

資 料

沿岸性魚類14種の温度耐性

土田修二^{*1§}・三浦正治^{*1}・瀬戸熊卓見^{*2,3}・渡邊裕介^{*4}・吉野幸恵^{*1}

Temperature Tolerance of Fourteen Japanese Coastal Fishes

Shuji Tsuchida^{*1§}, Masaharu Miura^{*1}, Takumi Setoguma^{*2,3}, Yusuke Watanabe^{*4}
and Sachie Yoshino^{*1}

要約: 海水温の上昇による魚類への影響予測に必要な基礎的知見を得ることを目的として, 日本沿岸に生息する海産魚類14種について高・低温側の最終致死温度を明らかにした。高温側の最終致死温度(UULT₅₀)は32.2~37.5°C, 低温側の最終致死温度(ULLT₅₀)は1.5~14.8°Cの範囲にそれぞれあった。高温側100%生残温度(UST₁₀₀)はUULT₅₀より0.5~3.6°C低く, 低温側100%生残温度(LST₁₀₀)はULLT₅₀より0.6~3.3°C高い値であった。また, 温度耐性幅(UULT₅₀とULLT₅₀との差)は22~33°Cの範囲にあった。そのうちアオギス, スズキ, クロダイ, キチヌ, ミナミクロダイ, ヒラメは31~33°Cと幅広く広温性魚種と考えられた。それに対してホシギス, トゲチョウチョウウオ, ハマフエフキ, ソラスズメダイ, ナンヨウツバメウオは22~23°Cと狭く狭温性魚種に区分されると考えられた。イサキ, シロギス, イシダイは26~28°Cで中間的な魚種と区分された。これら魚種の温度耐性は生息分布域と深く関わっており, 魚種ごとの温度特性を明らかにしておくことが海水温上昇による影響予測に必要と考えられた。

キーワード: 沿岸性魚類, 海水温の上昇, 温度耐性, 最終致死温度, 温度耐性幅

まえがき

魚類の多くはその体温が周辺の環境水温に応じて変動する外温性動物である。そのため環境水温の変動は, 種々の生理機能や生化学反応に変化を引き起こし, 極端な場合には死亡を招く。局所的な海水温の変動をもたらすものとして発電所等の温排水があるが, 近年では地球温暖化に伴う海水温の上昇が魚類の地理的分布や個体群構造などに影響を及ぼすことが懸念されている (Roessig *et al.*, 2004; 桑原ら, 2006; Madeira *et al.*, 2012; 須之部ら, 2014; Shultz *et al.*, 2016; Tose *et al.*,

2017)。これら環境水温の変動に伴う海産魚類への影響を検討する場合, 例えば, ある魚種の高温側の生存限界温度に関する知見は, 南限域での生息分布の影響を知る手がかりとなり, 逆に低温側の生存限界温度に関する知見は, 北限域での越冬の可能性や北方への生息分布拡大を予測するうえで不可欠であろう。

魚類の温度耐性は馴致温度の影響を受け, 馴致温度が高くなるほど50%致死温度など反応温度が高くなる傾向が認められる (土田, 2002)。また接触時間の延長に伴って高温側試験では50%致死温度が低下する傾向が認められる (Fry *et*

(2017年8月4日受付, 2017年9月21日受理)

*1 公益財団法人海洋生物環境研究所 中央研究所 (〒299-5105 千葉県夷隅郡御宿町岩和田300番地)

§ E-mail: tsuchida@kaiseiken.or.jp

*2 元公益財団法人海洋生物環境研究所職員

*3 現住所 蝶々魚研究所 (〒299-5232 千葉県勝浦市川津1637)

*4 公益財団法人海洋生物環境研究所 実証試験場 (〒945-0017 新潟県柏崎市荒浜四丁目7-17)

al.,1946 ; Brett,1956 ; 土田・瀬戸熊, 1997)。このため、無限時間の温度接触における50%致死温度を初期致死温度と定義されているが、実用的には7日間の接触時間から50%致死温度を求めることが多い。さらに馴致温度と初期致死温度が一致する温度は最終致死温度と呼ばれている (Fry *et al.*, 1946 ; 鈴木ら, 2013)。この最終致死温度は魚種の生存の限界温度であり、海水温上昇による生息分布などの影響を予測するうえで特に必要な知見と考えられる。しかしながら海産魚について最終致死温度を測定された例は極めて少ない (土田・瀬戸熊, 1997 ; 磯野ら, 2008)。そこで本研究では、沿岸性魚類14種について生存限界温度である高温側および低温側の最終致死温度を明らかにした。

