

水粒子凍結過程の計算予測と実験装置の試作*

平 栄蔵^{*1}・中山 隆^{*2}

Numerical Prediction for Icing Process of Water Particles
and Setup of Experimental Apparatus

Eizo HIRA and Takashi NAKAYAMA

低温度の空気の流れの中に水を噴霧し、それを急速冷却して凍結水粒子を製造する装置を設計・製作するには低温空気の温度と流量、水粒子の直径と初期温度、空気と水粒子の接触性やその時間などが水粒子生成時間やその到達温度に及ぼす影響をあらかじめ検討しておく必要がある。

そこで本報告では、低温空気中に噴霧した水粒子の凍結過程を予測する熱移動計算プログラムを作成し、各種パラメータが凍結時間などに及ぼす影響について検討した。また、これらの予測値を基にして実証実験用の気液混合器及び水粒子分離用サイクロン等を設計・試作した。

キーワード：低温空気、水粒子、気液混合器、凍結過程、実験用水粒子製造装置

1 はじめに

空気を冷媒とした空気冷凍機は、冷媒に空気をを用いるため地球環境にやさしいこと、その構造が比較的簡易であること、低圧の空気をを用いることができるなどいくつかのメリットを有している。

特に、-60 以下の極低温度域になるとフロンガス等蒸気圧縮方式よりも空気冷凍機の方が原理的に、構造的に有利となることが知られている。

本研究では、このような特徴を有する空気冷凍機の基礎的研究とその応用機器の開発を行う。

本年度は低温空気流中に水粒子を同伴させた場合の水粒子の凍結過程について数値計算予測し、その結果に基づいて実証実験用の水粒子製造装置の設計・試作を行った。

2 水粒子の凍結過程のモデル及び基礎式

図1に計算に用いたモデル図を示す。

本装置の動作は以下のとおりである。スクリー圧縮機のようなコンプレッサーを用いて設定した

圧力まで空気を圧縮し、常温冷却したのち熱交換器へ送る。ここで、水粒子分離用サイクロンから回収した冷風と熱交換させ予冷し、エアモーターへ送る。動力回収用発電機付きのエアモーターでエネルギーを吸収された空気は、その圧力と温度が低下する。温度が低下した空気は気液混合器で、微粒化した水滴と混合される。水滴は冷風の冷熱により凍結し、水粒子となる。水粒子は水粒子分離用サイクロンで空気と水粒子に分離される。低温の空気は熱交換器へ送られ、導入空気を予冷し

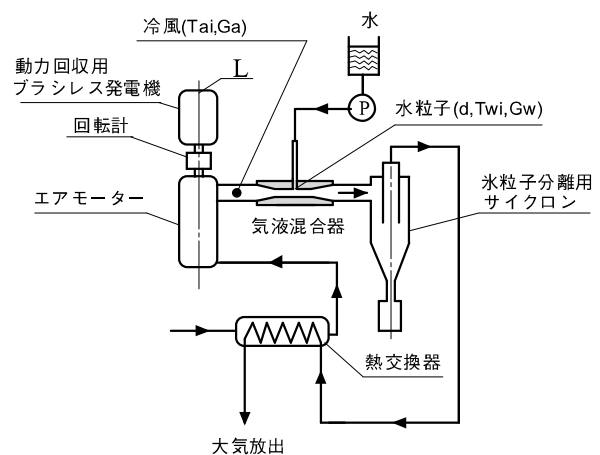


図1 計算モデル図

* 高速水粒子噴射による表面凍結浄化システムの研究開発(第2報)

*1 機械電子デザイン部

*2 同部長

たのち、外へ放出される。

空気の冷却過程については前報で報告したので本報告では、気液混合器前後における水粒子の凍結過程について検討する。

この凍結過程の検討のための計算式導入に先立ち、以下の仮定をおく。

気液混合器及び空気輸送管と周囲の間の熱の出入りは無視する。

水粒子と冷風との熱伝達は $Nu = 2$ 一定とする。

図2は気液混合器内での水粒子の凍結過程を示す。横軸は経過時間で、縦軸は水滴及び冷風の温度である。図中の破線は水粒子の温度経過 T_w を、一点鎖線は冷風温度 T_a の経過を示す。また、図中のAは気液混合器へ水滴を導入した時刻とその時の温度を示す。A点からB点の間は水粒子の温度低下を示し、B点からC点の間は水粒子の凍結区間である。C点以降は凍結粒子の温度低下を示す。

