

## 曲げ荷重により切断した凍結魚肉の 切断面角度の予測

岡本 清\*, 羽倉義雄, 鈴木寛一, 久保田清

Prediction of Cut Surface Angle of the Frozen Fish by Bending

Kiyoshi Okamoto\*, Yoshio Hagura, Kanichi Suzuki and Kiyoshi Kubota

*Faculty of Applied Biological Science, Hiroshima University, 1-4-4 Kagamiyama,  
Higashihiroshima-shi, Hiroshima 739-8528*

*\*Central Research Institute, Maruha Co., 16-2, Wadai, Tsukuba-shi, Ibaraki 300-4295*

We have proposed a new cutting method (cryo-cutting method) in which a frozen fish is cut by applying the 3-point bending force, instead of a band saw in the conventional cutting method using. We have already reported that the cutting destruction of fish meat occurred in two typical destruction modes of "the destruction across the muscle fiber" and "the destruction along the muscle fiber" when frozen fish are cut by the new method. The frequency of these two destruction modes was dependent on muscle fiber orientation angle ( $\theta_f$ ). In order to obtain the accurate cut section of frozen fish, it is necessary that only "the destruction across the muscle fiber" would be developed. In this paper, we tried to predict the range of muscle fiber orientation angle for yielding only "the destruction across the muscle fiber", based on the assumption the fish muscular tissue is the unidirectional composite material strengthened with the muscle fiber. By modifying the fracture theory of the unidirectional composite material strengthened in the fiber, we proposed a prediction equation for the destruction mode in 3-point bending fracture. Using the equation and the bending fracture stress of test pieces at  $\theta_f=0^\circ$  and  $90^\circ$  ( $S_0$  and  $S_{90}$ ), we estimated the range of muscle fiber orientation angle only for "the destruction across the muscle fiber" in order to prove the effectiveness of the equation, three-point bending test of frozen tuna muscle was carried out at  $-70$ ,  $-100$  and  $-130^\circ\text{C}$  and the generation frequency of each destruction mode was measured. The following results were obtained. (1) At all the temperatures tested, only "the destruction across the muscle fiber" was generated muscle fiber orientation between  $\theta_f=0^\circ$  and  $20^\circ$ . (2) The frequency of each destruction mode measured in the experiments agreed with the predicted at all the temperature tested, when the mean value of bending fracture stress ( $S$ )  $\pm$  double of the standard deviation ( $\sigma$ ),  $S_{0(\text{mean})} \pm 2\sigma_0$  and  $S_{90(\text{mean})} \pm 2\sigma_{90}$ , were used for the prediction calculation.

(Received Sep. 6, 2001 ; Accepted Jan. 31, 2002)

凍結食品材料（特に冷凍マグロ）を鋸を用いて切断することにより発生する問題（切り屑の発生、またそれに伴う肉粉末を含む洗浄排水の発生、作業の危険性など）を回避するための食品の加工方法として、3点曲げ荷重により切断を行う低温切断法を著者らは提案し、切断を良好に行うことができる操作条件の検討を行ってき

た<sup>1)</sup>。

前報<sup>1)</sup>ではキハダマグロの赤身肉を直方体状に切り出した試験片の3点曲げ試験を行い、 $-70$ 、 $-100$ 、 $-130^\circ\text{C}$ に凍結した試験片の破壊様式が、筋線維配向角度  $\theta_f$ （試験片の長さ方向と筋線維配向方向とのなす角 図1 (a)）に依存し、 $\theta_f=30^\circ$ 付近を境として「垂直切断」

広島大学生物生産学部（〒739-8528 広島県東広島市鏡山1-4-4）

\* マルハ株式会社中央研究所（〒300-4295 茨城県つくば市和台16-2）

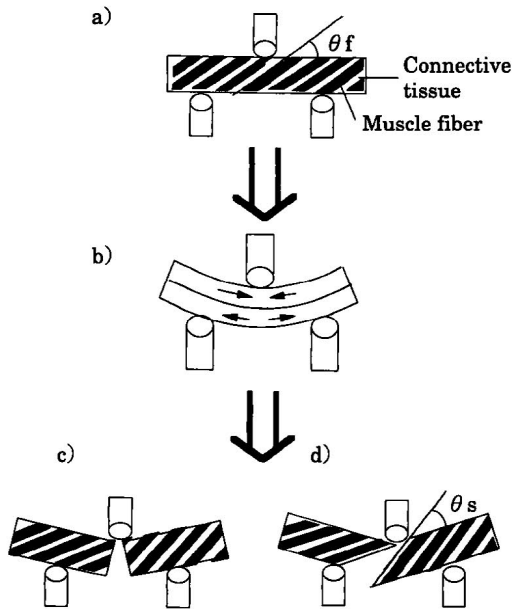


Fig. 1 The description of the test piece

- (a) Before applying 3-point bending force ;
- (b) The two components of the force which arises in the test piece ;
- (c) The destruction mode of "the destruction across the muscle fiber" ;
- (d) The destruction mode of "the destruction along the muscle fiber".

