

原著論文

発電所温排水放水口に蛸集する魚類の一種
ギンガメアジの温度耐性・選好性

三浦雅大^{*1§}・山本正之^{*2†}・瀬戸熊卓見^{*2,3}・土田修二^{*1}

Temperature Tolerance and Preference of the Bigeye Trevally *Caranx sexfasciatus*,
a Kind of Fish Attracted to the Thermal Effluent Outlet of Thermal Power Plants

Masao Miura^{*1§}, Masayuki Yamamoto^{*2†}, Takumi Setoguma^{*2,3} and Shuji Tsuchida^{*1}

要約: 南日本の発電所温排水放水口に蛸集する代表的な魚種であるギンガメアジ *Caranx sexfasciatus* の選好温度および致死温度を室内実験によって測定し, 周年にわたって本種の蛸集が観察されている火力発電所の温排水の水温と比較検討した。本種の最終選好温度 (Fpt) は29.1°C, 高温側および低温側の最終致死温度 (UULT₅₀, ULLT₅₀) はそれぞれ, 36.5°C, 15.1°Cと推定された。発電所周辺海域の自然の海水温度は, 12月下旬以降にギンガメアジのULLT₅₀を下回るが, 温排水の水温が自然の海水温度よりも平均で5.0°C高いため, 温排水放水口近傍には本種の生残が可能な水温条件が保たれると考えられた。一方, 年間で最も水温が高くなる9月には温排水の水温がFptより最大で約5°C高くなり, 必ずしも本種の生息に好適な条件ではないことから, 水温上昇以外の環境変化も本種の誘因に関与しているものと推察された。

キーワード: ギンガメアジ, *Caranx sexfasciatus*, 発電所, 温排水, 温度耐性, 温度選好性

Abstract: The preferred and lethal temperature of the bigeye trevally *Caranx sexfasciatus*, a typical fish species attracted to the thermal effluent outlet of power plants in southern Japan, estimated by laboratory experiments were compared with the seasonal temperatures of the thermal effluent where the species shoaled throughout the year. The final preferendum (Fpt), the ultimate upper and lower lethal temperature (UULT₅₀ and ULLT₅₀) were estimated to be 29.1°C, 36.5°C and 15.1°C, respectively. The temperature of the thermal effluent was on average 5.0°C higher than the natural seawater temperature. Therefore, even though the natural seawater temperature was below the ULLT₅₀ of the bigeye trevally after late December, it was considered that the water temperature condition that allowed survival of the species was maintained in the vicinity of the outlet. On the other hand, in September, when the water temperature is the highest in the year, the temperature of the thermal effluent was at most about 5.0°C higher than the Fpt. The fact that the water temperature of the thermal effluent in summer is not necessarily a suitable condition for the species inhabitation suggests that environmental changes other than the water temperature rise are also involved in the incentive to the outlet of the species.

Key words: bigeye trevally, *Caranx sexfasciatus*, thermal power plant, thermal effluent, temperature tolerance, temperature preference

(2019年9月3日受付, 2020年1月30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)

§ E-mail: m-miura@kaiseiken.or.jp

*2 元公益財団法人海洋生物環境研究所職員

† 2018年6月13日逝去

*3 蝶々魚研究所 (〒299-5232 千葉県勝浦市川津1637)

まえがき

火力・原子力発電所温排水放水口近傍への魚類の蝟集は各地で観察されており（山本ら, 2003）、放水口近傍に釣り公園を設営し積極的に利用している例もある（株式会社JERAの碧南火力発電所に併設された碧南釣り広場等）。また、外来種の帰化による在来生物への影響が懸念されている近年では、本来ならば無効分散である熱帯性の生物が、温排水による海水温度の上昇によって放水口近傍域に生残・定着することが問題視される場合もある（羽生・関口, 2000; 益田, 2012）。このような温排水による海生生物の蝟集の促進あるいは抑制のいずれを検討するにしても対象生物の蝟集機構の解明が必要である。

温排水放水口近傍における魚類蝟集の要因としては、温排水の放出に伴う水温の上昇、水流や気泡の発生、餌料の集積等が考えられるが、九州西岸の火力発電所周辺海域において魚類分布を調査した例では（山本ら, 2003）、熱帯性魚類の蝟集が多く見られることから、海水温度の上昇が主要因である可能性が高い。また、同海域では、蝟集魚類のうち温帯性の魚種は冬季を中心とした低水温期に蝟集し、熱帯性の魚種はほぼ周年にわたって蝟集することから、魚種によって好適生息水温に差があり、温排水放水口近傍域の季節的な水温変化に対する反応行動（選好あるいは忌避）が異なることが蝟集時期の差異の一因となっていると推察される。しかし、実際に温排水放水口近傍域の水温の季節変化とそこに蝟集する魚種の温度耐性や選好性を照合した報告はほとんど無い。

本稿で研究対象としたギンガメアジ *Caranx sexfasciatus*（第1図）は、南日本の発電所温排水放水口近傍に蝟集する代表的な魚種である（山本ら, 2003）。本種はインド・太平洋、東太平洋の熱帯および亜熱帯海域に広く分布し、成魚は通常サンゴ礁域に生息するが、幼若個体は内湾や河口汽水域に多く、河川の淡水域にまで侵入することもある（Laroche *et al.*, 1984; Smith-Vaniz, 1984; 具志堅, 1988; 木下, 1989; 木村, 1997）。本邦での分布域は南日本沿岸とされているが（具志堅, 1988; 木村, 1997）、釣り雑誌等の情報によると南日本沿岸で釣獲される個体は四国・九州南部以南の温暖な海域を除くとほとんどが幼若個体であり、出現時期は夏季から初冬までに限られていること、本種の幼若個体は流木等の漂流物に伴伴す

る性質があること（木村ら, 1998）、伊豆では冬季に海水温度が13℃台に低下した際に当歳魚の大量斃死が観察されていること（上村, 1989）等から、本邦沿岸に出現する幼若個体は主として黒潮およびその分流によって南方海域から輸送されたもので、冬季の低水温によって死滅する無効分布である可能性が高い。

本稿では、温排水放水口近傍への魚類の蝟集機構の解明に資するため、ギンガメアジの選好温度および致死温度を室内実験によって確認し、実際に本種の蝟集が観察されている発電所の温排水の水温の季節変化と比較検討した。

