

9 6 2 8 異なる塩成分環境における鉢水母類の適応形態の変化

助成研究者：柿沼 好子(鹿児島大学 理学部)

共同研究者：三宅 裕志(東京大学 大学院農学生命科学)

海洋の巨大プランクトン鉢水母類は、他の生物と同様、環境変動に自らの行動や生体内の生理代謝等を変化させ、生存維持する恒常性を保つように機能し、外的環境に順化し、適応してゆく。

本研究は鹿児島湾に生息するミズクラゲ *Aurelia aurita* とサカサクラゲ *Cassiopea andromeda* の2種を用い、春から秋の自然界の多量な降雨や真夏の高水温時を想定して、10、20、30、40‰の4種の異なる塩濃度の海水中で適応形態への過程や時間的变化のかかわりについて観察し、調べた。30‰はほぼ正常海水の濃度で、ここでは正常海水として対象実験、観察を行った。

この結果、10‰でミズクラゲは1時間以内に、サカサクラゲは18時間以内に死滅し、この濃度では順化適応しなかった。20、30、40‰では、2種共に実験海水に投入後3時間内にストレス行動が観察され、外部形態としての体サイズ及び湿重量は塩濃度に反比例して縮小した。傘高や触手数、胃腔また各器官などの内部形態や構造は時間的な経過と共に微妙な変化が生じた。また、外部からの塩濃度変化は生体内環境変化を起し、拍動数、溶存酸素、水素イオン濃度、アンモニア、リン酸が1~36時間の間、各時間毎に変化をもたらした。ミズクラゲでは20‰で大きく変動、6時間で安定、40‰では13~18時間で安定した。また、サカサクラゲでは20、40‰ともに、6時間で環境抵抗がピークに達し、12時間で安定した。この2種間の相違は種の相異とサカサクラゲが植物との共生種であることのためと考えられた。

異なる塩濃度による適応的形態と時間的推移による変化は、それぞれの種の経過した生存環の歴史を物語るものとして、すでに報告したミズクラゲの年齢指標(Kakinuma, Takeda and Miyake, 1993)と同様、生体の形態と器官が環境の指標となりうることを示唆された。

9628 異なる塩成分環境における鉢水母類の適応形態の変化

助成研究者：柿沼 好子 (鹿児島大学 理学部)

共同研究者：三宅 裕志 (東京大学 大学院農学生命科学)

目的

水母類はゼラチン質プランクトンとも呼ばれ、その個体の大きさ、出現量や他生物への捕食、その水域への栄養塩の排泄等の点で、海洋生態系の中でも重要な位置を占める動物群である。ミズクラゲは、無性生殖するポリプ世代と有性生殖する水母世代が交互に繰り返される世代交代をもち、世界中の様々な環境に適応して生息していることから、最近国内外でもその生態学的調査が盛んに行われている。これまでの研究及び国内外の報告の結果、ミズクラゲの生息環境は、水温が0~30°C、塩濃度が10‰に満たない汽水域から36‰以上とかなり幅広く適応して世界中に分布していることがわかった。

本研究は、常に浮遊生活するミズクラゲ、底生生活するサカサクラゲの2種の鉢水母を用いて、外部環境の変動に対する鉢水母類の形態学的変化および生理学的変化による環境海水へのDO、NH₃、PO₄などの出入力から順化適応現象を各種塩濃度で比較検討し、環境海水中の塩濃度がもたらす鉢水母の生活現象にあたる効果及び影響、また水母の生活現象に伴う環境適応の限界を考察することを目的とした。

材料と方法

I. 塩濃度変化に対する鉢水母の適応能力

実験に用いたミズクラゲは鹿児島県谷山の谷山長水路より採取した。採取する際には、水母の外傷を防ぐためボウルを用いて海水ごと水母を採取し、海水を満した15リットルバケツにゆっくりと移し、実験室に持ち帰り静置した。なお、水母が正常状態を保てるように1つのバケツには水母を5匹以上入れるのは避けた。また、サカサクラゲは鹿児島市与次郎ヶ浜の長水路にてシュノーケリングにより採取した。

実験には直径25センチの円柱型水槽(7リットル)を8個用意し、塩濃度10‰、20‰、30‰、40‰の人工海水(Sea Life)を5リットルずつ、それぞれ2個ずつ計8個準備した。この2個のうち一方に水母を1個体入れ、もう一方を海水のみのコントロールとした。

実験を初める8時間前に、採取してきたバケツ内の水母の正常状態のバルスを測定した後、水母の傘径、湿重量を測定した。実験開始直前には、それぞれの塩濃度の水母の正常状態の行動(コントロール)として拍動(バルス)を測定し、その後すぐに水母を実験水槽に移した。この時点をも0時間として以降、1、2、3、6、12、13、14、15、18、24、36時間目にバルス数、水温、溶存酸素(Model 55/25 FT, YSI Incorporated)、pH(pH METER F-8L, HORIBA INC.)を測定し、アンモニア、

磷酸測定のための海水100mlを採水した。採水した試水は後の測定のため、Whatmann Glassfiber Filterで吸引濾過後、すぐに冷凍保存した。実験終了時には、再び水母の傘径(mm)、湿重量(g)を測定した。アンモニア、磷酸の測定はParsons et al. (1984)の方法を用いて測定した。