(筋線維を断ち切り破断面が試験片の長さ方向に垂直な切断 図 1 (c))と「平行切断」(筋線維を断ち切らず破断面が筋線維の配向角度に平行な切断 図 1 (d))とに分かれることを明らかにした。さらに冷凍サバを用いて、実際に魚体の輪切り試験を行ったところ、「垂直切断」が起こり、輪切り加工が可能であることも確認した。

一般に食品材料を切断する場合(例えばマグロのサク取りなど)には、その商品的価値を損なわぬよう、切断面を直角にすることが必要である。低温切断法により、任意の食品材料を切断面が直角になるように切断するためには、個々の食品材料において「垂直切断」が起こる筋線維配向角度を調べ、その範囲に応じて曲げ荷重を加える方向を変化させる必要がある。従って、この切断方法を広く適用していくためには、「垂直切断」が起こる筋線維配向角度の範囲を、容易に予測できる方法が必要となる。

そこで本論文では、曲げ荷重下での凍結魚肉における

「垂直切断」が起こる筋線維配向角度を容易に予測する方法を明らかにすることを目的とした。具体的には、凍結魚肉の構造を一方向強化材料<sup>2)</sup>と仮定し、3点曲げ荷重下における切断様式の筋線維配向角度  $\theta_f$  依存性の予測方法として、一方向強化材料の引張荷重下での破壊理論を修正して利用する方法を提案した。さらに提案した予測方法について、その精度を確認するために、凍結マグロ赤身肉試験片の3点曲げ試験の結果と予測結果との比較を行った。

## 実験方法

### 1. 試料

試料には凍結キハダマグロ [*Thunnus albacares* (Bonnaterre)] の赤身肉を用いた。赤身肉は入手後直ちに  $-5^{\circ}\text{C}$  程度まで昇温させ、凍結した状態のまま 40 mm (長さ)  $\times$  15 mm (幅)  $\times$  15 mm (厚さ) の直方体状に切り出した。この際、筋線維の配向角度  $\theta_f$  (試験片を側面から見た場合に筋線維の配向方向と試験片の長さ方向との

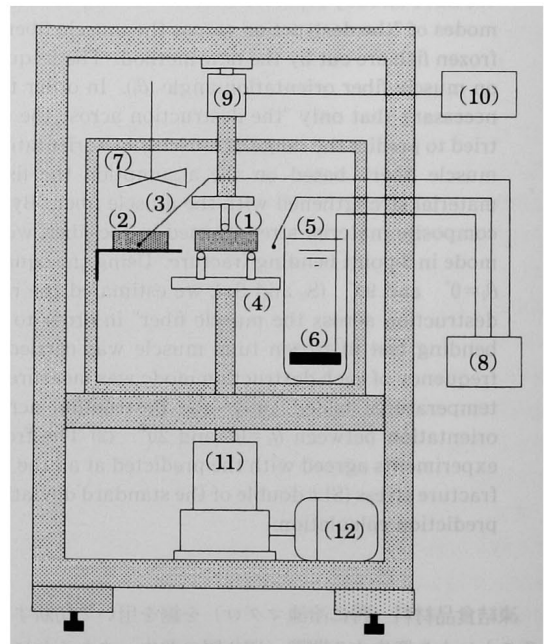


Fig. 2 Schematic diagram of the experimental cutting apparatus

- (1) Test piece, (2) Dummy test piece for measuring the test piece temperature, (3) Thermocouple, (4) Jigs, (5) Liquid nitrogen, (6) Heater, (7) Agitator, (8) Thermoregulator, (9) Load cell, (10) recorder, (11) Ball jack, (12) Motor.

