

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of
National Institute for Land and Infrastructure Management

No.989

October 2017

東京港京浜運河周辺のシースケープの検討 －浮遊期をもつ貝類・甲殻類に着目して－

秋山吉寛・黒岩寛・岡田知也

Examinations of Seascape in the Keihin Canal of Tokyo Bay
- Case Study of Mollusks and Crustaceans -

Yoshihiro B. AKIYAMA, Hiroshi KUROIWA, Tomonari OKADA

国土交通省 国土技術政策総合研究所

National Institute for Land and Infrastructure Management
Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Japan

東京港京浜運河周辺のシースケープの検討 ー浮遊期をもつ貝類・甲殻類に着目してー

秋山吉寛*・黒岩寛**・岡田知也***

要 旨

東京港京浜運河のシースケープを、新たに定義したメタ個体群動態モデル（ハビタット評価モデル）を用いて、生態ネットワークの状況と共に変化するメタ個体群存続可能性に基づき定量評価した。京浜運河の底質および護岸基質から成る基盤の空間分布を調べ、これらの基盤の分布の、生物生息場としての適性を定量的に調べた。基盤の分布は種類ごとに異なった。この基盤の分布の生物生息場としての適性を、メタ個体群成長率 $\lambda_{\max}$ を用いて評価した結果、現状の基盤の配置は、付着性二枚貝類の存続に適しており、底生二枚貝類の存続には適さないと判断された。様々なケースのシースケープにおけるメタ個体群の存続可能性を調べると、現状のシースケープにおける存続可能性の程度や、存続可能性の高いシースケープのデザインに関する情報が得られた。生息場の面積、あるいは近接指数の変化の程度に対する、メタ個体群存続可能性、および個体数が飽和するまでにかかる時間の変化の程度を定量的に示すことができた。

キーワード：生態ネットワーク、一時プランクトン、受動的移動、メタ個体群存続可能性、シースケープデザイン

*沿岸海洋・防災研究部海洋環境研究室研究官

**沿岸海洋・防災研究部海洋環境研究室研究員

***沿岸海洋・防災研究部海洋環境研究室長

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 国土交通省国土技術政策総合研究所

電話：046-844-5019 Fax：046-844-9265 e-mail：ysk.nil-kikaku@ml.mlit.go.jp

Examinations of Seascape in the Keihin Canal of Tokyo Bay – Case Study of Mollusks and Crustaceans –

Yoshihiro B. AKIYAMA*

Hiroshi KUROIWA**

Tomonari OKADA***

Synopsis

The spatial distributions of benthic habitats (seascape) in the Keihin Canal of Tokyo Port were quantitatively assessed based on the metapopulation viability of benthos using a newly proposed habitat assessment model. Spatial distributions of the bottom and side substrata of the canal were examined and their appropriateness as habitats for benthos were quantitatively assessed. The spatial distributions of substrata varied among the substratum types. Data on the metapopulation growth rate ($\lambda_{\max}$) revealed that these substratum distributions were more appropriate for attached bivalves. Information regarding metapopulation viability on the present seascape and seascape designs that enhance metapopulation viability were obtained. The magnitude of the change in metapopulation viability and the period until the population reached saturation under a change in the habitat area or the proximity index of habitat patches were quantitatively estimated.

Key Words : ecological network, meroplankton, passive transport, metapopulation viability, seascape design

* Researcher of Marine Environment Division, Coastal, Marine and Disaster Prevention Department
** Research Engineer of Marine Environment Division, Coastal, Marine and Disaster Prevention Department
*** Head of Marine Environment Division, Coastal, Marine and Disaster Prevention Department
National Institute for Land and Infrastructure Management
Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan
Phone : +81-46-844-5019 Fax : +81-46-844-9265 e-mail : ysk.nil-kikaku@ml.mlit.go.jp

目 次

1. はじめに	1
2. 方法	2
2.1 生息場の調査.....	2
2.2 メタ個体群存続可能性の評価方法	2
2.3 メタ個体群存続可能性とシースケープの関係.....	4
3. 結果および考察	5
3.1 生息場の調査	5
3.2 メタ個体群存続可能性の評価	6
3.3 メタ個体群存続可能性とシースケープの関係	6
4. おわりに	30
4.1 まとめ	30
4.2 今後の展望	30
参考文献	30
付録A モデル生物の1成体あたりの幼生放出数および1年級群越年後生残率に対するリンク率の変化	32
付録B モデル生物の1成体あたりの幼生放出数および1年級群越年後生残率に対するリンク1本あたり 平均ネットワーク強度の変化	36

1. はじめに

沿岸域は、海洋の中でも豊かな生態系サービスを提供してくれる海域である（Costanza et al., 1997, 2014）。生態系サービスとは、人類が生態系機能から直接的あるいは間接的に受ける恩恵であり（Costanza et al., 1997）、食料や水の供給等の供給サービス（provisioning services）、気候、水質、洪水に作用する調整サービス（regulating services）、レクリエーション的、美的、精神的恩恵を提供する文化的サービス（cultural services）、土壌形成、光合成および栄養循環等の基盤サービス（supporting services）がある（Millennium Ecosystem Assessment, 2005）。生態系サービスは、私たちの社会活動および経済活動を根源から支えており、生態系サービスの豊かさは、私たちの生活の豊かさと直接的あるいは間接的に関わる。

しかし、さまざまな人間活動によって、沿岸域の生物の生息環境の改変が起き、沿岸域の生態系サービスは低下してきた（Barbier et al., 2011）。沿岸域において高い生態系サービスを再生するためには、生物の存続および繁栄に適した生息場の再生が求められる。

生息環境の改変による生態系サービスの低下は国際的な課題であり、2010年の生物多様性条約第10回締約国会議（CBD-COP10）では、生態系サービスを安定供給する豊かな生物多様性の保全のため、特に重要な区域を含む沿岸及び海域の保護地域システムやその他の効果的管理による保全に関する目標（愛知目標の目標11）が設定された。国内では生物の多様性の保全及び持続可能な利用に関する施策等を定めた生物多様性基本法の成立（2008年5月成立）を受け、2010年3月に生物多様性国家戦略2010が閣議決定された。これを踏まえて、2011年3月には環境省によって、海洋生物多様性保全戦略が策定されている。

