

# マグロのヤケ発生状況およびヤケ防止法の検証\*1

太田 格・中村勇次\*2・石川貴宣\*3・城間一仁\*2・諸見里直子\*4・加藤美奈子\*5

## 1. 目的

マグロ類は沖縄県において年間1万トン以上漁獲され、海面漁業生産量の約50%を占める最も重要な水産資源のひとつである<sup>1)</sup>。マグロ類は主に延縄やバヤオ周辺での様々な漁法によって漁獲されている。特にバヤオ周辺でのマグロ釣り(以下バヤオ漁業)は、1982年のバヤオ導入以来著しく発展している。しかし、ヤケと呼ばれるマグロの肉質の低下が以前から問題となっていた。

ヤケは、青白く透明感がなく、肉質は水っぽく、粘稠性がなく繊維性(バサバサした感じ)のある状態となる。その発生実態は明らかではないが、ヤケは延縄よりもバヤオ周辺で漁獲されるものに多い、夏季の高水温時に多いなどと言われている。ヤケは鮮魚としての商品価値を著しく低下させることから、生産現場からその対策法が求められてきた。

一方、伊良部漁協では、指導漁業士の伊良波淳世氏が考案した独自のヤケ対策によりヤケを防いでいる。本報告では、バヤオ漁業で漁獲されるマグロ類のヤケ発生状況把握調査を実施するとともに、伊良部式ヤケ防止法と従来の処理による比較を行い、その効果を検証した。さらにこれらの結果から、簡便なヤケ防止法の提案を試みた。

ヤケの防止対策は長年の経験と努力により考案された伊良部漁協伊良波淳世氏の功績が大きい。本調査への惜しみない協力を頂いた同氏には深い感謝と賞賛の意を表明する。また、調査を実施するにあたりご協力頂いた糸満漁協安谷屋秀喜氏ならびに伊良部町水産振興課、漁協、仲買等関係者の方々には深く感謝する。

## 2. 材料および方法

### 1) アンケート調査

沖縄諸島の14漁協のバヤオ漁業者47名を対象にヤケの発生状況、漁獲後の処理法についてアンケート調査を行った。

### 2) セリ帳からのヤケ発生状況の把握

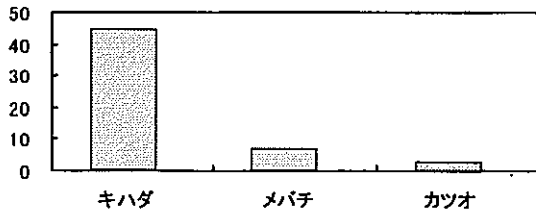
ヤケの発生状況を把握するために、ヤケマグロの価格調整を行っている沖縄島A漁協を調査した。価格調整は、販売・解体後に認知されるヤケの程度に合わせて、その損失分を割引することである。セリ帳から、ヤケマグロの本数、重量、販売した当初価格(A)、価格調整後価格(B)、割引率( $B/A \times 100$ )、被害額( $A - B$ )を月ごとに集計した。水試漁獲統計データベースから、A漁協のキハダ(5kg以上)を抽出し、漁獲量、尾数、平均単価、生産額を集計した。A漁協は競売(セリ)と直売店があり、2001年は両データを得たが2000年はセリデータのみしか得られなかったため、セリと直売店について分けて集計、解析を行った。

### 3) ヤケ防止処理実験

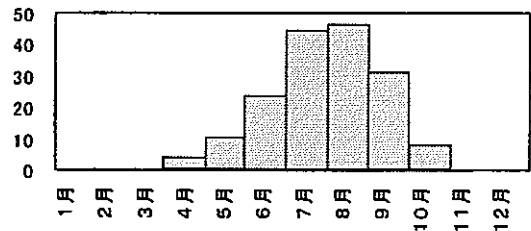
伊良部式(予冷)と従来式(即殺)の処理による比較を行い、その効果を検討した。従来式は、1)漁獲直後、脳、延髄破壊による即殺を行い、2)胸鰭下に切り込みを入れ脱血し、3)鰓内臓を取り出し、4)海水氷(水温約0℃)に保管した。伊良部式は、1)漁獲後、生きたまま予冷槽(水温8-15℃)に30-60分間入れ、2)鰓内臓を取り出し、3)海水氷(約0℃)に保管した。

比較試験は、2002年6月から11月に、伊良部島海域と沖縄島南部海域および両漁港セリ市場で行った。試験は、両処理による体温の経時測定(特に漁獲後1時間以内の体温変化)、官能試験または販売価格による身質(特にヤケの程度)の評価を行った。体温は、体側正中線上、胸鰭中央下、脊椎付近の血合筋温度とした。温度の測定は防水型デジタル温度計(SK-250WP、佐藤計量器製作所、分解能±0.1℃)およびサーミスタセンサープローブ(SWP-01)を用いた。

