鮮魚用刃物の切れ味計測のシステム開発

葉 紅 偉, 矢 田 貞 美*

(2000 年 7 月 24 日受付, 2000 年 12 月 8 日受理)

東京水産大学海洋生産学科

Development on Measuring System of Cutting Performance for Fresh Fish Knife

Hongwei Ye, Sadami Yada*

Department of Marine Science and Technology, Tokyo University of Fisheries, Tokyo 108-8477, Japan

The theory of the cutting resistance of a knife that shows cutting performance is examined, and a new measuring system for the cutting resistance is developed. The cutting resistance was in inverse proportion to the rate of horizontal to vertical cutting speed, and that of the double-edge knife became much bigger than that of the single-edge knife following an increase of the vertical cutting speed. In the single-edge knife, the horizontal cutting speed contributed much more to the cutting resistance than vertical speed, but in the double-edge knife, it was almost the same. The single-edge knife is more suitable than the double-edge knife for cutting sashimi because crushing of muscle fibers of the fish meat is minimal. This measuring system simulated hand cutting by knife and could measure cutting performance to a high level of precision.

キーワード：切れ味，切断抵抗，刃物，刃先角度，計測システム

刺し身の作りでは，刃物による魚肉組織の圧砕を回避して，うまみ成分や栄養分の滲出を防止し，素材の持味を生かすためには，鋭利な切れ味が求められる。¹⁾ 切れ味が良好な刃物は，研磨しやすく，初期の切れ味と耐久性がよく，かつ弾力があって折れ難いなどの要件を具備する必要がある。²⁾ 従来の切れ味の良否は使用者の感覚によって判断され，切断時における使用者の感覚に基づく切れ味を“感覚切れ味”としていた。³⁾ この感覚切れ味は，使用者の主観および経験の差などにより，定量化しにくい。⁴⁾ このため，1)切断時における刃物が受ける抵抗を“機械切れ味”とする方法，³⁾ 2)シャルピー型切れ味試験機による糸の切断時における刃物の振り上げ角度を切れ味とする方法，^{5,6)} 3)簡易切れ味試験機による積層紙束の切断時における切断紙数，4)本多式切れ味試験機による紙束への切込み深さなどを切れ味とする方法が開発された。^{7,8)} しかし，これら従来の機械切れ味に関する計測方法は，1)水平・垂直両方向の抵抗が同時に刃物にかかる実際の抵抗と異なり，切断時における刃物の水平・垂直両方向の抵抗を個別に計測して，その合力を切れ味としていた，2)シャルピー型切れ味試験機は衝撃押切りなので実際の包丁捌きのシミュレーション

機構としては不適當である，3)簡易切れ味試験機および本多式切れ味試験機は，定量化しやすい紙を切断物としたので，実際の感覚的な切れ味と必ずしも対応していない。³⁾

畜肉および野菜用刃物の洋包丁，中華包丁などは煮る，焼くなどを主体とする料理に使用され，切口の繊細さを必要としないのではほぼ両刃に研磨されているが，生鮮魚肉用刃物の和包丁は繊細な切れ味を持たせるためほとんど片刃に研磨されている。そのため，魚肉の切れ味を評価するには，微細な切れ味を計測する必要がある。本研究では，以上の背景および問題点に着目し，切断時に刃物が受ける切断抵抗を切れ味とし，魚包丁の切れ味に関する計測装置のシステム開発および計測精度の向上を目的とした。このために，水平・垂直両方向および切断速度を単独，または同時に両者の可変可能な，使用者の感覚切れ味に近似する切れ味の計測システムを新しく構成試作した。次に，本システムを供試して魚包丁の片刃および両刃の水平・垂直両方向の切断速度が切れ味に及ぼす影響について検討した。なお，本論文では，この切断抵抗が小さいほど切れ味が良いものと定義した。

* Tel : +81-3-5463-0482, Fax : +81-3-5463-0492, E-mail : yada@tokyo-u-fish.ac.jp

試料および方法

実験材料 所要供試量の均質な魚肉は入手し難いので、再現性の観点から魚の肉質と近似し、かつ常温下で物理性が変質し難いゴム板（縦9×横88×長さ195 mm、硬度 25 Hs JIS C, 28 Hs JIS C, 換算ビッカース硬度約 160 HV, 180 HV）を試作し被切断物とした。（以降、擬似魚肉と称する。）また、擬似魚肉を魚肉と比較するためマグロブロック肉（硬さ 12 Hs JIS C, サイズ 40×40×150 mm）を供試した。押切りおよび押し引き切りにおいて繊細な切れ味を発揮し易い市販の鮮魚用和包丁（片刃, 刃長 179 mm, 刃厚 3.75 mm, 刃先角度 14.1°; 両刃, 刃長 175 mm, 刃厚 1.85 mm, 刃先角度 17.6°）を供試した。