材料および方法

公益財団法人海洋生物環境研究所中央研究所 (千葉県御宿町) で試験に供した供試魚は、飼育中の親魚より産卵孵化したものを養成飼育した11種 (スズキ *Lateolabrax japonicus*, イサキ *Parapristipoma trilineatum*, クロダイ *Acanthopagrus schlegeli*, キチヌ *Acanthopagrus latus*, ミナミクロダイ *Acanthopagrus sivicolus*, ハマフエフキ *Lethrinus nebulosus*, ホシギス *Sillago maculata*, アオギス *Sillago parvisquamis*, シロギス *Sillago japonica*, イシダイ *Oplegnathus fasciatus*, ヒラメ *Paralichthys olivaceus*), および千葉県外房海域 (乙浜漁港から大原漁港の範囲) で採集した稚魚1種 (ナンヨウツバメウオ *Platax orbicularis*) とした。このほか熱帯魚販売業者より稚魚を購入した2種 (熊本県産ソラスズメダイ *Pomacentrus coelestis*, 沖縄県産トゲチウウオ *Chaetodon auriga*) は公益財団法人海洋生物環境研究所実証試験場 (新潟県柏崎市) に搬送したのち試験に供した。試験に先立ち、各供試魚は試験開始温度とほぼ同じ温度で7~14日間馴致飼育を行った。

最終致死温度試験には容積60L (ポリ塩化ビニル製) もしくは100L (ポリカーボネート製) の小型円形水槽あるいは容積500L (FRP製) の大型円形水槽を魚体に合わせて適宜用いた。小型円形水槽内の海水は濾過海水を加温した温海水と冷却した冷海水を適宜混合し、さらに熱交換器で設定水温の微調整を行ったのち注水した。注水量は毎分0.3~1Lの範囲で適宜調節する掛け流し式ある

いは一部再循環する方式で、水温を高い精度で維持することができた。大型円形水槽では、上記の温海水と冷海水を電動弁で設定温度に自動調節される温度調節ユニットを用いた。温度調節された海水は毎時300~360Lで掛け流した。いずれも海水は、砂ろ過されたものを使用した。

高温側と低温側の各試験では、それぞれ5~15個体を水槽に収容した。試験開始の水温は馴致温度とし、以後は7日間毎に1°C上昇もしくは下降させた。この試験期間中の温度変化は、試験を行った千葉県や新潟県沿岸における月別の平均水温の変化速度に近似している。なお、温度変更には約1~4時間を要した。

試験期間中は、体重の1~2%相当量の冷凍アミと自家製モイストペレットを残餌がないように1日2回与えた。なお、ナンヨウツバメウオとトゲチウウオには冷凍アミに冷凍アサリを混合したものを給餌した。給餌と同時に、摂餌状態、行動状態、生死の観察を行った。試験終了時に測定した供試魚14種の平均体重は1~15gの範囲にあった。

高・低温側の最終致死温度の算出は、磯野ら (2008) に準じて算出した。すなわち試験温度と7日間経過時の死亡率との関係から死亡率が50%に相当する温度を求め、これを高温側最終致死温度 ($UULT_{50}$) と低温側最終致死温度 ($ULLT_{50}$) とした。また、各供試魚が7日間で100%生残した最も高い温度および最も低い温度を、それぞれ高温側100%生残限界温度 (UST_{100}) と低温側100%生残限界温度 (LST_{100}) とした。

結果

試験期間中、7日間毎の水温は目標とした値にほぼ調節され、平均値の標準偏差は $\pm 0.1\sim 0.3^{\circ}\text{C}$ であった。また、試験期間中のpHは8.10~8.29、溶存酸素飽和度は87~110%の範囲内であった。

第1表に魚類14種の温度耐性の結果を示した。 $UULT_{50}$ は $32.2\sim 37.5^{\circ}\text{C}$ の範囲にあり、ナンヨウツバメウオ (37.5°C) が最も高く、続いてアオギスとキチヌが $36.5\sim 36.4^{\circ}\text{C}$ 、クロダイ、ミナミクロダイ、トゲチウウオ、ハマフエフキが $35.6\sim 35.3^{\circ}\text{C}$ に、さらにスズキ、ホシギス、イサキ、イシダイ、シロギスは $34.8\sim 34.3^{\circ}\text{C}$ の範囲にあった。ソラスズメダイ (32.9°C) とヒラメ (32.2°C) は、本試験で対象とした14種の中で最も低い値で

