

阿賀野川東海岸における沿岸砂州の特性について

田 中 則 男*・加 藤 一 正**

1. はじめに

砂浜海岸でしばしば観察されるリズムックな三次元地形は、汀線に形成されるカスプ、海面下に形成される inner bar および crescentic outer bar によって特徴づけられる。汀線測量・航空写真等を用いた従来の研究によって、その形成に必要な自然条件・規模・それら相互の位置関係が明らかにされた^{1),2)}。沿岸地形をこのように静的に把握することとは別に、動的な変形をとらえようとする試みは、長期にわたる現地の連続観測が困難なため、もっぱら移動床模型実験³⁾・理論解析⁴⁾、さらには確率理論の導入⁵⁾等によって行われて来たが、それらの結果は現地観測データによる地形変化の把握が必要であることを強く示している。

本報告は、リズムックな沿岸地形のうち特に沿岸砂州の三次元的な変形の実態を、12年間にわたり収集された深浅図をもとに、標準偏差による沿岸地形の規模の定義・empirical eigenfunction (後述)等を用いて明らかにしようと試みたものである。

本報告の解析対象海岸は、図-1に示す阿賀野川から新潟東港に至る約6kmの水深-20m以浅の海域であり、解析期間は新潟東港が建設された1962年～1973年の12年間である。この間の地形変化の概略を述べると、

阿賀野川河口前面において西側の信濃川河口を中心とした欠壊と阿賀野川流下土砂の減少の影響と考えられる著しい欠壊が生じており、本海岸の漂砂特性⁶⁾のため東へ移動した欠壊地域の土砂は新潟東港西防波堤に沿った西向きの流れに阻止され 図-1の No. -44 近傍の水深-10m以浅に堆積している⁷⁾。なお対象海岸を含む新潟海岸の自然条件等は、本講演会でもしばしば報告されている^{8),9)}のでそれらを参照されたい。

2. 標準偏差による沿岸砂州の把握

従来おこなわれて来た沿岸砂州の規模の定義には、比高の概念がある¹⁰⁾が、ここでは沿岸砂州の規模に関連して新しく次に示す沿岸地形の起伏の定義を行った。すなわち、汀線から沖向きに50mピッチで水深-10mまでの水深値を最小自乗法で直線近似し、この直線と水深値の差異を Δh_i とするとき、次式で表わされる値を沿岸地形の起伏の大きさとした。

$$Q = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^N \Delta h_i^2\right) / N} \quad N: \text{データ数} \cdots \cdots (1)$$

本海岸は、深浅図を検討した結果、水深-10m以浅の海底断面の平均勾配はほぼ1/100で、全体に凹状あるいは凸状になっていないことが明らかであったので、式(1)は多段バーも含めて沿岸砂州の規模を示す指標とみ

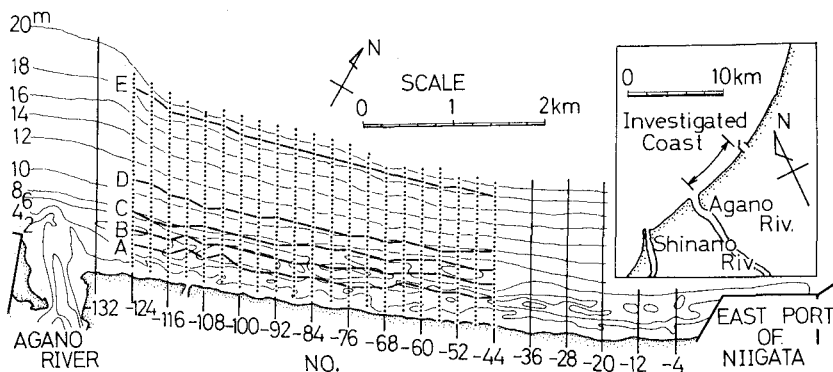


図-1 解析対象海岸

* 正会員 運輸省港湾技術研究所 水工部漂砂研究室長

** 正会員 運輸省港湾技術研究所 水工部漂砂研究室

なせる。

式(1)で Q を求めるために沿岸方向50m間隔に設定した測線のうち代表的な位置と番号が図-1に示されている。1963年から1973年までの各年春季秋季の深淺図から得られるこれらの測線上のデータを用いて Q を計算し、さらにこの値を沿岸方向に移動平均することにより沿岸方向変動波長200m程度以下の変動を取り除いたものを改めて Q として図-2にその結果を示してある。横軸は測線番号(No.)、縦軸は Q の値をとってあり、春季のものは実線、秋季は破線で区別して年ごとにずらして描いてある。