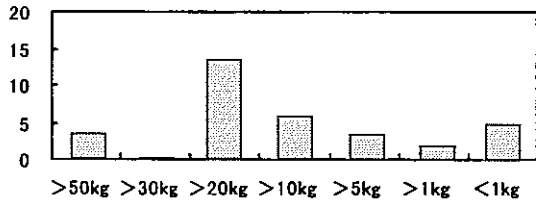
\*1 現場実践型技術開発推進費 \*2 普及センター \*3 宮古支庁 \*4 水産課 \*5 現所属：水産課



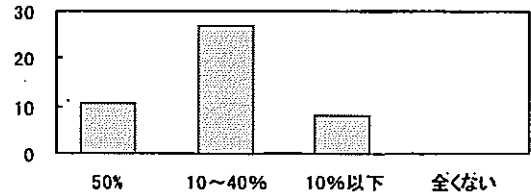
質問 1. ヤケの起こりやすい魚種は？ (複数回答可)



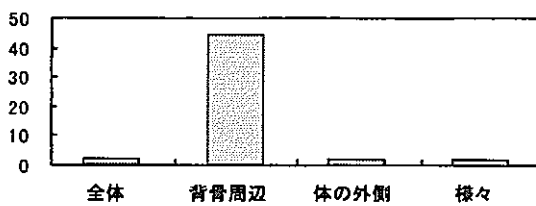
質問 2. ヤケの起こる時期は？ (期間を指定)



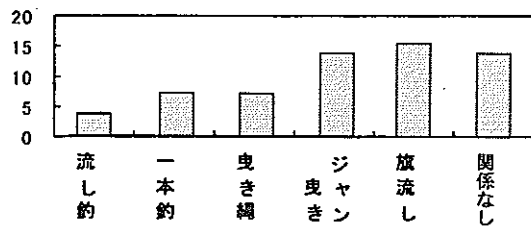
質問 3. ヤケの起こる魚サイズ (体重) は？



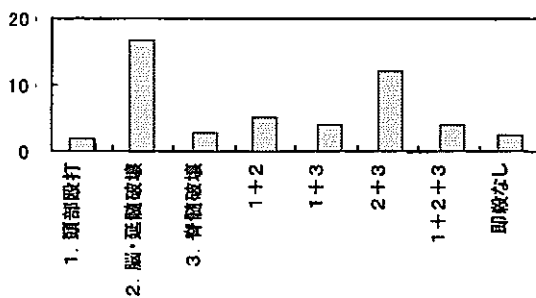
質問 4. ヤケの起こる頻度は？



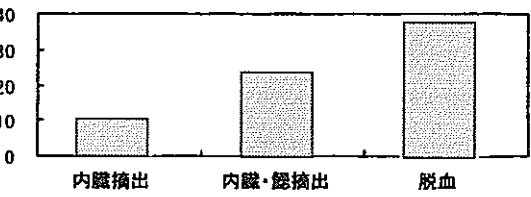
質問 5. ヤケの起こる部位は？ (複数回答可)



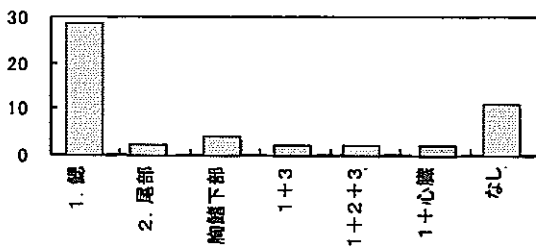
質問 6. ヤケの起こりやすい漁法は？ (複数回答可)



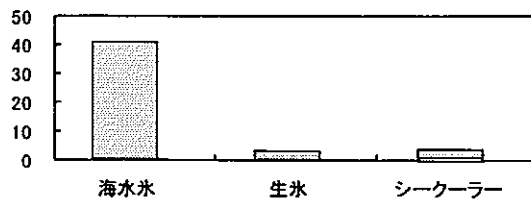
質問 7. 即殺の方法



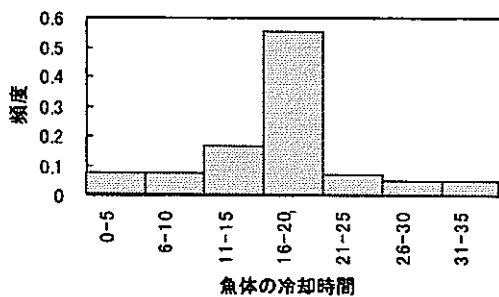
質問 8. 即殺後の処理



質問 9. 脱血の部位



質問 10. 保存方法は？ (複数回答完了)



質問 11. 操業終了から水揚げまでの時間 (冷却時間)

図 1. ヤケの発生および漁獲後の処理についてのアンケート結果 (対象: 沖縄諸島 14 漁協 47 名の漁業者)

