

短期汀線変動のモデル化の試み

加藤一正*・柳嶋慎一**・村上裕幸**・末次広児***

1. はじめに

国土を海岸護岸のような線で防護してきたのに対し、最近では砂浜に防災機能を期待する面的防護の考えが打ち出されている。防災機能を有する砂浜を人工的に造成するためには、造成後の砂浜の変形を事前に予測すること、特に台風や低気圧の通過に伴う短期間の変形を予測することが必要になる。

本報告は、波崎海洋研究施設において1986年3月12日から9月11日の間毎日1回測量して得られた海浜断面データを基にして、汀線移動を検討し、その結果と沖波のエネルギーフラックスを関連付けることにより汀線位置の短期変動予測モデルを組み立てたものである。

2. 波崎海洋研究施設における断面測定

2.1 海浜断面測定の方法

現地観測は、鹿島港と銚子の間ほぼ中央の鹿島灘に面する砂浜海岸にある全長427mの波崎海洋研究施設（以下“HORF”と称する）で実施した（図-1）。HORF建設地点の長期間にわたる汀線変化を1947年から1984年の間に米軍、国土地理院によって撮影された11枚の空中写真で調べたところ、汀線位置は1975年から1979年の間に50m程度前進するが、1979年以降は前進してお

らず比較的安定していた。したがって、本報告で述べる1986年の184日間の汀線位置の変化には、長期的な汀線の前進、後退の影響はほとんどないものと考えられる。

観測栈橋の南側（銚子側）に沿う測線を設定し、栈橋先端から後浜までの範囲（延長500m）を岸沖方向5m間隔で海浜断面の測定を行った。海面下の断面は、栈橋上から重さ3~5kgのレッドにより、また陸上部については予め測定点にピンを打設しておき、その地点のレベル測量することにより測定した。

断面測定は、1986年3月12日より毎月1回正午ごろに実施しているが、鹿島港における沖波観測が1986年9月12日以降欠測になったので、本報告では1986年9月11日まで（184日間）のデータを解析対象とした。

2.2 測定期間中の海象条件

HORFでは、沖波観測を実施していないので、鹿島港の南海浜の水深D.L.-22m（図-1参照）で、超音波式波高計により2時間ごとに測定された有義波高、有義波周期を用いることとした。波浪観測は偶数正時に実施されているが、断面測定が1日間隔であるので、前日の14時から当日の12時までの2時間間隔の有義波高、周期より、波浪観測点のエネルギーフラックスを計算し、その結果をもとに1日平均のエネルギーフラックスを求めた。

図-2は、1986年3月12日~同年9月11日のエネルギーフラックスの経時変化を示したものである。エネルギーフラックスのピーク値のうち矢印で示した日のものを、極大波高とともに表-1に示す。

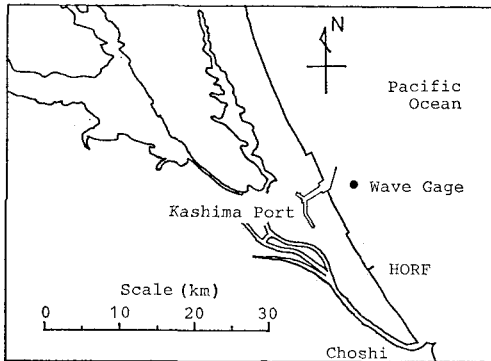


図-1 現地調査地点（波崎海洋研究施設）

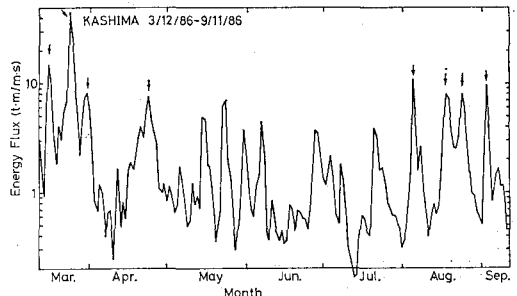


図-2 エネルギーフラックスの経時変化

* 正会員 工修 運輸省港湾技術研究所 水工部 漂砂研究室長
 ** 運輸省港湾技術研究所 水工部 漂砂研究室
 *** 運輸省港湾技術研究所 水工部 高潮津波研究室

