

高温高湿発生技術の研究

Development of Two-pressure, Two-temperature Humidity Generator

株式会社 山武 伊藤 力哉
ビルシステムカンパニー Rikiya Itou

株式会社 山武 石塚 保夫
ビルシステムカンパニー Yasuo Ishizuka

キーワード
湿度, 二圧力・二温度法, 飽和水蒸気, 不確かさ

高温高湿領域で湿度計測をするニーズが産業市場などで高まっている。そこで高温環境で湿度センサの特性評価ができるように、JIS B 7920に規定されている二圧力・二温度法をもとに湿度発生装置を製作した。100℃以上の領域では飽和水蒸気量が指数的に増加するため飽和状態を作るのが難しい。このため飽和槽の前に前置飽和槽を設置し、空気に含まれる水蒸気量を操作することによって、湿潤空気を飽和槽に投入し飽和槽の飽和条件を探索した。また、この求めた飽和条件から、本装置で発生する相対湿度の不確かさについて見積もったので報告する。

The needs for humidity measurement in high-temperature, high-humidity areas are growing in industrial markets and other sectors. For this reason, we built a humidity generator based on the two-pressure, two-temperature method specified in JIS B 7920 to enable evaluation of the properties of a humidity sensor in a high-temperature environment. In areas where the temperature is 100°C or higher, it is difficult to create a saturation state because the saturated water vapor content increases exponentially. Therefore, a pre-saturation chamber is installed before the saturation chamber for controlling the water vapor content in the air, and damp air is injected into the saturation chamber for finding the saturation conditions of the saturation chamber. In this paper, we present our estimates on the uncertainty of the relative humidity generated by this device from these saturation conditions that were found.

1. はじめに

湿度センサはオフィスや居住空間の空調用途では15～35℃程度で多く用いられるが、工業市場を考えた場合、その温度範囲は広く180℃もの高温度領域で使用可能な湿度センサが存在する。しかし、産業技術総合研究所所有の特定標準器では露点温度95℃以下となっており、この温度が基準値の国内最高温度となっている。そのため、95℃以上の高温度領域での湿度計測は、メーカー各社の技術に基づく評価装置で得られた精度に依存している。

そこで、高温度領域での湿度計測の実現にあたって、150℃高温環境下の湿度センサの特性を評価できるよう、JISB7920に規定される二圧力・二温度法の原理を用いた湿度発生装置を、高温・高圧条件下で実現する湿度発生装置を製作した。

飽和水蒸気を連続的に生成する一般的な方法として、飽和槽で空気をバブリングしたり、空気の流れを飽和槽内部の水面上を走らせることによって飽和水蒸気を生成する。

しかし、100℃以上の高温度領域では指数関数的に飽和水蒸気量が増加するため、上記の方法では水の蒸発潜熱の授受により飽和槽の水温が低下し、飽和槽の飽和が不完全になる。飽和が不完全であると試験槽へ導いた空気が、実際よりも低い湿度で生成され理論値と一致しない。そのため、本稿では飽和槽の前に予熱した飽和槽(前置飽和槽)を設置し、上記の方法に加えてより完全な飽和となるよう装置を製作した。具体的には前置飽和槽の温度を変化させ、空気に含まれる水蒸気量を操作し、飽和槽に投入することにより、飽和槽の飽和温度特性を求めた。これを飽和温度の不確かさとして見積もり、この装置で実現できる相対湿度の不確かさを見積もった。

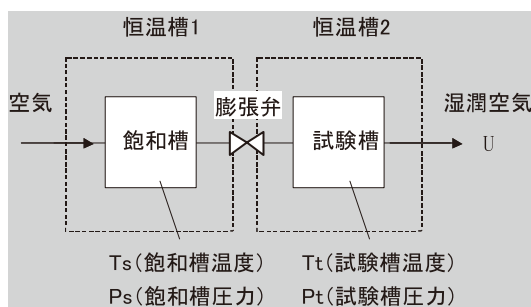


図1 二圧力・二温度法の原理

2. 二圧力・二温度法の原理

本装置の湿度発生装置の原理はJISB7920に規定される二圧力・二温度法に基づいている。二圧力・二温度法は産業技術総合研究所所有の特定標準器で用いられており、精密な湿度発生装置の原理として用いられる。

二圧力・二温度法は試験槽よりも低い温度にて水蒸気で飽和された飽和槽内の圧縮空気を圧力膨張弁を介して試験槽へ送る(図1)。

すると、この時の試験槽内の相対湿度は(1)式から求められる。

$$U_w = \frac{P_t}{P_s} \frac{f(P_s, T_s)}{f(P_t, T_t)} \frac{e(T_s)}{e(T_t)} \times 100(\%) \quad \text{式(1)}$$

