

財団法人国土地理協会学術研究助成（2022年度）

海岸線の屈曲度に着目した

リアス海岸の発達条件に関する研究

研究成果報告書

青木 久 (東京学芸大学)

I はじめに

リアス海岸とは、岬と入り江（溺れ谷）が交互に連続し、屈曲した海岸線を呈する地形である。この地形は、河谷が発達した山地や丘陵が沈水することで形成される。リアス海岸の研究は Richthofen (1886) の定義に始まり、以来、沈降過程や形成時期が中心的課題とされ（例えば、米地ほか, 1997），発達史地形学的視点からの議論が進められてきた（吉川, 1964；三浦, 1966, 1968）。

日本列島周辺では、約2万年前の最終氷期以降の温暖化に伴う海面上昇、すなわち縄文海進によって、約6000年前に現在とほぼ同じ海水準に達したとされる。日本のリアス海岸は、氷期の低海面期に開析された山地・丘陵や台地が、縄文海進に伴い沈水した結果、形成（あるいは再形成）されたという認識がある（貝塚, 1988；山崎, 2019）。筆者は、この認識に基づき、縄文海進によって沿岸が広域的に沈水したにもかかわらず、現在リアス海岸が三陸海岸、伊勢志摩、若狭湾など限られた地域にしか分布しない点に着目した。岩石海岸の縦断形の三類型（海食台・波食棚・プランジング崖）に基づくと、リアス海岸の発達域が硬岩質のプランジング崖と対応することを見出し、「現在のリアス海岸は、縄文海進当時に形成された硬岩質の岬が侵食を受けず、長期にわたり保持された結果である」との仮説を提起した（青木, 2018）。そして、房総半島や三浦半島を対象に海岸線の屈曲度と岬の岩石強度の関係を検討した結果、強度の大きい岩石からなる岬をもつ海岸ほど屈曲度が大きいことを実証し、この仮説が支持される結果を得た（孫・青木, 2021）。

海岸線形状については、大塚（1933）による海岸線屈曲度の分析によって、屈曲度と地質年代との関係が早くから指摘されてきた。貝塚（1998）も海面変動・気候条件・岩石強度が海岸線形態に与える影響を定性的に述べている。しかしながら、岩石強度との関係を定量的に実証した研究は乏しく、これまでのところ孫・青木（2021）が唯一の例である。また岬の侵食が海岸線の屈曲に影響を与える可能性は指摘されてきたものの、実際に岬がどの程度侵食されたかを示した研究もほとんど存在しない。

以上を踏まえ、リアス海岸の発達条件を明らかにするためには、縄文海進以降の岬の侵食の受けやすさを定量的に把握し、それと海岸線の屈曲度との対応を検討することが重要であると考えた。そこで、まず国土地理院が公開している「日本の典型地形」の「海の作用による地形」のうち、「リアス式海岸（溺れ谷）」の区分を利用し、日本各地に分布するリアス海岸の海岸線の屈曲度を分析した。屈曲度（C）は次式で定義した（第2図）。

$$C = L / L_0 \quad (1)$$

ここに L_0 は調査区間の両端を結ぶ直線距離（区間長）、 L は調査区間における海岸線長さである。 C は無次元量であり、海岸線が直線的であれば $C=1$ 、屈曲が大きいほど値は大きくなる。調査対象は、リアス（式）海岸として掲載されている38地点（国土地

理院 HP では 36 地点として掲載) である(第 1 図, 第 1 表)。地理院地図上で青枠により示された範囲を調査区間とし、「距離計測ツール」を用いて両端を結ぶ直線距離を区間長 (L_0), 海岸線を細かく追跡した長さを海岸線長 (L) として計測した。区間長は 1.2~67.2 km, 海岸線長は 4.7~431.4 km と, いずれも地点ごとに大きなばらつきを示した(第 1 表)が, これらの値から, 各海岸について区間全体の平均屈曲度 (C) を算出したところ, 第 3 図に示すように, C 値は 1.7~41.6 の範囲を示した。以上の結果から, 日本のリアス海岸は少なくとも $C \geq 1.7$ を有すること, さらにその屈曲度には地域ごとに顕著な差異が存在することが明らかとなった。

本研究の目的は, リアス海岸が現在に至るまで発達し続けてきた条件を, 屈曲度の分析を通じて明らかにすることである。その際, リアス海岸に限定せずに, 屈曲度の小さい海岸を比較対象として取り上げ, 岬の侵食抵抗性, すなわち波食に対する侵食の受けやすさに注目する。この視点から, リアス海岸がなぜ特定の地域に発達しているのかを考察する。

本稿の構成は次の通りである。第 II 章では志摩半島における調査結果を示し, 第 III 章では三陸海岸から関東地方にかけての調査結果を報告する。最後に, 第 IV 章において本研究の結果を総括する。

II 志摩半島における内湾・外洋海岸の比較

伊勢志摩の海岸には、外洋（遠州灘・熊野灘）に面する海岸と、内湾（的矢湾・英虞湾）に面する海岸があり、両者の屈曲度には明瞭な差が認められる。とくに内湾の的矢湾や英虞湾は、リアス海岸の典型例とされる（内野ほか、2017）。

本章では、リアス海岸の発達条件を明らかにするために、「なぜ外洋ではリアス海岸が発達しにくいのか」というリサーチクエスチョンから出発する。すなわち、屈曲度の異なる内湾部と外洋部の海岸を比較し、両者の地形的特性の差異に着目しながら、リアス海岸の発達条件を考察する。

2-1 調査対象地域

第4図に調査対象地域の位置を示す。本調査の対象は紀伊半島東部に位置する志摩半島であり、紀伊山地から連なる山地や丘陵、英虞湾内の島嶼部を含む海岸域である。外洋に面する調査範囲は、鳥羽市石鏡町から志摩市大王崎までの遠州灘沿岸と、大王崎から西へ延びる先志摩半島の熊野灘南岸である。一方、内湾域としては的矢湾と英虞湾を選定した。

地域の大部分には海成段丘群からなる先志摩台地が広がる。旧汀線高度に基づくと、同台地は78～100mの最高位段丘、48～70mの高位段丘、30～50mの中位Ⅰ段丘、15～38mの中位Ⅱ段丘、10m以下の低位段丘の5面に区分され、特に高位面と中位面が広く発達する（内野ほか、2017）。この地域は、氷期の低海面期に河川の下刻によって谷が形成され、その後の沈水によりリアス海岸が発達した地域である。

第5図に示すように、志摩半島には北から三波川帯、秩父累帯、四万十帯が分布するが、本調査の対象海岸域はいずれも四万十帯に属する。また、大王崎沖の海底地質構造図によれば、熊野灘や遠州灘の沖合にも四万十帯の地質が広がっている。対象地域の基盤は中生代の泥岩砂岩互層、砂岩、砂岩泥岩互層からなり、同一の地質年代に属する堆積岩で構成されている。

2-2 調査方法

地形図を用いた地形計測

リアス海岸の発達度を示す指標として、海岸線の屈曲度（C）を定義した（第2図）。調査区間は隣接する岬と岬の間とし、海岸線の長さ（L）を区間長（L₀）で除した値をCとした（C=L/L₀）。Cが1に近いほど直線的、値が大きいほど屈曲の発達した海岸を意味する。

調査区間の起点と終点となる岬は、地形図や過去の空中写真に基づいて判定し、判別が難しい場合には陸上地形、例えば、海食崖背後の台地との連続性を考慮した。L

と L_0 の計測は、地理院地図の距離計測ツールを用い、スケールバー300 m 表示で行った（Appendix 参照）。

本研究では外洋（遠州灘・熊野灘）に面する海岸と、内湾（的矢湾・英虞湾の湾口部を除いた湾央・湾奥部）に面する海岸を対象とし、計 73 区間の調査区間を設定した。ただし、堤防など人工構造物が卓越する区間や、国府白浜のように砂浜（沖積低地）が広く発達する区間は除外したため、区間は必ずしも連続していない。さらに、地理院地図を用いて入江と岬の発達状況を把握、加えて、海底地形図を用いて入江・岬に対して岸沖方向の測線をそれぞれ設定し、縦断面図を作成した。

現地調査

外洋と内湾に面する海岸での波浪条件の違いを把握するために、海岸地形の特徴と作用している波の大きさを現地で観察した。次に、岬を構成する岩石強度を把握するため、四万十帯の中生代堆積岩（泥岩砂岩互層、砂岩泥岩互層、砂岩の分布域）に対し、シュミットロックハンマー計測を行い、計測値を一軸圧縮強度 (S_c) に換算した（松倉・青木、2004）。現地の岩盤はいずれも地層の変位に関連すると考えられる節理が発達しており、割れ目の間隔は概ね 10 cm～1 m である。さらに泥岩では 1～5 cm 間隔の鱗片状の微細な割れ目も加わり、小岩片がフレーク状に剥離している箇所が多く観察された。これは乾湿風化に起因する風化節理と考えられる。そのため、得られたシュミットハンマー値には割れ目の影響が少なからず反映されていると判断される。

2-3 結果

観察結果

まず、外洋に面する海岸の観察結果を述べる。第 6 図は先志摩半島南岸の大王崎から西方を望んだ外洋沿岸の様子を示す。岬の前面には、岩盤が露出した海食崖や波食棚が発達し、沖合には岩礁が点在していた。これらの地形は地形図に示された崖や隠頭岩の記号と対応する。また、波食棚の陸側、すなわち海食崖の上部は、尾根状の地形として内陸へと続いている。先志摩半島南岸における現地観察では、砂浜が卓越する区間（例えは、麦崎～和具漁港）があり、特に和具漁港以西では海食崖と砂浜が交互に分布する特徴がみられた。また船越浜では、比高の大きな海食崖や海食洞が発達していた。

一方、内湾に面する岬では、外洋沿岸とは様相が異なる。第 7 図 a に示す横山展望台から見た英虞湾の海岸線は、細かく、かつ大きく屈曲していた。第 7 図 b に示す湾奥部の岬前面では、外洋沿岸でみられるような比高の大きな海食崖や波食棚は確認されなかった。波浪状況の観察結果から、外洋に面する安乗崎では、数十 cm から数 m 程度の波が作用していたのに対し、英虞湾湾奥部では波高が数 cm 程度にとどまり、極めて静穏な波浪環境であった。

計測結果

地形図と海底地形図の読図によれば、陸上の谷は海岸で入江に連続し、海底谷へ接続する。さらに深部では谷同士が合流し、特に英虞湾では合流によって顕著な海底谷が形成されている。また、内湾の岬は陸上の尾根がそのまま海面下の尾根状の高まりに連続するのに対し、外洋の岬前面の浅海域は平坦な岩床（波食棚）となっており、尾根状の高まりは水深 10~15 m 以深で初めて確認される。このことを岸沖方向の縦断面で説明すると、入江の縦断面では、外洋・内湾ともに顕著な傾斜変換点はなく、陸域から海底までほぼ一様に深くなっていく。一方、岬の縦断面では、海食崖背後に海拔約 20 m の台地が連なり、外洋の岬では水深約 10 m まで緩傾斜の海食台・波食棚が発達する。これに対し、内湾の岬は陸上の傾斜がそのまま水面下に続き、プランジング崖を形成している。

シュミットハンマーの値から換算した一軸圧縮強度 (S_c) は、53.3~319.0 kgf/cm² の範囲をとり、湾奥のデータは、外洋に比べ、やや小さい値を示し、顕著な差はなかった。

2-4 考察

志摩半島におけるリアス海岸の分布

リアス海岸は入江と岬の二つの要素から成る。本研究ではその形成・発達を考察するにあたり、両者を区別して検討した。まず入江についてみると、地形図からは海岸段丘を刻む河谷が入江へ連続し、さらに海底谷に接続する様子が確認できた。海底では谷同士が合流して深い海底谷を形成しており、この特徴は外洋・内湾で共通する。したがって現在の海底谷は、海面低下期に河川の下刻で形成された谷が沈水後に保持されたものと解釈できる。すなわち、志摩半島の入江は約 6000 年前の沈水に伴う溺れ谷であり、現在まで保持してきたと考えられる。

第 8 図は内湾と外洋における海岸線の屈曲度を示したものである。これによると、内湾の海岸線は、 $C=1.2\sim7.6$ 、平均 3.2 であり、外洋の海岸線 ($C=1.0\sim3.0$ 、平均 1.5) と比較して大きな屈曲度をもつ区間が多いことがわかる。この結果は、横山展望台から観察される深く屈曲した海岸線景観とも整合的であり、的矢湾や英虞湾において顕著なリアス海岸が発達していることと対応する。一方、外洋に面する海岸では、屈曲度の小さい区間が連続しており、典型的なリアス海岸とはみなしがたい。第 1 章で述べたように、日本のリアス海岸は平均屈曲度が少なくとも 1.7 以上を有することから、外洋海岸の平均屈曲度が 1.5 にとどまる点を踏まえ、本研究では外洋に面する海岸をリアス海岸として扱わないことにする。