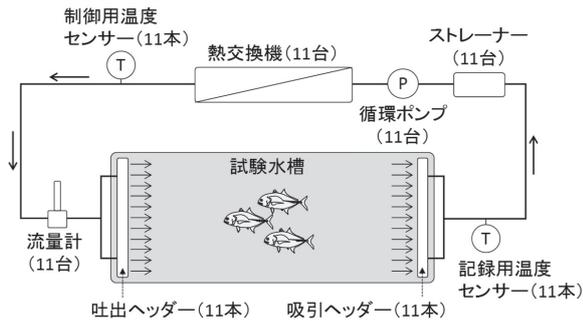
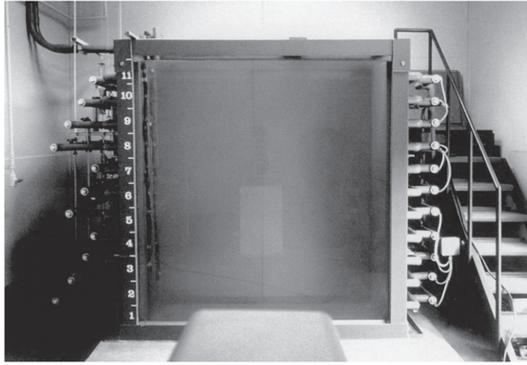


第1図 火力発電所の温排水放水口近傍で釣獲したギンガメアジ（三浦ら, 2003 より引用）。

方法

選好温度試験 ギンガメアジの選好温度を推定するために、垂直温度勾配試験装置（第2図）を用いた選好温度試験を行った。垂直温度勾配試験装置は土田（2002）と同一のものであり、11の異なる温度に調節した海水を層状に試験水槽（幅1,500mm×奥行き600mm×水深1,650mm、容量約1,500L）内に注入することにより、鉛直方向の温度勾配を形成することができる。

供試魚には、1998年7月に千葉県勝浦市興津町の海水浴場において投網によって採捕したのち、濾過海水を掛け流しにした500L円形水槽を用いて16日間飼育したギンガメアジ未成魚（当歳魚）4個体を使用した（サイズは第1表参照）。なお、飼育海水の交換率は約1回/時であり、水温の調節は行わず、蓄養期間中に10分間隔で測定した水温は19.2～23.8℃の範囲で変化した。また、飼育期間中は配合飼料を1日2回、飽食するまで投与した。



第2図 垂直温度勾配試験装置の外観（上）と循環回路の概略（下）。

水温を22℃（採捕時の生息場の水温）に設定した垂直温度勾配反応試験装置に供試魚を収容し、この状態で一夜放置して供試魚を試験水槽に馴らしたのち試験を開始した。第3図に試験水槽内の各水深帯（No.1～11）の温度推移と測定期間（0～Ⅳ期）を示す。まず、試験水槽全体の水温が22℃の温度勾配無しの状態（0期）で、供試魚の滞泳位置と各水深帯の温度を1時間にわたって1分おきに記録した。その後、水深帯No.1～11に15～35℃の温度勾配（隣接する水深帯の差温2℃）を形成させた。なお、温度勾配の形成については、急激な温度変化による供試魚への影響を軽減するために、約1時間かけて徐々に所定の水温へと調整した。

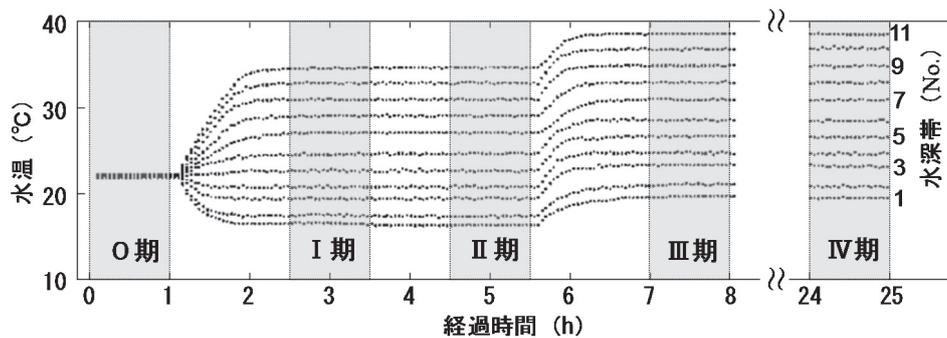
温度勾配が安定したのち、供試魚の滞泳位置と各エリアの温度を1時間にわたって1分おきに記録した（Ⅰ期）。さらに1時間後、2回目の観測を同様に行った（Ⅱ期）。

第1表 各試験の供試魚の個体数およびサイズ

試験名	馴致温度*1 (℃)	供試魚 個体数	標準体長*2 (mm)	体重*2 (g)	
選好温度試験	(22.0)	4	102.5 ± 14.0	25.2 ± 9.7	
CTM試験	温度上昇試験	18.0	6	133.7 ± 21.9	54.6 ± 24.8
		25.0	6	149.9 ± 27.5	85.7 ± 42.3
		32.0	6	143.5 ± 29.5	82.3 ± 41.1
	温度降下試験	18.0	6	128.0 ± 16.0	52.8 ± 18.8
		25.0	6	143.5 ± 24.1	80.6 ± 43.7
		32.0	6	146.5 ± 26.5	89.8 ± 51.7
最終致死 温度試験	高温側試験	18.0	10	139.3 ± 17.6	55.1 ± 20.9
	低温側試験	32.0	10	155.3 ± 15.0	102.9 ± 31.9

*1 温度馴致を行わなかった試験については、試験開始時の水温を括弧内に示した。

*2 平均値±標準偏差を示した。



第3図 選好温度試験期間中における試験水槽内の各水深帯の温度推移と供試魚の遊泳位置記録時間帯（0～Ⅳ期）。

次に、各水深帯の水温を4℃上昇させることにより、温度勾配を19～39℃にシフトし、供試魚の滞泳位置と各エリアの温度を同様に記録した（Ⅲ期）。さらに、この温度勾配条件下で一晩放置し、翌日（24時間後）に同様の観測を行った（Ⅳ期）。

