

沖縄・石西礁湖における海水流動構造および 濁質・淡水・熱輸送特性に関する現地観測

灘岡 和夫* ・三井 順** ・濱崎 克哉***
波利井佐紀****・田村 仁*****・鈴木 庸彦*****

琉球列島のサンゴ礁は、オニヒトデによる食害や赤土汚染、高水温によるサンゴの白化などの危機にさらされている。日本最大のサンゴ礁海域である石西礁湖は、その豊かな生態系やサンゴ幼生の供給源としての期待などから適切に保全することが重要であるが、そのための基本的な情報としての物理環境については不明点が多い。本研究では、多点係留ブイ方式による連続観測を中心とした大規模な総合的観測を行うことで、海水流動構造および出水時における淡水・濁質の動態、水温環境特性の解明を試みた。その結果、石西礁湖の物理環境は、複雑な地形に影響を受けた局所性の大きなものであることがわかり、その特徴の概要を把握することができた。

1. はじめに

石西礁湖は石垣島と西表島の間に広がる東西 20 km 南北 15 km に及ぶ海域の呼称で、日本最大のサンゴ礁海域であり、海域内の 4 地区が海中公園地区に指定されている (図-1)。沖縄・琉球列島のサンゴ礁は、近年、オニヒトデによる食害や赤土汚染、高水温によるサンゴの白化などによって生態系の劣化が著しい (例えば、大見謝ら, 1998; 茅根ら, 1999)。しかし、その中にあって、石西礁湖海域はサンゴがまとまった規模で生息しており、琉球列島の他のサンゴ礁海域に対するサンゴ幼生供給源としての役割も期待されていることから、その適切な保全のあり方を探ることが重要な課題になっている。同海域に関しては、1983 年以降、八重山海中公園研究所等によって継続的なサンゴ礁モニタリング調査が精力的に行われているが、サンゴ被度などの生物調査が主で、サンゴ礁環境を知る上で重要となる流動場等の基本的な物理環境については不明点が多い。そこで本研究では、後述する大規模な総合的観測を実施することにより、物質・熱輸送を支配する海水流動場の特性を明らかにするとともに、周辺の陸域から流入する濁質や淡水の動態や、石西礁湖内の水温環境特性を解明することを試みた。

2. 現地観測の概要

現地観測は、2002 年 10 月上旬から 12 月上旬までの約 2 ヶ月間、多数の自記式センサーによる連続観測を主体に行った。流動場観測とともに、海水流動機構の解析に必要なとなる水位・波浪観測を行い、さらに濁質・淡水・

熱輸送特性を把握するための濁度・塩分・水温に関する連続観測も実施した。これらは基本的には多点係留ブイ方式によって行ったが (図-2)、GPS 搭載小型漂流ブイによるラグランジュの流動観測も 11 月上旬に行った。また、STD による海水鉛直構造観測を行った。さらに、河川出水を捕らえるために、石西礁湖付近の 5 河川の河口域において水位・濁度を測定するとともに、それぞれの流域の代表的な地点で降水量を測定した。また、風向風速および日射量を測定した。

主要な測定機器の測定モードを表-1 に示す。電磁流速計は 1 秒間隔で 5 分間、2 時間毎の設定で測定した。圧力式波高計は、0.5 秒間隔で 20 分間、2 時間毎の設定で測定した。濁度計は 1 秒間隔で 1 分間、15 分毎の設定で測定した。水温計および塩分計は 10 分毎の設定で測定した。河川の水位計は 5 分毎の設定で測定した。

