

小型鏡面冷却式露点計FINEDEW™における 鏡面結露状態の顕微鏡観測

The study on a behavior of the condensation on the chilled mirror surface by the digital microscope.

株式会社 山武

井端 一雅

株式会社 山武

金井 良之

Kazumasa Ibata

Yoshiyuki Kanai

株式会社 山武

増本 新吾

株式会社 山武

堀田 耕一郎

Shingo Masumoto

Kouichiro Hotta

キーワード

鏡面冷却式露点計、小型、高速応答、直挿型、顕微鏡観測、1/10 プロジェクト、ISHM2006

社会を取巻く環境が大きく急激に変化している現在において、新しい技術を考案するのと同時に、その技術の背後にある理論を研究・理解することが、継続的に魅力的な価値を創造し社会貢献していくために重要である。今回、開発中の小型鏡面冷却式露点計FINEDEW™において考案した新技術の背後にある理論の研究と考案を行ったので報告する。なお、本内容は、湿度・水分研究の国際学会であるISHM2006において論文発表を行なったものである。あわせてFINEDEW™の最新のプロトモデルについても紹介する。

In recent years, the environment around us has changed significantly and rapidly. It is more important to create attractive value and contribute to the society by studying the theory behind the technology that is designed by the development. [Note: See Editor's Note #1.] We have considered and studied a theory that explains the technology behind a microchilled mirror hygrometer, FINEDEW™, and have presented the paper at the International Symposium on Humidity and Moisture 2006.

1. はじめに

「計測と制御」の技術をもとに、「人を中心としたオートメーション」で、人々の「安心、快適、達成感」のある仕事や生活を実現するとともに、地球環境に貢献する事を理念としている弊社は、センサの開発を生業としている。我々が産業界で実現しているセンサ(温度・湿度・圧力・流量など)は、自然界が作ったセンサと比べるとまだまだ至らないところが多い。例えば、人間の手のひらには、 1cm^2 あたり250 ものセンサ(温点・冷点・触点・痛点)が埋め込まれているといわれているが、現在の技術力ではこれと同じ密度でセンサを実装することはできない。今後、産業界で用いられているセンサの微細化が格段に進み、人間と同じような密度で実装できる技術が確立されれば、より精細で完成度の高い製品を実現することができ、より豊かな社会が実現できるという夢がふくらむ。

こういう想いを込めて、弊社では「今あるセンサを1/10のサイズ(縦・横・高さ各1/10、体積比で1/1000)にしよう」という

1/10プロジェクトを開発しており、その一環として一般的なセンサと比較して、体積比で1/100以下という大幅な小型を実現した小型鏡面冷却式露点計FINEDEW™を開発した[1]。

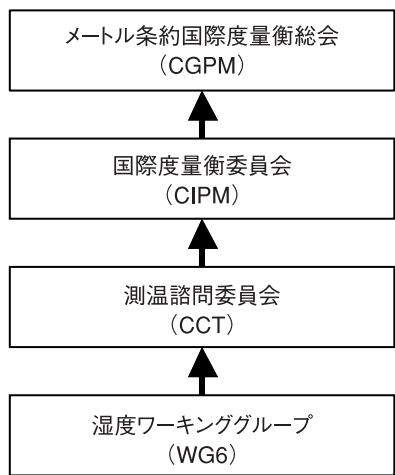
鏡面冷却式露点計の小型化を検討していく中で、多くの技術的疑問が発生した。それらの多くは、実験的に検討し検証することで解決してきたが、なお理論的・解析的にその現象を研究する必要性が感じられた。

我々の研究活動の中で多くの割合を占めたのは、冷却鏡面上の結露現象の解析である。これまで、同様の研究が行われた例はあるが、その数はあまり多くなく、かつ古いものが多い[2][3]。

そこで我々は、デジタル顕微鏡と専用に開発した結露観測チャンバーを用いて、FINEDEW™の開発で考案したコンセプトの検証を行ったので、その結果の一部について報告する。なお、本内容は2006年5月に開催された国際会議、ISHM2006で発表した。[4]以下の章で、この観測実験の概要を紹介する。

2.ISHM2006 とは

ISHM (International Symposium on Humidity and Moisture) とは、メートル条約国際度量衡総会の下部に属する湿度と水分計測に関する国際会議であり、全世界の湿度と水分計測の研究者がもっとも重視する国際学会である。ISHMの運営組織を第1図に示す。ISHMは第一回が1963年5月に米国で開催されてから40年の歴史を持ち、近年は4年ごとに開催されている。過去の開催時期、内容などを第1表に示す。弊社は、1998年4月の第三回会議から連続して論文発表を行っている。