実験方法 魚包丁の切れ味を測定する試作計測システムを供試して、繰返し実験数 3, 水平・垂直両方向の切断速度を 10 から 40 mm/s まで 5 mm/s 間隔の 7 水準 2 因子の要因に分け実験を行った。前記のとおり魚の肉質に近似するゴム板を擬似魚肉として切断時における切断抵抗を計測した。なお、実験時の室温は約 18°C, 湿度は約 58% であった。

切れ味の計測システム 本システムは切断制御機構、計測装置本体、ひずみ計測機構およびデータ採取処理機構などより構成される。切断制御機構は、まな板の移動

速度および移動距離を制御するパソコン（NEC PC-9801vm）および制御盤（日東 CCD-11）などより構成される。

Fig. 1 に切れ味の計測装置本体の概略を示す。計測装置本体は架台、刃物取付部、タイミングベルト（椿本 879P3M 型および 260P5M 型）、滑走レールのガイド（THK RSR15WX 型）、2 個のステッピングモータ（オリエンタル UPD566TG10-B 型および UPD596TG10-B 型）およびタイミングプーリ（椿本 32P3M10BFA 型）などより構成される。本装置では、水平・垂直両方向の切断速度は 1 から 150 mm/s まで最小ディビジョン 1 mm/s 間隔で、水平・垂直両方向の可動範囲は 1 から 60 mm まで最小ディビジョン 1 mm 間隔で制御できる。

切断抵抗を計測するひずみ計測機構は 3 軸センサ（共和電業 LSM-BS 型）、3 個のブリッジボックス（共和電業 DB-350）および動ひずみ測定器（共和電業 DPM-612, 計測感度 0.2 V）などより、またデータ処理機構は A/D 変換ボード（CANOPUS ADX-98E）およびデータ採取用パソコン（NEC PC-9801）などより構成される。3 軸センサ 7 はまな板 6 の下部に設置されている。

切れ味の計測方法 包丁捌きをシミュレートするため、切断部分の刃先線（刃渡り）と水平面との傾斜角が 10°になるように刃物取付部に刃物固定用金具およびネ

A : Front view

B : Side view

Fig. 1. Outline of apparatus for measuring cutting performance. 1, platform; 2, timing pulley; 3, metal fittings to fix knife; 4, knife; 5, ditch to protect cutting edge; 6, chopping board; 7, 3-axis sensor; 8, stepping motor; 9, stepping motor.

Fig. 3. Forces acting on single-edge knife by push and pull cutting. The notation of the X, Y and Z-axis is based upon the 3-axis sensor. F_{SE} , resistance of the cutting edge; N_{S1} , reacting force of the surface of cutting edge; f_{SE} , dynamic friction resistance of the cutting edge; f_{S1} , dynamic friction resistance of the surface of cutting edge; f_{S2} , viscosity resistance of the surface of cutting edge; f_{S3} , viscosity resistance of the abdomen; f_{S4} , viscosity resistance of the back of cutting edge; T , repulsion force of the back of cutting edge in X-axis direction caused by the moment because of the reacting force of the surface of cutting edge; V_{SY} , the cutting speed of the horizontal direction; V_{SZ} , the cutting speed of the vertical direction; γ_s , cutting edge angle.

抵抗, すなわち切断方向の合力 F_S は式(3)で示される。

$$F_S = f_{S1} \cdot \cos \gamma_s + f_{S2} \cdot \cos \gamma_s + f_{S3} + f_{S4} + N_{S1} \cdot \sin \gamma_s + f_{SE} \cdot \sin \left[\tan^{-1} \left(\frac{V_{SY}}{V_{SZ}} \right) \right] + F_{SE} \quad (3)$$

