Res. Bull. Obihiro Univ., **9** (1975) : 357～364.

寒冷外気による生あんの冷凍

東条　衛・岡村太成・石橋憲一
(帯広畜産大学製造機械学研究室)

1974年11月30日受理

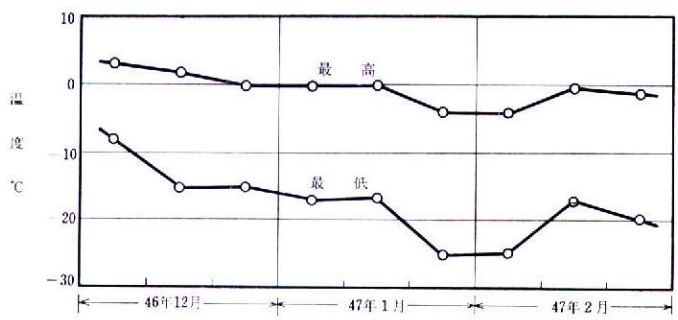
Freezing of Bean Jam "Azuki-an" Fresh by Cold Air

Mamoru TŌJŌ*, Taisei OKAMURA* and Ken'ichi ISHIBASHI*

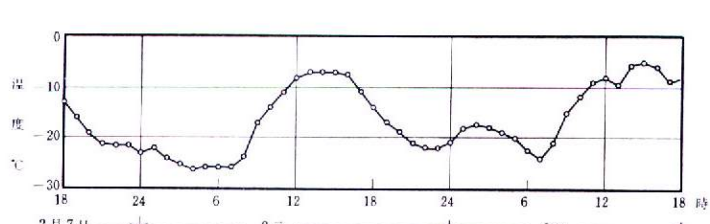
1. 緒　　言

道東地方では冬季に氷点下20°Cを越える寒気が数日間続くことは珍しくない，これらの低温を有効に利用することは，寒冷地の産業にとり当然考えねばならない課題である。

第1図は大学構内における昭和46年12月から昭和47年2月の間の1日の最高最低温度を旬間平均したもので，その間における外気温度の日変化の1例を第2図に示す。。



第1図　旬間平均最高最低温度（於帯畜大）



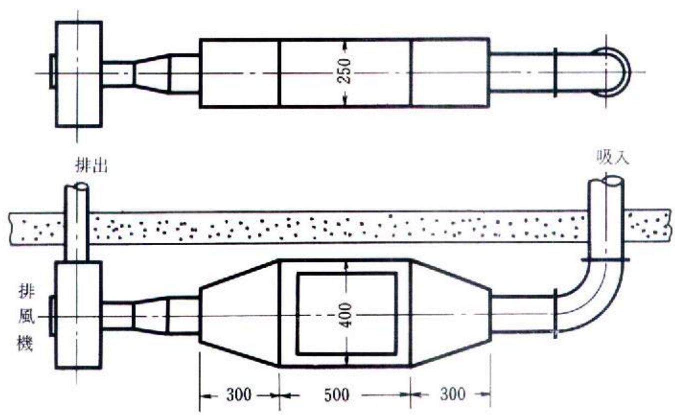
第2図　外気温度の日変化（昭和47年）

* *Laboratory of Agricultural Processing Machinery, Obihiro University of Agriculture and Veterinary Medicine, Obihiro, Hokkaido, Japan.*

この様な低温を利用して食品を凍結保存し必要な時に利用する習慣は，餅，豆腐などに適用されている。この方法を生あんに用いて実験を試みた，すなわち本報告は球状に成形した生あんを寒冷外気にあて，風温，風速，試料温度，凍結所要時間を実験的に求め，熱収支計算により熱伝達率を求めたものである。

2. 実験装置と実験法

外気を吸入排出する途中に試料を設置する方法として第3図に示す装置を用いた。試料を設置する部分は400×250×500 mm で一端を風量5.4 m^3/min，風圧64mm Aq の排風機に接続し，試料に1.0～13.0 m/s の風速で寒冷空気があたる様にダンパーで制御した。装置外部に厚さ30 mm の発泡スチロールを張り，その上に厚さ50 mm のグラスウールで断熱した。この方法により室内温度15°C のとき，装置の内部温度を外気温度より1～2°C 高い程度に保持できた。



