

バリ島・クタ海岸におけるサンゴ移植・増殖の適用性に関する検討

Experimental coral transplantation in the moat of Kuta beach, Bali Island, Indonesia

遠藤秀文¹・ラフマディ プラセティオ²・西平守孝³・大中 晋⁴

Shubun ENDO, Rahmadi Prasetyo, Moritaka NISHIHARA, Susumu ONAKA

In a search for suitable coral species and fixing methods in coral transplantation and to elucidate environmental factors affecting survival and growth of corals, we conducted experimental transplantations in the moat (shallow lagoon) of Kuta beach, Bali. On 20 limestone substrates set in the moat, we transplanted each 40 pieces of 10 species of corals. Coral pieces were fixed using either a spring or a cable tie. Corals used for experiments consisted of *Acropora* (4 spp.), *Montipora* (3 spp.), *Hydnophora* (1 sp.), *Galaxea* (1 sp.) and *Pocillopora* (1 sp.). These corals were obtained from a coral farm in Bali. Corals were transplanted on substrates, and underwater working time was also measured. Monitoring for more than 2 years was continued intermittently for coral survival, growth, effect of environmental factors on the survival, etc.

1. はじめに

無性生殖を活かしたサンゴ移植についてはこれまで多くの研究がされているが、遠藤ら (2006) はインドネシア国バリ島のクタ海岸において、長期間のモニタリングに基づき、サンゴの種類や固定方法の違いが、移植したサンゴの再固着や残存率および成長率に及ぼす影響について定量的に示した (第1回移植試験)。ここでは、ミドリイシ属が他の種に比べて再固着や成長速度が速いこと、残存率の高い固定方法 (ワイヤースプリング・2点固定) の把握、またサンゴの白化およびその回復について定量的に示した。しかし、今後の広域を対象としたサンゴ移植を考える上で、水中作業時間の短縮および移植に必要なドナー・サンゴの確保が更なる課題点として挙げられた。

そこで、本研究では、2年以上にわたるモニタリングを実施することにより、ドナーサンゴとして近隣のサンゴ養殖場より調達した色彩や形状の異なるサンゴを用いた場合のサンゴ移植・増殖の適用性を調べた。さらに第1回目移植試験で良好な結果が得られた固定方法に加えて、更なる利便性、経済性の向上を目的とした固定方法を用いた場合の水中作業性および移植サンゴの定着率の比較検討を行った。

本研究は、養殖サンゴの移植ドナーとしての適用性を確認すると共に、水中での作業性や移植後の再固着・残存率のモニタリングを行って、確実性の高い移植方法に

ついて把握することを目的とする。

2. 調査の概要

(1) 調査場所

調査地点を図-1に示す。この場所は、沿岸方向約2.5kmおよび岸沖方向0.5km~1.3kmのエリアを有するクタの礁池内のほぼ中央で、実験用の基盤石の設置に十分な水深を有し、比較的波および流れの強い場所を選定した。サンゴ移植用の基盤 (写真-1) として当地の波浪に耐えうる約600kg (H=50~80cm) の石灰岩の自然石基盤 (以下、基盤と記す) を図-1に示すように、汀線と平行に10個ずつ2列、計20個設置した。本論文では沖側および岸側の列をそれぞれL1およびL2とし、空港側より基盤番号を1~10とする。基盤同士の間隔は、モニタリングや作業船の係留等を考慮し、3~5m程度とした。基盤設置場所の平均水深はLWL-1.0~-1.5mであり、基盤表面は干潮時においても干出ししない。なお、高潮時における各地点の平均波高は約0.8m、平均流速は約0.2m/sである。

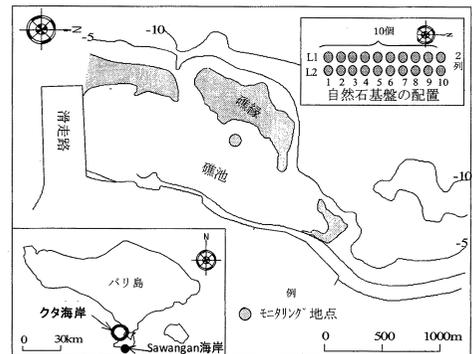


図-1 実験地点および基盤設置位置 (20個)

