

人工ノルのサンゴ移植に関する研究

工藤 君明^{*1} 鶴岡 正敬^{*1}

沖縄県との地域共同研究「サンゴ礁造園技術の研究開発」は昭和62年より基礎的調査研究を開始し、平成3年3月に終了した。この間、沖縄本島のサンゴ礁現況調査に基づき、サンゴ礁造園モデル地区を選定して、サンゴ礁海域の海水環境や生態系がサンゴ生育に及ぼす影響を明らかにするために、気象海象条件を連続的に観測するシステムを確立した。また、サンゴ礁の回復を促進するためには自然の復元力に加え、人為的に回復を補強する必要があるため、生きたサンゴの破片を用いたサンゴ移植技術の研究開発を進めた。この技術を実証するため、サンゴ礁造園モデル地区に人工の移植基盤であるピラミッド状の人工ノルを設置し、周辺海域から採捕したサンゴを移植して、生存率や成長率を観測し、移植サンゴの生育に適した環境条件や環境に適したサンゴ種などについて調査研究した。

サンゴが生育する礁縁に比べて環境が必ずしも良好とはいえない海域の水深5.3mの地点に設置した人工ノルの、上・中・下3段に7種604片を移植して定期的に生存率を調査したところ、移植後1年半経過した時点で、全体の生存率は約60%となった。しかし、上段の生存率は82%となっており、光環境条件が良好であれば、移植サンゴも十分に生育できることが明らかになった。またサンゴ種によって深度影響は異なり、オヤユビミドリイシなど頑健なサンゴでは深度による生存率変化は小さく、逆に、ショウガサンゴなど繊細なサンゴでは深度が大きくなるにつれて生存率は低下する傾向を示した。

サンゴ移植の実験により、人工移植基盤がサンゴ礁回復の技術的に可能な手段であることを実証することができた。

キーワード：サンゴ、移植、人工ノル

Coral Transplantation on the Artificial Knoll

Kimiaki KUDO^{*2} Masanori TSURUOKA^{*2}

JAMSTEC started the Coral Reef Project to accelerate the restoration of coral reef communities in cooperation with Okinawa prefectural government since 1987. The primary objective of this project was to estimate the feasibility of transplanting

* 1 海域開発研究部

* 2 Marine Development Research Department

corals. The artificial knoll for coral transplantation was designed and installed on the sea bed in the moat off the Chinen coast, which is in the southern part of Okinawa Island. The structural form of the artificial knoll is a pyramid with 3 tiers of grates of mortared wires, the sizes of which are 6.2m square base and 3m high. Totally, 604 pieces from 7 coral species from the outer reef were transplanted on to the tiers in August 1989. After the transplantation, both the mortality and the growth rates were monitored by taking pictures and counting the number of living coral fragments.

In February 1991, 60% of the transplanted corals survived for 1.5 years.

- ① 80% of transplanted coral pieces on the upper stage survived and grew well.
- ② The survival rate depends on the depth of the tier.
- ③ The mortality is greatest at the lower tier.
- ④ The fine corals (*Pocillopora verrucosa*, *Stylophora pistillata*) were mortal in deeper water.
- ⑤ The robust corals (*Acropora gemmifera*, *Acropora nobilis*, *Porites cylindrica*) were healthy on all tiers of the artificial knoll.

This project proved the artificial knoll and coral transplantation as feasible means of recovering damaged coral reefs.

Key words : Coral, Transplantation, Artificial knoll

1 はじめに

サンゴ礁は観光資源として重要であるばかりでなく、生きた防波堤として陸域を海岸侵食から守る役割も果たしてきた。サンゴは体内に共生させている褐虫藻の働きにより基礎生産力が高く、このため多様なサンゴ礁生物群集の基礎となっており、また骨格形成活動により CO_2 を炭酸カルシウムとして固定しながら、歴史的時間をかけてサンゴ礁を構築してきた^{1) 2)}。

しかしサンゴ礁は、近年、陸域の開発の影響を受けて次第に破壊されつつあり、また、オニヒトデの異常発生による食害や海水温上昇による白化現象などにより、広範囲のサンゴが一挙に死滅するなど、多くの病的症状を示している。健全なサンゴ礁生物群集の回復を促進するためには、海域環境の保全に努めることが必要であることは勿論であるが、自然の復元力に加え、人為的に回復を補強することも必要となっている³⁾。サンゴ礁環境の復元を促進するため、海洋科学技術センターと沖縄県は共同で、サンゴ移植技術の研究開発を

実施してきた。この研究ではサンゴの無性生殖能力を活かした移植技術を確立するとともに、サンゴの生育に影響する自然環境条件の調査研究をも進めている⁴⁾。

サンゴ移植の実験海域を、沖縄本島南部の知念村地先海域（サンゴ礁造園モデル海域）とし（図1）、沖合約1km、水深5.3mの地点に人工の移植サンゴ基盤（人工ノル）を設置して移植実験を行なった（図2）。人工ノルの形状及び構造は、移植固定作業を迅速・確実・容易にできること、フィールド実験ではあるが可能な限り環境条件のバラツキを小さくすること、さらに、自然の状態では半永久的に回復しない所にもサンゴ礁を再生させることを目標にし、ピラミッド型の人工移植基盤を設計製作した。

人工ノルの設置位置はサンゴの生育環境として必ずしも良好とはいえないが、この場所を選定した理由は、この海域の沖合4kmには堡礁状のサンゴ礁が発達し、生サンゴの被度が比較的に高く、しかも優占種であるミドリイシ類が豊富に生育し、

さらにオニヒトデの出現頻度が低いなど生物的環境に恵まれているばかりでなく、サンゴの採捕や移植などの作業、環境の調査などに必要なアクセス手段が揃っているからである。