II. 異なる塩濃度におけるミズクラゲの成長

飼育室(約24℃)で経代飼育しているポリプを15℃のインキュベータに入れると、約2~3週間でストロビレーションを起こしエフィラを遊離する(柿沼, 1975)。この遊離したエフィラを用いて実験を行なった。実験は室温(23±1℃)で行い、10‰, 20‰, 30‰, 40‰の各塩濃度の人工海水(Sea Life) 500mlを入れた直径9cm, 高さ12cmの腰高シャーレでエフィラを飼育した。飼育水槽内には、外径3mm, 内径1mmのアクリルチューブで通気して微弱な水流を作り、酸素供給と幼水母が沈降しないように操作した。1日1回、孵化後24時間以内のアルテミアのノープリウス幼生を餌として飽食するまで投与し、換水し、飼育した。成長の指標として、水母の生残率、水母の直径(mm)、湿重量(g)、傘高(mm)、触手数、胃腔の直径(mm)を観測した。

観察及び結果

I. 塩濃度変化に対する鉢水母の適応能力

I-i 水母の行動と環境海水の変化(図参照)

I-i-1 ミズクラゲの行動

10‰: 水母を導入した直後から、海水の比重に比べて水母体の比重の方が重いいため、水母は傘を下方に向け、傘を逆さにした状態で水槽の底まで速やかに沈み、パルスが微弱な痙攣状態となり、正常状態でのパルスは平均して約20回(／30秒)であったが、この塩濃度では5秒以内でパルスが止まった。実験1分後パルスを再び開始するが、痙攣状態で、正常なパルスではなかった。水母は15秒ほ～3分後には全くパルスは無くなり完全に死亡した。

20‰: 10‰と同様に、水母を導入した直後から水母は逆さになって沈み、実験前は約27回(／30秒)のパルスが20秒程度で停止した。実験1分後に再びパルスを開始するが、傘の周縁部のみの痙攣がみられ、不規則に正常なパルスをする。実験1~2時間後も水母は傘を下方に向け、逆さになって水槽の底で沈んでおり、傘の周縁部のみの痙攣状態のパルスで遊泳できなかった。3時間後、パルスの収縮行動は正常に近くなってきたが、弛緩行動が不自然で、まだ平衡状態を保てず、底で逆さの状態であった。4~6時間のうちに水母は低塩濃度に順応し始め、活発な正常パルス状態になり、水槽の中層位まで遊泳した。6~24時間で水槽内を自由自在に遊泳するが、パルスを停止すると同時に、逆位になり沈降するが、24時間以降は完全に低塩濃度に適応した。また、通常よりミューカスを多量に出し12~14時間の間に、人工海水中に懸濁物をすべてからめとり、固めてしまった。

30%：通常の海水とほとんど変わらないため、水母は水槽の中層で平衡を保ち、傘を上に向けて正常状態で静止した。また、実験水槽導入後も正常状態とほぼ変わらない力強い、柔軟なパルスをおこなうが、実験終了まで遊泳層も表層から底層まで正常状態と変わらず自由に遊泳していた。

40%：海水の比重よりも水母の比重の方が軽いため、水母は傘を上に向けた状態で平たくなって表面に浮いており、導入した直後は正常にパルスををおこなうが、5分後には約21回あったパルスは傘の周縁部のみで痙攣状態の微弱なパルスが約8回となった。2時間頃から次第にパルスが力強くなり始め、3時間頃にはパルスは正常に回復し始め、6時間で正常なパルス数が観察されたが、水母は水面に浮いた状態で、遊泳することは出来なかった。水母は12～15時間で実験水槽の底まで遊泳できるようになるが、パルスを止めると水面に浮上し、完全には40%海水に順応できていない。18時間以降水母はパルスを停止しても浮上せず、逆に沈降するようになり、自由に遊泳し完全に適応した。

I-i-2 サカサクラゲの行動

10%：ミズクラゲ同様、水母を導入した直後から、海水の比重に比べて水母体の比重の方が重いため、水母は傘を下に向け、仰向けの状態で水槽の底まで速やかに沈んだ。パルスは0.5時間程度までは正常状態と変わらないパルスをするが、徐々に弱く、少なくなり、1時間後には傘の周縁部のみで痙攣状態のパルスとなり、正常状態でのパルスは平均して約4回（/30秒）あったにも関わらず、約2回（/30秒）となった。6時間までは水母の形態は、傘の周縁部がかなり内傘部へ巻き込み、また傘中央部がへこんだ状態になりつつあったが、3時間頃から徐々に正常の形態に戻り始めた。3時間頃から水母は底から少し離れて浮き始め、6～13時間まで水面に浮くようになった。2時間頃からミューカスの分泌が目立ち始め、13時間頃には浮いた水母から垂れ下がるまでに分泌されていた。実験を通してパルスは正常にもどらず、傘の周縁部のみで痙攣状態で13時間以降パルスはなくなり、14時間頃死亡した。

20%：10%と同様に、水母を導入した直後から水母は逆さになって沈み、実験終了まで底にいた。2時間頃までほぼ正常に近いパルスを行うが、2時間以降、傘の周縁部がやや内傘部へ巻き込んだ状態となり、3～6時間で力強い正常なパルスをするようになった。6～12時間頃にはミューカスの分泌が目立ち始め、パルスはリズムカルになり、36時間頃には、サカサクラゲの仲間である旗口水母に特徴的な付属器を立て、完全な正常状態になった。

