

Swash zone を含む砕波帯の岸沖漂砂量に関する研究

砂 村 継 夫*

1. はじめに

砂浜海岸の季節変化に代表されるような地形変化は、砕波帯から swash zone にかけての極浅海域で生ずる岸沖漂砂によってもたらされる。このような地形変化を定量的に予測するためには精度のよい漂砂量算定式が必要となる¹⁾が、現在までのところ実用に耐えるに十分な精度をもち、しかも一般化された算定式は実験室という単純な条件下ですら得られていない。この原因の一つに、極浅海域における漂砂量測定のみつかしさがある。この問題を解決するため、本研究では等分割トレイ方式²⁾を砕波帯に適用し、高精度の漂砂量測定を行った。なお swash zone における漂砂量については既往の実験データを用いた。これらのデータをもとにして、swash zone を包含する砕波帯全域に適用可能な漂砂量算定式を作り、この式の現地への適用性について若干の考察を試みた。

2. 砕波帯内漂砂量の2次元実験

造波水路(長さ 12m, 高さ 0.4m, 幅 0.2m)の一端に作られた 1/20 固定斜面の一部を掘込み漂砂量測定用のトレイを設置した。トレイは長さ 60cm, 幅 20cm, 深さ 2cm であり、仕切板で二等分できるように作られている。二等分された岸側、沖側のトレイにそれぞれ 1500g の底質を入れ、凹凸をならす。仕切板をとり去り、砕波後の波を一定時間作用させた後に仕切板を再び元の所にセットし、岸側と沖側のトレイから別々に底質を採集して、乾燥させ質量を測定し、その差を求める。これを体積(空隙を含む)に換算し net の漂砂量を算出する。用いた底質は粒径のそろった5種類の砂で、平均粒径 D と標準偏差 σ は次の通りである。(1) $D=0.23$ mm, $\sigma=0.046$ mm; (2) $D=0.41$ mm, $\sigma=0.041$ mm; (3) $D=0.79$ mm, $\sigma=0.055$ mm; (4) $D=1.3$ mm, $\sigma=0.11$ mm; (5) $D=2.9$ mm, $\sigma=0.30$ mm。

トレイが波の plunging point よりも常に岸側にくるように実験波の周期と波高を定め、合計 80 ケースの実験

を行った。砕波波高は物差しで、砕波後の波高はトレイの二等分線上で容量式波高計を用いて、それぞれ測定した。波の作用時間はケースにより異なり、10~40 分であった。

3. 漂砂量算定式

算定式を作るに当り、砕波帯内のデータ(表一)以外に既往の swash zone の実験データ^{3)~10)}も用いた。Swash zone の漂砂量は、すべて、地形変化から算出されたもので、初期の静水時汀線上の断面を通る net の値(1時間平均)である。

データの整理は(1)流速変動の非対称性を表わすパラメータとして Ursell 数 $[U_r=HL^2/h^3]$ と(2)底質移動を表わすパラメータとして Hallermeier¹¹⁾ の Φ $[\Phi=(d_0 \cdot \omega)^2/\gamma'gD]$ との二つを用いて行われた。ここに H および L は水深 h における波高および波長、 $d_0=H/\sinh(2\pi h/L)$ 、 $\omega=2\pi/T$ 、 γ' は底質の水中比重、 T は波の周期、 D は底質粒径、 g は重力の加速度である。これら二つのパラメータの組合せて非対称流速場における砂移動(net)の方向を規定できることが既に報告されている¹²⁾。ここで実際 U_r と Φ とを計算するに当っては、微小振幅波理論の浅海近似 $[L=T\sqrt{gh}$ および $d_0=HL/2\pi h]$ を適用して変形した次式をそれぞれ使用した。

$$U_r=gHT^2/h^2 \dots\dots\dots (1)$$

$$\Phi=H^2/\gamma'hD \dots\dots\dots (2)$$

砕波帯実験の H は実測値を、swash zone の実験の場合は次式¹³⁾による計算値を用いた。

$$H=2.5(\tan \beta)H_b \dots\dots\dots (3)$$

ここに $\tan \beta$ は海底勾配(ただし一樣)、 H_b は砕波波高である。一方、 h は、いずれの実験の場合にも佐々木・佐伯¹⁴⁾による次式で計算した。

$$h=-(3.85 \tan \beta - 0.985)h' + (1.63 \tan \beta + 0.048)H_b \dots\dots\dots (4)$$