これらの観測結果から、遊泳水温の頻度分布を作成し、遊泳水温の平均値（遊泳水温を頻度で重みづけした加重平均）を選好温度の推定値とした。

臨界最高・最低温度試験 水温を一定の速度で上昇あるいは降下させた場合に、供試魚が体の平衡を喪失して横転する高温側と低温側の温度（臨界最高温 critical thermal maximum: CTMaxおよび臨界最低温度 critical thermal minimum: CTMin）および死亡する温度（高温側死亡温度 upper death temperature: UDTおよび低温側死亡温度 lower death temperature: LDT）を求めるため、以下の温度上昇・降下試験を行った。

本試験に用いた装置（第4図）も土田（2002）と同一のものである。容積が38Lの塩化ビニル製試験水槽と熱交換器から構成され、水槽内の海水を所定の速度で昇温あるいは降温させることおよび任意の温度で一定に維持することが可能である。

本試験では、1998年7～8月に千葉県いすみ市、御宿町および勝浦市の漁港（大原、岩和田、川津等）において投網や釣りによって採捕し、中央研究所で温度馴致したギンガメアジ未成魚を供試魚とした。温度馴致には3つの500L円形水槽を用い、それぞれに17～18個体の供試魚を収容した。馴致温度は18℃、25℃、32℃とし、各水槽の飼育海水

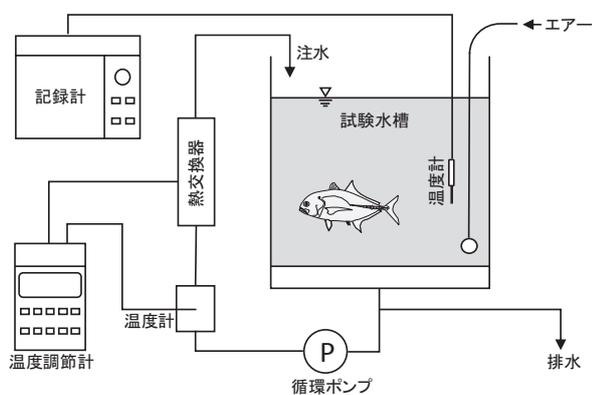
の温度を1～3日かけてそれぞれの馴致温度へ移行させた後、2週間以上馴致飼育した。なお、馴致期間中の飼育海水（濾過海水）の交換率は1回/時であり、配合飼料を1日2回飽食するまで投与した。

馴致飼育終了後、試験水槽内の海水の温度を馴致温度と等しくなるように設定し、1回の試験当たり3個体の供試魚を収容した。この状態で一時間放置し、供試魚の行動に異常が見られないことを確認したのちに温度上昇あるいは降下を開始した。温度上昇試験では馴致温度からの昇温速度を+5℃/時とし、供試魚が横転した時点の温度をCTMax、鰓蓋活動が停止した時点の温度をUDTとして記録した。温度降下試験では降温速度を-5℃/時とし、温度上昇試験と同様に、供試魚が横転した時点の温度をCTMinとして記録した。LDTについては、低温条件下では鰓蓋活動が停止しても生存している場合があるため、水槽底面を金属棒（ステンレス製、直径8mm、長さ1m）で叩いても反応しなくなった時点の温度とした。以上の温度上昇・降下試験を、各馴致群について二例ずつ実施した。

最終致死温度試験 飼育水温を自然の季節変化に類似したペースで上昇・降下させた場合に100%生残する最高温度と最低温度（高温側100%生残温度 upper 100% survival temperature: UST₁₀₀および低温側100%生残温度 lower 100% survival temperature: LST₁₀₀）および死亡率が50%となる高温側と低温側の温度（高温側最終致死温度 ultimate upper lethal temperature: UULT₅₀および低温側最終致死温度 ultimate lower lethal temperature: ULLT₅₀）を求めるために以下の試験を実施した。

2000年8～9月に千葉県御宿町の岩和田港、鴨川市小湊港等において釣獲したギンガメアジ未成魚を供試魚とした。これらを500L円形水槽2槽に10個体ずつ収容し、高温側と低温側の試験を実施した。なお、試験期間中の飼育海水（濾過海水）の交換率は1回/時であり、配合飼料を1日2回、飽食するまで投与した。

飼育海水の温度を高温側試験では32℃まで、低温側試験では18℃まで（それぞれこれまでに判明している飼育可能な最高および最低水温）上昇あるいは低下させ、7日間馴致させたのち7日毎に水温を1℃上昇あるいは低下させた。試験期間中は、飼育海水の水温を10分間隔で記録するとともに、供試魚の死亡個体数を毎日記録した。これらの試



第4図 臨界最高・最低温度試験に用いた装置の模式図。

験から、各供試魚が7日間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UST₁₀₀およびLST₁₀₀とした。また、水温と生残率の関係から、磯野ら(2008)に準じて生残率が50%となる温度を読みとり、UULT₅₀およびULLT₅₀を求めた。

