

阿嘉島マエノハマにおける 白化した造礁サンゴの回復 および死亡過程の報告

岩尾 研二
谷口 洋基
阿嘉島臨海研究所

The Report on recovery and death process from the bleaching of the reef-building corals at Maenohama, Akajima Island, Okinawa

K. Iwao
H. Taniguchi

はじめに

1998年夏、琉球列島を中心に大規模なサンゴの白化現象が報告された。白化現象とは、高水温や低塩分濃度などの環境からのストレスにより、サンゴの細胞内に共生する褐虫藻が宿主であるサンゴから離脱し、その結果、サンゴの骨格が透けて見えるようになる現象である。サンゴの白化現象は、フロリダでの Vaughan (1911) による報告の後、オーストラリア (Yonge and Nicholls 1931)、ジャマイカ (Goreau 1964)、パナマ、コロンビア、カリブ海など世界各地で報告されている。今回の白化現象もオーストラリアのグレートバリアリーフをはじめ世界の多くのサンゴ礁にこれまでにない大規模な被害を与えており、過去に沖縄のサンゴ礁ではこのような大規模な白化現象によるサンゴの大量死は記録されておらず、前代未聞の出来事であった。

沖縄県の慶良間列島海域でも、1998年7月末から白化したサンゴが見られるようになり、8月末には、地形等によって差はあるものの、水深3メートル以浅の場所ではトゲサンゴ *Seriatopora hystrix* やハナヤサイサンゴ *Pocillopora damicornis*、ミドリイシ *Acropora* spp. をはじめとするほとんどのサンゴが、水深25メートルの比較的深い場所においてもヤセミドリイシ *A. horrida* などのサンゴの白化が確認された。谷口らが、同年9月に阿嘉島周辺15地点において、2m×2m コドラートを用いた白化状況調査を行ったところ、湾奥部あるいは礁池内の4つの調査地点で、サンゴ総被覆面積の90%以上の白化が確認された (谷口ら 1999)。しかし、この調査では、群体の認識が不十分であり、また調査地点に標識を施していないため、再調査が行えないという欠点があった。

そこで本調査では、谷口らの調査で白化の割合の

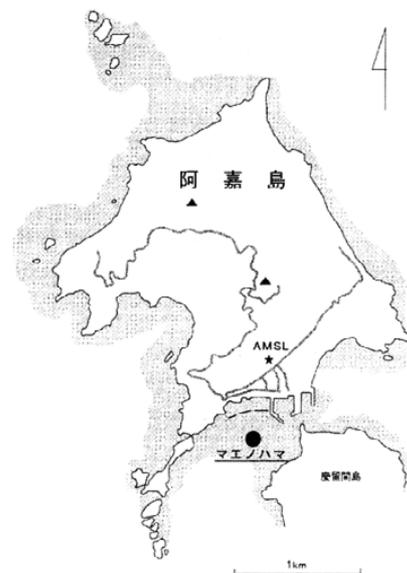


図1. 調査地点

高かった4地点のうちの一つであるマエノハマに定点を設け、群体の識別を基本とした白化サンゴの継続観察を行ったので報告する。

方法

阿嘉島の南に位置するマエノハマに 0.5m×30m (15m²) のベルトを設定し、定点とした (図1)。ベルト内に出現したそれぞれの造礁サンゴ群体の分布状況を地図に写し、群体ごとに属名、群体形状 (樹枝状、テーブル状、指状、塊状、準塊状、被覆状、葉状、コリンボース型) および白化レベルを目視観察により判別し、可能な限り記録した。白化レベルは以下の5段階である：レベル0；白化していない、レベル1；一部白化が見られる、レベル2；群体の約半分が白化している、レベル3；群体の大部分が白化している、レベル4；完全に白化している。なお、樹枝状ミドリイシにおいては、群体の識別が困難であ

