

平成 30 年 6 月 20 日現在

機関番号：24402

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06114

研究課題名(和文)高温高湿度の高度利用のための湿度測定法と精度評価技術に関する研究

研究課題名(英文) Humidity measurement and accuracy evaluation methods to improve the use of high-humidity hot air and superheated steam

研究代表者

伊與田 浩志 (Iyota, hiroyuki)

大阪市立大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：10264798

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：大気圧、沸点温度以上の湿り空気並びに過熱水蒸気を食品加工や乾燥時の熱風として利用するための技術向上のためには、湿度の計測が必要不可欠である。本研究では、湿度計の開発、精度の検証と校正に必要な、標準湿度の発生装置の構造提案と試作を行った。また、発生湿度の不確かさ解析を国際的なガイドラインであるGUMに基づいて行った。その結果、過熱水蒸気を含めた広範囲の湿度条件において高い精度で湿度を発生できることを示した。

研究成果の概要(英文)：Superheated steam or high-humidity air at temperatures higher than the boiling point of water are used as heating media in food heating appliances such as steamers and ovens. In this study, we developed a humidity generator to calibrate humidity measuring devices. The uncertainty of the generated humidity was evaluated based on GUM; the results indicate that our device has satisfactory accuracy and can be used as a calibration system for humidity sensors for high humidity and high temperature air, including superheated steam.

研究分野：乾燥工学，食品工学，熱工学，計測工学

キーワード：乾湿計 湿度計測 過熱水蒸気 湿度発生 湿度標準 不確かさ解析 蒸気流量計

1. 研究開始当初の背景

湿度の計測は、空調分野では快適で安全な生活環境を実現、あるいは、工業製品や農産物の保管や加工の際の品質安定化、品質向上のためには必要不可欠である。そのため、様々な計測方法が提案され、また、装置やデバイス開発が行われてきた。近年はMEMS技術を利用した100℃以上でも使用可能な安価な湿度センサやデバイスも自動車産業を中心に普及が進んでいる。

ところで、湿度の表現方法として、天気予報で使用されている相対湿度が一般的に知られている。一方、工業分野では、露点温度、絶対湿度、混合比、水蒸気モル分率など、多くの表現方法が用いられている。

湿度は、このように湿潤空気中に含まれている水蒸気の量を表すために用いられる概念であるが、空気を含まない水蒸気は、例えば発電所などで作動流体として用いられてきた。近年、沸点よりも温度の高い水蒸気(大気圧では100℃)の水蒸気は、農業・食品加工分野、材料開発など、様々な分野で「過熱水蒸気」と称して実用化あるいは利用研究が進められている。しかし、過熱水蒸気、あるいは、過熱水蒸気に少しの空気が混合されている高温かつ非常に高い湿度の空気に対して、湿度という概念がなじみにくく、測定に際しては計測装置(感湿部)の汚損の恐れがあること、計測精度が保障されている装置がないことなどから、高温高湿度の気体を対象とした計測は行われていなかった。

このような中で報告者らは、過熱水蒸気の食品加工や乾燥操作での利用技術の向上を目指して、湿度(空気の混合割合)の測定の必要性を指摘してきた。更に、水を含ませたガーゼ等の温度(湿球温度)を測定し、空気中に含まれる水蒸気の量(湿度)を測定する乾湿球湿度計を原理とした湿度測定法の実用性と精度検証を進めてきた。これまでに、気体中に置かれた湿った材料を用いて湿球温度を測定することで、300℃を超える高温域でも湿度が簡便に直接測定できることを示してきた。