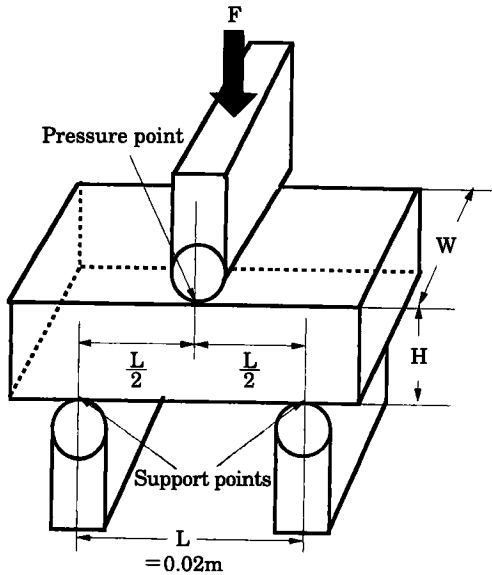


Fig. 3 The jigs for cutting test by 3-point bending

なす角度)を $0^\circ \leq \theta_f \leq 90^\circ$ となるようにした(図1(a)). 切り出した試験片は、保存中の乾燥を防止するため、ポリ塩化ビニリデン製のラップで包み、 $-40^\circ\text{C}$ の冷凍庫内で、実験に使用するまで保存した。

### 2. 曲げ切断試験機

凍結魚肉の3点曲げ試験には、試作した材料試験機を用いた(図2)。試験機には、液体窒素をヒーター出力により強制的に沸騰蒸発させ、発泡スチロール製の試験室内容積の温度を制御した。

図3に3点曲げ切断試験用の器具と試験片の寸法を示した。曲げ切断試験では、試験片を上側の荷重点、下側の2つの支点により挟み、試験片に曲げ荷重Fを加え狭めることにより変形させる構造となっている。

### 3. 実験手順

$-40^\circ\text{C}$ 保管の試験片を取り出し、曲げ切断試験機の支点上に載せ、器具および試験片を試験温度( $-70$ 、 $-100$ 、 $-130^\circ\text{C}$ )まで冷却した。温度測定用のダミー試験片の中心温度が試験温度に達した後、約30分間試験温度で保持し、その後、3点曲げ試験を行った。変形速度は $8\text{mm}/\text{min}$ とし、試験片が完全に切断するまで曲げ荷重を加え続けた。

$\theta_f=0^\circ$ と $90^\circ$ の試験片については、切断時の荷重から破壊応力S[Pa]を算出した。算出は(1)式<sup>5)</sup>に従った。

$$S = \frac{3FL}{2WH^2} \quad (1)$$

ここで、Fは切断時に荷重点にかかった荷重[N]、Lは支点間の距離[m]で今回は $0.02\text{m}$ とした。W、Hはそれぞれ試験片の幅[m]、高さ[m]である(図3)。

また、切断した試験片の切断面角度 $\theta_s$ (試験片を側面から見た場合の、切断方向と試験片の長さ方向とのなす角度;図1(d))を、分度器を用いて測定した。 $\theta_s$ は筋繊維の配向角度 $\theta$ と同様に、切断面が試験片の長さ方向に垂直な場合を $90^\circ$ とし、 $\theta_s=\theta_f$ の場合を「平行切断」が起こったとし、 $\theta_s \neq \theta_f$ の場合「垂直切断」が起こったとした。この測定結果を基に(2)式により、 $\theta_s \neq \theta_f$ の事象即ち「垂直切断が起こった割合」を算出した。

「垂直切断が起こった割合」=

$$\frac{(\text{各}\theta_f\text{において}\theta_s \neq \theta_f\text{であった試験片数})}{(\text{各}\theta_f\text{の全試験片数})} \quad (2)$$

### 破壊挙動の解析方法

#### 1. 凍結魚肉の一方向強化材料モデル

本研究では、凍結魚肉の構造(図4(a))を、結合組織の内部で魚体の長さ方向に平行に筋線維が配向した一方向強化材料(図4(b))とみなし、解析を行うこととした。一方向強化材料とは、マトリクス内部に一定方向に繊維を配向させることにより応力を高めた複合材料のことである(図4(c))。このような構造をとることにより、繊維の長さ方向の破壊応力は向上するが、繊維に垂直な方向の破壊応力は向上しないか、あるいは低下する。すなわち一方向強化材料の破壊応力は、繊維の配向角度に依存する。

#### 2. 引っ張り荷重下における一方向強化材料の破壊理論(最大応力説)

一方向強化材料の引っ張り荷重下での破壊理論は、現在約10種類近くが提案されている<sup>2)</sup>。本研究ではその中でも理論的に単純で、適応可能な範囲が広いと考えられる「最大応力説」を修正することで、3点曲げ荷重下の試験片の切断様式の筋線維配向角度 $\theta$ 依存性を予測できると考えた(ここでは「最大応力説」について簡単に説明する)。

一方向強化材料を、繊維の配向方向に対して角度 $\theta$ をなす方向に引っ張った場合には、繊維の切断を伴う「縦方向破壊」、繊維と平行な方向に働く応力によりマトリクスが破壊する「せん断破壊」、繊維と垂直な方向の応力によりマトリクスが破壊する「横方向破壊」の3種類の破壊様式が想定され、各々の破壊様式における応