り、本調査では調査開始時に同一種により形成されたひと続きの群落であったものを1群体と見なした。また、水中デジタルビデオを用いてベルトの撮影を行い、その映像を基にサンゴ群体の投影面積を解析し、サンゴの被度および被度組成を求めた。その結果、ミドリイシ属およびコモンサンゴ属以外のサンゴの被度が低く、属ごとのデータの解析が困難であったので、ミドリイシ属 *Acropora* とコモンサンゴ属 *Montipora* 以外のものをキクメイシ科 *Favidae* (キクメイシ属 *Favia*、バラバットサンゴ属 *Barabattoia*、カメノコキクメイシ属 *Favites*、コカメノコキクメイシ属 *Goniastrea*、ノウサンゴ属 *Platygyra*、ナガレサンゴ属 *Leptoria*、マルキクメイシ属 *Montastrea* の7属からなる)とそれ以外のサンゴに分けて整理した。

調査は、1998年9月から1999年1月までの4ヶ月間、ほぼ1ヶ月に1回行い、作成した地図を基に群体を識別してそれぞれの群体の変化を追跡した。

なお、調査期間中に群体の確認ができなくなったものがいくつかあり、それらは「消失」として扱ったが、それ以前に死亡の確認されたものについては、消失後も「死亡」として処理した。

結果

1. 造礁サンゴの被度および組成

ベルト内に出現した造礁サンゴは17属298群体、総被覆面積は4.83m²で、被度は32.2%であった。サンゴの総被覆面積中でのそれぞれのサンゴ属の占める割合は、ミドリイシ属が圧倒的に高く90.3%を占め、第2位のコモンサンゴ属(6.8%)の13倍にもおよんでいた。その他の15属は、いずれも1%未満に過ぎず、キクメイシ科サンゴの占める面積の割合の合計が1.2%、それ以外のサンゴは1.8%であった。サンゴの総群体数に対するそれぞれの属の群体数の割合においても上位2属は同じで、ミドリイシ属68.5%(207群体)、コモンサンゴ属16.4%(49群体)であり、キクメイシ科は7.1%(21群体)、その他のサンゴは8.1%(24群体)であった。

2. 造礁サンゴの白化状況

1998年9月の時点で、総群体数の33.4%(総被覆面積の30.0%、以下括弧内のパーセンテージは総被覆面積に対する割合を示す)が完全に白化しており、58.0%(67.5%)が部分的に白化していた。また、白化による死亡と思われる群体が、2.3%(0.4%)観察され、合わせておよそ94%(98%)のサンゴが白化によりダメージを受けていた。白化していない正常なサンゴは、5.0%(1.9%)に過ぎなかった。

白化レベル2から4の割合(白化サンゴの割合)をコモンサンゴ属とミドリイシ属とで比較すると、合計値はそれぞれ89.8%(80.7%)と88.2%(95.1%)でほぼ同じだったが、レベル2、3、4の個々の割合を見ると、コモンサンゴ属では14.3%、12.2%、63.3%とレベル4に大きな偏りが見られたのに対して、ミドリイシ属では35.8%、24.0%、28.4%と比較的近い数値を示した(図2)。キクメイシ科では、正常なものを含めた全レベルを通じて20%前後で、特定のレベルでの偏りは見られなかった。また、その他のサンゴでも30%以上を示したレベルはなかった。

4ヶ月後の1999年1月、完全に白化したもの(レベル4)は全く見られず、全サンゴ群体の25.2%(24.5%)が部分的に白化していたが、39.6%(53.8%)のサンゴは正常な状態であった。また、24.8%(14.9%)のサンゴが死亡していた。コモンサンゴ属、ミドリイシ属では、レベル4だけでなく、レベル3の群体も全くなく、もっとも割合の大きかったのは、両属ともに正常なもの(レベル0)であった(コモンサンゴ属28.6%、ミドリイシ属43.6%; 図2)。正常なものの割合は、キクメイシ科とその他のサンゴでも最も高く、それぞれ29.2%と38.1%であった。