### 3. 結果

#### 1) ヤケに関するアンケート調査

バヤオ漁業者47名に対して行ったヤケに関するアンケートの結果を図1に示した。質問1-6の結果から、ヤケ発生は以下の状況が考えられた。1) ヤケはキハダ、メバチ、カツオの全てに起こり、キハダが多い。2) ヤケはマグロの盛漁期(4-10月)を通して発生するが7-9月の高水温期に多い。3) ヤケは小型にもみられるが、20kg以上に多く発生する。4) ヤケの発生は全ての漁業者が認めており、かなりの高頻度で発生している。5) ヤケは脊椎骨周辺から進行する。6) バヤオ周辺の漁法とヤケの発生は関係がない。

また、質問7-11で、漁獲後の魚の扱いについて概要を知ることができた。漁獲後のマグロは一般に即殺するが、その方法は1) 頭部を殴打する、2) 松果体窓より錐状の金属を差込み、脳、延髄を破壊する、3) 松果体窓から針金状の金属を挿入し脊髄を破壊する、の3通りがあった。ほとんどの漁業者は2) または3) 方法を単独または併用して行っていた。7割の漁業者は内臓の摘出と脱血をしていた。脱血の部位は、主に鰓周辺から行なわれていた。漁獲物の保存は84%の漁業者が海水氷を用いていた。操業終了から水揚げまでは魚槽内で保管されていることから、この間を魚体の(最短)冷却時間とすると、16-20時間が最も多く、55%を占めた。それより短い0-15時間は31%、また長い21-35時間は14%であった。

#### 2) ヤケの発生状況

ヤケの発生に関わると考えられる沖縄島南東部沖合の月平均表層水温を図2に示した。月平均表層水

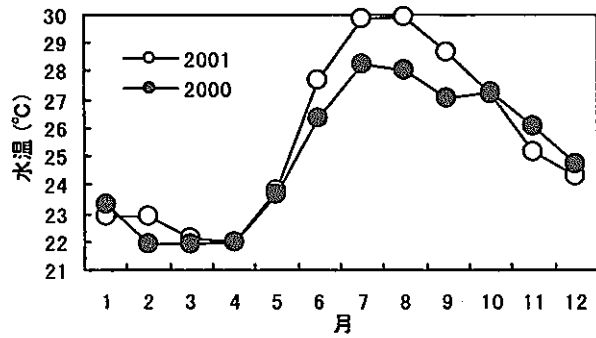


図2. 沖合の月平均表層水温 (ニライ1号知念沖水深4m)

温は、2000、2001年とも1-4月に約21-23°Cであったのが、4-7月にかけて急激に上昇した。両年とも7、8月にピークとなったが、2000年の約28°Cに比べ、2001年は約30°Cで非常に高かった。8月以降は徐々に低下し、12月は約24-25°Cであった。2001年は例年よりも高水温であり、6-9月は2000年より2°C程度高かった。

A漁協のヤケ発生状況を表1に示した。セリにおけるキハダのヤケ発生尾数は、2000年に16尾、2001年に86尾であった。年間発生率Aはそれぞれ5.0%、16.6%で2001年に多かった。ヤケは2000年は8-12月に発生し、発生率は8月の25%をピークにその後減少した(図3)。2001年では4-12月に発生し、発生率は6月に低いのを除くと、4-7月にかけて増加し、11月まで20%以上の高い割合であった(図3)。ヤケ発生期間の平均発生率Bは2000年に11.2±8.6%で2001年の16.7±10.3%に比べ低かったが、有意差は認められなかった。

2001年のA漁協全体(セリ+直売店)のヤケ発生尾数は、キハダで231尾、メバチで63尾であった(表1)。年間発生率Aはそれぞれ12.8%、9.8%であった。キハダでは4-12月に発生し(図4)、

表1. A漁協のヤケ発生状況および被害額

| 項目                         | セリ扱いのみ    |           | 全体(セリ+直売店) |           |           |
|----------------------------|-----------|-----------|------------|-----------|-----------|
|                            | キハダ       |           | キハダ        |           | メバチ       |
|                            | 2000      | 2001      | 2000       | 2001      | 2001      |
| 年間ヤケ尾数                     | 16        | 86        | -          | 231       | 63        |
| ヤケ発生率 A: 年間ヤケ尾数/年間漁獲尾数 (%) | 5.0       | 16.6      | -          | 12.8      | 9.8       |
| B: ヤケ発生期間 年平均±SD (%)       | 11.2±8.6  | 16.7±10.3 | -          | 15.3±10.4 | 11.9±5.6  |
| 年間生産量 (t)                  | 8.7       | 15.7      | 30.4       | 52.6      | 18.4      |
| 年間生産額 (万円)                 | 928       | 1545      | 2608       | 4160      | 1140      |
| 割引率 (%) (ヤケ発生期間 年平均±SD)    | 32.6±22.1 | 54.7±33.1 | -          | 46.0±25.5 | 42.7±17.4 |
| 年間被害額 (万円)                 | 21.9      | 186.2     | -          | 284.7     | 18.1      |
| 被害率 (%) (年間被害額/年間生産額)      | 2.4       | 12.1      | -          | 6.8       | 1.6       |