一方、湿度を計測するための装置を開発する際に、測定値の精度を検証するための装置が必要不可欠である。

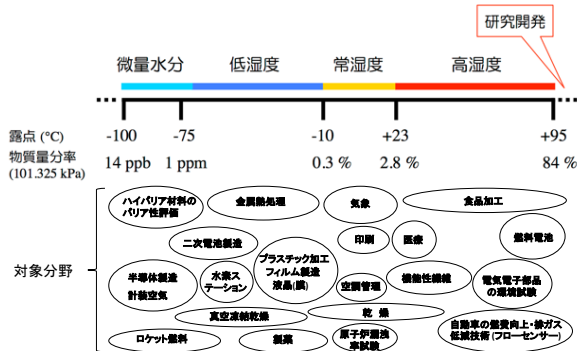


図1 湿度標準と提供範囲(NMIJ 提供)

しかし、現在、計測装置として最も重要な精度を確認するための基準器(湿度発生方法)について、過熱水蒸気までを含む発生方法がなく、図1に示すように、国家標準としても提供されていない。

2. 研究の目的

(1) 気体の最高温度 300℃、水蒸気モル分率が 0.01 (室内空気) - 1.0 (過熱水蒸気)、気圧までの湿度センサ校正用の湿度発生装置の開発を行う。特に高湿度域の湿度発生に適した、新たな方式の発生装置を提案・開発し、その有用性の検証を GUM に基づいて行う。

(2) 食品加工や乾燥装置の湿度計測においては、安価な測定装置が求められているため、乾湿計の原理を利用した測定法に注目し、湿球部分に多孔質セラミックスを用いて、また、信号処理には普及型の電子部品を用いた場合の測定値の精度検証を行う。加えて、市販されている MEMS 技術を利用した 125℃まで使用可能とされているデバイスの高温高湿度域での精度評価を行う。

(3) 過熱水蒸気の利用は、食品加工や農産物加工の分野で進んでおり、その際の加工条件として湿度は極めて重要なパラメータであるものの、手軽に利用できる計測装置が無い現状がある。これらの課題やニーズについて、湿度計測装置メーカーと、装置ユーザとの意見交換を実施して、高温高湿度域での湿度計測技術の確立を目指す取り組みを行い、ひいては、過熱水蒸気の利用技術の向上を目指す。その際、計測装置は、図2に示すように、湿度の国家標準と、湿度計測装置のユーザをつなぐ役割を担う。このような計測を取り巻く実情についても、標準と実際(現場)で関係者が共通の認識を持つための活動として研究会を開催する。

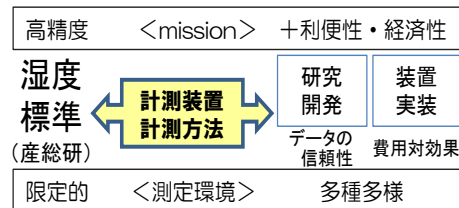


図2 標準と実際(現場)との関連と連携の必要性

3. 研究の方法

(1) 試作した湿度発生装置の概略を図3に示す。同方法では、高温空気と過熱水蒸気を混合することで標準湿度を発生させる方式である。同方法は、高湿度の湿度標準の発生に従来法に比べて装置構造、装置サイズ、コスト面で優位であると考えられることから、本研究により、過熱水蒸気混合法として新たに提案し、その開発に取り組んだ。

試作した装置の混合する高温空気生成と流量計測の方法について説明する。⑥コンプレッサから供給される除湿された圧縮空気を⑦レギュレータにより減圧し流量を任意の値に調節する。空気流量は測定レンジ 0.2 L/min–20 L/min (at 101.3 kPa, 0 °C) の⑧マスフローメータ(CMS0020, azbil 製)、または、並列に配置した測定レンジ 0.1 L/min–5 L/min (at 101.3 kPa, 0 °C) の⑨マスフローコントローラ(FCST1005, Fujikin)のいずれかを、必要な空気量に応じて選択し測定・制御する。空気流量計を通過した空気は⑩リボンヒータで 200 °C に加熱する。