3. ミドリイシ属およびコモンサンゴ属における群体形での比較

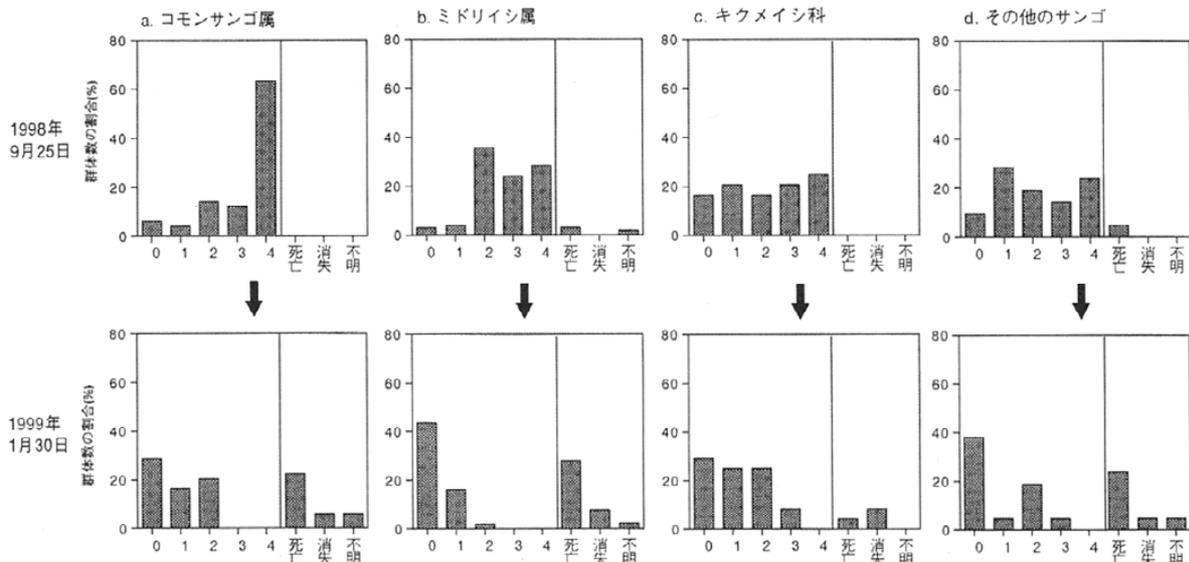


図2. 4分類群における白化状況および死亡状況の4ヶ月間 (1998年9月25日～1999年1月30日) での変化

比較的被度の高かったミドリイシ属とコモンサンゴ属について、群形体ごとの白化状況を群体数の割合としてみると(図3) 1998年9月、両属全群形体において白化が確認されており、ミドリイシ属については、コリンボース型を除く3形において、全白化レベル中でレベル4の割合が30%以上で最も高く、さらに樹枝状およびテーブル状においては、白化レベルが低くなるにつれて群体数は減少していた。コリンボース型においては、白化レベル2が最も多かったが、それを除けば、先の2形と同様に白化レベルが低くなるにつれて群体数は減少していた。指状においては、レベル2から4までは同率であった。樹枝状を除く3形については、正常な群体が2.8～8.7%存在していたが、樹枝状では全く見られなかった。ミドリイシ属の4形において、この時点ですでに死亡群体が確認されており、その群体の割合の最も高かったのはテーブル状(8.7%)で、最も低かったのはコリンボース型(0.9%)であった。

コモンサンゴ属の1998年9月の白化状況は3形で異なっており、被覆状ではミドリイシ属と同様に白化レベルが低いほど群体の割合が少なくなる傾向にあった。ただしミドリイシ属よりもレベル4(完全白化群体)の割合は高く(72.5%で、両属全群形体中での最高値)また、正常な群体は観察されなかった。これに対し、葉状においては、正常な群体の割合が

最も高く(42.9%で、全群形体中最高値)、レベル4は最も少なかった(14.3%)。準塊状群体は2群体しかなかったが、その白化レベルは3と4で、白化の程度は大きかった。