ここに h' は静水時水深で、swash zone の場合には $h'=0$ とした。砕波帯実験では $\tan \beta=1/20$ 、swash zone の実験では $\tan \beta$ は初期海底勾配とした。

図一1 は U_r - Φ 平面に底質の net の移動方向をプロ

* 正会員 工博 筑波大学助教授 地球科学系

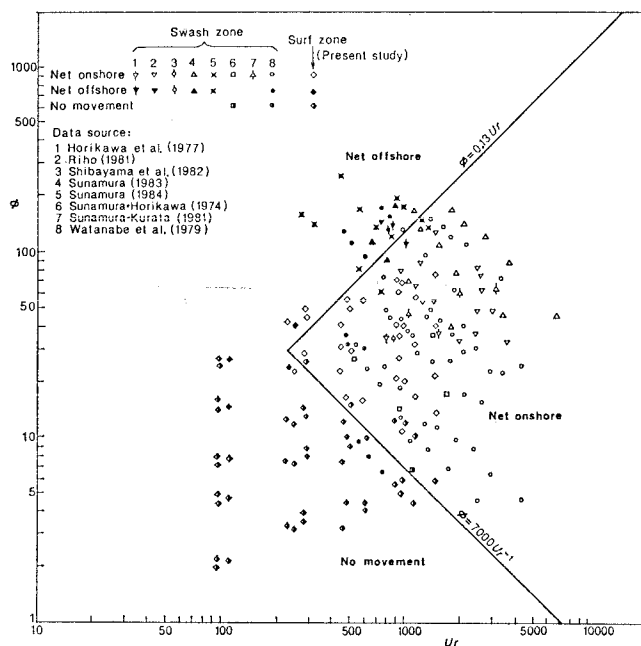


図-1 漂砂の方向

と表わせることがわかる。一方、 $U_r < 230$ ならば砂移動はほとんど起らないと考えてよい。

図-1 中の各データに対応する無次元漂砂量 Q/wD [Q は単位幅・単位時間当りに net で移動する底質の体積 (空隙を含む) で岸向きを正, w は底質の沈降速度] の値を調べてみると, 一定の U_r に対して Q/wD が Φ の関数として表わせることがわかった。そこで, この関数形を見出すために, 適当な大ききで区分された U_r の値ごとに Q/wD と Φ との関係をプロットしたものが図-2 である。底質の移動限界 Φ_0 は, 図-1 からは $\Phi_0 = 7000 U_r^{-1}$ と表わせるが, 定量的に検討してみると図-2 からわかるように Φ_0 を決定することは困難である。近似的には $\Phi_0 = 0$ としてもよいであろう。このことと, $\Phi = 0.13 U_r$ の直線を境にして漂砂の方向が変わる (図-1 参照) ことを考慮して, $U_r \geq 230$ に対する Q/wD の関数形を次式のように仮定する。