また, 刃先の動摩擦力 f_{SE} および刃先表面の垂直抗力 N_{S1} による動摩擦力 f_{S1} は式(4)および式(5)で示される。

$$f_{SE} = \mu \cdot F_{SE} \cdot \cos \left[\tan^{-1} \left(\frac{V_{SY}}{V_{SZ}} \right) \right] \quad (4)$$

$$f_{S1} = \mu \cdot N_{S1} \quad (5)$$

刃先表面と魚肉の粘性抵抗 f_{S2} , はらと魚肉の粘性抵抗 f_{S3} および刃先裏面と魚肉の粘性抵抗 f_{S4} は, 式(6), 式(7)および式(8)で示される。

$$f_{S2} = \eta \cdot \frac{\rho \cdot (V_{SY}^2 + V_{SZ}^2)}{2 \cos \gamma_s} \cdot A_{S1} \quad (6)$$

$$f_{S3} = \eta \cdot \frac{\rho \cdot (V_{SY}^2 + V_{SZ}^2)}{2} \cdot A_{S2} \quad (7)$$

$$f_{S4} = \eta \cdot \frac{\rho \cdot (V_{SY}^2 + V_{SZ}^2)}{2} \cdot A_{S3} \quad (8)$$

ただし, μ は刃物と魚肉間の動摩擦係数, η は魚肉の粘性係数, ρ は魚肉の密度, A_{S1} , A_{S2} および A_{S3} は刃先表面, はらおよび刃先裏面と魚肉との接触面積である。

式(4)から式(8)を式(3)に代入して整理すると, 片刃の全切断抵抗 F_S は式(9)で示される。

$$F_S = \eta \cdot \frac{\rho \cdot (V_{SY}^2 + V_{SZ}^2)}{2} \cdot (A_{S1} + A_{S2} + A_{S3}) + (\mu \cdot \cos \gamma_s + \sin \gamma_s) \cdot N_{S1} + \left\{ 1 + \frac{1}{2} \mu \cdot \sin \left[2 \tan^{-1} \left(\frac{V_{SY}}{V_{SZ}} \right) \right] \right\} \cdot F_{SE} \quad (9)$$

刃先表面の粘性抵抗によって刃先裏面方向に生じるモーメントも X 軸方向の反力 T が生じるので, X 軸方向の刃物の受ける力が釣り合うものとする, 式(10)が成立する。

$$N_{S1} \cos \gamma_s - f_{S1} \sin \gamma_s - f_{S2} \sin \gamma_s - T = 0 \quad (10)$$

この反力 T は, 左辺の X 軸方向の分力に比べて極めて微小なので, 解析を容易にするために割愛した。式(5)および式(6)を式(10)に代入して整理すると, 刃先表面の垂直抗力 N_{S1} は式(11)で示される。

$$N_{S1} = \frac{\eta \cdot \rho \cdot (V_{SY}^2 + V_{SZ}^2) \cdot A_{S1} \cdot \tan \gamma_s}{2 (\cos \gamma_s - \mu \cdot \sin \gamma_s)} \quad (11)$$

式(11)を式(9)に代入すると, 片刃の全切断抵抗 F_S は式(12)で示される。

$$F_S = \eta \cdot \frac{\rho \cdot (V_{SY}^2 + V_{SZ}^2)}{2} \times \left(\frac{1 + \tan^2 \gamma_s}{1 - \mu \tan \gamma_s} \cdot A_{S1} + A_{S2} + A_{S3} \right) + \left\{ 1 + \frac{1}{2} \mu \cdot \sin \left[2 \tan^{-1} \left(\frac{V_{SY}}{V_{SZ}} \right) \right] \right\} F_{SE} \quad (12)$$

なお, 魚肉は筋肉繊維, 骨および腱などで構成されるが, 骨および腱を含有する魚肉の切断抵抗については両刃の叩き切りで検討するものとし, 押し引き切りでは均質な魚肉を対象とする。均質な魚肉は, 筋肉繊維の集合体なので⁹⁾ 刃先の抵抗 F_{SE} はほぼ筋肉繊維から受ける抵抗と考えられる。筋肉繊維は弾性のある柔軟体であり, 捻り変形により剪断されるものと考えられる。ここで, 筋肉繊維の断面を円形とし, 魚肉は i 行 j 列の均質な筋肉繊維が垂直方向に切断されるものと仮定した。Fig. 4 に第 i 行および第 j 列目における筋肉繊維単位当たりの剪断力と捻り力で合成された力 F_{ij} (以降, 捻り剪断力と称する。) によるモーメント N_{ij} (以降, 捻り剪断モーメントと称する。) と水平・垂直方向の切断速度の関係を示す。捻り剪断モーメント N_{ij} が一定値以上になると筋肉繊維は剪断されるが, この筋肉繊維単位当たりの捻り剪断モーメント N_{ij} は式(13)で示される。