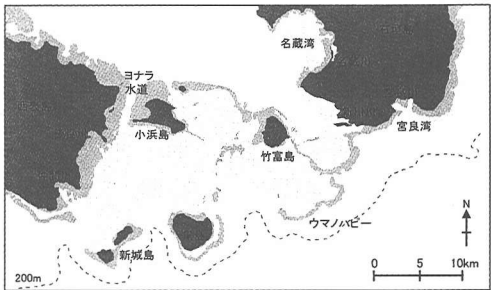


図-1 石西礁湖の地形

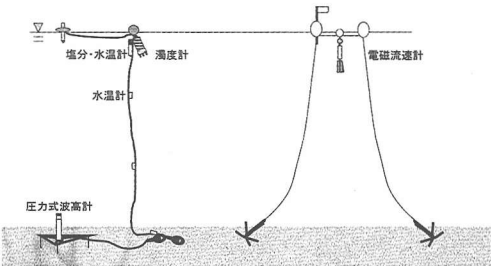


図-2 石西礁湖内の代表的な測器設置図

* フェロー 工 博 東京工業大学教授 大学院情報理工学研究科情報環境学専攻
** 東京工業大学大学院 情報理工学研究科情報環境学専攻 修士課程
*** (財)自然環境研究センター 研究員
**** 博(理) 東京工業大学助手 大学院情報理工学研究科情報環境学専攻
***** 学生会員 修(工) 東京工業大学大学院 情報理工学研究科情報環境学専攻 博士課程
***** 東京工業大学大学院 情報理工学研究科情報環境学専攻 修士課程

観測地点は、石西礁湖内およびその周辺部 24 地点、河川内および河口部 7 地点、風速・日射計測 1 地点、雨量計測 5 地点である（図-3）。そのうち、石西礁湖内・周辺では、ブイ係留による海水流動観測を 13 地点、水位および波浪観測を 10 地点、表層濁度観測を 11 地点、表層塩分観測を 15 地点、鉛直アレイ水温観測を 15 地点で行った。各地点の観測項目および水深を表-2 に示す。

3. 観測結果および考察

(1) 海水流動構造

全観測期間分の 5 分間平均表層流速値の u - v プロットを図-4 に示す。これから、ほとんどの観測地点で往復流パターンがあらわれていること、また、その変動幅と主軸方向が場所によって大きく異なっていることがわかる。これらの事実は、石西礁湖およびその周辺での流れ場が、潮流が卓越する場であり、しかも局所的な地形効果はかなり顕著に現れる場であることを示すものである。

図-5 に、全観測期間平均表層流速ベクトルを示す。

全観測期間平均風は北東風で約 4 m/s であり、これによって全体的に西へ向かう平均的な吹送流が生じていたものと考えられる。石西礁湖南側の H（黒島北東）や L 地点（黒島北西）では北西向きの平均流、また石西礁湖東側の E 地点（ウマノハピー北）では 8.8 cm/s もの大きさの西向きの平均流となっており、これらの地点では平

表-1 主な計測機器の測定モード

	測定間隔 (min)	サンプル 間隔(s)	サンプル数	測定時間 (min)
電磁流速計	120	1	300	5
圧力式波高計	120	0.5	2400	20
水位計	5	—	1	—
濁度計	15	1	60	1
塩分・水温計	10	—	1	—
水温計	10	—	1	—

表-2 各地点の水深と観測項目

地点名	水深(m)	観測項目
A	4.8	流速・濁度・塩分・水温
B	7.4	流速・濁度・塩分・水温
C	12.8	流速・濁度・塩分・水温
D	9	流速・波高・濁度・塩分・水温
E	12.8	流速・波高・濁度・塩分・水温
F	16	流速・濁度・塩分・水温
G	17	波高
H	25.6	流速・塩分・水温
I	15	流速・濁度・塩分・水温
J	5.5	流速・波高・濁度・塩分・水温
K	13.8	流速・波高・濁度・塩分・水温
L	26	流速・塩分・水温
M-a	24.5	流速鉛直プロファイル・水温
M-t	12	流速・濁度・塩分・水温
N	16	流速・波高・濁度・塩分・水温
P	6	流速・濁度・塩分・水温
O1	50	塩分・水温
O2	51	塩分・水温
O3	49	塩分・水温
O4	49	塩分・水温
W1	13.7	波高
W2	12	波高
W3	14.5	波高
W4	15	波高

均的に海水が石西礁湖に流れ込む傾向があったことを示している。一方、D 地点（竹富島南東）や M 地点（ヨナラ水道）では、石西礁湖から出ていく傾向の平均流になっている。

最小 2 乗法を用いた調和解析によって、主要 4 分潮の潮流成分を求めた結果、全ての地点で M2 分潮が卓越していることがわかった。その M2 分潮の潮流楕円を図-6、図-7 に示すが、ほとんどの地点で主軸方向がはっきりしたパターンとなっていることがわかる。また、全体的には満潮時に北向き、干潮時に南向きの流れとなっているが、例えば E 地点（ウマノハピー北）では、