以上を踏まえると、志摩半島全域は約 6000 年前に沈水したにもかかわらず、リアス海岸が顕著に発達しているのは内湾部に限られることになる。この差異の要因を岬の侵食過程に着目して検討する。

リアス海岸の発達条件

松倉（2021）によれば、外洋における波浪作用限界水深は約 10 m、内湾では 2~4 m である。海底地形図を読むと、湾奥の岬では、陸域から水深 4 m 付近まで急傾斜のプランジング崖が連続し、緩傾斜面や侵食平坦面はみられない。さらに内湾は外洋の波から遮蔽された閉鎖性の高い環境にあり、海岸に作用する波のエネルギーはきわめて小さいと考えられる。そのため、内湾の岬は沈水以降も波食をほとんど受けず、プランジング崖が保持されてきたと解釈される。一方、外洋に面する岬では水深 10~15 m まで緩傾斜の地形面が発達している。退治崎周辺の地形図においても、尾根線は水深 15 m 以浅にみられず、それ以深で急勾配とともに現れる。これらは波の侵食による海食崖の後退によって形成された海食台であり、外洋では暴浪が襲来することにより、波食地形が発達したと解釈される。現在みられる比高の大きな海食崖は、波の侵食による継続的な後退を反映している。

以上から、外洋の岬では沈水以降の 6000 年間に波の侵食による短縮が進行したのに対し、内湾の岬では波食がほとんど及ばず、当初の形態が保持されたと考えられる。このプロセスを模式化したものが第 9 図（内湾の岬）と第 10 図（外洋の岬）である。

沈水後の海岸線の変化

約 2 万年前の最終氷期には海面が現在より 120~130 m 低下し、谷と尾根が形成された。その後の海面上昇により約 6000 年前に沈水が起こり、屈曲度の大きいリアス海岸が成立した。内湾の海岸では岬の侵食が抑制され、沈水時の屈曲度が維持されている。一方、外洋では岬が後退・短縮し、屈曲度が次第に減少して海岸線は平滑化していく。まとめると、志摩半島での矢ヶ崎や英虞湾に典型的なリアス海岸が発達するのは、波の侵食をほとんど受けず岬が保持されてきたためである。一方、外洋の海岸では強い波食により岬が短縮し、屈曲度が小さくなつたため、リアス海岸は発達しにくいといえる。したがって、リアス海岸の発達には、岬が波によって大きく侵食されず、短縮が抑制されることが重要な条件の一つであるといえる。

岬の侵食に関わる要素

最後に、岬の侵食を規定する要素について触れる。松倉（2021）は、地形変化には「地形物質」「営力」「時間」の 3 要素が関与するとし、特に岩石から成る地形物質は強度を用いて定量化できると述べている。志摩半島では時間要素を沈水以降の約 6000 年間と一定とみなせるため、岬の侵食を左右するのは岩石強度と波の営力である。シユミットハンマー計測の結果から、湾奥と外洋の岬の一軸圧縮強度に顕著な差はない。このため、侵食への岩石強度の寄与はほとんどない。一方、外洋（熊野灘・遠州灘）の海岸では太平洋からの暴浪が直接作用するのに対し、内湾では先志摩半島に遮蔽され波のエネルギーが著しく小さい。この差異が岬の侵食量を決定づけているといえる。

以上を整理すると、外洋の海岸では波の営力 (F_w) が岩石強度 (R) を上回る条件 ($F_w > R$) にあり、岬は後退・短縮して海岸線の屈曲は小さくなる。一方、内湾の海

岸では $F_w \leq R$ の条件下にあり、岬は保持され、屈曲度の大きいリアス海岸線が現在まで残されていると解釈される（第 11 図）。

2-5 まとめ

本章では、志摩半島の内湾および外洋に面する海岸を比較対象として、リアス海岸の発達条件を検討した。その結果、以下の知見が得られた。

(1) 志摩半島における海岸線の屈曲度は、内湾の的矢湾や英虞湾で大きく、遠州灘や熊野灘に面する外洋の海岸では小さい。すなわち、リアス海岸は内湾部において顕著に発達している。

(2) 岬の侵食特性を短縮量および海底地形から検討した結果、波の営力が岩石強度を下回る内湾の海岸では、岬はほとんど侵食されず短縮しにくい。一方、波の営力が岩石強度を上回る外洋の海岸では、海食崖の後退に伴って海食台や波食棚が形成され、岬の短縮が進行している。

以上より、志摩半島において顕著なリアス海岸が長期に発達しているのは内湾部に限られることから、内湾であることは、リアス海岸が長期に維持されるための必要条件であると考えられる。すなわち、内湾環境により波の営力が抑制され、波の営力が岩石強度を上回らない条件 ($F_w \leq R$) が成立することが、岬の侵食を抑え、リアス海岸の形態を維持する上で重要である。ただし、内湾であること自体がリアス海岸の発達を保証する十分条件であるとは限らず、岬を構成する岩石の侵食抵抗性や沈水前の初期地形条件など、他の要因も併せて検討する必要がある。

III 三陸海岸から関東地方にかけての太平洋岸の事例

本章では、三陸海岸南部の宮城県女川湾から神奈川県三浦半島南部までの太平洋岸の海岸を対象とし、海岸線の屈曲度と縄文海進以降、約 6000 年間の岬の侵食量を図上地形計測により把握し、リアス海岸の発達条件を検討する。

3-1 調査対象地域と調査区間

宮城県女川湾、福島県末続海岸、千葉県房総半島東部海岸、神奈川県三浦半島南部の 4 地域を調査対象とした。選定理由は、①典型的なリアス海岸と直線的な海岸線を含み、屈曲度の異なる海岸を比較できること、②いずれも背後に山地・丘陵や台地が広がり、最終氷期の低海面期には河谷が発達し、縄文海進によってリアス海岸が成立したと想定できることである。

各地域において、同一地質で構成される岬と岬を結ぶ区間を調査区間とした。その際、背後の尾根や谷が海岸線に直交する区間、すなわち縄文海進時にリアス地形が形成されたと考えられる区間に限定した。設定した区間数は、女川湾と末続海岸で各 1 区間、房総半島東部海岸で 6 区間（三浦半島の屏風ヶ浦から小湊まで）、三浦半島南部海岸で 17 区間（金田湾から荒崎海岸まで）の計 25 区間である。以下に各地域の概要を示す。

女川湾（区間 1、第 12 図 a）

三陸海岸南部の女川湾は牡鹿半島北東部に位置し、リアス海岸として知られており（石川、1964；米地ほか、1997），国土地理院でも典型的な「リアス式海岸（溺れ谷）」として扱われている。一帯は中生代の堆積岩からなる牡鹿層群で構成され、岬は礫岩・砂岩・砂質頁岩からなる月の浦累層でつくられる。岬間の直線距離は約 6 km で、岬と入江が交互に連なり、深い入江が発達する。岬前面にはプランジング崖や波食棚がみられる。

末続海岸（区間 2、第 12 図 b）

福島県いわき市の末続海岸は、中新統白水層群三沢層の砂岩泥岩互層および礫質砂岩からなり、南北方向に海食崖が連続する。背後には山地と沖積低地が広がり、低地には河川が流れ、海に流入する。海岸線は直線的で屈曲に乏しく、前面には緩傾斜の海食台が発達している。現地では護岸や消波ブロックが設置されており、激しい波食を受けてきたことがうかがえる。

房総半島東部海岸（区間 3～8、第 13 図）

房総半島東部の海岸は鮮新～更新統の上総層群から構成される。区間 3（屏風ヶ浦）は飯岡層の泥岩を主体とし、高さ 25～65 m の海食崖が約 10 km にわたり連続する。

岬や入江は乏しく、直線的海岸である。崖は背後の谷に対応して部分的に比高が低下し、河口部まで波食が及んでいる（孫・青木、2021）。崖前面には海食台が発達し、離岸堤も設置されている。区間4～6（浪花・御宿・勝浦）は砂岩泥岩互層からなる上総層群（浪花層・勝浦層）で構成され、小規模な岬がみられ、その前面に波食棚が広がる。区間7（鵜原）・区間8（小湊）は中新～鮮新統の三浦層群（清澄層・天津層）の泥岩で構成され、岬前面に波食棚を伴う。

三浦半島南部海岸（区間9～25、第14～16図）

三浦半島南部は中新～鮮新統の三浦層群からなり、北部は宮田層（砂岩・泥岩互層）、中部は初声層（凝灰質砂岩・砂質凝灰岩）、南部は三崎層（泥岩主体の互層）で構成される（小玉ほか、1980）。油壺火砕岩層は三崎層に含めた。区間9・10（金田湾）は宮田層で構成され、長い砂浜が卓越し直線的な海岸線を示す。前面には海食台が発達する。区間11～13（初声層）は長い砂浜に加え、小規模な岬があり、その前面に波食棚が形成される。区間14・15（三崎層）は岬と入江が交互に現れ、岬の前面には波食棚が発達する。区間16～18（江奈湾・毘沙門湾・宮川湾）はいずれも三崎層で構成され、約1km間隔で大きな湾が連続し、岬の前面には広い波食棚を伴う。区間19（三崎層）は岬と小規模な入江が交互に現れる。区間20（油壺湾・諸磯湾）・区間21（小網代湾）は奥深い入江と広い波食棚をもつ。特に区間20は女川湾と同様、国土地理院による「リアス式海岸（溺れ谷）」の典型例に含まれている。区間22・23（三崎層）は岬と小規模な入江が交互に現れ、波食棚を伴う。区間24・25（初声層）は直線的な海岸線を示し、岬前面に波食棚が形成される。

以上より、本章では、女川湾（区間1）と油壺湾・諸磯湾（区間20）をリアス海岸として扱う。

3-2 調査方法

海岸線形状の計測

各区間の海岸線形状を把握するため、地理院地図の距離計測ツール、またはキルビメーターを用いて2万5000分の1地形図上で屈曲度（C）を算出した（第17図）。地理院地図を用いる場合は、スケールバーを300m表示に設定して計測した。屈曲度は次式で定義する。

$$C = L_c / L_0 \quad (2)$$

ここで、 L_c は海岸線の長さ、 L_0 は岬間を結ぶ直線距離（区間長）である。 C が1に近いほど直線的な海岸を、 C が大きいほど屈曲に富んだ海岸を意味する。

さらに、リアス海岸における岬の突出度を定量化するため、岬の長さ（ L_h ）を計測した（第17図）。岬の長さは、湾奥の最奥部から岬先端までの距離とし、両側の岬の

長さが異なる場合はその平均値を用いた。計測は地理院地図または地形図上で行った。

岬の短縮量の計測

岬前面には波食棚と海食台が確認された。両者はいずれも海食崖の後退により形成される波食地形であるが、侵食が激しい場合（岩石強度が小さい）には海底まで侵食が及び海食台が、侵食が緩やかな場合（岩石強度が大きい）には水面付近に波食棚が形成される（辻本, 1985）。本研究では、この水平幅を沈水以降の海食崖の後退量、すなわち岬の短縮量（X）とみなし、以下のように計測・推定した。

波食棚の場合：地理院地図上で岬前面に分布する隠頭岩の沖側端を波食棚の外縁とみなし、その水平幅を距離計測ツールで測定した。女川湾（区間1）ではプランジング崖と波食棚が併存するが、分析では波食棚を有する海岸と判断し、その値を短縮量とした。

海食台の場合：明瞭な傾斜変換点がみられない場合、松倉（2021）が示した外洋域の波浪作用限界水深（10 m）を基準とし、海底地形図から水深10 mまでの水平幅を計測した。

以上 の方法で、各区間に岬前面に海岸線と直交する測線を数本設け、得られた値の平均を短縮量とした。

岩石強度の計測

岬を構成する岩石強度を把握するため、シュミットロックハンマーで反発硬度（R）を測定した。値は0～100を取り、大きいほど硬度が大きい。計測は松倉・青木（2004）に従い、反発硬度を求め、次式を用いて圧縮強度（Sc）に換算した（菊池ほか, 1982）。

$$\log S_c = 0.0307R + 1.4016 \quad (3)$$

ここにScの単位はkgf/cm²である。ただし、区間3・7・8については辻本（1985）に掲載された圧縮強度値を用いた。

3-3 調査結果・考察

第18図は、縦軸に屈曲度（C）、横軸に岬の短縮量（X）を示したものである。屈曲度は1.00～12.83、短縮量は30.1～2157.2 mと幅広く分布し、区間ごとの差が大きい。データにはばらつきがあるものの、全体としては図中の破線に示すように、短縮量が大きいほど屈曲度が小さくなる傾向が認められる。