国土交通省港湾局では、生物の生息環境の向上に向けた取り組みとして、港湾域および沿岸域において、干潟・浅場・藻場・サンゴ礁の保全・再生に加えて、生物共生型港湾構造物の設置など様々な生物の生息・育成場の保全・拡大を実施している。ただ、これまでの保全・再生では、まずは一歩でも進むことが重要であり、造成干潟や生物共生型港湾構造物等を、造れる水域に、小さなスケールでも良いから、着実に造っていくことを目指し、水域全体に渡る生態系ネットワークの視点はあまり重視されてこなかった。沿岸域の生態系を、より一層多様かつ持続可能な状態に再生させていくためには、生物の盛衰に影響を及ぼす、水域全

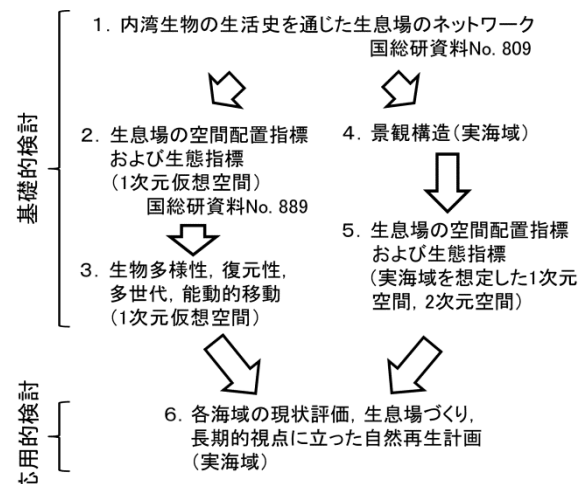


図-1 新学術テーマ「シースケープのデザイン」のロードマップ

体に渡る生物の移動や繋がりへの考慮が必要と考える。つまり、これまでの造成干潟や生物共生型護岸の断面形状の設計（部分最適な技術開発）だけでは不十分であり、水域に対する生物生息場の最適配置の検討（全体最適な技術開発）を行う必要があると考える（秋山ら、2014、2015、2016、印刷中）。

生物の豊かな沿岸域を再生するために、海洋環境研究室では、生物生息場の空間配置の検討を、新たな学術テーマ「シースケープのデザイン」として検討している（図-1）。シースケープ（Seascape）とは、海域の底生環境あるいは水柱環境中で定量化されたパッチのモザイク、空間的勾配、その他の幾何学的様式といった、ヒトが把握可能な沿岸域環境の空間的に不均一な場のことである（Boström et al, 2011）。パッチとは、モザイク状の生息場所の1単位を意味する概念である（宮下・野田、2003）。愛知目標の目標11においても、「シースケープ」は用いられており、ランドスケープと並列な概念として扱われている。

ランドスケープ（相互に作用し合う様々な生態系から成る陸域の不均一な場）では、ネットワークの検討手法として、メタ個体群モデルがHanski (1999)によって提案されている。メタ個体群とは、生物の移動のネットワークで連結し合う、パッチ状に分布する生息場上の局所個体群の集まりである。メタ個体群モデルでは、ある確率で局所個体群の絶滅および移入による回復があると仮定して、全ての生息場のうち、局所個体群の占める生息場の割合が、どのように変化するかを示す。

「シースケープのデザイン」の推進のため、過去に、

1. 内湾生物の生活史を通じた生息場のネットワークに関する検討 (秋山ら, 2014), 2. 1次元仮想空間における生息場の空間配置指標および生態指標の検討 (秋山ら, 2016), および3. 1次元仮想空間における生物多様性, 復元性, 多世代, 能動的移動に関する検討 (秋山ら, 未発表) を実施してきた (図-1). 次のステップは, 実海域をより意識した検討である. 実海域における景観構造の検討および, 実海域を想定した1次元空間, および2次元空間における生息場の空間配置指標および生態指標の検討である.

そこで本研究では, 東京港京浜運河周辺のシースケープを調査し, モデル生物の局所個体群間ネットワークの状況と共に変化するメタ個体群存続可能性の観点から, 存続可能性を高める生息場の空間配置を定量的に検討できる新たな個体群動態モデルを構築することを目的とする.

2. 方法

2.1 生息場の調査

2014年12月から2015年2月に, 東京港の京浜運河周辺 (図-2) で調査を実施した. 調査対象水域には, 貝類と甲殻類を含む様々な動物が生息する (表-1). これらの貝類および甲殻類の生息場となりうる潮間帯および潮下帯の水深3m以浅 (岡田・古川, 2010) において, シースケープの景観要素である底質および運河側面の護岸基質の空間分布を調査した. 底質の種類は, 目視観察, 突棒で底面を突き, 手に伝わる感触および臭いに基づき判別し, 5種類 (ヘドロ (硫化水素臭のする泥), 泥 (硫化水素臭のしない泥), 砂, 礫, 石) に分類した. 護岸基質の種類は, 目視観察で判別し, 6種類 (コンクリート, 鋼, 化粧パネル, 石, 土砂, 木) に分類した. 底質および護岸基質の種類ごとに, パッチの数およびパッチの総面積を調べた. 調査範囲全体の面積に占める, 各種類の底質および護岸基質の面積の割合を算出した.