回数	年月	内容
第1回	1963年5月	米国:NBS(現NIST)が主催 論文229編、参加約850名
第2回	1985年4月	米国:NBS(現NIST)が主催 論文100編
第3回	1998年4月	イギリス:NPLが主催 論文130編、参加290名
第4回	2002年9月	台湾:ITRIが主催 論文89編、参加200名
第5回	2006年5月	ブラジル:INMETROが主催 論文86編、参加130名

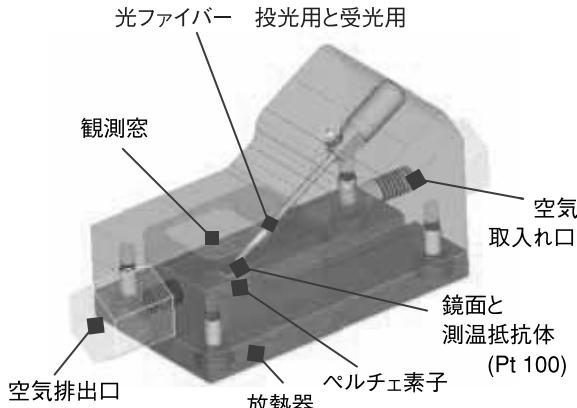
第1表. ISHM 開催の歴史

3.結露観測の目的と観測装置の構成

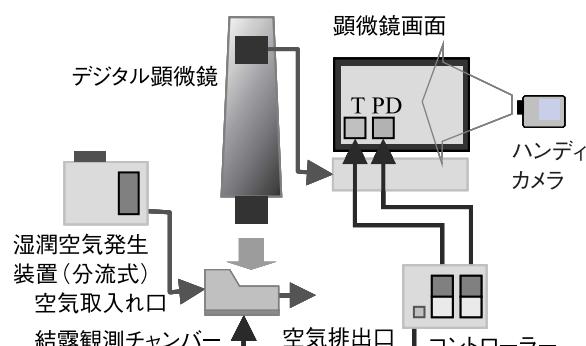
鏡面冷却式露点計を小型化するために考案したセンサ構造に起因して、FINEDEW™が計測器として好ましくないふるまいをする事がないか確認するために、我々はFINEDEW™と同様のセンサ構造を持つ結露観測チャンバーを開発した。そのチャンバーの構造を第2図に、その写真を第3図に示す。

結露観測チャンバーにはペルチェ素子、測温抵抗体の埋込まれた鏡面、2本の光ファイバー(投光用と受光用)が挿入されたパイプ、観測窓などで構成されている。チャンバーのケースはアルミでできており、底面は銅の放熱器になっている。基本的には、開発されたFINEDEW™と同じ構造になっている。

チャンバーの観測窓を通して鏡面の状態が顕微鏡で観測できるよう、このチャンバーは顕微鏡の対物レンズの下に設置される。



分流式の湿潤空気発生装置から、湿度(露点)の安定した空気が観測チャンバーに送込まれる。流量は10L/分に設定してある。結露観測チャンバー内に組込まれたペルチェ素子には電流をコントロールするためのコントローラが接続されており、これにより鏡面の温度を任意に冷却・加熱することができる。あるいは、鏡面の結露量を検出する光ファイバーの受光信号により、鏡面温度を制御することもできる。デジタル顕微鏡の画面内に鏡面温度と受光信号を表示するための信号もコントローラから出力されている。結露観測装置の構成を第4図に、機器の構成表を第2表に示す。また結露観測装置のセットアップの写真を第5図、第6図に示す。

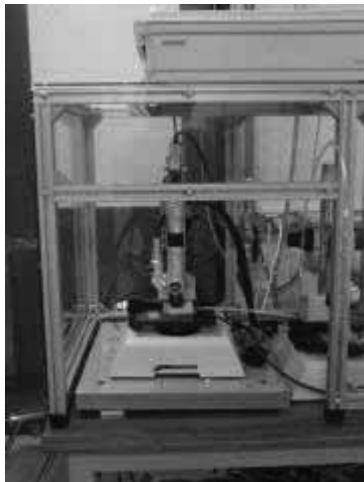


装置	メーカー	形番
顕微鏡 (光学系)	オリンパス	SZX ILL D2-100
顕微鏡 (CCD+DSP)	オムロン	VC3500
ハンディーカメラ	ソニー	DCR-TRV10
湿潤空気発生装置	神栄	SRH-1
結露観測チャンバー	山武	-
コントローラ	山武	-

