

氷生成における溶質が与える潜熱への実験的検証

システム工学群

ものづくり先端技術研究室 1190173 山本 伶子

1. 緒言

濃縮法とは、液状食品中の水分のみを取り除くことで濃度を高める操作であり、加熱蒸発法、膜濃縮法、凍結濃縮法の3種類に分類される。本研究の対象である凍結濃縮法は、最も低温下で濃縮操作が行えるため、味、色彩および芳香成分などの損失や微生物の繁殖が抑えることができ、高品質な濃縮液が得られるといったメリットがある。また、加熱蒸発法と比較すると、融解潜熱が蒸発潜熱の約 1/7 であるため、省エネルギーで濃縮が行えるというメリットも挙げられる。しかし、液状食品といった多成分で構成された水溶液においては、製氷部で生成される氷の熱物性値について明確にされておらず、定量化を図るためにはデータの蓄積が必要である。したがって、本研究では単成分の水溶液として、糖類のグルコース($C_6H_{12}O_6$)とフルクトース($C_6H_{12}O_6$)の2種類の水溶液から生成される氷の融解潜熱を調べるため、各水溶液における凝固点、比熱、希釈熱、および実験装置の熱容量から実験的に求めた。

2. 潜熱の算出方法

凍結濃縮法において、製氷部では溶質が含有した氷が生成されることが考えられる。しかし、溶質を含む氷としてモデル化すると融解潜熱の算出が複雑になることが予想される。このため、本研究では生成される氷は純粋な水であると仮定した。

このとき、水溶液に純粋な氷を投入し、融解させたときを考えると、熱の釣り合いは式(1)で表せる^[1]。本式より、水溶液の凝固点、比熱、希釈熱、実験装置の熱容量を把握することで、氷の融解潜熱が算出可能である。

$$M_i L - M_i C_i (T_i - T_e) + M_i C_w (T_2 - T_e) = M_s C_s (\Delta T) + C (\Delta T) + D \quad (1)$$

M_i : 投入する氷の質量[g] M_s : 氷投入前の水溶液質量[g]

L : 氷投入前の水溶液濃度における融解潜熱[J/kg]

T_i : 氷の初期温度[K]

T_e : 氷投入前の水溶液濃度における凝固点[K]

T_2 : 氷投入後の水溶液温度[K]

ΔT : 氷投入前後の水溶液温度差[K]

C : 実験装置の熱容量[K]

C_s : 水溶液の比熱[J/(kg · K)] C_i : 氷の比熱[J/(kg · K)]

C_w : 水の比熱[J/(kg · K)] D : 希釈熱[J]

3. 融解潜熱算出実験

3.1 実験方法

実験装置フローを図1に示す。断熱材で覆ったφ120mmのポリエチレン容器に水溶液を450g投入し、容器と水溶液の温度に変化が見られなくなるまで実験準備とした。その後、温度センサ(アズワン製, MF-O-T)を埋め込んだ氷50gを水溶液に投入し、氷を融解させた。このとき、5分毎に容器を揺動することで水溶液を流動させ、3分以上水溶液の温度に変化が見られなくなるまで温度測定を行った。サンプリング周

期は、前述と同様のセンサを用いて氷の温度を500msで、水溶液の温度を温度センサ(CHINO製, SCHS1-0)を用いて500msで測定した。また、使用した水溶液はグルコースとフルクトースの2種類で行い、濃度は10~40°Brixまで5°Brix間隔とした。雰囲気温度24°Cの恒温室で行った。

なお、氷投入で得られた水溶液の温度変化は10°C程度に留まったため、2種類の温度センサで測定可能である。

水溶液中の氷の融解潜熱に関する研究^[1]を参考にグルコース水溶液とフルクトース水溶液の比熱 C_s を推定した。

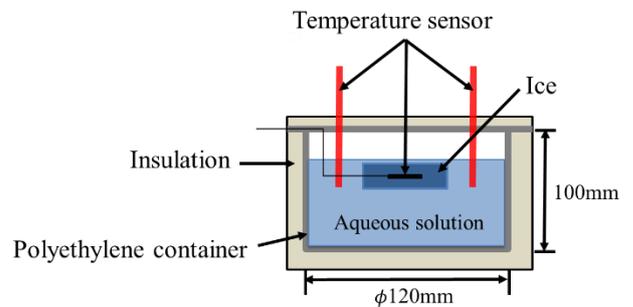


Fig.1 Schematic of experimental equipment

3.2 実験結果と考察

予備実験より、実験装置の熱容量は145J/Kと確認できた。

さらに、グルコース水溶液、フルクトース水溶液における希釈熱測定実験での希釈前後の水溶液の温度と加えた純水の温度を表1, 2に示す。

Table1 Temperature before and after dilution in aqueous glucose solution

Concentration [°Brix]	10	15	20	25	30	35	40
Before input [K]	296.32	299.61	300.72	303.17	304.11	304.97	305.94
After input [K]	296.42	299.66	301.76	303.10	303.97	304.69	305.76
Water [K]	294.77	297.77	299.22	300.44	301.18	301.61	302.41
Temperature difference [K]	0.10	-0.05	-1.03	0.08	0.14	0.28	0.19

