

斜め入射重複波による直立堤前面の海底洗掘

栗山 善昭*・浅倉 弘敏**・藤田 誠***・入江 功****

1. ま え が き

我が国では、重複波領域の防波堤としてはほとんどの場合混成方式が採用されている。しかし、地盤が軟弱な場合には混成堤のような重力式を採用することは困難かつ不経済となり、矢板式や軟着底式構造の採用が有利となる。これらの構造方式は一般に混成堤のような捨石マウンドを有せず直立堤としての性格が強い。

重複波領域における直立堤前面の洗掘については、これまでに多くの実験がなされており、現地スケールにおいては重複波の腹で堆積、節で洗掘されていることが明らかにされている¹⁾。これによれば、直立堤前面は、重複波の腹の位置に当たるため洗掘の危険はないものと考えられる。しかし、斜め入射重複波の場合、入射角（堤体直角方向と波の進行方向とのなす角）が大きくなると腹の位置での洗掘が発生し、堤脚部が洗掘される可能性が示唆されている²⁾。そこで、本研究では波の入射角が大きい場合を中心として斜め入射重複波による防波堤前面の洗掘特性を一連の実験により調べた。

2. 実験方法および実験条件

実験は図-1に示す縦 7.5 m、横 14.4 m、高さ 0.3 m の平面水槽で行った。造波機の位置を固定し、防波堤の向きを変えることにより入射波の向きを変えた。防波堤としての長さ 3.0 m の木製の直立堤を用い、堤体底面を水槽の底面に接着した。堤体の長さはいずれの場合も 3.0 m で、これは、入射波の 3 波長程度である。

波の入射角 $\alpha=60^\circ$ の 1 ケースについては、固定床による底層平均流測定を行った。入射波高 3.0 cm、周期 0.57 s、水深 18.0 cm とした。

移動床実験は波の入射角 $\alpha=0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 52.5^\circ, 60^\circ$ の 5 ケースについて行った。L 型洗掘が発生するように¹⁾、入射波高 5.0 cm、周期 0.9 s の規則波および中央粒径 0.14 mm の底質、12.8 cm の水深を実験条件とした。

実験では、水平に敷きならした厚さ 8 cm の移動床に、波を 10 時間作用させて、その間の地形の変化を調べた。地形の測定は、波作用開始前、波作用 45 分後、90 分後、

180 分後、360 分後、600 分後に、レベルを用いて行った。波作用 360 分から 600 分の間に、容量式の波高計を用いて波高の測定を行った。地形および波高測定の測点としては、防波堤と平行方向と直角方向のメッシュを想定し、防波堤と平行方向には 30 cm 間隔で 11 測線、直角方向には、5 cm ないし 10 cm 間隔で防波堤から重複波の波長で 1 波長分以上の長さとした。

3. 斜め入射重複波による防波堤前面の洗掘特性

(1) 防波堤前面の底層平均流

まず、堤体の洗掘に大きな影響を与える底層平均流を固定床において測定した。図-2(a)は、波の入射角 $\alpha=60^\circ$ の場合において、波作用中、水槽底面に過マンガン酸カリウムの粉末を置き、底面に沿って流れる溶出液の先端位置を 1 分毎に追跡した結果であり、

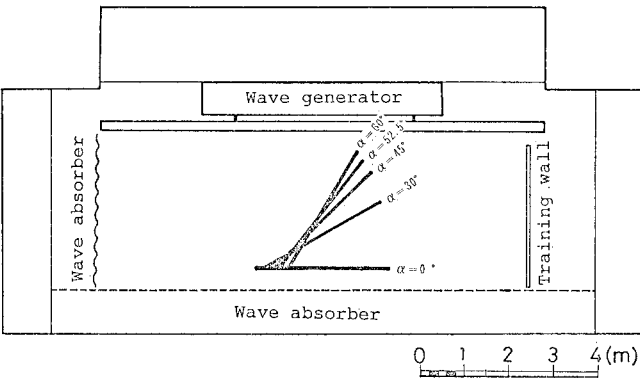


図-1 実験水槽

* 正会員	運輸省港湾技術研究所	水工部	漂砂研究室
**	運輸省第五港湾建設局	清水港工事事務所	
	(前 港湾技術研究所)	水工部	漂砂研究室
***	運輸省港湾技術研究所	水工部	漂砂研究室
**** 正会員 工博	運輸省港湾技術研究所	海洋水理部長	