第2表. 機器構成表



第5図. 結露観測装置のセットアップ



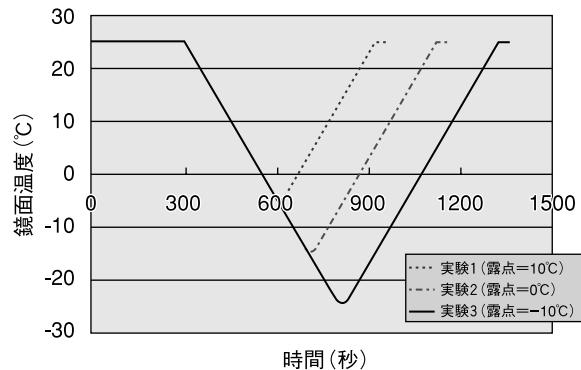
第6図. 結露観測チャンバーとデジタル顕微鏡

げることが、しばしば行われている。そこで、鏡面温度が露点温度以下になった場合に、鏡面上の結露がどのようにふるまうかについて把握することも興味深いことである。

以上のようなことを配慮して、第3表、第7図のような実験計画が準備された。

		実験1	実験2	実験3
供給空気	温度	25 °C		
	露点温度	10 °C	0 °C	-10 °C
鏡面条件	開始温度	25 °C		
	ホールド時間	300 秒		
冷却勾配	最低温度	0.1 °C／秒		
	ホールド時間	-5 °C	-15 °C	-25 °C
加熱勾配	ホールド時間	20 秒		
	終了温度	0.1 °C／秒		
	ホールド時間	25 °C		
		30		