U_w :湿度値(相対湿度)(%RH)

P_t :試験槽圧力 $e(T_t)$:試験槽の飽和水蒸気圧

P_s :飽和槽圧力 $e(T_s)$:飽和槽の飽和水蒸気圧

$f(p, t)$:圧力p, 温度t時の増加補正係数

$e(t)$ は水の $t^\circ\text{C}$ における飽和水蒸気圧であり、 100°C 以上の飽和水蒸気圧式はJIS Z 8806ではWAGNER-PRUSSの式で与えられている。

また、 f は増加補正係数である。飽和水蒸気圧式で示される蒸気圧は、水と平衡状態にある水蒸気であり、実際の湿潤空気では水蒸気分子及び乾燥空気分子相互作用による影響と水への溶解の影響があるためこれを補正する必要がある⁽²⁾。

しかし、増加補正係数は 100°C 以下でR.W.Hyland(1975)にて報告されている⁽¹⁾が、 100°C 以上の補正値は未知であるため、(2)式のように本稿では $f=1$ とし、増加補正係数の影響が小さい二温度法で実験を行った。

$$U_w = \frac{P_t}{P_s} \frac{f(P, T_s)}{f(P, T_t)} \frac{e(T_s)}{e(T_t)} \times 100 \div \frac{e(T_s)}{e(T_t)} \times 100 \quad \text{式(2)}$$

3. 本装置の概略

本装置の概略図を図2に、仕様を表1に示す。

温度設定範囲	50~180℃
湿度生成	~100%RHを目標
耐圧	~1MPa

表1 本装置の仕様

飽和槽と試験槽に圧力容器を用い、それらは恒温液槽を用いて温度を一定に保っている。

加圧された試料空気は、エアドライヤを通してほぼ0%RHになり、レギュレータを介してマスフローコントローラで流量を制御され、前置飽和槽に導かれる。前置飽和槽はヒーターとコントローラで特定の温度に制御され、その中で試料空気をバブリングしている。

前置飽和槽から排出される空気はヒーターで昇温され、飽和槽Iに送られる。飽和槽Iは熱交換及び結露した水を溜める容器として用いている。飽和槽Iから送られる空気は同じ恒温液槽内にある飽和槽IIで再びバブリングすることにより、飽和水蒸気を生成する。飽和槽で発生した飽和水蒸気を、飽和槽と試験槽をつなぐ経路でヒーターによって露点温度以上に昇温させ、結露しないように試験槽に導いている。試験槽は恒温液槽で温度を一定に保っている。また、試験槽内には温度計、圧力計が取り付けられている。これらの構成により任意の温湿度環境を作り出している。