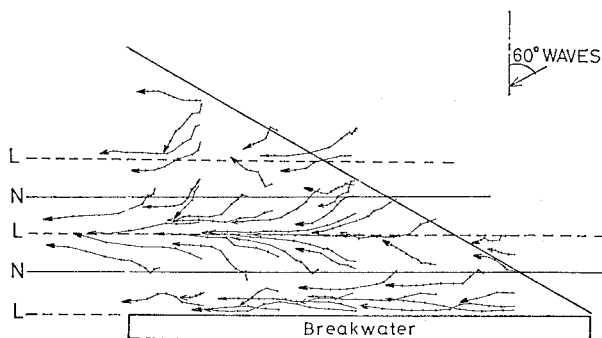
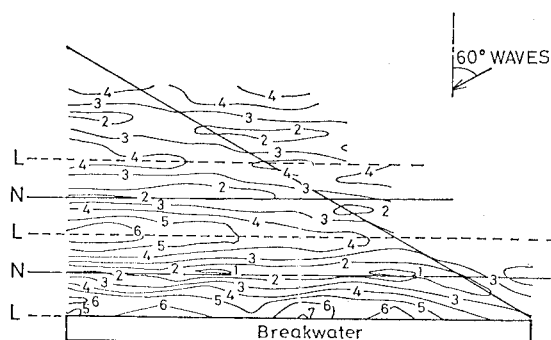
図-2 (a) 防波堤前面の底層平均流 ($\alpha=60^\circ$)図-2 (b) 防波堤前面の波高分布 ($\alpha=60^\circ$)

図-2(b)は波高分布である。図中の堤体と平行方向の点線と実線はそれぞれ重複波の腹の位置と節の位置を示している。

図-3は、5種類の波の入射角における境界層外縁の質量輸送速度の理論値を示したものである。波の入射角が小さい場合、理論値と実験値が定性的に一致することが確認されている²⁾。

図-2、図-3より波の入射角が大きい場合でも実験値は理論値と定性的に一致し、節から腹へ収束しつつ下流へ向かう流れとなっていることがわかる。波の入射角が大きい場合の流れは波の入射角が小さい場合に比べて重複波の腹の位置を中心として、堤体と平行方向に下流へ向かう成分が非常に大きくなるようである。

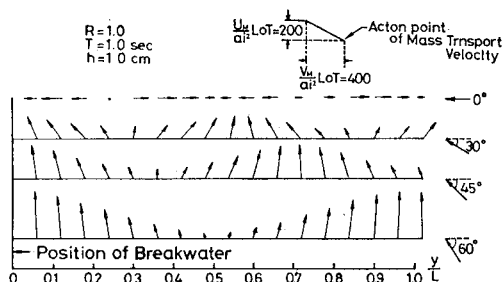


図-3 境界層外縁の質量輸送速度

(2) 防波堤前面の海底洗掘

a) 入射角 $\alpha=30^\circ$ の場合

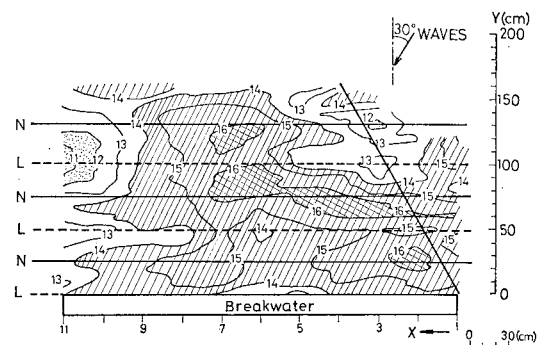
図-4は波作用600分後の底面地形を示したものである。波は図の右上より入射する。図中のX軸、Y軸はそれぞれ堤体に平行な方向、直角な方向であり、X軸の数字は測線番号を、Y軸の数字は堤体からの距離を示している。X軸方向の測線間隔は30 cmである。等深線のわきの数字は水深値を示しており、斜線の領域は侵食された領域を、打点の領域は堆積した領域を示している。点線および実線はそれぞれ重複波の腹の位置、節の位置を示している。図より、堤体前面がほぼ全域にわたって初期地形よりも侵食されているものの、重複波の節の位置では洗掘深が大きく、腹の位置では洗掘深が小さいか堆積傾向になっていることがわかる。