第3図　実験装置

試料の生あんは水分68～70 % で，石膏の型により直径45 mm および30 mm の球状に成形した，試料内部に素線直径0.3 mm の C.C 熱電対を挿入し温度変化を記録した。試料中心部の温度が－1.0°C から－5.0°C まで降下するのに要する時間を凍結所要時間と定め，比較の基準とし，表面の平均熱伝達率を次の方法で算出した。なお風速0 m/s の実験には小型のフリーザーボックスを利用した。

a)　生あん球の凍結時における熱収支

凍結中の球表面から周囲の空気への放熱量 Q Kcal は次の式で与えられる。

$$Q = h_m \pi D^2 \Delta t \Theta_f / 60 \quad \cdots\cdots\cdots ①$$

ここに

h_m = 表面と空気との平均熱伝達率，Kcal/m^2h°C

D = 生あん球の直径，m

Δt＝温度差＝t_f-t_a，℃

t_f＝凍結温度，℃

t_a＝空気温度，℃

Θ_f＝凍結所要時間，min

とする。また凍結に必要な氷の潜熱を L Kcal とすると

$$L=80W(\omega/100)\phi \quad \cdots\cdots\cdots(2)$$

ここに

W＝生あんの重量，kg

ω＝生あんの水分，％

ϕ＝凍結率

とする。ϕ について[1]，溶液の凍結点の降下は濃度に比例するとする RAOULT の法則から，凍結温度 t_f℃ から冷却して t℃ になったときの凍結率 ϕ は　$\phi=1-(t_f/t)$　となる。本実験では $t_f=-1$℃，$t=-5$℃　と定めたので $\phi=0.8$ である。

b）平均熱伝達率 h_m の計算

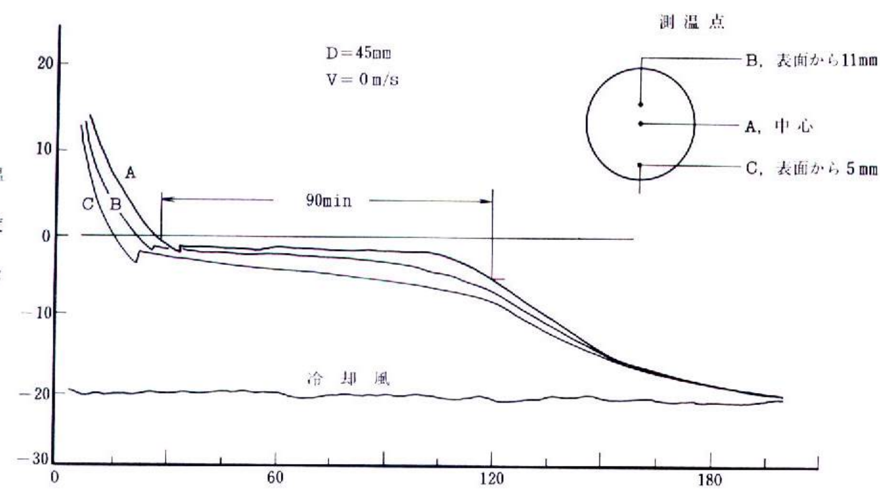
凍結所要時間 Θ_f のとき球表面からの放熱量 Q は凍結潜熱 L に近似的に等しいと考え得るから　①，②式より　L＝Q　として

$$h_m=\frac{80\cdot W(\omega/100)\phi}{\pi D^2\cdot\Delta t\cdot\Theta_f/60} \quad \cdots\cdots\cdots(3)$$