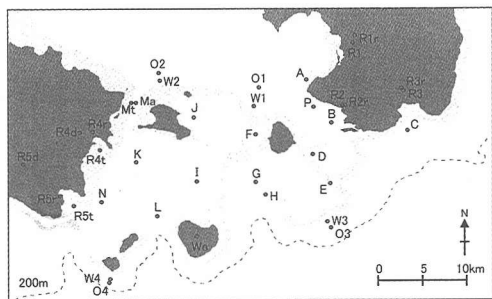


図-3 観測地点

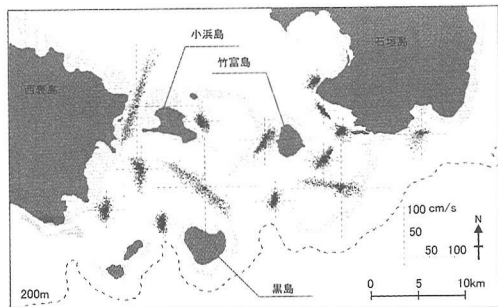


図-4 全期間の表層流速 u - v プロット

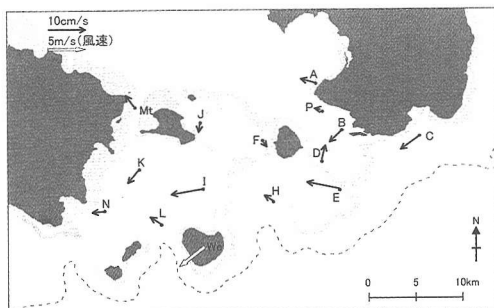


図-5 全期間の平均表層流速ベクトル

干潮から上げ潮にかけて西へ流れ、満潮から下げ潮にかけて東へ流れている。このように潮流の位相も場所によってはかなり異なる特性を示し、この海域での潮汐に対する局所的な地形効果の大きさがわかる。

つぎに、海水流動の駆動力として考えられる水位勾配の特性を見るために、10地点で測定した水位データから求めた等潮時線を図-8に示す。これから、大局的な構造として、潮汐波が南東から入ってきて、リーフなどの影響を受けながら北へ抜けていく様子がわかる。