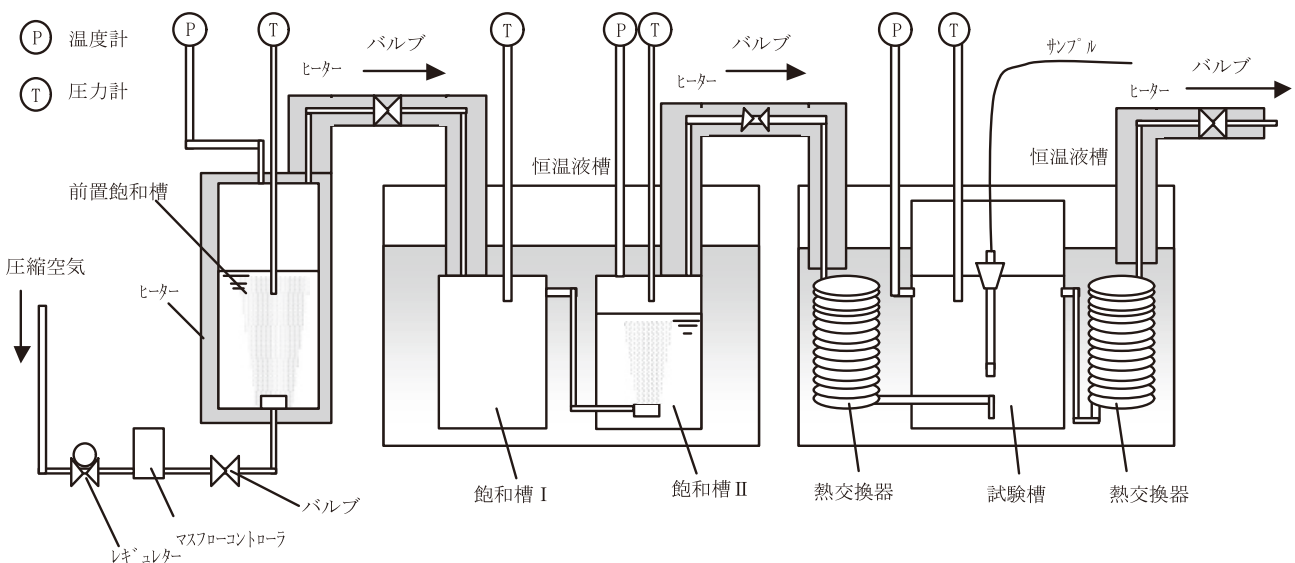


図2 本装置概略図

4. 飽和槽の評価

4.1 飽和槽温度の確認

飽和の状態とは水から蒸発する水蒸気分子の量と、水に戻り凝結する気体の水蒸気分子の量が平衡している状態である。100℃以上の高温度領域では、指数関数的に飽和水蒸気量が増加するため、水の蒸発潜熱の授受により飽和槽の水温が低下する。すると、水面の温度における水の水蒸気圧と水面近傍の空間の水蒸気圧が等しくなくなり、相対湿度の分布が発生することになる。従って、飽和槽が飽和状態にあるか確認するために飽和槽の水温と蒸気温度差を調査した。飽和槽の蒸気と水の温度に差がなくなった時、飽和状態と判断できると考え、その状態を作りだす。

4.2 試験方法

相対湿度分布を推量するために、飽和槽の前に前置飽和槽を用意する(図3)。前置飽和槽では飽和槽Ⅱよりも高い温度でバブリングし、空気に水分を含ませた後、飽和槽Ⅱに投入する。これにより、飽和槽Ⅱの内部に水分が過剰にある状態を作りだす。前置飽和槽をヒーターで加熱し、バブリングする時の温度を操作して、前置飽和槽の設定温度(T_p)と飽和槽Ⅱ内部の蒸気温度(T_2)と水温(T_1)の差の関係を調査し、飽和槽の水温と蒸気温度が一致する範囲を求める。

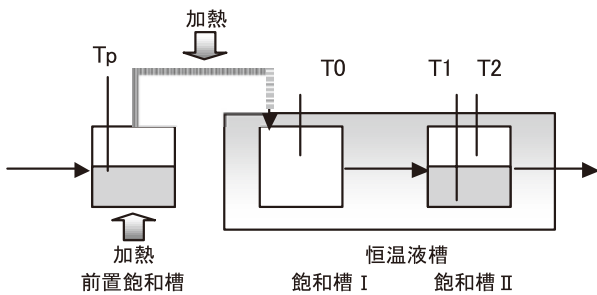


図3 前置飽和槽と飽和

図3の中の T_1 , T_2 に関して次のことが言える。

- (a) T_1 が T_2 より低くなる領域。飽和槽Ⅱにおいて蒸発が活発である。
- (b) T_1 より T_2 が高くなる領域。飽和槽Ⅱにおいて凝縮熱等により過熱されている。
- (c). (a). (b).の中間
- (b)の状態が、飽和槽Ⅱの内部に水分が過剰にある状況であると考えられ、(c)が最も飽和状態に近いと考えられる。そこで実験では流入する蒸気温度 T_p を操作することにより、 T_1 と T_2 の関係を調査した。

4.3 試験結果

試験条件を表2で示した。図4は前置飽和槽の水温 T_p と飽和槽Ⅱの水温 T_1 と蒸気温度 T_2 の関係を示した結果である。

飽和槽設定温度(恒温液槽)	130℃
試験槽設定温度(恒温液槽)	150℃
飽和槽設定圧力	550kpa
試験槽設定圧力	550kpa
乾燥空気流量	1.0L/min
(試験槽設定相対湿度)	(57%RH)
※前置飽和槽操作	
前置飽和槽設定温度	128~146℃

表2 試験条件

T_p の温度が128~130℃の範囲で、飽和槽の水温 T_1 が低下し、それにつられるように気体 T_2 の温度が低下する(a)。これは飽和槽Ⅱで蒸発が起きているためである。