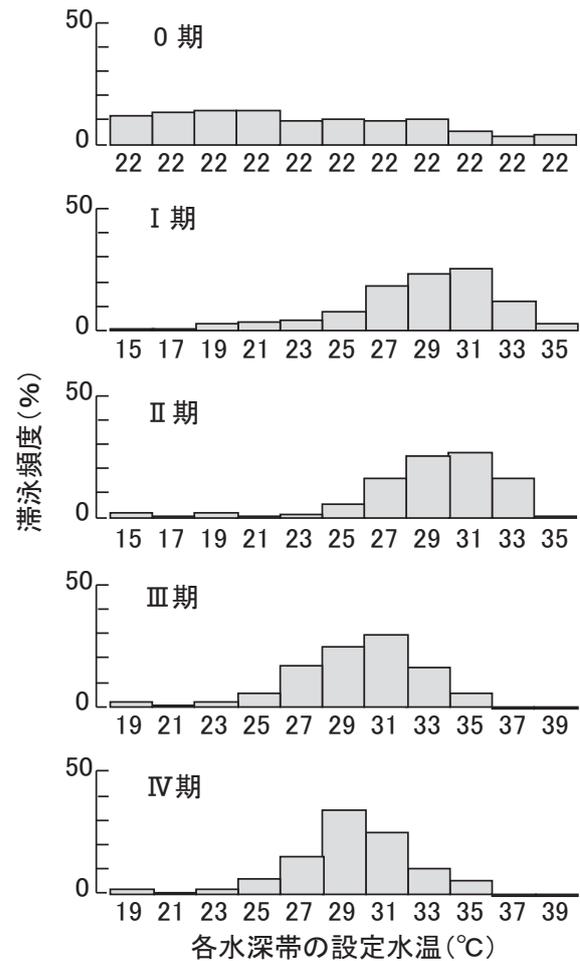
結果

選好温度試験 第5図に試験水槽内の各水深帯(水温帯)におけるギンガメアジの滞泳頻度を示す。温度無勾配状態(水温22℃)の試験水槽に移されたギンガメアジは、しばらくは底面付近に集まって定位していたが、一夜放置後の0期には試験水槽内を広く遊泳するようになった。15~35℃の温度勾配形成後のIおよびII期には、水温29~31℃の水深帯における滞泳頻度が高く、ここから高温側あるいは低温側の水深帯に向かってゆるやかに遊泳した後、急速に戻ってくる行動を繰り返した。IおよびII期における遊泳水温の平均値(遊泳水温を頻度で重みづけした加重平均)は、それぞれ28.5℃、28.9℃であった。

温度勾配を19~39℃にシフトしたIII期においては、IおよびII期において滞泳頻度の高かった水深帯と同じ水温(29~31℃)の水深帯における滞泳頻度が高かった。この状態で一夜放置した後のIV期においては、特に水温29℃の水深帯における滞泳頻度が高くなった。IIIおよびIV期における遊泳水温の平均値は、それぞれ29.5℃、29.1℃であった。

臨界最高・最低温度試験 試験結果を第2表に示す。一回目の試験と二回目の試験結果を比較したところ、温度降下試験の25℃馴致群において低温側死亡温度の平均値(各個体の測定結果の平均値)に1.1℃の比較的大きな差が見られたが、その他の試験結果については全て1.0℃未満の僅差であったため、以後、一回目と二回目の結果を合わせて解析した。

温度上昇試験では、昇温開始前は試験水槽の底面近くに定位している場合が多かったが、昇温開始後は温度上昇が進むにつれて水槽壁面に沿って水面直下を激しく遊泳するようになり、やがて平衡喪失状態となった。平衡喪失から数分後、水槽底面に横臥し、鰓蓋活動が停止した。鰓蓋活動停止後には、金属棒による打撃音・振動に対する反応は全く見られなかった。18、25、32℃馴致群そ



第5図 選好温度試験における供試魚の遊泳水温の頻度分布。

れぞれの臨界最高温度(CTMax)の平均値は、35.1、38.1、40.1℃、高温側死亡温度(UDT)の平均値は、35.5、38.4、40.3℃であった(第2表)。馴致温度(acclimation temperature: AT)に対するCTMaxおよびUDTの回帰式を求め、回帰係数の有意性検定を行ったところ、いずれも有意な相関関係($P < 0.01$)が認められた(第6図a)。

温度降下試験では、降温開始前は試験水槽の底面近くに定位している場合が多かったが、降温開始後は温度降下が進むにつれて水槽壁面に沿って遊泳するようになり、やがて平衡喪失状態となった。更に温度低下が進むと水槽底面に横臥し、鰓蓋活動が停止したが、その後も鰓や体表面の痙攣が続き、金属棒による打撃音・振動に対して反応が見られた。平衡喪失から刺激に対する反応が停止するまでには20~40分を要した。18、25、32℃

第2表 臨界最高・最低温度試験の結果

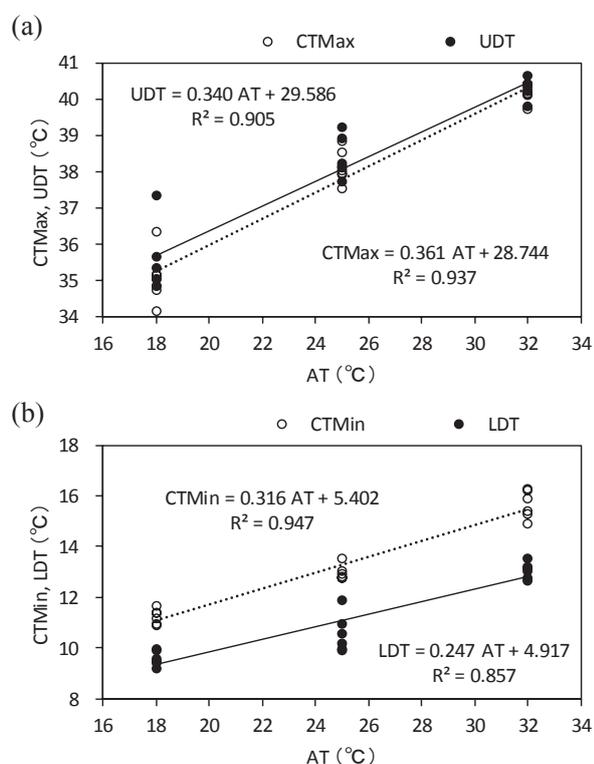
温度上昇試験

馴致温度 (°C)	臨界最高温度：CTMax (°C)			高温側死亡温度：UDT (°C)		
	一回目	二回目	全個体	一回目	二回目	全個体
18	35.4 ± 0.6	34.7 ± 0.4	35.1 ± 0.7	36.0 ± 1.0	35.1 ± 0.2	35.5 ± 0.8
25	38.4 ± 0.4	37.8 ± 0.2	38.1 ± 0.4	38.8 ± 0.5	38.0 ± 0.2	38.4 ± 0.5
32	40.2 ± 0.1	40.0 ± 0.2	40.1 ± 0.2	40.5 ± 0.1	40.1 ± 0.2	40.3 ± 0.2

温度降下試験

馴致温度 (°C)	臨界最低温度：CTMin (°C)			低温側死亡温度：LDT (°C)		
	一回目	二回目	全個体	一回目	二回目	全個体
18	11.5 ± 0.1	11.0 ± 0.1	11.2 ± 0.3	9.6 ± 0.2	9.6 ± 0.3	9.6 ± 0.3
25	13.0 ± 0.4	12.9 ± 0.1	13.0 ± 0.3	11.1 ± 0.5	10.0 ± 0.1	10.6 ± 0.7
32	16.1 ± 0.2	15.2 ± 0.2	15.7 ± 0.5	13.1 ± 0.3	13.0 ± 0.3	13.1 ± 0.3