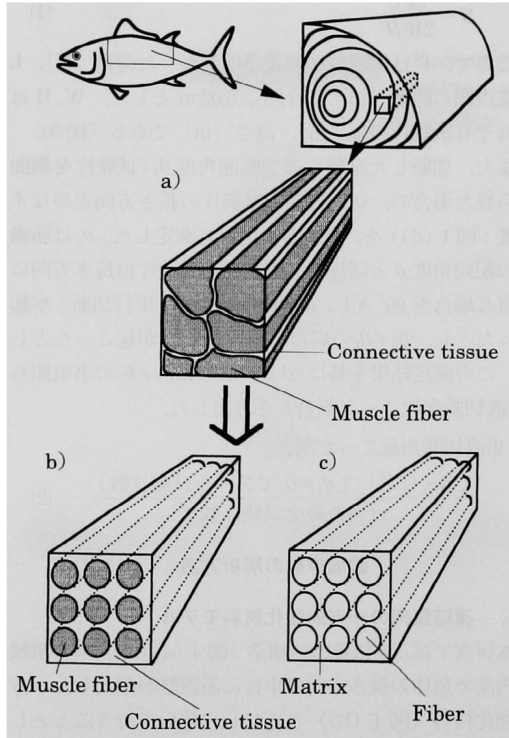


Fig. 4 The structural replacement of the fish muscular tissue structure to the composite material model

- (a) Microscopic structure of fish muscular tissue ;  
 (b) Composite material model of fish muscular tissue ;  
 (c) Unidirectional composite material strengthened in the fiber.

力予測式は、次のように表わされる。

$$\text{(縦方向破壊)} \quad S_{\theta} = \frac{S_0^*}{\cos^2 \theta} \quad (3)$$

$$\text{(層内せん断破壊)} \quad S_{\theta} = \frac{\tau^*}{\sin \theta \cos \theta} \quad (4)$$

$$\text{(横方向破壊)} \quad S_{\theta} = \frac{S_{90}^*}{\sin^2 \theta} \quad (5)$$

ここで、 $S_0^*$  は  $\theta=0^\circ$  の場合の試験片の破壊応力 [Pa]、 $S_{90}^*$  は  $\theta=90^\circ$  の場合の試験片の破壊応力 [Pa]、 $\tau^*$  は  $\theta$  に平行な方向のせん断破壊応力 [Pa] である。繊維が任意の  $\theta$  で配向する材料を引っ張った場合、材料は (3)~(5) 式のうち  $S_{\theta}$  を最も低く与える式の様式により破壊する。

### 3. 曲げ荷重下における一方向強化材料の破壊応力予

#### 測式

曲げ荷重を受ける一方向強化材料には、中立面を境にして荷重点側に圧縮応力が、支点側に引っ張り応力がそれぞれ同じ大ききで発生する (図 1 (b))。一般に、材料の破壊応力は引張破壊応力が圧縮破壊応力よりも圧倒的に小さいため、曲げ荷重を受けた材料では、支点側の引張応力により破壊が開始し、その破壊が荷重点側に進展して切断される。今回の実験試料である凍結マグロにおいても同様の現象を確認したことから、凍結マグロの曲げ荷重による破壊現象の説明には、引張荷重下での一方向強化材料の破壊理論を一部修正することにより適用できるものと考えた。

曲げ荷重を受ける試験片の破壊応力を求めるための (1) 式を導出する際には、曲げ荷重が加わる前後において、試験片内部の平面の平行関係、直角関係が保存されるという仮定 (ベルヌーイ・オイラーの仮定)<sup>4)</sup> の下に、試験片内部ではせん断変形が発生しないことを前提としている。そこで本研究では曲げ荷重下における一方向強化材料においては、繊維の切断を伴う「縦方向破壊」と、繊維配向方向に垂直な応力により、マトリクスが破壊する「横方向破壊」のどちらかの破壊様式のみが発生し、「せん断破壊」は発生しないと仮定した。

また、凍結マグロ赤身肉の曲げ破壊において発生する破壊様式のうち、「垂直切断」は、最大応力説における「縦方向破壊」に、「平行切断」は、「横方向破壊」に対応している (図 1 (c), (d))。