(2) 淡水・濁質輸送特性

図-9は、石垣島新川川流域(R2)、西表島後良川流域(R4)での降水量の時系列データを示したもののだが、ここでは、石垣島と西表島の両方で大きな降水量があった10

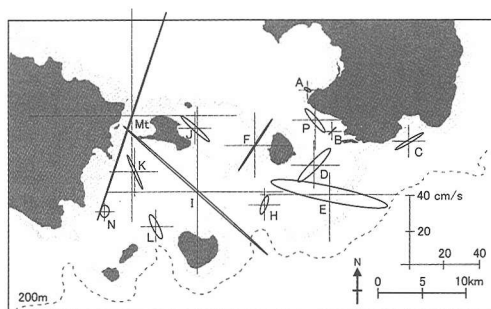


図-6 潮流楕円 (M2成分) 空間分布パターン

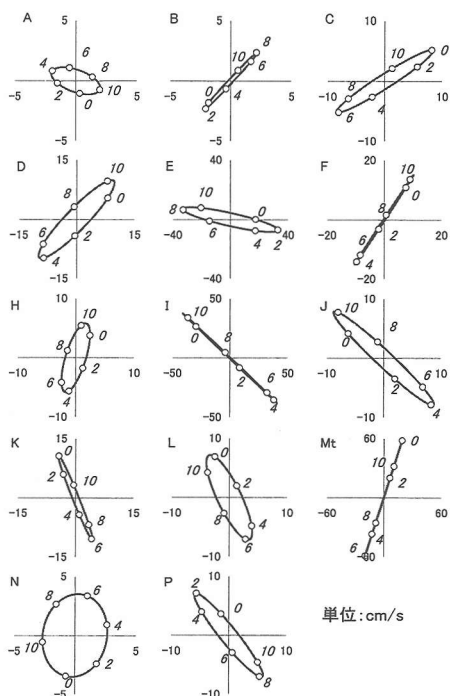


図-7 各観測地点での潮流楕円(M2成分)。斜体数字は石垣港での満潮時刻からの時間遅れを表す。

月19日前後の時期に着目して検討した結果について述べる。まず、淡水流入の程度を見るために、それぞれの地点において10月19日0:00における塩分値を出水前の基準として、出水期間中(10月19日0:00~10月21日0:00とした)最も低塩分となったときの値との差を求めた(図-10)。また濁度についても同様に、出水前の基準値と、最も高濁度となったときの値との差を求めた(図-11)。最も塩分低下が著しかったのは、N地点(西表島南東)で、10.6 psuの低下量であった。ついでC地点(宮良湾南)の6.0 psu, A地点(名蔵湾南)の4.1 psu, B地点(新川川河口)の2.8 psuであった。一方、最も濁度上昇が著しかったのはC地点で(17.6 ppm), ついでA地点(16.2 ppm), B地点(5.1 ppm), N地点(4.8 ppm), J地点(小浜島東, 1.9 ppm), Mt地点(ヨナラ水道, 1.5 ppm)の順であり、その他の地点では上昇量は1 ppm以下であった。このように、出水時の顕著な濁度上昇は小浜島周辺を除くと比較的沿岸域に限られること、また、西表島に比べて、石垣島からの赤土流入の割合が大きいことがわかる。

(3) 水温特性

平常時における基本的な水温特性を見るために、晴天微風時の典型的な表層水温の一日間平均値と変動幅を算出した結果を図-12に示す。O1地点(北東側外洋), O4地点(南西側外洋)では、比較的高水温で変動幅が小さく、その傾向は全観測期間を通じて見られた。また、C(宮良湾南), H(黒島北東), L地点(黒島北西)のような外洋に近い場所でも同じ傾向が見られた。

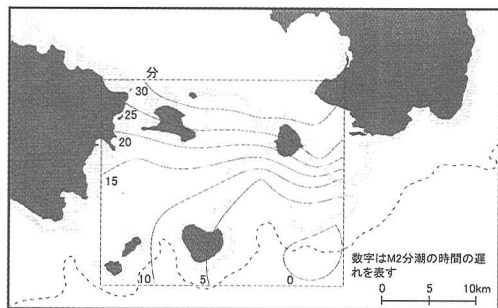


図-8 等潮時線 (M2成分)

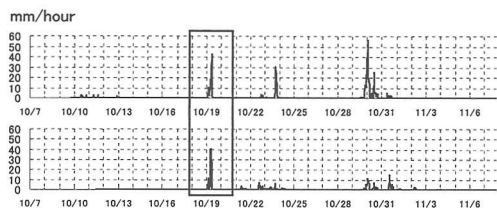


図-9 降水量 上段: 石垣島新川川流域 (R2r) 下段: 西表島後良川流域 (R4r)