2.2 メタ個体群存続可能性の評価方法

(1) 生息場およびモデル生物の設定

図-2に黄色で示した運河幹線部 (総延長6,494 m) の底泥および護岸基質を貝類および甲殻類の生息場とみなした. 4種類の貝類・甲殻類を, モデル生物として設定した. 石の護岸に住むカニ類, コンクリート・鋼・化粧パネル・石の護岸に住む付着性二枚貝類, 砂タイプ (砂, 礫)・泥タイプ (ヘドロ, 泥) の堆積物中に住む底生二枚貝類である. これらの生物種には, 共通す

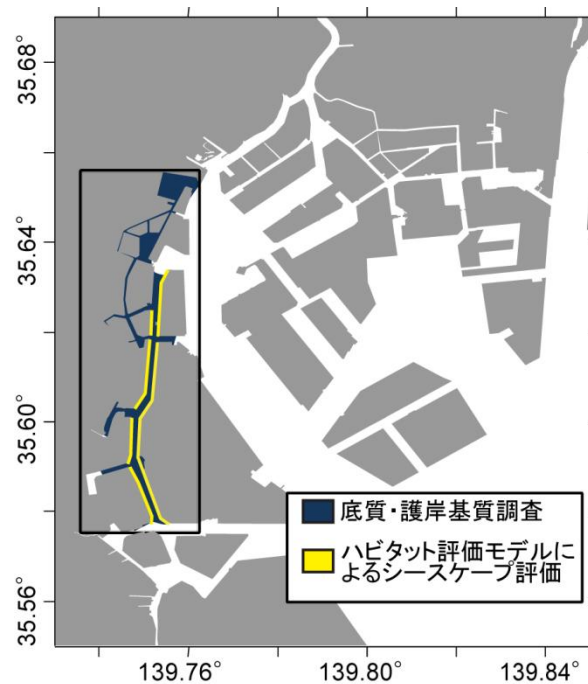


図-2 調査地 (東京湾)

表-1 東京港京浜運河周辺の泥～砂質に住む底生動物

門	種名	門	種名
刺胞	チゲレイソギンチャク	環形	アシナガゴカイ
	タデジマイソギンチャク		クシカギゴカイ
	ムシモドキギンチャク科		ホソミサシバ
扁形	<i>Katara gloriosa</i>		<i>Cirriformia</i> sp.
紐形	イイジマヒラムシ		<i>Dipolydora socialis</i>
線形	オロチヒモムシ		ドロオニスビオ
軟体	アラムシロ	節足	ヤマトスビオ
	ホトギスガイ		イトエラスビオ
	コウロエンカワヒバリガイ		ホソエリタテスビオ
	マガキ		カラミジンコ目
	イガイダマシ		タデジマフジツボ
	ホンビノスガイ		アメリカフジツボ
環形	カガミガイ	毛類	クロイサザアミ
	アサリ		ニホンドロソコエビ
	イトミミズ目		アリアケドロクダムシ
	<i>Capitella</i> sp.		カギメリタココエビ
	<i>Heteromastus</i> sp.		コエビ下目 幼生
	<i>Mediomastus</i> sp.		ニホンスナモグリ
	シダレイトゴカイ		ケフサイソガニ
	<i>Armandia</i> sp.		ミズカメムシ科
	<i>Hediste diadroma</i>		

調査時期および場所の詳細は既報 (佐藤ら, 2006) を参照

る6点の生態学的な特徴 (①第2年級群以降繁殖に参加, ②雌雄異体, ③繁殖は1回/年, ④一時的な浮遊幼生期間 (2 または 20 日間), ⑤第2年級群以降の年間生存率は90%/年, ⑥寿命は5年) を設定した. これ

らの特徴のうち、②および③は多くの貝類および甲殻類に共通する（武田，1978；日本水産資源保護協会，1985；細見，1989）。①，④，⑤および⑥は既往の知見が不足しているため，任意に設定した。これらに加えて，個々の種について，個別に個体群動態に関わる生態学的な特徴を，既往の知見（武田，1978；日本水産資源保護協会，1985；細見，1989）に基づき設定した（表-2）。カニ類および付着性二枚貝の生息する護岸基質の範囲は，海面から深さ1 mまでとし，底生二枚貝の生息する範囲は，運河両端から運河の中心軸方向に向かって5 mまでの海底とした。

(2) ハビタット評価モデル

メタ個体群モデルの考え方をを用いて，沿岸域における浮遊期間の幼生に適用可能なハビタット評価モデルを作成した。浮遊期間の幼生は，拡散のみで移動するものとした。座標 x' の成体から出発した幼生が，時刻 t に座標 x に分布する確率を示す確率密度関数 $p(x, t)$ は，一次元の拡散方程式の解として次式で表す。

$$p(x, t) = \frac{1}{\sqrt{4\pi Dt}} \exp\left(-\frac{(x-x')^2}{4Dt}\right) \quad (1)$$

ここで， D は拡散係数であり，既存の文献（安田，2015）を参考に $10^6 \text{ cm}^2/\text{s}$ とした。

パッチ j の成体によって放出され，水中を漂い，パッチ i に着底した幼生（これを第1年級群とする）の個体数は，次式で表す。

$$n_{i,1}(t+1) = \sum_{j=1}^N C_{ij} \sum_{l=2}^L \gamma_l n_{j,l}(t) \quad (2)$$

ここで， $n_{j,l}(t)$ は，時刻が t の時の，パッチ j の第 l 年級群の個体数， N はパッチの数， C_{ij} は，パッチ j から発生した幼生がパッチ i に着底した割合（着底率）を表し，式(1)の確率密度関数をパッチ i が存在する範囲で積分したものに，着底までの生残率を乗じたものである。また， L は生物の寿命（全動物種で $L = 5$ 年とした）， γ_l は第 l 年級群の成体1個体あたりの幼生生産数を表す（雌1個体あたりの幼生生産数の50%とする）。

また，第2年級群以降の個体数は密度効果が生じないと仮定し，次式で表す。

$$n_{i,l}(t+1) = q_{l-1} n_{i,l-1}(t) \quad (3)$$

ここで， q_{l-1} は第1年級群が越年し，第 $l+1$ 年級群に加入する確率（残存率）である。

式(2)，式(3)は，パッチ数が2，生物の寿命が3年の場合を例にすると，次式のような行列表現が可能となる。

表-2 モデル生物の生態学的特徴

	カニ類	付着性二枚貝類	底生二枚貝類 (砂性, 泥性)
幼生生産数 (個 ÷ 回 ÷ 成体)	0-5万	5百万-1億5百万	0-1千万
着底までの生残率(%)	1	0.1	0.1
着底後の1年級群生残率(%)	2.5-50	0.5-10	0.5-10
環境収容力 (個体 ÷ m^2)	50	1000	1000

$$\begin{pmatrix} n_{1,1}(t+1) \\ n_{1,2}(t+1) \\ n_{1,3}(t+1) \\ n_{2,1}(t+1) \\ n_{2,2}(t+1) \\ n_{2,3}(t+1) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & C_{11}\gamma_2 & C_{11}\gamma_3 & 0 & C_{12}\gamma_2 & C_{12}\gamma_3 \\ q_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & q_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_{21}\gamma_2 & C_{21}\gamma_3 & 0 & C_{22}\gamma_2 & C_{22}\gamma_3 \\ 0 & 0 & 0 & q_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & q_2 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} n_{1,1}(t) \\ n_{1,2}(t) \\ n_{1,3}(t) \\ n_{2,1}(t) \\ n_{2,2}(t) \\ n_{2,3}(t) \end{pmatrix} \quad (4)$$