第3表. 実験計画



第7図. 鏡面温度制御プロファイル

4.結果

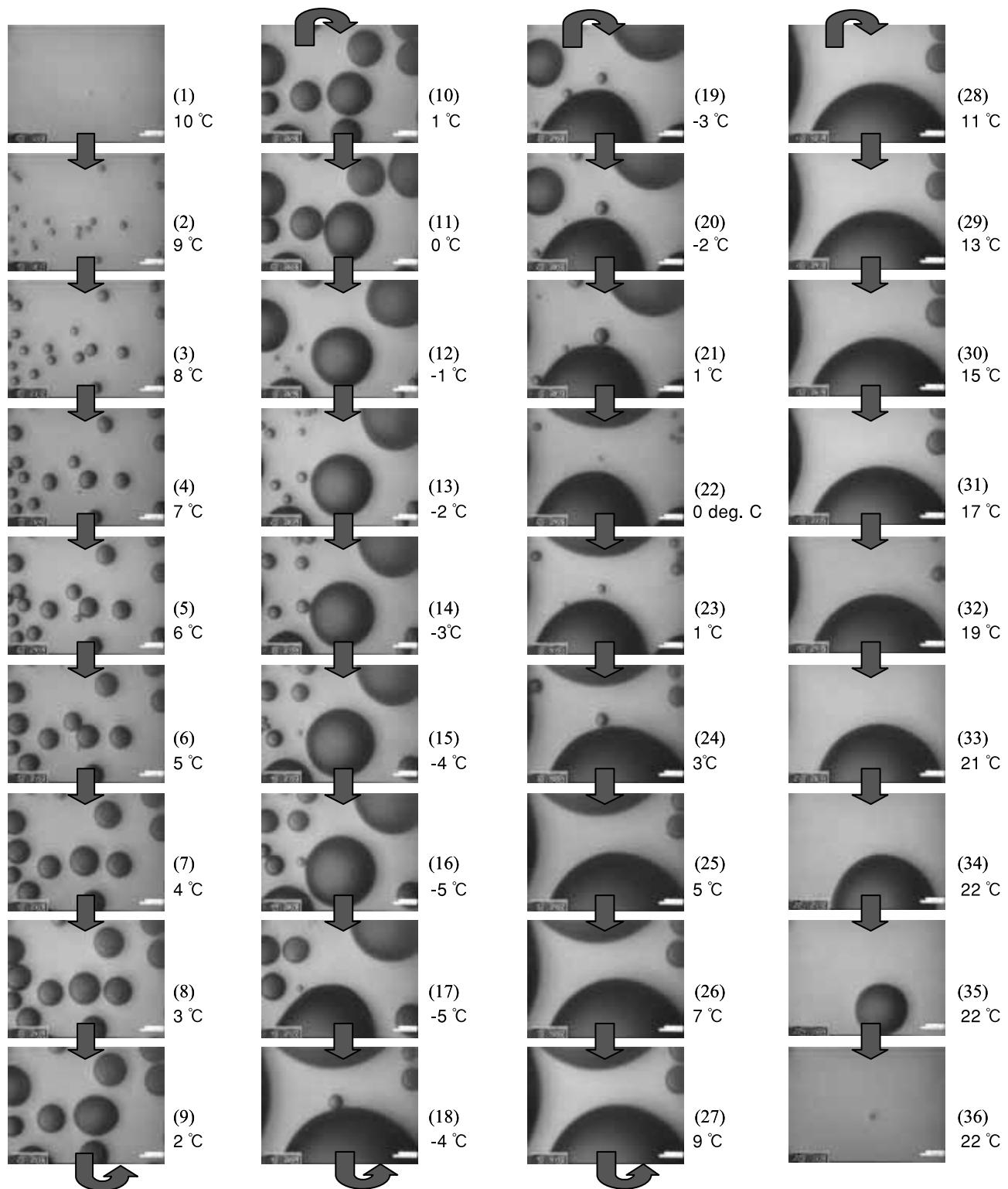
4.1.実験計画

-20~0°Cのレンジにおいて、露と霜が混在することにより鏡面冷却式露点計の動作が不安定になることがあることが良く知られている。また、きわめて平滑な鏡面(我々がFINEDEW™で採用しているシリコンベースの鏡面では、平滑な鏡面が得やすい)上では、0°C以下において過冷却水(露)の状態で存在しやすいうことも良く知られている。一般的に過冷却水は不安定で、自然に氷に変化する。そこで我々は、この温度領域で、結露がどのように始り、霜への相転移がどのように行われるか、把握する必要がある。

従来より鏡面冷却式露点計では、鏡面での結露の発生を加速するために、はじめに鏡面温度を露点温度以下にまで下

4.2. 実験1の結果 (露点=10°C)

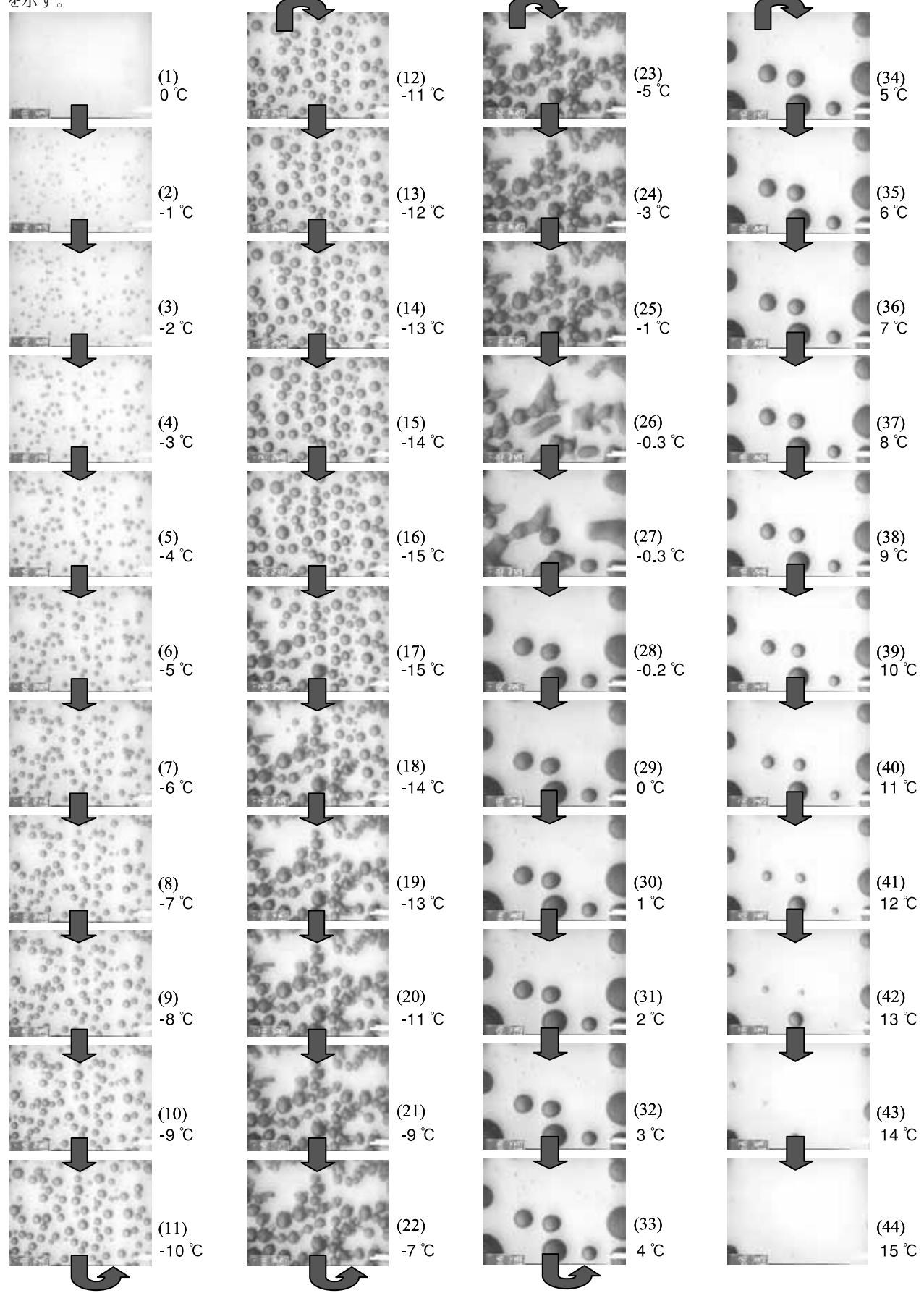
第8図に、供給空気の露点が10°Cの時の典型的な観測結果を示す。



第8図. 実験1(供給空気の露点温度が10°C)の観測結果(注:各駒の時間間隔は一定ではない)