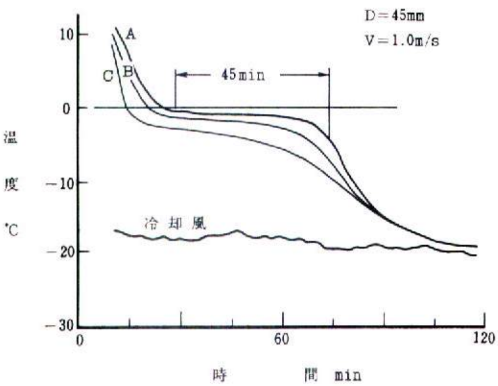
が得られる。

3. 実験結果，考察

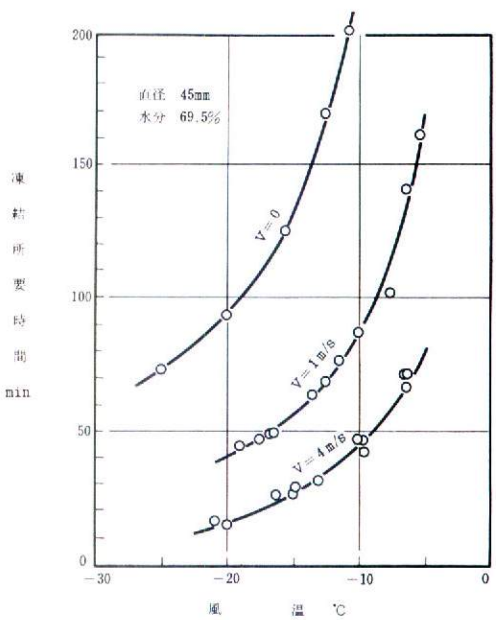
第 4 図は水分 68～71％，直径 45 mm の生あん球の表面から，夫々 5.0，11.0，22.5 mm の位置に熱電対を挿入して，凍結中の温度変化を記録させた一例を示す。風速 0 の場合は凍結



第 4a 図　生あん球の冷凍曲線



第 4b 図 生あん球の冷凍曲線



第 5 図 生あん球の凍結所要時間と風温，風速の関係

速度が遅いので過冷却の状態が明瞭に現われている，記録紙から中心部の温度が −1℃ から −5℃ まで降下する時間 Θ_f を読み取って凍結所要時間を求めた。この様にして凍結所要時間，空気温度，風速の関係を第 5 図に示す，平均熱伝達率 h_m はレイノルズ数の関数であり，従って風速が一定の時は③式の $\Delta t \cdot \Theta_f/60$ は一定と考えることができる。

この様にして風速別に $\Delta t \cdot \Theta_f/60$ を求めたのが第 1 表である。これらの数値および生あん

第 1 表 実験結果（直径 45 mm，風速 0，1，4 m/s）

u＝0			u＝1.0			u＝4.0		
t_a	Θ_f	$\Delta t \cdot \Theta_f/60$	t_a	Θ_f	$\Delta t \cdot \Theta_f/60$	t_a	Θ_f	$\Delta t \cdot \Theta_f/60$
−10.75	203.0	32.99	− 5.25	162.0	11.48	− 6.25	66.6	5.83
−12.25	170.0	31.88	− 6.40	141.5	12.74	− 6.25	72.2	6.32
−15.50	126.0	30.45	− 7.50	102.5	11.10	− 6.50	72.0	6.60
−20.00	94.5	29.93	−10.00	87.5	13.13	− 9.50	42.6	6.04
−25.00	74.0	29.60	−11.50	77.5	13.56	− 9.50	46.1	6.53
	平 均	30.97	−12.50	69.0	13.23	−10.00	47.4	7.11
			−12.75	58.1	11.38	−13.00	31.2	6.24
			−13.50	63.5	13.23	−14.75	25.8	5.91
			−17.00	50.0	13.33	−15.00	25.8	6.02
			−17.50	47.5	13.06	−16.25	25.8	6.56
			−19.00	45.0	13.50	−20.00	14.9	4.72
				平 均	12.70	−21.00	16.2	5.40
							平 均	6.11

u＝風速 m/s
Θ_f＝凍結所要時間 min
Δt＝$(-1-t_a)$℃
t_a＝風温 ℃

球の直径D，重量W，水分ω，凍結率φを③式に代入して平均熱伝達率h_mを計算し第2表に示す。

第2表 実験結果（第1表を含め h_m, Re, Nu の値）

D (mm)	u (m/s)	t_a (°C)	θ_f (min)	$\frac{\Delta t \cdot \theta_f}{60}$ (h °C)	Q (Kcal)	h_m (kcal/m²h°C)	R_e	$\frac{N_u-2}{P_r^{1/3}}$
45	13.0	−5.8	57.6	4.61	2.0755	70.77	4.36×10⁴	173.2
		−9.0	34.2	4.46	2.1211	73.10		
		−6.5	50.4	4.62	2.0946	71.26		
	6.0	−12.0	33.0	6.05	2.0548	53.39	2.07×10⁴	137.0
		−14.5	26.4	5.94	2.0412	54.02		
		−24.0	14.1	5.41	2.0457	59.49		
	4.0	*	*	6.11	2.029	52.21	1.40×10⁴	129.9
	1.0			12.70		25.12	3.49×10³	62.5
	0.0			30.97		10.59	—	—
30	13.0	− 7.8	22.9	2.60	0.6004	81.67	2.91×10⁴	136.1
		− 9.0	19.1	2.54	0.6357	88.52		
		− 6.5	29.4	2.70	0.6357	83.27		
	6.0	−12.0	19.9	3.65	0.5719	55.42	1.37×10⁴	98.5
		−14.5	14.6	3.27	0.5719	61.86		
		−24.0	9.2	3.51	0.6369	64.18		
	1.3	−21.0	22.2	7.40	0.6189	29.58	3.03×10³	48.8
		−16.0	27.2	6.79	0.6054	31.53		