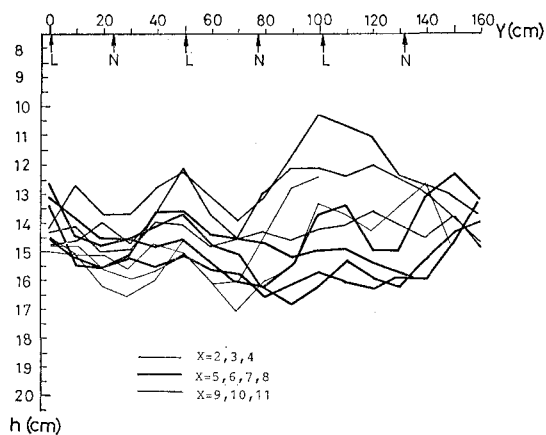
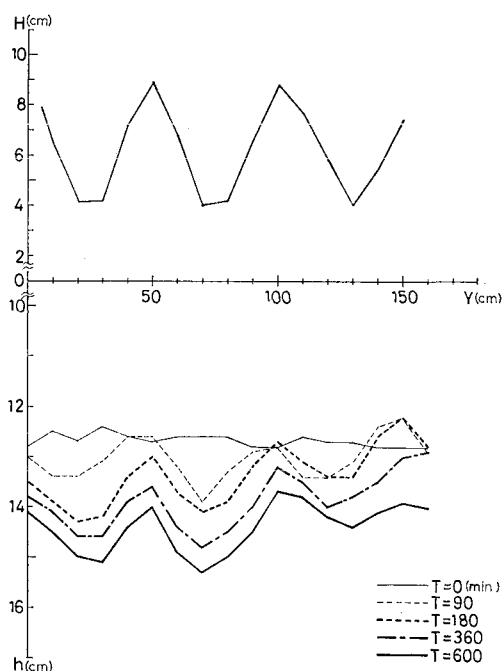
そこで、図-4において重複波が形成されると見なされる領域（図中の斜太線より左側の領域）において堤体に対し直角方向にとった断面地形を図-5に示す。縦軸は水深値を、横軸は堤体からの距離を示しており、L、Nはそれぞれ重複波の腹の位置、節の位置を示している。断面形状は各測線毎に相当のばらつきがあるものの直立壁

直前を含め腹で堆積、節で洗掘の傾向が見られる。

このような堤体に直角方向の断面形状の特徴をより明瞭に見るために、堤体から等しい距離にある地点の水深を平均した。図-6はそうにして求めた波作用前から波作用600分後の平均断面を、堤体前面の波高分布（堤体平行方向に平均化してある）と共に示したものである。図の上段が波高分布を示しており、下段が平均断面を示している。重複波の節の位置での洗掘深が大きく、腹の位置での洗掘深が小さいか堆積傾向にあり、L型洗掘の発生したことが明らかである。

b) 入射角 $\alpha=60^\circ$ の場合

図-4 波作用600分後の底面地形 ($\alpha=30^\circ$)

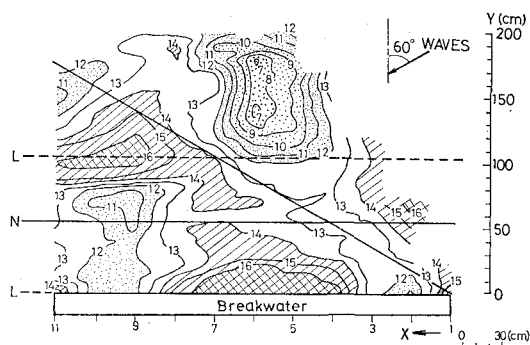
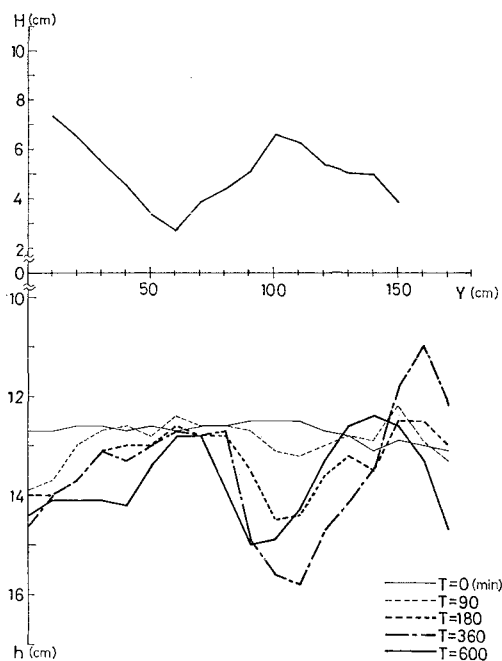
図-5 底面地形の縦断面図 ($\alpha=30^\circ$)図-6 平均断面および波高分布 ($\alpha=30^\circ$)