1999年1月、ミドリイシ属の4形は、前年9月と逆に白化レベルが低いほど群体数は多い傾向にあり、しかもレベル4は全く観察されなかった。そして、いずれの群形体でも正常な群体が40%を上回っていた。特にテーブル状では56.5%に達し、生きている群体の90%以上を占めていた。しかし、死亡群体も多く、最高では34.8%(テーブル状)最低でも16.3%(樹枝状)の群体が死亡していた。

コモンサンゴ属の3形においても、1999年1月には完全白化群体は観察されなかった。被覆状においては、ミドリイシ属と異なり、レベル2の割合が最も高かった(25.0%)が、葉状においては、ミドリイシ属と同様に正常な群体が最も多かった(71.4%)。被覆状では25.0%の群体が死亡していたが、葉状では全く観察されなかった。準塊状の2群体は1群体が正常なもので、もう1群体は死亡していた。

4. ミドリイシ属およびコモンサンゴ属の各群形体における経過

サンゴ群体の回復および死亡過程をより明確に捉えるために、1998年9月の時点で完全白化していた

群体(レベル4)のみに注目し、これらの群体がその後どのような経緯をたどったかミドリイシ属およびコモンサンゴ属の各群体形について整理した(図4)。なお、本報告においては、サンゴ体内の褐虫藻密度の増加が原因と思われるサンゴ群体の褐色化を「回復」と呼んだ。また、本項においては、白化レベル3および4であった群体が、次回観察時に死亡していた場合は、白化が死亡原因と推断し、レベル0~2からの死亡は他の要因(被食など)による死亡とした(ただし、調査の性格上、正確ではない可能性はある)。

ミドリイシ属では、1ヶ月後、すべての群体形において白化レベル4(完全白化群体)が激減し、指状、テーブル状においては、全くなくなっていた。それに代わって、全群体形において死亡群体が出現していた。2ヶ月後には、レベル4だけでなく、レベル3の群体もなくなり、コリンボース型を除く3形において、はじめて正常群体が出現した(コリンボース型においては、1ヶ月後に1群体が出現していたが、この時点ではなくなっていた)。3ヶ月後、コリンボース型においては、レベル2のものが1群体あったが、それ以外の3形においてはなく、生群体のすべてがレベル1ないし正常群体であった。4ヶ月後、樹枝状およびコリンボース型において、レベル1の減少と正常群体の増加がみられたが、それ以外の大きな変化はなかった。

コモンサンゴ属においては、被覆状群体では、1ヶ月後、レベル1および正常群体が1群体ずつ出現した。完全白化群体は激減し、レベル2、死亡群体が出現し、3者はほぼ同数であった(それぞれ7、8、8群体)。2ヶ月後、完全白化群体の激減とレベル1群体の激増が確認された。また、死亡群体も増加した。3ヶ月後には完全白化群体がなくなり、生きている群体はレベル2より白化程度の軽いものだけになった。レベル2のものも減少し、正常な群体が増加した。死亡群体は増加しなかった。4ヶ月後、レベル1の群体が減少し、レベル2および正常群体が増加した。死亡群体は増加しなかった。

葉状および準塊状コモンサンゴの対象となる群体は、それぞれ1群体しかなく、1ヶ月後、葉状のものは正常群体となり、準塊状のものは死亡し、その後4ヶ月後まで変化はなかった。

考 察

調査の結果、阿嘉島マエノハマの調査地点において、サンゴの総被覆面積の30.0%(総群体数の33.4%)が完全に白化しており、それに部分的な白化と白化による死亡群体を合わせた白化によるダメージを受けたサンゴは、総被覆面積の98%(総群体数の94%)という高い割合であったことが明らかとなった。この地点のサンゴの組成を見ると、サンゴの被覆面積の90%以上がミドリイシ属、およそ7%がコモンサンゴ属により占められていた。1998年9月、キクメイシ属やその他のサンゴでは、正常なものや白化レベル1程度のダメージの軽いものも他の白化レベルと同じ位の割合で見られたが、ミドリイシ属とコモンサンゴ属では、白化レベル2以上の部分が大半を占めており、この2属は敏感に白化を生じるグループであると考えられる。調査地点で観察された高い白化率の一要因は、こうした白化しやすいサンゴが優占していたためと考えられる。