サンゴ移植を平成元年8月に完了させ、その後ほぼ定期的に移植サンゴの生存率をモニターする

とともに、環境条件を連続的に計測し、サンゴ移植技術の実用化のための基礎データを蓄積した。

本稿では、人工ノルのサンゴ移植実験の成果と周辺海域の自然環境条件の調査結果について紹介する。

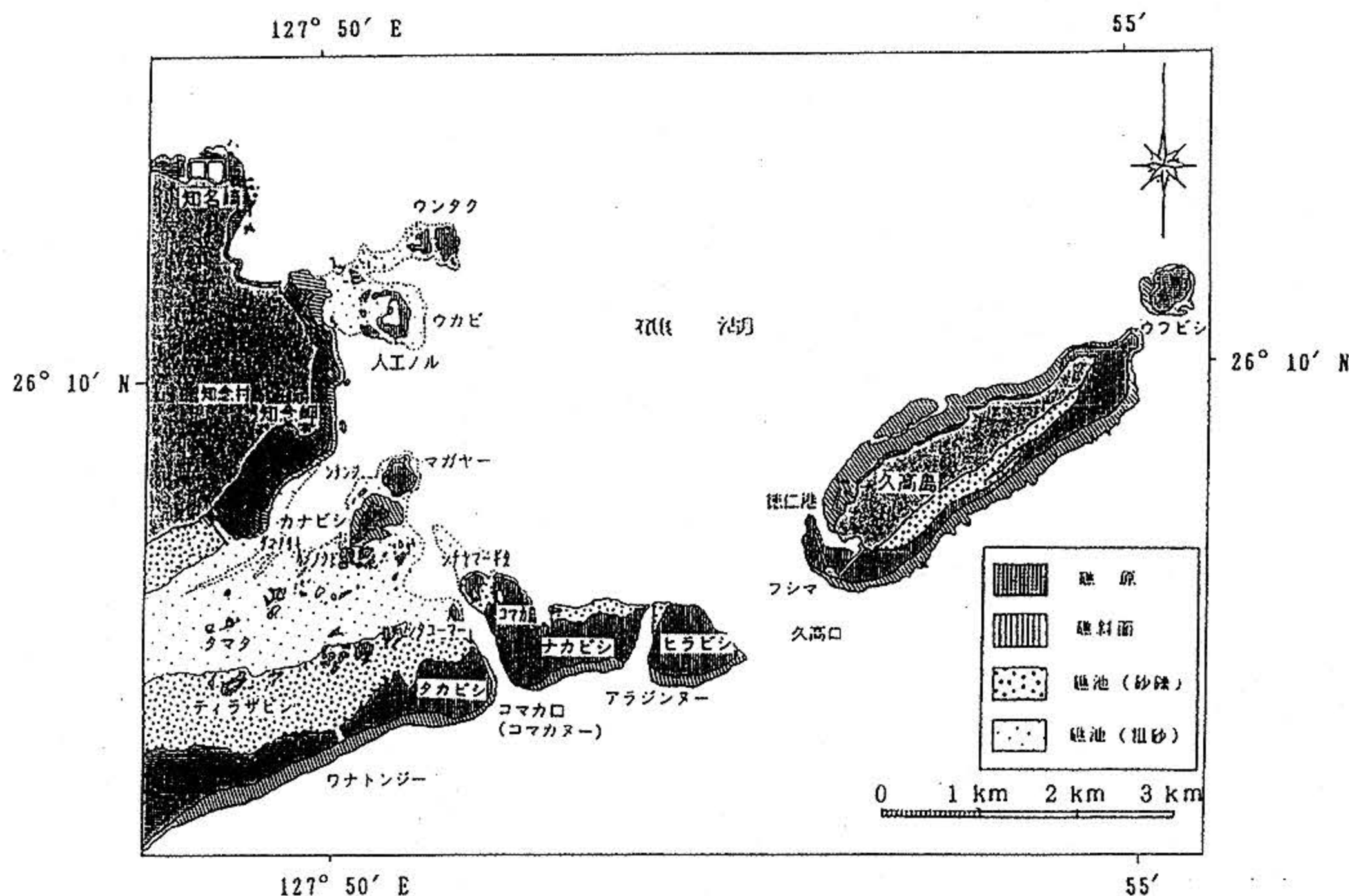


図1 サンゴ礁造園モデル海域

Fig. 1 The model site for investigation of coral transplantation

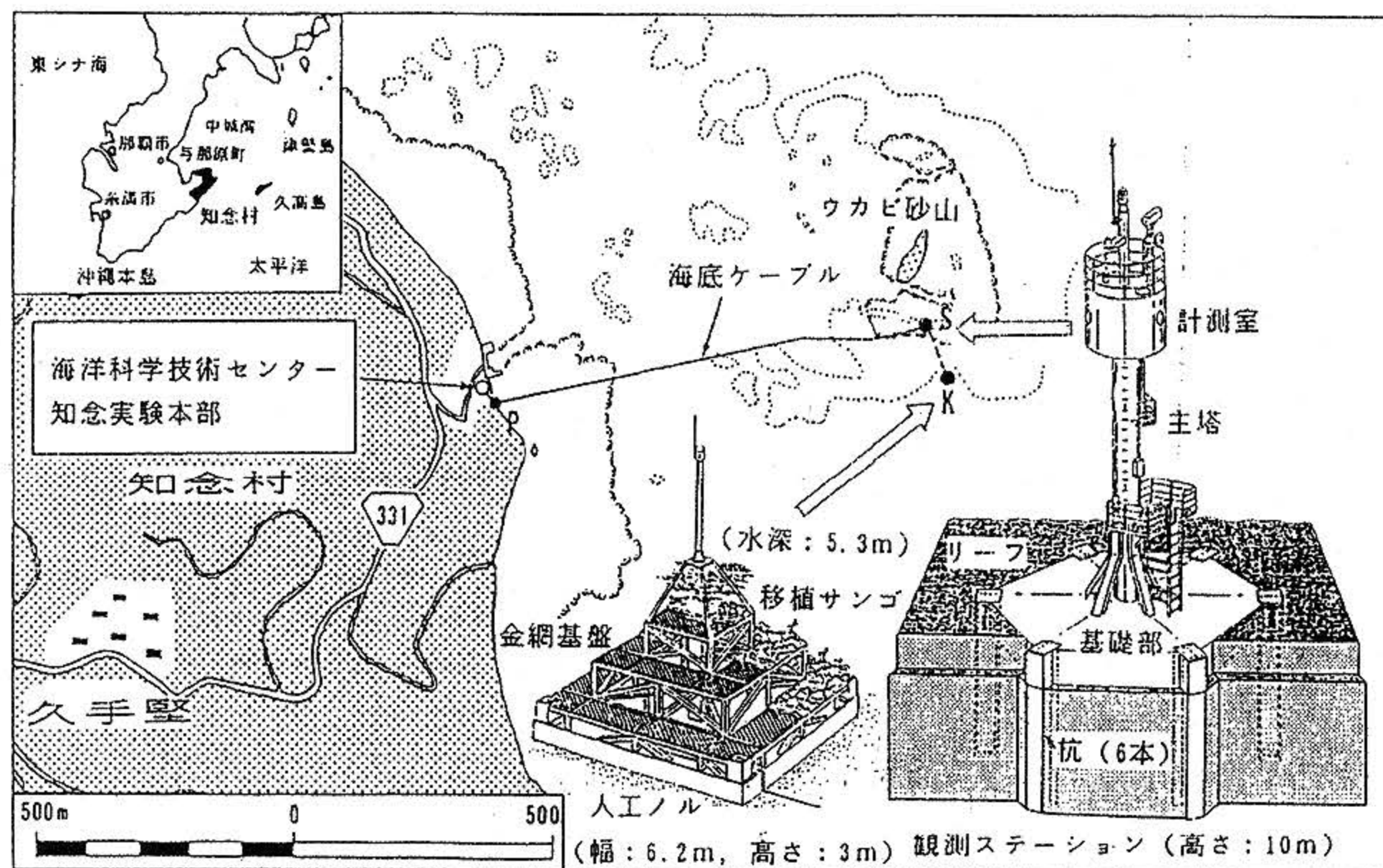


図2 人工ノルと観測ステーション

Fig. 2 Artificial knoll and Observation station

2 人工ノルのサンゴ移植実験

2.1 人工ノルへのサンゴ移植

サンゴを移植する人工の基盤は、安定した構造物であること、サンゴ破片が固定しやすく、またサンゴがなじみやすい固い基盤を有すること、さらにサンゴの生育に必要な光をより多く供給できる形状であることが基本条件になる。サンゴ礁を造園する海域に合わせて、全体形状は堤防型や平板状など、さまざまに設計できるが、本研究では鉄骨構造によるピラミッド型とし、全体形状が海底から直立する小さな山 (knoll) に似ているので、これを人工ノルと名付けた。

人工ノルは縦横 6 m、高さ 3 m で、海底より 1 m、2 m、3 m の各段にサンゴ移植基盤を設けた。サンゴが固定しやすく、また台風等の激浪に対しても脱落しないようサンゴ移植基盤は格子構造とし、鉄筋にモルタルを厚く塗布したものを使用した。

人工ノルの移植基盤を 1 m × 1 m の大きさの 36 区画に分割し、上段 (U)、中段 (M)、下段 (L) の各区画に通番を付した (図 3)。各区画には原則として 25 個 (5 行 × 5 列) の破片を移植した。混合移植区画は、5 種類のサンゴ破片を各 5 個移植し、同一区画における成長度や優占種を調査することを目的とした。単一移植区画は単一群体を破片にして、単一種のサンゴ破片による成長過程を観察することを目的とした。この他に、後の移植計画のために無移植区を確保し、また金網基盤に通電した場合の効果を調べるための通電区画、さらに大型のサンゴ破片を高密度に移植し、サンゴ群体の生育度や魚の蟄集状況を観察するためのデモ区 (L2, L3) を設けた。

移植に用いたサンゴはすべて沖合の、太平洋に面する礁原 (沖縄ではヒシと呼ばれる) から採捕した。ミドリイシサンゴを主体に、全部で 7 種を移植に使用した (表 1)。大型のサンゴを適当な大きさの破片に分割した後、移植基盤にステンレスワイヤを用いて固定した。

平成元年 8 月 31 日までに、混合種移植区画及び単一種移植区画に、総数で 642 破片を移植したが、早い段階で脱落したものが 38 片あり、移植固定率は 94 % となっていた。生存率の調査対象とした各段毎の移植サンゴ片数は、上段 : 49、

中段 : 234、下段 : 321、総計 604 片である。

2.2 移植サンゴの生存率

移植サンゴの生存数をほぼ定期的に調査し、調査結果を生存率として整理した。各段毎の生存率変化を図 4 に、また移植サンゴ種の生存率変化を図 5 (1) ~ (7) に示す。

移植してから約 1 年半経過した時点で、総生存率は 60 % であるが、移植サンゴの種や人工ノルの段により有意な差が見られる。以下に、移植サンゴの生存率の推移を詳細に検討する。

平成 3 年 2 月まで合計 8 回調査した。第 8 回調査で全体の生存率は 60 % であるが、上段 : 82 %、中段 : 66 %、下段 : 53 % となっており、下段の移植数が大きいために全体としても低い生存率になってしまった。図 4 から平成 2 年の 7 月から 8 月にかけて生存率が急激に低下し、その後も引き続いて低下していることが分かる。これらは主として下段面の移植サンゴの死亡率が原因となっている。

移植して半年後までは比較的に少数のサンゴ片が、主として下段面で死亡していた。第 5 回調査 (5 Jul 91) で中段のオヤユビミドリイシとトゲスゲミドリイシが死亡しているのはオニヒトデの食害によると考えている。第 6 回 (20 Jul 91) 及び第 7 回 (9 Nov 91) の調査にかけて、サンゴの死亡数が顕著に増大していることが判明した。

人工ノルにおける水温の観測によると、平成元年の場合、8 月中旬に最高水温が 30 °C になったが、8 月中はおおむね 29 °C 程度であった。これに対し、平成 2 年の場合には、7 月の始めに最高水温が 30 °C となり、7 月中旬の最高水温は 29 °C 程度であったが、下旬には最高水温が 31 °C を超え、平均でも 30 °C 程度の日が続き、例年になく高温となった。地元の人話によると、例年は 30 °C を超えることはあまりなく、このような高温は 20 年ぶりとのことであり、周辺サンゴ礁のサンゴも色が鮮やかになっているのを心配していた。このことは、高温のためサンゴに共生する褐虫藻が抜けることにより、サンゴ本来の鮮やかな色彩になることを意味しており、もう少し高温が続けばサンゴが全滅してしまう恐れもあった。これは世界のサンゴ礁でも問題になっている“白化現象”といわれるものである。7 月 ~ 8 月の高温

L 11	L 12	L 13	L 14	L 15	L 16
	▷○▷☆☆	△▷*☆☆	△△△△△	□□□□□	▷▷▷**
	△○▷□▷	○▷☆○△	△△△△△	□□□□□	▷▷▷**
	☆☆△*○	□△☆▷○	△△△△△	□□□□□	▷▷▷▷▷
	△□☆	□○○▷▷	△△△△△	□□□□□	▷▷▷▷▷
	▷☆○△☆	□*△△☆	△△△△△	□□□□□	▷▷▷▷▷
L 10	M 7	M 8	M 9	M 10	L 17
☆☆☆☆☆		▷□□△○	○▷☆☆△	☆☆☆☆☆	○△☆☆△
☆☆☆☆☆		☆○△○△	☆▷□○▷	☆☆☆☆☆	○☆*△▷
☆☆☆☆☆		○□☆☆*	□○▷□△	☆☆☆☆☆	▷△○*○
☆☆☆☆☆		○▷▷☆☆	△☆☆▷○	☆☆☆☆☆	▷▷□☆☆
☆☆☆☆☆		△□▷☆☆	*△□☆☆	☆☆☆☆☆	○□☆☆□
L 9	M 6	U 3	U 4	M 11	L 18
○○○○○	▷☆☆△▷		○△▷○△	▷**□☆	▷○□☆☆
○○○○○	○□○□△		▷☆☆○□	□☆☆△*	○▷☆☆△
○○○○○	○*☆☆▷		☆☆△▷○	○□▷△○	△☆☆*▷
○○○○○	▷□☆☆△		○□△□▷	△▷○○*	*△○△△
○○○○○	□△△▷☆		*☆☆▷□☆	△○□△▷	*○☆☆☆
L 8	M 5	U 2	U 1	M 12	L 19
▷□▷☆☆	○▷☆☆▷	△▷○▷▷		▷*▷▷☆	(通電区画)
□☆☆☆☆	*□△○	▷△☆☆☆		☆☆*○△	
△□△○	☆☆△△○	○☆☆□△		△△○▷	
□☆☆▷	○△□□▷	□○□△☆		□▷□△	
○△○△☆	□▷□△☆	▷□☆☆○		○○□△○	
L 7	M 4	M 3	M 2	M 1	L 20
*○□○▷	▽▽▽▽▽	▷▷○□▷	▷□▷☆☆		(通電区画)
*☆☆☆☆	▽▽▽▽▽	△☆☆☆☆	☆☆○△□		
☆☆☆☆	▽▽▽▽▽	△□□☆☆	△△△▷		
▷△○▷△	▽▽▽▽▽	△△○▷○	○☆☆☆☆		
☆☆○○○	▽▽▽▽▽	*○☆☆*	△○○□▷		
L 6	L 5	L 4	L 3	L 2	L 1
◇◇◇◇◇	☆☆▷○*	○△☆☆△			
◇◇◇◇◇	○☆☆☆☆	▷☆☆**	(デモ区)	(デモ区)	
◇◇◇◇◇	☆☆○△▷	▷☆☆△□			
**◇◇◇	*△△□▷	○△○☆☆			
**◇◇◇	▷△▷△□	▷□☆☆○			

図 3 移植サンゴの配置図 (記号は表 1 参照) (移植直後: 平成元年 8 月 31 日)

Fig. 3 Distribution of the transplanted coral pieces on the Artificial knoll (31 Aug.1989). For symbols, refer to the Table 1 (*:not transplanted).

の影響でかなりのサンゴが死亡し、また衰弱してその後徐々に死んでいったものと思われる。

なお、この期間におけるサンゴの死亡状況を見ると、単一移植区画のサンゴが集中的に死亡するパターンがみられる。ただし、サンゴを移植する場合に単一区画でなく混合種とすべきであるのかどうかは明確でない。単にその種のサンゴが環境条件に合わなくて死亡したのか、同一群体からの破片のために同期して死亡したのかなど、不明な点が多くある。

移植サンゴの生存率と種の間係をみると(図5)、オヤユビミドリイシ、トゲスギミドリ

イシ、アザミサンゴでは深度による変化は小さく、逆にクシハダミドリイシ、イボハダハナヤサイサンゴ、ショウガサンゴなどでは、深度が大きくなるにつれて生存率は低下する傾向が強いことを示している。これらのタイプは深度が大きくなって入射光が小さくなるにつれて光合成を十分に行なうことができなくなり、海水温の上昇に対して抵抗力が小さくなったことが考えられる。なぜならば、同じような海水環境であるにもかかわらず、これらのサンゴは上段面では健康に生育しているからである。

表 1 人工ノルに移植したサンゴの種と移植片数 (平成元年 8 月 31 日)
Table 1 Coral species and the number of pieces transplanted
on the Artificial knoll (31 Aug.1989)

サンゴ類 Coral species	記号 Symbol	上 段 Upper	中 段 Middle	下 段 Lower	合 計 Total
オヤユビミドリイシ <i>Acropora gemmifera</i>	○	10	40	64	114
トゲスギミドリ <i>Acropora nobilis</i>	△	10	40	64	114
クシハダミドリイシ <i>Acropora hyacinthus</i>	▽	0	25	0	25
イボハダナヤサイサンゴ <i>Pocillopora verrucosa</i>	☆	10	55	65	130
ユビエダハマサンゴ <i>Porites cylindrica</i>	▷	10	40	60	110
ショウガサンゴ <i>Stylophora pistillata</i>	□	9	34	47	90
アザミサンゴ <i>Galaxea fasciculais</i>	◇	0	0	21	21
合 計 Total		49	234	321	604