表-1 代表的な高波浪諸元

月, 日	エネルギー フラックス ($t \cdot m/m \cdot s$)	極大波高		
		月: 日: 時	有義波高 (m)	有義波周期 (s)
3, 16	15.4	3: 15: 18	4.04	9.3
3, 24	45.9	3: 23: 20	6.76	10.7
3, 31	8.3	3: 31: 2	2.87	10.1
4, 24	7.8	4: 23: 24	3.06	10.0
8, 5	11.0	8: 4: 18	4.12	9.1
8, 18	8.0	8: 18: 14	3.12	11.9
8, 24	8.2	8: 24: 6	3.10	9.2
9, 3	9.6	9: 2: 16	3.35	10.9

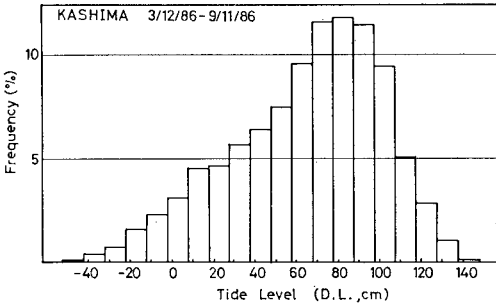


図-3 潮位の頻度分布(鹿島港)

潮位は鹿島港港内の検潮所で観測されている。図-3は観測期間中の1時間ごとの潮位の頻度分布である。

3. 汀線変化の実態

3.1 断面変化の概略

図-4の実線は、測定期間中の全断面を平均して求めた平均海底断面をHORFのD.L.基準(D.L.=T.P.-0.687m)で示したものである。D.L. 0mまでの前浜部はほぼ一様勾配(1/50程度)である。測点150mより沖測で周辺よりくぼんだ平均断面地形になっているところは、橋脚周辺の局所洗掘の影響である。

図-4の黒丸は、各測点の毎日のレベルを平均断面を基準にした標準偏差で示したものである。全体的な傾向としては、海底レベルの標準偏差は沖に向かうほど徐々に増大する。興味あることは、測点25m(平均レベルD.L.+0.28m)で、標準偏差値が極小となっていることである。この点より岸測、沖測の海浜レベルが変化し

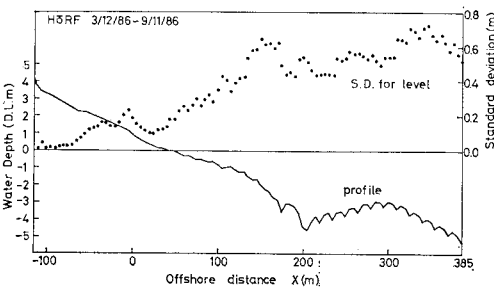


図-4 平均断面、地形変化の標準偏差

ても、この付近のレベルは変化しにくいことを意味している。

なお、栈橋上からあるいは浜から測点50mより岸側の地形を観察した結果によると、前浜を含む浅海域、陸上部は、常に二次元性の強い地形となっていた。

3.2 汀線位置の変動特性

汀線位置を、D.L.+1.4mの静止海面と前浜が交わるところと定義し、5m間隔の断面データを内そうして求めた汀線位置の変動を述べる。D.L.+1.4mは、鹿島港内の潮位がこのレベルを越えることがほとんどないレベル(図-3)であるが、前浜部で地形変化の最も大きいところの平均レベルである(図-4)。

図-5は、D.L.+1.4m汀線位置の岸沖変化である。全体的な変化傾向は、波のエネルギーフラックスの変化に概略対応しており、エネルギーフラックスの大きい3~4月および8月には汀線位置が岸側に(汀線後退)、エネルギーフラックスの小さい5~7月にはそれは沖測(汀線前進)に位置している。

汀線位置が沖方向に移動する期間(堆積過程)の汀線位置の変化を、図-5中に破線で近似して示した。これによると、9本の破線の傾きはそれぞれよく似ており、平均的な勾配は0.68m/dayとなった。堆積過程では、外力の大きさに関係なく一定速度で汀線の前進が生じていると言える。一方、汀線位置の後退は図中の破線が不連続になっているところで生じており、しかも1~2日で変化している。急激な汀線後退は5~7月のように必ずしもエネルギーフラックスが大きくないときにも生じている。