第1表 沿岸性魚類14種の高低温側の最終致死温度と生残温度および温度耐性幅

魚種名	平均 体重 (g)	高温側(°C)			低温側(°C)			温度耐性幅(°C)	
		馴致 温度	UULT ₅₀ ^{*1}	UST ₁₀₀ ^{*2}	馴致 温度	ULLT ₅₀ ^{*3}	LST ₁₀₀ ^{*4}	UULT ₅₀ - ULLT ₅₀	UST ₁₀₀ - LST ₁₀₀
スズキ	8.0	28.1	34.8	34	11.0	1.5	3.0	33	31
イサキ	3.5	27.9	34.4	33	16.3	8.7	12.0	26	21
クロダイ	5.4	28.1	35.6	32	10.0	4.3	6.0	31	26
キチヌ	1.0	28.2	36.4	35	20.1	5.0	6.0	31	29
ミナミクロダイ	7.0	32.2	35.4	33	20.0	4.0	7.0	31	26
ハマフエフキ	3.7	31.9	35.3	33	20.1	12.7	14.0	23	19
ホシギス	1.5	28.0	34.6	33	19.8	12.4	13.0	22	20
アオギス	7.5	28.1	36.5	36	19.9	3.5	5.0	33	31
シロギス	8.3	30.2	34.3	32	12.1	6.5	9.0	28	23
トゲチョウチョウウオ	4.9	26.0	35.4	33	18.0	13.5	15.0	22	18
ソラスズメダイ	4.7	26.0	32.9	32	18.0	10.4	12.0	23	20
イシダイ	5.5	31.0	34.3	33	10.1	6.6	8.0	28	25
ナンヨウツバメウオ	14.8	29.0	37.5	36	23.0	14.8	16.0	23	20
ヒラメ	6.0	28.0	32.2	31	8.0	1.4 >	1.4 >	31 <	30 <

*1 UULT₅₀ : 高温側最終致死温度, *2 UST₁₀₀ : 高温側100%生残温度, *3 ULLT₅₀ : 低温側最終致死温度,

*4 LST₁₀₀ : 低温側100%生残温度

あった。UST₁₀₀は31~36°Cの範囲にあり、UULT₅₀よりも0.5~3.6°C低い値であった。

14種のULLT₅₀は1.5~14.8°Cの範囲にあり、ナンヨウツバメウオ(14.8°C)、トゲチョウチョウウオ(13.5°C)、ハマフエフキ(12.7°C)、ホシギス(12.4°C)、ソラスズメダイ(10.4°C)が高く、続いてイサキ、イシダイ、シロギス、キチヌ、クロダイ、ミナミクロダイ、アオギスの順に低く(8.7~3.5°C)、スズキが1.5°Cと最も低い値であった。LST₁₀₀は3~16°Cの範囲にあり、ULLT₅₀よりも0.6~3.3°C高い値であった。なお、ヒラメは馴致温度8°Cから1.4°Cに速やかに移した結果、全個体(10個体)が移行直後に平衡喪失状態になったが、24時間後には全個体が正常な状態に復帰した。その後も平衡喪失状態など異常な行動を示す個体は認められなかったことから、ULLT₅₀は1.4°C以下と推定された。