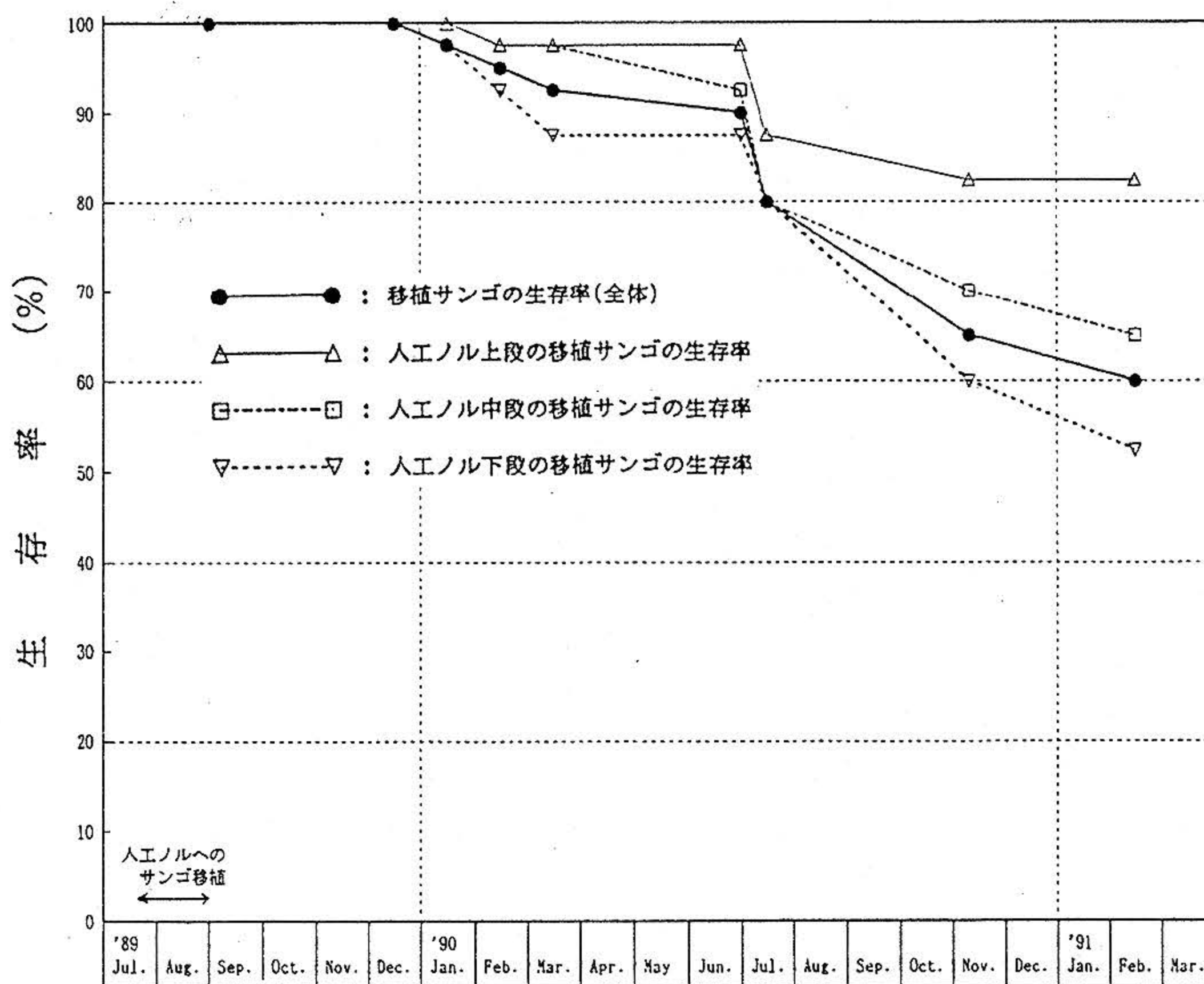


図 4 人工ノル移植サンゴの生存率変化 (各段及び全体)

Fig. 4 Survival changes of the transplanted corals on the Artificial knoll (each stage and total)