白化によりダメージを受けたサンゴは、回復あるいは死亡のいずれかの過程をたどると考えられるが、調査地点において4ヶ月後の1999年1月には、部分的に白化したサンゴが総群体数のおよそ25%あったが、40%は正常な状態にあり、25%のサンゴが死亡していたことから、この時点で、調査地点はその二者択一的な過程のかなり進んだ段階にあると思われる。

ミドリイシ属およびコモンサンゴ属内の群体形による比較を行ったところ、ミドリイシ属においては、1998年9月、コリンボース型において白化レベル2のものが卓越して高いパーセンテージを示した以外は、どの群体形でも白化レベルが高いものほど、群体数が多く、1999年1月には逆に、白化レベルが低いものほど、群体数が多い傾向が見られ、大きな相違はなかった。しかし、コモンサンゴ属では、被覆状と葉状とで大きな相違が見られた。すなわち、1998年9月、被覆状コモンサンゴの白化の程度はかなり大きく、4ヶ月後でも、部分白化サンゴの割合はミドリイシ属より高かったのに対し、葉状のものでは、1998年9月の時点でも白化の程度は低く、最も割合の高かったのは正常なサンゴであり、4ヶ月後には正常なサンゴが70%以上を占め、白化レベル2以上のものはなくなっていた。また、被覆状では25%のサ

ンゴが死亡したのに対し、葉状では死亡したものは全くなかった。これらのことから、コモンサンゴ属においては、被覆状のものよりも葉状のものの方が、今回白化を引き起こしたストレスに対して耐性をもっていることが示唆された。また、ミドリイシ属を含めた全群体形中で、被覆状コモンサンゴが最も白化しやすく、葉状コモンサンゴが最も白化しにくいと言えるだろう。

完全白化からの回復および死亡過程を見てみると、ミドリイシ属サンゴは、1998年9月の調査から1ヶ月後には、どの群体形においても回復および死亡が進行していた。回復過程は、樹枝状とコリンボース型においては、調査期間終了まで継続していたが、指状とテーブル状では、3ヶ月後以降止まっているようだった。死亡過程は、回復過程よりも速く、コリンボース型を除く3形では2ヶ月間で終了しており、コリンボース型でも3ヶ月間で終了した。コモンサンゴ属については、被覆状では3ヶ月間回復が見られたが、その後の1ヶ月で白化レベル2の増加が観察された。この退行の原因は不明であるが、少なくとも前年夏期の白化の回復には、3ヶ月以上費やされることが明らかとなった。葉状の回復は速く、1ヶ月後には回復しており、ミドリイシ属を含めた他の5形（準塊状コモンサンゴは回復のデータがないため除外した）とは大きく異なっていた。死亡過程は、ミドリイシ属と同様に回復過程よりも速く、被覆状では2ヶ月後、準塊状では1ヶ月後に終了していた（葉状はデータなし）。これらのことから、完全白化サンゴの回復には3ヶ月以上の時間が必要であるが、死亡は2ヶ月内に起こることが示めされた。また、このことから、前年夏期の白化を直接的な原因とした死亡サンゴは、これ以上増加することはなく、したがって本調査地点での白化による死亡サンゴは総群体数の約25%であったと言える。今回の白化は、高水温がその主要因と考えられている(谷口ら1999)が、今回の調査開始時(1998年9月25日)には、調査海域の水温は既にピークを過ぎており、白化の最盛期はもっと以前であったかもしれない。したがって、今回提示した回復および死亡に至る期間はこれより長くなる可能性が