Fig. 4. Twist shearing moment of muscle fiber differs with cutting speed of horizontal and vertical directions. F_{ij} , the twist shearing force that the No. i line and j row's muscle fiber of the fish meat caught from the cutting edge; f_{ij} , repulsion force of the dynamic friction resistance of the cutting edge that the No. i line and No. j row's muscle fiber of the fish meat caught; V_{SY} , the cutting speed of the horizontal direction; V_{SZ} , the cutting speed of the vertical direction; O , center of the section of a muscle fiber; θ , angle between the cutting direction and vertical direction; R , diameter of the section of a muscle fiber.

$$N_{ij} = \frac{1}{2} R \cdot \left[F_{ij} \cdot \sin \left(\tan^{-1} \frac{V_{SY}}{V_{SZ}} \right) + f_{ij} \right] \quad (13)$$

ただし, R は筋肉繊維径である。筋肉繊維単位当たりの刃先動摩擦力の反力 f_{ij} は, 式(14)で示される。

$$f_{ij} = \mu \cdot F_{ij} \cdot \cos \left(\tan^{-1} \frac{V_{SY}}{V_{SZ}} \right) \quad (14)$$

ただし, μ は刃物と魚肉間の動摩擦係数である。式(14)を式(13)に代入すると, 捻り剪断モーメント N_{ij} は式(15)で示される。

$$N_{ij} = \frac{1}{2} R \cdot F_{ij} \cdot \left[\sin \left(\tan^{-1} \frac{V_{SY}}{V_{SZ}} \right) + \mu \cdot \cos \left(\tan^{-1} \frac{V_{SY}}{V_{SZ}} \right) \right] \quad (15)$$

したがって, 筋肉繊維単位当たりの捻り剪断力 F_{ij} は式(16)で示される。

$$F_{ij} = \frac{2N_{ij}}{R \cdot \left[\sin \left(\tan^{-1} \frac{V_{SY}}{V_{SZ}} \right) + \mu \cdot \cos \left(\tan^{-1} \frac{V_{SY}}{V_{SZ}} \right) \right]} \quad (16)$$

また, 刃先の抵抗 F_{SE} は式(17)で示される。

$$F_{SE} = \sum_j F_{ij} = \sum_j \frac{2N_{ij}}{R \cdot \left[\sin \left(\tan^{-1} \frac{V_{SY}}{V_{SZ}} \right) + \mu \cdot \cos \left(\tan^{-1} \frac{V_{SY}}{V_{SZ}} \right) \right]} \quad (17)$$

式(17)を式(12)に代入すると, 片刃の全切断抵抗 F_S は式(18)で示される。

$$F_S = \eta \cdot \frac{\rho \cdot (V_{SY}^2 + V_{SZ}^2)}{2} \times \left(\frac{1 + \tan^2 \gamma_s}{1 - \mu \tan \gamma_s} \cdot A_{S1} + A_{S2} + A_{S3} \right) + \sum_j \left\{ 2 + \mu \cdot \sin \left[2 \tan^{-1} \left(\frac{V_{SY}}{V_{SZ}} \right) \right] \right\} \cdot N_{ij} \times \frac{1}{R \cdot \left[\sin \left(\tan^{-1} \frac{V_{SY}}{V_{SZ}} \right) + \mu \cdot \cos \left(\tan^{-1} \frac{V_{SY}}{V_{SZ}} \right) \right]} \quad (18)$$

式(18)は, 刃物と魚肉間の動摩擦係数 μ , 魚肉の粘性係数 η , 魚肉の密度 ρ , 筋肉繊維径 R , 刃先表面と魚肉との接触面積 A_{S1} , はらと魚肉との接触面積 A_{S2} , 刃先裏面と魚肉との接触面積 A_{S3} , ならびに筋肉繊維単位当たりの捻り剪断モーメント N_{ij} が一定の場合には, 押し引き切り時において片刃が受ける全切断抵抗は水平・垂直両方向の切断速度および刃先角度によって変動することを示している。片刃の全切断抵抗は刃先角度に比例することを示しており, 刺し身を作る際の包丁捌きは概して低速のため刃物と魚肉の粘性抵抗は小さく, また刃物と魚肉間の動摩擦係数 μ も小さいので, 片刃の全切断抵抗は水平方向に対する垂直方向の切断速度の比 (V_{SY}/V_{SZ}) に反比例することになる。

両刃の理論的切断抵抗 押し引き切り時における両刃が受ける力の関係を Fig. 5 に示す。ここで, 一定サイズの魚肉を押し引き切りで切断する場合, 刃先の抵抗を F_{DE} , 刃先表面の垂直抗力を N_{D1} , 刃先の動摩擦力を f_{DE} , 刃先表面の垂直抗力 N_{D1} による動摩擦力を f_{D1} , 刃先表面と魚肉の粘性抵抗を f_{D2} , はらと魚肉の粘性抵抗を f_{D3} , 水平方向の切断速度を V_{DY} , 垂直方向の切断速