考 察

海水温の上昇による魚類への致死的影響は、生息域の水温が対象となる魚種のUST₁₀₀あるいはUULT₅₀を超えると現れ始めると考えられる。桑

原ら(2006)は、IPCC第3次報告から現在の海水温より1°C上昇(30年後)、1.5°C上昇(50年後)、3.0°C上昇(100年後)を設定した日本沿岸の水温予測と、水産生物の温度に関する既往知見から分布域の影響を調べた。その結果、温帯性種の代表的なマダイ、ヒラメ、トラフグなどの生息適水温上限が28~30°C程度であり、生息分布域の南限での温度上昇に伴って、これら生物は北上する影響が生じる可能性を推測している。本試験結果においてもヒラメのUULT₅₀とUST₁₀₀は31~32°Cと供試魚14種の中で最も低く、生息南限域での海水温上昇による影響の生じやすい魚種といえる。また、亜熱帯区から熱帯区に分布するソラスズメダイ(UULT₅₀=32.9°C, UST₁₀₀=32°C)においても、海水温の2~3°Cの上昇で南限付近の生息分布域の縮小が考えられる。逆に、生息分布域の冬期水温がUULT₅₀より高くなると越冬が可能となり、南方系魚種の北限分布域の拡大の可能性が考えられる。須之部ら(2014)は2008年から2010年にかけて魚類相調査と合わせて水温調査を実施した結果、広島県倉橋島および福岡県恋の浦では南方系種が出現できなかったのは、冬期に11°Cまで下がるためと考察している。本試験に供した魚種のう

ち、キチヌとミナミクロダイを除く南方系魚種5種（ナンヨウツバメウオ、トゲチョウチョウウオ、ハマフエフキ、ホシギス、ソラスズメダイ）はULLT₅₀が10°C以上、LST₁₀₀が12°C以上であり、生息域の水温がLST₁₀₀より低いことから、低水温期に生息が制限されていることが、本試験の温度耐性の結果からも明らかである。冬期の最低水温が15°Cを下回る程度の千葉県坂田と長崎県野母崎、また15~16°C程度の鹿児島県平崎や高知県横浪海岸、さらには高知県柏島、和歌山県串本などでは南方系魚種（ソラスズメダイなど）の生息が報告されている（須之部ら, 2014; Tose *et al.*, 2017）。本試験で対象とした南方系魚種では、これら海域の最低水温よりもULLT₅₀およびLST₁₀₀が低いことから冬期も生息することができると推定される。一方、千葉県外房海域で採集されたナンヨウツバメウオは採集された海域の最低水温（11~13°C; 海上保安庁ホームページ, 2014）よりもULLT₅₀（14.8°C）およびLST₁₀₀（16°C）が高く、現状では冬期における越冬の可能性は低いと考えられるが、今後、海水温が2~3°C上昇すると、周年の生息が可能と推定される。このように魚類の温度耐性から海水温上昇による影響を予測することも可能であると考えられた。

温度耐性多角形（温度耐忍領域）の平方摂氏度（面積）は馴致温度と致死温度等の温度耐性の関係から得られ、広温性種や狭温性種などの指標として用いられている（Brett, 1956; Elliott, 1981; 鈴木ら, 2013）。同様に、各魚種のULLT₅₀とLST₁₀₀の差（温度耐性幅）についても、温度耐性の指標として用いることが可能と考えられている（Beitinger and Bennett, 2000; Shultz *et al.*, 2016）。試験に用いた14種の温度耐性幅は22~33°Cの範囲にあった。そのうちアオギス、スズキ、クロダイ、キチヌ、ミナミクロダイ、ヒラメの温度耐性幅は31~33°Cと幅広く広温性魚種と考えられた。それに対してホシギス、トゲチョウチョウウオ、ハマフエフキ、ソラスズメダイ、ナンヨウツバメウオの温度耐性幅は22~23°Cと狭く狭温性魚種に区分されると考えられた。イサキ、シロギス、イシダイの温度耐性幅は26~28°Cで広温性と狭温性の中間的な魚種と区分された。広温性魚種と考えられた6種はいずれも浅所や河口域あるいは干潟域など比較的環境変化の大きい水域にも分布していることが共通している。また、狭温性魚種に区分された5種はULLT₅₀が10°C以上と高く、

主に亜熱帯区から熱帯区（インド-西太平洋熱帯海域）に分布する熱帯系魚種であった。

今回、試験に供した魚種は暖温帯区から冷温帯区に分布する温帯系と亜熱帯区から熱帯区に分布する南方系である。南方系種のうちトゲチョウチョウウオ、ハマフエフキ、ソラスズメダイは温帯域にも分布する特性を持っている。これらは生息分布域の北限の冬期水温とULLT₅₀とがおよそ一致しており、生息分布と温度耐性が深いかわりがあることが示唆された。今後、ナンヨウツバメウオなど熱帯系の無効散布魚種や亜熱帯区および熱帯区を中心としたより狭い分布特性を持った魚種、および冷温帯区から亜寒帯区に生息する魚種について、温度特性を明らかにしておくことが、海水温上昇による影響予測に必要と考えられる。さらに、魚類の温度耐性や選好温度などの温度反応は、成長段階や年齢によって異なることも報告されている（土田・田端, 1997; 土田, 2002; Golovanov, 2012）。本試験で使用した供試魚はいずれも幼稚魚期である。今後、成長段階など生活史と温度反応特性との関わりについても検討する必要がある。