以上より、任意の筋線維配向角度  $\theta_f$  を持つ凍結マグロ試験片に曲げ荷重を与えた場合には、試験片は、(6)、(7) 式のうち  $S_{\theta}$  をより低く与える方の式の様式によって破壊するといえる。

$$\text{(垂直切断)} \quad S_{\theta} = \frac{S_0}{\cos^2 \theta_f} \quad (6)$$

$$\text{(平行切断)} \quad S_{\theta} = \frac{S_{90}}{\sin^2 \theta_f} \quad (7)$$

ここで、 $S_0$  は図 1 (a) における  $\theta_f=0^\circ$  の場合の試験片の破壊応力、 $S_{90}$  は  $\theta_f=90^\circ$  の場合の試験片の破壊応力である。

#### 実験結果および考察

##### 1. 凍結マグロ赤身肉の破壊様式の $\theta_f$ 依存性の測定結果

切断面角度  $\theta_s$  の測定結果より、各試験温度における「垂直切断が起こった割合」を算出した (図 5)。

各試験温度とも、筋線維配向角度  $\theta_f$  が  $0^\circ \leq \theta_f \leq 20^\circ$  の

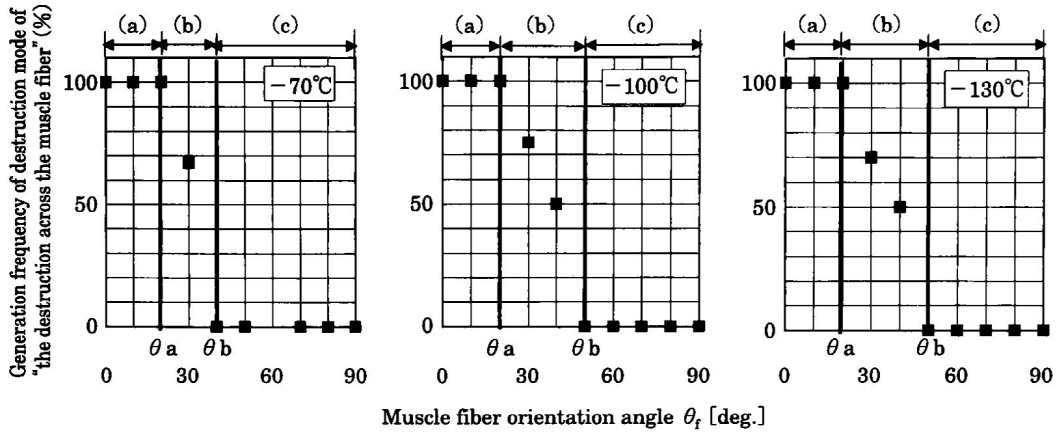


Fig. 5 Effect of muscle fiber orientation angle ( $\theta_f$ ) on the generation frequency of each destruction mode

- (a) Only "the destruction across the muscle fiber" ;
- (b) The destruction in both modes ;
- (c) Only "the destruction along the muscle fiber".

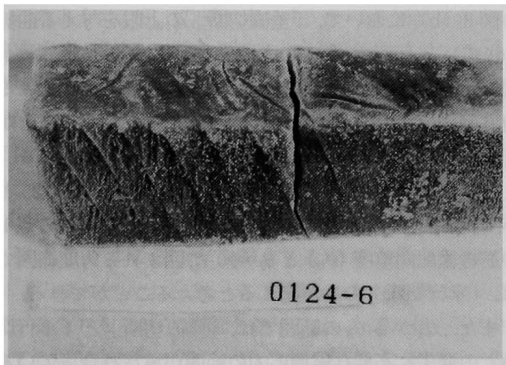


Fig. 6 Test piece of "the destruction across the muscle fiber"

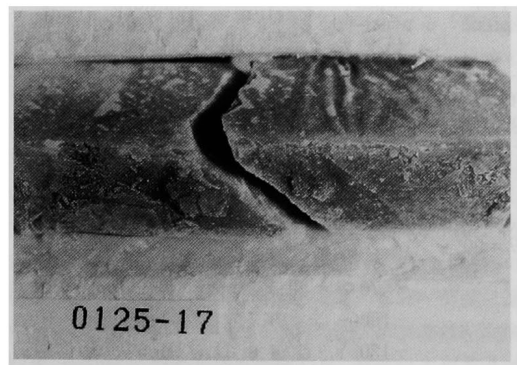


Fig. 7 Test piece of "the destruction along the muscle fiber"

場合、全ての試験片で「垂直切断」(図6)が起こった。さらに $\theta_f$ を増した場合、上記割合は低下し、 $-70^\circ\text{C}$ では $40^\circ \leq \theta_f \leq 90^\circ$ の範囲で、 $-100, -130^\circ\text{C}$ では $50^\circ \leq \theta_f \leq 90^\circ$ の範囲で0%となり、全ての試験片で「平行切断」(図7)が起こった。また、 $-70^\circ\text{C}$ における $20^\circ < \theta_f < 40^\circ$ の範囲と、 $-100^\circ\text{C}, -130^\circ\text{C}$ における $20^\circ < \theta_f < 50^\circ$ の範囲では、試験片ごとに「垂直切断」と「平行切断」のどちらか一方により切断されていた。