短縮量が30.1～162.3 mの区間では屈曲度が大きく、岬前面には波食棚が発達している。一方、短縮量が988.5 m以上の区間では屈曲度が1に近づき、海食台が発達する。すなわち、岬前面の波食地形のタイプと短縮量の大小が対応している。またリアス海岸に相当する区間1や20は左上にプロットされ、短縮量の小さい波食棚海岸において屈曲度の大きいリアス海岸が発達しやすいことも確認できる。

では、なぜ波食棚海岸で短縮量が小さいのか。岬の短縮とは岬前面における海食崖の後退を意味する。Sunamura (1994) は、崖後退速度は波による岩石の侵食抵抗性に依存し、波食棚海岸の後退速度は海食台海岸よりも 1 オーダー以上小さいと報告している。

短縮量は約 6000 年間にわたる岬の後退速度に関係し、岩石の侵食抵抗性は強度に依存する。第 19 図は横軸に一軸圧縮強度 (S_c)、縦軸に短縮量 (X) をとったグラフである。データにはばらつきがあるものの、強度が大きいほど短縮量が小さくなる傾向がみられ、岬の短縮量が岩石強度に依存していることがわかる。とくに海食台海岸は図の左上に、波食棚海岸は右下にプロットされ、強度の大きい岩石で岬の短縮速度が小さい場合に波食棚が形成されることを示している。これは Sunamura (1994) の知見とも整合的である。

以上から、調査地域が縄文海進で沈水してリアス海岸が形成されたと仮定すると、波食棚海岸では岩石強度が大きいために岬が大きく短縮せず、沈水以降も屈曲が保持されたと解釈できる。この解釈は、区間 1 において非侵食性のプランジング崖が併存していた事実とも矛盾しない。一方、海食台海岸では約 6000 年間の激しい後退により屈曲が失われ、直線的な海岸線に変化したと考えられる。これは、地形図や現地観察で岬が乏しく海食崖が直線的に連続している事実と調和する。

さらに、岬の長さ (L_h) と短縮量 (X) を用いて、沈水時の岬の長さを L_h+X とし、岬の残存率 (P) を次式で定義する。

$$P = L_h / (L_h + X) \quad (4)$$

P は沈水時の岬の長さに対して現在どの程度残存しているかを示す指標であり、言い換えれば「岬の短縮されにくさ」を表す。第 20 図に示すように、残存率が大きいほど屈曲度も大きい傾向がみられる。とくに区間 1 や 20 のリアス海岸では P が 0.95 以上と高く、短縮率が低いことがわかる。したがって、リアス海岸の発達には岬の残存率の高さ、すなわち岬が短縮されにくいことが重要である。さらに、この残存率が岩石強度の大きさと関連することを踏まえると、本結果は青木 (2018) が指摘した岬の侵食抵抗性によるリアス残存説を支持するものといえる。

3-4 まとめ

本章では、宮城県女川湾、福島県末続海岸、房総半島東部海岸、三浦半島南部海岸を対象に、縄文海進（約 6000 年前）以降の岬の短縮量を定量的に計測し、海岸線の屈曲度との関係からリアス海岸の発達条件を検討した。その結果、次の知見が得られた。

(1) 海岸線の屈曲度は岬の短縮量に依存し、短縮量が大きいほど屈曲度は小さくなる傾向が認められた。さらに、短縮量は岩石の圧縮強度と関係し、強度が大きいほど短縮量は小さい。リアス海岸は、岬の短縮量が数十～数百 m にとどまる、強度の大

きい海岸で発達していた。

(2) 岬の短縮量と現在の岬の長さから沈水当時の岬の長さを推定し、残存率を算出した結果、女川湾や油壺湾・諸磯湾などのリアス海岸で残存率が高いことが明らかとなつた。これは、岩石強度の大きい海岸では侵食が抑制され、リアスの形状が長期間維持されてきたことを示唆する。すなわち、リアス海岸の発達には、岬の波食に対する高い抵抗性が関係していると考えられる。

IV リアス海岸の発達条件に関する総括的検討

本研究では、海岸線の屈曲度を指標として、リアス海岸が現在まで発達・維持されてきた条件を検討した。第Ⅰ章では、全国のリアス海岸を対象に屈曲度を分析し、日本のリアス海岸は少なくとも一定以上の屈曲度を有すること、さらにその値には地域差が存在することを示した。これにより、屈曲度がリアス海岸を客観的に評価する有効な指標となり得ることが確認された。

第Ⅱ章では、志摩半島を対象に、内湾と外洋に面する海岸の屈曲度および岬の侵食特性を比較した。その結果、志摩半島全域が繩文海進によって沈水したにもかかわらず、顕著なリアス海岸は的矢湾や英虞湾などの内湾部に限られることが明らかとなつた。この差異は、内湾では波の営力が小さく岬の侵食が抑制される一方、外洋では波の侵食により岬の短縮が進行するためであると解釈された。

第Ⅲ章では、三陸海岸から関東地方にかけての太平洋岸を対象に、岬の短縮量を定量的に評価し、海岸線の屈曲度との関係を検討した。その結果、岬の短縮量が大きい海岸ほど屈曲度が小さくなる傾向が認められ、リアス海岸は岬の短縮が小さい海岸において発達することが示された。さらに、岬の短縮量は岩石の強度と密接に関係していることが明らかとなつた。

以上の結果を総合すると、リアス海岸の成立には沈水という初期条件が必要であるものの、その後の長期的な維持には、波の侵食による岬の短縮が抑制されることが重要であると考えられる。すなわち、波の営力 (F_w) が岩石強度 (R) を上回らない環境条件 ($F_w \leq R$) が成立することが、リアス海岸が現在まで残存するための重要な条件の一つであるといえる。

また、本研究は、リアス海岸を単なる沈水地形として捉えるのではなく、沈水後にその海岸線の形態がどの程度、保持されてきたかという視点から検討した点にも特徴がある。本研究の結果から、リアス海岸の発達過程は、①沈水による屈曲地形の生成、②沈水後における岬の侵食量の差異、という二段階のプロセスとして整理される。波の侵食が起こりにくい環境では波の侵食が抑制され、岬の短縮が小さいため、沈水時に形成された屈曲が長期にわたり維持される。一方、波の侵食が活発な環境では岬の短縮が進行し、屈曲は次第に失われる。このように、リアス海岸の現在の分布は、沈水後の岬の侵食速度の差異を反映した結果であると解釈できる。

Appendix : 紙媒体の 2 万 5,000 分の 1 地形図と地理院地図から得られた値の比較

本研究では、海岸線の長さを計測するために、地理院地図の距離計測ツールを用いた。地理院地図は拡大・縮小が可能であり、画面左下には常にスケールバー（30 m, 50 m, 100 m, 300 m, 500 m, 1000 m）が表示される。縮尺が大きい場合、例えば、30 m 表示では、紙媒体の 2 万 5000 分の 1 地形図では判読できない、波食溝などの微地形が描出され、より細かく追跡できる。そのため、使用するスケールによって得られる海岸線長の値は大きく変動する可能性が高い。一方、従来の方法として、2 万 5000 分の 1 地形図を用い、キルビメーターなどで海岸線をなぞり、長さを計測する方法がある。

本研究では、地理院地図のスケールバーが 300 m と表示される画面で計測を行ったが、その理由はこの画面で得られる値が 2 万 5000 分の 1 地形図からの計測値と最も近似することを確認したためである。以下に、この判断に至った調査手順と結果を報告しておく。

三浦半島の海岸線 18 区間について、まず 2 万 5000 分の 1 地形図（以下、単に地形図と呼ぶ）を用い、キルビメーターで各区間を 3 回追跡して長さを計測し、その平均値を代表値とした。次に、地理院地図を用い、スケールバーが 30 m, 50 m, 100 m, 300 m, 500 m, 1 km と表示される各条件下で距離計測ツールにより 18 区間の海岸線を細かく追跡し、その長さを計測した。これらの値を用いて、横軸に地形図による計測値（x）、縦軸に地理院地図の計測値（y）をとり、スケールごとにプロットした結果が第 21 図である。図中には基準線として $y=x$ （両者の値が完全に一致する状態）を示し、その線からのずれが小さいほど、地形図の値に近いことを意味する。さらに、最小二乗法により原点を通る直線で近似した結果は以下の通りである（決定係数を併記）。

$$\begin{aligned} \text{スケールバー } 30 \text{ m} &: y = 1.14x, R^2 = 0.89 \\ \text{スケールバー } 50 \text{ m} &: y = 1.12x, R^2 = 0.90 \\ \text{スケールバー } 100 \text{ m} &: y = 1.07x, R^2 = 0.93 \\ \text{スケールバー } 300 \text{ m} &: y = 0.97x, R^2 = 0.98 \\ \text{スケールバー } 500 \text{ m} &: y = 0.87x, R^2 = 0.97 \\ \text{スケールバー } 1 \text{ km} &: y = 0.78x, R^2 = 0.96 \end{aligned}$$

これらを見ると、縮尺によって値がどのように変化するかがわかる。縮尺が大きい（30 m や 50 m 表示）の場合は、細かい凹凸まで拾うため、海岸線は地形図より長く計測され、データは、図中において直線 $y=x$ の左上にプロットされる傾向がある。逆に、縮尺が小さい（500 m や 1 km 表示）の場合は、細かい凹凸が平滑化されてしまい、地形図より短く計測され、データは右下にプロットされる傾向がある。このことから、100 m 表示はやや過大、300 m 表示が最も基準線に近く、両者の対応関係が安定して

いると判断できる。すなわち、地理院地図において海岸線の長さを計測する際、縮尺が大きすぎると、細かく拾いすぎて長くなる、縮尺が小さすぎると、短くなるという傾向をもつ。そして 300 m 表示は、2 万 5000 分の 1 地形図を用いた値にもっとも近いという結果を得た。したがって、本研究では、地理院地図を使って海岸線長を評価する際に、2 万 5000 分の 1 地形図を用いた従来手法との整合性を考慮し、スケールバーが 300 m 表示となる条件で計測した。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、東京学芸大学教育学部学生の關 汐音さん、住本冬羽さん、平野優人さん、峯岸寛奈さんには多大なご協力をいただきました。ここに深く感謝申し上げます。また、本研究の遂行に際し、ご支援を賜りました公益財団法人国土地理協会に心より御礼申し上げます。

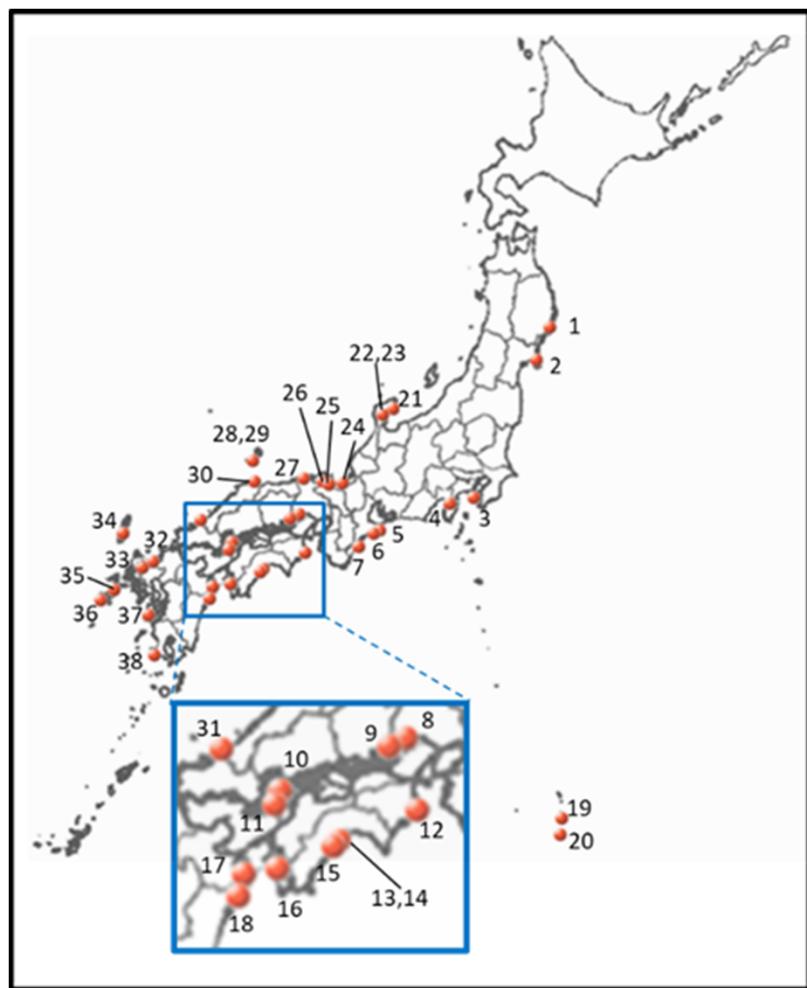
文 献

- 青木 久 (2018) : 景観写真で読み解く地形—海岸に注目してみようー. 加賀美雅弘・荒井正剛編『景観写真で読み解く地理(東京学芸大学地理学会シリーズ II 第 3 卷)』古今書院, pp.28–37.
- 石川謙三 (1964) : 牡鹿半島の海成段丘と地形発達. 東北地理, 16 (3), pp.126–129.
- 大塚彌之助 (1933) : 日本の海岸線の発達に関する或る考へ. 地理学評論, 9, pp.819–843.
- 貝塚爽平 (1988) : 『東京の自然史』紀伊國屋書店.
- 貝塚爽平 (1998) : 『発達史地形学』東京大学出版会.
- 菊池宏吉・齊藤和雄・楠 建一郎 (1982) : ダム基礎岩盤の安定性に関する地質工学的総合評価について. 大ダム, 102-103 合併号, pp.20–31.
- 久保和也・柳沢幸夫・利光誠一・坂野靖行・兼子尚知・吉岡敏和・高木哲一 (2002) : 川前及び井出地域の地質. 地域地質研究報告 : 5 万分の 1 地質図幅.
- 小玉喜三郎・岡 重文・三梨 昂 (1980) : 三崎地域の地質. 地域地質研究報告 : 5 万分の 1 地質図幅.
- 孫 小淳・青木 久 (2021) : 海岸線の屈曲度と岩石強度との関係—房総半島と三浦半島の事例ー. 学芸地理, 77, pp.139–150.
- 滝沢文教・神戸信和・久保和也・秦 光男・寒川 旭・片田正人 (1984) : 石巻地域の地質. 地域地質研究報告 : 5 万分の 1 地質図幅.
- 辻本英和 (1985) : 千葉県東部海岸の波食地形と構成岩石の物理・力学的性質. 地理学評論, 58, pp.180–192.