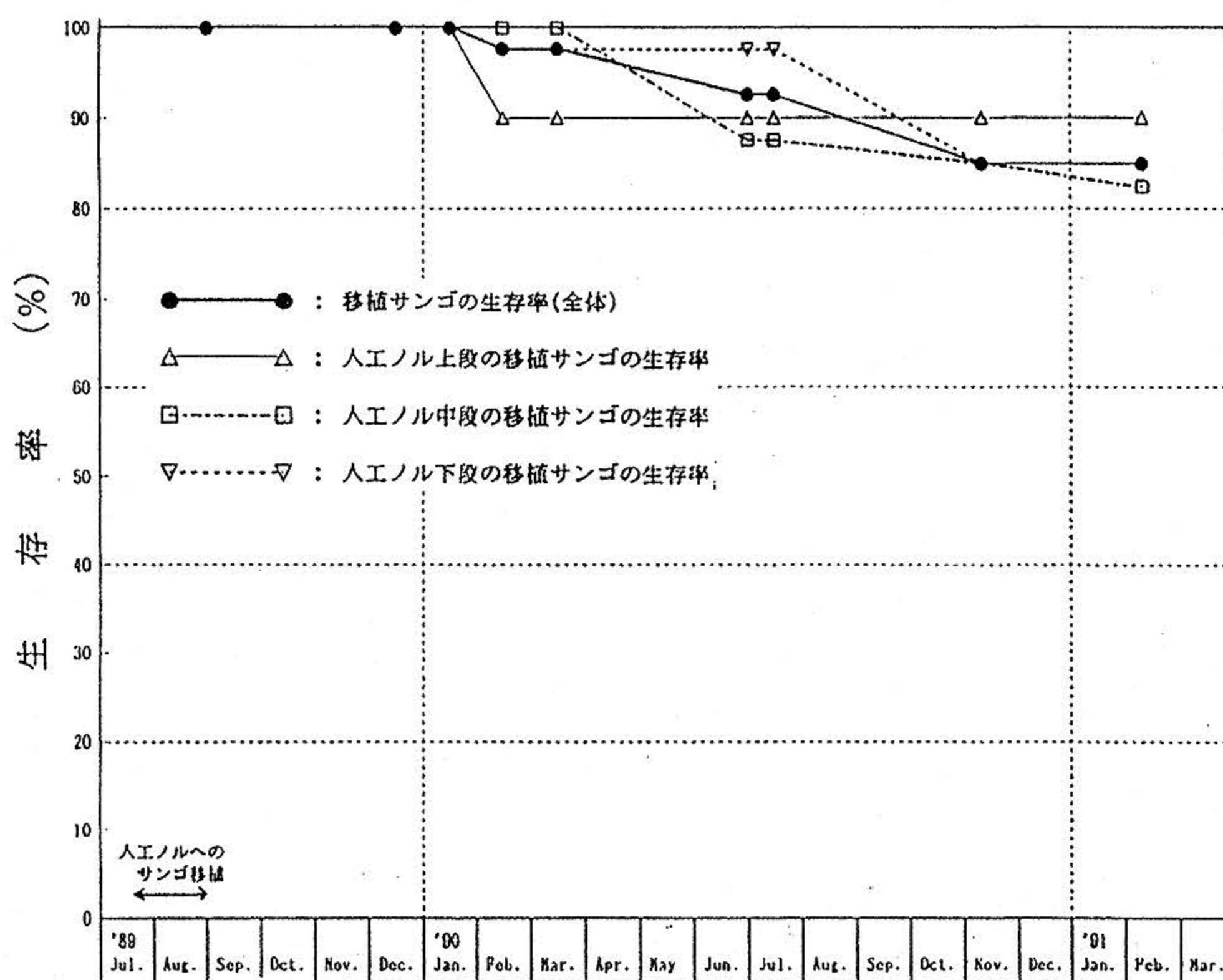


図 5(1) オヤユビミドリイシの生存率変化

Fig. 5(1) Survival change of transplanted *Acropora gemmifera*

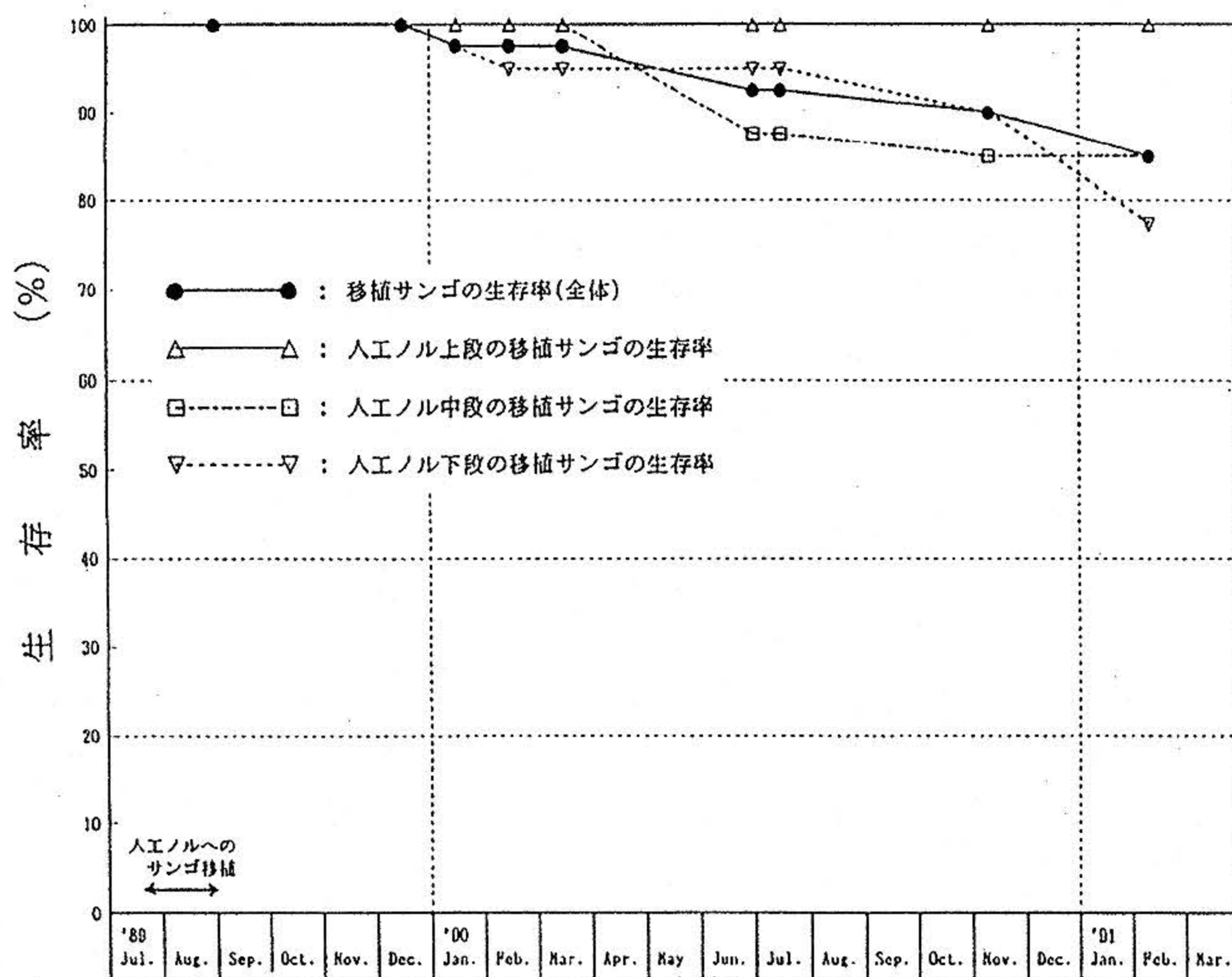


図 5(2) トゲスギミドリイシの生存率変化

Fig. 5(2) Survival change of transplanted *Acropora nobilis*

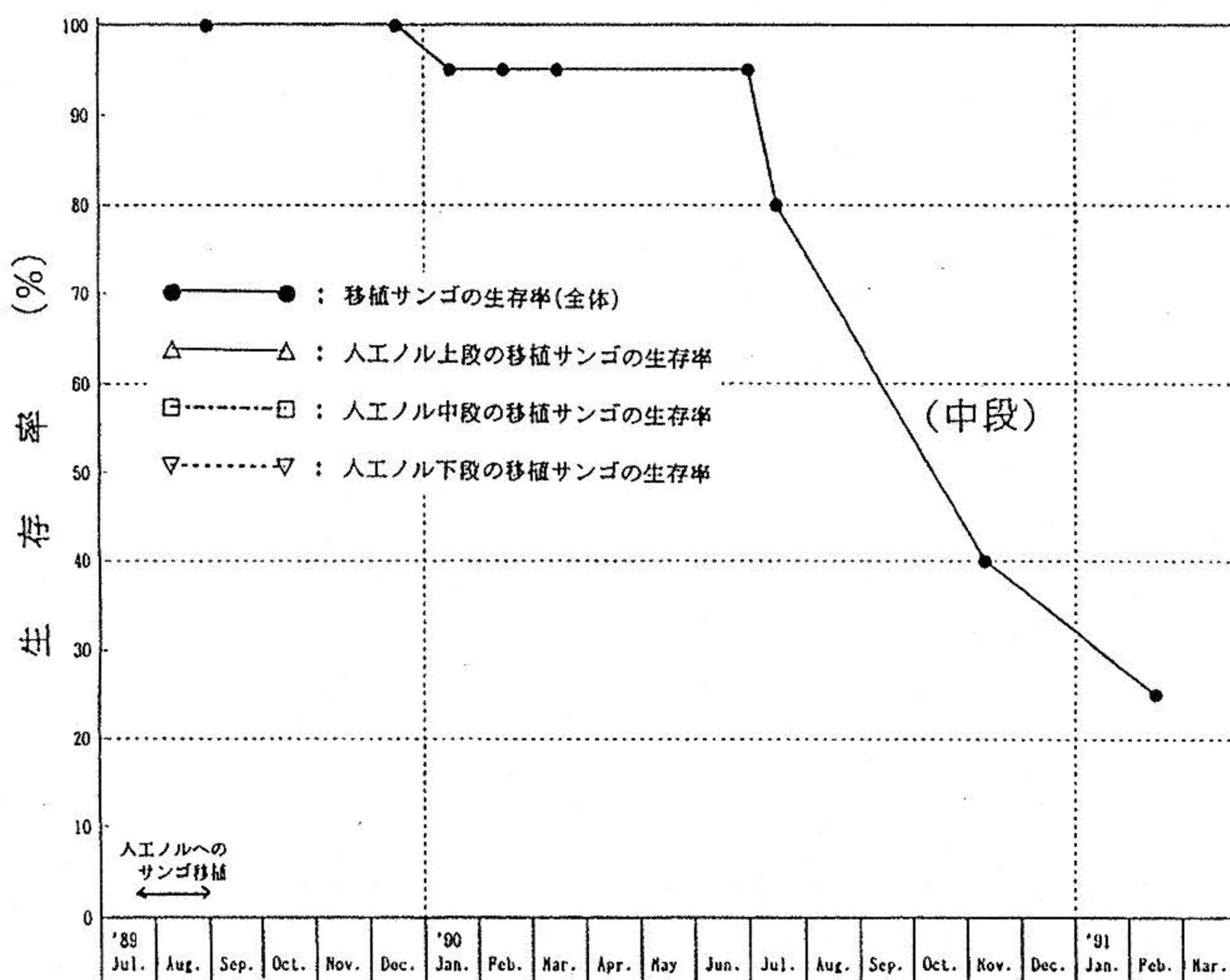


図 5(3) クシハダミドリイシの生存率変化

Fig. 5(3) Survival change of transplanted *Acropora hyacinthus*

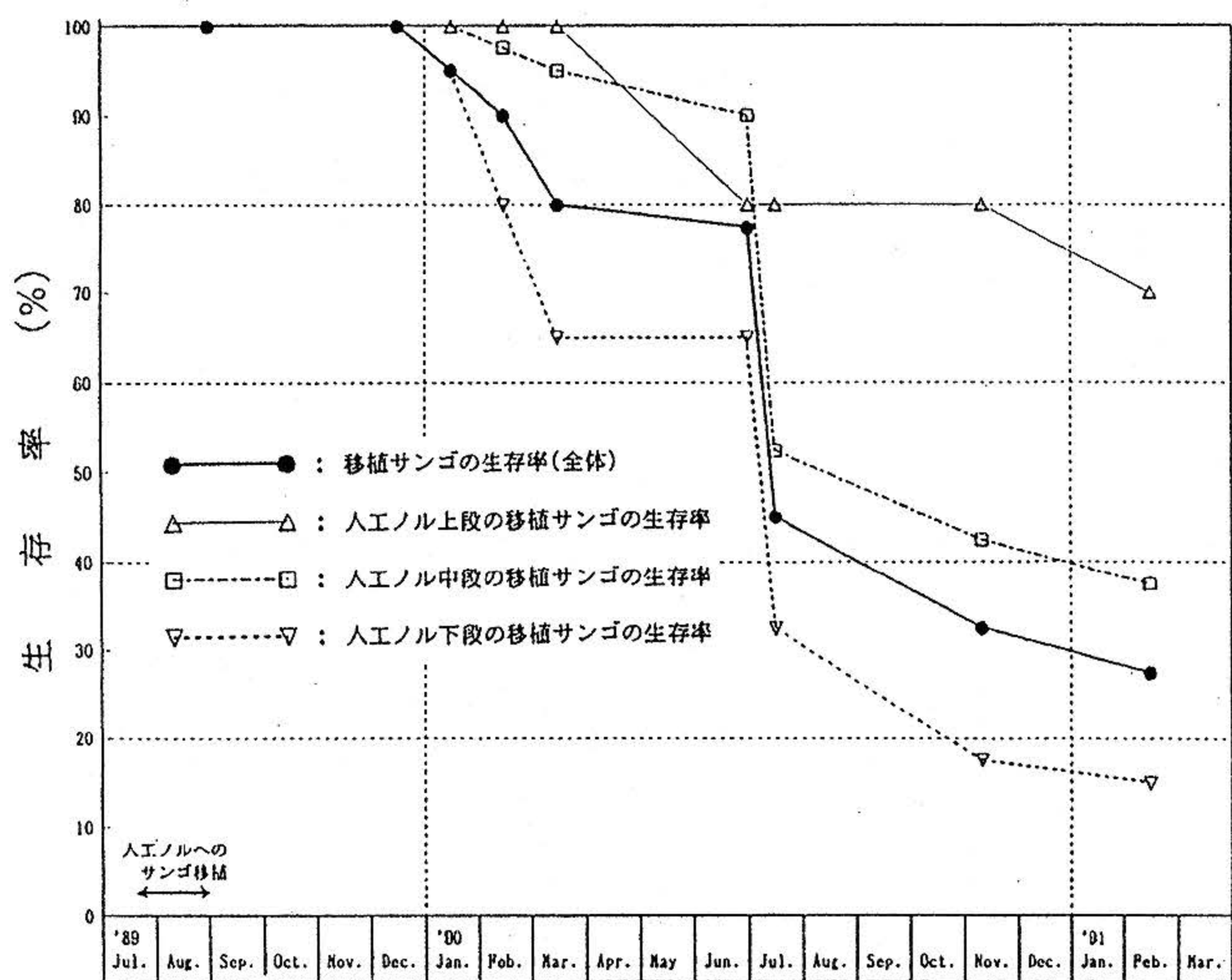


図 5(4) イボハダハナヤサイサンゴの生存率変化

Fig. 5(4) Survival change of transplanted *Pocillopora verrucosa*

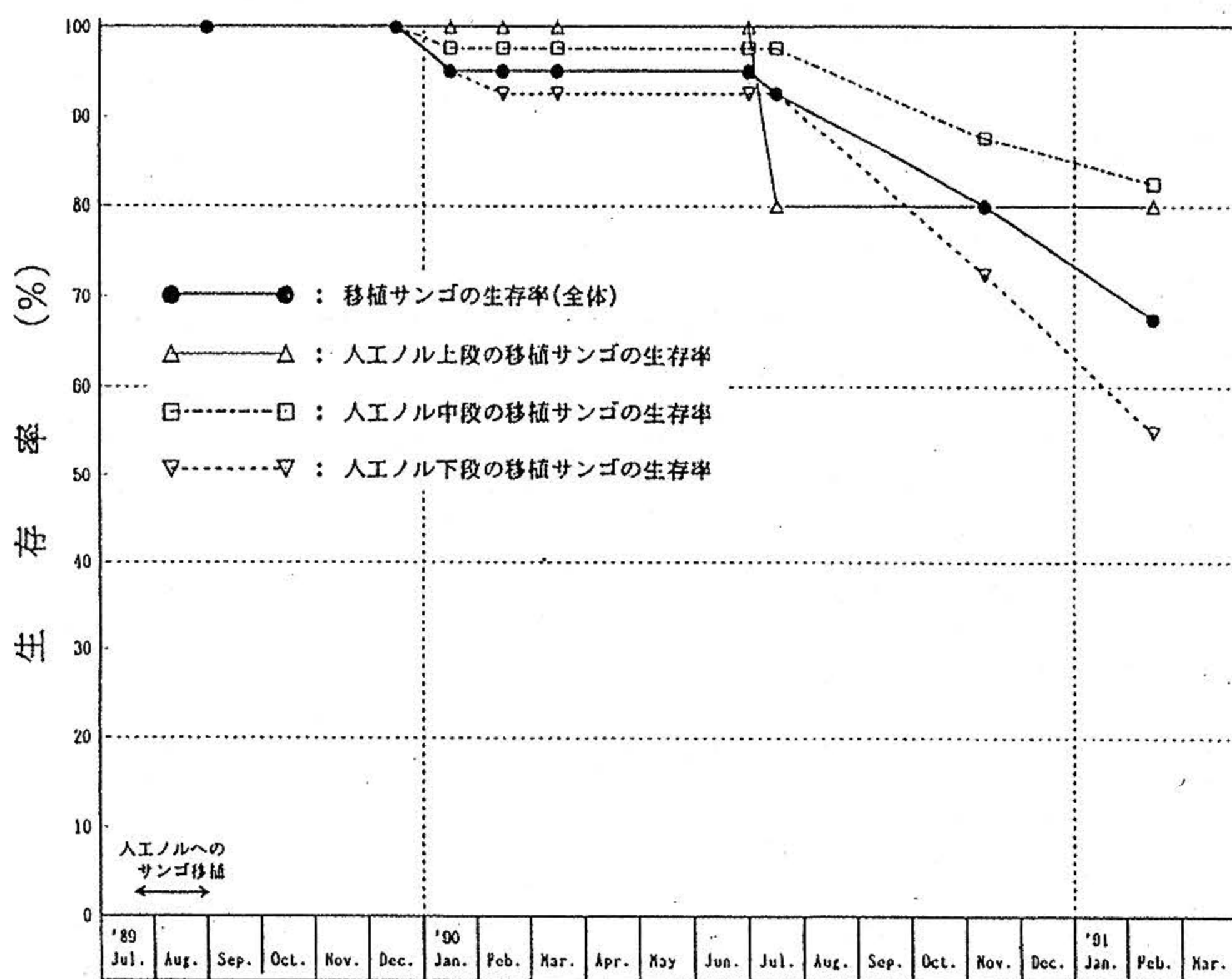


図 5(5) ユビエダハマサンゴの生存率変化

Fig. 5(5) Survival change of transplanted *Porites cylindrica*

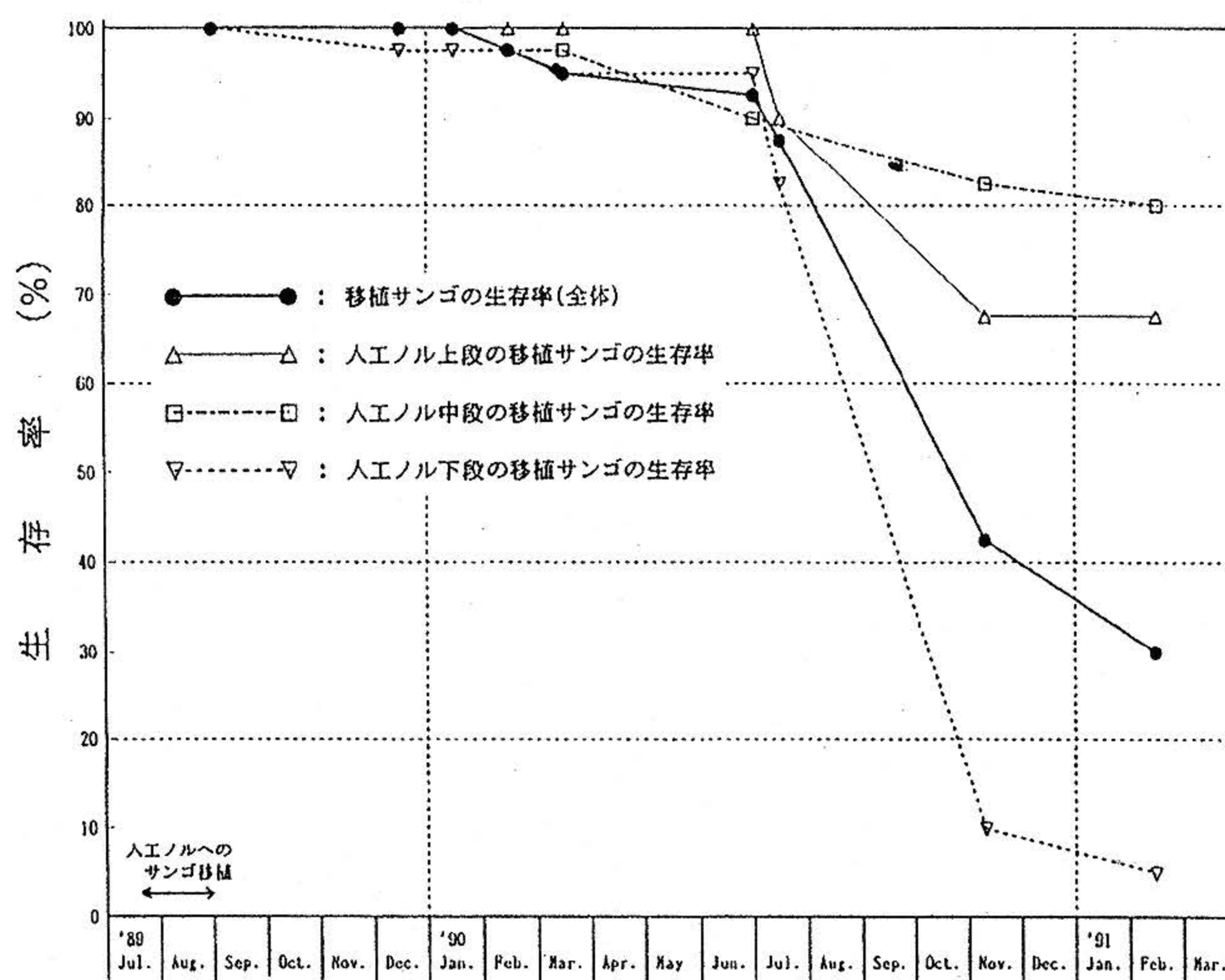


図 5 (6) ショウガサンゴの生存率変化
Fig. 5 (6) Survival change of transplanted *Stylophora pistillata*