波作用 360 分後の底面地形を図-7 に示す。図より、堤体直前面および $Y=100$ cm 付近の重複波の腹の位置で大きな洗掘孔の存在していることがわかる。 $Y=60$ cm 付近の節の位置では堆積が見られる。

図-8 は、図-6 と同様に堤体に対して直角方向にとった断面地形の平均値を波高分布とともに示したものである。 $\alpha=30^\circ$ の場合と異なり、重複波の腹の位置で洗掘深が大きく、節の位置で洗掘深が小さい。

c) 波の入射角の相違による洗掘特性の相違

図-9 は、図-6, 8 のようにして得られた堤体に直角方向の平均断面を波の入射角が 0° , 30° , 45° , 52.5° , 60° の場合について示したものである。横軸は堤体から

図-7 波作用 360 分後の底面地形 ($\alpha=60^\circ$)図-8 平均断面および波高分布 ($\alpha=60^\circ$)

の距離を示しており、縦軸は水深値を示している。図中の黒丸印、黒三角印はそれぞれ重複波の腹の位置、節の位置を示している。入射角 $\alpha=0^\circ$, 30° の場合には重複波の節の位置での洗掘量が多いものの、 $\alpha=45^\circ$ では明瞭な傾向が見られず、 $\alpha=52.5^\circ$, 60° と増大するにつれて逆に重複波の節の位置より腹の位置での洗掘深が大きくなっている。

d) 洗掘の機構

波の入射角が小さい場合には、重複波の節から腹へ向かう流れのため、主として堤体に直角方向の底質移動によって重複波の節の位置で洗掘が発生する²⁾。しかし、波の入射角が大きい場合には図-9 から明らかなように重複波の腹の位置での洗掘深が大きくなっており、波の入射角が小さい場合と違う機構で洗掘が起きていると考えられる。

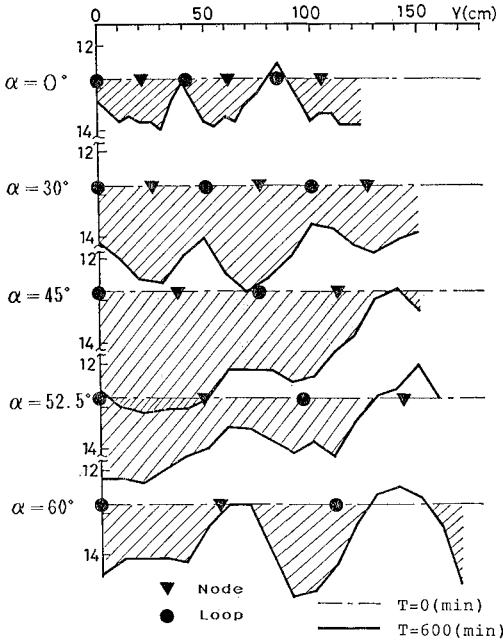


図-9 それぞれの入射角における平均断面

そこで、まず、波の入射角が小さい場合に顕著に洗掘される重複波の節の位置での初期洗掘速度と波向との関係を簡単な計算で求めた。初期洗掘速度の計算には底質の連続式を用い、漂砂量を底層平均流と浮遊砂濃度の積で評価した。底層平均流として境界層外縁の質量輸送速度を使い、浮遊砂濃度を水底における最大水粒子速度から求めた²⁾。図-10に計算結果に示す。縦軸はそれぞれの入射角における初期洗掘速度を $\alpha = 0^\circ$ のときの初期洗掘速度で無次元化した値を示し、横軸は入射角を示している。波の入射角が大きくなるにしたがって堤体に直角方向の底質移動による節の位置での洗掘深が小さくなっていることがわかる。