以上のように、凍結マグロ赤身肉が曲げ荷重により切断された際には、筋線維配向角度 $\theta_f$ に依存して、①「垂直切断」のみが起こる角度範囲、②「垂直切断」と「平行切断」の両方が起こり得る角度範囲、③「平行切断」のみ

が起こる角度範囲が存在し、その角度範囲は、試験温度により異なることが明らかとなった。

## 2. 凍結マグロ赤身肉の破壊様式の $\theta_f$ 依存性予測方法の検討

### (1) 凍結マグロ赤身肉試験片( $\theta_f=0^\circ, 90^\circ$ )の曲げ破壊応力

各試験温度( $-70, -100, -130^\circ\text{C}$ )において実測した凍結マグロ赤身肉試験片( $\theta_f=0^\circ, 90^\circ$ )の曲げ破壊応力( $S_0, S_{90}$ )の平均値( $S_{0(\text{mean})}, S_{90(\text{mean})}$ )と標準偏差( $S_0, S_{90}$ )の値を表1に示す。

$\theta_f=0^\circ, 90^\circ$ の両試験片とも、破壊応力に温度依存性が見られ、試験温度の低下とともに試験片の破壊応力は増

加した。  $\theta_f=0^\circ$  の試験片の破壊応力  $S_0$  については  $-70^\circ\text{C}$  から  $-100^\circ\text{C}$  の間で、  $\theta_f=90^\circ$  の試験片の破壊応力  $S_{90}$  については  $-100^\circ\text{C}$  から  $-130^\circ\text{C}$  の間で、大きく増加した。

(2) 予測式に代入する破壊応力 ( $S_0$ ,  $S_{90}$ ) のばらつきの影響の検討

実測した破壊応力 (表 1) を (6), (7) 式に代入し、破壊応力  $S_0$  の  $\theta_f$  依存性をプロットすることにより、予測式に代入する破壊応力のばらつきの影響を検討した。ここでは、一例として  $-70^\circ\text{C}$  の場合の検討結果を示す。

まず (6), (7) 式に  $S_0$ ,  $S_{90}$  の平均値のみを代入して、予測を行った場合の結果を図 8 (a) に示す。図 8 (a) より、  $0^\circ \leq \theta_f \leq 29.1^\circ$  の範囲では、「垂直切断」に必要な応力が

「平行切断」に必要な応力を常に下回るため、「垂直切断」が起こると予測される。一方、  $29.1^\circ \leq \theta_f \leq 90^\circ$  の範囲では、「平行切断」に必要な応力が「垂直切断」に必要な応力を常に下回るため、「平行切断」が起こると予測される。

しかし、実際には「垂直切断」と「平行切断」の両方が起こり得る  $\theta_f$  範囲 ( $-70^\circ\text{C}$ :  $20^\circ \leq \theta_f \leq 50^\circ$ ) があることから、この方法による予測は、実際の結果を反映していないことになる。

そこで、  $S_0$ ,  $S_{90}$  がそれぞれ一定のばらつきの範囲内 (平均値  $\pm \sigma$ ;  $\sigma$ : 標準偏差) に分布するものとして予測を行った結果の一例を図 8 (b) に示す。図 8 (b) では  $-70^\circ\text{C}$  での  $S_0$  の平均値 (9.4 MPa) に標準偏差 (1.0 MPa) を加えた値 (10.4 MPa) と差引いた値 (8.4 MPa) をそれぞれ (6) 式に代入しプロットした曲線 (図中の (6)', (6)" 式) と、  $S_{90}$  で同様の処理を行った値 (4.0 MPa, 2.7 MPa) を (7) 式に代入してプロットした曲線 (図中の (7)', (7)" 式) の以上 4 本の曲線から成っている。

図 8 (b) において、「垂直切断」の上限を与える曲線 ((6)' 式) と「平行切断」の下限を与える曲線 ((7)" 式) が交わる点 A の筋線維配向角度 ( $\theta_A$ ) と  $\theta_f=0^\circ$  で囲まれる角度範囲では、「垂直切断」のみが起こると考えることができる。

同様に「垂直切断」の下限を与える曲線 ((6)" 式) と「平行切断」の上限を与える曲線 ((7)' 式) が交わる点 B の筋線維配向角度 ( $\theta_B$ ) と  $\theta_f=90^\circ$  で囲まれる角度範囲では、「平行切断」のみが起こると考えることができる。