ある。

本調査により、白化後の回復および死亡過程をある程度追跡することができた。しかし、例えば1998年9月のコリンボース型ミドリイシで見られた“白化レベルが高くなるにつれ群体数が多くなる傾向”と“白化レベル2の群体の高い割合”の混在や、その他のサンゴでの白化レベル1と4での割合の高まりなど、1つの群体形において複数の傾向が同時に存在しているように見えるものがあった。これらは各群体形の特徴かもしれないが、それぞれの群体形を構成しているサンゴ種の性質が複合されたために生じたものかもしれない。今後、白化、そしてその後の回復および死亡過程の研究には、種や群体サイズ、年齢など群体自体の属性を考慮すべきであろう。

謝 辞

本調査を行うに当たり、海中作業と画像処理にご協力いただいた大矢正樹氏(元・阿嘉島臨海研究所研究員)に深く感謝いたします。また、本研究の一部は、平成10年度科学技術振興調整費による「サンゴ白化現象の機構解明に関する緊急研究」として、科学技術庁からの委託により実施したものです。関係者の方々に感謝の意を表します。

引用文献

- Goreau, T. F. 1964. Mass expulsion of zooxanthellae from Jamaican reef communities after hurricane Flora. *Science*, 145: 383-386.
- 谷口洋基・岩尾研二・大森 信 (in printing) 慶良間列島阿嘉島周辺における造礁サンゴの白化. I. 1998年9月の調査結果. *Galaxea, Journal of the Japanese Coral Reef Society*.
- Vaughan, T. W. 1911. Recent Madreoporaria of southern Florida. *Carnegie Inst. Washington Year Book*, 8: 135-144.
- Yonge, C. M. and A. G. Nicholls 1931. Studies on the physiology of coral. V. The effect of starvation in light and in darkness on the relationship between corals and zooxanthellae. *Sci. Rep. Great Barrier Reef Exped.* 1928-1929, 1(7): 177-122.

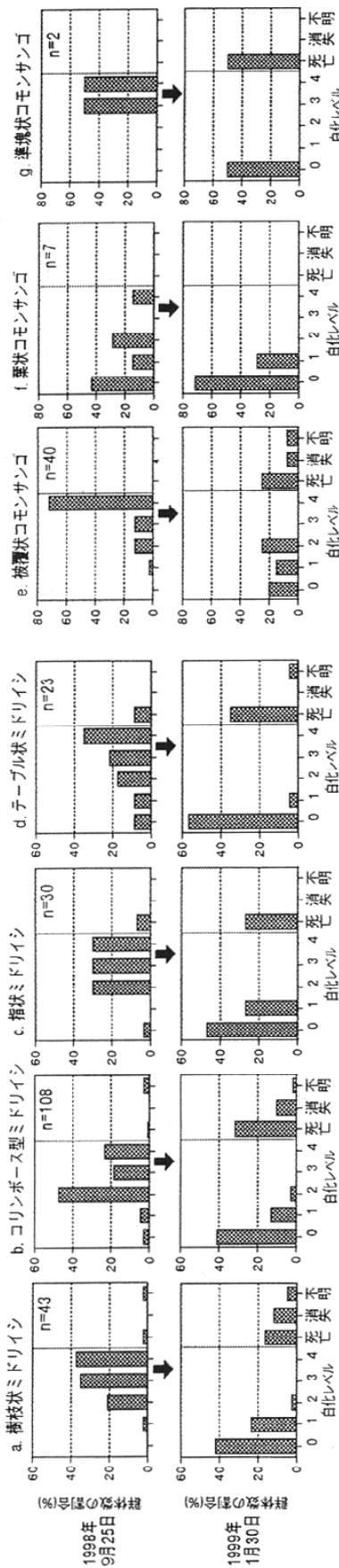


図3. ミドリイシ属およびコモンサンゴ属サンゴの群形成ごとの白化状況の変化 (1998年9月25日-1999年1月30日)