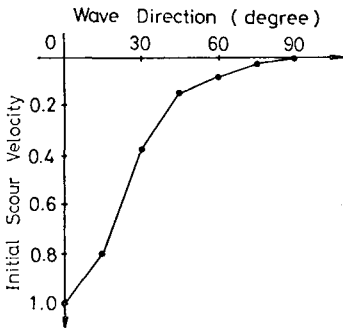


図-10 波向と初期洗掘速度との関係

一方、波向が大きな場合に顕著に洗掘された腹の位置での洗掘を考える。この場合は、図-3からもわかるように堤体に直角方向の底質移動に比べて平行方向の底質移動の効果が卓越すると考えられる。図-11は、堤体に平行な方向の漂砂量を前述の考え方に基づいて求めたものである²⁾。実線が腹を中心とした $L/4$ (L : 波長) の範囲の平均値を、破線が節を中心とした $L/4$ の範囲の

平均値を示しており、横軸は波の入射角を、縦軸はそれぞれの入射角における漂砂量を $\alpha = 75^\circ$ のときの腹の位置を中心とした漂砂量で無次元化した値を示している。波の入射角が大きくなるに

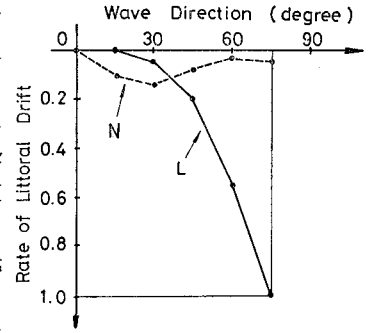


図-11 波向と漂砂量との関係

たがって、重複波の腹の位置を中心とした領域の漂砂量が節の位置でのそれに比べて著しく増大している。

堤体に平行な方向の底質移動による洗掘は、まず堤体先端付近の進行波領域と重複波領域の境界において、重複波領域の漂砂量が進行波領域の漂砂量に比べて大きいため発生し、やがて、漂砂量のアンバランスが下手側に移り、洗掘孔が下手へ広がっていくと考えられる。

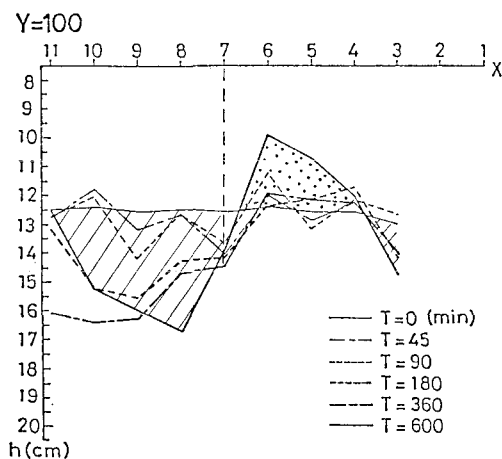
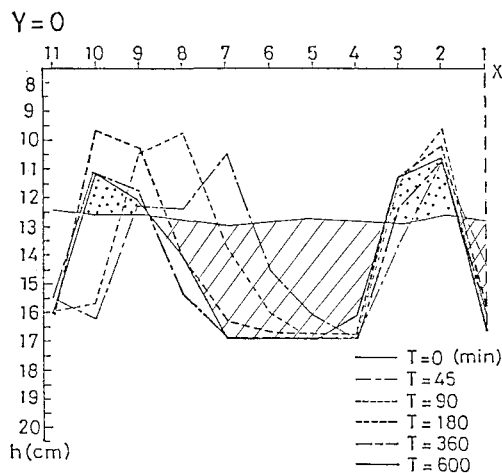
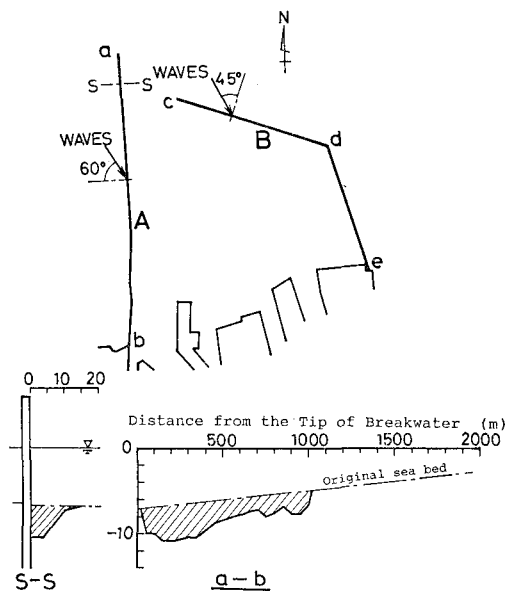
堤体に直角な方向の底質移動と平行な方向の底質移動を合わせて考えると、波の入射角が小さいときは堤体に直角な方向の底質移動による洗掘が平行な方向の底質移動による洗掘に比べて大きいために重複波の節での洗掘深が大きくなる。しかし、波の入射角が大きくなるにしたがって堤体に直角な方向の漂砂量が減少し、堤体に平行な方向の漂砂量が増加するために重複波の腹の位置での洗掘深が大きくなると考えられる。図-9の実験結果はこの考え方から説明することができる。