平均値±標準偏差を示した。



第6図 馴致温度(AT)と反応温度の関係。

(a) 臨界最高温度：CTMax, 高温側死亡温度：UDT,
 (b) 臨界最低温度：CTMin, 低温側死亡温度：LDT。

馴致群それぞれの臨界最低温度 (CTMin) の平均値は、11.2, 13.0, 15.7°C, 低温側死亡温度 (LDT) の平均値は、9.6, 10.6, 13.1°Cであった (第2表)。温度上昇試験の結果と同様に、ATとCTMinおよびLDTの間には有意な相関関係 ($P < 0.01$) が認められた (第6図b)。

最終致死温度試験 馴致温度から1°C間隔で降温あるいは昇温した各温度段階に対応する試験期間をそれぞれI~VII期とし (低温側試験はV期まで), 各期の水温および生残率を第3表に示す。

高温側試験では、V期 (平均水温36.0°C) に最初の1個体が死亡し、続くVI期 (平均水温36.9°C) に8個体が死亡した。その後のVII期では水温が平均37.1°Cまでしか上がらなかったが、残りの1個体が死亡した。

低温側試験では、III期 (平均水温16.3°C) に1個体、IV期 (平均水温15.3°C) に3個体が死亡し、V期 (平均水温14.3°C) に残りの6個体全てが死亡した。

これらの結果から、高温側100%生残温度 (UST₁₀₀) および低温側100%生残温度 (LST₁₀₀) は、それぞれ34.8°C, 17.3°Cとなった。また、水温と生残率の関係 (第7図) から、高温側最終致死温度 (UULT₅₀) および低温側最終致死温度 (ULLT₅₀) は、それぞれ36.5°C, 15.1°Cとなった。

考 察

最終選好温度の推定 魚類の選好温度は前歴の温度である馴致温度の影響を受けることが多くの実験結果で明らかにされているが (Coutant, 1970; Reynolds, 1977; Reynolds and Casterlin, 1980等), 馴致温度の影響は時間の経過とともに薄れ、異なる温度馴致群それぞれの選好温度は、徐々に同じ温度域に収斂することが知られている (Fry, 1947; Coutant, 1970; Reynolds and Casterlin, 1980)。この収斂した温度は魚種に固有の値と考えられ、最終選好温度 (final preferred temperature あるいは

第3表 最終致死温度試験における試験期間（温度段階）ごとの死亡個体数

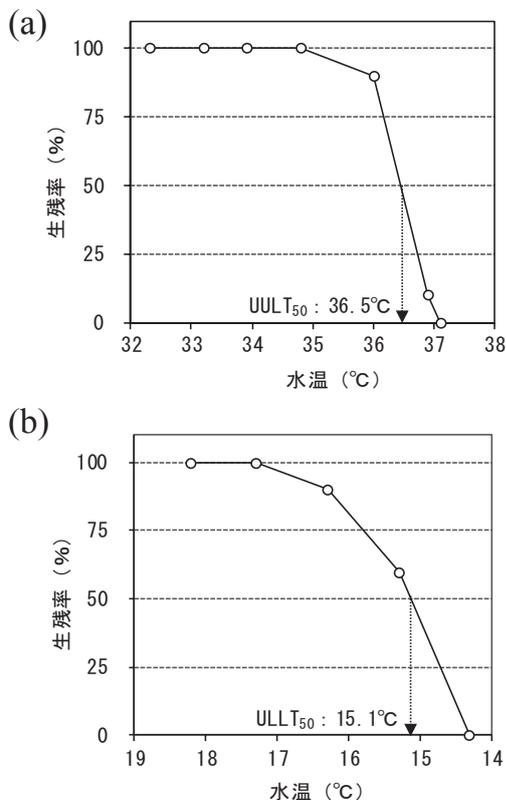
高温側試験

試験期間	設定温度 (°C)	平均水温*1 (°C)	死亡個体数	生残率 (%)
I	32	32.3	0	100
II	33	33.2	0	100
III	34	33.9	0	100
IV	35	34.8	0	100
V	36	36.0	1	90
VI	37	36.9	8	10
VII	38	37.1	1	0

低温側試験

試験期間	設定温度 (°C)	平均水温*1 (°C)	死亡個体数	生残率 (%)
I	18	18.2	0	100
II	17	17.3	0	100
III	16	16.3	1	90
IV	15	15.3	3	60
V	14	14.3	6	0

*1 10分間隔で測定した水温の平均値。



第7図 水温と生残率の関係および50%生残温度の推定。(a) 高温側試験, (b) 低温側試験。

final preferendum: Fpt) と呼ばれている。Fptは温度に対する行動の方向性（魚が現在の温度より高い温度あるいは低い温度のどちらを好むのか）を決める内的基準として用いることが可能と考えられ（土田, 2002）, 魚類の温度反応行動を検討するうえで有用な知見である。

Fptは一般的には異なる温度で馴致した供試魚を用いて温度選好試験を行い, 馴致温度 (AT) と選好温度の関係を求めることによって推定することができる。しかし, 一部の底生性の魚種は温度選好が不明瞭であるため, この方法でFptを求めることが難しい。このような魚種の一つであるヒラメについて, 土田 (2002) は以下のような方法でFptを推定している。土田は, まずFptが既知である魚類21種について, Fptとこれで馴致した (ATをFptとした) 場合の臨界最高温度 (CTMax) との間に回帰直線を得た。また, ヒラメのATとCTMaxとの間の回帰直線を求め, この回帰式のATをFptとした場合のCTMaxが, 他の21魚種における両者の関係に合致すると仮定してFptを推定する (すなわち, 2式の交点における水温をFptとすることができる) ことの妥当性を示した。なお, 同様にFptと高温側死亡温度 (UDT) の関係を利用した推定も行っている。

本稿のギンガメアジを対象とした選好温度試験では供試魚を一定の温度で馴致しなかったため, ATと選好温度の関係からFptを求めることはできない。そこで, 土田 (2002) のFptと高温耐性 (CTMax およびUDT) の関係を利用した方法に従い本種のFptを推定した。