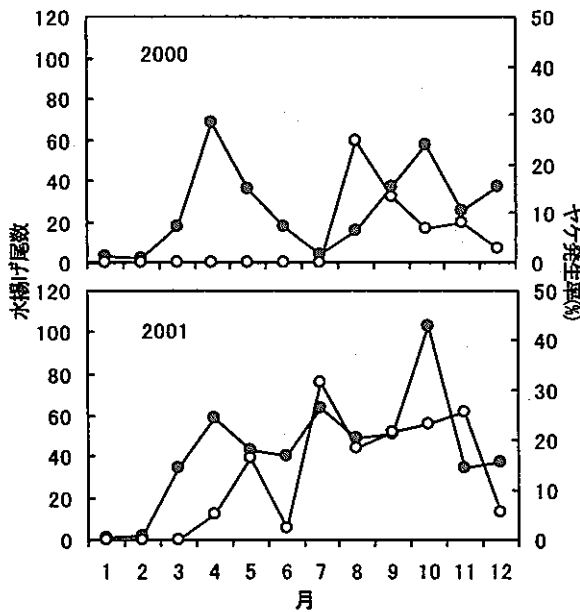


図3. キハダの水揚げ尾数●とヤケ発生率○  
(A漁協セリのみ)

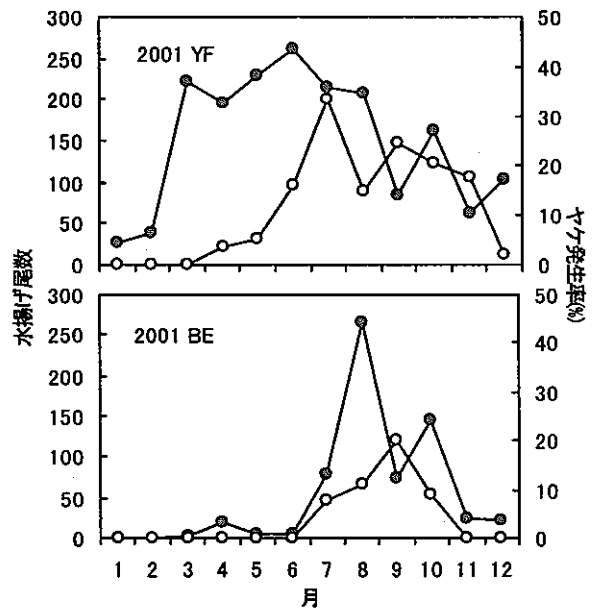


図4. キハダ(YF),メバチ(BE)水揚げ尾数●とヤケ発生率○  
(A漁協セリ+直売店)

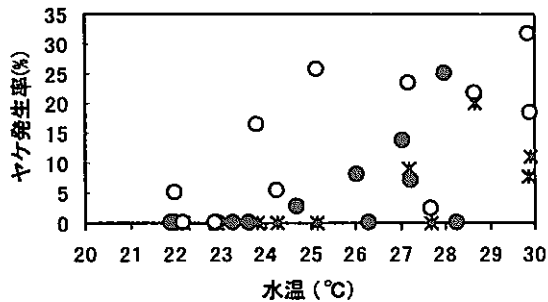


図5. 月平均表層水温およびヤケ発生率の関係  
2000年キハダ：●，2001年キハダ：○，2001年メバチ：\*

この期間の平均発生率Bは  $15.3 \pm 10.4\%$  であった(表1)。メバチでは、ヤケは漁獲量の増加に伴って7-10月に発生し、9月に20%のピークとなった(図3)。平均発生率Bは  $11.9 \pm 5.6\%$  で(表1)、キハダと有意差が認められなかった認められなかった。ヤケの発生は水温の上昇とともに増加する傾向があったが、発生率と絶対水温に明瞭な関係は認められなかった(図5)。

ヤケの程度を反映すると考えられる割引率は10-100%まで様々であった。セリのキハダでは、割引率は2000年に比べ、2001年が有意に高かった(Mann-Whitney検定,  $p < 0.05$ , 表1)。このことは、高水温であった2001年では、ヤケ発生率は若干高かったが(有意差なし)、それより各個体のヤケの程度が大きかったと理解された。2001年の全体の平均割引率はキハダで  $46 \pm 25\%$ 、メバチで  $43 \pm 17\%$  となり、両種とも価格調整によって平均で価