Fig. 5. Forces acting on double-edge knife in cutting process. The notation of the X, Y and Z-axis is based upon the 3-axis sensor. F_{DE} , resistance of the cutting edge; N_{D1} , reacting force of the surface of cutting edge; f_{DE} , dynamic friction resistance of the cutting edge; f_{D1} , dynamic friction resistance of the surface of cutting edge; f_{D2} , viscosity resistance of the surface of cutting edge; f_{D3} , viscosity resistance of the abdomen; V_{DY} , the cutting speed of the horizontal direction; V_{DZ} , the cutting speed of the vertical direction; γ_D , cutting edge angle.

度を V_{DZ} , 刃先角度を γ_D とすると, 両刃が受ける切断方向の合力, すなわち全切断抵抗 F_D は式(19)で示される。

$$F_D = 2f_{D1} \cdot \cos \frac{\gamma_D}{2} + 2f_{D2} \cdot \cos \frac{\gamma_D}{2} + 2f_{D3} + 2N_{D1} \cdot \sin \frac{\gamma_D}{2} + f_{DE} \cdot \sin \left[\tan^{-1} \left(\frac{V_{DY}}{V_{DZ}} \right) \right] + F_{DE} \quad (19)$$

刃先の動摩擦力 f_{DE} および刃先表面の垂直抗力 N_{D1} による動摩擦力 f_{D1} は, 式(20)および式(21)で示される。

$$f_{DE} = \mu \cdot F_{DE} \cdot \cos \left[\tan^{-1} \left(\frac{V_{DY}}{V_{DZ}} \right) \right] \quad (20)$$

$$f_{D1} = \mu \cdot N_{D1} \quad (21)$$

刃先表面と魚肉の粘性抵抗 f_{D2} およびはらと魚肉の粘性抵抗 f_{D3} は, 式(22)および式(23)で示される。

$$f_{D2} = \eta \cdot \frac{\rho \cdot (V_{DY}^2 + V_{DZ}^2)}{2 \cos \frac{\gamma_D}{2}} \cdot A_{D1} \quad (22)$$

$$f_{D3} = \eta \cdot \frac{\rho \cdot (V_{DY}^2 + V_{DZ}^2)}{2} \cdot A_{D2} \quad (23)$$

ただし, μ は刃物と魚肉間の動摩擦係数, η は魚肉の

粘性係数, ρ は魚肉の密度, A_{D1} および A_{D2} はそれぞれ刃先表面およびはらと魚肉との接触面積である。

式(20)から式(23)を式(19)に代入して整理すると, 両刃の全切断抵抗 F_D は式(24)で示される。

$$F_D = \eta \cdot \rho \cdot (V_{DY}^2 + V_{DZ}^2) \cdot (A_{D1} + A_{D2}) + 2 \left(\mu \cdot \cos \frac{\gamma_D}{2} + \sin \frac{\gamma_D}{2} \right) \cdot N_{D1} + \left\{ 1 + \frac{1}{2} \mu \cdot \sin \left[2 \tan^{-1} \left(\frac{V_{DY}}{V_{DZ}} \right) \right] \right\} \cdot F_{DE} \quad (24)$$

刃先表面の垂直抗力 N_{D1} は被切断物の強さによって変動し, 刃先角度の関数である。¹⁰⁾ここで, 魚肉を切断する場合, 刃先表面の垂直抗力 N_{D1} は, 刃先角度に比例するものとする, 刃先表面の垂直抗力 N_{D1} は式(25)で示される。

$$N_{D1} = k \cdot \gamma_D \quad (25)$$

ただし, k は刃先角度による刃先表面の垂直抗力の変動係数である。

両刃で一定サイズの魚肉を押し引き切りする場合, 片刃と同様に, i 行 j 列の均質な筋肉繊維が垂直方向に切断されるものとする, 筋肉繊維単位当たりの捻り剪断力 F_{ij} は式(26)で示される。

$$F_{ij} = \frac{2N_{ij}}{R \cdot \left[\sin \left(\tan^{-1} \frac{V_{DY}}{V_{DZ}} \right) + \mu \cdot \cos \left(\tan^{-1} \frac{V_{DY}}{V_{DZ}} \right) \right]} \quad (26)$$