図-6は、測点-20m~+25mの間(図-4参照)の断面データを最小自乗法により直線近似して求めた海浜の平均勾配の経時変化(実線)を、D.L.+1.4m汀線の位置とともに示したものである。図-6によると、多少のズレはあるが、前浜勾配と汀線位置の変動は全体と

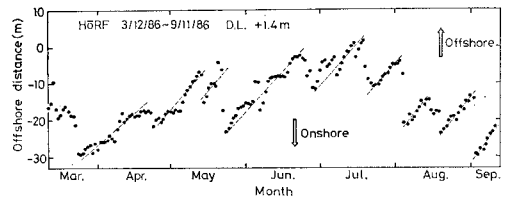


図-5 汀線位置の岸沖変動(D.L.+1.4m)

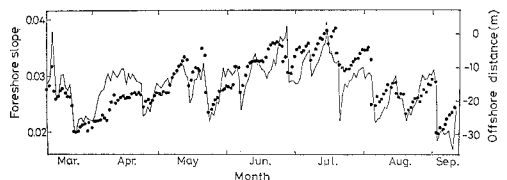


図-6 前浜勾配の経時変化(測点-20m~+25m)

して同じ傾向にあり、また汀線の急激な後退が生じるときには前浜勾配も急激に変化して小さくなる傾向が認められる。

4. 汀線位置の変動とエネルギーフラックスとの関係

現地の汀線の前進・後退の境界を表現する砂村の式¹⁾で、波の諸元を左辺にまとめて書き直すと、

$$H/L^{1/3} = C \cdot (\tan \beta)^{-0.27} \cdot D^{0.67} \quad (1)$$

となる。ここに、 H : 沖波有義波高、 L : 沖波有義波長、 $\tan \beta$: 汀線から水深 20 m までの平均海底勾配、 D : 底質粒径、 C : 定数 (=18) である。

図-7 は、縦軸に $H/L^{1/3}$ 、横軸にエネルギーフラックスをとって観測期間中の一日平均値をプロットしたものである。ここで波長は、2 時間ごとの有義波周期を単純に平均した一日平均周期をもとに微小振幅波理論で計算し、波高は一日平均周期と一日平均エネルギーフラックスから逆算して求めた。この図によると、両者の間には強い相関があり、最小自乗法で直線近似すると

$$H/L^{1/3} = 0.25 \cdot E^{0.37} \quad (2)$$

となる (図中実線)。式 (2) を式 (1) に代入すると、砂村の式をエネルギーフラックスで表現した次式を得る。

$$E = C' \cdot (\tan \beta)^{-0.73} \cdot D^{1.81} \quad (3)$$

ここで C' は定数である。

ここでは $\tan \beta$ を前浜勾配 $\tan \beta'$ におきかえることにする。レベル変動の標準偏差が極小になる測点 25 m (平均レベル D.L. +0.28m) を節 (不動点) と見なし、

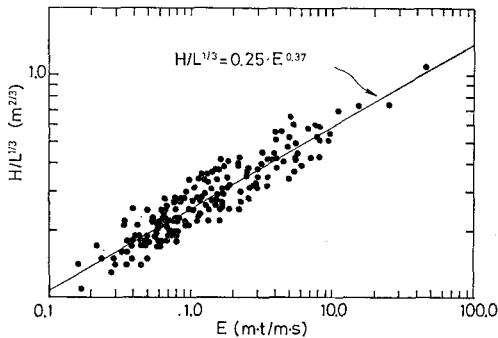


図-7 エネルギーフラックスと $H/L^{1/3}$ の関係

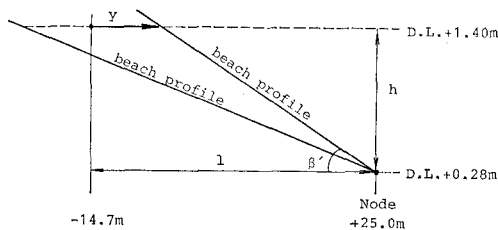


図-8 前浜勾配と汀線位置の関係

前浜勾配 $\tan \beta'$ と汀線位置の簡単な関係式を導く。図-8 は、前浜勾配と汀線位置の関係を図示したものである。図中 l は節から平均汀線までの水平距離 (=39.7m)、 h は節のレベル D.L. +1.4m (汀線レベル) の鉛直距離 (=1.12m)、 y は平均汀線位置を原点にして沖向きを正にとった汀線位置である。図より、前浜勾配は次式となる。