過熱水蒸気については、産業用ボイラから供給される飽和蒸気を 3 台の②③④減圧弁で減圧し圧力を安定させながら流量を調節した後、⑩⑪⑫リボンヒータで加熱し、200 °C の過熱水蒸気をつくる。流量は、⑤差圧式流量計(自作)で測定する。この流量計の精度を GUM に基づいて秤量法により確認し、流量範囲 9 L/min–25 L/min (at 101.3 kPa, 200 °C) で、不確かさ 4.2–5.2 %R.D.を得た。

これらの高温空気と過熱水蒸気を混合後、所定の発生湿度  $T_{d,gen}[^{\circ}C]$  に調節された気流は、テストセクションに供給され、同時に⑭リボンヒータで所定の温度まで保温される。流量計、温度計、圧力計の各信号は、⑮データロガー(CADAC3, 江藤電気製)を介して、1 秒ごとに⑯PC に保存する。各流量から水蒸気モル分率を算出し、更に露点温度に変換して発生湿度  $T_{d,gen}$  を算出した。

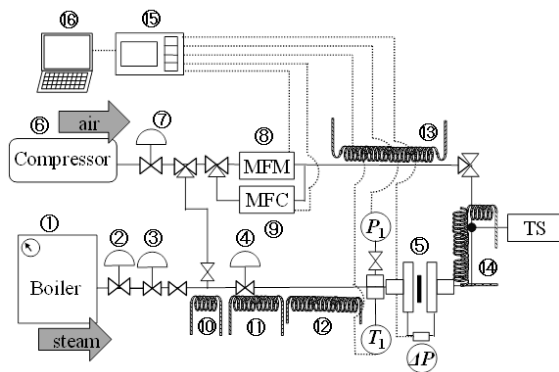


図3 水蒸気混合法による湿度発生装置の構造

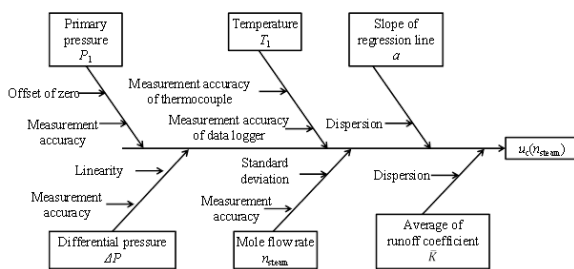


図4 不確かさの特性要因図の例

過熱水蒸気流量の不確かさ  $u_c(n_{steam})$  の特性要因図を図4に示す。

なお、本湿度発生装置設計時の発生露点の不確かさの目標値は、高温高湿度気流の利用例でよく挙げられる食品分野では 1 °C 刻みでの温度表現が行われていることから、± 0.5 °C とした。更に、95 °C までの発生露点の精度を確認するための比較試験として、校正済みの鏡面式露点計(抽気・冷却の装置を含む)を用いた。

(2)試験槽(Test Section)には、湿度計測のための装置として、医療用ガーゼと多孔質セラミックスをウィック(湿球)として用いた乾湿球湿度計、並びに、一般に市販されている湿度センサを取り付けて、高湿度域の測定精度についても比較し検証した。

#### 4. 研究成果

##### (1)水蒸気差圧式流量計

本研究で提案する水蒸気混合法による湿度発生装置の精度は、流量計の不確かさに強く依存する。その一方、少量の水蒸気の流量を測定するための装置は市販されていなかった。そこで、水蒸気を更に加熱して過熱水蒸気とし、単純形状のオリフィスを用いて差圧を発生させることができる差圧式流量計を製作した。秤量法を用いて流出係数の決定し、得られたデータ並びに流出係数をもとに GUM に基づいて差圧式流量計の指示値の不確かさを算出することができた。また、得られた結果から En 数を算出し、全ての条件で  $|En| < 1$  であることを確認した。

180 kPa までの加圧された過熱水蒸気の流量測定を行い、その指示値と凝縮秤量法により求められた流量は 1.8 % 以内で一致しており、不確かさの範囲内であった。