この図によると、 Q の値は沿岸方向に周期性をもつて変動しており、波長1.5~2kmの変動に波長数百mの変動が重なっていることがわかる。式(1)で計算される Q は、先にも述べたように多段バーも含めた沿岸砂州の規模を表わすものであること、およびその沿岸方向の波長のスケールから考えて、波長1.5~2kmの周期性はouter barのリズミカルな地形に対応するもの、数百mの周期性はinner barに対応するものと考えられる。これらの周期変動は同じ年の春季と秋季の小さなス

ケール変動に差異が認められるにもかかわらず、大きなスケール変動ではほとんど一致している。ところが翌年春季になると大きなスケールの変動は、前年秋季と異なる位置に存在している。このことは、日本海のように夏季がきわめて静穏な海岸では、冬季波浪によって形成された大スケールの沿岸砂州が夏季波浪によってほとんど変形されず保持されることを意味するものである。

また11年間の全体的なパターンは、年代的に3つに区分できる。すなわち、(i)1963年~1966年：波長2km程度の大スケールの沿岸砂州が時間とともに図示した区域を半波長とするモード1のさらに大きなスケールの沿岸砂州に成長していき、かつ図中で右側新潟東港方向に移動している時代。(ii)1967年~1968年：中央(No. -50)から新潟東港寄りに波長1~2km程度の大スケールの沿岸砂州が認められる時代。これは(i)の時代と次の(iii)の時代の遷移期であると考えられる。(iii)1969年~1973年：阿賀野川から中央部に至る地域に1km程度の大スケール沿岸砂州が存在し、かつそれらが図中破線でピークを結んで示したようにほぼ250m/年の速度で新潟東港方向に移動している時代である。(iii)の時代には図示した地域を1波長とするモード2のさらに大きな Q の変動が認められる。(ii)の時代を遷移期にして、(i)と(ii)の時代でモードが異なることは、新潟東港建設によって沿岸方向の境界条件が変化したことに関連性があるように思える。

3. Empirical eigenfunction による解析

沿岸地形の解析に empirical eigenfunction を用いたのは、Winant・Inman & Nordstrom (1975) らが、Terrey Pines Beach (California) の沿岸砂州・トラフ・テラスの季節変動を実測値から考察する際に利用したのが最初である¹¹⁾。この統計手法の詳細は原論文に記されているので、ここでは概略説明しておく。

いま、測点を順番に1, 2, …… n_x と番号を付し、 x 番目の測点の水深を h_{xt} で表わす。ただし添字 t は、1と n_t (全測量回数：今回は $n_t=23$)の間の整数であり測量年月を示す。 h_{xt} を成分とするベクトル

$$h_t = \begin{pmatrix} h_{1t} \\ h_{2t} \\ \vdots \\ h_{n_x t} \end{pmatrix} \dots\dots\dots (2)$$

は、たとえば測点を汀線に直角沖方向の測線に設定すれば、 t における海底断面形を表わす。この h_{xt} から計算される、

$$a_{ij} = \frac{1}{n_x \cdot n_t} \sum_{t=1}^{n_t} h_{it} \cdot h_{jt} \dots\dots\dots (3)$$