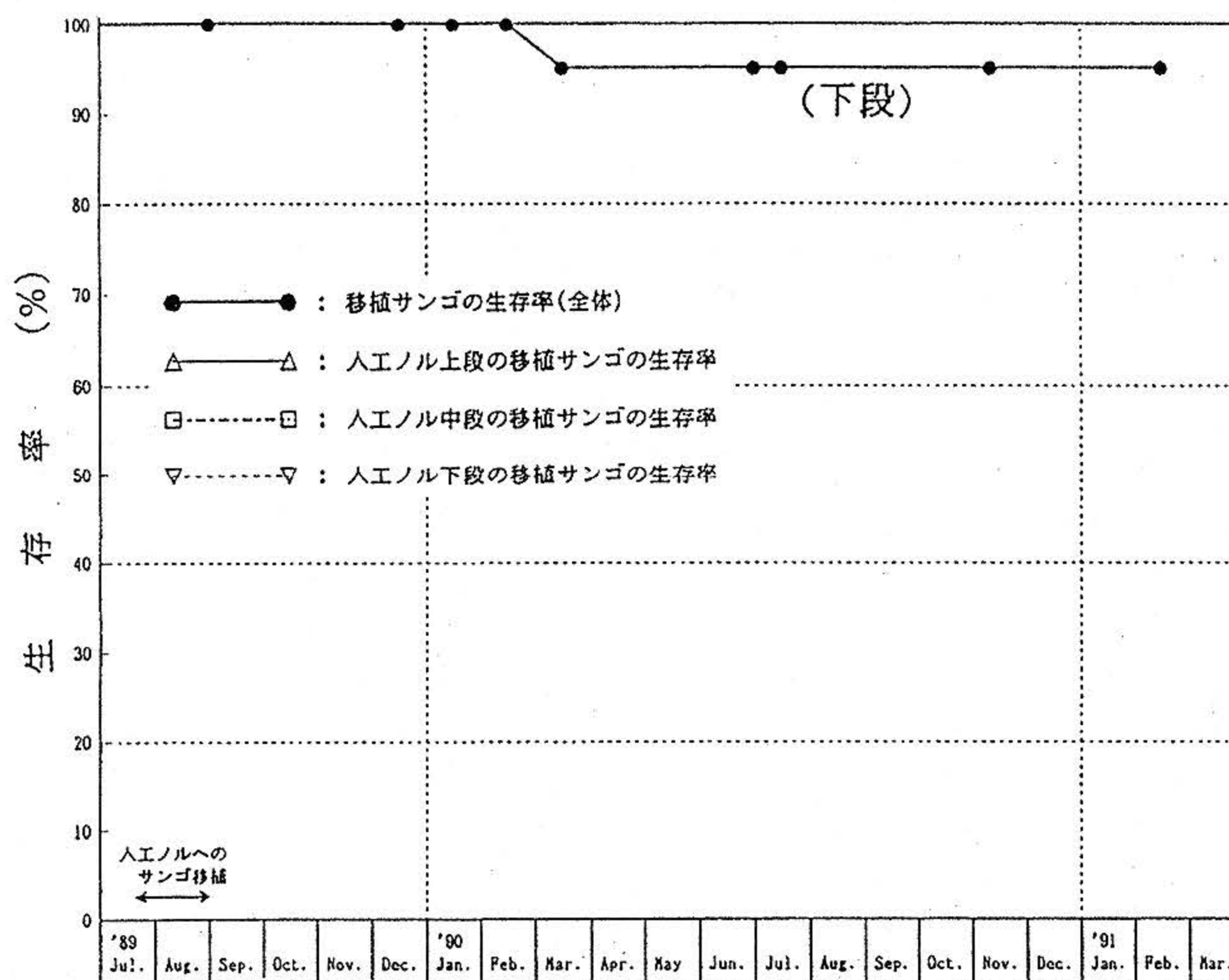


図 5 (7) アザミサンゴの生存率変化
Fig. 5 (7) Survival change of transplanted *Galaxea fascicularis*

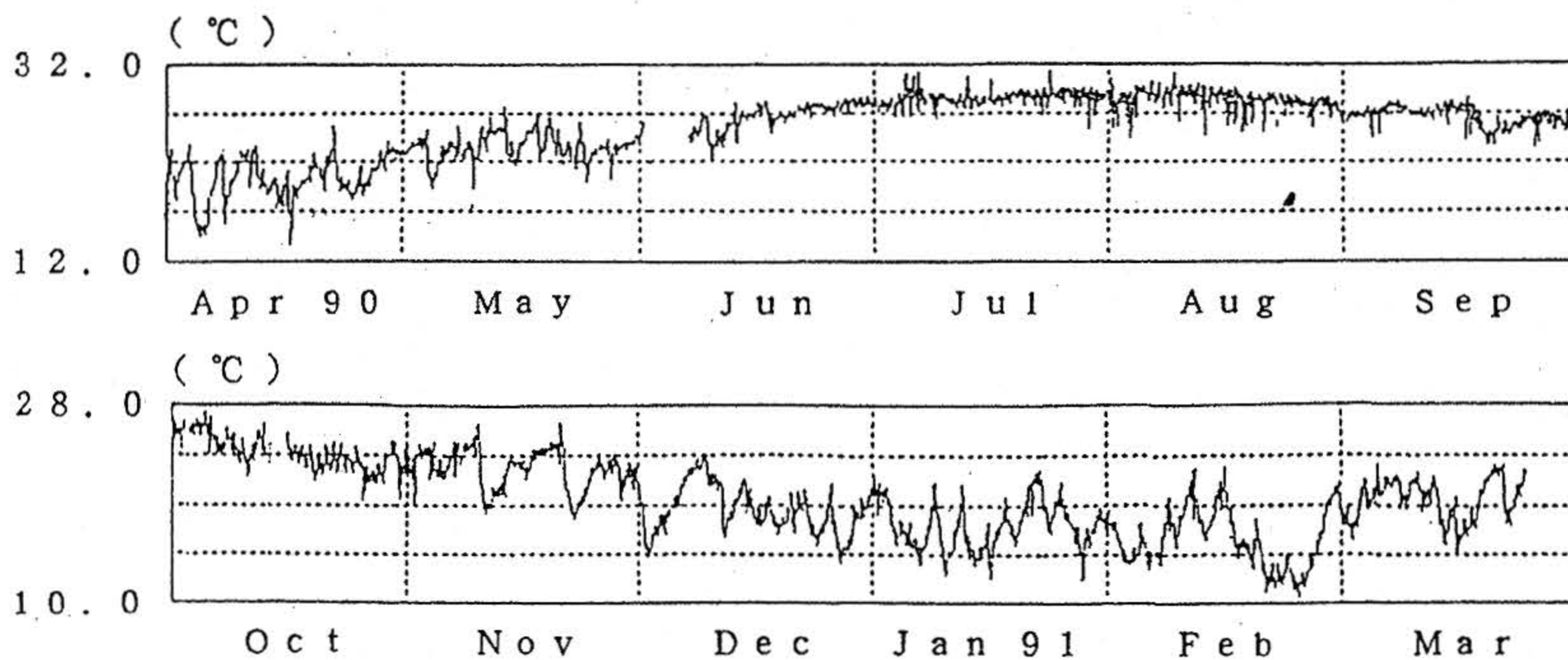


図 6 気温
Fig. 6 Temperature

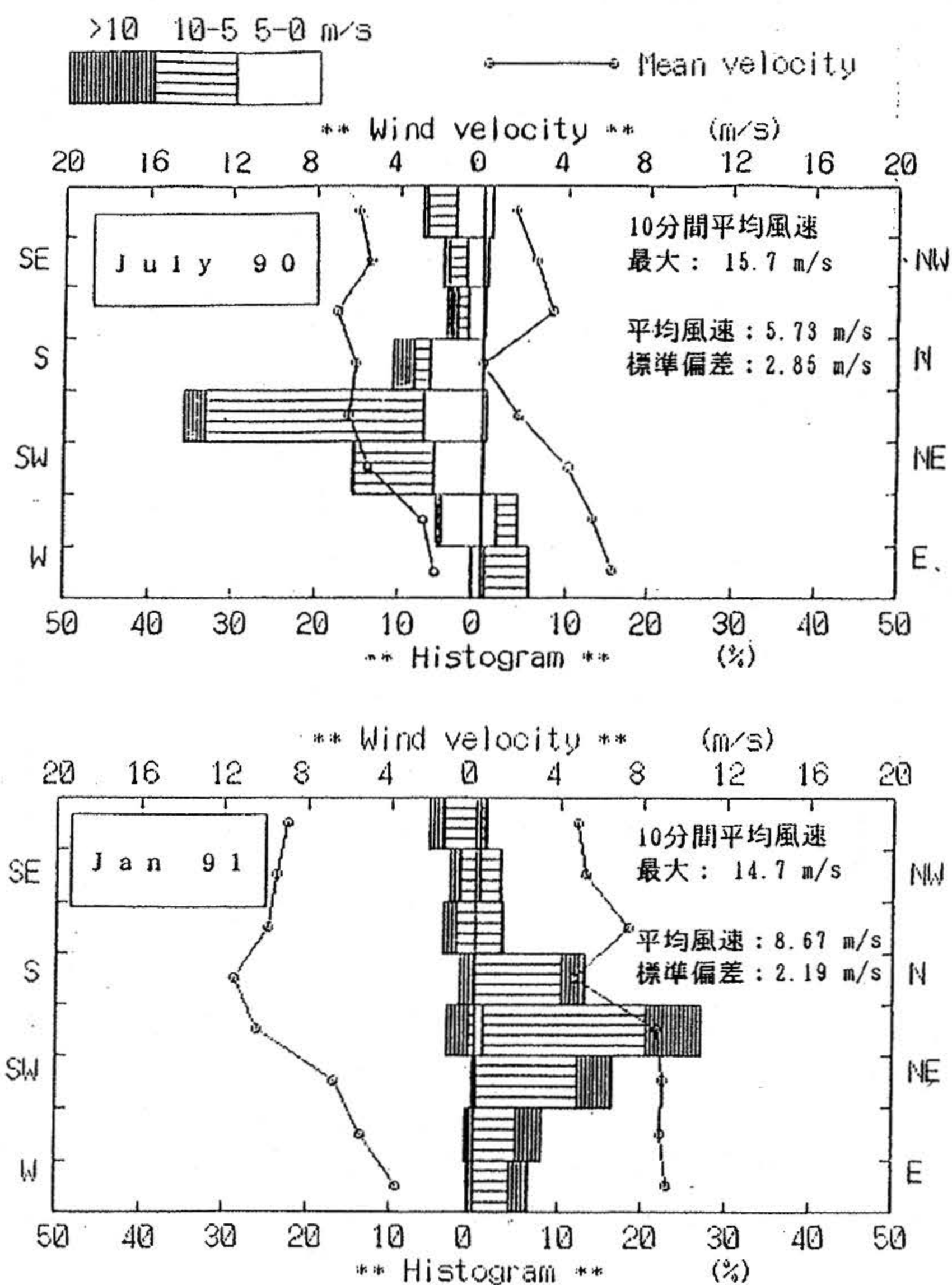


図 7 夏(7月)と冬(1月)の風向風速分布
Fig. 7 Wind distribution in summer (July) and winter (January)