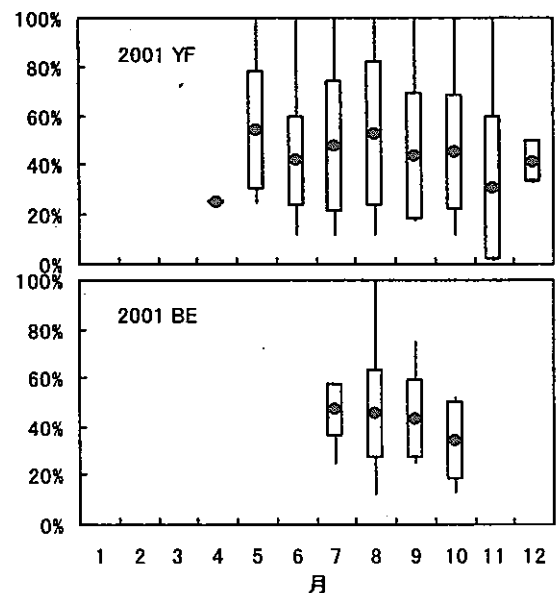


図6. 2001年のヤケまぐろ月別価格調整率の推移  
キハダ(YF),メバチ(BE),最大,平均±SD,細小

格がほぼ半減した(表1)。割引率の月別変化をみると、7、8月に若干高いが、発生期間中あまり変化がなかった(図5)。

販売価格から調整価格を差し引いたものをヤケの被害額とすると、セリ扱いのみで、2000年の22万円に比べ、2001年では186万円と被害が大きかった(表1)。2001年の全体の被害額はキハダ285万円、メバチ18万円と算出された。キハダでは2001年の生産額4,160万円の6.8%を占めた。

### 3) ヤケ防止処理試験

2002年6月と9月に伊良部島周辺のパヤオで漁獲したキハダを伊良部式(予冷)と従来式(即殺)の処理別に体温(血合筋温度)測定を行った。特に漁獲直後から2時間後までの体温の経時変化について、体重20kg即殺群(平均±標準偏差: 18.7 ± 0.6 kg, n=3), 20kg予冷群(16.9 ± 2.2 kg, n=4), 30kg予冷群(29.7 ± 2.9 kg, n=4)の3群を比較した(図7)。即殺群は処理後、保冷槽(海水氷約0℃)へ収容し、予冷群は生きたまま予冷槽(海水約15℃, 魚が浸る程度の水量)に1時間収容した後、保冷槽へ収容した。6月と9月の調査海域の海面水温はそれぞれ、27.6℃と29.6℃で2℃の違いがあったが、各群の漁獲直後の平均体温には有意差が認められず(1元配置ANOVA, p=0.69), 20kg即殺群(31.1 ± 0.2℃), 20kg予冷群(30.9 ± 0.5℃), 30kg予冷群(31.1 ± 0.3℃)の全てで約31℃であった(図7)。

処理45分後の体温を比較したところ、各群にはそれぞれ有意差が認められた(1元配置ANOVA, p < 0.01)。処理45分後の体温は、即殺群(平均 30.3 ± 0.5℃, 範囲 0.1 - 1.3℃)で平均 0.8℃しか低下しなかったのに対して、20g予冷群(22.8 ± 1.4℃, 7.2 - 9.3℃)で8.1℃, 30kg予冷群(27.0 ± 1.0℃, 2.4 - 5.0℃)は4.1℃低下した(図7)。この結果から、伊良部式は従来式よりも著しく早く魚体中心部の温度を低下させることが分かった。また、予冷による体温の低下は処理後15分間に顕著であった。

上記の処理各個体の肉質を、仲買により官能的に評価した。ヤケの程度により単価を評価し、それぞれの魚体サイズの相場単価との比をヤケの程度を表す指標(ヤケが無ければ1, 全体がヤケていれば0)とした。処理45分後の低下体温とヤケの指標の関係には有意な正の相関(R<sup>2</sup> = 0.75, p < 0.01)が認められ、体温低下が顕著であった個体にヤケの程度が低い、またはヤケが発生しない傾向があった(図8)。言い換えれば、伊良部式処理個体はヤケの発生が抑えられ、反対に従来式はヤケの発生が進んでいることが分かった。また、出血の多かった1個体で、予冷処理後すぐに死亡したものは体温低下が小さく、

ヤケの程度が高かった(図8)。これらのことから、伊良部式は生きたまま予冷することにより、体温低下を早め、ヤケの発生を抑える効果があることが分かった。

2002年10月、11月に糸満沖パヤオで漁獲したビンナガ3個体(体重14kg)を伊良部式(予冷)と従来式(即殺)の処理別に体温の経時測定を行った。#1は10月の調査結果で海面水温は27.8℃, 体温