を要素とする対称相関マトリックス A の固有値(λ_m)と固有ベクトル e_m および

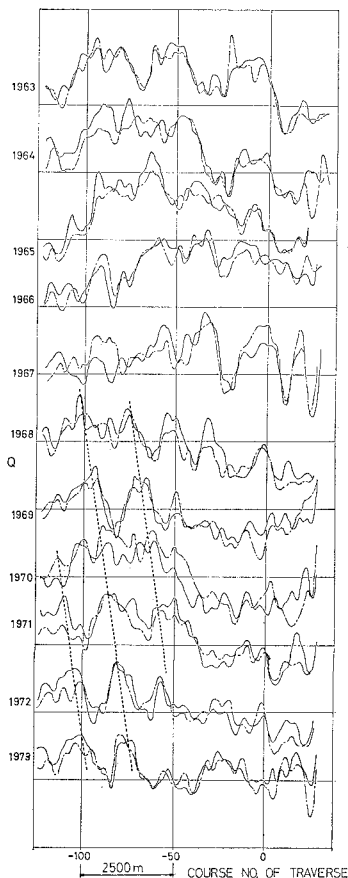


図-2 沿岸砂州の規模

$$C_{mt} = h_t^T \cdot e_m \dots\dots\dots (4)$$

で計算される C_{mt} を用いて, h_t は次式で表わされる。

$$h_t = \sum_m C_{mt} \cdot e_m \dots\dots\dots (5)$$

式(5)は, 時間および空間に対応する関数の線型重ね合せとして h_t を表現するものである。このとき e_m を empirical eigenfunction と呼び, 同時に計算される λ_m の大きさによって重要度が決定される。

この統計手法は, 水深ベクトル式(2)を決定する際の測点のとり方に制限がないため, 三次元解析が可能であるが, ここでは汀線に直角方向と平行方向の測線それぞれについて1962年~1973年の深浅図23回分から二次元解析を行った。

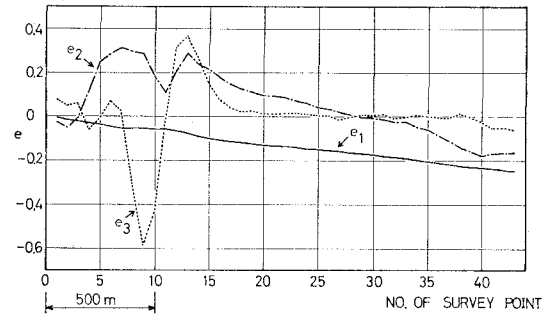
なお各測線の海底断面を, それぞれ固有値の大きい順に $m=1, 2, 3, \dots$ として, 式(5)で表現した場合, e_1 は平均断面を表わし, e_2, e_3 はその断面の地形変化の特性を表わすが, e_4 以降は重要度がきわめて小さく現実の物理現象との対応をつけることが困難である。本報告では, 主に e_2, e_3 について考察した。

(1) 沖方向

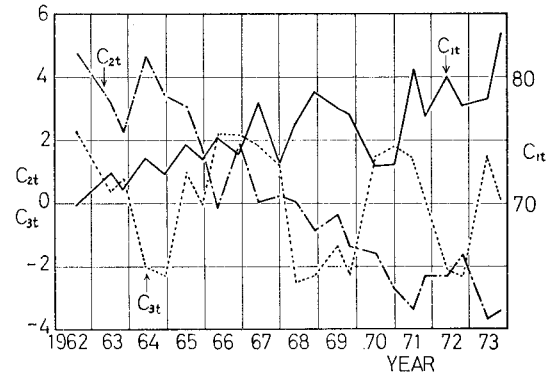
沖方向に設定した21測線は, 沿岸方向200m間隔であり, 各測線上の測点は50m間隔とし図-1にその位置が黒丸で示されている。

解析結果の一例としてNO.-124の e_m と C_{mt} を図-3(a), (b)に示す。(a)図の縦軸は e_m の値, 横軸は汀線から順番に50m間隔で設定した測点番号であり, (b)図の縦軸は係数 C_{mt} の値, 横軸は深浅測量の行われた年月である。この断面における e_1 はWinantらが述べているように海底の平均断面を, e_2 は阿賀野川河口前面海底の舌状の砂州の変形に対応した大きな盛り上りを, e_3 は一段のバー・トラフ地形をそれぞれ表わす。

各測線の e_2, e_3 についてその物理的意味を検討した結果, (i) 大きな盛り上り, (ii) バー・トラフ地形に大きく分類でき, さらに後者は一段バー・二段バー・三段バーに細分することができた。この分類と同時に, それらの重要度, すなわち λ_2, λ_3 の値を検討するため, $1000\lambda_2/\lambda_1, 1000\lambda_3/\lambda_1$ をそれぞれ e_2, e_3 の寄与率と定義しその結果を図-4に示す。この図の縦軸は寄与率, 横軸は測線番号であり, 白丸は大きな盛り上りを, また黒印はバー・トラフ地形について黒丸(一段バー), 黒四角(二段バー), 黒三角(三段バー)で区別して表わす。これによると, 大きな盛り上りの寄与率はNO.-124から遠ざかるにつれて急激に消滅していき, NO.-112ではもはや e_4 以下になっている。 e_2 はNO.-120~NO.-84でしばしば一段バーを表わすが, 全体としては二段バーが支配的である。さらに実線で示したバー・トラフに関連しているものの寄与率を加えたものは直線的増加していることがわかる。