3 人工ノル周辺の環境条件

サンゴの移植場所である人工ノル周辺で自然環境条件を連続的に観測した。

3.1 気象観測

3.1.1 気温

気象要素として気温・湿度・気圧及び風向・風速を観測した。図6に観測ステーションにおける気温の変化を示す。気温は1月～2月に最低となり、2月末には11℃程度まで低下して、人工ノルにおける同時期の水温低下を招いた。他方、7月には29℃を超えている。7月上旬には32℃近くまで上昇し、このため最高水温も31℃を超えて移植サンゴを死亡させる原因となった。

3.1.2 風

図7に夏（7月）と冬（1月）の階級別風速・方向分布及び方向別月間平均風速を示す。この海

域では、6月～7月に南風が卓越し、冬期に向かうにつれて風向は反時計回りに変化していき、12月～5月までは北東風が卓越する。年間を通じた10分間の平均風速の最大は9月に28.7m/sとなったが、台風19号の通過に伴うものであり、このときには最大風速60m/secが観測された。

3.1.3 光量子

図8に観測ステーションで計測した観測日毎の総光量子日量及び各月における1日当りの平均光量子日量を示す。1月には7月の33%程度の日射量しかなく、サンゴに共生する褐虫藻の光合成活動が低下するため、サンゴの成長速度も低下することが予想される。他方、平成2年の7月は平年より15%も光量子日量が増大しており、水温上昇の原因となっている。

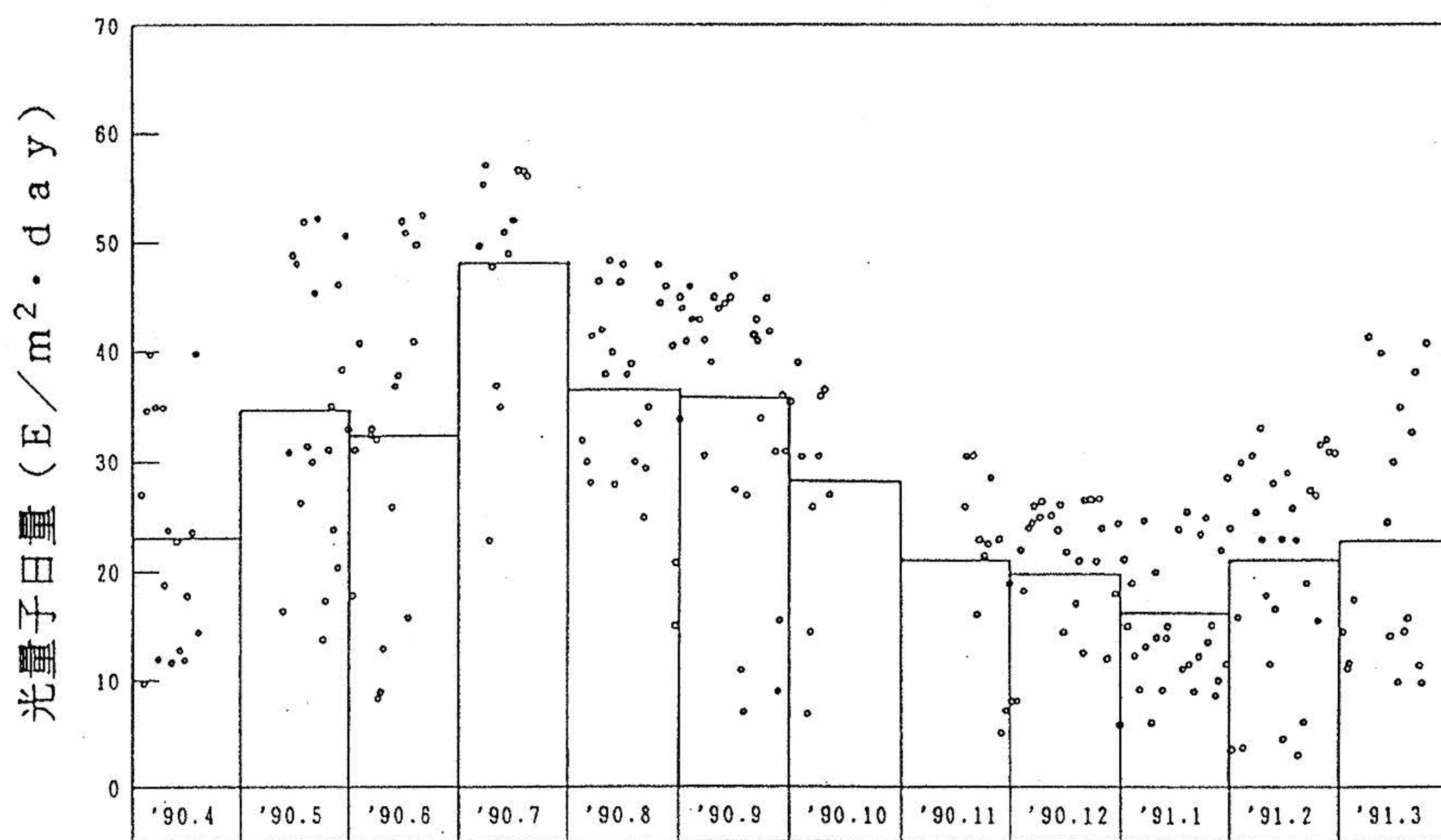


図8 光量子の日量および月平均日量

Fig. 8 Daily changes of incident quantum and monthly mean

3.2 海水環境

3.2.1 水温

水温は現場設置型でデータを自動計測・収録する離合社製のRMT水温計を用いて観測した。図9に人工ノルの中段、下段及び人工ノル近傍の海底で観測された水温の月変化を示す。7月、8月の夏期には水温が30℃にも達しており、とくに7月下旬には31℃を超えている。1月～2月の冬期には水温が20℃以下になる日が多く、造礁サンゴの生育限界とされる18℃以下となる日も観測されている。夏期と冬期に移植サンゴが比較的に多く死亡しているのは、この水温上昇と水温低下がかなり影響していると考えられる。

3.2.2 水中光量子

共生藻による光合成はその深度における水中光量子に比例することが期待されるが、水中に入射した光は深度の増加に従い急激に減少し、また海象や海水の濁度によっても減少する。図10に観測ステーションで計測した空中光量子と人工ノルで計測した水中光量子の相関を示す。光量子の減衰率は海水の環境条件により大きく変化するためバラツキは大きい。人工ノル中段（海底上2m、平均水深3.3m）で約50%、海底上0.5m（平均水深4.8m）の深度で約40%にまで減衰している。水中光量子量の減衰は特に波浪や流速が増加して、

海底の底質が巻上げられるために生じる濁度の増加により大きく影響を受ける。人工ノルで観測された濁度の変化によると、夏期に濁度が高くなることを示している。

夏期間の濁度の増加及び冬期間の日射量の低下等による光環境の悪化は、サンゴの成長に対する阻害要因であったと考えられる。

3.2.3 海水流動

人工ノルはリーフ内のサンゴ礁池に設置されている。そのためリーフの水路に見られるような大きな流速は観測されない。人工ノル付近の流速は約80～90%が5cm/s以下であり、最大でも30cm/s程度であった。流向は春から夏にかけては北～東方向への流れが多く、秋から冬にかけては南西～東方向への流れが多くなる。

恒流の向きは変動する流れの向きにほぼ一致しているが、比較的に長期間ほぼ一定の向きに流れる傾向がみられる。秋季の恒流は20～40m/hであり、冬期には70～80m/hに増大する。ところが、5月末には17m/h、7月末～8月初は2m/h弱まで低下する。このことから気温が上昇する夏期に、海水流動が停滞し、周辺海水との交換がなくなるため、滞留する海水の温度が上昇して移植サンゴが死亡している原因となっている。