$$Q/wD = -A\Phi(\Phi - 0.13 U_r) \dots\dots\dots (7)$$

ットしたもので, この図から, $U_r \geq 230$ ならば岸向きの移動を生ずる領域は

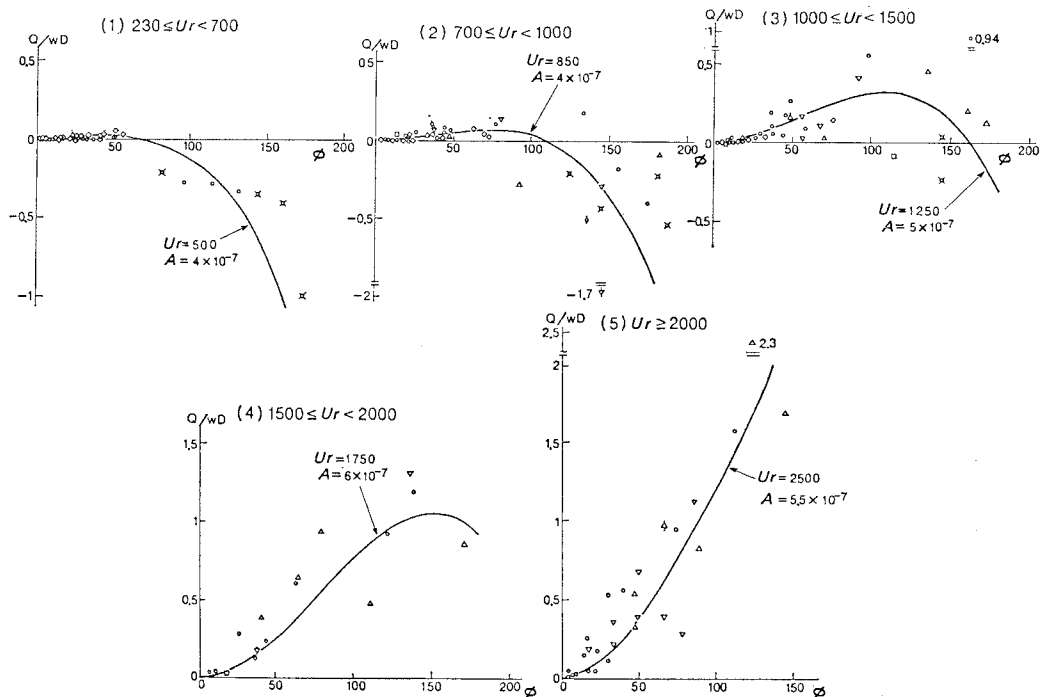
$$7000 U_r^{-1} \leq \Phi \leq 0.13 U_r \dots\dots\dots (5)$$

沖向き移動の領域は

$$\Phi > 0.13 U_r \dots\dots\dots (6)$$

ここに A は U_r の関数である。

図-2 中の曲線は, 一定の U_r に対して上式がデータに出来るだけよく fit するように A の値を決定して描かれている。データにかなりのバラツキがみられるが, 全体の傾向は式 (7) で表現できるのであろう。図-2 の曲

図-2 Q/wD と Φ の関係 (図中の記号については図-1の凡例参照)

線に付されている A と U_r の値をプロットしたものが図-3 である. この図より $A=1.15 \times 10^{-7} U_r^{0.2}$ と表わせることがわかる. したがって無次元漂砂量 Q/wD は ϕ と U_r の関数として次式のように書ける.

$$\frac{Q}{wD} = \begin{cases} -1.15 \times 10^{-7} U_r^{0.2} \phi (\phi - 0.13 U_r), & \text{for } U_r \geq 230 \\ 0, & \text{for } U_r < 230 \end{cases} \dots\dots\dots (8)$$

4. 現地への適用性

実験室砕波帯における漂砂の卓越方向は式 (8) より $\phi=0.13 U_r$ (9) で規定できる. この式を, $H/h=0.78$ を仮定して変形すると $H/gT^2=0.17D/H$ となる. 式中の定数を B において現地の砕波点に適用すると

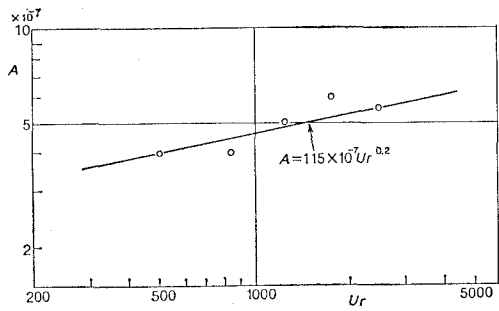


図-3 A と U_r の関係

$$H_b/gT^2=B(D/H_b) \dots\dots\dots (10)$$

と書ける.

図-4 は, 上式中の二つのパラメータを用いて, 現地砕波帯内にあるバーの移動方向¹⁵⁾を整理した結果で, 砕波帯内の net の砂移動の方向を表わしていると考えてよ

表-1 漂砂量実験結果 (砕波帯)