(a) NO.-124 の e_m



(b) NO.-124 の C_{mt}

図-3

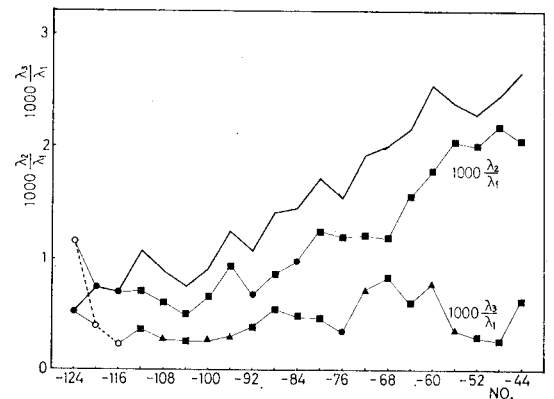


図-4 e_2 と e_3 の物理的意味と寄与率

係数 C_{2t} (NO.-124 については C_{3t}) の経年変化は, 周期変動をしており, その周期は阿賀野川から遠ざかるにつれて徐々に長くなる。このことの例として, NO.-124 の C_{2t} , NO.-88, NO.-68, NO.-44 の C_{3t} を図-5に示してある。縦軸・横軸は図-3(b)と同じである。この図によると, 阿賀野川に一番近いNO.-124で4~5年の周期変動, 最も遠いNO.-44では約10年で半周期変化していることがわかる。

この周期変動現象を検討するため, 阿賀野川に一番近

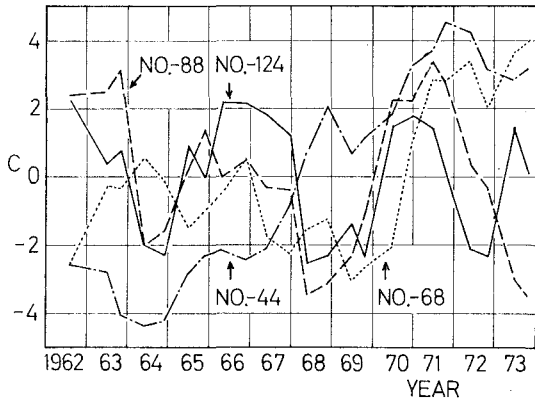


図-5 NO. 124 の C_{3t} と NO.-88, NO.-68, NO.-44 の C_{2t}

い NO.-124 の C_{3t} と阿賀野川年平均流下流量の経年変化を 図-6 に示す。図は左側縦軸に年平均流下流量 (m^3/sec), 下側横軸に年平均流下流量に対応した年を, また右側縦軸に C_{3t} の値, 上側横軸に C_{3t} 対応した年をとってあり, 上側横軸と下側横軸は年代が1年ずれている。この図をみると, 1963 年の出水を除いて年平均流下流量と係数 C_{3t} にはきわめて高い相関があり, 係数 C_{3t} の変化は年平均流下流量変化に約1年遅れて応答していることが認められる。これより, パー・トラフの周期変動は阿賀野川河口近くにおいて河川の流下土砂, 言い換えると付近の土砂の豊富さに依存していると考えられる。

前節で示された沿岸砂州が沿岸方向に移動する現象は, C_{2t} の周期変動の位相の遅れとしてとらえられる。というのは, 沿岸方向に場所的な周期性を有する沿岸砂州が沿岸方向に移動するとき, ある地点の地形変化はその上手地点の地形変化より遅れて生ずるためである。図-7 は NO.-96, NO.-92, NO.-88, NO.-82 について 1968 年~1973 年に対する C_{2t} の変化を示したものであり, 阿賀野川から遠ざかるにつれてこの位相の遅れが生じていることが認められる。