30%：導入直後は傘を上にして水面に浮くが、パルスは正常で、身体全体で力強く行う。1時間頃には、パルスを止めると浮いてしまうが、底まで遊泳することが出来、傘の吸盤作用により底面に吸着し、留まることが出来る。実験終了までミューカスもあまり分泌せず、正常と変わらない形態で、活発なパルスを行っていた。

40%：水母は導入後、平衡を保てずに傘を下に向けて逆さになって表面に浮き、盛んにパルスを行った。2～6時間には水母の傘が外傘にむかって巻き込み、傘が裏返しの状態になり、パルスは正常には出来なかったが、力強く続いていた。12時

間以降傘の裏返りはなくなったが、逆に内傘への巻き込みがやや強くなった。13時間以降、付属器も立ち始めて形態も正常になり、パルスは完全に正常に行うようになった。

I-ii 水母の生活活動による海水環境の変化

I-ii-1 ミズクラゲ（図1参照）

塩濃度30‰を鹿児島湾の自然海水のほぼ正常値として、低濃度10‰、20‰と高濃度40‰を比較すると、図1で示した様に、パルス数は20‰、40‰において、水母導入後急激に低下するが6～12時間で正常値に戻った。溶存酸素消費量は、パルス数が正常値に戻り、行動も正常になるにつれて徐々に低下し、同様にpHも6～12時間に急激に低下した。アンモニアは塩濃度が低いほど多くなり、いずれの塩濃度でも6～12時間の間に急激に増加した。リン酸ではアンモニアとは逆に塩濃度の高いほど、磷酸の放出が見られたが、アンモニアほどの急激な増加は見られなかった。

I-ii-2 サカサクラゲ（図2参照）

パルス数は20‰においては水母導入後にパルスの現象は見られず、6～12時間にかけて急激に減少したが、30‰、40‰ではミズクラゲ同様、水母導入後に急激にパルス数は減少したが、いずれも6～12時間で正常値に戻った。溶存酸素量は20‰で最も多く、同時にpHの変動も20‰で最も大きくなった。アンモニアは全ての塩濃度において実験開始から3時間までに急激に増加し、塩濃度が低いほど放出量が大きく、酸素消費量とともに変動した。リン酸は、30‰で実験初期ではあまり放出は見られず、その後放出量が増え、18時間以降ほぼ安定したが、20‰、40‰では実験開始初期に急激に増加し、その後18時間まで徐々に増加し、安定化する傾向が見られた。10‰においてはサカサクラゲが生きている12時間までは大量にアンモニア、リン酸を放出していた。

I-iii 塩濃度環境変化による体サイズの変化（図3）

実験終了後のミズクラゲの直径は20‰では実験前に比べて約1.03倍になり、湿重量は1.12倍となり増加した。一方、30‰、40‰では逆にこれらは減少し、30‰では直径は0.91倍、湿重量は0.83倍、40‰では直径は0.87倍、湿重量は0.73倍となった。

サカサクラゲでは、20‰で直径は1.02倍、湿重量は0.95倍、30‰では直径は1.01倍、湿重量が0.91倍となり、直径では実験前よりも大きくなったが、湿重量では小さくなった。一方、40‰では直径、湿重量ともに減少し、直径は0.91倍、湿重量では0.72倍となった。

II. 異なる塩濃度におけるミズクラゲの成長（図4、5参照）

水母直径は平均では、20‰で最も成長がよく、30‰、40‰の順になった。30‰では、よく成長するグループとそうでないグループの2群にわかれたが、後者のグループは水管系の発達が異常で、放射管は分岐せずに環状管が太くなり、傘の周縁部が水膨れ状態になった。サイズと湿重量の関係はほぼ従来通り、 $\text{湿重量} = (\text{直径})^3$

という相対成長関係を示すが、同程度のサイズで各塩濃度の水母を比較すると20%が最も重く、40%が軽くなり、また、傘高も同様の傾向にあった。胃腔サイズは水母サイズと正比例しているが、サイズに対する胃腔の大きさの比率は20%では平均34.32%、30%では35.14%、40%では33.93%となり、40%が最も小さく、また、胃糸の数も発達していなかった。触手数はその他の項目とは異なり、30%で最も多くなり、20、40%の順になった。生残率は20、30、40%の順になり、10%では当日のうちにすぐに死滅する。40%では、実際には残っているが、傘が非常に小さく、口腕に小さな傘が付属しているような形態で生きており、野外では見られない形態であった。

考察

常にプランクトンとして浮游生活しているミズクラゲは、10%では導入後3分以内、早ければ15秒程度で死滅してしまうが、太陽光線の到達する浅い海底に底生生活をするサカサクラゲは12時間も生存した。しかも、塩濃度変化に対してはミズクラゲはすぐに対応できずにパルスが無くなり、いわば生死不明状態のようになるが、サカサクラゲは急激にパルスが無くなるなどの仮死状態にはならず、急激な高低塩分環境変動に対する耐性があるのではないかと思われた。また、ミズクラゲ、サカサクラゲともに3～6時間に適応し始め、6～12時間には生理機能が正常に働き始めることが考えられ、12～24時間程度で完全にその環境水に適応でき、十分に生息できるまでになった。