その後、前置飽和槽温度の上昇に伴って、飽和槽Ⅱの温度も上昇していくが、途中温度変化が緩やかになる。この間、 T_1 と T_2 の温度差がなくなっていく(c)。

前置飽和槽温度の132~136℃付近でその差がなくなり、138℃以上で飽和槽Ⅰの温度上昇が顕著に現れ、水温と水蒸気温度の高低が逆転する(b)。

前置飽和槽 (T_p)と飽和槽Ⅱ (T_1), (T_2)温度

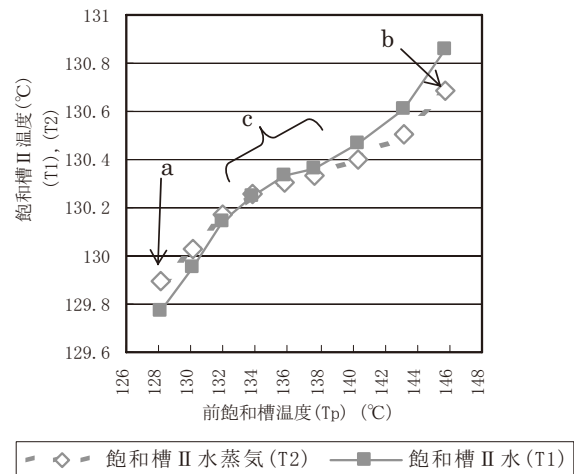


図4 前置飽和槽と飽和槽の温度の関係

(c)の範囲に飽和点があると考えられる。水温と蒸気温度差(T_1-T_2)が0になる前置飽和槽の設定条件を求めるために、前置飽和槽温度 T_p と、水温と蒸気温度差(T_1-T_2)の関係を図5に示した。蒸気温度及び水温の測定には不確かさがあるため、図5中の各プロットに表3で求めた測定時の不確かさの幅を示した。

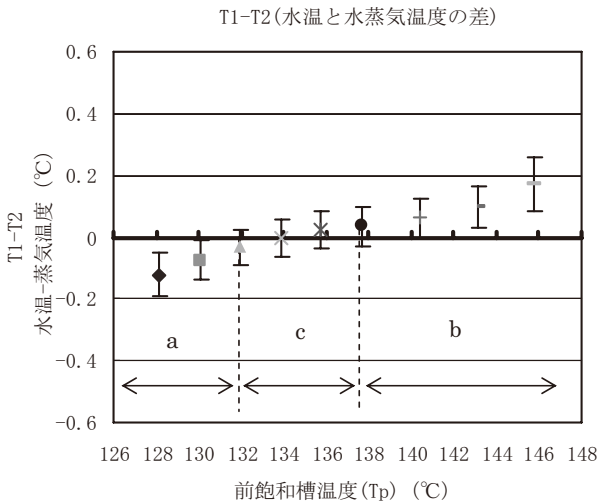


図5 前飽和槽温度と水温-水蒸気の温度差

不確かさの要因	σ (°C)	除数
・校正	0.02887	1.732
・分解能	0.00058	3.464
・補完校正値	0.00000	1
・安定性	0.00808	3.464
・自己加熱	0.00160	1

$$u(t) = 0.060(k=2)$$

表3 水温-水蒸気の測定時の不確かさ要因

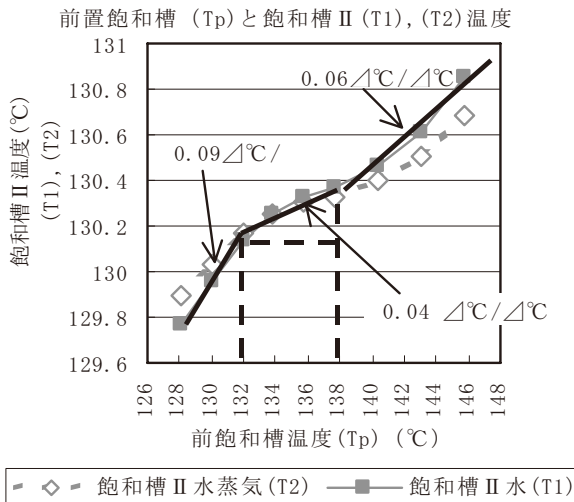


図6 前飽和槽温度と水温、水蒸気の温度

不確かさを考慮した場合、水温(T1) - 水蒸気温度(T2) = 0になる条件は前置飽和槽の設定温度で132~138°Cの範囲にあると推定される。

また、この範囲で飽和温度が、前置飽和槽温度1°Cの変化に対し、飽和槽の水温の勾配は約0.04°C/°Cで変化している(図6)。従って前置飽和槽の温度変動は飽和温度の変

動につながることになるが、この領域は前置飽和槽の温度の振れ幅(±0.1°C程度)に対し最も安定的に飽和温度が得られる領域でもある。実際(a), (b), (c)の測定時の飽和温度の安定性は(c)の領域が最も良く、図5で各プロットの不確かさの幅が小さいのは(c)の領域であり、これは飽和温度の安定性が良かったことに起因している。そのため、この領域に飽和点があると想定した。