4.3. 実験2の結果(露点=0°C)

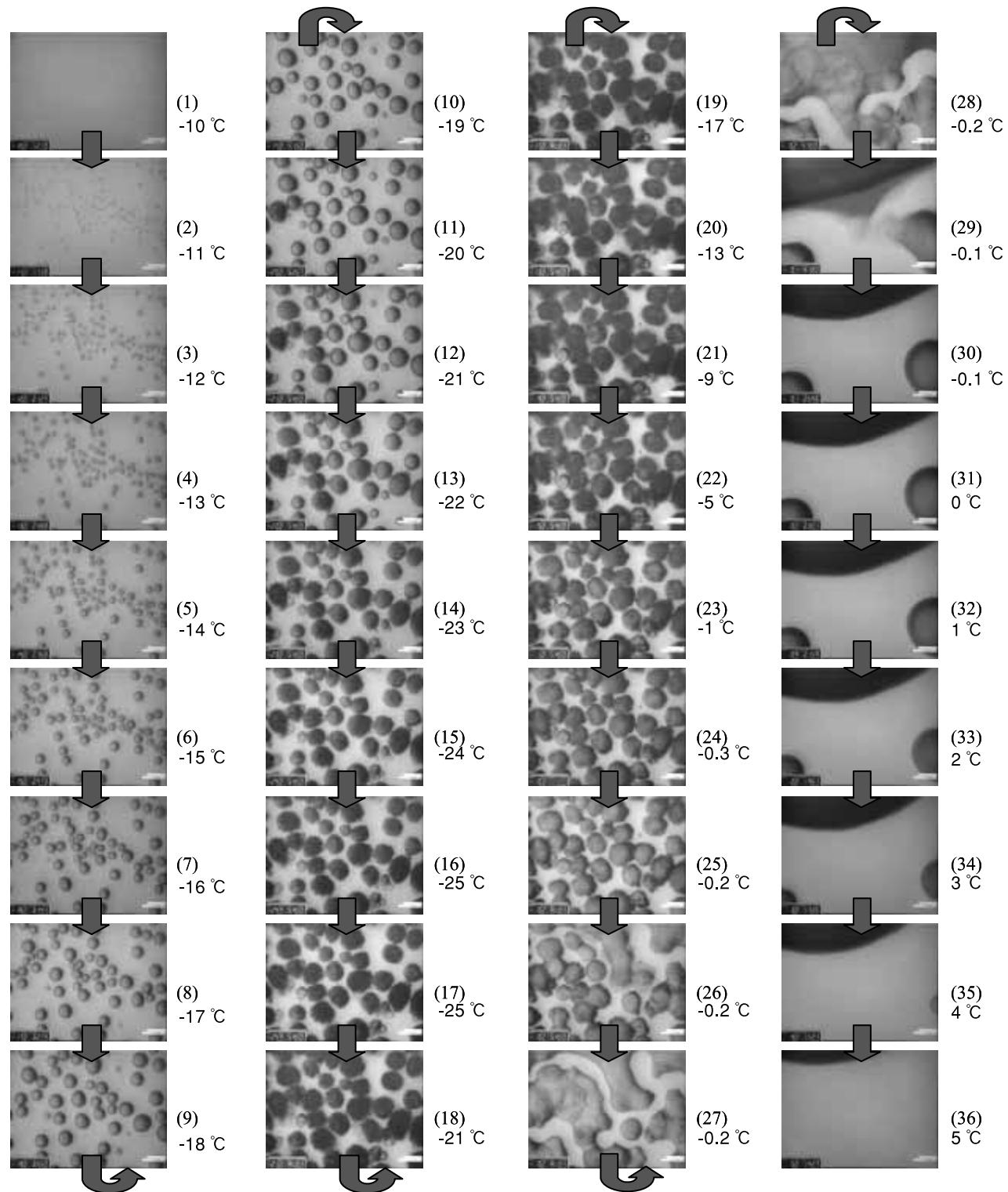
第9図に、供給空気の露点が0°Cの時の典型的な観測結果を示す。



第9図. 実験2(供給空気の露点温度が0°C)の観測結果(注:各駒の時間間隔は一定ではない)

4.4. 実験3 の結果(露点=−10°C)