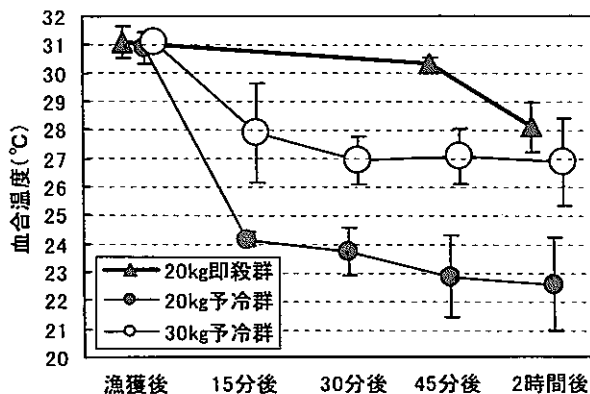


図7. キハダ各処理の平均血合温度の変化  
20kg 即殺群(n=3), 20kg 予冷群(n=4), 30kg 予冷群(n=4).  
縦棒は標準偏差を示す。

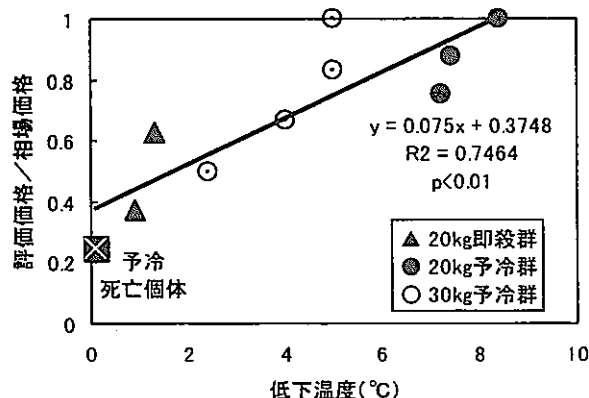


図8. キハダ処理45分後の血合低下温度とヤケの関係  
ヤケの指標として、評価価格/相場価格を用いた。

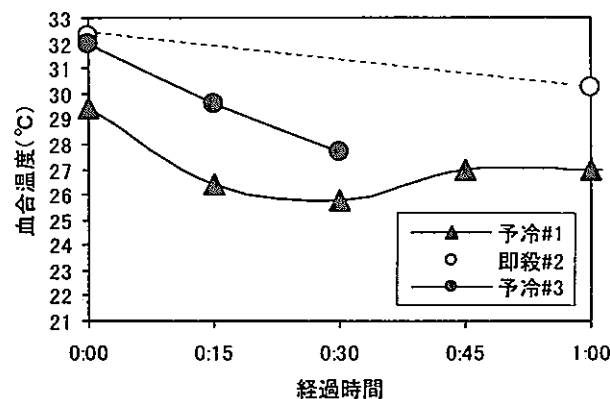


図9. ビンナガ各処理の血合筋温度変化  
各個体ともに体重14Kg

は29.4℃であった。また、#2、#3は11月の調査結果で、海面水温は24.4℃、体温は約32℃であった。即殺した#2の体温は1時間後30.2℃で1.8℃低下したのに対し、予冷処理#1、#3の30分後の体温はそれぞれ、25.8℃、27.7℃であり、3.6-4.3℃低下した(図9)。ビンナガも、予冷による体温低下が顕著であった。

#### 4. 考察

##### 1) ヤケの発生状況

ヤケ肉は鮮魚としての商品価値を著しく損なう。全体的、部分的に発生することもあれば、半身だけにヤケを生じることもある。多くの場合、ヤケの発生は魚体中心から起こるので魚体外観および尾部の肉質観察からも認知できない。このことはヤケ発生状況の把握を難しくしている要因である。以前からヤケは問題となっていたがその現状は明らかでなかった。また、バヤオで漁獲されるマグロはヤケが多く発生すると言われ、県外流通の発展を阻む一因となっている。

本調査で、価格調整を行うA漁協のセリ帳から、周年のヤケ発生状況を把握できた。ヤケの発生率はおよそ15%であり、高水温であった2001年は、2000年に比べてヤケの程度が高く、漁獲量の多いことも重なってヤケによる被害が大きかったと推察された。

県内で、ヤケに関わる価格調整をする漁協は現在数カ所程度である。価格調整はヤケの程度によって価格を変更し、場合によっては値段のつかないこともあるので生産者には大きな問題である。しかし、多くの漁協は価格調整をしないので、ヤケの発生は仲買の損失となる。そのため、ヤケが多発する時期は、潜在的なセリ価格の低下が懸念される。これらの状況から、県全体のヤケによる被害額を見積もることは難しいが、発生率は地域による大きな違いはないと考えられ、かなりの潜在的な被害が想定される。

またヤケの問題は沖縄だけではない。70年代後半にハワイで行われた調査では、夜間の一本釣りにおいて漁獲されるマグロ(キハダ、メバチ)のヤケ発生率は25%<sup>2)</sup>、損失額は年間生産額の16%<sup>3)</sup>に達したと報告されている。ヤケの発生は漁獲後の

処理や保管方法に影響を受け、脳の破壊や低温(0℃)での保管はヤケの発生を抑えるとの報告がある<sup>2,3)</sup>。しかし、今回の調査結果のように、従来から中枢神経系の破壊と0℃保存を行い、鮮魚として注意深く扱っている沖縄でも高頻度にヤケが発生していることから、従来の処理では十分にヤケを防ぐことはできないと考えられる。