5. 相対湿度の不確かさ

二圧力・二温度法による湿度発生装置の相対湿度の相対標準不確かさは不確かさの伝播則に従って、式(3)のように表わされる(JIS Z 7920)。

$$u_r(Uw) = \sqrt{u_r(Ps)^2 + u_r(Pt)^2 + \left\{ \frac{e}{e} \right\}_{ts} u(ts)^2 + \left\{ \frac{e}{e} \right\}_{tt} u(tt)^2 + u_r\{e(ts)\}^2 + u_r\{e(tt)\}^2 + u_r\{f(Ps, ts)\}^2 + u_r\{f(Pt, tt)\}^2}$$

式(3)

$u_r(Uw)$: 相対湿度の相対標準不確かさ

$u_r(Ps)$: 飽和槽圧力の相対標準不確かさ

$u_r(Pt)$: 試験槽圧力の相対標準不確かさ

$\left\{ \frac{e}{e} \right\}_{ts} u(ts)$: 温度tsの飽和蒸気圧と飽和蒸気圧の導関数の比

$\left\{ \frac{e}{e} \right\}_{tt} u(tt)$: 温度ttの飽和蒸気圧と飽和蒸気圧の導関数の比

$u_r\{e(ts)\}$: 温度tsの飽和蒸気圧式の相対標準不確かさ

$u_r\{e(tt)\}$: 温度ttの飽和蒸気圧式の相対標準不確かさ

$u_r\{f(P, t)\}$: 圧力p温度t時の増加補正係数の相対標準不確かさ

第5, 6項は飽和蒸気圧式の不確かさ、第7, 8項は増加補正係数の不確かさを表す。

本稿の飽和蒸気圧式の不確かさは、IAPWS(国際蒸気性質協会)“Release on the Skeleton Table 1985, The Thermodynamic Properties of Ordinary Water Substance”に表されている表中のToleranceを用いた。増加補正係数は未知のため、不確かさの見積もりはこの項を省略している。

6. 不確かさ要因

測定的主要な不確かさ要因を表4に示す。

不確かさ要因は①測定システム②試験環境③試験行為について検討し一覧にした。

①測定システムは測定に用いた精密温度計や圧力計の不確かさである。②試験環境は、製作した装置固有の特性による不確かさであり、試験槽及び飽和槽内の温度分布、飽和槽の飽和の不完全さ、温度計の自己加熱影響を考慮した。③試験行為については、測定者が試験毎に飽和槽に給水を行う時の給水レベルと飽和槽の飽和温度への影響に関する不確かさである。

ここでは、①測定システム及び③試験行為についての詳細は省略し②試験環境について説明する。

6.1 飽和槽の温度分布

飽和槽内部では温度分布があり、この温度分布により、部分的な水蒸気圧分布により、相対湿度の分布が発生することになる。そのため、 T_p の設定を133~136℃の範囲で飽和槽内部の温度分布を調査した。測定点を図7に示す。これらの測定点の4点を同時に測定した。

図8は飽和槽Ⅱの水温と各測定点の温度との差の関係を示している。飽和槽Ⅱの水温1℃の変化に対して、各測定点とも飽和槽の水と水蒸気の温度差は約0.3Δ℃/℃(温度差/水温)で平行に変化している。

相対湿度の算出時の、飽和温度は、これらの測定点の平均値を用いた。また、飽和槽Ⅱの水温とこれらの測定点の平均値を一次近似することにより、飽和槽の温度分布の不確かさとした。

