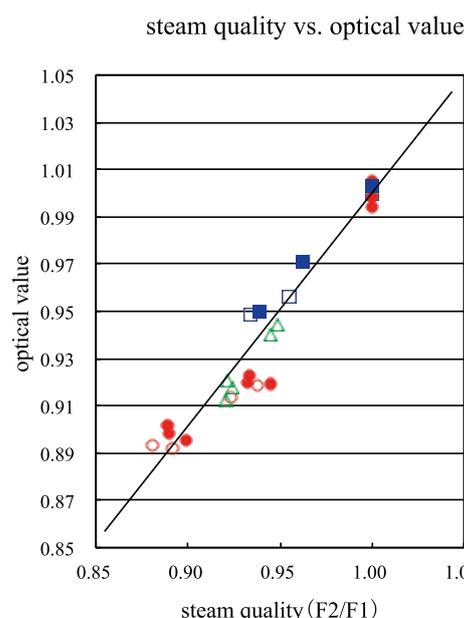


図10 実験結果

冷却水とヒータを用いて、蒸気の乾き度をおよそ0.9~1の範囲で制御し、乾き度指標と光学測定より求めた値との相関を確認した。その結果、標準偏差(σ)は、0.9%であった。

7. おわりに

乾き度のリアルタイム測定を実現するため、光学測定装置を開発し評価を行った。

その結果、乾き度指標と光学測定より求めた値の相関は、標準偏差(σ)0.9%であった。

今後、製品化に向けてエンジニアリングサンプルの製作を行い、お客さま先にてフィールド評価を実施する予定である。

<参考文献>

- (1) 高田敏則：食品業界における蒸気の有効利用技術，月刊食品機械装置，2006年12月
- (2) 日本機械学会：蒸気表，1999年，日本機械学会
- (3) エネルギー管理士受験準備通信講座テキスト(熱力学の基礎)第8刷，p.89，財団法人省エネルギーセンター
- (4) J.K.Partin & J.R.Davidson：Development of Optical Technologies for Monitoring Moisture and Particulate in Geothermal Steam，INL (Idaho National Laboratory)，2006年8月

<商標>

Bravolight, STEAMcube はアズビル株式会社の商標です。

<著者所属>

- 五所尾 康博 技術開発本部基幹技術開発部
 西野 義一 技術開発本部基幹技術開発部
 田邊 志功 技術開発本部基幹技術開発部