Table2 Temperature before and after dilution in aqueous fructose solution

Concentration [°Brix]	10	15	20	25	30	35	40
Before input [K]	295.49	294.49	294.42	293.98	295.49	294.49	293.98
After input [K]	295.26	294.43	294.39	294.44	295.26	294.43	294.39
Water [K]	295.26	294.43	294.39	294.39	295.26	294.43	294.44
Temperature difference [K]	0.23	0.06	0.03	-0.46	0.23	0.06	-0.42

希釈熱 D は式(2)で表される。

$$D = C_s (\Delta T_s) \quad (2)$$

C_s : 水溶液の比熱[J/(kg · K)]

ΔT_s : 希釈前後の水溶液の温度差[K]

表1, 2と式(2)より、希釈前後の各水溶液の温度変化は微小であったため、本研究では希釈熱は考慮しないものとして

式(1)からグルコース、フルクトース水溶液の融解潜熱を算出した。

潜熱算出実験での水溶液の温度と氷の温度を表 3, 4 に示す。

Table3 Temperature before and after of aqueous glucose solution and ice

Concentration [°Brix]	10	15	20	25	30	35	40
Before input [K]	294.44	288.63	292.54	294.26	293.69	293.18	292.87
After input [K]	287.19	281.19	281.19	287.24	286.68	286.68	286.71
Ice temperature [K]	255.13	265.44	238.46	255.12	257.36	256.66	257.91
Temperature difference [K]	7.25	7.44	11.35	7.02	7.01	6.50	6.16

Table4 Temperature before and after of aqueous fructose solution and ice

Concentration [°Brix]	10	15	20	25	30	35	40
Before input [K]	294.61	292.40	292.73	292.97	293.31	293.31	292.42
After input [K]	286.41	285.61	285.84	287.01	286.72	286.69	285.30
Ice temperature [K]	260.29	266.62	260.66	263.32	264.36	248.86	254.96
Temperature difference [K]	8.20	6.79	6.89	5.96	6.59	6.62	7.12

グルコース水溶液、フルクトース水溶液における濃度別の融解潜熱を表 5, 6 に、両者をまとめた濃度別の融解潜熱を図 2 に示す。

Table5 Latent heat of aqueous glucose solution

Concentration [°Brix]	10	15	20	25	30	35	40
Latent heat [kJ/kg]	330.05	386.81	560.35	311.53	315.51	281.70	261.23

Table6 Latent heat of aqueous fructose solution

Concentration [°Brix]	10	15	20	25	30	35	40
Latent heat [kJ/kg]	401.81	333.61	324.68	268.61	307.44	274.95	320.76

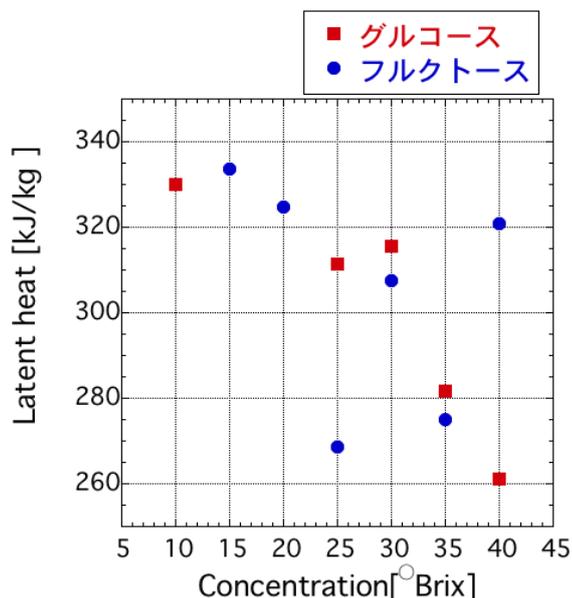


Fig.2 Latent heat at concentration of aqueous solution

図 2 より、グルコース水溶液とフルクトース水溶液において、濃度が上昇すると融解潜熱は減少する傾向が見られた。また、グルコース水溶液とフルクトース水溶液を比較すると、比熱に差は見られない。このことから、グルコース、フルクトースが含まれることによって、氷生成に必要な潜熱は小さくなるため、氷ができにくくなると考えられた。

4. 結言

本研究は、初めにグルコース水溶液とフルクトース水溶液

の凝固点、比熱、希釈熱実験装置の熱容量を調べた。

次に、グルコース水溶液とフルクトース水溶液の潜熱を調べる実験を行い、水溶液中の氷の融解潜熱に関する研究^[1]を用いて融解潜熱を求めた。算出した融解潜熱は、グルコース水溶液、フルクトース水溶液において濃度が増加すると潜熱は減少傾向が見られた。また、純水な氷の融解潜熱 333.6kJ/kgと比較すると、グルコース水溶液、フルクトース水溶液の融解潜熱は濃度の上昇とともに低い値をとることが確認できた。

参考文献

[1] 熊野寛之 浅岡龍徳 斎藤彬夫 大河誠司 “水溶液中の氷の融解潜熱に関する研究”，日本冷凍空調学会論文集 Vol22, No, 3, p209~216(2005)