酸素消費量は、体内に共生藻を持つサカサクラゲの方が多いが、この実験では光が不足していたために共生藻の呼吸による影響があると推測される。アンモニアは両種とも塩濃度が低いほど放出量が多くなり、その放出量はミズクラゲのほうが多く、逆にリン酸は塩濃度の高い程が放出量が多くなり、その放出量はサカサクラゲの方が多くなった。これらの栄養塩の変動にはパルス数、溶存酸素量の変動に良く相関しており、pHもこれらの栄養塩の放出に平行して低下してゆく傾向が見られ、pHの変動は塩濃度が低いほど大きくなり、サカサクラゲよりミズクラゲの方が大きくなった。これらも共生藻の存在の有無および水母の体構成物質あるいは代謝基質の違いによるものと考えられる。実験の前後の体サイズの変化は、両種において違いが生じた。遊泳力が強く常に水中に浮遊しているミズクラゲは、塩濃度に対応した変化を示し、体サイズを塩濃度に合わせて急激に変化させることから、塩濃度によってサイズや湿重量が規定される。一方、海底で底生生活をするサカサクラゲは、高塩濃度に対してはミズクラゲと同様に体サイズを縮小させ適応するが、低塩濃度に対してはそれほど傘径は変化させず、湿重量をわずかに変化させて適応した。また、両種とも低塩濃度ではミューカスの分泌が多く、とくにサカサクラゲでは低塩濃度になるほど多い。このミューカスの多量の分泌は、身体全体を包むことによって、一時的に低塩濃度に対する防御を行い、徐々に塩濃度に適応するためのものかも知れない。また、両種ともに高塩濃度より低塩濃度の方が適応能力が高いと判断された。

つぎに、異なる塩濃度下において成長したミズクラゲの形態は、20‰で最も直径が大きくなり、それに比例して湿重量、胃腔ともに大きくなったが、直径に対する胃腔の割合は30‰で最も大きくなり、また、直径に対する傘高の割合も30‰で21.35%と最大となり、20‰では平均19.95%、40‰では15%となった。塩濃度30‰を鹿児島湾の自然海水のほぼ正常値として、低濃度20‰と比較すると、20‰では触手、胃腔があまり発達せず、直径が大きく、傘高がない扁平な形態の水母になることが推察された。また、40‰では、エフィラは高塩濃度の影響で急激に体サイズを縮小させたため、大部分のものは餌を捕食できなくなり脱落した。一部の生き残ったエフィラは幼水母まで変態したが、胃腔が発達せず、また消化液を分泌する胃糸もほとんど発達しないので、体サイズの成長が抑制され、その形態としては自然界では見られない形態となった。これらの異なる塩濃度による形態変化は、個体の生息環境を表わす指標として用いることが可能であることが示唆される。

また、成体水母の塩濃度適応と同様にエフィラ、幼水母は低塩濃度に対してより適応能力が高いが、水母の成長については高塩濃度、低塩濃度は主に捕食器官、消化器官関係に負の効果を及ぼし、その影響は通常塩濃度よりも高塩濃度であるほど大きくなると推察された。以上のことから鉢水母は高塩濃度より低塩濃度に対して非常に適応的であるが、これは自然界では急激に高塩濃度になることが少なく、逆に降雨や河川の流入などで急激な低塩濃度にさらされることが多いことから、より早く適応する能力を持ったと考えられる。

さらに前年度の報告では、遊泳性活するミズクラゲの水母は10‰では死滅し、底質に固着生活するポリプは10‰でも無性生殖は抑制されたが、かろうじて生きることが出来た。また、水母世代であってもミズクラゲは10‰で死滅したが、底生生活をするサカサクラゲは12時間以上も生きることが出来た。これらのことから、常に浮遊し、移動能力のあるミズクラゲは急激な塩濃度の変化に対しては耐性がなく、その場を垂直、あるいは水平移動することで急激な塩濃度の変化をさけるように適応しており、また、ポリプと同様に底生生活をして、移動能力の微弱なサカサクラゲは急激な塩濃度変化に対して耐性を持つように適応していることが考察される。また、同じミズクラゲでも、浮遊世代、着生世代という生活様式がことなることによって、その塩濃度環境の適応範囲が変化し、それぞれの生活環境に応じた環境適応能力があることが示唆された。