2-1 AB区間の水粒子と空気との熱バランス

任意の時刻 t から微小時間 Δt 経過後の水粒子から冷風への微小熱移動量 Q_w は、

$$Q_w = F \cdot hw (T_a - T_w) \Delta t \quad (1)$$

式(1)中の hw は水粒子と冷風との熱伝達率で、

$$hw = Nu \cdot k / d \quad (2)$$

である。 Nu はヌセルト数で、この値は、

$$Nu = 2 \quad (3)$$

とする。

任意時刻 t から微小時間 Δt 経過後の水粒子及び冷風の微小変化温度 ΔT_w 及び ΔT_a は、

$$\Delta T_w = -Q_w / (cp_w \cdot G_w) \quad (4)$$

$$\Delta T_a = Q_w / (cp_a \cdot G_a) \quad (5)$$

ここに、 F は単位流量当たりの水粒子の全表面積、 k は空気の熱伝導率、 d は水粒子の直径、 T_a 及び T_w は任意時刻の冷風及び水粒子の温度、 cp_w 及び cp_a は水粒子及び冷風の定圧比熱である。

2-2 BC区間の水粒子と空気との熱バランス

任意時刻 t における熱バランスは、式(1)の水粒子の温度 T_w を、

$$T_w = 0 \quad (6)$$

とおき、式(2)~(5)を用いて、 t 後の温度を計算し、 Q の総和が水の潜熱の $Q = 80 \text{ kcal/kg}$ に達するまで繰り返す。

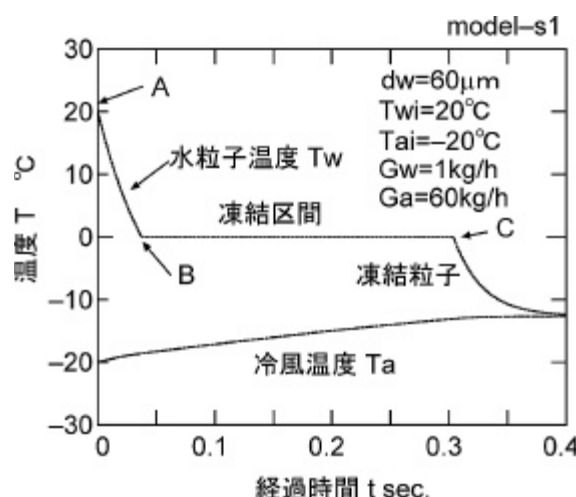


図2 水粒子の凍結過程

2-3 C点以降の水粒子と空気との熱バランス

水粒子が凍結した後は、上述の式(1)~(5)と同様にして、 t 後の温度を計算する。なお、凍結後の氷の比熱は $cp_w = 0.487$ で、水の場合のおよそ $1/2$ である。

本計算では微小時間 Δt を 0.01 msec とした。

また、空気と水粒子間の伝熱式や熱物性値等は伝熱工学資料、化学工学便覧等を参考にした。

3 結果の検討

水粒子凍結過程の説明に用いた図2は、水粒子の直径 d を $60 \mu\text{m}$ 、初期温度 T_{wi} を 20°C 、その流量 G_w を 1 kg/h で、空気の初期温度 T_{ai} を -20°C 、流量 G_a を 60 kg/h とした場合の水粒子及び冷風温度経過 T_w 及び T_a を示している。

本図より、 20°C で噴射された水粒子は約 0.05 秒後に凍結し始めること、この場合の凍結開始から終了までの時間は約 0.25 秒であること、更に凍結後の氷粒子は約 0.1 秒で冷風とほぼ同一の温度、 -12°C 程度となることわかる。

以下、本項では、気液混合器内における水粒子の凍結に及ぼす水粒子の粒子径と初期温度、冷風の初期温度や流量などの影響について検討する。

図3は水粒子の初期温度が水粒子の凍結時間に及ぼす影響を示す。横軸に水粒子の粒径 d 、縦軸に水粒子が凍結するまでの時間を示す。計算条件は初期空気温度 $T_{ai} = -20^\circ\text{C}$ 、空気流量 $G_a = 60 \text{ kg/h}$ 、水粒子流量 $G_w = 1 \text{ kg/h}$ である。

T_{wi} は低温ほど、また水粒子径 d は小さくなるほど凍結に至るまでの時間が短縮されることがわかる。特に水粒子径が $20\mu\text{m}$ 以下では、水粒子の初期温度の影響はほとんど無視できると考えられる。

図4は低温空気の流量 G_a が水粒子の凍結時間に及ぼす影響を示す。横軸に水粒子の粒径 d 、縦軸は水粒子が凍結するまでの時間を示す。計算条件は初期水粒子温度 $T_{wi}=20$ 、初期空気温度 $T_{ai}=-20$ 、水粒子流量 $G_w=1\text{kg/h}$ である。

空気流量 G_a は多いほど、また水粒子径 d は小さくなるほど凍結に至るまでの時間が短縮されることがわかる。特に、水粒子径が $20\mu\text{m}$ 以下では、空気流量 G_a の影響はほとんど無視できると考えられる。