式(4)の個体数ベクトルを $\mathbf{N}(t)$ で表し， t を十分に経過させると，

$$\mathbf{N}(t) = C_{\max} \lambda_{\max}^t \mathbf{u}_{\max} \quad (5)$$

となる。ここで， $C_{\max}$ は初期値によって決定される定数， $\lambda_{\max}$ は式(4)の行列の最大固有値， $\mathbf{u}_{\max}$ は $\lambda_{\max}$ に対応する固有ベクトルを表す。 $\lambda_{\max}$ は密度効果が無い場合の N 個のパッチ上の生物のメタ個体群としての増殖率（存続可能性）を表し， $\lambda_{\max}$ の値は，生物の生態学的特徴，および，シースケープに応じて変化する。 $\lambda_{\max} > 1$ の場合，すべてのパッチは存続し， $\lambda_{\max} < 1$ の場合，すべてのパッチは絶滅する。現状の京浜運河の生息場の配置の評価は，以下の通りに実施した。先述した4種類のモデル生物の成体1個体あたりの幼生の放出数および1年級群の越年後の残存率の値を，表-2に示した範囲内で，それぞれ21段階および20段階に変化させた。このとき，成体1個体群あたりの幼生の放出数の値および1年級群の越年後の残存率の値の各組み合わせに該当する生物種数は等しいと仮定した。現状の京浜運河の生息場の配置は，この仮定の下で， $\lambda_{\max} > 1$ となる計算ケースの割合に基づき評価された。

本研究では，運河幹線部の生物のみに着目し，運河幹線部の外部からの生物の移入によるメタ個体群存続可能性への影響は考慮しない。また，運河幹線部の外部へ一旦移出した生物は戻ってこないとした。

2.3 メタ個体群存続可能性とシースケープの関係 (1) 検討における諸条件

本検討では、運河幹線部のカニ類に着目し、生息場として石の護岸を対象とした。カニ類の幼生生産数は2万個/回/成体、着底後1年級群の生残率は20%とした。その他の生態学的な特徴は、2.2(1)のカニ類と同じとした。拡散係数は既存の文献（松梨1993；安田2015）を参考に $10^4, 10^5, 10^6 \text{ cm}^2/\text{s}$ とした。

各浮遊幼生期間に対して、4種類の条件（表-3）の下で、各150ケースずつ合計600種類のシースケープを、無作為に生成した。カニ類のメタ個体群存続可能性を表す要素として次の4つを用いた。

- ・ 個体数が定常（飽和）状態に達する年数
 $t+1$ 年の幼生放出数に対する t 年の幼生放出数の比率で1を引いた時の値が0.001未満となる年数 t 。ただし、幼生放出数が0の場合を除く
- ・ リンク率
 理論的な総リンク数に対して幼生の移動により実際に繋がっているリンク数の比率
- ・ リンク1本あたりの平均幼生ネットワーク強度
 各リンクを利用して着底した幼生の数の平均値。発生源のパッチへ幼生が戻るリンクは含まない。
- ・ $\lambda_{\max}$

シースケープを表す要素として、次の3つを用いた。

- ・ パッチ総面積
- ・ 近接指数
- ・ 有効パッチ面積

シースケープを表す3要素は運河総延長で規格化し、空間構成指標とした。なお、2.2と同様に、運河幹線部のみに着目した。

(2) 密度効果を考慮したハビタット評価モデル

個体数が定常状態となる年数およびリンク1本あたりの平均ネットワーク強度を算出するためには、前述したハビタット評価モデルに種内競争による密度効果（生存率の低下）を考慮する必要がある。

第1年級群への幼生の加入については、密度効果が生じず無制限に加入できるものと仮定し、式(2)と同一とする。これは、着底した幼生が越年する際に、最も多く個体数の減耗が生じるためである。第1年級群が越年して、第2年級群になる際の個体数は、密度効果を考慮し、以下の双曲線関数で表す。

表-3 ダミー運河の生成条件

ケース	パッチ延長	パッチの端部間距離
1	パッチ延長最大値の 一様乱数	端部間距離最大値 の一様乱数
2	パッチ延長平均値の 指数乱数	端部間距離最大値 の一様乱数
3	パッチ延長最大値の 一様乱数	端部間距離平均値 の指数乱数
4	パッチ延長平均値の 指数乱数	端部間距離平均値 の指数乱数

$$n_{i,2}(t+1) = \frac{q_1 n_{i,1}(t)}{1 + \alpha_i \sum_{l=1}^L n_{i,l}(t)} \quad (6)$$

ここで、 α_i はパッチ i の密度効果係数であり、次式で表す。

$$\alpha_i = \frac{1}{\tilde{n}_{i,1} + \kappa A_i} \left(\frac{q_1 \tilde{n}_{i,1}}{K_{i,2}} - 1 \right) \quad (7)$$

ここで、 $\tilde{n}_{i,1}$ は全てのパッチの個体数が環境収容力に達したと想定した場合のパッチ i の第1年級群への幼生の加入数、 κ は1 m²あたりの環境収容力（表-2）、 A_i はパッチ i の面積を表す。また、 $K_{i,2}$ はパッチ i における第2年級群に対する環境収容量であり、第2年級群以降の環境収容力の合計値が κA_i となるように定式化すると次式で表される。

$$K_{i,2} = \frac{\kappa A_i}{1 + \sum_{l=3}^L \prod_{k=3}^l q_{k-1}} \quad (8)$$