- | | |
|-------|---------------------|
| 1 正会員 | 双葉測量設計(株), 元日本工営(株) |
| 2 | 日本工営(株)バリ海岸保全開発事務所 |
| 3 | 理博 名城大学教授 総合研究所 |
| 4 正会員 | 修(工) 日本工営(株)港湾・空港部 |

(2) 移植準備

予め陸上において、基盤表面に固定用釘を挿入するための穴を搾孔した。1基盤当たり上面および側面それぞれ20箇所搾孔した。φ3.2mmのハンドドリルを用いて斜め方向に深さ約3cm搾孔し、孔の間隔は5cm程度とした。また、搾孔箇所は基盤の運搬中に砂などが詰まらないようにボンドで塞ぎ、さらに水中で孔の箇所を容易に確認できるようボンド上にペイントした。

移植試験に用いるサンゴは、バリ島の最南端のSawangan海岸にあるサンゴ養殖場より調達した。表-1に示す色彩や形状の異なる10種類のサンゴを選定し、それらをクッション材と氷を敷き詰めた発泡スチロール内に保管し、クタ海岸まで陸上輸送した。養殖場からクタ海岸までの輸送距離は約20km、輸送時間は約30分である。クタ海岸到着後、発泡スチロールをボートに移し、予めクタ海岸の礁池に設置した鉄筋とワイヤーメッシュで組んだ架台(L=2.0m, W=1.0m, H=0.5m)まで海上輸送し、サンゴ群体を架台上に固定して、約24時間の順化期間を設けた(写真-1)。なお、架台は、LWL-0.8m程度の場所に設置した。



写真-1 移植直後



写真-2 サンゴ群体の架台

表-1 移植サンゴの概要

No	サンゴ種	基盤No.	移植サンゴ片	
			片数	サイズ(cm)
1	<i>Acropora tenuis</i>	L1-3, L2-4	40	6.0
2	<i>Acropora parilis</i>	L1-5, L2-3	40	6.0
3	<i>Hydnophora rigida</i>	L1-6, L2-7	40	5.0
4	<i>Montipora digitata</i>	L1-8, L2-10	40	4.0
5	<i>Montipora cactus</i>	L1-4, L2-5	40	6.0
6	<i>Acropora millepora</i>	L1-9, L2-8	40	4.0
7	<i>Galaxea fascicularis</i>	L1-10, L2-2	40	3.5
8	<i>Montipora aequituberculata</i>	L1-7, L2-6	40	4.5
9	<i>Acropora valida</i>	L1-2, L2-9	40	3.5
10	<i>Pocillopora verrucosa</i>	L1-1, L2-1	40	4.0

約24時間の順化期間後、サンゴ群集をタガネや剪定用はさみを用いて、ダメージを最小にしつつ、サンゴ片当たり3.5~6.0cmの大きさに揃えて切断した。準備したサンゴ片は、移植地点に輸送した後、約24時間順化させた。サンゴ種、基盤番号、サンゴ片数、サンゴ片のサイズは、表-1に示すとおりである。

(3) 移植作業

サンゴ片の移植は以下の手順で実施した。

- 水中でφ3.5mmのコンクリート釘(L=5cm)を搾孔した箇所に抜けないようにハンマーで打ち込み、釘頭部の突出が20mm程度になるようにした。
- 基盤の移植箇所に付着している藻や砂などをワイヤーブラシで取り除いた。
- 固定方法は第1回移植試験で良好な残存率(80%以上)を示したワイヤースプリング・2点固定(写真-3)および水中での容易かつ強固な固定が可能な結束バンド(写真-4)を用いた。
- 対の釘の片方にワイヤースプリングまたは結束バンド(固定材料)をかけ、釘の間にサンゴ片を横に寝かし、もう片方の釘に固定材料をかけ、サンゴ片の軟体部が直接基盤に接触して動かないように固定した。

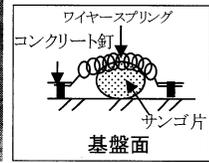


写真-3 ワイヤースプリング・2点固定

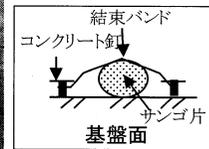


写真-4 結束バンド・2点固定

(4) 移植後のモニタリング

移植は、2004年9月24日に開始し、サンゴ移植後10日、1ヶ月、2ヶ月、3ヶ月、6ヶ月、9ヶ月、12ヶ月、18ヶ月および24ヶ月目にモニタリング調査を実施した。モニタリングの項目は、1) 基盤上面・側面および各々のサンゴ片の写真記録、2) 各サンゴ群体の最大幅および最大高の測定、3) サンゴ片の基盤への再固着、生存状況、4) サンゴ群体の切断後の回復状況等である。また、クタの礁池の6地点に自記式水温計を設置し、水温の毎時連続観測を行った。