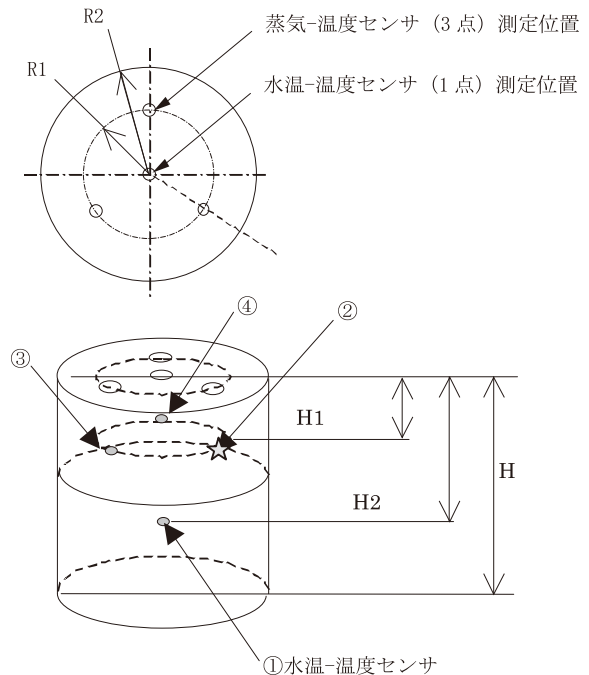


図7 飽和槽内部の測定位置

要素	番号	不確かさの要因	内容	対応
①測定システム				
	1	温度計	温度計の校正の不確かさ	○
	2		温度計の補間による不確かさ	○
	3		分解能	○
	4	圧力計	圧力計の校正の不確かさ	○
	5		圧力計の補間による不確かさ	○
	6		分解能	○
	7		温度依存性	○
②試験・環境				
飽和槽内温度	8	飽和の不完全さ	気体温度と液体温度の温度平衡の不確かさ	○
	9	温度分布	飽和槽内部の温度分布	○
飽和槽内圧力	10	温度計の自己加熱	外挿による不確かさ	○
	11	短期安定性	飽和槽内温度短期安定性	○
	12	短期安定性	飽和槽内圧力短期安定性	○
試験槽内温度	13	温度分布	試験槽内部の温度分布	○
	14	温度計の自己加熱	外挿による不確かさ	○
試験槽内圧力	15	短期安定性	試験槽内温度短期安定性	○
	16	短期安定性	試験槽内圧力短期安定性	○
空気源	17	流量変動	流量の変動による飽和温度平衡の不確かさ	■
③試験行為				
	18	給水量	飽和槽2の水位レベルによる飽和温度のばらつき	■
④その他				
	19	蒸気圧式の不確かさ	飽和蒸気圧式の不確かさ	○
	20	増加補正式の不確かさ	高圧力(空気)下における水蒸気分子及び乾燥空気分子相互作用による影響	■

○は対応 ■は非対応

表4 不確かさの要因

また飽和槽の温度分布の平均値を飽和温度とした場合、蒸気温度と水温には若干の偏差が残る。この分の偏差を水温と水蒸気の温度が一致していない不確かさとして計上した。

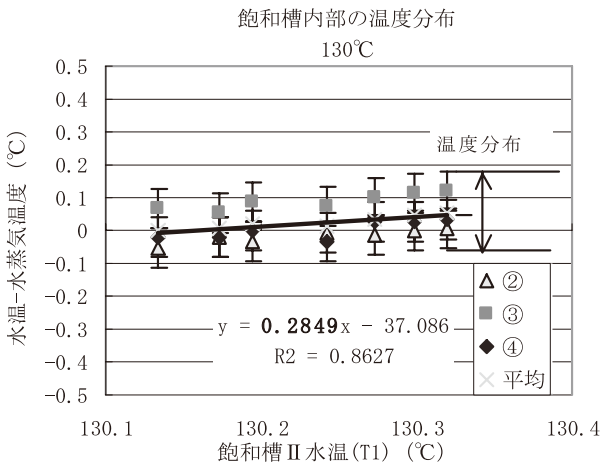


図8 飽和槽水温と飽和槽内部の温度分布

6.2 試験槽の温度分布

試験槽内部の温度分布を調査した。測定点を図9に示す。これらの測定点を4点同時に測定した。

繰り返し2回の測定により、温度分布は図10のようになった。

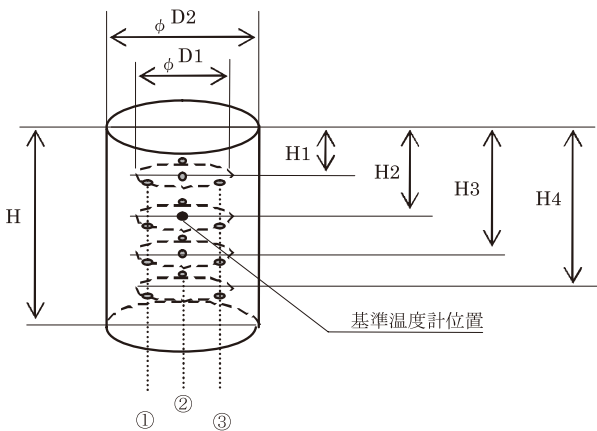


図9 試験槽温度分布測定点

試験槽の蓋の近傍で温度が著しく低下しており、また位置によるばらつきと繰り返し測定のばらつきが大きい。この付近は、外気の影響をかなり受けていると思われる。さらに高湿度で計測をする場合、結露する可能性が高いため改善の必要がある。