No.	T (s)	H_b (cm)	H (cm)	h^* (cm)	D (cm)	Q^{**} ($\text{cm}^3/\text{cm}/\text{s}$)	No.	T (s)	H_b (cm)	H (cm)	h^* (cm)	D (cm)	Q^{**} ($\text{cm}^3/\text{cm}/\text{s}$)
1	0.8	5.6	1.8	3.2	0.023	-4.1×10^{-4}	41	1.6	8.2	2.4	3.6	0.023	1.4×10^{-3}
2					0.041	-4.6×10^{-4}	42					0.041	1.1×10^{-3}
3					0.079	-1.3×10^{-4}	43					0.079	1.2×10^{-3}
4					0.13	-1.5×10^{-4}	44					0.13	3.3×10^{-4}
5					0.29	0	45					0.29	0
6	0.8	7.0	1.8	3.4	0.023	-5.8×10^{-5}	46	1.6	9.4	2.7	3.7	0.023	2.9×10^{-3}
7					0.041	-4.7×10^{-5}	47					0.041	3.4×10^{-3}
8					0.079	5.0×10^{-5}	48					0.079	1.3×10^{-3}
9					0.13	3.6×10^{-5}	49					0.13	2.4×10^{-5}
10					0.29	0	50					0.29	0
11	0.8	7.6	1.9	3.5	0.023	1.3×10^{-4}	51	1.6	10.5	2.9	3.9	0.023	2.6×10^{-3}
12					0.041	-1.3×10^{-4}	52					0.041	5.6×10^{-3}
13					0.079	6.2×10^{-5}	53					0.079	2.6×10^{-3}
14					0.13	-2.9×10^{-5}	54					0.13	5.2×10^{-4}
15					0.29	0	55					0.29	0
16	1.2	7.4	2.5	3.5	0.023	9.6×10^{-4}	56	2.0	7.5	2.9	3.5	0.023	4.9×10^{-3}
17					0.041	3.4×10^{-4}	57					0.041	8.8×10^{-3}
18					0.079	6.9×10^{-4}	58					0.079	1.2×10^{-2}
19					0.13	-2.6×10^{-5}	59					0.13	3.9×10^{-3}
20					0.29	0	60					0.29	3.4×10^{-4}
21	1.2	8.2	2.6	3.6	0.023	4.4×10^{-4}	61	2.0	8.5	3.1	3.6	0.023	3.1×10^{-3}
22					0.041	8.8×10^{-4}	62					0.041	6.5×10^{-3}
23					0.079	-9.2×10^{-4}	63					0.079	4.4×10^{-3}
24					0.13	8.9×10^{-5}	64					0.13	2.8×10^{-3}
25					0.29	0	65					0.29	2.5×10^{-6}
26	1.2	9.5	2.4	3.7	0.023	-2.3×10^{-4}	66	2.0	9.0	3.2	3.7	0.023	2.0×10^{-3}
27					0.041	9.5×10^{-4}	67					0.041	3.5×10^{-3}
28					0.079	-1.1×10^{-3}	68					0.079	3.5×10^{-3}
29					0.13	-1.9×10^{-4}	69					0.13	2.2×10^{-3}
30					0.29	0	70					0.29	6.1×10^{-4}
31	1.2	10.7	2.5	3.9	0.023	2.4×10^{-3}	71	2.4	8.0	3.2	3.5	0.023	9.5×10^{-3}
32					0.041	-2.0×10^{-3}	72					0.041	1.3×10^{-2}
33					0.079	-6.4×10^{-4}	73					0.079	1.2×10^{-2}
34					0.13	-2.6×10^{-4}	74					0.13	5.8×10^{-3}
35					0.29	0	75					0.29	1.9×10^{-4}
36	1.6	7.2	2.7	3.4	0.023	2.1×10^{-3}	76	2.4	9.8	2.9	3.8	0.023	5.9×10^{-3}
37					0.041	1.8×10^{-3}	77					0.041	1.1×10^{-2}
38					0.079	1.4×10^{-3}	78					0.079	6.1×10^{-3}
39					0.13	1.2×10^{-3}	79					0.13	2.7×10^{-3}
40					0.29	0	80					0.29	9.4×10^{-5}

注: * 式 (4) による計算値, ** マイナスは沖向きを示す.

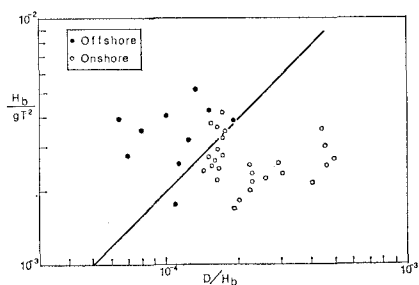


図-4 現地砕波帯内のバーの移動方向

い. すなわちバーが岸向きに移動するならば, net の漂砂も岸向きである. データポイントがオーバーラップしている個所もあるが, 図中の直線を境にして砂移動方向(net)をほぼ区分できる. この直線は

$$H_b/gT^2 = 20D/H_b \quad \text{..... (11)}$$

である.