さらに、この考え方を裏付ける実験結果を図-12に示す。図-12は、波の入射角が 60° のときの $Y=0$ cm と $Y=100$ cm の重複波の腹の位置における堤体平行方向の断面図を調べたものである。縦軸は水深 h (cm) を示しており、横軸は堤体と平行方向の測線番号を X ($X=1 \sim 11$) で示している。ただし、 $X=1$ が堤体の最上手端となる。図中初期の地形と最終時の地形との間をシェイドに示している。

$Y=0$ cm における重複波領域上手端の堆積は、堤体先端において重複波が完全に形成されていなかったことが原因ではないかと思われる。しかし、それより下手側の領域では、時間の経過とともに洗掘孔が下手側に広がっている。 $Y=100$ cm の重複波の領域においても、洗掘孔は時間の経過とともに下手側に広がっている。この実験結果は、波の入射角が大きい場合の重複波の腹の位置における洗掘の原因が堤体に平行な方向の漂砂量のアンバランスであることを裏付けている。

(3) 直立堤前面の洗掘災害例

図-13は、東南アジアにおける矢板式防波堤の洗掘災害の例である。A, Bの防波堤に対し波の入射角が図中

図—12 防波堤に平行な断面の時間変化 ($\alpha=60^\circ$)

図—13 直立堤前面の災害例

4. 結 語

本研究によって得られた結論は以下の通りである。

- (1) 波の入射角が小さい場合には重複波の節の位置において洗掘深が大きくなるのに対し、波の入射角が大きい場合には重複波の腹の位置において洗掘深が大きくなる。
- (2) 波の入射角が大きい場合の洗掘は、まず、堤体と平行方向の漂砂量が重複波領域と進行波領域が異なることによって生じ、やがて、この漂砂量のアンバランスが下手側に移ることによって洗掘孔が下手側に広がっていく。

最後に、本研究の遂行に際し、当所加藤一正漂砂研究室長から貴重な御意見をいただいた。ここに記して感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 入江 功・灘岡和夫・近藤隆道・寺崎賢次：重複波による防波堤前面での二次元的海底洗掘——底質の移動機構に注目した研究——，港湾技術研究所報告，第23巻，第1号，pp. 3~52, 1984.
- 2) 入江 功・栗山善昭・浅倉弘敏：重複波による防波堤前面の海底洗掘及びその対策に関する研究，港湾技術研究所報告，第25巻，第1号，pp. 3~86, 1986.
- 3) 田中則男・入江 功・小笹博昭：斜め入射部分重複波による質量輸送速度の分布に関する研究，港湾技術研究所報告，第11巻，第3号，pp. 111~140, 1972.

矢印で示したように、A堤に対して 60° 、B堤に対して 45° であった。波高 2.7 m 周期 7.8 s の波が来襲した際B堤では局所集中型の洗掘が発生しなかったけれども、A堤では著しい局所洗掘が生じた。図中左下の断面図は S-S 断面の洗掘状況を示したもので、その形状は実験による $\alpha > 45^\circ$ の場合の洗掘断面と同じ性質のものであることがわかる。図中右下の図は、A堤の堤体に沿った洗掘状況を示したものである。防波堤先端付近の洗掘が著しく、下手へ向って減少している様子がみられ、著者らの実験結果と類似している。以上の事例は、本実験の結果から十分に説明できることであると考えられる。