$$\tan \beta' = h/(l-y) \quad (4)$$

式 (4) を式 (3) に代入し、両辺を観測期間中の平均エネルギーフラックス (2.48 t·m/m·s) で除し、前浜の底質中央粒径 ($D=0.17 \sim 0.19$ m) を定数とみなして (C' を新たな定数とする)、前浜勾配にかかる指数を α とすれば、次式を得る。

$$\hat{E} = C' \cdot \left(\frac{l-y}{h} \right)^\alpha \quad (5)$$

ここで $\hat{E}$ は波のエネルギーフラックスを平均エネルギーフラックスで除して無次元化したものである。

図-9 は、 $\hat{E}$ と y の関係をプロットしたものである。なお、エネルギーフラックスとしては、本来岸沖成分を考慮すべきであるが、波の入射角が $\pm 10^\circ$ 以内であるとき、岸沖成分を計算しないときの誤差が $\pm 3\%$ 以内におさまるので考慮していない。図中の実線は、 $\alpha=6.0$ 、 $C'=7.15 \times 10^{-10}$ としたときの式 (5) である。破線は、このときの式 (5) をグラフ上で直線近似したものであり、次式で表現される。

$$y = -16.0 \cdot \log \hat{E} + 1.63 \quad (6)$$

ここに、 $\log$ は常用対数であり、 y は m 単位である。

図-9 には 1 日で 5 m 以上の急激な汀線後退が生じたときの前後のデータを矢印のついた実線で結んである。これらの矢印の方向、位置に若干の差はあるが、ほぼ実線、破線に沿っていることが分かる。図-9 から読み取れることは、汀線位置が前進した状態にあるときほど小さなエネルギーフラックスで急激な後退が生じるといえることである。

一方、急激な汀線後退の生じないとき (堆積過程) の

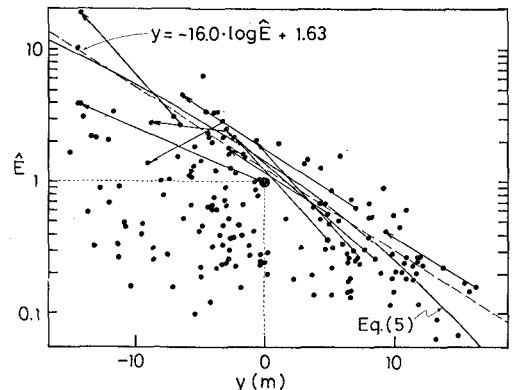


図-9 汀線位置とエネルギーフラックスの関係

データのほとんどは式(5)あるいは(6)の下側にある。

今一つ興味のあることは、図中に大きな黒丸で示した点、すなわち、平均汀線位置 $y=0$ と平均エネルギーフラックス $\bar{E}=1$ の関係を示す点が、式(6)の直線のすぐ近くにプロットされていることである。このことは、1-line-theory との関連において述べる。

5. 汀線位置の短期変動モデル

佐藤・入江²⁾、鹿島³⁾、Sunamura⁴⁾ は、海浜地形変化の外力に対する遅れを時定数の概念で説明している。しかし、前章で明らかになったことは、堆積過程の一定速度の汀線前進、侵食過程の急激な汀線後退であるので、地形変化の遅れを考慮せず、エネルギーフラックスから汀線位置の変動を予測するモデルを検討する。

i 日の汀線位置を y_i とし、そこに $i+1$ 日に $\bar{E}_{i+1}$ のエネルギーフラックスの波が作用した場合の $i+1$ 日の汀線位置を y_{i+1} とする。

[Step 1] 堆積過程(外力に関係なく 0.68 m/day で前進)を仮定して、

$$y_{i+1} = y_i + 0.68 \text{ m} \dots\dots\dots (7)$$

を計算する。

[Step 2] 堆積過程の確認を行う。もし、

$$y_{i+1} < -16.0 \cdot \log \bar{E}_{i+1} + 1.63 \dots\dots\dots (8)$$

が成立すれば、式(7)で求まる y_{i+1} を汀線位置とする。

[Step 3] 式(8)が成立しないとき(侵食過程)は、汀線位置の急激な後退が生じているとして次式によって y_{i+1} を計算する。

$$y_{i+1} = -16.0 \cdot \log \bar{E}_{i+1} + 1.63 \dots\dots\dots (9)$$

Step 1~Step 3 を一つの漸化式で表現すれば、

$$y_{i+1} = \min \{y_i + 0.68, -16.0 \cdot \log \bar{E}_{i+1} + 1.63\} \dots\dots\dots (10)$$