現地砕波帯の底質が全体として岸向きに移動するならば結果として汀線の前進が, 沖向きならば汀線の後退が生ずることが予想される. そこで, 現地に適用可能な次式¹⁶⁾ [砕波波高と沖波特性の関係式]

$$\frac{H_b}{H_0} = (\tan \beta)^{0.2} \left(\frac{H_0}{L_0} \right)^{-0.25} \quad \text{..... (12)}$$

と

$$L_0 = gT^2/2\pi \quad \text{..... (13)}$$

を用いて, 式 (10) を変形すると

$$\frac{H_0}{L_0} = C(\tan \beta)^{-0.27} \left(\frac{D}{L_0} \right)^{0.67} \quad \text{..... (14a)}$$

$$C = (2\pi B)^{0.67} \quad \text{..... (14b)}$$

を得る. ここに H_0 および L_0 は沖波波高と波長である. 式 (14a) は, Sunamura・Horikawa¹⁷⁾ が 10 年前に提案した現地汀線の前進・後退を規定する経験式であり, $C < 18$ ならば汀線は前進, $C > 18$ ならば後退する. その後, 信頼度の高い現地データ¹⁸⁾や大型造波水路実験データ¹⁹⁾を用いて C 値の検討が行われた結果, 汀線の前進・後退の境界が $C \approx 18$ で与えられることが報告されている. そこで式 (14b) へ $C = 18$ を代入すると, $B = 12$ となる. すなわち式 (10) において $B > 12$ ならば汀線は後退し, $B < 12$ ならば前進する.

この結果を, 前述した砕波帯内のバーの移動方向との関連でみてみると, $B > 20$ ならばバーは沖向きに移動し汀線は後退する. $B < 12$ ならばバーは岸向きに移動し汀線の前進がみられる. ところが, $12 < B < 20$ ではバーが岸向きに移動するにもかかわらず汀線は後退する. この理由は, バーの頂部水深が大きいため, 波は大きなエネルギー減衰を起さずに汀線にまで到達し, そこを侵蝕するためであろう.

現地砕波帯の漂砂量については, 現在のところ利用できるデータはほとんどない. そこで, 大型造波水路実験

による swash zone の漂砂量データ (0~5 時間の平均)²⁰⁾を用いて, 式 (8) の現地への適用性について若干の検討を加えた. 式 (8) 中の $-U_r^{0.2}\phi(\phi-0.13U_r)$ を x 軸に, Q/wD を y 軸にとってデータをプロットした結果が 図-5 である. U_r および ϕ の計算に必要な H および h

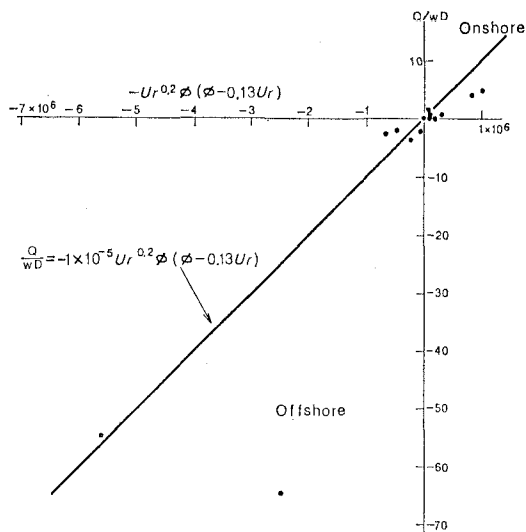


図-5 大型水路実験データを用いた検討結果

の値については, それぞれ式 (3) および (4) を用いて算出した.

図中の直線は

$$\frac{Q}{wD} = -1 \times 10^{-5} U_r^{0.2} \phi (\phi - 0.13 U_r) \quad \text{..... (15)}$$

で与えられる. 一つのデータポイントが直線から大きく離れたところにプロットされている. このデータを無視すれば, 現地 swash zone における漂砂量は上式でほぼ表わすことができるであろう. しかし, 漂砂の方向を規定する関数 [式 (9)] が現地スケールの実験と小規模な室内実験とで全く同じ形をとる点に疑問が残る. この点については広範な現地データを用いて今後検討する必要がある.