* 第1表による。

Ranz-MARSHALL[2] は，$1<R_e<10^5$ の範囲の強制対流下における球の熱伝達について，次の関係を与えている。

$$N_u=\frac{h_m \cdot D}{\lambda}$$
$$=2+0.60R_e^{1/2}P_r^{1/3} \quad \cdots\cdots\cdots④$$

ここに　N_u；Nusselt 数

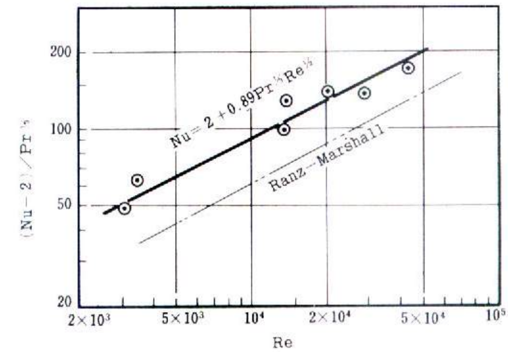
R_e；Reynolds 数

P_r；Prandtle 数

とする，実験の温度範囲では空気の熱伝導率 $\lambda=0.0190\sim0.0205$ Kcal/mh°C，動粘度 $\nu=(0.115\sim0.130)\times10^{-4}$m²/s，$P_r=0.72$ として④式より N_u を求め，本実験より求めた第2表に示す値と比較して第6図に示した。この図から明らかな如く平行な2直線となり，本実験の結果からは

$$N_u=2+0.89R_e^{1/2}P_r^{1/3} \quad \cdots\cdots\cdots⑤$$

が得られ，④式と比較して約50％大きな値の N_u となる，この原因は凍結率および凍結所要



第6図　Nusselt 数と Reynolds 数の関係

時間の定め方に問題点があると考える。

凍結所要時間 Θ_f を表面温度が －1°C となった時点から中心温度 －5°C に達するまでの時間とすれば理想的であるが，表面温度の平均を求めることは実験上困難である。しかし第4図に見られる如く表面から 5 mm の深さの C 点の温度は中心より相当早く －1°C に達しており，このことを考慮すれば実際の凍結所要時間は実測値より大きくなり，従って実際の熱伝達率 h_m は実験値より小さくなることが予想される。

風速0すなわち自然対流の場合の N_u 数は④式と同じく Ranz-MARSHALL[2] により次式で与えられている。

$$N_u = 2 + 0.60 G_r^{1/4} \cdot P_r^{1/3} \quad \cdots\cdots\cdots⑤$$

ここに　$G_r = \dfrac{D^3 \cdot \beta \cdot g \cdot \Delta t}{\nu^2}$　Grashof 数で

D＝球の直径　m
β＝流体の熱膨張率　1/°C
g＝重力の加速度　m/s²
Δt＝伝熱面と流体の温度差　°C
ν＝流体の動粘度　m²/s

である，流体温度 －25～－10°C の場合につき⑤式より N_u を求め平均熱伝達率 h_m を計算すると 5.4～6.8 Kcal/m²h°C となり，第2表に示す実験値 10.59Kcal/m²h°C より小さく約60％の値となる。これらの要因を検討するため次の近似式を利用して，凍結所要時間を計算し実験値と比較した。

球状食品を凍結点 －1°C から －15°C まで冷却して凍結を完了させるのに要する時間 Θ_f,(－15) は次の式で[3] 与えられる。

$$\Theta_f,(-15) = \frac{\omega(105.0 + 0.42 t_a)}{11.3\lambda'(-1 - t_a)} \cdot a\left(a + \frac{3.7\lambda'}{h}\right) \cdots\cdots\cdots ⑥$$