第10図に、供給空気の露点が−10°Cの時の典型的な観測結果を示す。

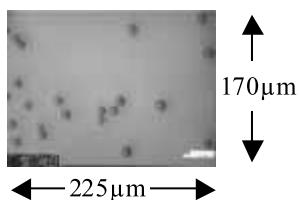


第10図. 実験3(供給空気の露点温度が−10°C)の観測結果(注:各駒の時間間隔は一定ではない)

5. 考察

5.1. 寸法表示

この論文中における顕微鏡観測写真的寸法の参考値を第11図に示す。



第11図. 参照寸法値

実際の観測システムにおいては、寸法ゲージが顕微鏡の画面上に表示されている。

5.2. 温度の精度

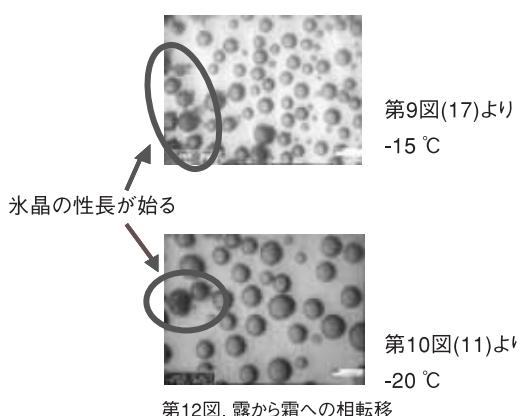
この実験の主たる目的は、小型鏡面冷却式露点計FINE-DEW™の鏡面上のふるまいを理解することであるので、観測はどちらかというと定性的に取扱った。湿潤空気発生装置から供給される供給空気の温度と露点は、観測期間中十分な安定度があったと確信している。しかしながら、その読み値は必ずしも校正された値ではない。

5.3. 結露水滴の露から霜への相転移

実験において、シリコンベース上に初めて結ばれる結露水滴は、初期の段階では常に非常に小さな露（水あるいは過冷却水）であった。これは実験3（供給空気の露点温度が -10°C ）においてもそうであった。

実験1（供給空気の露点が 10°C ）において、露から霜への相転移はいっさい観測されなかった（第8図参照）。鏡面が露点温度よりはるかに低温に冷却された時、鏡面上に結ばれた結露水滴は、次第に集合し大きな水滴に成長した。加熱過程に入った以降も、鏡面の温度が 10°C に達するまで、水滴の成長は継続した（第8図の(17)から(27)参照）。これは、鏡面の温度が露点温度（実験1の場合 10°C ）を越えるまでは、鏡面の表面が飽和状態に維持されているからである。

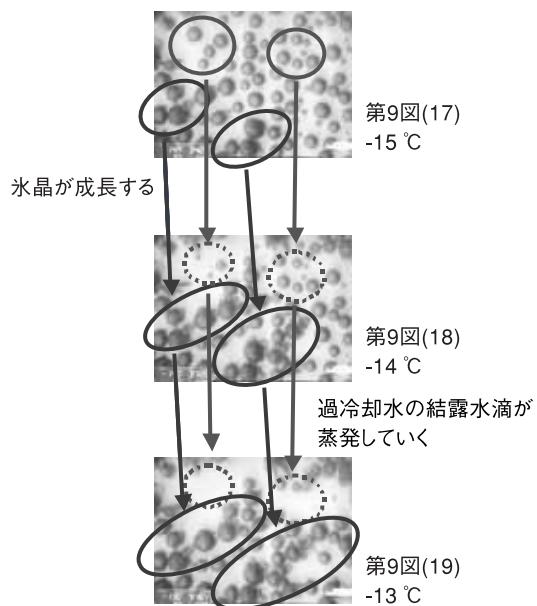
実験2（供給空気の露点温度が 0°C ）と実験3（供給空気の露点温度が -10°C ）の場合、第12図に示すように、露から霜への相転移が観測された（あるいは第9図、第10図参照）。



第12図. 露から霜への相転移

5.4. 相転移のふるまい

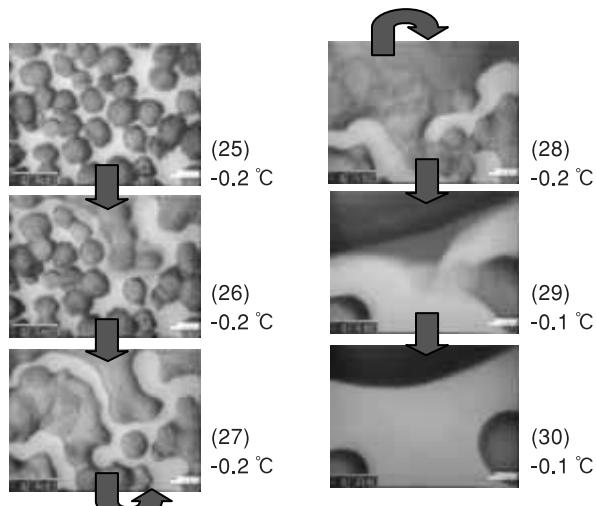
氷の飽和水蒸気圧と過冷却水の飽和水蒸気圧は同じ氷点下温度において異なっていることは良く知られている。 0°C から温度が下がるに従って、氷の飽和水蒸気圧は過冷却水の飽和水蒸気圧より低くなっていく。この影響で、結露水滴が過冷却水から水晶に相転移するとき、直近の過冷却水の結露水滴が蒸発する[5]。この現象の事例を第13図に示す（あるいは第9図参照）。