ギンガメアジのATとCTMaxおよびUDTの関係 (第6図a, b) は下の回帰式で表される。

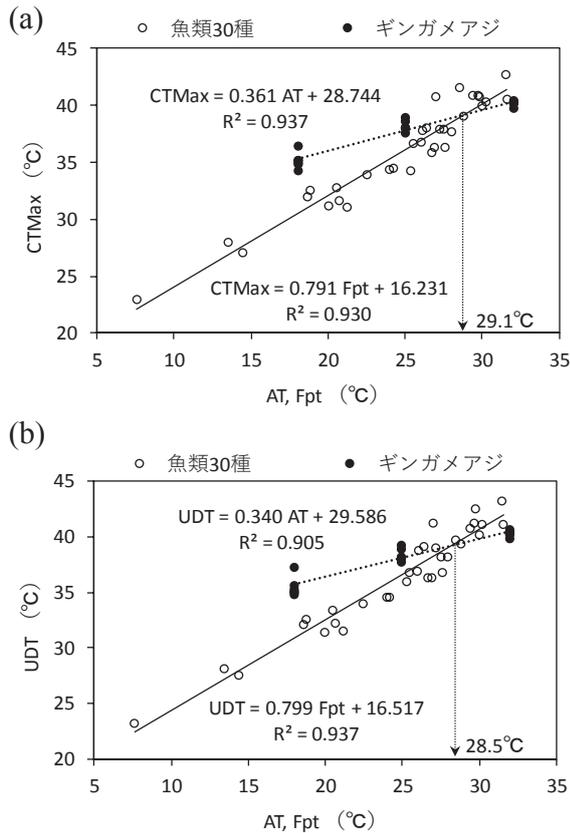
$$CTMax = 0.361 AT + 28.744 \dots \textcircled{1}$$

$$UDT = 0.340 AT + 29.586 \dots \textcircled{2}$$

一方, 土田 (2002) が魚類30種について求めたFptとFptで馴致した場合のCTMaxおよびUDTの関係は下式で表される (土田, 2002, 図16参照)。

$$CTMax = 0.791 Fpt + 16.231 \dots \textcircled{3}$$

$$UDT = 0.799 Fpt + 16.517 \dots \textcircled{4}$$



第8図 魚類30種の最終選好温度 (Fpt) とFptで馴致した場合の臨界最高温度 (CTMax)、高温側死亡温度 (UDT) の関係 (土田, 2002) を利用したギンガメアジのFptの推定。(a) CTMaxに基づく推定, (b) UDTに基づく推定。

土田にならいう式①, ②のATをFptに置き換え, ①, ③からFptを求めると29.1°C, ②, ④から求めると28.5°Cとなる (第8図)。これらの推定結果のうち, FptとCTMaxの関係から推定されたFptの値29.1°Cは, 本稿の選好温度試験において試験開始から最も時間が経過し (24時間後), 最も馴致温度の影響が薄れた値 (最もFptに近い値) と考えられるIV期の選好温度の値と一致したので, 以後この29.1°Cを本種のFptとする。

他魚種の温度反応特性値との比較 本稿で推定したギンガメアジの最終選好温度 (Fpt) を沿岸魚類30種の最終選好温度の測定結果 (土田, 2002) と比較すると, 熱帯種のギンガメアジのFptは7番目に高く, 広温性種として知られるクロダイ類3種 (クロダイ, キチヌ, ミナミクロダイ), スズキを除くと, 温帯・亜熱帯種よりも高い値であった (第4表)。また, 高温および低温側の最終致死

温度 (UULT₅₀, ULLT₅₀), 高温側および低温側の100%生残温度 (UST₁₀₀, LST₁₀₀) を沿岸性魚類14種の測定結果 (土田ら, 2018) と比較すると, ギンガメアジのUULT₅₀は2番目に, UST₁₀₀は4番目に高く, ULLT₅₀, LST₁₀₀は最も高かった (第5表)。温度耐性幅については, UULT₅₀とULLT₅₀の差が21.4°C, UST₁₀₀とLST₁₀₀の差が17.5°Cであり, いずれも最も狭かった。

以上のように, ギンガメアジは高水温を好み高温耐性に優れているが, 低温耐性は乏しく温度耐性の幅が狭いことが特徴である。そのLST₁₀₀やULLT₅₀は, 無効分散を行う典型的な魚類であるチョウチョウオ類の一種のトゲチョウチョウオよりも高く, ギンガメアジの南日本沿岸域における幼若個体の出現は, 温暖な亜熱帯海域を除くと無効分散である可能性が高い。

温度反応特性値と発電所取放水温度の比較 比較対象とした取放水温度は, 九州西岸に立地し, 温排水放水口近傍域におけるギンガメアジの蟄集が確認されている出力100万kW (定格出力50万kWの発電機2基) の火力発電所 (山本ら, 2003) における測定結果で, 発電所から提供された2001年9月1日~12月31日の期間 (以後, 調査期間とする。) のデータ (海生研, 2002) を整理した。なお, 発

第4表 魚類30種の最終選好温度 (土田, 2002) とギンガメアジの最終選好温度の比較

魚種名	体長 (cm)	最終選好温度 (°C)	魚種名	体長 (cm)	最終選好温度 (°C)
マダラ	7.7	7.6	ヘダイ	6.2	26.4
サケ	10.3	13.5	イサキ	10.3	26.7
ニシン	7.0	14.4	ブリ	19.0	26.9
アユ	5.7	18.6	ボラ	3.6	27.0
カタクチイワシ	9.8	18.8	トラフグ	6.9	27.2
マイワシ	14.6	20.0	カワハギ	6.0	27.6
クロソイ	5.2	20.5	ハマフエフキ	5.2	28.0
カサゴ	6.0	20.7	アオギス	9.7	28.5
メバル	5.0	21.2	ギンガメアジ	13.5	29.1
	14.0	22.6	クロダイ	5.6	29.8
シマアジ	10.2	22.5		11.5	28.8
マアジ	16.8	24.0	ホシギス	5.2	29.4
チダイ	10.0	24.2	スズキ	5.3	29.7
マダイ	11.7	25.3		11.4	30.0
シロギス	12.1	25.5	キチヌ	4.5	30.2
インダイ	6.7	27.5	コトヒキ	5.8	31.5
	14.0	26.0	ミナミクロダイ	5.9	31.6
クロメシナ	6.3	26.1			