相対湿度の算出時の試験槽温度には、基準温度計とこれらの測定点の平均値との偏差を補正して用いた。不確かさの算出はこれらのすべての測定点を試験槽の温度分布の不確かさとして見積もった。

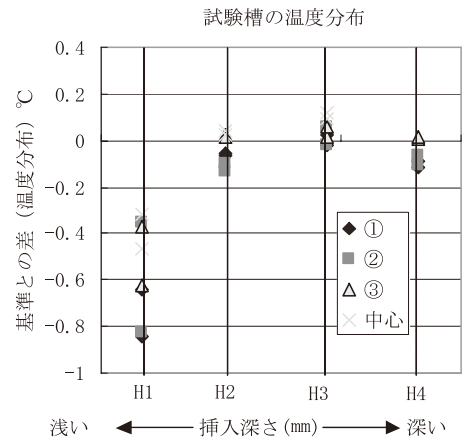


図10 試験槽の温度分布

7. 相対湿度の不確かさの見積もり

式(3)により相対湿度の不確かさを算出した。その一例を表5に示す。

150°C-60%RHの測定時、相対標準不確かさは1.7%RH (k=2)だった。また、各部位の温度、圧力の相対標準不確かさの寄与率を図11に示す。温度計の自己加熱の影響は、飽和槽内部、試験槽内部ともに小さく0.1%に満たなかった。最も寄与率が高かったのは、試験槽温度であった。その中でも試験槽の温度分布が大きく含め8割以上を占めている。

これは、試験槽の上部が被測定サンプルを取り付けることができるようにしており、断熱材で覆っているが、試験槽の蓋が大気中にさらされているため、試験槽の上部の温度が低くなる。そのため、上下方向の温度分布が大きくなってしまった。

しかし、これを改善し試験槽の上部の温度分布を、試験槽中部、下部と同等にした場合で試算すると、相対標準不確かさは1.0%RHに減少することが見込まれる。

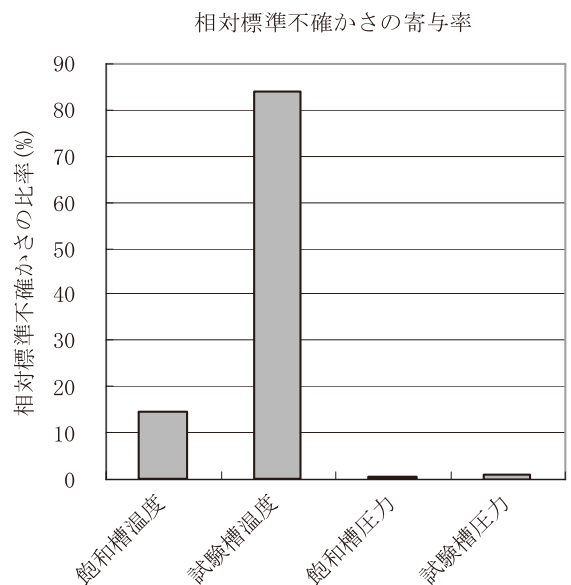


図11 相対標準不確かさの寄与率

8. おわりに

本稿では温度150℃圧縮空気550kPa中の湿度発生装置の不確かさを見積もった結果を報告した。

そのために飽和槽の前に前置飽和槽を設置し、飽和槽内部の蒸気の温度と水温が一致する前置飽和槽のヒーターの設定範囲を調査した。次にその範囲で飽和槽の蒸気の温度分布を調べ、温度分布の平均値から飽和温度を求めた。また温度分布の不確かさ及びその平均値が蒸気と水温が一致しない分を飽和温度の不確かさに計上した。

試験槽では試験槽の温度分布を求め、本装置で発生している相対湿度とその不確かさを求めた。

その結果、温度150℃圧力550kPa(空気)の環境で湿度60%RH±1.7%RH(k=2)という結果が得られた。またその時の寄与率を見ると試験槽の温度分布が最も大きく、不確かさをさらに小さくするためには試験槽の温度分布を改善するのがよい。しかし、今回求めた相対湿度は増加補正係数が不明なため、550kPaの空気雰囲気中という限定的な相対湿度である。

今後は圧力レベルを段階的に変化させ、この影響を調べるとともに、湿度センサ及び露点計の温度、圧力依存性を調査していく。また、長期安定性の不確かさ等、データの蓄積を行っていく。