また、  $\theta_A$  から  $\theta_B$  の範囲では、「垂直切断」と「平行切断」の発生に必要な破壊応力の範囲が重なり合っている

Table 1 Average bending fracture stress and standard deviation of test pieces at  $\theta_f=0^\circ$  and  $90^\circ$

Test piece	Test temperature (°C)	Average bending fracture stress (MPa)	Standard deviation	Number of sample
		$S_0(\text{mean})$		
$\theta_f=0^\circ$	-70	9.4	1.0	5
	-100	11.4	2.5	5
	-130	12.0	2.3	5
$\theta_f=90^\circ$	-70	3.3	0.7	5
	-100	3.7	1.1	6
	-130	4.8	1.5	6

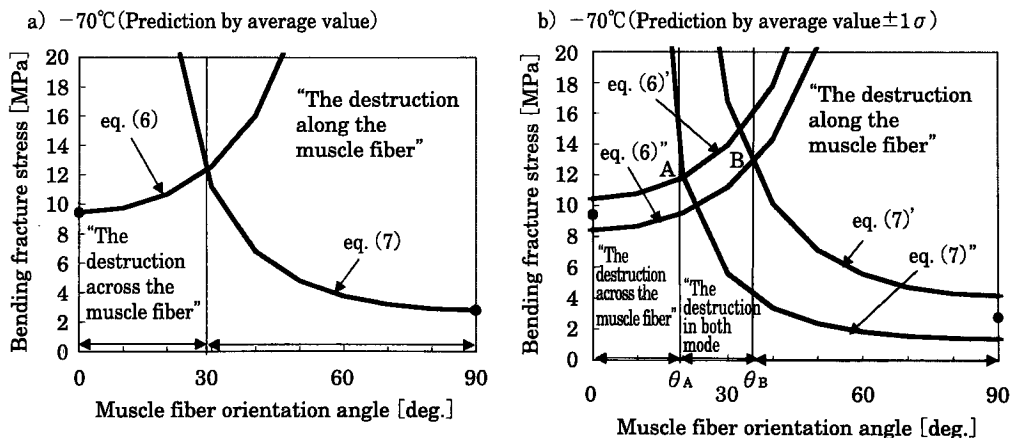


Fig. 8 Prediction of the destruction mode at  $-70^\circ\text{C}$

Table 2 Error between predicted value and measured value

Test temperature (°C)	n	$ \theta_A - \theta_a  +  \theta_B - \theta_b $		
		$ \theta_A - \theta_a $ (deg.)	$ \theta_B - \theta_b $ (deg.)	2 (deg.)
-70	1	6.81	5.49	6.15
	2	2.74	1.64	2.19
	3	1.72	2.32	2.02
-100	1	3.62	13.6	8.61
	2	2.90	6.18	4.54
	3	11.30	3.00	7.15
-130	1	5.78	11.06	8.42
	2	1.60	4.17	2.89
	3	12.37	3.56	7.97

ため、両方の切断様式が存在する可能性があるといえる。

このように、(6)、(7)式において、 $\theta_f = 0^\circ, 90^\circ$ における破壊応力にばらつきを導入して計算することにより、「垂直切断」と「平行切断」の両方の切断が発生する筋線維配向角度範囲を表現することができた。そこで本研究では、破壊様式の予測において、破壊応力の平均値にばらつきを加えて検討を行うこととした。

### (3) 破壊応力のばらつきの範囲の検討

破壊応力にばらつきを導入した予測方法において、(6)、(7)式に代入する  $S_0, S_{90}$  のばらつきの範囲はどの程度が適当であるのかを検討するため、今回実験を行った全ての温度条件 (-70, -100, -130°C) において、 $S_0, S_{90}$  の分布範囲を平均値  $\pm 1\sigma$  から  $\pm 3\sigma$  ( $\sigma$ : 標準偏差) の間で変化させ、「垂直切断」と「平行切断」の両方が起こり得る筋線維配向角度範囲 (図 8 (b) 中の  $\theta_A \sim \theta_B$  の範囲) を算出した。

$\theta_A$  と  $\theta_B$  は以下の方法により求めた。 $\theta_A$  は (6) 式の  $S_0$  に、 $S_0 + n \cdot \sigma_0$  ( $\sigma_0$ :  $S_0$  の標準偏差,  $n=1, 2, 3$ ) を代入した式と、(7)式に  $S_{90} - n \cdot \sigma_{90}$  ( $\sigma_{90}$ :  $S_{90}$  の標準偏差,  $n=1, 2, 3$ ) を代入した式の各々で算出される破壊応力  $S_\theta$  が等しくなる (曲線同士が交わる) 点の筋線維配向角度である。従って次式が成り立つ。

$$\frac{(S_0 + n \cdot \sigma_0)}{\cos^2 \theta_A} = \frac{(S_{90} - n \cdot \sigma_{90})}{\sin^2 \theta_A} \quad (8)$$

$$\sin \theta_A = \sqrt{\frac{(S_{90} - n \cdot \sigma_{90})}{(S_0 + n \cdot \sigma_0) + (S_{90} - n \cdot \sigma_{90})}} \quad (9)$$