したがって, 両刃の刃先の抵抗 F_{DE} は式(27)で示される。

$$F_{DE} = \sum_j F_{ij} = \sum_j \times \frac{2N_{ij}}{R \cdot \left[\sin \left(\tan^{-1} \frac{V_{DY}}{V_{DZ}} \right) + \mu \cdot \cos \left(\tan^{-1} \frac{V_{DY}}{V_{DZ}} \right) \right]} \quad (27)$$

ただし, μ は刃物と魚肉間の動摩擦係数, R は筋肉繊維径, N_{ij} は筋肉繊維単位当たりの剪断に要する捻り剪断モーメントである。式(25)および式(27)を式(24)に代入すると, 両刃の全切断抵抗 F_D は式(28)で示される。

$$F_D = \eta \cdot \rho \cdot (V_{DY}^2 + V_{DZ}^2) \cdot (A_{D1} + A_{D2}) + 2k \cdot \left(\mu \cdot \cos \frac{\gamma_D}{2} + \sin \frac{\gamma_D}{2} \right) \cdot \gamma_D + \sum_j \times \frac{\left\{ 2 + \mu \cdot \sin \left[2 \tan^{-1} \left(\frac{V_{DY}}{V_{DZ}} \right) \right] \right\} \cdot N_{ij}}{R \cdot \left[\sin \left(\tan^{-1} \frac{V_{DY}}{V_{DZ}} \right) + \mu \cdot \cos \left(\tan^{-1} \frac{V_{DY}}{V_{DZ}} \right) \right]} \quad (28)$$

式(28)は, 刃物と魚肉間の動摩擦係数 μ , 魚肉の粘性係数 η , 魚肉の密度 ρ , 刃先角度による刃先表面の垂直

抗力の変動係数 k , 筋肉繊維径 R , 刃先表面と魚肉との接触面積 A_{D1} , はらと魚肉との接触面積 A_{D2} , ならびに筋肉繊維単位当たりの捻り剪断モーメント N_{ij} が一定の場合, 魚肉の押し引き切り時において両刃が受ける全切断抵抗は水平・垂直両方向の切断速度および刃先角度によって変動することになる。既述のように, 刺し身を作る際の包丁捌きは, 概して低速のため刃物と魚肉の粘性抵抗は小さく, また刃物と魚肉間の動摩擦係数 μ も小さいので, 両刃の全切断抵抗は刃先角度に比例し, 水平方向に対する垂直方向の切断速度の比 (V_{SY}/V_{SZ}) に反比例することになる。

片刃の切断抵抗 2 因子要因実験のプログラム“AOV2”¹¹⁾により擬似魚肉の切断時における片刃の切断抵抗の分散分析の結果を Table 1 に示す。切断速度の寄与率は水平方向が 74.2% と大きく, 垂直方向が 18.4% と少ない。片刃の切れ味に対する切断速度の寄与率は, 垂直方向より水平方向が高く, 引き切り時における包丁捌きとよく一致した。本切れ味計測システムは人間の包丁捌きをシミュレートし, 人間の感覚切れ味と一致したことを明らかにした。

水平方向の切断速度 A の各水準 A1, A2, A3, A4, A5, A6 および A7 の主効果は,¹²⁾ それぞれ -0.57 , -0.49 , -0.32 , $+0.11$, $+0.39$, $+0.42$ および $+0.46$ であり, 垂直方向の切断速度 B の各水準 B1, B2, B3, B4, B5, B6 および B7 の主効果は, それぞれ $+0.46$, $+0.21$, $+0.12$, -0.09 , -0.11 , -0.23 および -0.36 である。ここで, “+” は切れ味が良好なことを, また “-” は切れ味が低いことを示す。水平・垂直方向の切断速度 A, B の主効果および交互作用は, いずれも 1% 水準で有意であった。

Fig. 6 および Fig. 7 に片刃の切断抵抗と水平・垂直方向の切断速度の関係を示す。片刃では, 切断抵抗は垂直方向の切断速度に比例し, 水平方向の切断速度に逆比例するが, このことは水平方向に対する垂直方向の切断

Fig. 6. Relationship between cutting resistance of single-edge knife and cutting speed of horizontal direction at artificial fish meat cutting.

Fig. 7. Relationship between cutting resistance of single-edge knife and cutting speed of vertical direction at artificial fish meat cutting.