3. 作業計画を策定する上でのデータ取得

(1) 養殖サンゴ群体から採取可能なサンゴ片

表-2にサンゴ種毎に使用した群体数、各サンゴ種から採取したサンゴ片数より、1群体から採取可能な平均のサンゴ片数の算出結果を示す。なお、実際の移植試験に使用したサンゴ片は各サンゴ種で40片であるが、予備の

サンゴ片として20~40片確保した。

これらより、1群体から得られた平均のサンゴ片数は、最多の *Acropora parilis* で30片、最少の *Montipora aequituberculata* で4片程度と種によって大きく異なった。特に、樹枝状のサンゴ種の群体から、多くのサンゴ片の入手が可能であることが分かった。

表-2 サンゴ群体から採取可能なサンゴ片

サンゴ種	使用した群体数	サンゴ片数	
		移植サンゴ片数	1群体当たり片数
<i>Acropora tenuis</i>	4	90	22.5
<i>Acropora parilis</i>	3	90	30.0
<i>Hydnophora rigida</i>	7	90	12.9
<i>Montipora digitata</i>	4	60	15.0
<i>Montipora cactus</i>	7	90	12.9
<i>Acropora millepora</i>	10	60	6.0
<i>Galaxea fascicularis</i>	10	60	6.0
<i>Montipora aequituberculata</i>	14	60	4.3
<i>Acropora valida</i>	5	60	12.0
<i>Pocillopora verrucosa</i>	3	60	20.0

なお、バリ島の養殖場におけるサンゴ群体（約55種類）の価格は、2006年時点で Rp.41,250~75,000（1円=Rp.70~80）である。ミドリイシ属の価格は Rp.41,250~45,000と比較的安価であった。これより、*Acropora parilis* や *Acropora tenuis* の移植用サンゴ片の単価は、Rp.1,375 および Rp.1,833（1円=Rp.75とすると、18~24円/片）である。試験に使用したサンゴ片の単価が最も高いのは *Montipora aequituberculata* で、Rp.54,000/4.3片 = Rp.12,558（約167円）/片であった。

(2) 固定方法および固定時間

潮位条件および固定材料の違いによる固定時間を把握するため、平均潮位（MSL）および低潮位（LWL）におけるワイヤースプリング（WS）および結束バンド（TB）を使用した際の固定時間を測定した（表-3）。ここで、サンゴ片の固定は水中作業に慣れた6人のダイバーによって行われ、固定作業は、1）基盤表面の清掃、2）固定材料によるサンゴ片の固定、3）固定材料の余り部分の切断・回収の大きく3つからなる。その結果、サンゴ片の平均の固定時間はLWL時においてWSで39秒、TBで29秒、MSL時においてWSで53秒、TBで47秒であった。これより、WSはペンチでワイヤーを釘に巻き付ける作業で時間を要する一方で、TBはバンドを釘に掛けて締め付け、余りの部分を切断するだけの容易な作業であるため、固定時間に差異が生じた。また、潮位条件による固定については、潮位が高くなるにつれて波や流れの外力の影響を受けるほど、水中での作業時間を要することが分かった。

表-3 水中でのサンゴ片の固定時間

潮位条件	固定材料	サンゴ片固定時間（片/秒）		
		平均	最短	最長
低潮位時（LWL）	WS	39	20	65
	TB	29	12	57
平均潮位時（MSL）	WS	53	42	72
	TB	47	30	66

備考 WS：ワイヤースプリング・2点固定、TB：結束バンド；

4. 移植後のサンゴ片の残存率および成長速度

固定法毎の残存率の変化を図-2に示す。なお、WSおよびTBの固定方法により、それぞれ200片のサンゴ片を固定した。WSおよびTBの残存率は移植後12ヶ月経過時点で共に89%、24ヶ月経過時点でWSが85%およびTBが83%と共に高い値を示した。また、WSおよびTBの残存率の値は、殆ど同じ推移を示したことから、固定材料の違いによる残存率に大きな差異はないといえる。