第13図. 相転移のふるまい

5.5. 霜から露への相転移

ひとたび露から霜への相転移が発生すると、水晶は鏡面温度が 0°C に戻ってくるまで、水に戻ることはない。そしてこの相転移は、 0°C で発生する。水晶の下層部が解けてシャーベット上になり、その上を水晶が、バケツから氷水をこぼしたときのように滑っていきながら、水滴に戻っていくことが、第14図より観測される（あるいは第10図の(25)から(30)まで参照）。

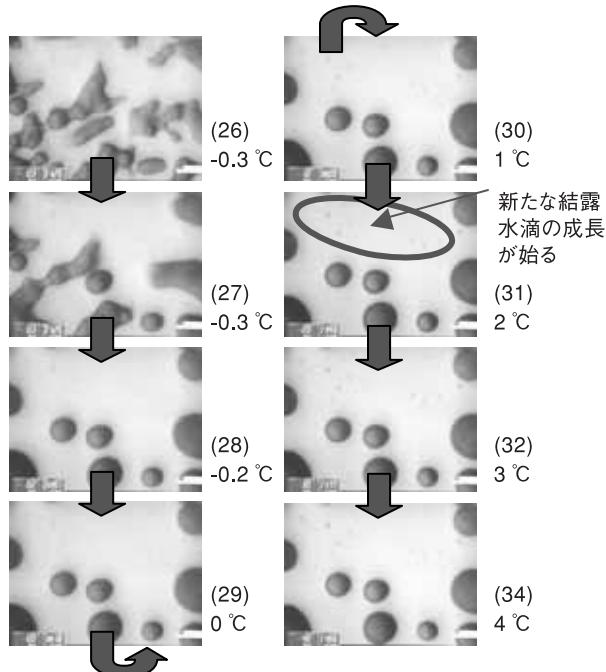


第14図. 霜から露への相転移

(第10図の(25)から(30)より)