ここに　ω＝食品の単位体積当りの水分量　kg/m³
t_a＝冷却媒体の温度　°C

a＝球状食品の半径 m
λ'＝食品の凍結後の熱伝導率 kcal/mh°C
h＝食品表面と冷却媒体との間の熱伝達率 kcal/m²h°C

とし，λ' の値は食品成分表[6] により田中の式[7] から算出して $\lambda'=1.94$ kcal/m²h°C とした。また -5°C まで凍結するに要する時間 $\Theta_{f_1}(-5)$ は $\Theta_f(-5) \fallingdotseq 0.75\,\Theta_f(-15)$ と近似的[3] に与えられるので，実験値から求めた熱伝達率 h＝10.59 kcal/m²h°C を用いて風速 0 の場合の凍結所要時間を計算して第 3 表に示し実験値と比較した。⑤式より求めた熱伝達率を使って⑥式から凍結時間を計算すると第 3 表の計算値は約 1.6 倍大きくなる。平井ら[4,5] は豆腐，バター等の凍結実験において凍結所要時間の理論値が実験値の 1.6～2.2 倍大きくなり，実際には理論値より可なり早く凍結が完了することを報じている。

第 3 表 自然対流の時の計算値と実験値の比較

t_r °C	計算値		実験値
	$\Theta_{f_1}(-15)$	$\Theta_{f_1}(-5)$	$\Theta_{f_1}(-5)$
−10.75	388.9	254.2	203.0
−12.25	291.9	218.9	170.0
−15.50	223.4	167.5	126.0
−20.00	167.2	125.4	94.5
−25.00	129.5	97.1	74.0

これらの例からも本実験での凍結所要時間は当を得たものと考えられる。今後は凍結生あんの保存と解凍および比熱，熱伝導率など熱特性についても研究を進める必要があるものと考える。最近の冷凍食品は −18°C 以下に冷凍することが常識となっているので，凍結前処理の工程としてこの様な外気による冷凍を作業工程の中に合理的に組込むことも，エネルギー対策の上から考えるべきである。おわりに外気温度の貴重なデータを提供して戴いた本学開発土木工学の古谷将教授に謝意を表します。

要 約

生あんを球状に成形して寒冷外気により凍結させ，次の実験結果を得た。

1) 直径 30 mm と 45 mm の球状生あんを，風温 −6.0～−25.0°C，風速 0～13.0 m/s の条件下で凍結させた結果，−1°C から −5°C までの凍結所要時間は 10～60 min であった。

2) 凍結所要時間から求めた平均熱伝達率 h_m は近似計算により次の式で示される。

$$\frac{h_m D}{\lambda} = 2 + 0.89\,R_e^{1/2} P_r^{1/3}$$

但し $1.4\times10^3 < R_e < 4.4\times10^4$

参 考 文 献

1) 源生一太郎： 化学技術と食品工学． 化学工業社 p. 183, 1971.
2) 日本機械学会： 伝熱工学資料（改訂2版）． p. 46, 1971.
3) 源生一太郎： 食品冷凍テキスト． 日本冷凍協会 p. 127, 1969.
4) 平井英二・小森友明： 食品冷凍の伝熱的解析． ケミカルエンヂニアリング Vol, **16** No, 1 p. 78, 1971.
5) 小森友明・平井英二： 食品冷凍への Neuman 問題の応用． 化学工学 Vol. **33** No. 1 p. 74, 1969.
6) 科学技術庁： 日本食品標準成分表 1971.
7) 田中和夫： プラスチック製凍結パンと耐水ボール箱による凍結実験． 冷凍 Vol. **42** No. 474 p. 2～10 1967.

Summary

As basic research on the freezing of bean jam (Azuki-an Fresh), the mechanism of heat transfer from the frozen material and freezing times were investigated.

As the freezing medium, atomospheric cold air was introduced into experimental apparatus shown in Fig. 3.

The cold chamber was maintained at a temperature range of $-5°C$ to $-25°C$, with cold air velocities ranging from 1.0 m/s to 13 m/s.

Products were formed in two spheres of different sizes with diameters of 30 and 45 mm respectively.

The results are summarized as follows.

1) The time required to freeze the center of the sphere from $-1°C$ to $-5°C$ was from 10 minutes to 60 minutes as shown in Table 2.

2) Heat transfer coefficient 'h' at the surface of the sphere was calculated from the freezing time and expressed in term of dimentionless parameters according to the equation.

$$\frac{hD}{\lambda} = 2 + 0.89\, R_e^{1/2} P_r^{1/3}$$

where ;

D = diameter of sphere

λ = thermal conductivity of cold air

R_e = Reynolds Number

P_r = Prandtle Number