第3年級群以降の越年では、密度効果は生じないものと仮定し、式(3)と同一とする。

(3) 景観指標

パッチ i の近接指数 $\mu_i(S)$ とは、パッチ i の中心座標から距離 S の範囲内に存在するパッチ j の総延長であり、パッチ i が他のパッチと近接している程度を表す。この値が高いほど、周囲にはより広い生息場があることを示す。

$$\mu_i(S) = \sum_{j \in [R_{ij} \leq S]} L_j \quad (9)$$

ここで、 L_j はパッチ j の延長、 R_{ij} はパッチ i の中心からパッチ j の中心までの距離である。また、 S は式(1)の確率密度関数の標準偏差の2倍であり、次式で表す。

$$S = 2\sqrt{2DT} \quad (10)$$

ここで、 T は浮遊期間である。ここでとした。

パッチ i の有効パッチ面積 A_{ei} とは、パッチ i に供給さ

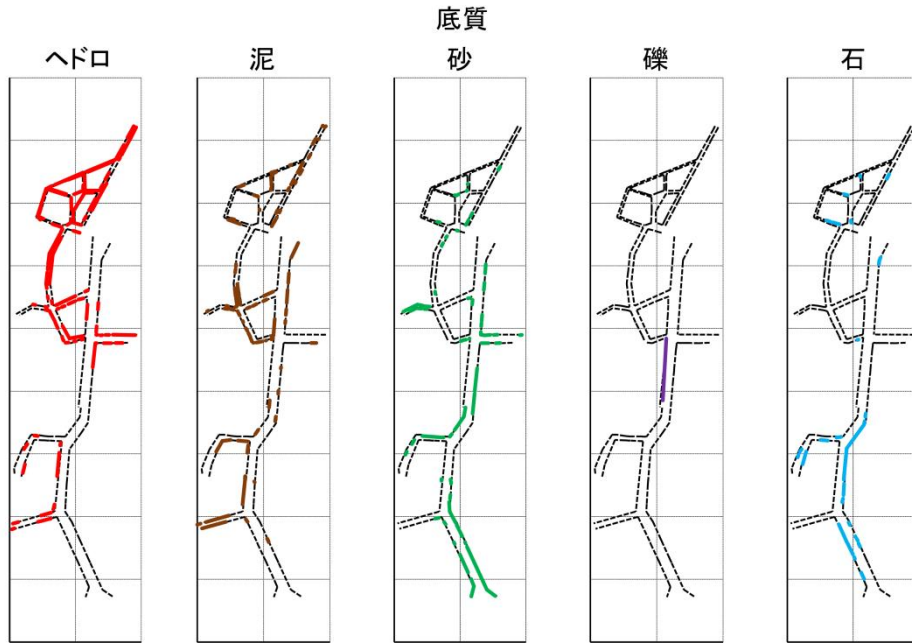


図-3 底質の空間分布

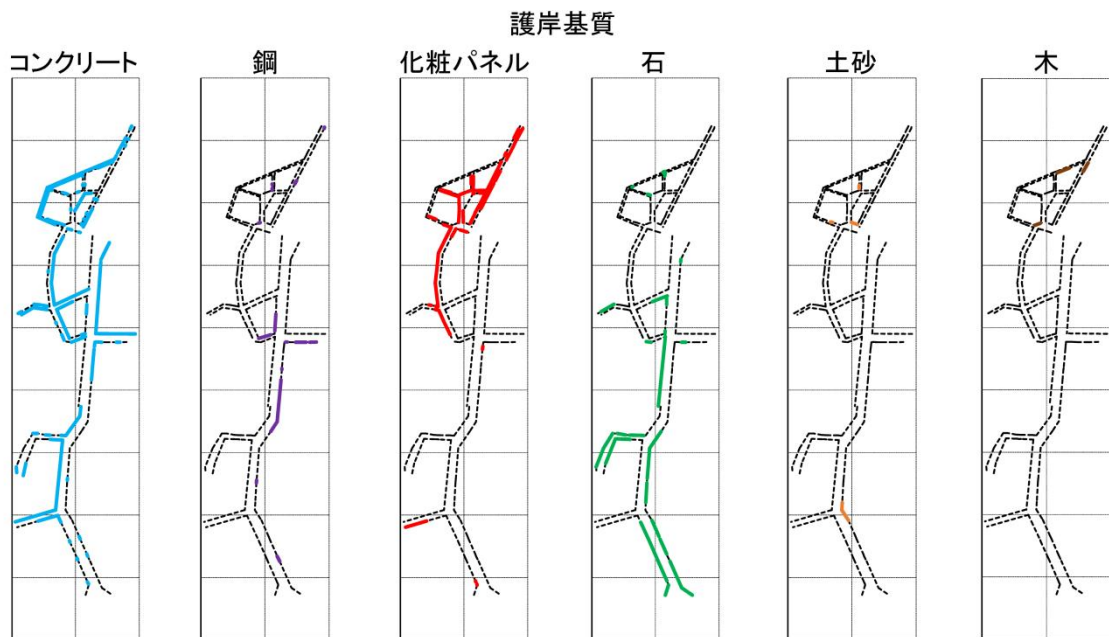


図-4 護岸基質の空間分布

れる幼生の多さを表す指標である。

$$A_{ei} = \sum_{j=1}^N P_{ij} A_j \quad (11)$$

ここで、 P_{ij} はパッチ j から発生した幼生のパッチ i の前面への到達確率(式(1)の確率密度関数をパッチ i が存在する範囲で積分したもの)、 N はパッチの総数である。

空間構成指標 (パッチ総面積/運河総延長, 近接指数平均値/運河総延長, 平均有効パッチ面積/運河総延長) と、生態系ネットワーク指標 ($\lambda_{\max}$, 個体群が定常状

態となる年数, リンク1本あたり平均ネットワーク強度, リンク率)との関係を調べ, 両者の関係を示す曲線を, 非線形最小二乗法を用いて求めた。

3. 結果および考察

3.1 生息場の調査

底質および護岸基質の空間分布は, 種類ごとに異なっていた (図-3, 4)。底質に関して, ヘドロと泥のパッチ数および面積の値は高く (図-5), ヘドロは北部を中