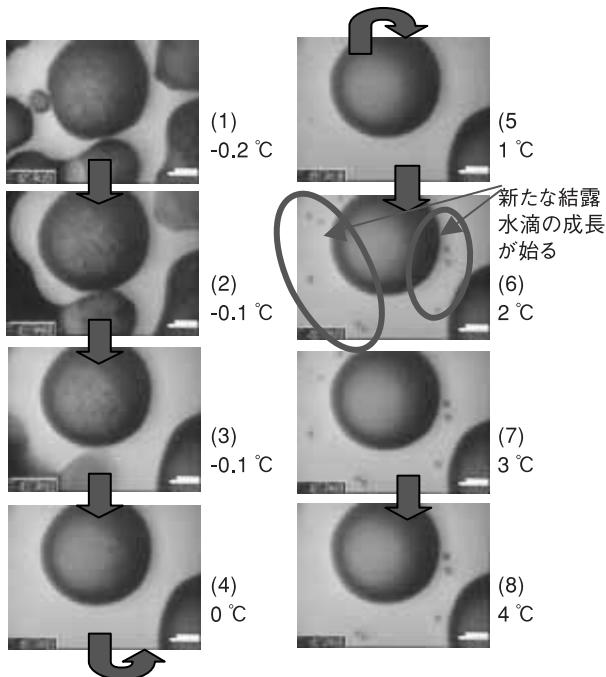
5.6.供給空気の露点が0°Cの場合の相転移後のふるまい

第15図(あるいは第9図の(26)から(33)まで)をよく観察すると、霜から露への相転移直後から、新たな結露水滴が成長していることがわかる。

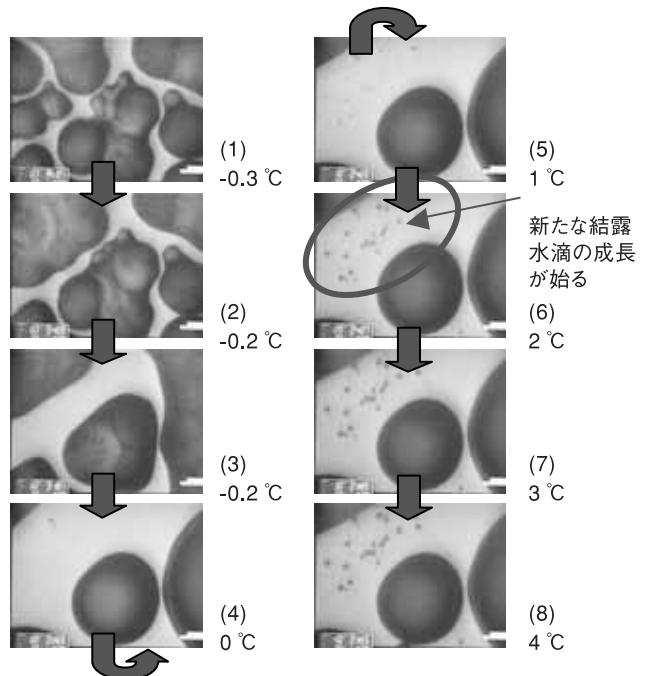


第15図. 霜から露への相転移
(第9図の(26)から(33)より)

これは供給空気の露点が0°Cの実験2の結果であるが、この現象は我々の想定にないことであった。しかし、第16図、第17図に示すように、霜から露への相転移直後に新たな結露水滴が発生する現象は、我々の追加実験でも観測された。



第16図. 霜から露への相転移
(実験2と同条件の別の実験の結果1)



第17図. 霜から露への相転移
(実験2と同条件の別の実験の結果2)

第16図と第17図に示した実験は、実験2と同じ実験条件で実施された(第3表、第7図参照)。両実験とも、冷却課程において鏡面温度0°Cで過冷却水の結露水滴が生成され、露から霜への相転移が-15°Cまでに発生した。その後加熱過程では、鏡面温度が0°Cに戻るまで、水晶状態で維持された。第16図の(4)、および第17図の(4)に示すように、鏡面温度が0°Cを超えた時点で、水晶が水に戻った。その直後より、鏡面上に新たな結露水滴が発生し成長はじめることが、第16図の(6)および第17図の(6)より観測される。これは、水晶が溶けて水になったときに余剰の水が蒸発し一時的に露点が上昇するため、鏡面上が過飽和状態になり新たな結露水滴が発生するのではないかと考えられる。

加熱過程において新たな結露水滴が発生するというこの現象は、供給空気の露点が0°C(実験2の条件)の場合に限られた。

6. 最新のFINEDEW™の紹介

ここでFINEDEW™の最新のプロトモデルについて紹介する。我々は、これまで様々なお客様のご意見を元に、FINEDEW™の試作品を改良してきた。特に取付性・操作性・形状寸法などを見直した結果、次ページに示すようなプロトモデルを完成させた。センサプローブは測定露点の範囲に応じて、S型、L型の2種用意している。



第18図. FINEDEW™プロトタイプ外観



第19図. S型プローブ



第20図. L型プローブ

7. おわりに

一連の実験から得られた結果より、顕微鏡による結露状況の拡大観測は、鏡面冷却式露点計のふるまいを理解するため有効であることがわかった。我々は今後も、近年格段に進歩している観測装置をうまく活用し、FINEDEW™の研究開発に応用していきたいと考えている。

なお、小型鏡面冷却式露点計の開発において考案したコンセプトは、FINEDEW™にうまく実装されている。しかし我々は、今後も継続的な検討と改良をつづけていく予定である。

参考文献

1. 金井良之, 井端一雅, "最新の微細加工技術を用いた小型鏡面冷却式露点計の実現", *SavemationReview*, Vol.23, No.2, pp. 30-37, 2005.
2. J. Kobayashi, "Investigations on Hygrometry", Paper in *Meteorology and Geophysic*, Vol. XI, Nos. 2 - 4, pp. 214 - 338, 1960.
3. Domen Hudoklin, Jovan Bojkovski, Janko Drnovšek, "Determination Of A Dew And Frost Using Digital Camera and Image-Processing Software", Paper from the 4th International Symposium on Humidity and Moisture, pp. 179 - 183, 2002.
4. Kazumasa Ibata, Yoshiyuki Kanai, "Developmant of the Micro Chilled Mirror Hygrometer", Paper from the 5th International Symposium on Humidity and Moisture, index 161, 2006
5. Yoshio Toyama, "On the Error of the Dew (Frost)-Point Radiosonde and Its Improvement", Paper in *Meteorology and Geophysic*, Vol. 30, No. 2, pp. 93 - 109, 1979

商標

FINEDEW™は、株式会社山武の登録商標です。

FP3™は、株式会社山武の登録商標です。

著者所属

井端 一雅	国際事業推進本部
金井 良之	生産技術開発センター
増本 新吾	生産技術開発センター
堀田 耕一郎	生産技術開発センター