以上のことから、小流量の過熱水蒸気流量を測定するための装置と測定精度の検証方法を確立することができた。これまで、比較的少量の試験を行った範囲においては大気圧下でのみの流出係数の決定試験を行えばよく、加圧下での流出係数の決定試験を行う必要がないことを示した。

##### (2)湿度標準発生装置

精度 ± 0.5 °C、流量範囲 20 L/min (200 °C、101.3 kPa) 以上、気流温度 120 °C 以上で湿度の発生を行える湿度標準発生装置の設計と試作を行った。露点温度 60 °C – 95 °C の範囲では、S I トレサブルな国家標準により校正された鏡面冷却式露点計を用いて測定した標準湿度  $x_{std}$  と、湿度発生装置で発生させた湿度  $x_{gen}$  の比較を行った。比較の結果、 $x_{gen} - x_{std}$  の最大値は 0.0068 mol/mol であった。更に、今回行った試験の結果から GUM に基づく不確かさ評価を行い、発生湿度の拡張不確かさ  $U(x_{gen})$  を算出した。不確かさ評価の結果、 $U(x_{gen})$  の最大値は 0.0091 mol/mol であった。不確かさ評価で得られた結果から

En 数を算出し、全ての条件で  $|En| < 1$  であることを確認した。

露点温度 95℃以上においては秤量法により発生湿度の確認(比較)を行った。露点温度 95℃では、鏡面冷却式露点計、秤量法での測定値、発生湿度の三つの値を比較した。その結果、鏡面冷却式露点計の測定値と秤量法の測定値との比較結果より  $x_{samp} - x_{std}$  は 0.00049 mol/mol であり、よく一致していた。つぎに、95℃以上の秤量法の測定値と発生湿度の比較結果より、 $x_{samp} - x_{gen}$  の最大値は 0.014 mol/mol であった。なお、秤量法の測定結果の不確かさ評価を行った結果  $U(x_{samp})$  の最大値は 0.041 mol/mol であった。

### (3)湿度センサの精度評価

乾湿計に基づく測定装置、車載用で普及の進んでいる湿度センサを対象に、それぞれの測定値と発生湿度との比較を行った。気流温度 120℃、発生湿度 0.234 mol/mol - 1.0 mol/mol の例では、乾湿計による測定値と発生湿度の最大偏差は、 $x_{gen} = 0.873$  mol/mol の時 0.024 mol/mol であり、高湿度になるにつれ偏差が大きくなる傾向があった。市販の湿度センサによる最大偏差は、 $x_{gen} = 0.311$  mol/mol のとき、0.050 mol/mol であった。

### (4)今後の展望

本研究により、汎用の空気用流量計と過熱水蒸気用の差圧式流量計を使用することで、小型・安価で、高露点校正用の簡易湿度発生装置を開発できた。また、不確かさを評価する手法を示した。今後、流量計の精度向上や長期安定性の検証を行いながら、可搬性を有する簡便な湿度校正用の装置として開発を進める予定である。

湿度センサについては、今後も高温の水蒸気(過熱水蒸気)を利用する現場での湿度計測のニーズに対応するため、本学並びに計測器メーカー様と情報共有しながら、市場開拓と普及に寄与できればと考えている。研究期間の3年間で、3回の研究会を開催し、2(3)で示した取り組みを実施した。継続した開催の希望もあったために、引き続き開催できるように尽力したいと考えている。

本研究開発にあたって、3年間、多くの計測器メーカー、大学・公的研究機関の皆様にも多大な協力をいただいた。ここに改めて深く感謝の意を表す。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計1件)

- ① 伊與田浩志, Frontier of Measurement and Utilization of High Humidity over Boiling Point Temperature, 伝熱, 査読有, 56(237), 2017, 17-23, [http://www.htsj.or.jp/wp/media/2017\\_10.pdf](http://www.htsj.or.jp/wp/media/2017_10.pdf)