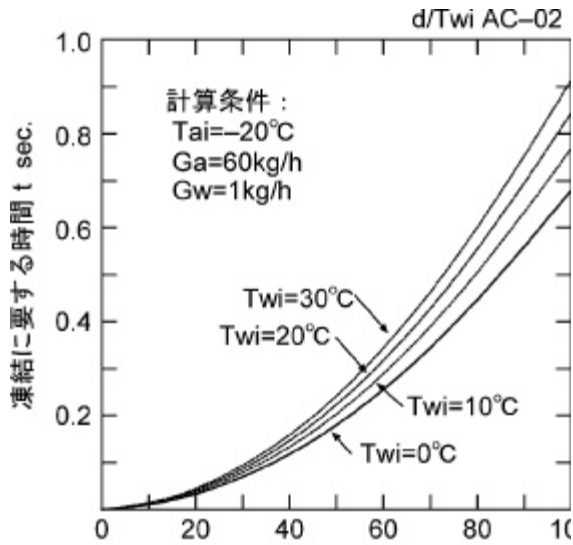


図3 水粒子初期温度 T_{wi} の影響

図5は低温空気の初期温度が水粒子の凍結時間に及ぼす影響を示す。横軸に水粒子の粒径 d 、縦軸は水粒子が凍結するまでの時間を示す。計算条件は初期水粒子温度 $T_{wi}=20$ 、空気流量 $G_a=60\text{kg/h}$ 、水粒子流量 $G_w=1\text{kg/h}$ である。

空気の初期温度 T_{ai} は低いほど、また水粒子径 d は小さくなるほど凍結に至るまでの時間が短縮されることがわかる。 T_{ai} が -10 と 0 に近づくほど水粒子の凍結までの時間が急速に増加し実用的でないこと、逆にその温度が -30 以上と低温化しても凍結に要する時間はそれほど短縮しないことがわかる。