となる。ここに $\min \{a, b\}$ は、 a または b のいずれか小さい方の値である。

図-10(a) は、1986年3月22日~5月14日のエネルギーフラックスと汀線位置の関係をプロットしたものであり、連続する点を結んで時系列のようすを表現した。前半のデータを破線で、後半のデータを実線で結んで区別してある。また、図中の斜めの破線は式(6)を図示したものである。まず最初に式(6)に沿って急激な汀線後退が生じる。その後エネルギーフラックスが小さくなるとともに汀線位置が徐々に前進し、 $y=-5$ m付近まで達する。再びエネルギーフラックスが増大し、ついに斜め破

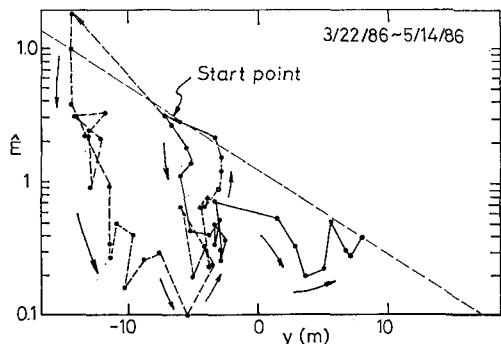


図-10(a) $\bar{E}$ と y の関係 (1986年3月22日~5月14日)

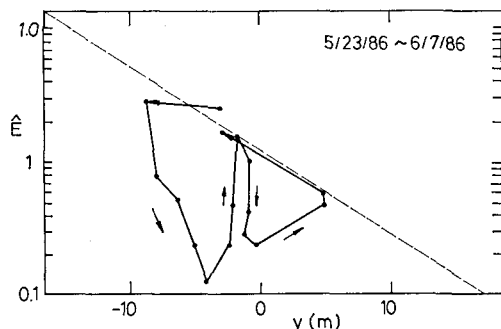


図-10(b) $\bar{E}$ と y の関係 (1986年5月23日~6月7日)

線に達して急激な汀線後退が式(6)に沿って生じる。その後、汀線は再び前進する。

図-10(b) は、図-10(a)と同様に5月23日~6月7日の間の変化を示したものである。最初に急激な汀線後退が生じた後、汀線は前進する。途中エネルギーフラックスが一時的に大きくなるが、斜め破線を越えず汀線後退は生じない。さらに汀線は前進した後再び6月6日に斜め破線上に達し、6月7日に急激な汀線後退が生じている。汀線後退後は、今までの例と同様に汀線が徐々に前進している。

このような変化は、式(10)のモデルで予測されるものと同じである⁵⁾。これら以外の4ケースについても同様な結果が得られた。

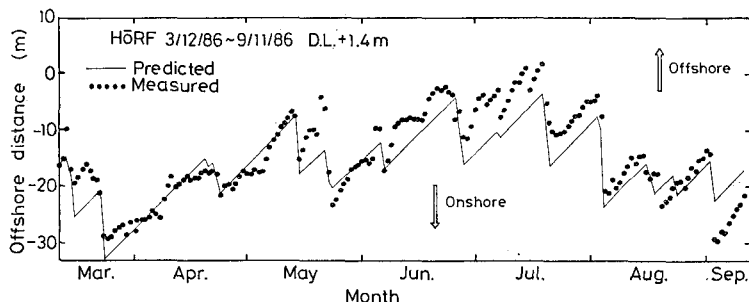


図-11 汀線位置予測結果と実測値の比較

図—11は、図—2に示したエネルギーフラックスの時系列データを用いて、式(10)の漸化式により汀線位置を予測した結果(実線)である。計算にあたっては、3月12日の実測汀線位置を初期汀線位置として与えた。予測された汀線位置の全体的な傾向および急激な汀線後退の発生状況は実測値とよく一致している。