5. おわりに

2次元造波水路実験のデータにもとづき, swash zone を含む砕波帯に適用可能な一般化された漂砂量算定式 [式 (8)] を求めた. 波の周期, 波高, 水深, 底質粒径が与えられれば, この式により実験室における net の漂砂量のみならず移動方向をも同時に計算することができる. 一方, 大型水路実験データを用いて検討した結果, 式 (8) のような関数形 (定数は異なる) で現地の漂砂量を算定できる可能性が大きいことがわかった. また式 (10) 中の B の値により現地砕波帯内のバーの移動方向 (すなわち net の漂砂方向) ならびに汀線の前進・後退

が規定できる。

最後に、本研究は文部省科学研究費（自然災害特別研究，研究代表者：尾崎 晃北大名誉教授および一般研究C，研究代表者：西村仁嗣筑波大助教授）を受けて行われたものであることを付記する。実験は、当時筑波大学自然学類学生であった郡司 忠君と渡辺和博君の協力の下に行われた。また同大学小崎四郎技官には図面のトレースをお願いした。ここに記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 砂村継夫：岸沖漂砂量，月刊海洋科学，7月号，pp. 388～393，1984.
- 2) 砂村継夫：浅海域の岸沖漂砂量に関する実験的研究，第29回海岸工学講演会論文集，pp. 239～243，1982.
- 3) 堀川清司・砂村継夫・柴山知也：二次元海浜変形に関する実験的研究，第24回海岸工学講演会論文集，pp. 170～174，1977.
- 4) 利穂吉彦：二次元海浜変形と岸沖漂砂に関する研究，東京大学大学院工学研究科土木工学専攻修士論文，94 p.，1981.
- 5) 柴山知也・堀川清司・矢吹信喜・半田信一：二次元海浜変形予測手法の実験による検討，第29回海岸工学講演会論文集，pp. 249～253，1982.
- 6) 砂村継夫：Swash zoneにおける岸沖漂砂量の算定式，第30回海岸工学講演会論文集，pp. 214～218，1983.
- 7) Sunamura, T.: Onshore-offshore sediment transport rate on the swash zone of a laboratory beach with steep slope, Ann. Rep., Inst. Geosci., Univ. Tsukuba, No. 10, 1984 (in press).
- 8) Sunamura, T. and K. Horikawa: Two-dimensional beach transformation due to waves. Proc. 14th Int. Conf. Coastal Eng., pp. 920～938, 1974.
- 9) 砂村継夫・倉田雄司：時間的に変化する波浪を用いた海浜変形に関する二次元実験，第28回海岸工学講演会論文集，pp. 222～226，1981.
- 10) 渡辺 晃・利穂吉彦・堀川清司：二次元海浜変形と岸沖漂砂量分布，第26回海岸工学講演会論文集，pp. 172～176，1979.
- 11) Hallermeier, R. J.: Oscillatory bedload transport: Data review and simple formulation, Continental Shelf Res., Vol. 1, pp. 159～190, 1982.
- 12) 前出 2).
- 13) 前出 6).
- 14) 佐々木幹夫・佐伯 浩：砕波後の波の変形に関する研究(2)，第21回海岸工学講演会論文集，pp. 39～44，1974.
- 15) Sunamura, T. and I. Takeda: Landward migration of inner bars, Marine Geol., Vol. 60, 1984 (in press).
- 16) Sunamura, T.: Determination of breaker height and depth in the field, Ann. Rep., Inst. Geosci., Univ. Tsukuba, No. 8, pp. 53～54, 1982.
- 17) 前出 8).
- 18) Sunamura, T.: Parameters for delimiting erosion and accretion of natural beaches, Ann. Rep., Inst. Geosci., Univ. Tsukuba, No. 6, pp. 51～54, 1980.
- 19) Kajima, R., T. Shimizu, K. Maruyama and S. Saito: Experiments on beach profile change with a large wave flume, Proc. 18th Int. Conf. Coastal Eng., pp. 1385～1404, 1982.
- 20) 清水隆夫・斉藤昭三・丸山康樹・長谷川寛・鹿島遼一：大型造波水路による岸沖海浜変形実験，電力中央研究所研究報告，1984（印刷中）。