参考文献

- (1) (社)日本計量機器工業連合会:湿度計測の不確かさに関する技術セミナー,「技術者養成講習会テキスト」(2003)
- (2) 日本機械学会編:湿度・水分計測と環境のモニタ, 技報堂出版, pp.16~17(1992)
- (3) JIS B 7920(2000)「湿度計-試験方法」
- (4) JIS Z 8806(2001)「湿度測定方法」
- (5) 上田政文:湿度と蒸発, コロナ社, pp.31-34(2000)

著者所属

伊藤 力哉 ビルシステムカンパニー
 開発本部開発2部

石塚 保夫 ビルシステムカンパニー
 開発本部開発2部

150℃-60%RH測定時の不確かさ												
要素	不確かさの要因		内容	飽和槽	試験槽	対応	寄与率	σ_r (相対)	σ_{rh}	除数	単位	n
①測定システム												
温度計(飽和槽)	温度計	温度計の校正の不確かさ	○	○	B	1.1012	0.0009	0.0289	1.73	℃	4	
		温度計の補間による不確かさ	○	○	A	0.0019	0.0000	0.0012	1.00			
温度計(試験槽)	温度計	補完時の繰り返し	○	○	A	0.0065	0.0001	0.0022	1.00			
		分解能	○	○	B	0.0001	0.0000	0.0003	3.46			
圧力計(飽和槽)	圧力計	温度計の校正の不確かさ	○	○	B	0.9028	0.0008	0.0289	1.73	℃	4	
		温度計の補間による不確かさ	○	○	A	0.0016	0.0000	0.0012	1.00			
圧力計(試験槽)	圧力計	補完時の繰り返し	○	○	A	0.0053	0.0001	0.0022	1.00			
		分解能	○	○	B	0.0001	0.0000	0.0003	3.46			
圧力計(飽和槽)	圧力計	圧力計の不確かさ	○	○	B	0.0373	0.0002	0.0866	3.46	kPa	4	
		分解能	○	○	B	0.0000	0.0000	0.0029	3.46			
圧力計(試験槽)	圧力計	温度依存性(上記に含む)	○	○								
		分解能	○	○	B	0.0000	0.0000	0.0029	3.46			
②試験・環境												
飽和槽内温度	温度分布	飽和温度代表値から求まる	○	○	A	0.3090	0.0005	0.0153	1.00	℃	5	
		温度分布の平均値の不確かさ	○	○	A	11.7844	0.0028	0.0944	1.00	3		
		温度分布による気体温度と	○	○	A	0.6468	0.0007	0.0221	1.00	2		
		液体温度の温度平衡の不確かさ	○	○	A	1.6598	0.0011	0.0354	1.00	3		
		繰り返し	○	○	A	0.0139	0.0001	0.0032	1.00	3		
		飽和の不完全さ	○	○	B	0.0634	0.0002	0.0069	3.46			
		温度計の自己加熱	○	○	A	0.1193	0.0003	0.0095	1.00	2		
		短期安定性	○	○	B	0.2855	0.0004	0.2395	3.46	kPa		
		飽和槽内圧力	短期安定性	繰り返し	○	○	A	0.1561	0.0003	0.1771	1.00	16
		試験槽内温度	温度分布	試験槽内部の温度分布	○	○	A	68.5942	0.0068	0.2516	1.00	℃
繰り返し	○			○	A	13.0729	0.0030	0.1099	1.00	2		
外挿による不確かさ	○			○	A	0.0114	0.0001	0.0032	1.00	3		
試験槽内温度短期安定性	○			○	B	0.0520	0.0002	0.0069	3.46			
繰り返し	○			○	A	0.0978	0.0003	0.0095	1.00	2		
試験槽内圧力	短期安定性	試験槽内圧力短期安定性	○	○	B	0.5985	0.0006	0.3468	3.46	kPa	8	
		繰り返し	○	○	A	0.3661	0.0005	0.2713	1.00			
空気源	流量変動	流量の変動による			■							
③試験行為												
	給水量	飽和槽2の水位レベルによる			■							
④その他												
蒸気圧式の不確かさ	蒸気圧式	飽和蒸気圧式の不確かさ	○	○	B	0.0373	0.0002	0.0866	1.73	kPa	1.73	
		蒸気圧式の不確かさ	○	○	B	0.0373	0.0002	0.0866	1.73			
増加補正式の不確かさ		高圧力(空気)下における水蒸気分子及び乾燥空気分子相互作用による影響			■							
							$\sigma_r(k=1)$	0.82	%RH			
							$\sigma_r(k=2)$	1.73	%RH			

表5 試験槽150℃ 60%RH時の相対標準不確かさの見積もり例