##### 2) ヤケの要因と伊良部式の効果

小長谷ら<sup>4)</sup>、や小長谷<sup>5)</sup>は、ヤケは筋肉の筋原繊維タンパク質(MP)が変性し、溶出した状態であり、その原因は漁獲後の筋肉の高温、低pHによると報告している。またDavieら<sup>6)</sup>は、マグロ類の筋繊維微細構造変化の観察から、通常の筋繊維微細構造の死後変化は、筋小胞体およびT管の空胞形成による筋原繊維のミトコンドリアおよびZ盤の変質であり、ヤケ肉においても質的な相違はなく、量的に進行した状態であると報告している。一方、Watsonら<sup>2)</sup>は、ヤケの原因を高温、低pH<sup>4,5)</sup>だけでは説明しきれないとし、ヤケ発生メカニズムについて以下のような仮説を唱えている。過度な運動で酸素とATPが不足した組織内では細胞膜の代謝崩壊が起こり細胞内にCa<sup>2+</sup>が流入する。Ca<sup>2+</sup>の増加により、酵素の一種CANP(calcium-activated neutral protease)が活性化されることでヤケが進行する。また、漁獲時のストレスは、アドレナリン等の神経伝達物質を分泌させCANPを活性化させるとしている。ここではマグロ類のヤケ発生は過去の研究により示唆された筋肉の高温、低pH条件、過度な運動などが主な要因となっているとして、試験したヤケ防止処理効果とヤケ発生状況について検討を加えた。

伊良部漁協ではすでに定評のあるヤケ防止方法(伊良部式処理)について、その効果を実証するために比較試験を行った結果、従来式に比べ、伊良部式は、漁獲直後の体温低下が著しく早いことが分かった。また、処理後の体温低下が顕著な程、ヤケの発生が抑えられている傾向があった。これらのことから、伊良部式にはヤケ防止効果があると考えられた。

変温動物である魚類の中で、マグロ類は奇網と呼ばれる特殊な熱交換器を備え環境水温よりも体温が高いことが知られている<sup>7)</sup>。奇網では、動脈と静脈

が密接して対向流をなしているの、組織で暖められた静脈血と鰓で環境水温と等しくなった冷たい動脈血との間で効率良い熱交換が行われる。しかし、マグロ類の体温は恒常的ではなく、環境水温の影響を受ける<sup>8)</sup>。そのため生きてまま冷たい水槽に入れることで血液循環を利用して効率よく体の中心から冷やすことができると考えた。一方、従来式の即殺魚は体温低下が小さく、主に体表面からの熱伝導によるもので、その効率の悪さを反映したものであると考えられる。熱伝導は表面積の増大に伴い大きくなる。体積は長さの3乗に比例して増大するのに対して、体表面積は長さの2乗に比例する。すなわち魚体が大きくなるほど体表面積の比が小さくなるので冷えにくくなる<sup>9)</sup>。

上述のように、ヤケの発生は筋肉の高温条件に関わっていると考えられる。また、ヤケは一端進行するとその後低温で保存しても進行すると報告されている<sup>10)</sup>。そのため、伊良部式では、漁獲直後の筋肉の温度低下が、ヤケを抑制する最大の要因になっていると考えられる。また、冬季にヤケが少ないことは、漁獲時の体温が夏期にくらべ低いことに起因すると思われる<sup>8)</sup>。

しかし、延縄で漁獲されるマグロ類にヤケが少ないという現象は体温低下だけでは説明できない。延縄は時間をかけて漁獲することで疲労回復を促し、ホルモンの排出等のCANPを活性化させる要因が排除されることによってヤケが起こらないと考えるのが妥当と思われる<sup>2)</sup>。伊良部式の予冷中に同様な付加的な効果があるのかもしれない。

### 3) ヤケの防止改良策

今回の調査結果およびこれまでの伊良部漁協の実績から、伊良部式にはヤケを防ぐ効果があると考えられる。しかし、伊良部式は一般的なマグロ類の鮮度保持である即殺、血抜き等の処理を行っていない。そのため全般的な鮮度保持、品質向上に若干問題を残していた。特に血抜きをしない場合、身に血が残ることがあり、流通上問題となる。また、鮮度保持には即殺による中枢神経系の破壊が重要である。

そこで、従来式と伊良部式双方の利点を生かした以下のヤケ防止対策法を提案する。

- 1) 生きてまま取り上げる
- 2) 生きてまま 15℃槽で予冷する
- 3) 15 - 30分後に生きてまま再び取り上げ、即殺、血抜きを行う
- 4) 十分に保冷する