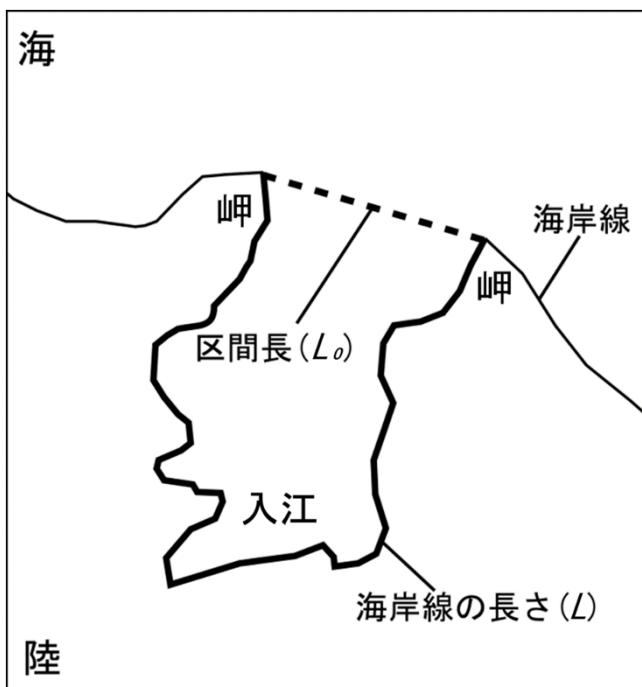
- 中村嘉男（1999）：福島県浜通り地方における「幻のリアス海岸」について－相双海岸の地形景観から－. 福島大学教育学部論集社会科学部門, 67, pp.1–5.
- 内野隆之・中江 訓・中島 礼（2017）：鳥羽地域の地質. 地域地質研究報告（5万分の1 地質図編）, 産総研地質調査総合センター.
- 松倉公憲・青木 久（2004）：シュミットハンマー：地形学における使用例と使用法にまつわる諸問題. 地形, 25, pp.175–196.
- 松倉公憲（2021）：『地形学』. 朝倉書店.
- 三浦 修（1968）：海岸段丘からみた三陸リアス海岸の発達. 地理学評論, 41 (12), pp.732-746.
- 米地文夫・今泉芳邦・三浦 修（1997）：地名「三陸リアス海岸」に関する地理学的、社会学的問題—地名「三陸」をめぐる社会科教育論（第3報）—. 岩手大学教育学部研究年報, 57 (1), pp.125–141.
- 吉川虎雄（1964）：日本のリアス海岸. 第四紀研究, 3 (5), pp.290-295.
- 山崎晴雄（2019）：『富士山はどうしてそこにあるのか』 NHK 出版新書.
- Sunamura, T. (1994) : Rock control in coastal geomorphic processes. Transactions, Japanese Geomorphological Union, 15, pp.253–272.

第1表 調査対象地点と計測結果

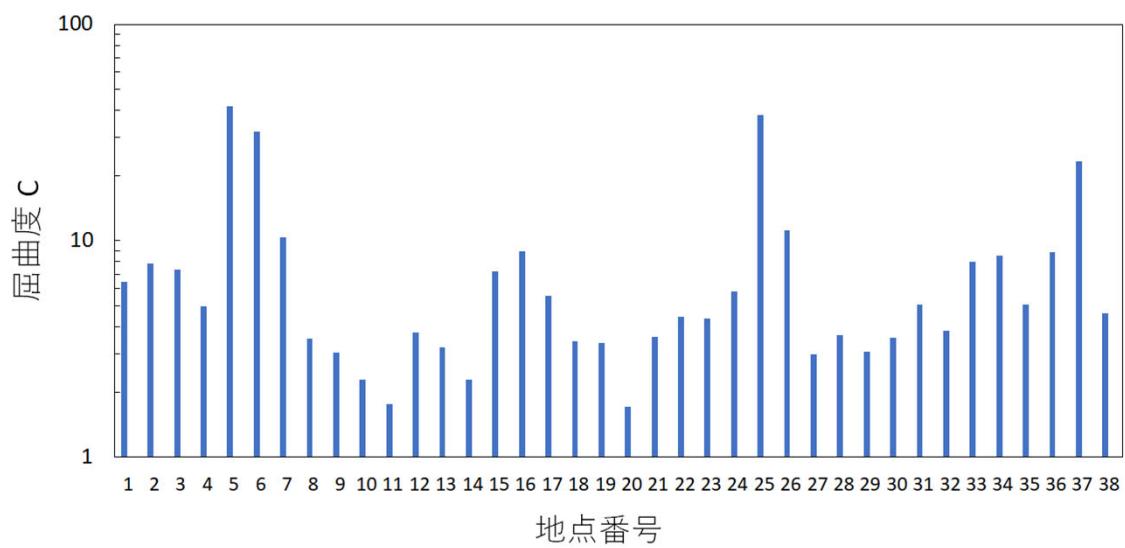
地点番号	地点名	都道府県	区間長 L_o (km)	海岸線長 L (km)	屈曲度 C
1	三陸海岸	岩手県	67.2	431.4	6.4
2	女川湾（を中心とする牡鹿半島）	宮城県	9.0	70.2	7.8
3	諸磯湾、油壺湾	神奈川県	1.2	8.9	7.3
4	江浦湾・内浦湾	静岡県	2.7	13.6	5.0
5	的矢湾・伊雑ノ浦	三重県	1.2	50.1	41.6
6	五ヶ所湾	三重県	2.9	92.0	32.0
7	賀田湾	三重県	2.8	29.3	10.4
8	室津七曲り	兵庫県	10.5	37.2	3.5
9	邑久町海岸	岡山県	5.2	15.8	3.0
10	倉橋島南岸	広島県	9.1	20.7	2.3
11	屋代島南東海岸	山口県	9.5	16.7	1.8
12	橘湾	徳島県	9.8	37.2	3.8
13	横浪半島浦ノ内湾	高知県	10.2	32.7	3.2
14	横浪半島浦ノ内湾（太平洋側）	高知県	10.8	24.8	2.3
15	野見湾	高知県	3.1	22.0	7.2
16	宇和海沿岸	愛媛県	29.7	266.0	8.9
17	日豊海岸	大分県	59.3	330.6	5.6
18	日豊海岸	宮崎県	4.3	14.8	3.4
19	父島西海岸	東京都	3.6	12.1	3.4
20	母島南部西海岸	東京都	2.7	4.7	1.7
21	九十九湾	石川県	4.0	14.3	3.6
22	七浦北湾	石川県	11.7	52.0	4.4
23	七浦北湾（能登島）	石川県	6.5	28.1	4.3
24	若狭湾	福井県	46.4	270.7	5.8
25	舞鶴湾	京都府	1.2	46.6	38.2
26	宮津湾	京都府	2.6	29.0	11.2
27	香住海岸	兵庫県	16.8	50.3	3.0
28	中ノ島一帯（東側）	島根県	10.2	37.6	3.7
29	中ノ島一帯（西側）	島根県	9.7	29.7	3.1
30	島根半島北岸	島根県	27.0	96.0	3.6
31	須佐湾	山口県	2.6	13.3	5.1
32	糸島半島	福岡県	14.0	53.7	3.8
33	東松浦半島	佐賀県	16.4	131.4	8.0
34	浅茅湾	長崎県	12.3	105.5	8.6
35	若松瀬戸	長崎県	16.2	82.1	5.1
36	玉之浦湾	長崎県	5.9	52.4	8.9
37	羊角湾	熊本県	1.6	36.9	23.2
38	坊津	鹿児島県	8.7	40.1	4.6