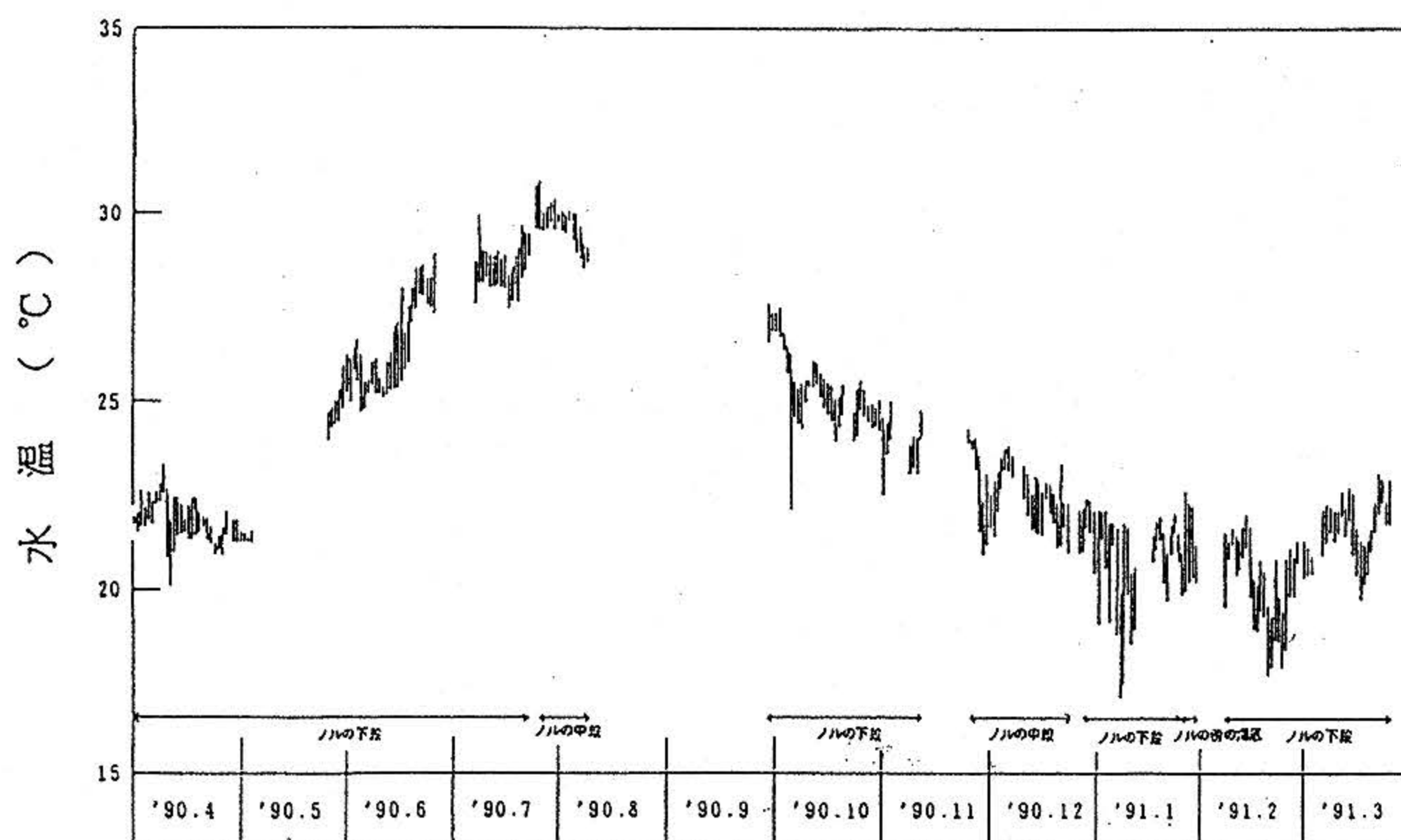


図9 人工ノルにおける水温日変化（日最大－日最小）

Fig. 9 Daily changes of water temperature at the Artificial knoll

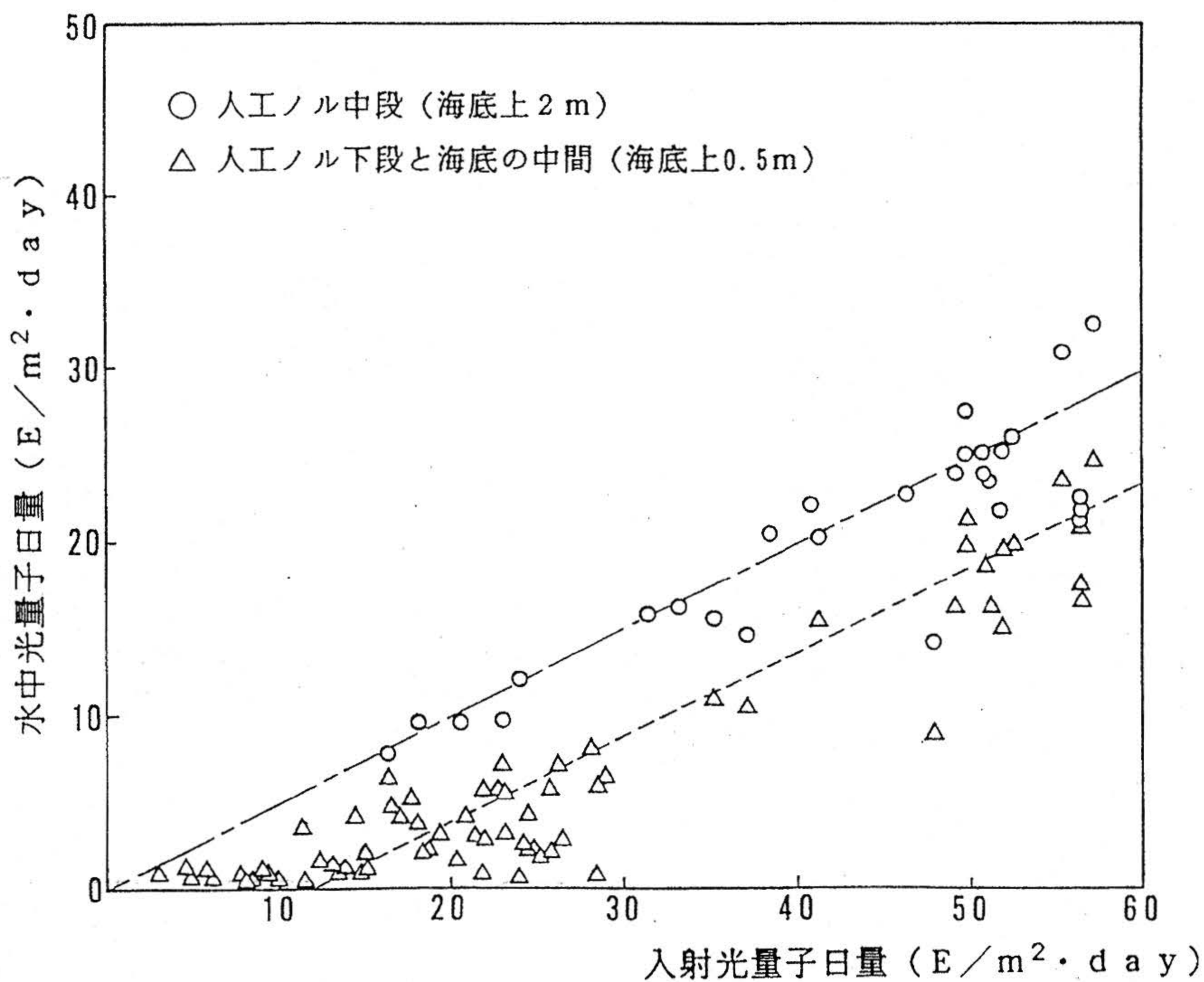


図 10 人工ノルにおける水中光量子日量と入射光量子日量の相関
 Fig. 10 Underwater quantum on the Artificial knoll vs. incident quantum

4 サンゴの成長速度

4.1 サンゴ海中重量法の利点

移植サンゴの成長速度は定期観測時の写真記録から推定することができる。例えば、上段に移植したトゲスギミドリイシでは、移植時に長径 8.9 cm, 短径 4.3 cm であったものが、16 ヶ月後に長径 22 cm, 短径 20 cm に成長しており、平均寸法で 3.4 倍成長している。この場合、年平均成長率は 7 ~ 8 cm/年となっており、成長の速いミドリイシ類では妥当な成長速度である。また、成長が比較的遅いイボハダハナヤサイサンゴでは、平均成長率 1.6 cm/年となっている。しかし、外形寸法による成長速度の推定は、困難な割には精度が低いものである。

サンゴの石灰化速度を研究する手法として、サンゴ骨格の重量を計測することが考えられる。サンゴ骨格の成長速度を種々の環境条件と対応させるためには、サンゴを生きたままで連続して計量する必要がある。また、計量間隔を短くし、しかも計量に伴う運搬作業などによってサンゴに与えるストレスを極力少なくするためには、現場の海中で計測できることが望ましい。この研究では、サンゴの海中重量計を開発し、移植サンゴの成長速度計測に応用した。

サンゴの海中重量を計測する利点は以下のとおりである⁵⁾。

- ①サンゴの骨格は炭酸カルシウムからできており、この結晶はアラレ石型である。これを直接計測するので、多孔質骨格中に含まれる海水量、組織や粘液の量、骨格内外に共生する生物量に影響されない。
- ②サンゴのサンプルを海中から取出す必要がないので、サンゴに与えるダメージやストレスを最小限に抑えられ、また同一サンプルを繰り返し成長計測できる。
- ③この計測法の感度では、短期間(12時間以下)の重量変化を検出することが可能である。
- ④この方法は、実験室において精密に計測できるばかりでなく、フィールドに応用でき、迅速かつ簡易に計測可能となる。
- ⑤この方法では、サンゴの寸法や形状にとらわれないので、サンゴの石灰化速度を計測できる。

4.2 サンゴの海中重量と骨格重量

サンゴの海中重量を計測することにより、サンゴ骨格の乾燥重量を次式で推定することができる。

$$W_d = \frac{\gamma_a}{\gamma_a - \gamma_w} W_o \quad \text{..... (1)}$$

W_o : サンゴのサンプルの海中重量 [g]

W_d : サンゴ骨格の乾燥重量(推定値) [g]

γ_w : 海水の比重

γ_a : 2.93: 造礁サンゴ骨格の比重

(アラレ石型)⁶⁾

なお、サンゴの海中重量から骨格重量を推定する場合には以下の誤差要因が考えられる。

- ①骨格の結晶型: 他の化学組成や結晶型も少し含まれている。
- ②内在性動物群: サンゴに共生する動物群は大部分が中性浮力の組織から成り、サンゴの海中重量には影響しないと考えられるが、多少の誤差はある。
- ③多孔性骨格: 多孔性骨格の空隙に空気が入っていると水中重量は小さくなる。また、空隙に水が閉じこめられると乾燥重量は大きくなる。
- ④サンゴの組織: 生きているサンゴの組織や粘液は海水とほとんど同密度である。

水中重量法のモデルを検証するため、サンゴの生育形や群体形の異なる種々のサンゴについて、いろいろな大きさのサンプルをつくり、水中重量と乾燥重量を計測し、両者の相関を比較検証した。

サンゴ骨格重量の推定値と測定値との相関を図 11 に示す。相関係数は $r^2 = 0.9991$ で、乾燥重量は推定値より約 2.5% 大きくなることがわかる。回帰直線は次式で表わされる。

$$W_d = 1.0249 W_o - 0.0220 \quad \text{..... (2)}$$

W_d : サンゴ骨格重量 [g]

4.3 移植サンゴの骨格成長量

サンゴを人工ノルに移植し、サンゴ骨格の成長量を計測した。トゲスギミドリイシ *Acropora nobilis* をいろいろな基盤に固定して人工ノルに移植し、期末に生きているものの水中重量を計測

して骨格重量を推定し、この間の増加重量及び月平均重量増加率をまとめて表2に示す。また、初期重量と月平均重量増加率との相関を図12に示す。

サンゴ群体形状は非常に複雑であるが、成長量は光を受ける面積、あるいはサンゴ種に固有の代表長さの2乗に比例すると考えて良い。また骨格重量は体積すなわち代表長さの3乗に比例する。

$$\Delta W_m \propto \ell^2$$

$$W_d \propto \ell^3$$

ただし、

W_m : 月平均重量増加率 [g/月]

W_d : 骨格重量 [g]

ℓ : 代表長さ [cm]

これから、

$$\Delta W_m = a (W_d)^{2/3}$$

という関係が成立することが期待されるので、最小自乗法により月平均増加係数 a [g^{1/3}/月] を推定した。表2に移植基盤毎及び全体の値を示し、図12にサンプル全体の回帰曲線を示す。サ

ンゴ骨格の重量増加が初期重量の2/3乗に比例することは、おおむね妥当な推定であることが分かる。人工ノルに比べて天然礁の係数は大きくなっており、天然礁の方がサンゴの成育にとって良好であることと対応している。このことから、月平均増加係数は多くのサンゴ種の成長や環境が、サンゴの成育に及ぼす影響を定量する指標として利用できる可能性が示唆された。

同じ方法でサンゴ種別の成長度を計測した結果によると、ミドリイシ類は比較的成長が速く、アザミサンゴやハナヤサイサンゴの成長は遅いことが分かった。イボハダハナヤサイサンゴについては人工ノルでは天然礁の1/3の成長度になっていた。このサンゴは人工ノルにおいて生存率が低くなっているが、環境条件が悪くなったために、成長度が大幅に低下したことと対応しているようにみえる。

今回の計測例は冬季に集中したため、成長率や生存率は低くなっているが、通年の実験により、成長係数のデータベースを構築したり、サンゴによりCO₂固定速度の評価に利用できることが期待できる。

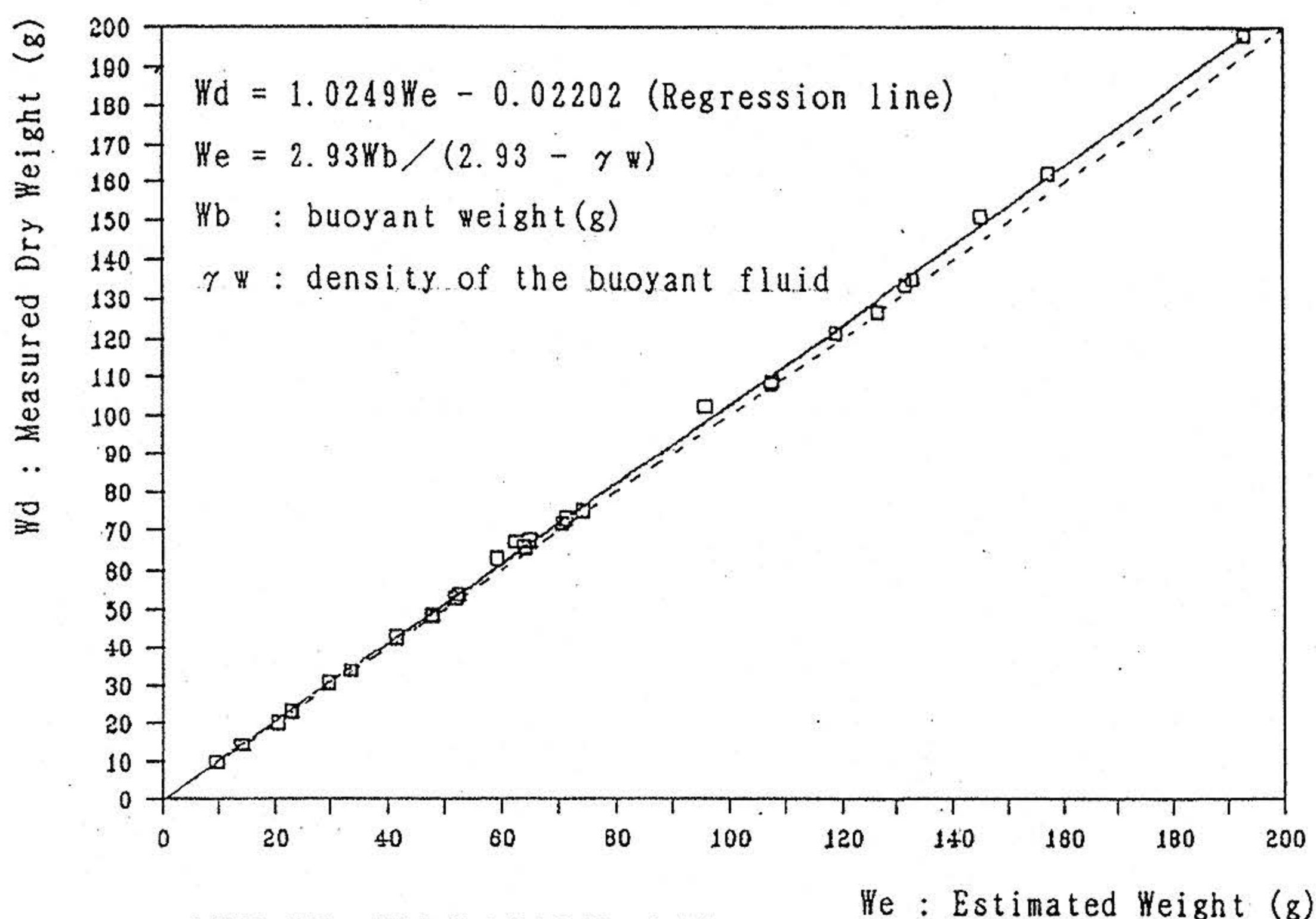


図11 サンゴ骨格重量の推定値と測定値の相関

Fig. 11 Measured dry weight (Wd) of corals vs. weight (We) estimated on buoyant weight (Wb)