6. 本モデルと 1-line-theory の組み合わせの可能性

岸沖漂砂に伴う短期の汀線の位置変動を予測するため、本モデルと従来の 1-line-theory を組み合わせようとするとき、基本的に重要なことは両者の考え方の整合性がとれているということである。これについては、以下の4項目が指摘できる。

(a) 碎波帯内の諸現象、特に底質運動の機構については、両者ともにブラック・ボックスとして取り扱っているので、現象のモデル化の精度は同程度である。

(b) 本モデルと 1-line-theory はともに、エネルギーフラックスを外力パラメータとしており、しかも前者はその岸沖成分(データ整理では考慮していない)、後者は沿岸方向成分を考慮しているために物理的な矛盾はない。

(c) 本モデルでは、エネルギーフラックスの時系列を使用するのに対し、1-line-theory ではある時間の平均値を使用する。しかし、本来 1-line-theory でも、時系列データを使用すべきなのであるが、そうすると波の変形計算に膨大な計算時間がかかるので、便宜的に平均値を使用しているにすぎない。

(d) 1-line-theory で予測できるのは、平均エネルギーフラックスの波が長期間作用したときの平均的な汀線位置である。図—9に示したように、平均エネルギーフラックス($\bar{E}=1$)と平均汀線位置($y=0$)の関係は、式(6)で示される急激な汀線後退の生じる線のごく近傍(図—9中の大きい黒丸)にある。言い換えると、1-line-theory で予測される汀線位置は、式(6)の関係をほぼ満足している。したがって、両方のモデルで予測される汀線位置は基本的な部分で一致すると言える。

以上のように、本モデルと 1-line-theory を組み合わせようとしたとき、考え方の整合性がとれている。しかし、本モデルは、経験的に組み立てたものであり、いまのところ、(a) D.L. +1.4m 汀線の定義が普遍的でない、(b) 碎波帯内の海底地形変化の汀線位置変動に及ぼ

す影響が明らかにされていない、(c) 潮位変動の効果、底質粒径が考慮できていない、(d) 汀線移動機構をブラック・ボックスとしている等の不備がある。

7. おわりに

本研究で得られた主要な結論は以下のとおりである。

(a) D.L. +1.4m で定義した汀線位置は、エネルギーフラックスが大きい期間は後退し、小さい期間は前進する傾向がある。堆積過程では波のエネルギーフラックスの状態に関係なく汀線は 0.68 m/day のほぼ一定速度で前進する。一方、侵食過程では、汀線の急激な後退が1~2日で生じる。汀線の急激な後退は波のエネルギーフラックスだけではなく、その波が入射する直前の汀線位置も関係している。

(b) 一定速度の汀線の前進、急激な後退をエネルギーフラックスの時系列データから予測する経験的な漸化式モデルを示した。これを用いて予測した汀線変動は実測値とよく一致した。

(c) 汀線位置の短期変動モデルと 1-line-theory を矛盾なく組み合わせて短期汀線変化の予測ができる可能性がある。

なお、詳細については別報⁵⁾を参照されたい。

最後に、HORF で継続的に現地データが入手できるようになった背景には、田中則男前海洋水理部長、入江功海洋水理部長の観測・橋建設の御尽力がある。鹿島港の波浪のデータの使用にあたっては、第二港湾建設局鹿島港工事事務所、当所水工部海象観測研究室のご協力を頂いた。ここに記し、謝意を表したい。

参考文献

- 1) 砂村継夫: 自然海岸における汀線位置の時間的変化に関する予測モデル, 第27回海岸工学講演会論文集, pp. 255~259, 1980.
- 2) 佐藤昭二・入江 功: 荒天時の海底地形変動に関する一考察, 第18回海岸工学講演会論文集, pp. 383~388, 1971.
- 3) 鹿島遼一・清水隆夫・丸山康樹・斉藤昭三: 大型造波水路による岸沖漂砂の実験的研究(2)——粗砂海浜($D_{50}=0.47$ mm)の岸沖漂砂のモデル化——, 第29回海岸工学講演会論文集, pp. 228~232, 1982.
- 4) Sunamura, T.: A predictive model for shoreline changes on natural beaches caused by storm and post-storm waves, Transactions, Japanese Geomorphological Union, 4-1, pp. 1~10, 1983.
- 5) 加藤一正 他: 汀線位置の短期変動特性とそのモデル化の試み, 港湾技術研究所報告, 第26巻, 第2号, 1987.