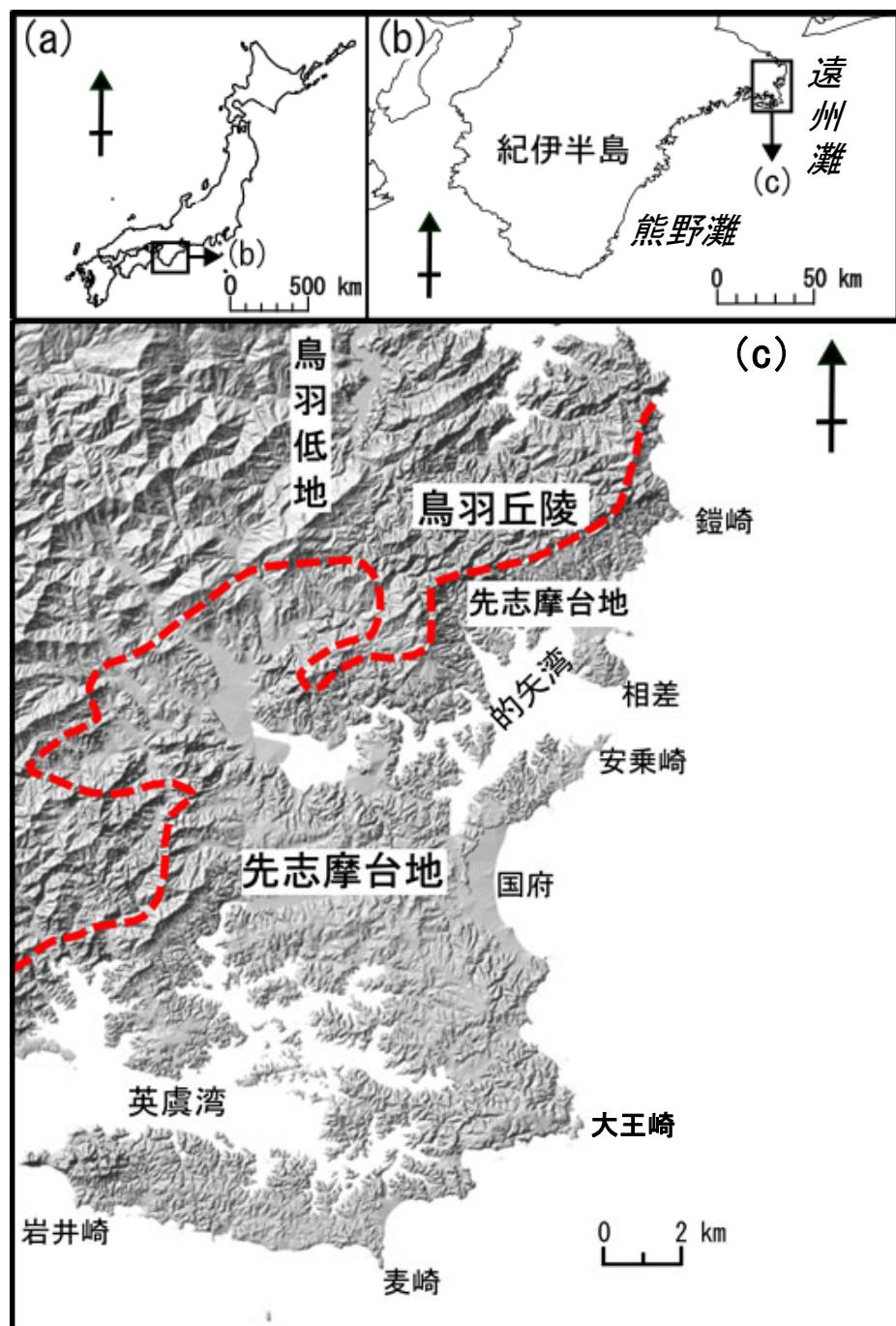
第1図 日本のリアス海岸



第2図 定義図

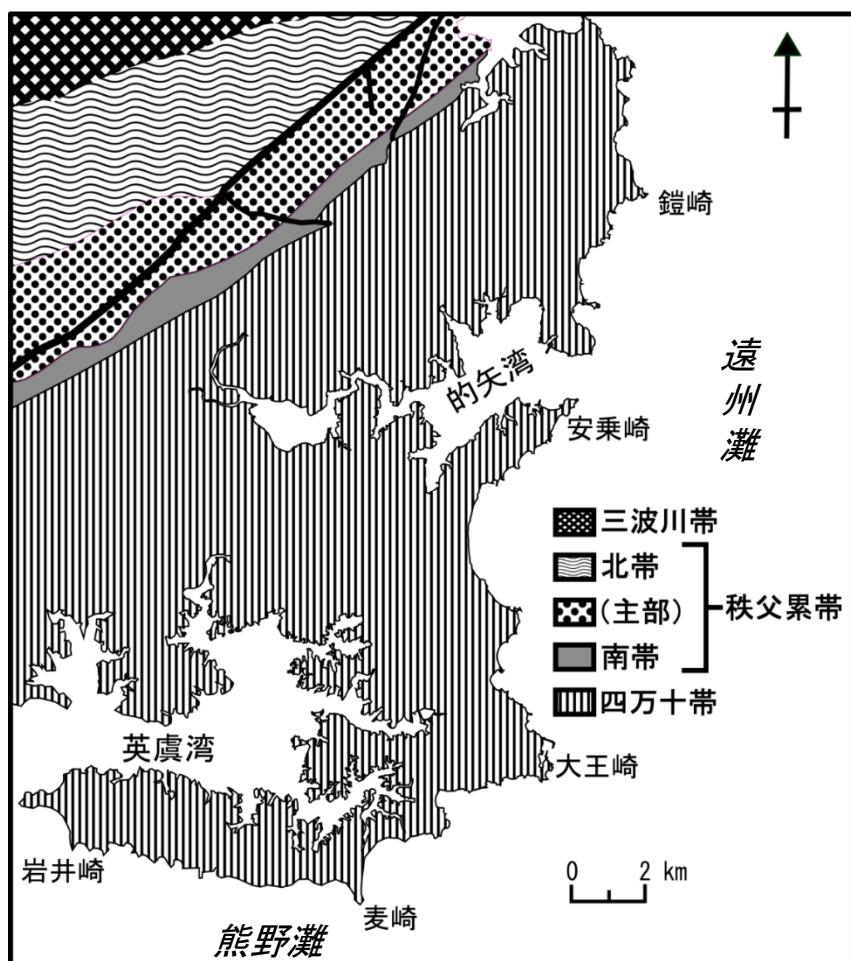


第3図 日本のリアス海岸の屈曲度



(cは内野ほか（2017）をもとに作成)