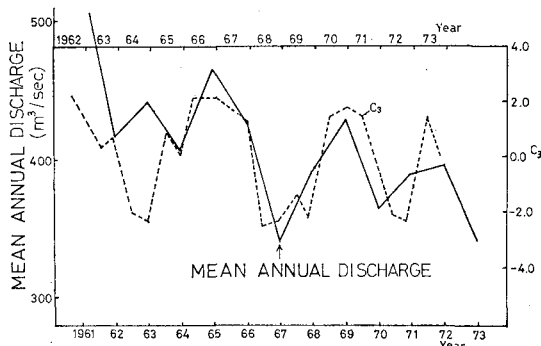


図-6 NO.-124 の C_{3t} と阿賀野川年平均流下流量の関係

(2) 沿岸方向

沿岸方向に設定した測線は, まず沖方向測線の e_2, e_3 から決定されるパー・トラフの位置を沿岸方向に連ねるものとした。すなわち, (A) 沖から二番目のパー頂部を連ねた線 (多段パーが形成されていないところは, 汀線から約 300m 沖の

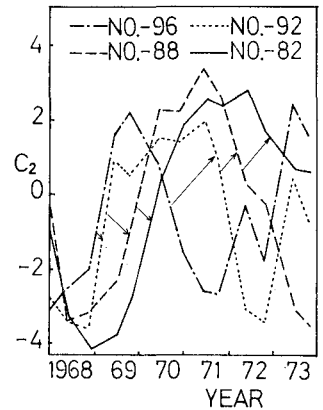


図-7 C_{2t} 位相の遅れ

地点), (B) 一番沖側のトラフ底部を連ねた線, (C) 一番沖側のパー頂部を連ねた線である。この3測線に加えて, 1962 年~1973 年の平均水深がそれぞれ -10m (D), -18m (E) に一番近い測点を連ねた計5測線について, 解析を行った。これらの測線は 図-1 に黒丸の測線を太い実線で連ねて示されている。

地形変化に注目するため, 式 (5) の平均水深 (e_1) と微小変動 (e_4 以降) を除去して, e_2, e_3 から次式で計算される有意な地形変動成分 h'_t を求めた。

$$h'_t = C_{2t} \cdot e_2 + C_{3t} \cdot e_3 \quad (6)$$

(B)・(C) の測線の h'_t を年代順に1目盛ずつずらして描いたのがそれぞれ 図-8, 図-9 であり, 縦軸1目盛は水深1m に相当し, 横軸は測線番号である。

(C) の測線に見られる右下りの曲線が年がたつにつれて連続的に右上りの曲線に変化する傾向は, (C)・(A) の測線において著しく, (D) ではわずかに認められるにすぎなかった。これは, NO.-124 から NO.-44 に向かう土砂移動が水深 -10m 以浅のトラフを除く地域で生じたことを示している。また (C) の測線は, 阿賀野川から遠ざかるにつれて変動周期が長くなっており, NO.-124

~NO.-108で約5年, NO.-56~NO.-44の地域で半周期の変化が10年で生じている。この傾向は, 沖方向の各測線について先に行った解析の結果と同じであり, 沖方向パー・