■亜寒帯種, □温帯・亜熱帯種, □熱帯種, 岡村・尼岡 (1997) の日本近海の気候帯区分および各種の分布に関する記述に基づいて仕分けした。

第5表 沿岸性魚類14種の最終致死温度と生残温度および温度耐性幅（土田ら，2018）とギンガメアジの試験結果の比較

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	ULLT ₅₀	UST ₁₀₀	馴致温度	ULLT ₅₀	LST ₁₀₀	ULLT ₅₀ - ULLT ₅₀	UST ₁₀₀ - LST ₁₀₀
ヒラメ	6.0	28.0	32.2	31.0	8.0	1.4 >	1.4 >	30.8 <	29.6 <
ソラスメダイ	4.7	26.0	32.9	32.0	18.0	10.4	12.0	22.5	20.0
シロギス	8.3	30.2	34.3	32.0	12.1	6.5	9.0	27.8	23.0
インダイ	5.5	31.0	34.3	33.0	10.1	6.6	8.0	27.7	25.0
イサキ	3.5	27.9	34.4	33.0	16.3	8.7	12.0	25.7	21.0
ホシギス	1.5	28.0	34.6	33.0	19.8	12.4	13.0	22.2	20.0
スズキ	8.0	28.1	34.8	34.0	11.0	1.5	3.0	33.3	31.0
ハマエビ	3.7	31.9	35.3	33.0	20.1	12.7	14.0	22.6	19.0
シメノカ	7.0	32.2	35.4	33.0	20.0	4.0	7.0	31.4	26.0
トゲチヨチヨウ	4.9	26.0	35.4	33.0	18.0	13.5	15.0	21.9	18.0
クロダイ	5.4	28.1	35.6	32.0	10.0	4.3	6.0	31.3	26.0
キチヌ	1.0	28.2	36.4	35.0	20.1	5.0	6.0	31.4	29.0
アオギス	7.5	28.1	36.5	36.0	19.9	3.5	5.0	33.0	31.0
ギンガメアジ	65.3	32.0	36.5	34.8	18.0	15.1	17.3	21.4	17.5
ナヨウツハメ	14.8	29.0	37.5	36.0	23.0	14.8	16.0	22.7	20.0

■温帯・亜熱帯種，□熱帯種，岡村・尼岡（1997）の日本近海の気候帯区分および各種の分布に関する記述に基づいて仕分けした。

電所を挟んで西側の海岸から冷却水を取水し，東側の港湾内に温排水を放出しているため温排水の再循環は見られず，取水温度は周辺海域の自然の海水温度と同等である。温排水の放水方式は開渠式で，放出された温排水は放水口のごく近傍では海底（水深5～6m）にまで達するが，その後急速に浮上し徐々に水温を低下させながら前面海域の表層を沖側に拡散して行く。

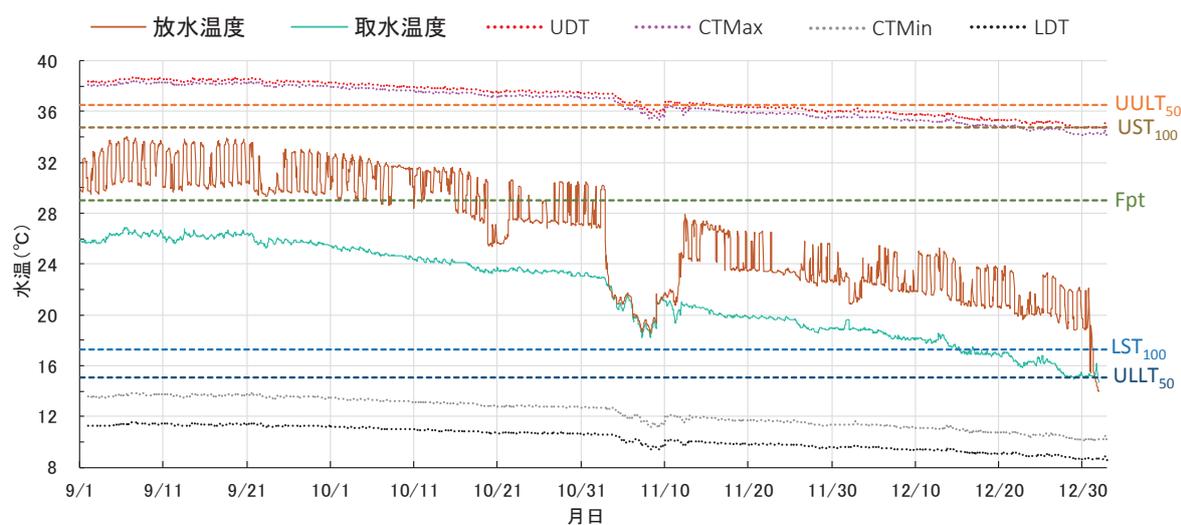
第9図に発電所の取放水温度とギンガメアジの温度反応特性値の比較を示す。なお，取放水温度については基本的に1，2号機それぞれの取水温度および放水温度の平均値を示したが，いずれかの発電機が定期検査等により停止している場合には運転中の発電機のデータのみを用いた。また，11月4日～12日の期間および12月31日には1，2号機ともに運転を停止したため，放水温度が低下し取水温度も不安定となった。

放水温度は発電所の出力調整により日周期的に2～3°Cの幅で変動したが，取水温度に大きな日周変化は見られなかった。調査期間中（1，2号機がともに停止していた期間を除く）に放水温度および取水温度は徐々に低下し，それぞれ17.6～34.0°C，14.9～26.8°Cの範囲で変化した。放水温度は取水温度に比べて平均で5.0°C高かった。