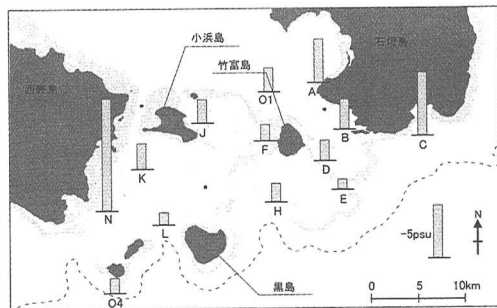


図-10 出水時 (10/19) の塩分低下量

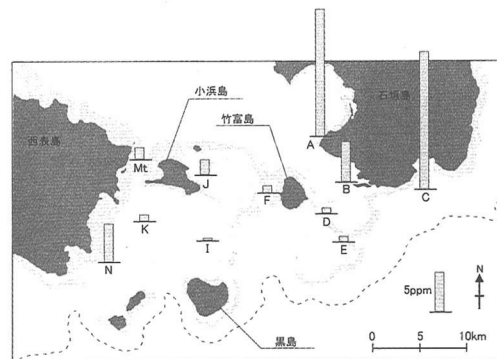


図-11 出水時 (10/19) の濁度上昇量

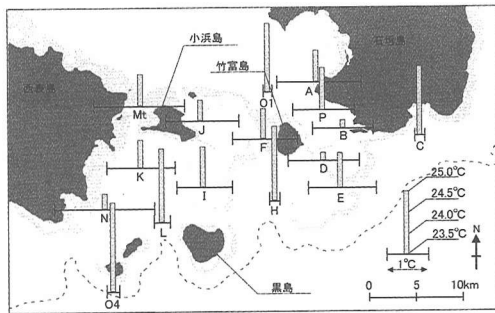


図-12 晴天微風時における表層水温の1日間平均値と変動幅

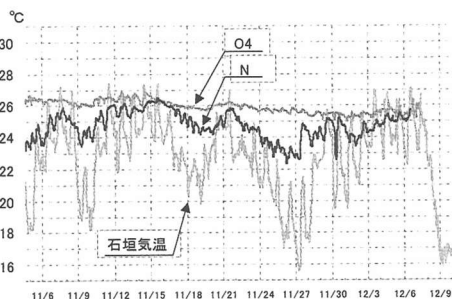


図-13 表層水温の時系列変化①

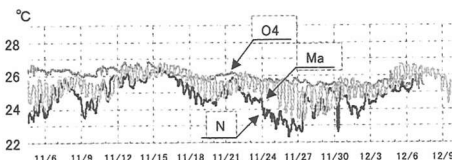


図-14 表層水温の時系列変化②

水温の時系列変化を見ると、その傾向はいくつかのグループに分けられる。外洋のO1, O4地点では水温変動は小さく、全観測期間を通してなだらかに低下していた。C, H, L地点は、外洋と似た傾向があった。それに対して、A(名蔵湾南), J(小浜島東), N(西表島南東)地点では、数日スケールの水温変動が大きく、全体的に比較的低水温であった。この数日スケールの水温変動は気温の変動と対応しており(図-13)、このことからA, J, N地点のような水深が浅く、あるいは外洋との海水交換が少ないところでは、気象擾乱に対する低温化応答幅が大きく、日平均水温はより低くなることが考えられる。また、M(ヨナラ水道), E(ウマノハピー北), I(黒島北)地点のような水路となっている地点では、潮汐周期での水温変動がかなり大きく現れることがわかった。これは、外洋側と石西礁湖内、両者をつなぐ水路の水温を比較すると明らかであるように(図-14)、この時期に石西礁湖内と外洋側の間で水温に明確なコントラストがあることから、両者の水塊をつなぐ水路部で、潮汐による周期的な水平移流効果が顕著に現れたことによる。

このように、場所によって水温特性がかなり異なることから、より定量的に各地点での水温環境の支配要因を明らかにするために熱収支解析を行った。具体的には、単位面積の水柱内における単位時間あたりの貯熱量の変

化率 ΔQ が、各検査面での熱フラックスの総和、すなわち、海表面から出入りする熱フラックス G 、海底面から出入りする熱フラックス G_{soil} 、水平方向の移流熱フラックス ΔF の和に等しいとして得られる次式に基づいた。

$$\Delta Q = G + \Delta F + G_{\text{soil}} \dots\dots\dots (1)$$

上式中における各フラックスの符号は、水柱の温度を上昇させる向きを正としている。なお、ここでは各観測点における水深の違いによるフラックスの差を取り除くために、各フラックスを水深で除して単位体積当たりの値として以後取り扱うこととする。

上式中の ΔQ は、各地点で測定した水温鉛直分布から求めることができる。 G は、日射量を S 、海面のアルベドを α 、長波放射量の収支を L 、潜熱フラックスを $1E$ 、顕熱フラックスを H として、

$$G = (1 - \alpha)S + L - 1E - H \dots\dots\dots (2)$$

で表される。 G_{soil} は地中の温度を測定していないため、底層の水温を地表面の温度と等しいと仮定して、鉛直一次

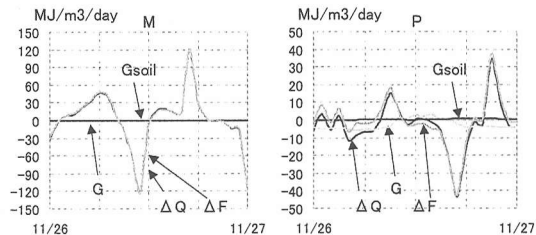


図-15 熱収支

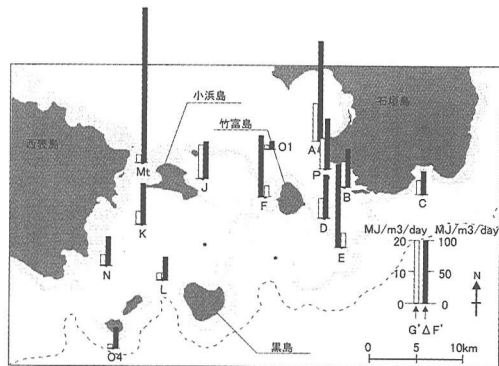
元熱伝導方程式の理論解から G_{soil} を求めた。 ΔF は式 (1) における残差として求めた。解析方法の詳細は二瓶ら (2001) や Nadaoka ら (2001) を参照されたい。