Table 1. Results of analysis of variance for cutting resistance

Type of knives	Factor	Sum of squares	Degree of freedom	Square average	F_0	Contribution rate (%)
Single-edge knife	A	2861.7	6	476.9	29210.1**	74.2
	B	810.9	6	135.2	8281.0**	18.4
	A × B	283.1	36	7.9	483.9**	
	Error	1.6	98	0.02		
	Total	3957.3	146			
Double-edge knife	A	2524.3	6	420.7	256.8**	50
	B	2609.2	6	434.9	265.4**	44
	A × B	380.0	36	10.6	6.4**	
	Error	160.5	98	1.6		
	Total	5674.0	146			

** significant at 1% level; A, cutting speed of horizontal direction; B, cutting speed of vertical direction; F_0 , ratio of square average.

速度の比 (V_{SY}/V_{SZ}) に反比例する式(18)とはほぼ一致し、片刃の切れ味を高精度に計測できた。

両刃の切断抵抗 Table 1 に擬似魚肉の切断時における両刃の切断抵抗の分散分析の結果を示す。両刃の切断抵抗に対する切断速度の寄与率は水平方向が 50%，垂直方向が 44% と、垂直方向より水平方向が大きかった。垂直方向の切断速度の寄与率は片刃より両刃が大きく、片刃は 18.4%，両刃は 44% であった。これは、後述するように片刃と両刃の刃先形状の異なりが主因と考えられる。

Fig. 8. Relationship between cutting resistance of double-edge knife and cutting speed of horizontal direction at artificial fish meat cutting.

Fig. 8 および Fig. 9 に両刃の切断抵抗と水平・垂直方向の切断速度の関係を示す。垂直方向の切断速度の増大に伴う切断抵抗は、両刃が片刃より大きく、片刃と両刃の刃先形状の相違が主因と考えられる。すなわち、片刃では刃先裏面には垂直抗力を受けず、刃先表面のみ垂直抗力 N_{S1} を受けるが、両刃では両側を均等な角度に研磨してあるため、両側の刃先表面に N_{D1} を受けることが主因である (Fig. 3 および Fig. 5 参照)。刃物の切断抵抗は刃先角度に比例するが、鮮魚肉を切断する場合、刃先角度がそれぞれ 10° , 15° および 20° の刃物の切断抵抗の有意差は認められなかった。また、供試片刃お

Fig. 9. Relationship between cutting resistance of double-edge knife and cutting speed of vertical direction at artificial fish meat cutting.

A. single-edge knife

B. double-edge knife

Fig. 10. Relationship between cutting resistance of knives and cutting speed of horizontal direction at fresh fish meat cutting. Cutting speed of vertical direction, 1.0×10^{-2} m/s; F_S , cutting resistance of the single-edge knife; F_D , cutting resistance of the double-edge knife; V_{SY} , V_{DY} , cutting speed of horizontal direction; R^2 , a decision coefficient.

よび両刃の刃先角度の計測部位の厚みは、それぞれ 0.30 mm, 0.29 mm であり、その差が微小なので、刃物の刃先角度および刃厚の相違による垂直方向の切断速度の寄与率への影響は小さいものと考えられる。

したがって、両刃は N_{D1} の反力によるくさび作用があるため叩き切りに好適で、刺し身を作る場合には、片刃は刃先裏面側の魚肉繊維の圧砕が発生せず、素材の持味を生かせるため、両刃より好適である。

また、両刃の場合も、切断抵抗は垂直方向の切断速度に比例し、水平方向の切断速度に逆比例するが、このことは水平方向に対する垂直方向の切断速度の比 (V_{SY}/V_{SZ}) に反比例する式(28)の理論解析とほぼ一致し、切れ味を高精度に計測できた。

擬似魚肉および魚肉の切断抵抗の一例 擬似魚肉としたゴム板および魚肉の切断時における刃物の切断抵抗の差異を検討するため、垂直方向の切断速度を 1.0×10^{-2} m/s, 水平方向の切断速度を 1.0×10^{-2} m/s から 4.0×10^{-2} m/s まで 5.0×10^{-3} m/s の間隔でマグロブロック肉を切断し、片刃および両刃の切断抵抗を計測した。Fig. 10 に魚肉の切断時における切断抵抗と水平方向の切断速度の関係を示す。片刃および両刃の切断抵抗は水平方向の切断速度に逆比例し、既述の擬似魚肉の切断時における切断抵抗と水平方向の切断速度の関係と一致した。

式(29)および式(30)に魚肉の切断時における片刃および両刃の切断抵抗と水平方向の切断速度の実験式を示す。

$$F_S = 0.0003 V_{SY}^3 - 0.003 V_{SY}^2 + 0.0067 V_{SY} + 3.7161 \quad (29)$$

$$F_D = 0.0003 V_{DY}^3 - 0.003 V_{DY}^2 + 0.0051 V_{DY} + 3.2777 \quad (30)$$

ただし、 F_S は魚肉の切断時における片刃の切断抵抗、 F_D は魚肉の切断時における両刃の切断抵抗、 V_{SY} は片刃の水平方向の切断速度、 V_{DY} は両刃の水平方向の切断速度である。