[学会発表] (計10件)

- ① 湯谷 智, 吉岡 秀矩, 伊與田 浩志, 阿部 恒, 高温高露点域の簡易湿度標準発生法に関する研究, 第78回応用物理学会秋季学術講演会, (2017・福岡)
- ② 北村祥太, 児玉飛翔, 伊與田浩志, 辻岡 哲夫, 産業用オープン庫内のワイヤレス加熱環境測定装置の開発, 日本食品工学会第18回(2017年度)年次大会, (2017・大阪)
- ③ H. Iyota, K.Miura, H. Yoshioka, T. Tsujioka, M. Tanaka, N. Uesugi, Development of Psychrometer using porous ceramic probe for improved utilization of superheated steam, Symposium on Temperature and Thermal Measurements in Industry and Science (TEMPMEKO 2016), (2016・Zakopane, Poland)
- ④ 伊與田浩志, 杉山久仁子, 山形純子, 三浦孝平, 水蒸気の凝縮を利用した食品加熱に関する研究, 第37回日本熱物性シンポジウム, (2016・岡山)
- ⑤ 湯谷 智, 三浦 孝平, 吉岡 秀矩, 伊與田 浩志, 辻岡 哲夫, 阿部 恒, 乾湿計の原理による沸点温度以上での湿度測定法(精度検証のための湿度発生装置の開発), 日本機械学会熱工学コンファレンス 2016(2016・松山)
- ⑥ 吉岡 秀矩, 伊與田 浩志, 三浦 孝平, 湯谷 智, 辻岡 哲夫, 阿部 恒, 乾湿計の原理による沸点温度以上での湿度測定法-湿度発生装置と測定精度の検討-, 第53回日本伝熱シンポジウム(2016・大阪)
- ⑦ 吉岡 秀矩, 伊與田 浩志, 三浦 孝平, 湯谷 智, 阿部 恒, 高温高湿度気流発生装置の試作と不確かさ評価, 日本機械学会関西支部第91期定時総会講演会(2016・大阪)
- ⑧ 湯谷 智, 三浦 孝平, 吉岡 秀矩, 伊與田 浩志, 阿部 恒, 空気一過熱水蒸気混合法による湿度発生装置の開発と不確かさ解析, 日本機械学会関西学生会平成27年度学生員卒業研究発表講演会(2016・大阪)

[産業財産権]

○出願状況(計1件)

名称: 湿度発生装置

発明者: 伊與田浩志

権利者: 大阪市立大学

種類: 特許

番号: 特願 2018-012443

出願年月日: 2018年1月29日

国内外の別: 国内

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

伊與田 浩志 (IYOTA, Hiroyuki)  
大阪市立大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号：1 6 2 6 4 7 9 8

### (2) 研究分担者

阿部 恒 (ABE, Hisahi)  
産業技術総合研究所・物質計測標準研究部  
門・上級主任研究員  
研究者番号：2 0 3 5 6 3 7 2

辻岡 哲夫 (TSUJIOKA, Tetsuo)  
大阪市立大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号：4 0 3 2 6 2 5 2

### (3) 連携研究者

井上 保 (INOUE, Tamotsu)  
東洋食品工業短期大学・包装食品工学科・  
講師  
研究者番号：5 0 5 5 2 8 8 2

小林 功 (KOBAYASHI, Isao)  
独立行政法人森林総合研究所・木材加工・  
特性研究領域・領域長  
研究者番号：3 0 3 5 3 6 8 4

小西 靖之 (KONISHI, Yasuyuki)  
公益財団法人函館地域産業振興財団（  
北海道立工業技術センター）・研究開発  
部・研究主査  
研究者番号：5 0 5 0 5 7 0 8

五月女 格 (SOUTOME, Itaru)  
独立行政法人農業・食品産業技術総合研究  
機構・食品研究部門・上級研究員  
研究者番号：9 0 4 6 9 8 3 3