B についても同様に次式が成り立つ。

$$\frac{(S_0 - n \cdot \sigma_0)}{\cos^2 \theta_B} = \frac{(S_{90} + n \cdot \sigma_{90})}{\sin^2 \theta_B} \quad (10)$$

$$\sin \theta_B = \sqrt{\frac{(S_{90} + n \cdot \sigma_{90})}{(S_0 - n \cdot \sigma_0) + (S_{90} + n \cdot \sigma_{90})}} \quad (11)$$

そこで (9)、(11) 式より、「垂直切断」のみが起こる上限の筋線維配向角度  $\theta_A$  と、「平行切断」のみが起こる下限の筋線維配向角度  $\theta_B$  を求め、実測値 (図 5 における  $\theta_a$  と  $\theta_b$ ) との差を  $n=1, 2, 3$  の各条件について比較した。結果を表 2 に示す。予測値と実測値との差の絶対値を平均した値 (予測誤差) を比較すると、-100°C と -130°C では  $n=2$  の場合が最も予測誤差が小さくなった。-70°C では  $n=2$  と  $n=3$  の場合において予測誤差が小さくなった。従って、切断様式の予測に際して  $S_0, S_{90}$  の分布範囲を平均値  $\pm 2\sigma$  とすることで、切断様式の予測が可能となることが明らかとなった。

## 要 約

本研究では曲げ荷重下での凍結魚肉における「垂直切断」が起こる範囲を容易に予測する方法を明らかにすることを目的とした。

凍結マグロ赤身肉を試料として、 $\theta_f$  の異なる試験片を作成し、-70, -100, -130°C で 3 点曲げ試験を行い、試験片の切断様式 (「垂直切断」が起こる割合) を測定した。また  $\theta_f = 0^\circ, 90^\circ$  の試験片については破壊応力を測定し、切断様式の予測に利用した。次に一方向強化材料の引張荷重下での破壊理論 (最大応力説) を曲げ荷重に適用できるよう修正し、試験片の切断様式の筋線維配向角度 ( $\theta_f$ ) 依存性の予測方法を提案した。さらにこの方法による予測結果と凍結マグロによる切断様式の測定結果との比較より、予測式の適用の可能性について検討を行った。その結果以下のことが明らかとなった。

(1) 試験片の切断試験の結果、-70°C における  $20^\circ < \theta_f < 40^\circ$  の範囲と、-100°C, -130°C における  $20^\circ < \theta_f < 50^\circ$  の範囲では、「垂直切断」と「平行切断」の両方が起こり得ることが明らかとなった。またこれらの切断挙動には温度依存性が見られた。

(2) 破壊応力測定の結果、 $\theta_f = 0^\circ, 90^\circ$  の試験片とも、破壊応力の温度依存性が見られ、試験温度の低下とともに試験片の破壊応力は増加した。

(3) 切断様式の予測において、 $\theta_f = 0^\circ, 90^\circ$  における破壊応力のばらつきを導入して計算することにより、「垂直切断」と「平行切断」の両方が起こり得る筋線維配向

角度範囲を表現することが出来た。そこで破壊様式の予測は、破壊応力の標準偏差範囲を考慮して行う必要があることが明らかとなった。

(4)  $\theta_f=0^\circ, 90^\circ$ における破壊応力の分布範囲を平均値±(標準偏差×2)の範囲として予測することで、実測値に最も近似した切断様式の予測が可能であった。

#### 文 献

- 1) 岡本 清, 羽倉義雄, 鈴木寛一, 久保田清: 食科工, **43**, 1035 (1996).
  - 2) D. ハル: 複合材料入門 (培風館) p. 149 (1984).
  - 3) 岡本 清, 羽倉義雄, 鈴木寛一, 久保田清: 平成 6 年度日本冷凍協会学術講演会講演論文集, p. 89 (1994).
  - 4) 関谷 壮, 角誠之助: 材料力学概要 (明文書房), p. 90 (1971).
  - 5) 須藤 一: 材料試験法 (内田老鶴園), p. 63 (1976).
- (平成 13 年 9 月 6 日受付, 平成 14 年 1 月 31 日受理)