なお、垂直方向の切断速度を 1.0×10^{-2} m/s, 擬似魚肉の切断時における片刃および両刃の切断抵抗と水平方向の切断速度の実験式を式(31)および式(32)に示す。

$$F_S^1 = 0.1429 (V_{SY}^1)^3 - 1.294 (V_{SY}^1)^2 - 0.1423 V_{SY}^1 + 70.359 \quad (31)$$

$$F_D^1 = 0.2578 (V_{DY}^1)^3 - 2.763 (V_{DY}^1)^2 + 5.2153 V_{DY}^1 + 48.742 \quad (32)$$

ただし、 F_S^1 は擬似魚肉の切断時における片刃の切断抵抗、 F_D^1 は擬似魚肉の切断時における両刃の切断抵抗、 V_{SY}^1 は片刃の水平方向の切断速度、 V_{DY}^1 は両刃の水平方向の切断速度である。

式(29)、式(30)、式(31)および式(32)を比較すると、魚肉および擬似魚肉の切断抵抗には明らかな差が認

められたが、魚肉の切断時における水平方向の切断速度の増大に伴う片刃および両刃の切断抵抗が小さくなる傾向は、擬似魚肉の実験結果と一致した。したがって、擬似魚肉を用いた本計測システムの検証が可能と考えられる。

既述のように、切断抵抗に対する寄与率は、片刃では垂直より水平方向の切断速度が極めて高く、両刃ではほぼ同程度であった。垂直方向の切断速度の増大に伴う切断抵抗は、両刃が片刃より大きく、水平方向に対する垂直方向の切断速度の比に反比例した。人間の包丁捌きをシミュレートする本切れ味計測システムを用いて、鮮魚用刃物、すなわち片刃および両刃の切れ味を高精度に計測できた。また、刺し身を作る場合には、片刃が両刃より好適であることを明らかにした。

残された関連研究項目としては、試作した切れ味計測システムを用いて、刃先角度と切れ味の関係の実証、刃物の切れ味と耐久性に及ぼす影響、凍結魚肉用刃物の切れ味の計測方法ならびに最適な刃型などである。これらについては、次報から順次、報告する予定である。

謝 辞

本研究を行うにあたり、擬似魚肉用ゴム板を試作提供して下さった西部ポリマー株式会社の関係者各位に御礼を申し上げる。

文 献

- 1) 葉 紅偉, 矢田貞美, 陳 汭. 鮮魚用刃物の刃先角度の計測システム. 日水誌 2000; **66**: 674-681.
- 2) 竹村和夫, 本川高男. 古来の打刃物(その1) 玉鋼を使った鍛工具(厚刃物)の測定例. 高知県工業技術センター研究報告 1980; **55**: 79-87.
- 3) 鴨下隆志. 工業量としての厨房用刃物の切れ味の定量化. 計量研究所報告 1994; **43**: 17-24.
- 4) 鴨下隆志, 矢野 宏: 厨房用刃物の切れ味試験. 計量研究所報告 1980; **29**: 51-59.
- 5) 平田泰宏. 切れ味(特に包丁)に及ぼすかたさ 刃先角度等の影響について. 岐阜県金属試験場報告 1970; **45**: 8-15.
- 6) 平田泰宏. 切れ味に及ぼすかたさ 刃先角度等の影響について(第2報). 岐阜県金属試験場報告 1971; **46**: 43-46.
- 7) 田中 互, 中村 勝, 田宮宏一, 堀 祐爾, 鈴木誠一, 神山義一. 包丁の簡易切れ味試験機の試作と官能検査について. 新潟県工業技術センター研究報告 1980; **55**: 31-35.
- 8) 本川高男. 刃物の切れ味に及ぼす諸因子について. 高知県工業技術センター研究報告 1988; **19**: 53-69.
- 9) 東京水産大学第7回公開講座編集委員会. 「マグローその生産から消費まで」成山堂書店, 東京, 1981; 151-160.
- 10) 森 徹. 「土木施工」山海堂, 東京, 1976; **17**: 346-371.
- 11) 協本和昌, 垂水共之, 田中 豊. 「パソコン統計解析ハンドブック(Ⅲ)」共立出版, 東京, 1985; 1-92.
- 12) 田口玄一. 「実験計画法」丸善, 東京, 1966; 50-77.