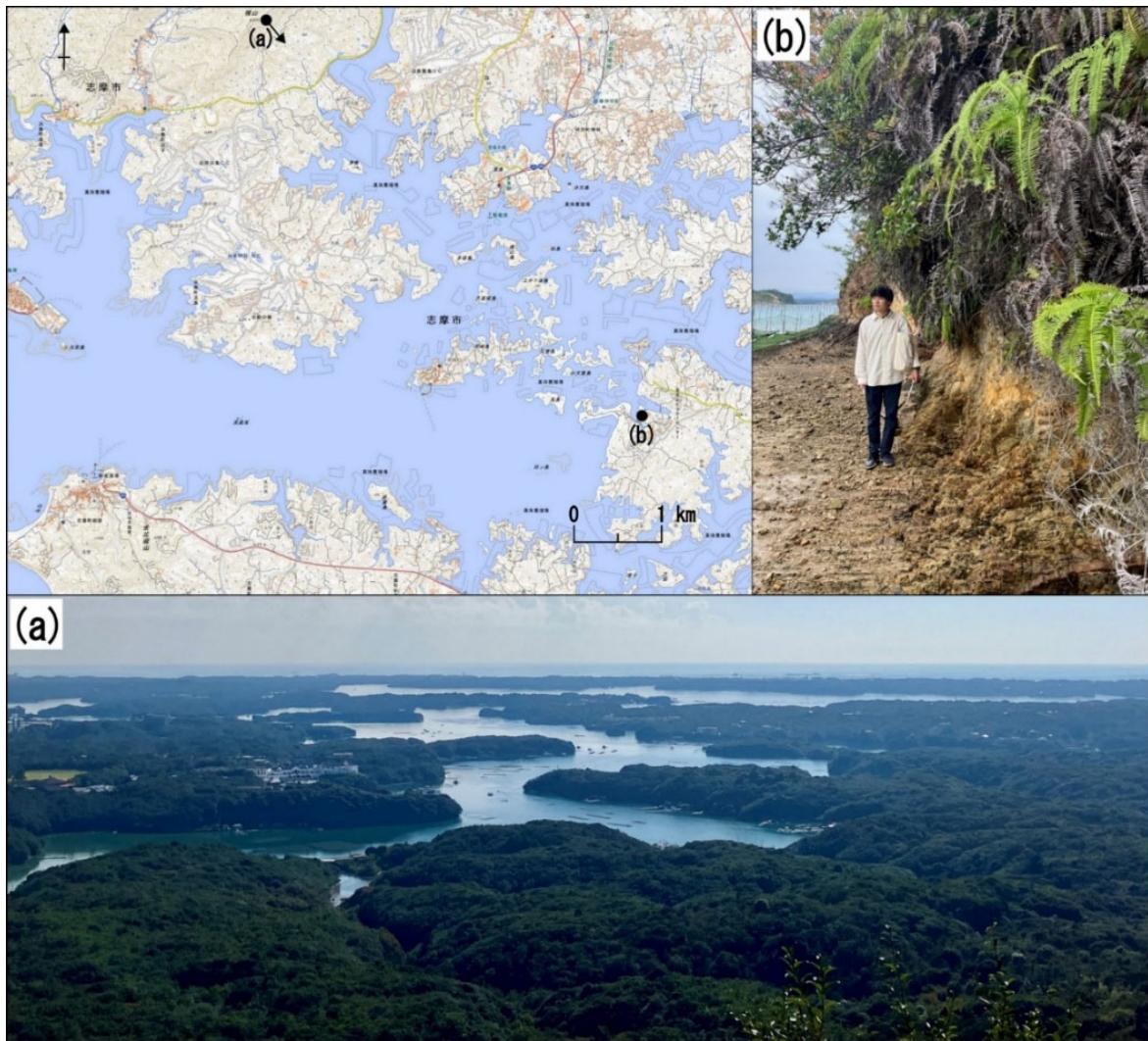
第4図 調査対象地域



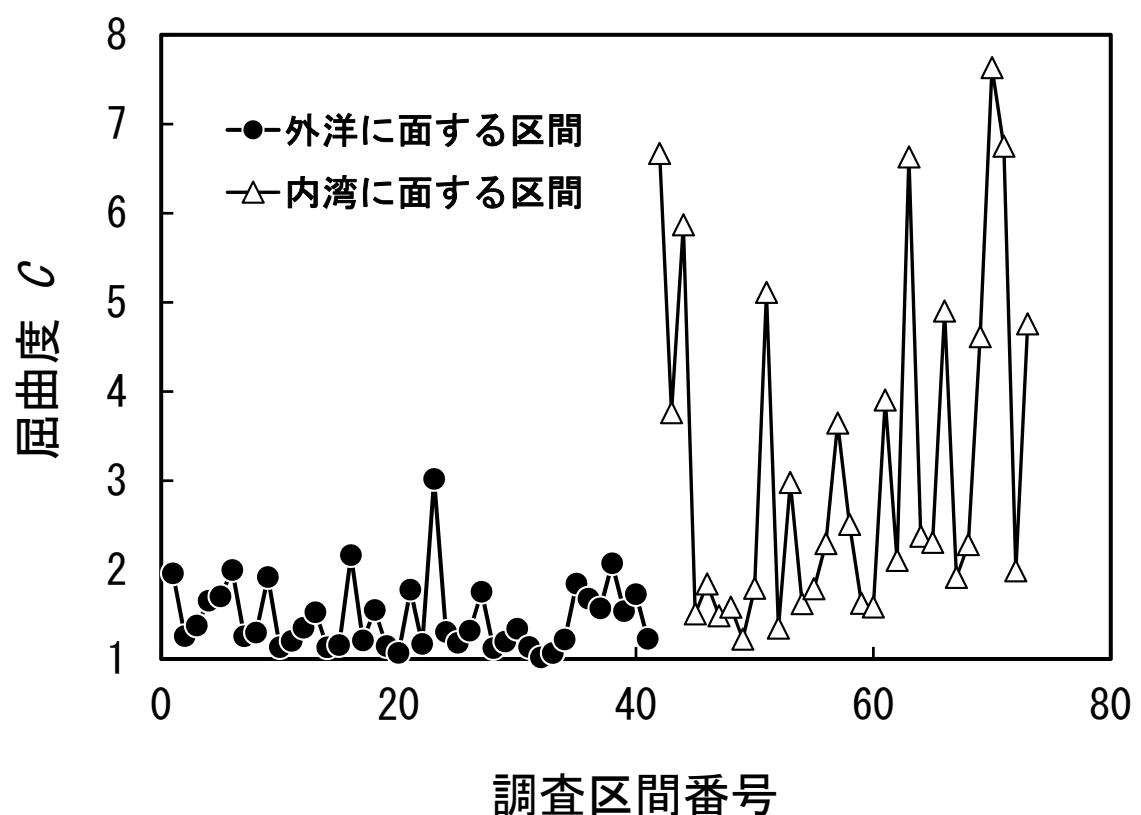
加藤（1995）の図をもとに作成
第5図 調査対象地域の地質



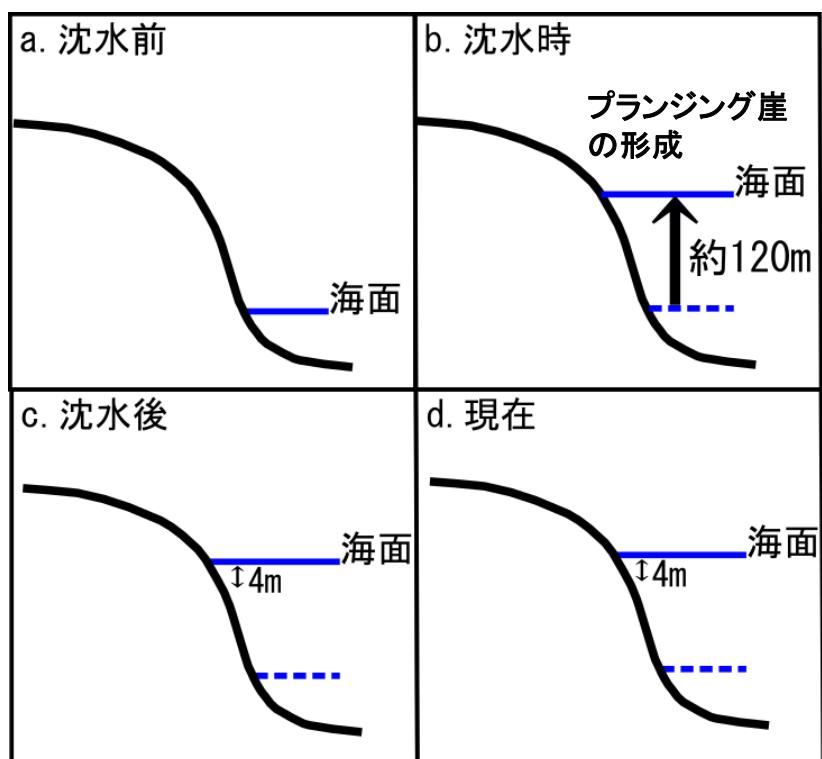
第6図 外洋に面する岬の様子：大王崎



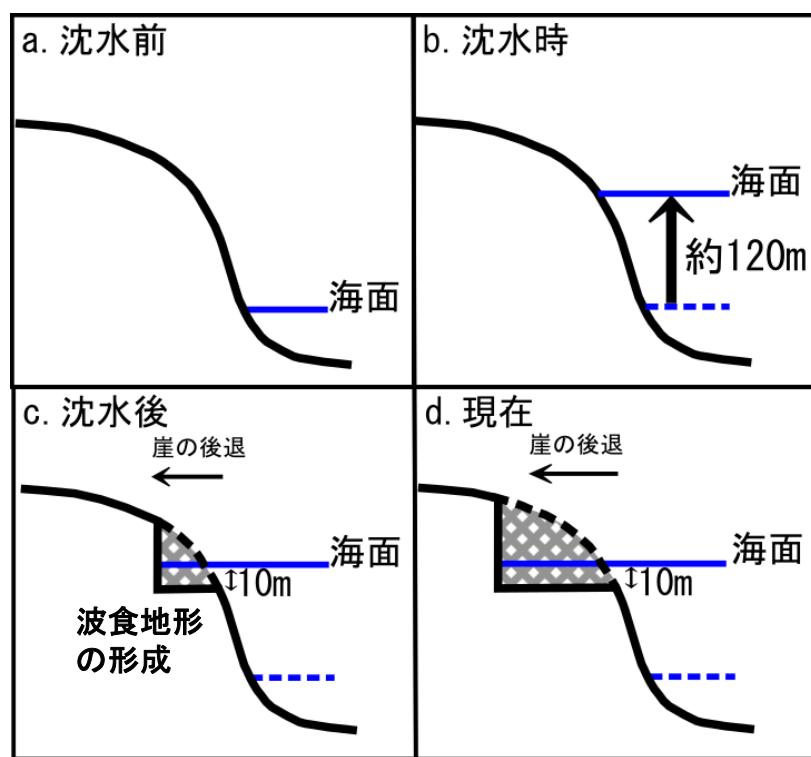
第7図 内湾に面する海岸の様子



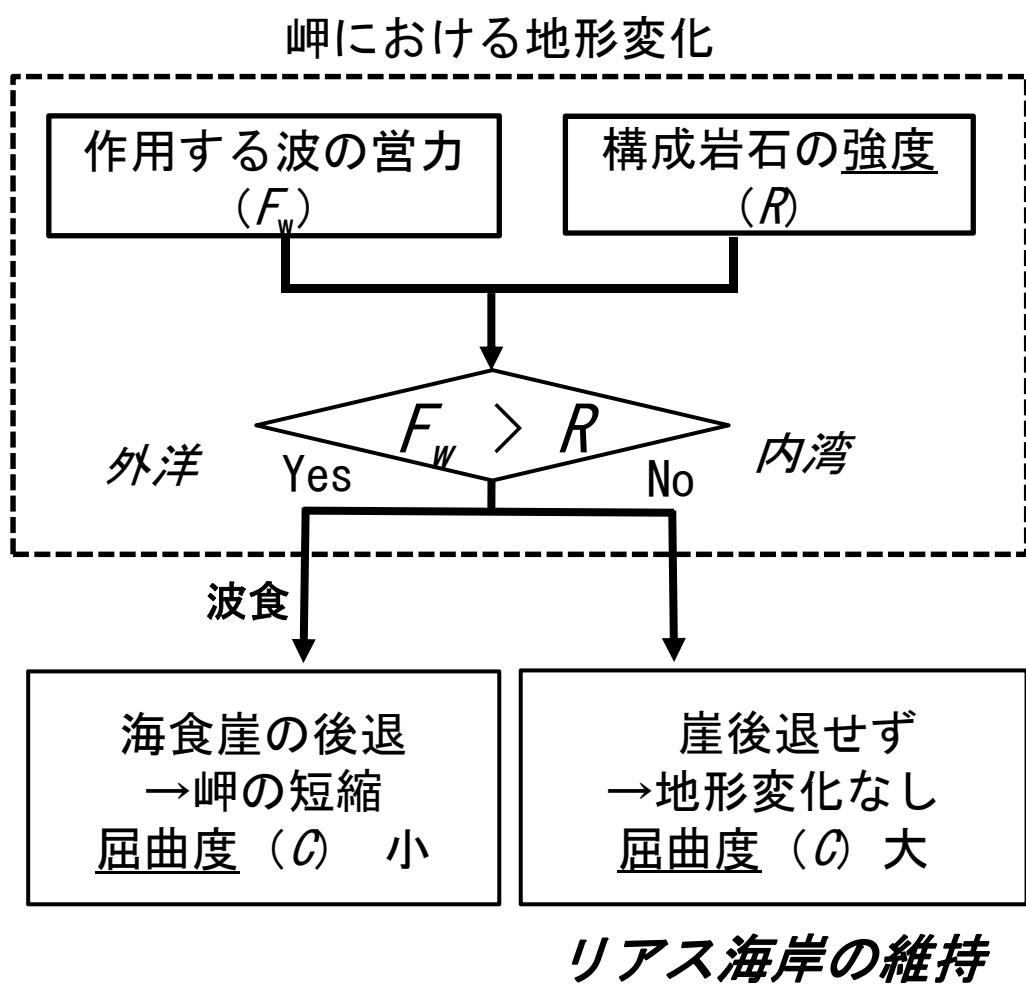