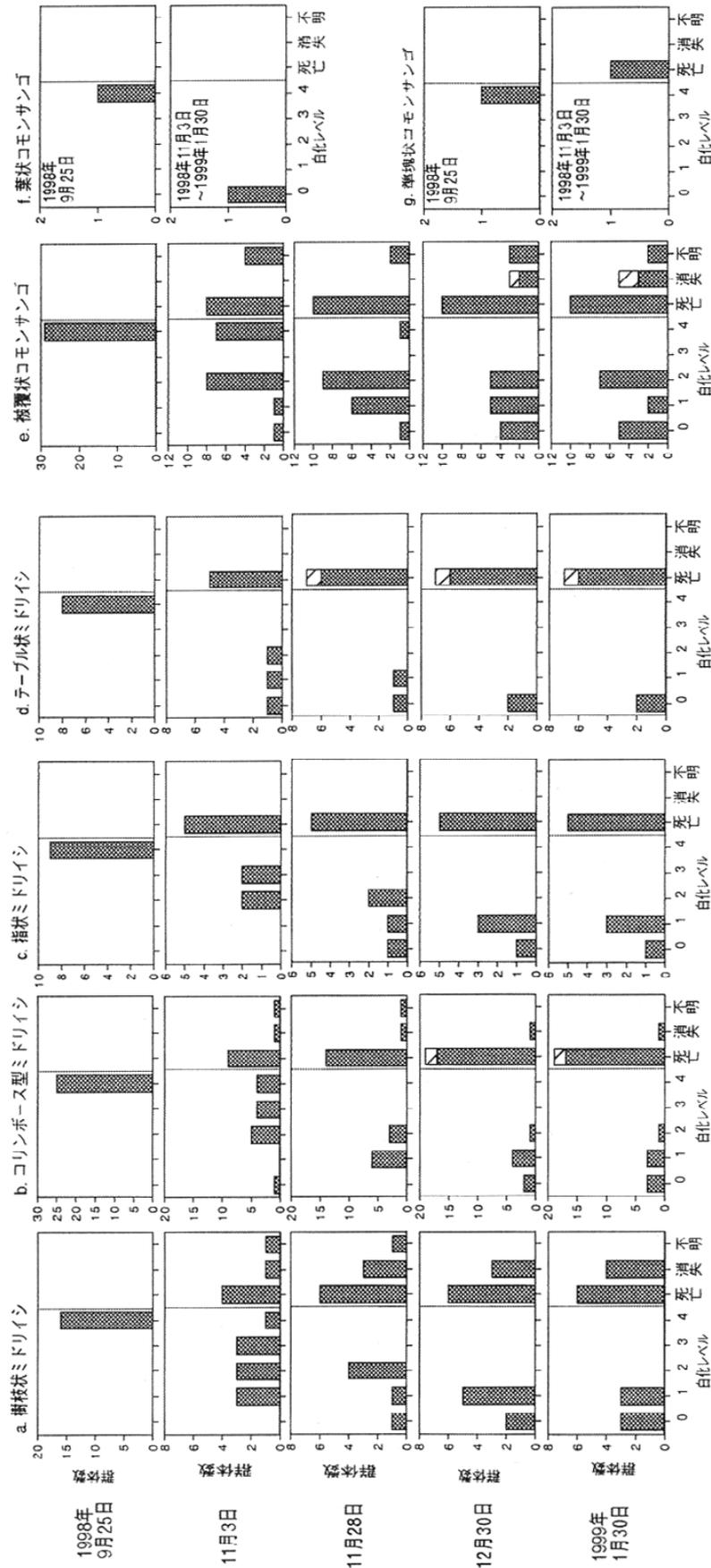


図4. ミドリイシ属およびコモンサンゴ属サンゴにおける群形成ごとの白化レベル4群体の回復および死亡過程 (■はレベル0-2からの死亡)