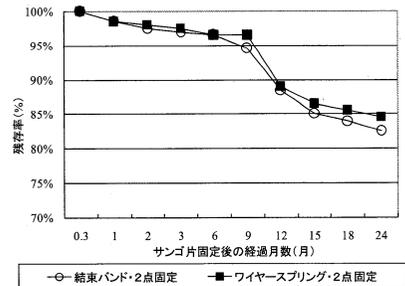


図-2 固定材料毎の残存率

固定法を区別せず残存していたサンゴの生存率、死亡率および脱落率を図-3に示す。その結果、生存率は、移植後3ヶ月経過までは99%と高い値を示したが、それ以降著しい低下を示し、移植後9ヶ月経過時点で56%まで低下した。それ以降の生存率には殆ど変化が見られず、24ヶ月経過時点での全体の生存率は52%であった。図-4に示すとおり海水温が2004年12月（移植後3ヶ月）~2005年3月（移植後6ヶ月）の期間で平均30℃を超え、2005年3月に最高33℃に達した。これより、高温水に対して脆弱なサンゴ種が高海水温期に殆ど死亡したと考えられる。

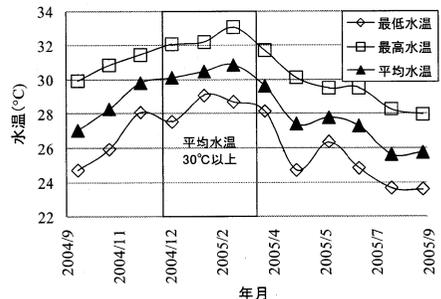


図-3 移植サンゴの生存率および脱落率

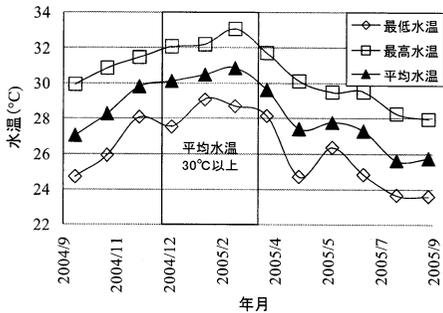


図-4 移植後1年間の水温変化

表-4は10種類のサンゴ種毎に移植後24ヶ月経過時点での生存率、脱落率および成長速度を取り纏めたものである。全10種のサンゴの内、6種類の生存率は68%~100%、その他4種の生存率は0~3%であった。*Acropora tenuis* および *Acropora parilis* の生存率は100%と全ての生存が確認された一方で、*Pocillopora verrucosa* の生存率は0%であった。これより、サンゴの種類によって生存率が大きく異なることが示された。脱落率については、*Pocillopora verrucosa* で35%と最大を示し、次いで *Montipora cactus* および *Montipora digitata* は20%を上回った。その他の種類は15%以下を示した。特に、4種類の樹枝状ミドリイシはいずれも脱落率が5~13%と低い値を示し、サンゴの固定材料および基盤への再固着の速度が関係していると考えられる。

表-4 移植サンゴの生存率および成長速度

サンゴ種	移植後24ヶ月 (%)			成長速度 (cm/年)	
	生存率	死亡率	脱落率	高さ	幅
<i>Acropora tenuis</i>	100	0	5	8.3	14.0
<i>Acropora parilis</i>	100	0	5	7.1	10.6
<i>Hydnophora rigida</i>	82	18	15	3.4	4.0
<i>Montipora digitata</i>	78	22	20	5.2	8.3
<i>Montipora cactus</i>	72	28	10	6.6	15.0
<i>Acropora millepora</i>	68	32	23	6.1	9.0
<i>Galaxea fascicularis</i>	3	97	8	— (死亡)	—
<i>Montipora aequituberculata</i>	3	97	8	— (死亡)	—
<i>Acropora valida</i>	3	97	13	— (死亡)	—
<i>Pocillopora verrucosa</i>	0	100	35	— (死亡)	—