この処理の注意点は、生きている間のみ体温低下が顕著なので、傷つけないよう丁寧に取り上げ、個体の活性に合わせて予冷時間を決定する必要がある。多く場合 15 - 30分間は生きており、また温度低下も顕著であることから予冷時間はこの程度で良いと思われる。また、予冷水温を 15℃よりも低くし、より効率的な予冷ができるかもしれない。しかし、水温 25℃から 15℃の低下により心拍数、心臓の拍出量が半減することが実験で示されており<sup>11)</sup>、水温が低すぎると循環効率の低下の可能性もある。予冷水温の 15℃は伊良部漁協の実績および実験結果からある程度妥当な値と思われる。

本報告は主にキハダについて、限られたサイズの調査結果を検討している。しかし魚体サイズや種によって体温保持特性が異なるので<sup>12-17)</sup>、今後適正な予冷温、予冷時間、効果の有無にも検討の余地がある。

今回提案したヤケ防止法はマグロの生理特性を利用し、特別な機材、薬品等を使わない簡便かつ安全なものであり、本県のバヤオ漁業に十分に活用できると考える。また、水温の高い熱帯海域、特にバヤオ周辺での小規模漁業を営む太平洋熱帯域の国々においてもこの防止法は有用だと考えられる。今後は現場での利用を通じて、より実用的、効果的に改良され、適切な評価を得るとともに、これによる品質向上が県内外への需要拡大に繋がることを期待する。

### 文 献

- 1) 沖縄開発庁沖縄総合事務局農林水産部. 第29次沖縄農林水産統計年報. 2001; 177 - 256.
- 2) Watson C, Bourke RE, and Brill RW. A comprehensive theory on the etiology of burnt tuna. Fish. Bull. 1988; 86: 367 - 372.
- 3) Cramer JL, Nakamura RM, Dizon AE, Ikehara WN. Burnt tuna: Conditions leading to rapid deterioration in the quality of raw tuna. Mar. Fish. Rev. 1981; 43 (6)

- 4) 小長谷史郎, 小長谷庸夫. 常温における赤身魚の筋原繊維タンパク質の変性: “ヤケ肉” の発生要因. 東海水研報. 1978 ; 69 , 67-74 .
- 5) 小長谷史郎. 異常性状の魚肉: ジェリーミートとヤケ肉. 日水誌. 1982 ; 6 , 379 - 388 .
- 6) Davie PS, Sparksman RI. Burnt tuna: An ultrastructural study of postmortem changes in muscle of yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) caught on rod and reel and southern bluefin tuna (*Thunnus maccoyii*) caught on handline or longline. Jour. Food Sci. 1986 ; 51 (5) : 1122-1128 .
- 7) Carey FG, Teal JM. Heat conservation in tuna fish muscle. Zoology. 1996 ; 56 : 1464-1469 .
- 8) 太田格, 下條武, 福田将数, 松本隆之. パヤオ周辺でのキハダ, メバチの遊泳行動生理. 平成 13 年度沖縄県水産試験場事業報告書. 2003 ; 41-51 .
- 9) Schmidt-Nielsen K. Temperature regulation. In: Schmidt-Nielsen K. (ed) Animal Physiology: Adaptation and environment. Cambridge University Press, New York, 1990 ; 241-297 .
- 10) 中村邦典, 藤井豊, 石川宣次. マグロ類の “ヤケ” の防止試験 - I : 発生原因の検討. 東海水研報. 1977 ; 90 , 39-43 .
- 11) Brill RW. How tuna physiology affects tuna movement and distribution. In: Sibert J (ed) Pelagic Fisheries Research Program Newsletter. 1997 ; 2(4) : 3-6 .
- 12) Holland KN, Brill RW, Chang RKC, Sibert JR, Fournier A. Physiological and behavioural thermoregulation in bigeye tuna (*Thunnus obesus*). Nature. 1992 ; 358 , 410-412 .
- 13) Holland KN, Sibert JR. Physiological thermoregulation in bigeye tuna, *Thunnus obesus*. Env. Biol. Fish. 1994 ; 40 , 319-327 .
- 14) Dizon AE, Brill RW. Thermoregulation in yellowfin tuna, *Thunnus albacares*. Physiol. Zool. 1979 ; 52 : 581-593 .
- 15) Brill RW, Dewar H, Graham JB. Basic concepts relevant to heat transfer in fishes, and their use in measuring the physiological thermoregulatory abilities of tuna. Env. Biol. Fish. 1994 ; 40 : 109-124 .
- 16) Graham JB, Dickson KA. Physiological thermoregulation in the albacore *Thunnus alalunga*. Physiol. Zool. 1981 ; 54(4) : 470-486 .
- 17) Kitagawa T, Nakata H, Kimura S, Tsuji S. Thermoconservation mechanisms inferred from peritoneal cavity temperature in free-swimming Pacific bluefin tuna *Thunnus thynnus orientalis*. Mar. Ecol. Prog. Ser. 2001 ; 220 : 253-263 .