晴天微風時の代表的なケースである、11月26日における M 地点、P 地点での各項の値の時系列変化を図-15 に示す。また、各観測点での ΔF と G の 1 日間変動幅(最大値から最小値を引いたもの)をそれぞれ $\Delta F'$ 、 G' として図-16 に示す (G_{soil} はどの地点でも微小であったため示していない)。M、P 両地点について、貯熱量の変化 ΔQ には、移流熱フラックス ΔF が最も寄与しており、海底面の熱フラックスは微小であるが、これは全地点に共通であった。中でも M 地点など水路となっているところでは ΔQ と ΔF がほぼ等しく、 G や G_{soil} はほとんど寄与していない。一方 P 地点など浅いところやよどみやすいところでは移流熱フラックスはそれほど小さくなく、他の地点に比べて相対的に海表面での熱フラックスの寄与分が大きくなっている。

4. おわりに

2002 年 10 月上旬から 12 月上旬までの約 2 ヶ月間にわたって行った今回の観測では、①石西礁湖内の流動構造、②出水時における淡水・濁質の分布特性、③水温変動特性の解明を試みた。主要な結論を以下に示す。

- ① 石西礁湖内の流動場は、陸やリーフなどの複雑な地形により流速の主軸方向や変動幅、潮流の位相が場所により大きく異なる。また、E (ウマノハピー北)、H (黒島北東)、L (黒島北西) 地点では、平均的に海水が石西礁湖内に流入する方向で、D (竹富島南東)、M (ヨナラ水道) 地点では出ていく方向となっている。
- ② 河川出水の影響は、小浜島周辺を除くと、石垣島および西表島の河口付近の地点に限られていた。また、出水時における沿岸部での濁度上昇量は、石垣側の方が西表側より顕著で、石垣島からの赤土流入の割合が

図-16 ΔF と G の 1 日間変動幅

大きいことがわかった。

- ③ この時期の水温の特徴として、石西礁湖内では外洋側に比べて水温が低く、特に水深が浅い場所や外洋との海水交換が少ない地点では、数日スケールの気象擾乱に対する低温化応答幅が大きくなる。そして、外洋の暖かい水塊と石西礁湖内の冷たい水塊をつなぐ水路周辺では、水平移流効果による潮汐周期の水温変動が顕著に表れる。

今回の観測は、秋から冬にかけての冷却期に行われたものであることから、今後さらに、他の季節たとえば梅雨を含む春から夏にかけて加熱期での観測等を行う必要がある。なお、本研究は、環境省平成 14 年度石西礁湖自然再生調査による調査研究委託ならびに日本学術振興会科学研究補助金基盤研究 A(1) (一般) (研究代表者：灘岡和夫、課題番号：14205071) を得て行ったものである。

参考文献

- 大見謝辰男・仲宗根一哉・小林 孝 (1998): 石垣島白保海域の赤土汚染とサンゴ礁の現状, 沖縄県衛生環境研究所報 32, pp. 113-117.
- 茅根 創・波利井佐紀・山野博哉・田村正行・井手陽一・秋元不二雄 (1999): 琉球列島石垣島白保・川平の定例線における 1998 年白化前後の造礁サンゴ群集被度変化, 日本サンゴ礁学会, Galaxea, Vol. 1, pp. 73-82.
- 二瓶泰雄・灘岡和夫・綱島康雄・丸田直美・青木康哲・若木研水 (2001): サンゴ礁海域の温熱環境特性に関する多面的観測と解析, 海岸工学論文集, 第 48 巻, pp. 1146-1150.
- Nadaoka, K., Y. Nihei, R. Kumano, T. Yokobori, T. Omija and K. Wakaki (2001): A field observation on hydrodynamic and thermal environments of a fringing reef at Ishigaki Island under typhoon and normal atmospheric conditions, Coral Reefs, Vol. 20, No. 4, pp. 387-398.