成長速度の指標としては、移植した個々のサンゴ群体の最大高および最大幅を用いた。群体の最大高の変化は、*Acropora tenuis* で8.3cm/年、次いで *Acropora parilis* で7.1cm/年であった。最大幅の変化は、*Acropora millepora* で15.0cm/年、*Acropora tenuis* の14.0cm/年であった。特に、*Acropora tenuis* の成長は最大高、最大幅ともに著しく速く、移植後24ヶ月経過時点で基盤全面を覆うまでに至った。*Galaxea fascicularis* を含む4種類のサンゴはほぼ全て死亡し、成長速度を測定することができなかった。これらの結果から、樹枝状ミドリイシの成長速度は、最大幅、最大高とも、他のサンゴ種に比べ非常に速いことがわかる。*Acropora millepora* の成長速度を図-5に示す。

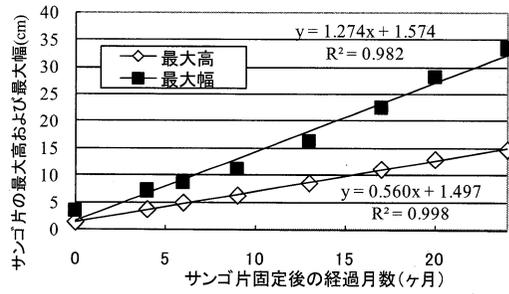


図-5 *Acropora millepora* の成長速度

L2-9に移植した *Acropora millepora* の成長過程を写真-5および写真-6に示す。移植後3ヶ月経過時点では、サンゴ片は完全に基盤に再固着し、既に鉛直方向および水平方向に成長している。移植後12ヶ月経過時点では、移植後約4cmのサンゴ片が、最大幅約16cm、最大高で約9cmに成長した。その後も順調に成長し、移植後24ヶ月経過時点で最大幅約33cm、最大高で約15cmに成長し、サンゴの周辺では様々な種類の魚介類が棲み込んでいることが確認された。

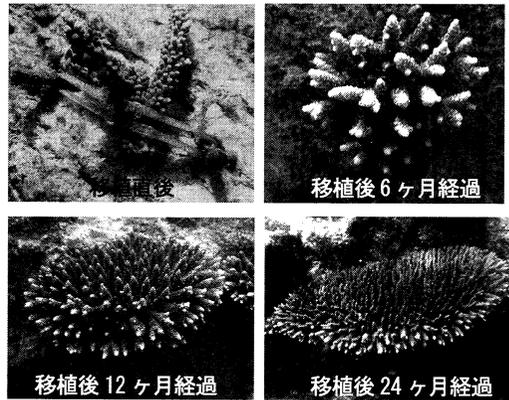


写真-5 *Acropora millepora* の成長過程

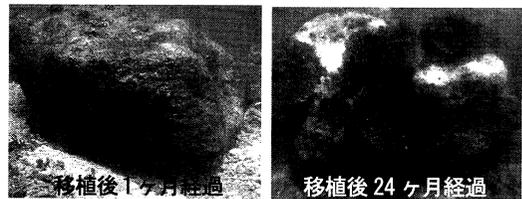


写真-6 *Acropora millepora* の成長過程 (L2-9)

L2-3に移植した *Acropora parilis* の24ヶ月後の状態を写真-7に示す。これらサンゴ片は、*Acropora millepora* と同様に著しく成長し、24ヶ月経過時点では、基盤表面の殆どを覆うまで成長している。

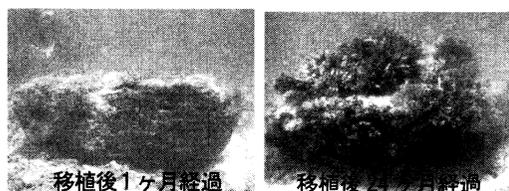


写真-7 *Acropora parilis*の成長過程 (L2-3)

5. 切断後のサンゴ群体の回復・成長状況

将来的に切断後のサンゴ群体が追加移植や維持管理などに使用できるかどうかを確認するために、架台上に固定した切断後のサンゴ群体 (*Acropora tenuis*) の回復状況をモニタリングした。回復状況を写真-8に示す。切断後10日経過の写真では、切断部に殆ど変化が見られない。切断後1ヶ月経過では、切断部の回復が見られるが、サンゴ群体自体の成長は殆ど無い。切断後3ヶ月では、切断部は完全に回復し、既に成長過程にあり、サンゴ群体の大きさは切断前と同程度まで達している。切断後12ヶ月経過では、サンゴ群体は、切断前の数倍のサイズに成長している。これらのことから、切断したサンゴ群体は、架台上に固定しておくことで、自然に回復・成長し、数ヶ月後にほぼ元の状態に戻ることが確認された。よって、切断後のサンゴ群体は、ある程度の期間固定し、移植のドナー・サンゴとして再利用できる可能性が示された。