塩分

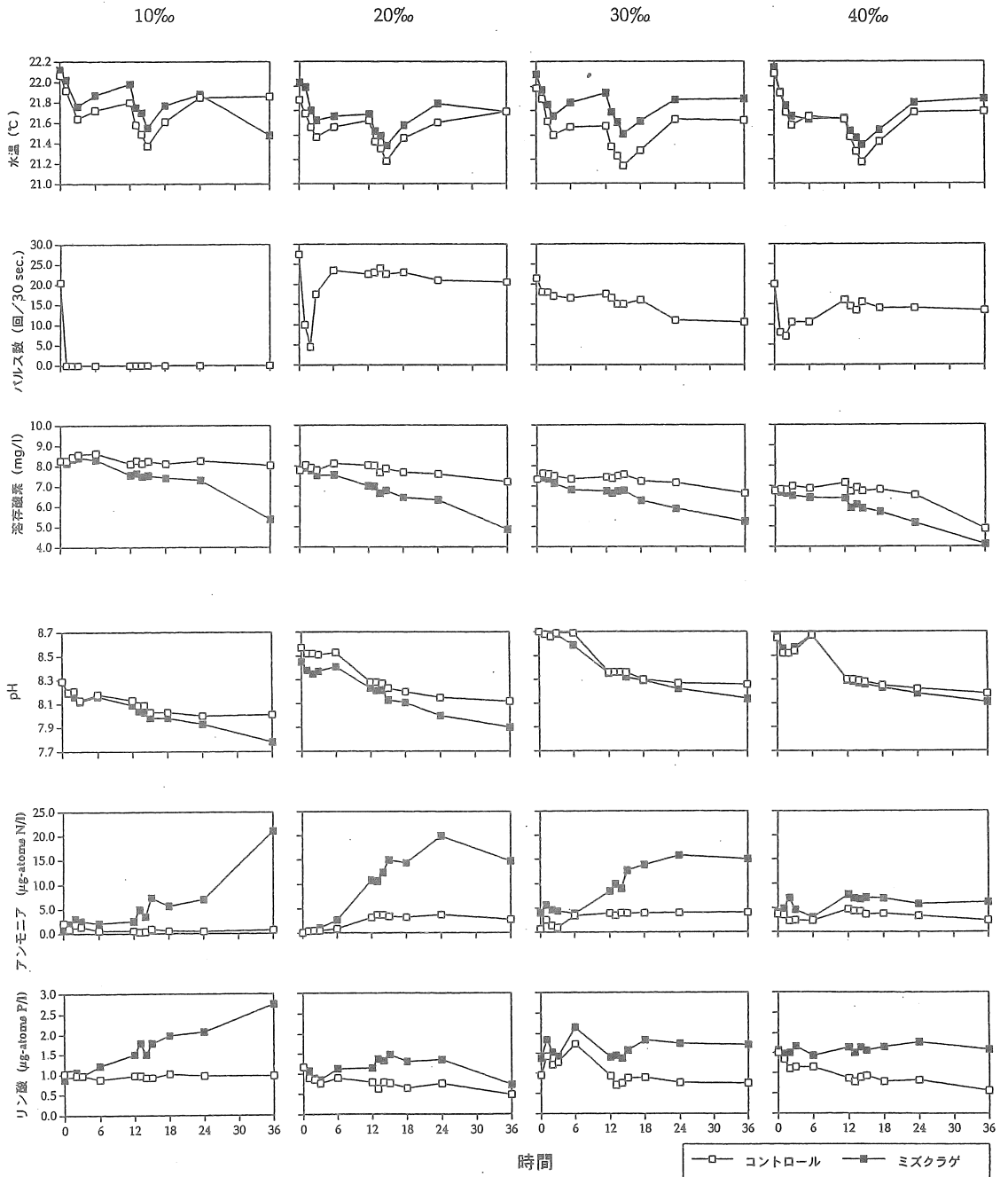


図1 塩濃度変化に対するミズクラゲの適応と水質変動

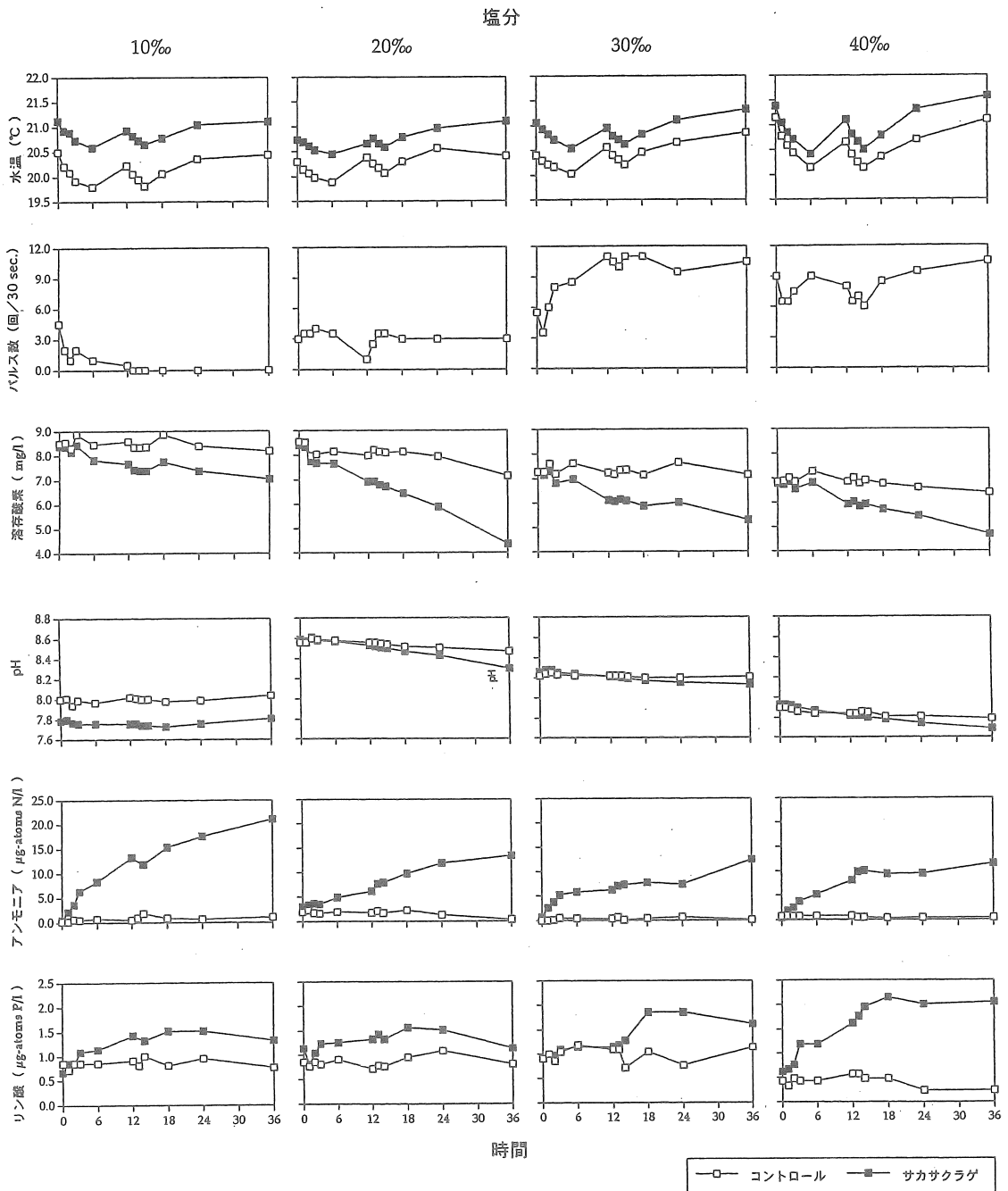


図2 塩濃度変化に対するサカサクラゲの適応と水質変動

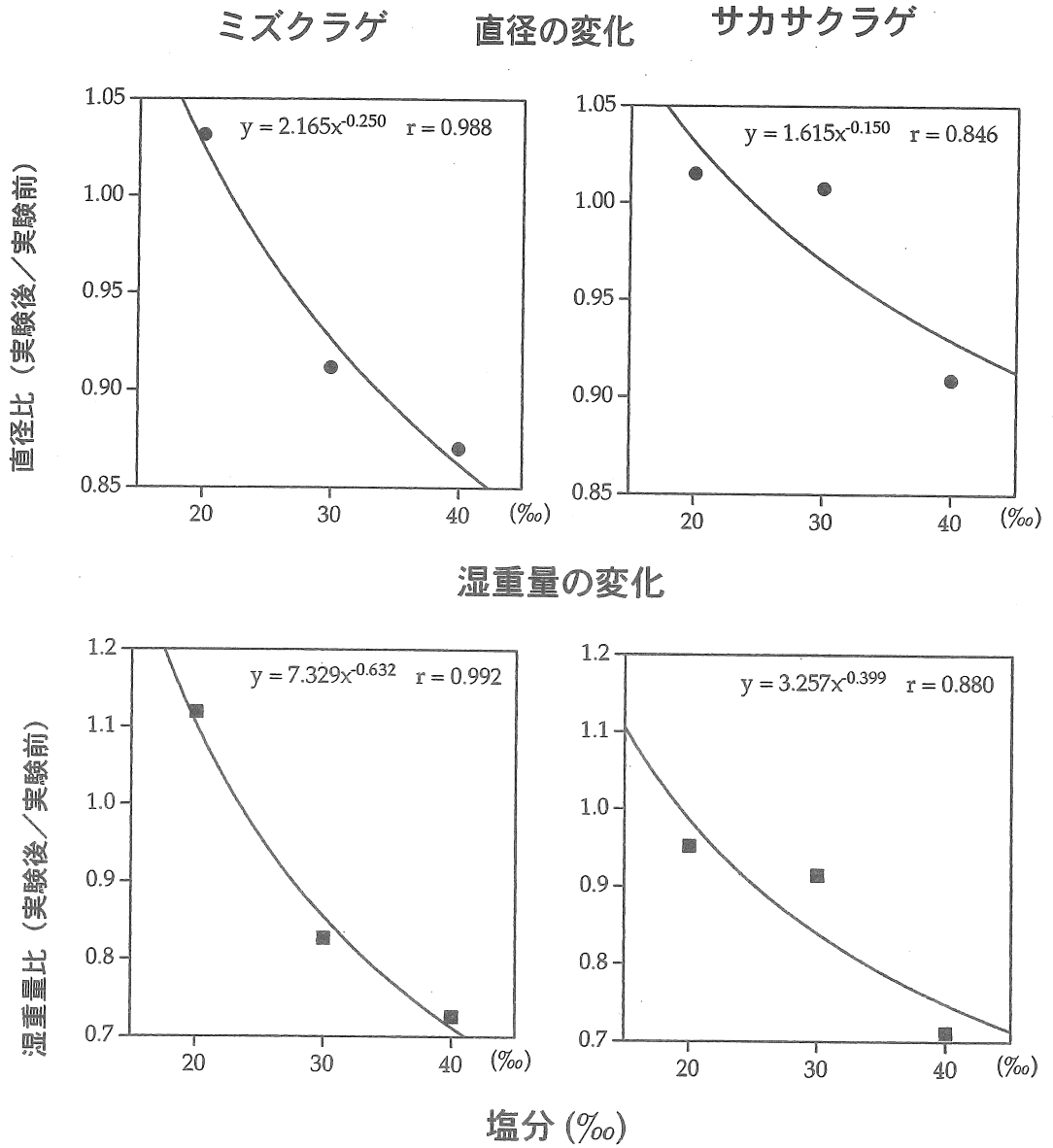


図3 塩濃度環境変化による体サイズの変化

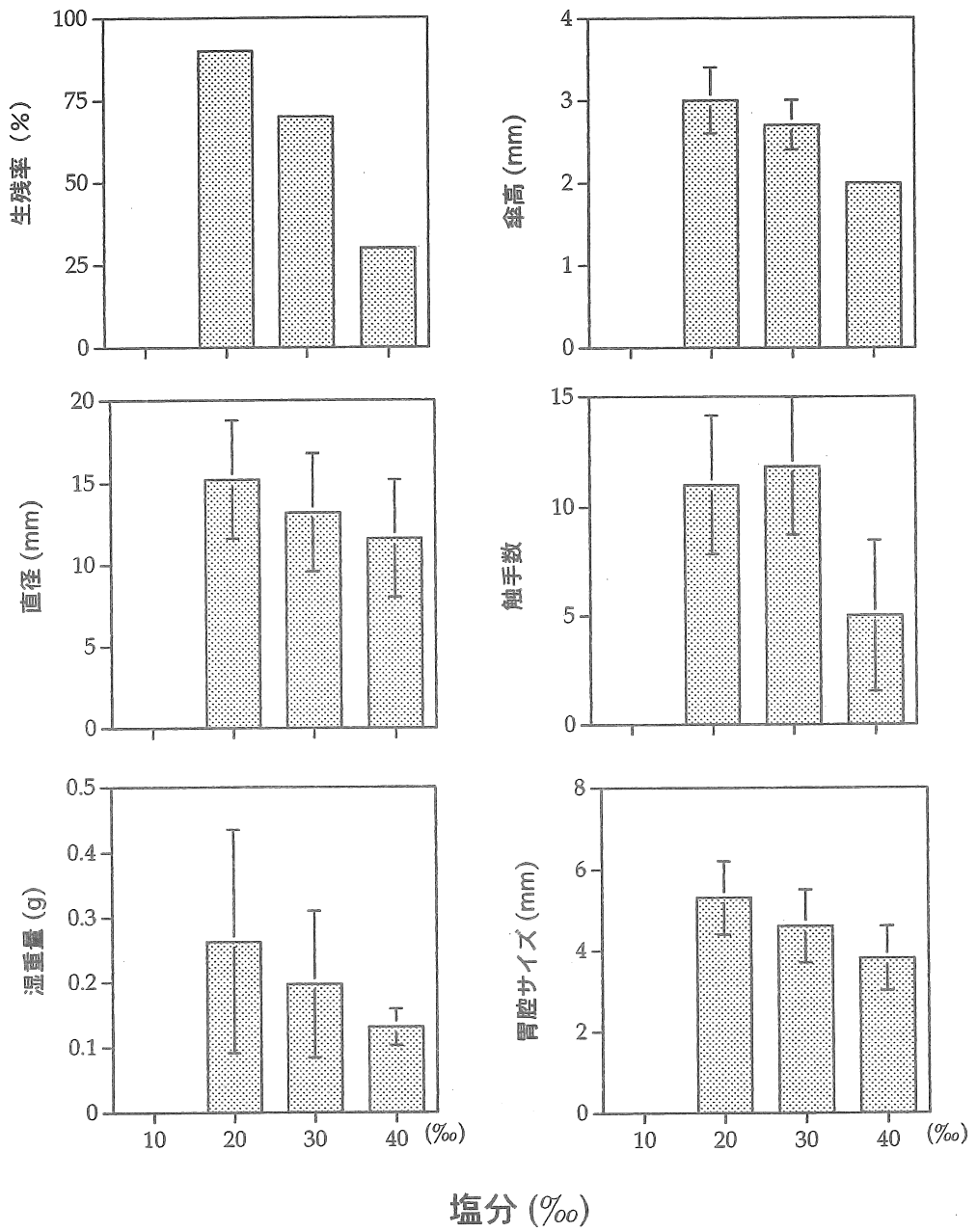


図4 異なる塩濃度におけるミズクラゲの成長

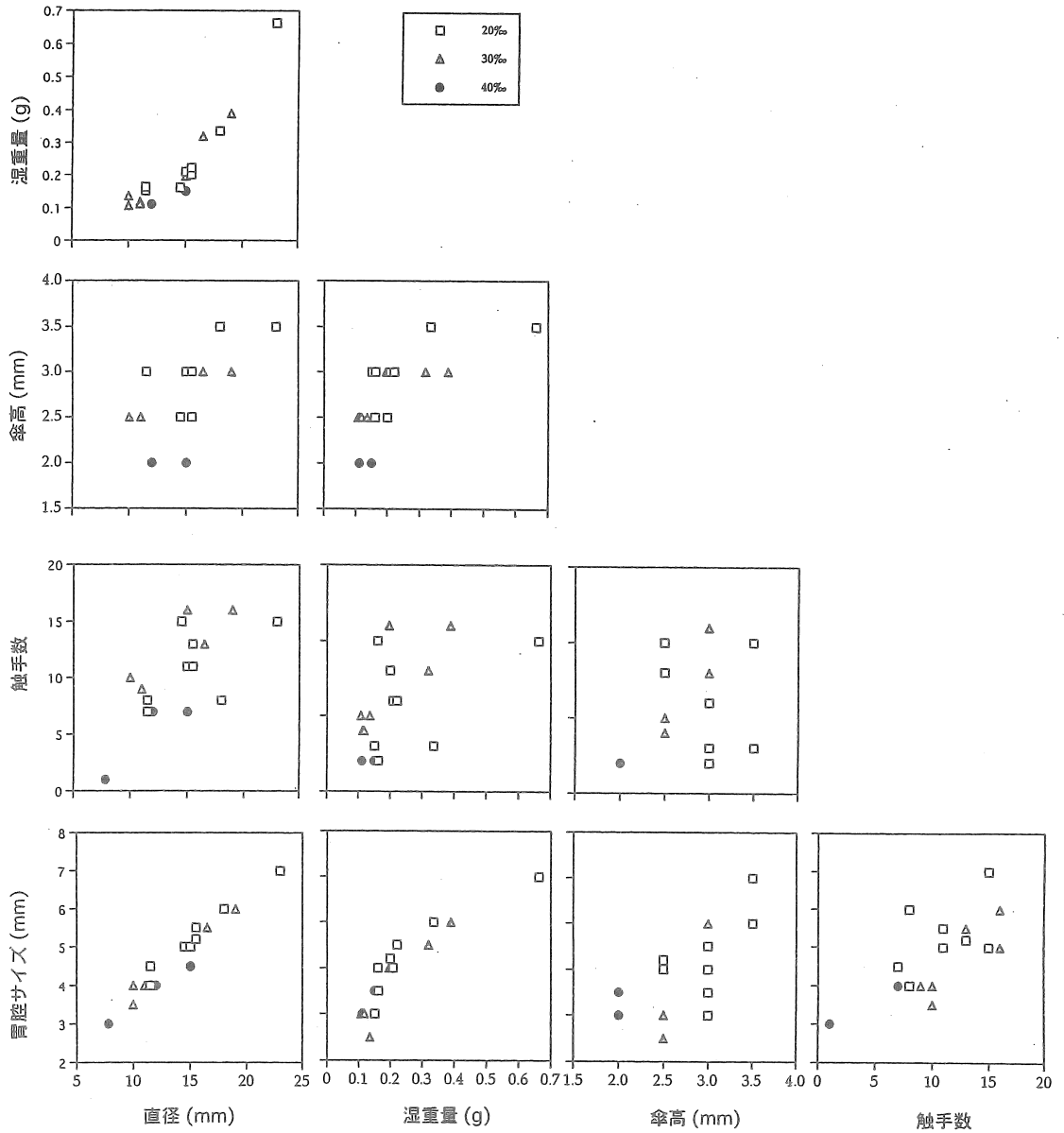


図5 異なる塩濃度におけるミズクラゲの成長に伴う形態

Changes in adaptive morphology of scyphozoans in varying concentration of salinity

Yoshiko Kakinuma¹⁾ and Hiroshi Miyake²⁾

1) Dept. of Biol., Fac. of Sci., Kagoshima Univ., Kagoshima

2) Ocean Res. Inst., Univ. of Tokyo, Tokyo

Ocean megaplankton scyphozoans are the same as other living things in that their metabolism and behaviour changes according to changes in their surrounding environment. Scyphozoans adapt to their external environment, functioning to maintain their existence.