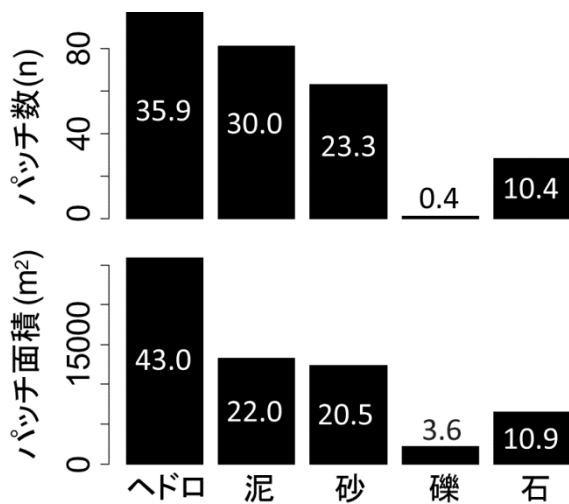


図-5 底質の景観情報。値は全パッチ数あるいは全パッチ面積に占める割合を示す。

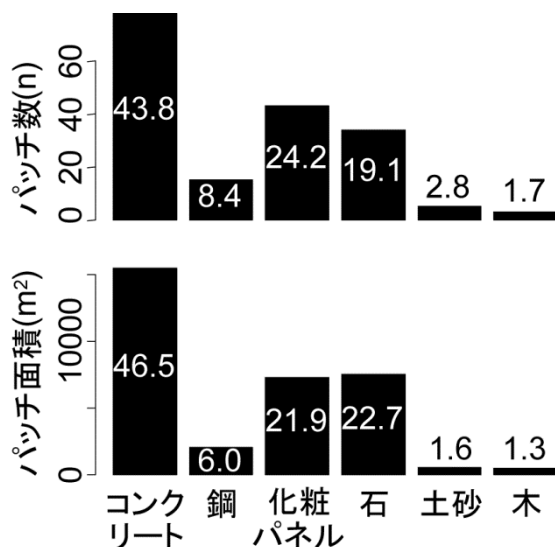


図-6 護岸基質の景観情報。値は全パッチ数あるいは全パッチ面積に占める割合を示す。

心に、泥は運河全体に、それぞれ分布した (図-3)。砂のパッチ数と面積の値は、ヘドロと泥に次いで高く (図-5)、全域に分布した (図-3)。礫は調査水域の中央の1箇所だけに集中的に分布した (図-3)。石のパッチ数および面積の値は、ヘドロ、泥、砂のそれぞれと比べて約半分以上と低く (図-5)、南部を中心に分布した (図-3)。調査範囲全体の底質は、北部ほど粒径が細かく、南部ほど粒径が粗くなる傾向があった (図-3)。この傾向は、図-2の運河黄色部の空間のみでもみられた。

護岸基質に関して、コンクリートのパッチ数および総面積の値は最も大きく (図-6)、全域に分布した (図

-4)。化粧パネルおよび石のパッチ数および総面積の値は、コンクリートの値の半分程度であり (図-6)、化粧パネルのパッチは北側、石のパッチは南側に偏って分布していた (図-4)。鋼、土砂、木のパッチ数および総面積の値は、相対的に小さかった (図-6)。

3.2 メタ個体群存続可能性の評価

現状のシースケープに対するメタ個体群の存続可能性を、 λ_{max} を用いて評価した (表-4~11)。メタ個体群の存続可能性は、モデル生物の種類に関わらず、浮遊期間が長く、成体1個体あたりの幼生生産数が少ないほど、低くなる傾向があった。 λ_{max} が1を超えるケースの頻度は、4種類のモデル生物の中では、付着性二枚貝類で最も高く、次にカニ類で高かったが、底生二枚貝類 (砂タイプ) および底生二枚貝類 (泥タイプ) では低かった (表-4~11)。よって、現状の生息場の配置は、付着性二枚貝類の存続に最も適しており、次にカニ類の存続に適していた。しかし、現状の生息場の配置は、底生二枚貝類 (砂タイプ) および底生二枚貝類 (泥タイプ) の存続にとっては、あまり適していなかった。

3.3 メタ個体群存続可能性とシースケープの関係

現状のシースケープに対するカニ類の個体群の λ_{max} は、浮遊期間が2日間、拡散係数が $10^4 \text{ cm}^2/\text{s}$ の場合 (図-7d, 8d, 9d) を除くすべてのケースで1未満であり (図-10d, 11d, 12d, 13d, 14d, 15d, 16d, 17d, 18d, 19d, 20d, 21d, 22d, 23d, 24d)、現状のシースケープでは、運河幹線部のカニ類のメタ個体群は、時間の経過と共に個体数が減少し、存続できないことを示した。

浮遊期間および拡散係数の違いに関わらず、 λ_{max} はパッチ総面積/運河総延長、近接指数平均値/運河総延長、および平均有効パッチ面積/運河総延長の増加と共に増加した (図-7d, 8d, 9d, 10d, 11d, 12d, 13d, 14d, 15d, 16d, 17d, 18d, 19d, 20d, 21d, 22d, 23d, 24d)。個体数が定常状態となる年数は、浮遊期間が2日間で拡散係数が $10^4, 10^5, 10^6 \text{ cm}^2/\text{s}$ の場合と、浮遊期間が20日間で拡散係数が $10^4, 10^5 \text{ cm}^2/\text{s}$ の場合に、パッチ総面積/運河総延長および近接指数平均値/運河総延長の増加と共に減少したが (図-7a, 8a, 10a, 11a, 13a, 14a, 16a, 17a, 19a, 20a)、平均有効パッチ面積/運河総延長の増加に対する傾向は、不明瞭であった (図-9a, 12a, 15a, 18a, 21a)。一方、浮遊期間が20日間で拡散係数が $10^6 \text{ cm}^2/\text{s}$ の場合は、すべての計算ケースのメタ個体群が1世代目で全滅したため、個体数が定常状態に達する年数は求められなかった (図-22a, 23a, 24a)。リンク率

表-4 付着性二枚貝類 ($T=2$ 日間, $D=10^6$ cm²/s) の1成体あたりの幼生放出数および1年級群越年後生残率に対するメタ個体群存続可能性 ($\lambda_{\max}$) の変化. 青色の計算ケースでは, メタ個体群は存続できるが ($\lambda_{\max}>1$), 黒色の計算ケースでは, メタ個体群は存続できない ($\lambda_{\max}<1$).