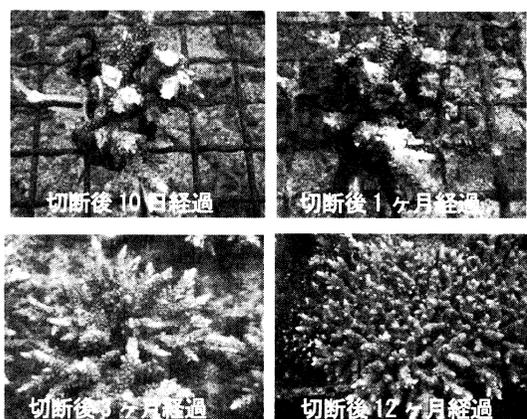


写真-8 *Acropora tenuis*の回復・成長過程

6. おわりに

本研究では主に以下の点を確認することができた。

- ① 1群体から採取可能なサンゴ片数は4~30と種によって大きく異なることが示された。
- ② 固定方法について、WS (ワイヤースプリング・2点

固定) および TB (結束バンド・2点固定) による2種類の方法で比較した結果、TBによる方法が、WSによる方法に比べて固定時間の大幅な短縮が図られ、水中作業性は良好であるといえる。なお移植サンゴの残存率については両者で顕著な差は生じなかった。

- ③ WSとTBの残存率は移植後24ヶ月経過時点で85%および83%と共に高い値を示し、両者で顕著な差は生じなかった。
- ④ 移植サンゴ片の生存率は移植後3ヶ月経過時点で99%と高い値を示したが、平均水温が30℃以上の高温期(約4ヶ月間)に生存率が著しく低下(56%)した。これより、サンゴ種の違いにより、特に高海水温に対する脆弱性に大きな違いがあることがわかった。
- ⑤ *Acropora tenuis*の成長は他のサンゴ種より速く、その成長速度は最大幅で14.0cm/年、最大高で8.3cm/年であった。他の5種類のサンゴについても成長速度を把握することが出来た。
- ⑥ サンゴ片採取のため切断されたサンゴ群体は、水中の架台上に固定しておくことで、自然に回復・成長することが確認され、移植用のドナー・サンゴとして再利用できる可能性を示した。

上記のように、移植後の生存率・脱落率のモニタリング結果に基づき、移植に適するサンゴ種を確認すると共に、水中作業効率や残存率の高い固定方法が示された。

前回の第1回目移植試験の結果も含め、実務的な広域でのサンゴの移植計画を策定する上で必要な基礎データが得られた。

謝辞：本研究の実施に際し、多くの意見を頂いたインドネシア国公共事業省ならびに野外実験に多大な支援を頂いた屋比久壮実氏、日本工営(株)バリ海岸保全事務所現地職員 Mr. Alis, Mr. Adri, 他に厚く謝意を表します。

参考文献

- 遠藤秀文・Rahmadi Prasetyo・西平守孝・大中晋(2006) サンゴの定着率に関する長期現地モニタリングおよびサンゴ移植の適用性の検討, 海岸工学論文集, 第53巻, pp.1196-1200
- 西平守孝(1996): 足場の生態学, 海遊舎, 東京, 269pp.
- 西平守孝(2006): 伸縮性素材を用いたサンゴ片の新たな固定方法, 名桜大学総合研究, pp.71-75
- 山下隆男・西平守孝・土屋義人・スワンディー(1996): サンゴの移植によるバリ島サヌール海岸の保全について, 海岸工学論文集, 第43巻, No. 21 (2), pp. 1281-1285.
- 宇多高明・大須賀 豊・遠藤秀文・芹沢真澄・三波俊郎・古池 鋼(2004): Bali 島の Kuta 海岸の侵食原因に関する考察, 海岸工学論文集, 第51巻, pp. 1376-1380.
- 大久保奈弥・大森 信(2001): 世界の造礁サンゴの移植レビュー, Galaxea, JCRS, No. 3, pp.31-40