図6は低温空気の初期温度 T_{ai} と空気流量 G_a が水粒子の凍結時間に及ぼす影響を示す。空気温度

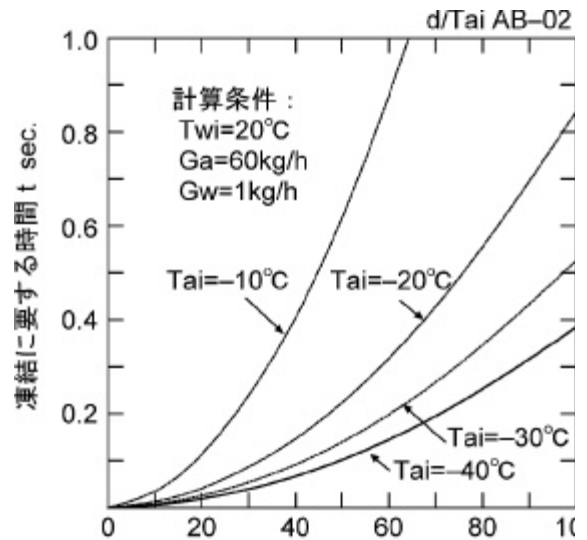


図5 低温空気の初期温度 T_{ai} の影響

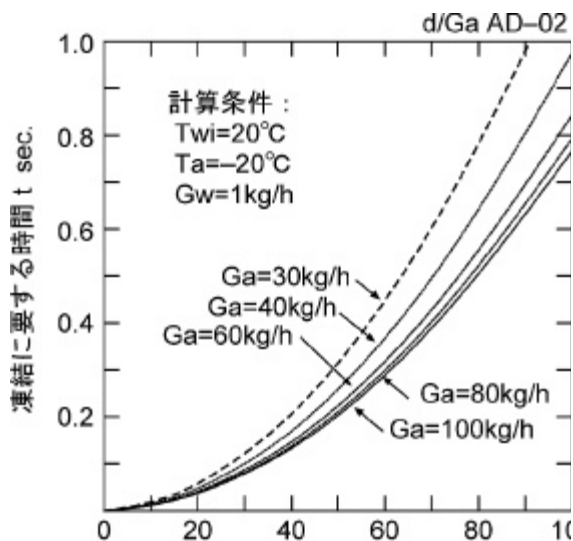


図4 低温空気流量 G_a の影響

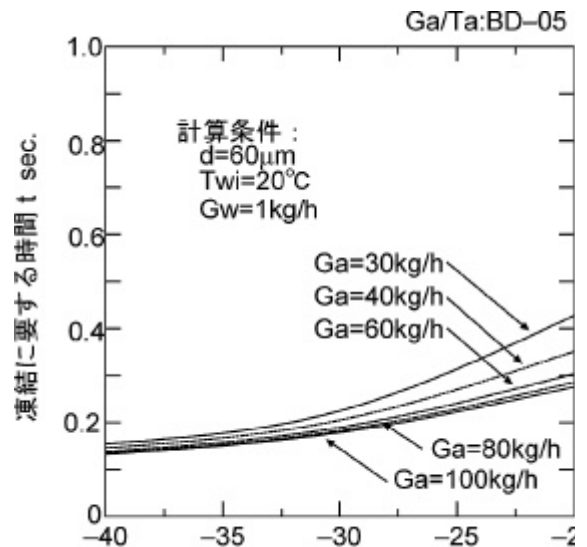


図6 T_{ai} と G_a の影響

T_{ai} が低下するほど、空気流量 G_a が増加するほど凍結に要する時間は減少することがわかる。

図7は低温空気の空気流量 G_a と水粒子の初期温度 T_{wi} が水粒子の凍結時間に及ぼす影響を示す。空気流量 G_a が増加するほど、水粒子の初期温度 T_{wi} が低下するほど、水粒子の凍結に要する時間は減少することがわかる。

図8は水粒子の初期温度 T_{wi} と低温空気の初期温度 T_{ai} が水粒子の凍結時間に及ぼす影響を示す。水粒子の初期温度 T_{wi} が低下するほど、低温空気の初期温度 T_{ai} が低下するほど、水粒子の凍結に要する時間は減少することがわかる。

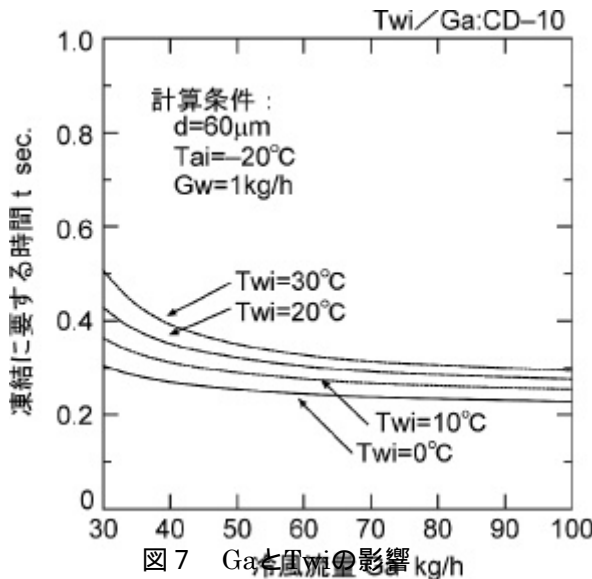


図7 G_a と T_{wi} の影響

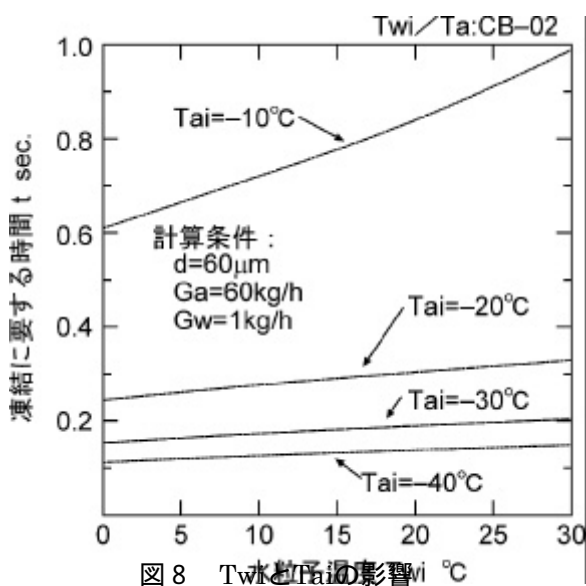


図8 T_{wi} と T_{ai} の影響

4 実証用実験装置の設計・試作

水粒子の凍結時間等の予測計算に基づき、実証用の水粒子製造装置を設計試作した。図9にその外観を示す。



図9 試作した気液混合器とサイクロン

5 まとめ

低温空気の流れの中に水粒子を混合して氷粒子を生成する装置の設計・試作を目的に、氷粒子凍結過程の予測計算を行った。その結果、水粒子径は小さいほど、水粒子の初期温度は低いほど、低温空気の流量は多いほど、また低温空気の温度は低いほど水粒子の凍結までに要する時間が短縮することなどがわかった。

特に、氷粒子凍結時間の短縮には、水粒子径を小さくする方法が他の方法よりも遙かに有効であるなどの知見を得た。

これらの予測結果に基づいて、実証実験用の水粒子製造装置の設計・試作を行った。