表 2 人工ノル移植サンゴ（トゲスギミドリイシ）の重量増加
Table 2 Weight increase of transplanted coral (*Acropora nobilis*)

移植基盤	移植期間	初期重量 [g]	期末重量 [g]	増加重量 [g]	月平均重量 増加率[g/月]	月平均 増加係数
アクリル板	11/10/90～ 3/ 8/91	30.820	35.673	4.853	1.223	0.1864
	11/10/90～ 3/ 8/91	53.980	67.178	13.198	3.355	
	11/10/90～ 3/ 8/91	76.321	95.688	19.367	4.924	
	11/10/90～ 3/ 8/91	87.308	93.198	5.890	1.497	
P-タイル板	11/10/90～ 3/ 8/91	60.886	65.879	4.994	1.270	0.0820
亜鉛メッキ板	11/10/90～ 3/ 8/91	110.367	128.818	18.450	4.691	0.1770
	11/10/90～ 3/ 9/91	62.254	71.472	9.218	2.324	
アルミ板	11/13/90～ 3/ 9/91	174.970	191.999	17.029	4.481	0.1433
浴槽タイル板	11/13/90～ 3/ 8/91	43.062	46.564	3.503	0.914	0.1042
	11/13/90～ 3/ 8/91	80.325	86.626	6.301	1.644	
	11/13/90～ 2/15/91	36.253	41.182	4.929	1.573	
人工ノル (直接)	1/11/91～ 3/ 8/91	184.503	192.450	7.947	4.257	0.1493
	1/11/91～ 2/15/91	200.692	207.775	7.084	6.072	
	1/11/91～ 3/ 9/91	85.654	90.721	5.066	2.667	
天然礁 (参考)	1/11/91～ 2/15/91	122.566	128.620	6.054	5.189	0.2048
	1/11/91～ 3/ 9/91	74.675	81.388	6.713	3.533	
全体平均						0.1622

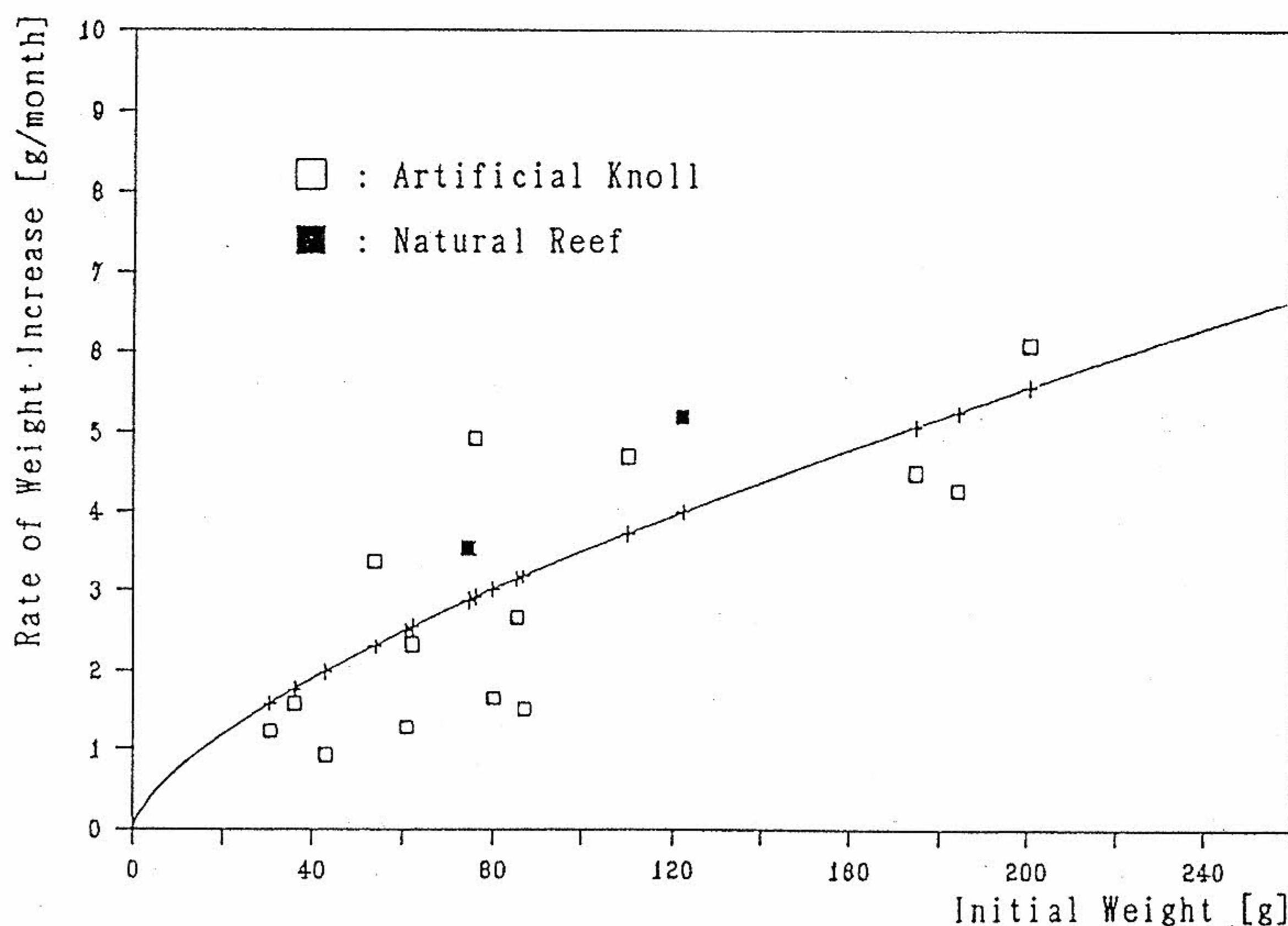


図 12 移植サンゴ（トゲスギミドリイシ）の月平均重量増加率

Fig. 12 Mean rate of weight increase per month of transplanted coral (*Acropora nobilis*)

5 おわりに

サンゴ移植の実験により、人工移植基盤がサンゴ礁回復の技術的に可能な手段であることを実証し、目的や環境条件に応じて人工移植基盤を設計する技術資料及びその環境に適したサンゴ種などに関し基礎的知見を得ることができた。

沖縄県との地域共同研究「サンゴ礁造園技術の研究開発」は平成2年3月に終了した。本稿では移植サンゴの生存率や成長率について調査研究成果を報告したが、本研究開発の成果の概要を紹介する。

5.1 サンゴ礁造園モデル地区の海域調査

5.1.1 サンゴ礁海域の海水環境調査

(1) サンゴ礁海域の海水流動特性調査

サンゴ礁造園モデル海域及び周辺海域における流向・流速測定により、海水流動や海水交換を調査した。この海域の濁度はサンゴの生育を阻害するまでにはなっていないが、中城湾主要部に蓄積された淡水が顕著な降雨や台風によってもって人工ノル付近まで底層水となって寄せてくるようである。これには顕著な量の懸濁物質が含まれていると考えられるが、台風が去るとともに湾外に排出されるようである。

(2) サンゴ礁海域の化学的環境条件調査

人工ノル設置地点及びサンゴ礁造園モデル海域の生サンゴ高被度域において、海水をサンプリングして水質分析を行った。栄養塩類はいずれも低濃度であり、沖縄周辺海域の一般的特性を示していた。人工ノル周辺海域を含め、表面海水の水質環境に有意差がみられないのは、この海域の海水交換が比較的速やかに行われていることによると考えられる。さらにサンゴ礁は亜熱帯海域に位置しながら基礎生産力が高く、炭酸塩堆積物の形成の場となっているので、サンゴの代謝過程に関する調査手法を検討した。

5.1.2 サンゴ礁海域の生態系調査

サンゴ礁造園モデル海域においてサンゴの生育状況を調査した。この調査はマンタボード法により、多数地点で概査し、その成果に基づき高被度域について精査した。タカビシ、ナカビシ、ヒラビシ、久高島の太平洋側礁斜面は生サンゴの高被

度域であり、造礁サンゴ類は64種が数えられた。

5.2 サンゴ繁殖の好適環境形成技術に関する調査研究

5.2.1 サンゴの無性生殖による移植技術の調査研究

移植サンゴの成長度を定量的に評価するために、アリザリンレッドにより染色したサンゴを人工ノルに移植して成長率を測定した。また、このような手法ではサンゴの概略成長度しか把握できないので、サンゴの海水中重量から石灰化を計測する手法を開発した。海水中重量を計量するためのサンゴ移植期間が冬季の短期間であったため、成長量は小さかったが、基盤材質、サンゴ種類別、移植地別に有意な差が得られ、この手法の実用性を実証した。

5.2.2 光制御による移植技術の調査研究

人工ノル各基盤上における水中光量子を測定し、サンゴの成長と光環境の関係について調査した。光環境の変化は、季節的な日射量の変化によるものの以外に、海底堆積物の攪乱及び海水中プランクトンによる海水の懸濁度の変化によるものがあるので、海水の懸濁度、波・流れ等海水の流動特性及び海水中の植物プランクトンの変化の関係について調査した。

5.3 人工サンゴ礁構築技術の研究開発

5.3.1 人工サンゴ礁形成技術の研究開発

(1) サンゴの有性生殖に関する調査研究

人工ノル周辺海域に表面形状・材質の異なる基盤を設置してプラヌラ着生率について比較調査した。人工ノルの基盤にはハナヤサイサンゴ等が着生し、順調に生育していることを確認した。

(2) 移植サンゴの生育度調査

平成元年9月に、人工ノルの設置場所は、水温が冬季には20℃以下、夏季には31℃以上となり、また風浪によってセジメントが巻き上げられるなど、サンゴの生育環境として好ましいとはいえない。移植後約1年半で全体の生存率は60%であるが、しかし環境の良い上段面で80%以上となっており、人工ノルが有効な移植基盤であることを実証した。

最後になりましたが、本研究開発を進めるにあ

たりご協力いただいた多数の方々に心から感謝いたします。とくに、サンゴ礁造園技術研究会でご意見をいただいた琉球大学教授 氏家 宏座長をはじめとする各委員の方々、さらに、沖縄県企画調整室の方々に深くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 山里清：サンゴの生物学，UP バイオロジーシリーズ 87，東京大学出版会（1991）
- 2) 茅根創：地球規模の CO₂ 循環におけるサンゴ礁の役割，地質ニュース，436号（1990）
- 3) 工藤君明・本多牧生：沖縄本島周辺サンゴ礁の現状調査，海洋科学技術センター試験研究報告，JAMSTECR 21（1989）

- 4) 工藤君明：サンゴ礁造園技術，JAMSTEC，第3巻第2号（1991）
- 5) P.L.Jokiel, J.E.Maragos and L.Franzisket：Coral growth：bouyant weight technique, Coral reefs：research methods, UNESCO（1978）
- 6) 大森保・渡久山章・大出茂：サンゴ礁の化学—水と炭酸塩鉱物からみたサンゴ礁—，沖縄のサンゴ礁，（財）沖縄県環境科学検査センター（1988）

（原稿受理：1992年1月17日）