成体1個体あたりの幼生の放出数（×万個）																						
	500	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000	5500	6000	6500	7000	7500	8000	8500	9000	9500	10000	10500	
1 年 級 群 の 越 年 後 の 残 存 率	0.005	0.479	0.565	0.626	0.674	0.715	0.750	0.782	0.811	0.838	0.863	0.887	0.909	0.930	0.951	0.970	0.989	1.007	1.024	1.041	1.057	1.073
	0.010	0.565	0.674	0.750	0.811	0.863	0.909	0.951	0.989	1.024	1.057	1.088	1.118	1.146	1.173	1.199	1.223	1.247	1.271	1.293	1.315	1.337
	0.015	0.626	0.750	0.838	0.909	0.970	1.024	1.073	1.118	1.159	1.199	1.236	1.271	1.304	1.337	1.367	1.397	1.426	1.454	1.481	1.508	1.533
	0.020	0.674	0.811	0.909	0.989	1.057	1.118	1.173	1.223	1.271	1.315	1.357	1.397	1.436	1.472	1.508	1.542	1.575	1.607	1.638	1.668	1.697
	0.025	0.715	0.863	0.970	1.057	1.132	1.199	1.259	1.315	1.367	1.417	1.463	1.508	1.550	1.591	1.630	1.668	1.704	1.740	1.774	1.808	1.841
	0.030	0.750	0.909	1.024	1.118	1.199	1.271	1.337	1.397	1.454	1.508	1.558	1.607	1.653	1.697	1.740	1.781	1.821	1.860	1.897	1.934	1.970
	0.035	0.787	0.951	1.073	1.173	1.259	1.337	1.407	1.472	1.533	1.591	1.645	1.697	1.747	1.795	1.841	1.885	1.928	1.970	2.010	2.050	2.088
	0.040	0.811	0.989	1.118	1.223	1.315	1.397	1.472	1.542	1.607	1.668	1.726	1.781	1.834	1.885	1.934	1.982	2.027	2.072	2.115	2.158	2.199
	0.045	0.838	1.024	1.159	1.271	1.367	1.454	1.533	1.607	1.675	1.740	1.801	1.860	1.916	1.970	2.022	2.072	2.121	2.167	2.214	2.258	2.302
	0.050	0.863	1.057	1.199	1.315	1.417	1.508	1.591	1.668	1.740	1.808	1.872	1.934	1.993	2.050	2.105	2.158	2.209	2.258	2.307	2.354	2.400
	0.055	0.887	1.088	1.236	1.357	1.463	1.558	1.645	1.726	1.801	1.872	1.940	2.005	2.067	2.126	2.183	2.239	2.293	2.345	2.395	2.445	2.493
	0.060	0.909	1.118	1.271	1.397	1.508	1.607	1.697	1.781	1.860	1.934	2.005	2.072	2.137	2.199	2.258	2.316	2.372	2.427	2.480	2.531	2.582
	0.065	0.930	1.146	1.304	1.436	1.550	1.653	1.747	1.834	1.916	1.993	2.067	2.137	2.204	2.268	2.331	2.391	2.449	2.506	2.561	2.615	2.667
	0.070	0.951	1.173	1.337	1.472	1.591	1.697	1.795	1.885	1.970	2.050	2.126	2.199	2.268	2.335	2.400	2.462	2.523	2.582	2.639	2.695	2.749
	0.075	0.970	1.199	1.367	1.508	1.630	1.740	1.841	1.934	2.022	2.105	2.183	2.258	2.331	2.400	2.467	2.531	2.594	2.655	2.714	2.772	2.828
	0.080	0.989	1.223	1.397	1.542	1.668	1.781	1.885	1.982	2.072	2.158	2.239	2.316	2.391	2.462	2.531	2.598	2.663	2.726	2.787	2.846	2.904
0.085	1.017	1.247	1.426	1.575	1.704	1.821	1.928	2.027	2.121	2.209	2.293	2.372	2.449	2.523	2.594	2.663	2.730	2.794	2.857	2.919	2.979	
0.090	1.024	1.271	1.454	1.607	1.740	1.860	1.970	2.072	2.167	2.258	2.345	2.427	2.506	2.582	2.655	2.726	2.794	2.861	2.926	2.989	3.050	
0.095	1.041	1.293	1.481	1.638	1.774	1.897	2.010	2.115	2.214	2.307	2.395	2.480	2.561	2.639	2.714	2.787	2.857	2.926	2.992	3.057	3.121	
0.100	1.057	1.315	1.508	1.668	1.808	1.934	2.050	2.158	2.258	2.354	2.445	2.531	2.615	2.695	2.772	2.846	2.919	2.989	3.057	3.124	3.189	

表-5 付着性二枚貝類 ($T=20$ 日間, $D=10^6$ cm²/s) の1成体あたりの幼生放出数および1年級群越年後生残率に対するメタ個体群存続可能性 ($\lambda_{\max}$) の変化. 青色の計算ケースでは, メタ個体群は存続できるが ($\lambda_{\max}>1$), 黒色の計算ケースでは, メタ個体群は存続できない ($\lambda_{\max}<1$).