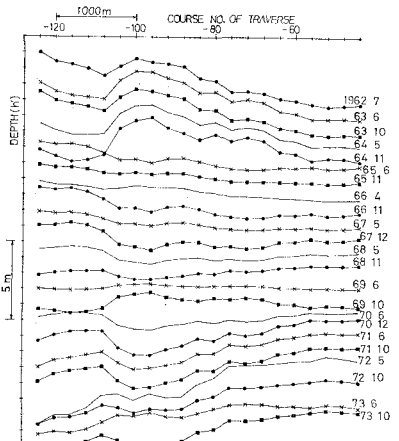


図-8 一番沖側のトラフ底部を連ねた線の h'_t

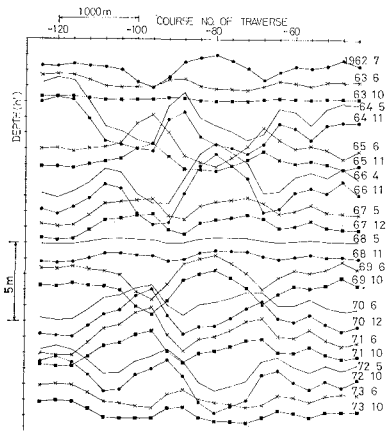


図-9 一番沖側のバー頂部を
連ねた線の h'_i

砂が移動したことを示す右下りの曲線から右上りの曲線に変化する傾向はなく、1963年、1968年、1973年に沿岸方向にはほぼ一定でそれ以外の時期には激しく変動するという、5年周期の地形変動が認められる。変動の激しい時期の NO.-124~NO.-60 には、沿岸方向に波長 1×10^3 m 程度の周期性が存在し、その波長のオーダーから outer bar の沿岸方向の周期性と見なせる。しかし (C) の測線の h'_i が示しているように、バー頂部にはこの沿岸方向の周期性がほとんど存在しない。このことと、本質的にトラフは侵食地形でありバーは堆積地形であることから、土砂移動の生じている地域の沿岸方向の周期性は、欠陥箇所で顕著になると考えられる。また同じ年の春季と秋季の h'_i はまったく一致しているのに対し、前後の年との関連性はあまりないようであり、沿岸砂州の移動を明瞭に示す結果にはなっていない。

なお水深 -18m (E) 付近には、大きな地形変動は認められなかった。

4. あとがき

阿賀野川河口東海岸の沿岸砂州は、1962年~1973年に次の変化をした。

(1) 冬季に形成された outer bar の規模とその分布は夏季にはほとんど変化しない。

(2) 1969年~1973年に outer bar は沿岸方向東向きに 250m/年 の速度で移動した。

(3) 阿賀野川の年平均流下流量が大きかった翌年には、河口近くの沿岸砂州はよく発達している。

(4) 阿賀野川から遠ざかるにつれて砂州の変動周期

トラフ empirical eigenfunction に一番沖のバーの変動の影響が強く含まれていることを意味している。

一方、一番沖側のトラフ底部を連ねた測線 (B) の h'_i には、トラフ内を長期にわたって土

は長くなり、河口近くで5年、4km離れたところで半周期が約10年である。

(5) 沿岸方向東向きの土砂移動は、水深 -10m 以浅で生じており、特にバー頂部で顕著である。

(6) トラフ底部の変動の大きさは沿岸方向に明瞭な周期性を有し、この周期性は4~5年の時間周期で消える傾向にある。

本研究は漂砂研究室で整備を進めている深浅図ライブラリーのデジタルデータを用いて行ったものであり、データ・解析結果の詳細は別報¹²⁾を参照されたい。

最後に、資料は第一港湾建設局、建設省北陸地方建設局阿賀野川工事事務所から提供していただいたことを記し感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Hom-ma, M. and C. Sonu: Rythmic pattern of longshore bars related to sediment characteristics, Proc. 8th Conf. Coastal Eng., pp. 248~278, 1963.
- 2) Sonu, C.J.: Three-dimensional beach changes, Journal of Geology, Vol. 81, pp. 42~64, 1973.
- 3) 堀川清司・佐々木民雄: 沿岸流に関する二、三の考察, 第15回海岸工学講演集, pp. 126~135, 1968.
- 4) 日野幹雄: 応答性を考慮した海浜流系と海浜地形の発生発達に関する理論, 土木学会論文報告集, 第237号, pp. 87~98, 1975.
- 5) Sonu, C.J. and H.Y. Myron: Stochastic analysis of beach profile data, Proc. 12th Conf. Coastal Eng., Vol II, pp. 1341~1362, 1970.
- 6) 田中則男・小笹博昭・小笠原昭: 海浜変形調査資料(第1報)一航空写真による汀線変化の解析(東日本編)一, 港湾技術資料, No.163, pp. 75~87, 1963.
- 7) 田中則男・加藤一正・柳島慎一: 阿賀野川河口近傍海岸の海底地形変化について(1962年~1973年), 港湾技術研究所報告, Vol. 16, No.2, 1976.
- 8) 高橋淳二: 新潟海岸の波と流れについて, 第3回海岸工学講演集, pp. 85~93, 1956.
- 9) 布施敏一郎: 新潟海岸について, 第4回海岸工学講演集, pp. 215~223, 1957.
- 10) 堀川清司: 海岸工学, 東京大学出版会, pp. 194~199, 1973.
- 11) Winant, D.C., D.L. Inman and C.E. Nordstrom: Description of seasonal beach changes using empirical eigenfunction, J.G.R., Vol. 80, No.15, pp. 1979~1986, 1975.
- 12) 前出 7)。