ギンガメアジの最終選好温度（Fpt:29.1°C）は，当該発電所周辺海域では，夏季の高水温期を除い

て自然水温よりも放水温度に近く，これが放水口近傍に本種が蟄集する主要因と考えられる。しかし，年間で最も自然水温が高くなる9月には放水温度がFptより最大で約5°C高くなっており，室内実験によって推定したFptは多くの魚種の生息適水温の上限値に近似すること（土田，2002）を考慮すると，高水温期の放水口近傍域の水温は必ずしも本種にとって好適な条件にはなっていない。当該発電所放水口近傍では周年にわたって本種の蟄集が見られるが，9月には放水口近傍域における出現個体数が減少するとともに，沖合の岩礁域にまで本種の分布が広がることが確認されており（山本ら，2003），水温が高すぎて放水口近傍への誘因効果が薄まるものと推察される。ただし，放水口近傍域から完全に逸散することはないため，蟄集要因は水温だけではなく温排水の吐出に伴う流れや気泡の発生等の環境変化も関わっているものと推察される。

取水温度（自然水温）は12月中旬に低温側100%生残温度（LST₁₀₀:17.3°C）を下回り，12月下旬には低温側最終致死温度（ULLT₅₀:15.1°C）に達し，さらに2月には14°C台にまで低下することが確認されている（山本ら，2003）。従って，当該発電所周辺海域ではギンガメアジの冬季の生残は困難で，本来は無効分散であると考えられる。しかし，放水温度は自然水温よりも平均で約



第9図 発電所の取放水温度の季節変化とギンガメアジの温度反応特性値の比較。UDT, CTMax, CTMin, LDTについては、取水温度で馴致した場合の値を示した。

5.0°C高いため、冬季においても放水口近傍域では本種の生残が可能な水温条件が保たれているものと推察される。ただし、放水温度は発電所の出力調整により2~3°C程度変動するため、出力抑制時の水温条件は本種の生息環境としてはかなり厳しいものと考えられる。

以上のように、夏季の高水温期を除き、発電所温排水はギンガメアジの生息に好適な水温条件をもたらすことが確認された。一方、高水温期には温排水の水温は必ずしも本種の生息に好適な値ではなく、この時期に放水口近傍に分布する理由は不明である。その解明のためには、放水口近傍域における本種の生態・行動を詳細に調査する必要がある。

謝 辞

取放水温度データの提供等、当該発電所の関係者の皆様には多大なご協力を頂いた。また、本報告のとりまとめに関して、公益財団法人海洋生物環境研究所の顧問および役職員の方々には有益なご意見、ご指導を頂いた。ここに記して深謝の意を表す。

なお、共著者の山本正之氏（元公益財団法人海洋生物環境研究所研究参事）は、2018年6月13日に逝去された。本稿の作成にあたり、改めて哀悼の意を表す。

引用文献

- Coutant, C.C. (1970). Biological aspect of thermal pollution. I. Entrainment and discharge canal effect. *CRC. Crit. Rev. Environ. Cont.*, **1**, 341-381.
- Fry, F.E.J. (1947). Effect of the environment on animal activity. *Publ. Ont. Fish. Res. Lab.* **55**, 1-62.
- 具志堅宗弘 (1988). ギンガメアジ. 「日本産魚類大図鑑2版」(益田一・尼岡邦夫・荒賀忠一・上野輝彌・吉野輝男編), 東海大学出版会, 東京, 151.
- 羽生和弘・関口秀夫 (2000). 伊勢湾と三河湾に出現したミドリイガイ. *Sessile Organisms*, **17**, 1-11.
- 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. *海生研報*, **No.11**, 1-6.
- 海洋生物環境研究所 (2002). 経済産業省原子力安全・保安院委託大規模発電所取放水影響調査平成13年度発電所海域ビオトープネットワーク確立調査報告書, 海洋生物環境研究所, 東京, 1-277.
- 上村信夫 (1989). 低水温のため青野川河口域でギンガメアジなどがへい死. 伊豆分場だより,

- No.234**, 12-13.
- 木村清志 (1997). ギンガメアジ. 「山溪カラー名鑑 日本の海水魚」(岡村 収・尼岡邦夫編), 山と溪谷社, 東京, 317.
- 木村基文・森井康宏・久野俊行・西田英明・吉村浩・秋重祐章・千田哲資 (1998). 西部太平洋熱帯水域の漂流物に伴う魚類. 長崎大学水産学部研究報告, **No.79**, 9-20.
- 木下 泉 (1989). ギンガメアジ. 「山溪カラー名鑑 日本の淡水魚」(川那部浩哉・水野信彦編), 山と溪谷社, 東京, 518.
- Laroche, W.A., Smith-Vaniz, W.F. and Richardson, S.L. (1984). Carangidae: development. *In* “Ontogeny and systematics of fishes” (eds. Moser, H.G., Richardson, W.J., Cohen, D.M., Fahay, M.P., Kendall, A.W. Jr. and Richardson, S.L.), *Amer. Soc. Ichthyol. Herpetol.*, Special Publication, No. 1, 510-522.
- 益田玲爾 (2012). 局所的温暖化：原発温排水に依存した魚類群集の持続性と崩壊. *科学*, **82**, 1339-1342.
- 三浦雅大・山本正之・益原寛文・余吾 豊・遠藤康之 (2003). 九州西岸の火力発電所周辺海域におけるギンガメアジの年齢-尾又長組成の季節変化. *海生研研報*, **No.5**, 13-19.
- 岡村 収・尼岡邦夫 編 (1997). 山溪カラー名鑑 日本の海水魚. 山と溪谷社, 東京, 1-783.
- Reynolds, W.W. (1977). Temperature as a proximate factor in orientation behavior. *J. Fish. Res. Can.*, **34**, 734-739.
- Reynolds, W.W. and Casterlin, M.E. (1980). The role of temperature in the environmental physiology of fishes. *In* “Environmental physiology of fishes” (ed. Ali, M.A.), Plenum Press, New York, 497-518.
- Smith-Vaniz, W.F. (1984). Carangidae. *In* “FAO species identification sheets for fishery purposes. Western Indian Ocean (Fishing Area 51)” (eds. Fisher, W. and Bianchi, G.), Vol. 1. FAO, Rome, 1-23.
- 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・三浦正治・瀬戸熊卓見・渡邊裕介・吉野幸恵 (2018). 沿岸性魚類14種の温度耐性. *海生研研報*, **No.23**, 69-73.
- 山本正之・三浦雅大・益原寛文・余吾 豊・遠藤康之 (2003). 九州西岸の火力発電所周辺海域における沿岸魚類の分布と放水口近傍の魚類群集の特徴. *海生研研報*, **No.5**, 1-12.