This research was carried out in Kagoshima Bay using two types of scyphozoans; *Aurelia aurita* and *Cassiopea andromeda* assuming a natural environment between Spring and Autumn with heavy rain and high temperatures. Changes in adaptive morphology were observed and recorded through this period in four different concentrations of ocean water salinity: 10‰, 20‰, 30‰, and 40‰ of water, with 30‰ assumed as the normal concentration of salinity in ocean water.

The result was that at a concentration of salinity of 10‰, *Aurelia aurita* died within one hour, and *Cassiopea andromeda* within 18 hours: they did not adapt to this concentration of salinity.

At concentrations of salinity of 20‰, 30‰, and 40‰, it was observed that both *Aurelia* and *Cassiopea* showed stressful behaviour within 3 hours of putting them in the experimental sea water.

As for their external morphology, their body size and weight reduced in inverse proportion to the concentration of salinity.

There were also slight changes in their internal morphology and structure over time: umbrella height, tentacles, coelenteron size and organs.

Changes in external saline concentration also caused to scyphozoans' internal environment: water temperature (°C), plus/30 sec., dissolved oxygen ($\mu\text{g/l}$), pH, amount of ammonia (μg - atoms N/l) and phosphoric acid (μg - atoms P/l) were released into the water every hour from between one and 36 hours after immersion in the sea water.

At 20‰ saline concentration a large change was observed in *Aurelia* after 3 hours; they become stable after 6 hours. In 40‰ saline concentration, they reached a level of stability after 10 to 18 hours. As for *Cassiopea*, in both 20‰ and 40‰ saline concentration, the peak of resistance to its environment was reached after 6 hours, and after 12 hours they become stable. This difference between *Aurelia* and *Cassiopea* seems to be because *Cassiopea* lives together with algae. Adaptive morphology and periodic transitions in different concentrations of salinity is a stomy of species environmental survival that has already been reported (in Environmental influence on Medusas' size of *Aurelia aurita* and age indicator.: Kakinuma, Y., Takeda, K. and Miyake, H. (1993)).

We would like to suggest that the morphology and organs of any organs can be environmental indicators.