第8図 志摩半島の外洋と内湾に面する海岸線の屈曲度



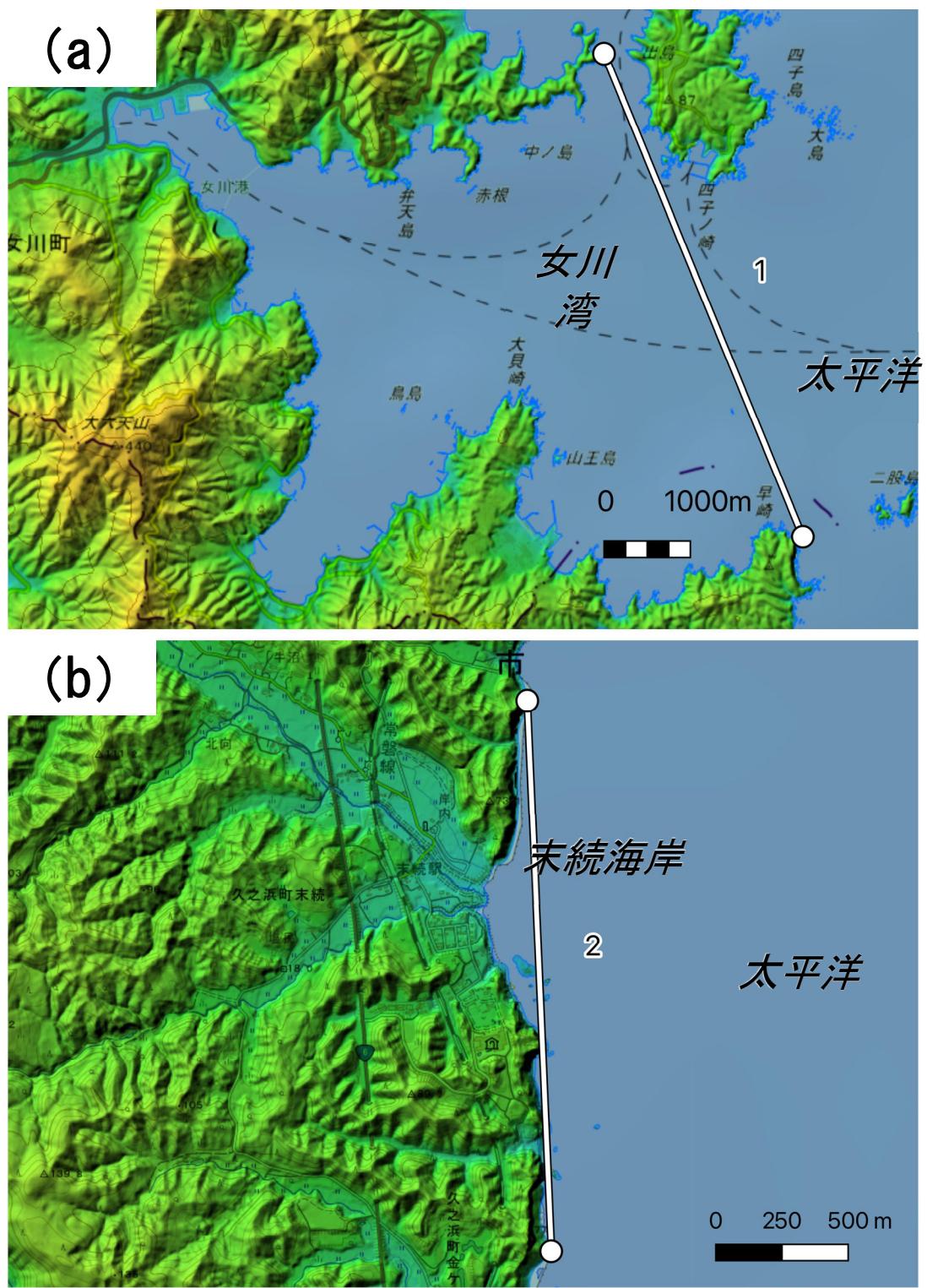
第9図 内湾における岬の縦断面形の変化



第10図 外洋に面する岬の縦断面形の変化

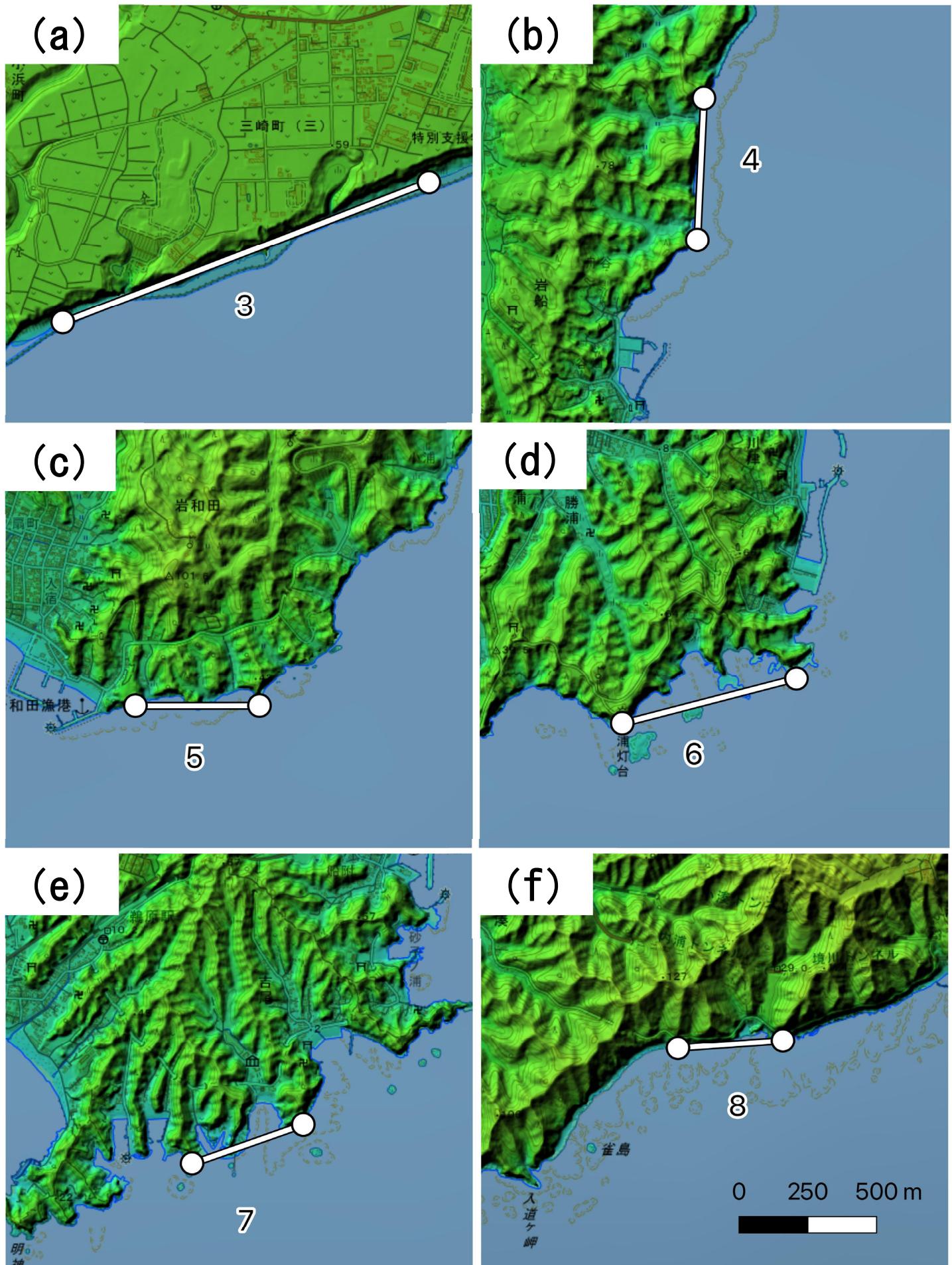


第11図 岬の地形変化に伴う屈曲度の変化

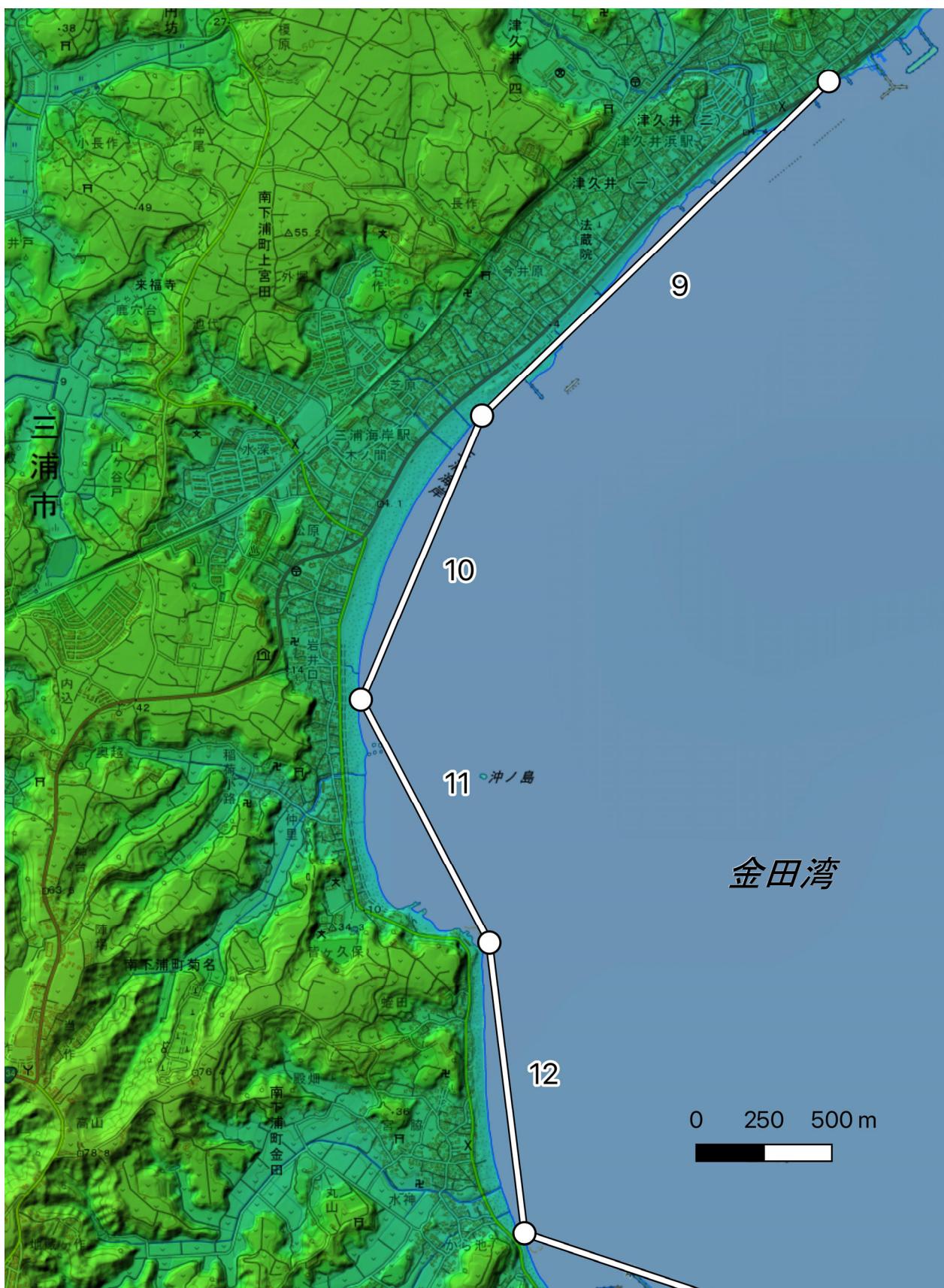


(地理院タイルを使用し、海域部は海上保安庁海洋情報部の資料を使用して作成)