謝 辞

本稿へのご校閲と有益なご助言を賜った公益財団法人海洋生物環境研究所馬場将輔博士、木下秀明博士および中村幸雄博士に厚く御礼申し上げる。本研究は通商産業省資源エネルギー庁（当時）の委託事業「大規模発電所取放水影響調査－温排水生物影響調査」および経済産業省原子力安全・保安院の委託事業「火力・原子力関係環境審査調査－発電所生態系予測手法検討調査」の一環として行われたことを記して、関係各位に御礼申し上げます。

引用文献

- Beitinger, T.L. and Bennett, W.A. (2000). Quantification of the role of acclimation temperature in temperature tolerance of fishes. *Env. Biol. Fish.*, **58**, 277-288.
- Brett, J. R. (1956) Some principles in the thermal requirements of fishes. *Q. Rev. Biol.*, **31**, 75-87.
- Elliott, J. M. (1981). Some aspects of thermal stress

- on freshwater teleosts. In "Stress and Fish" (ed. Pickering, A. D.), Academic Press, New York, 209-245.
- Fry, F. E. J., Hart, J. S. and Walker, K. F. (1946). Lethal temperature relations for a sample of young speckled trout, *Salvelinus fontinalis*. *Univ. Toronto Stud. Biol. Ser.*, **54**, 1-35.
- Golovanov, V. K. (2012). Influence of various factors on upper lethal temperature (Review). *Inland Water Biol.*, **5**, 105-112.
- 海上保安庁ホームページ (2014). 定地水温データ/観測地点の情報一覧. http://www.jodc.go.jp/data/coastal/kikan_list.htm (2017年8月3日に閲覧).
- 磯野良介・瀬戸熊卓見・佐藤祐介・吉富耕司 (2008). マダイ、クロダイの最終致死温度に及ぼす低塩分、低酸素の影響. *海生研研報*, **No.11**, 1-6.
- 桑原久実・明田定満・小林 聡・竹下 彰・山下洋・城戸勝利 (2006). 温暖化による我が国水産生物の分布域の変化予測. *地球環境*, **11**, 49-57.
- Madeira, D., Narciso, L., Cabral, H.N. and Vinagre, C. (2012). Thermal tolerance and potential impacts of climate change on coastal and estuarine organisms. *J. Sea Res.*, **70**, 32-41.
- Roessig, J. M., Woodley, C. M., Cech, Jr. J. J. and Hansen, L. J. (2004). Effects of global climate change on marine and estuarine fishes and fisheries. *Rev. Fish Biol. Fish.*, **14**, 251-275.
- Shultz, A. D., Zuckerman, Z. C. and Suski, C. D. (2016). Thermal tolerance of nearshore fishes across seasons: implications for coastal fish communities in a changing climate. *Mar. Biol.*, **163(article 83)**, 1-10.
- 須之部友基・川瀬裕司・坂井陽一・清水則雄・望岡典隆・田和篤史・竹垣 毅・中村洋平・出羽慎一 (2014). 地球温暖化と南日本各地における魚類相の比較. *千葉県生物多様性センター研究報告*, **No.7**, 3-13.
- 鈴木 讓・植松一眞・渡部終五・会田勝美 (2013). 総論. 「増補改訂版魚類生理学の基礎」(会田勝美・金子豊二編), 恒星社厚生閣, 東京, 1-27.
- Tose, K., Hirata, T., Kotera, Y., Kanda, M. and Nakamura, Y. (2017). Occurrence and reproduction of tropical fishes in ocean warming hotspots of Japanese temperature reefs. *Env. Biol. Fish.*, **100**, 617-630.
- 土田修二 (2002). 沿岸性魚類の温度選好に関する実験的研究. *海生研研報*, **No.4**, 11-66.
- 土田修二・瀬戸熊卓見 (1997). クロソイ幼魚の温度反応. *日水誌*, **63**, 317-325.
- 土田修二・田端重夫 (1997). イシダイ幼稚魚の成長に伴う選好温度の変化. *日水誌*, **63**, 64-69.