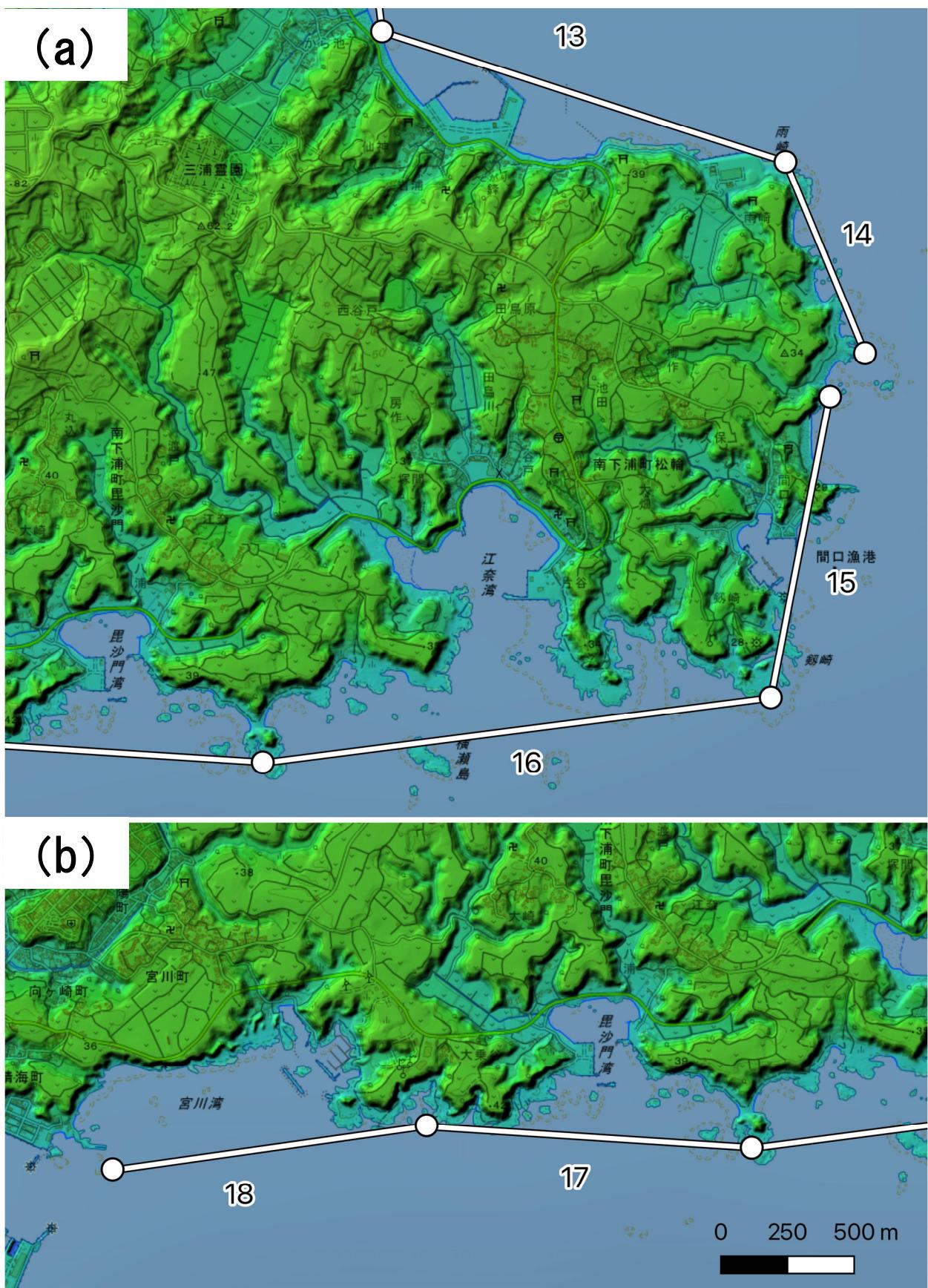
第12図 女川湾と末続海岸



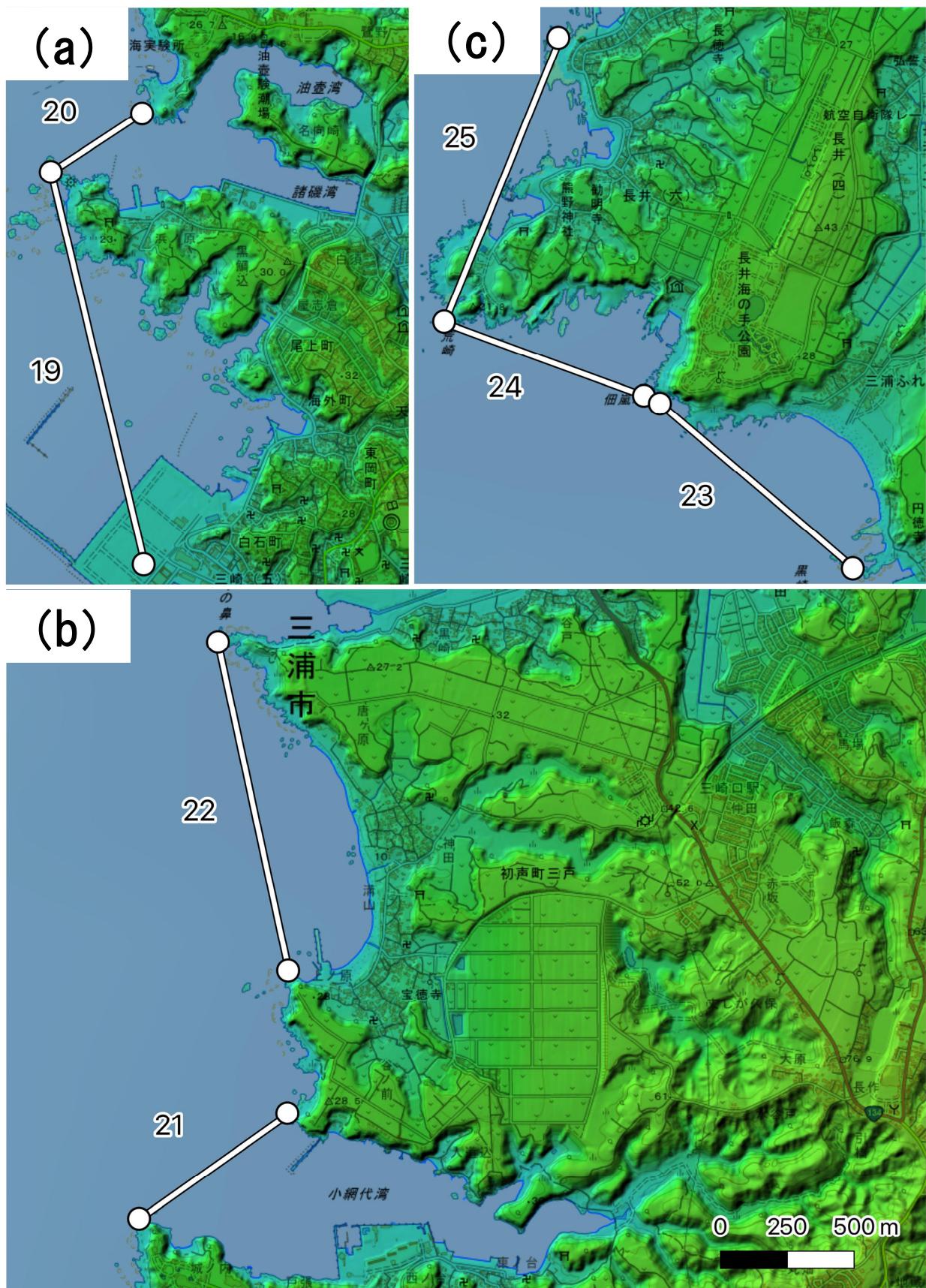
第13図 房総半島東部海岸



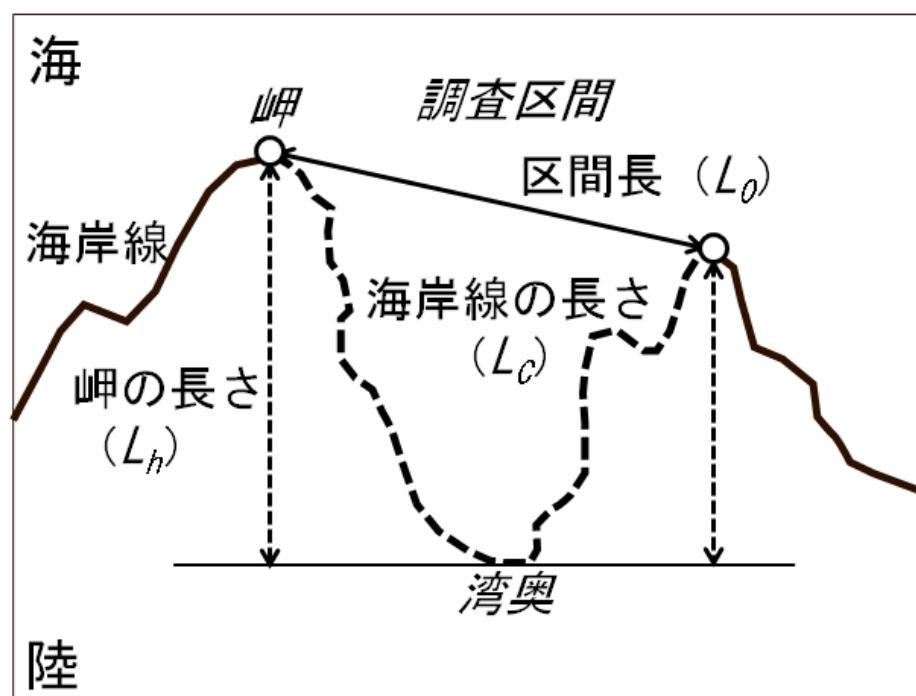
第14図 三浦半島南部の東海岸



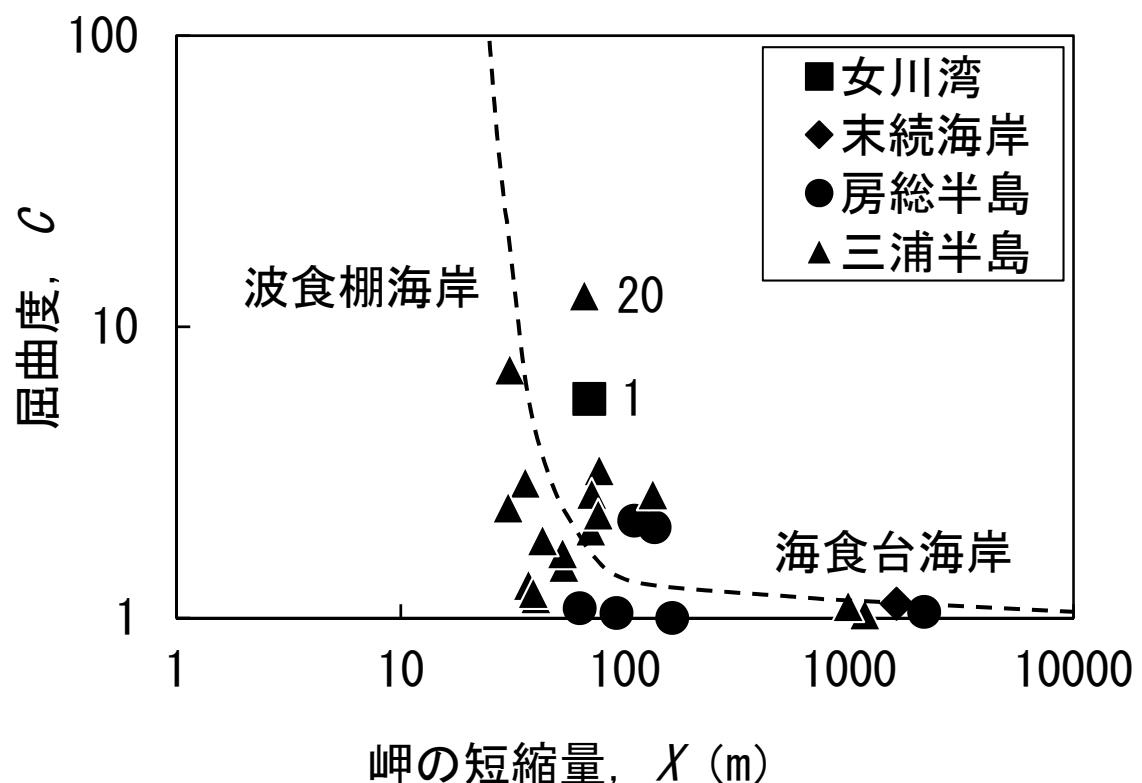
第15図 三浦半島南部の南海岸



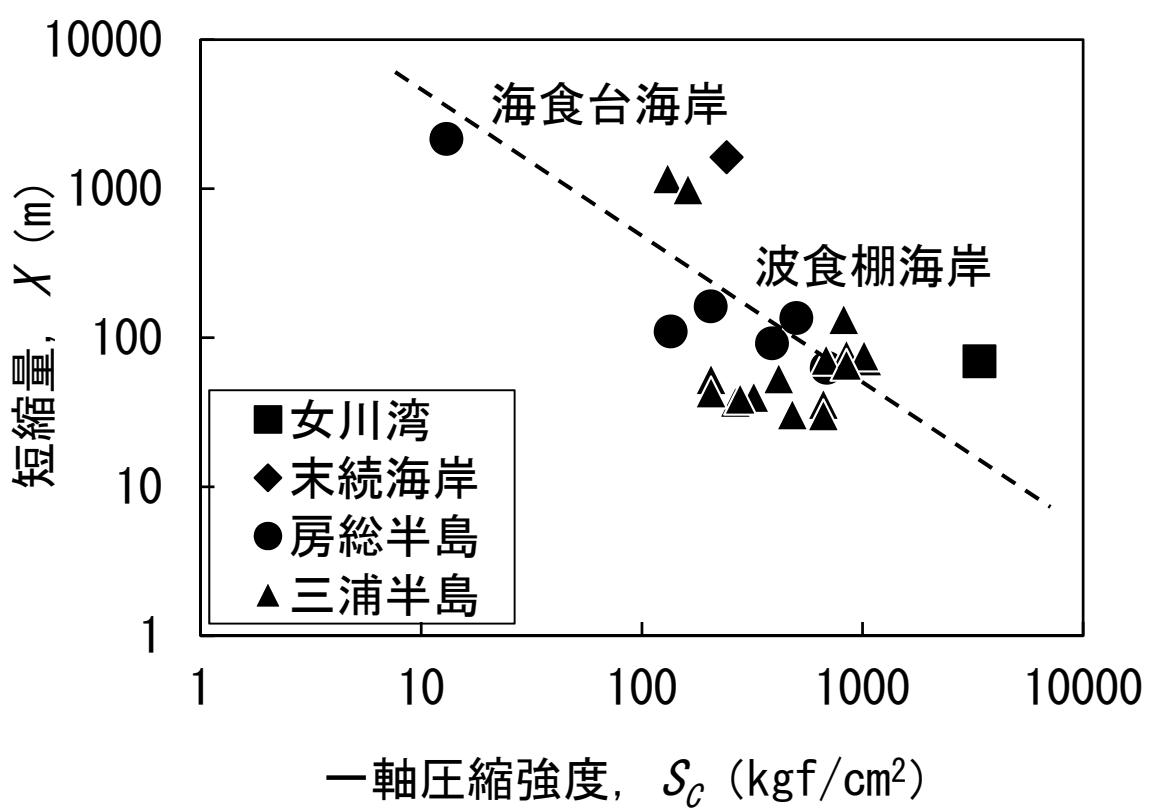
第16図 三浦半島南部の西海岸



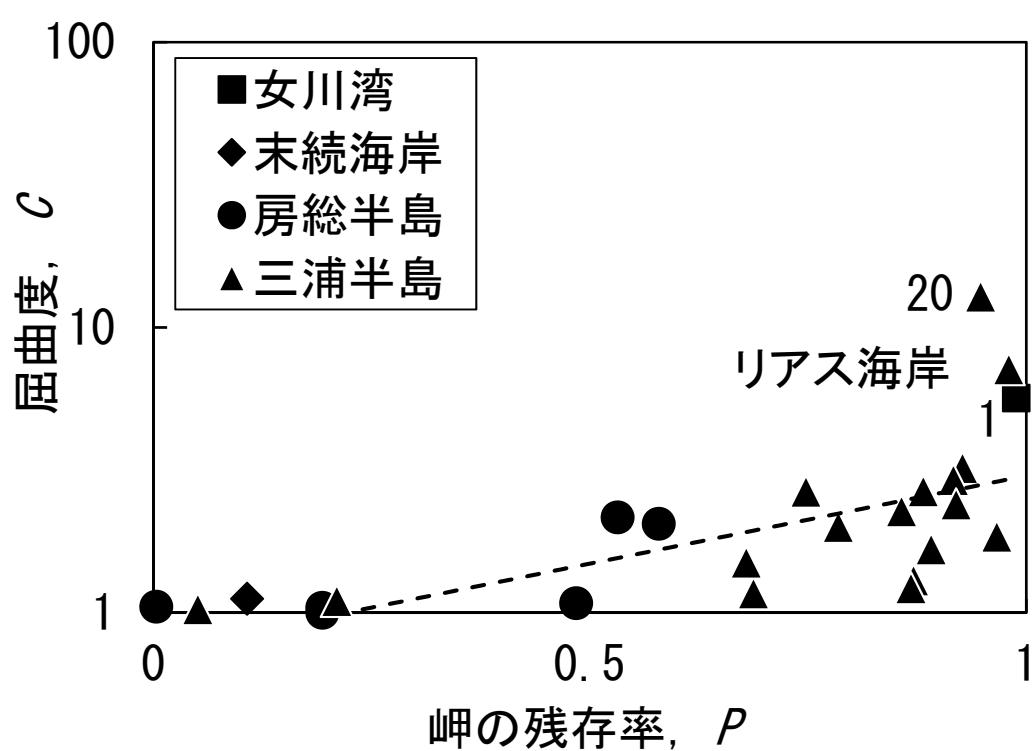
第17図 定義図



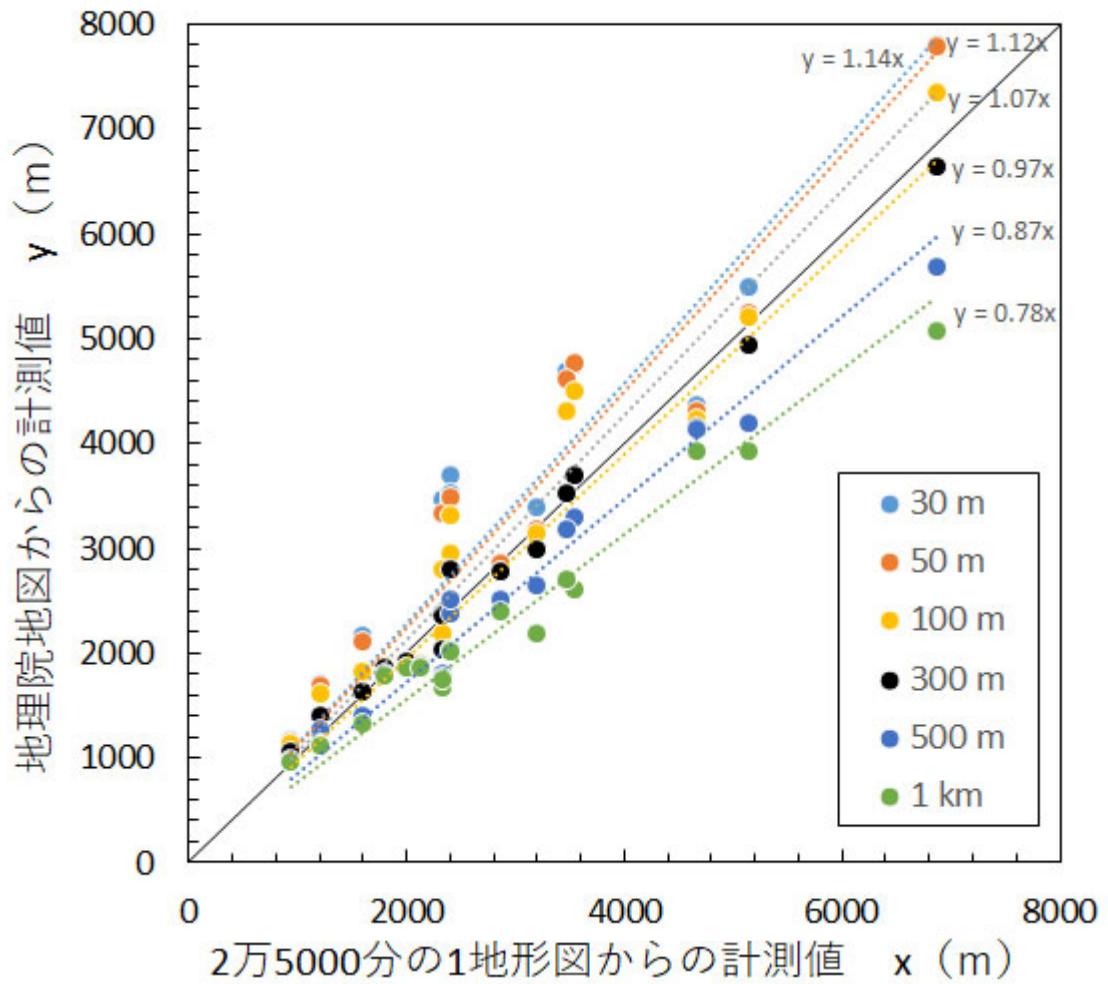
第18図 岬の短縮量と屈曲度の関係
(図中の数字は区間番号)



第19図 一軸圧縮強度と岬の短縮量の関係



第20図 岬の残存率と屈曲度の関係
(図中の数字は区間番号)



第21図 地形図と地理院地図から得られる
海岸線の長さの関係