成体1個体あたりの幼生の放出数（×万個）																						
1 年 級 群 の 越 年 後 の 残 存 率		500	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000	5500	6000	6500	7000	7500	8000	8500	9000	9500	10000	10500
	0.005	0.373	0.446	0.481	0.506	0.544	0.568	0.591	0.612	0.630	0.647	0.663	0.679	0.692	0.706	0.719	0.731	0.743	0.754	0.766	0.776	0.792
	0.010	0.438	0.500	0.568	0.612	0.647	0.679	0.706	0.731	0.754	0.776	0.797	0.816	0.835	0.852	0.869	0.885	0.900	0.915	0.929	0.943	0.957
	0.015	0.481	0.568	0.630	0.679	0.719	0.754	0.792	0.816	0.843	0.869	0.892	0.915	0.937	0.957	0.976	0.995	1.013	1.031	1.048	1.064	1.079
	0.020	0.517	0.612	0.679	0.731	0.776	0.816	0.852	0.885	0.915	0.943	0.970	0.995	1.019	1.042	1.064	1.084	1.106	1.125	1.144	1.163	1.181
	0.025	0.544	0.647	0.719	0.776	0.826	0.869	0.907	0.943	0.976	1.007	1.037	1.064	1.090	1.116	1.140	1.163	1.185	1.207	1.228	1.248	1.269
	0.030	0.568	0.678	0.754	0.816	0.869	0.915	0.957	0.995	1.031	1.064	1.096	1.125	1.154	1.181	1.207	1.232	1.257	1.280	1.303	1.325	1.346
	0.035	0.592	0.706	0.787	0.852	0.907	0.957	1.001	1.042	1.079	1.116	1.149	1.181	1.211	1.240	1.269	1.295	1.321	1.346	1.371	1.395	1.418
	0.040	0.612	0.731	0.816	0.885	0.943	0.995	1.042	1.084	1.125	1.163	1.198	1.232	1.265	1.295	1.325	1.353	1.381	1.408	1.434	1.459	1.484
	0.045	0.630	0.754	0.843	0.915	0.976	1.031	1.079	1.125	1.168	1.207	1.244	1.280	1.314	1.346	1.378	1.408	1.437	1.465	1.493	1.519	1.545
	0.050	0.647	0.782	0.869	0.943	1.007	1.064	1.116	1.163	1.207	1.248	1.288	1.325	1.360	1.395	1.427	1.459	1.491	1.519	1.548	1.576	1.603
	0.055	0.663	0.797	0.892	0.970	1.037	1.096	1.149	1.198	1.244	1.288	1.329	1.367	1.404	1.440	1.474	1.507	1.539	1.570	1.600	1.630	1.658
	0.060	0.678	0.816	0.915	0.995	1.064	1.125	1.181	1.232	1.280	1.325	1.367	1.408	1.447	1.484	1.519	1.554	1.587	1.619	1.651	1.681	1.711
0.065 <td>0.693</td> <td>0.835</td> <td>0.936</td> <td>1.019</td> <td>1.090</td> <td>1.154</td> <td>1.211</td> <td>1.265</td> <td>1.314</td> <td>1.360</td> <td>1.404</td> <td>1.447</td> <td>1.488</td> <td>1.525</td> <td>1.562</td> <td>1.597</td> <td>1.632</td> <td>1.666</td> <td>1.699</td> <td>1.730</td> <td>1.761</td>	0.693	0.835	0.936	1.019	1.090	1.154	1.211	1.265	1.314	1.360	1.404	1.447	1.488	1.525	1.562	1.597	1.632	1.666	1.699	1.730	1.761	
0.070	0.701	0.852	0.957	1.042	1.116	1.181	1.240	1.295	1.346	1.395	1.440	1.484	1.525	1.565	1.603	1.640	1.676	1.711	1.744	1.777	1.809	
0.075	0.719	0.869	0.976	1.064	1.140	1.207	1.269	1.325	1.378	1.427	1.474	1.519	1.562	1.603	1.643	1.681	1.718	1.754	1.789	1.823	1.856	
0.080	0.732	0.884	0.995	1.085	1.163	1.232	1.295	1.353	1.408	1.459	1.507	1.554	1.597	1.640	1.681	1.721	1.759	1.796	1.832	1.867	1.901	
0.085	0.744	0.900	1.013	1.106	1.185	1.257	1.321	1.381	1.437	1.490	1.539	1.587	1.632	1.676	1.718	1.759	1.798	1.836	1.873	1.909	1.944	
0.090	0.755	0.915	1.031	1.125	1.207	1.280	1.346	1.408	1.465	1.519	1.570	1.619	1.666	1.711	1.754	1.796	1.836	1.875	1.913	1.950	1.986	
0.095	0.766	0.929	1.048	1.144	1.228	1.303	1.371	1.434	1.493	1.548	1.600	1.651	1.699	1.744	1.789	1.832	1.873	1.913	1.952	1.990	2.027	
0.100	0.777	0.943	1.064	1.163	1.248	1.325	1.395	1.459	1.519	1.576	1.630	1.681	1.730	1.777	1.823	1.867	1.909	1.950	1.990	2.029	2.067	

表-6 カニ類 ($T = 2$ 日間, $D = 10^6 \text{ cm}^2/\text{s}$) の1成体あたりの幼生放出数および1年級群越年後生残率に対するメタ個体群存続可能性 ($\lambda_{\max}$) の変化. 青色の計算ケースでは, メタ個体群は存続できるが ($\lambda_{\max} > 1$), 黒色の計算ケースでは, メタ個体群は存続できない ($\lambda_{\max} < 1$).

成体1個体あたりの幼生の放出数（×万個）																						
	0.00	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00	2.25	2.50	2.75	3.00	3.25	3.50	3.75	4.00	4.25	4.50	4.75	5.00	
1 年 級 群 の 越 年 後 の 残 存 率	0.025	0.063	0.292	0.340	0.373	0.398	0.419	0.437	0.453	0.468	0.481	0.493	0.504	0.515	0.525	0.535	0.544	0.552	0.561	0.569	0.576	0.584
	0.050	0.077	0.340	0.398	0.437	0.468	0.493	0.515	0.535	0.552	0.569	0.584	0.598	0.611	0.624	0.635	0.647	0.658	0.668	0.678	0.688	0.697
	0.075	0.102	0.373	0.437	0.481	0.515	0.544	0.569	0.591	0.611	0.630	0.647	0.663	0.678	0.692	0.706	0.719	0.731	0.743	0.755	0.766	0.776
	0.100	0.057	0.398	0.468	0.515	0.552	0.584	0.611	0.635	0.658	0.678	0.697	0.715	0.731	0.747	0.762	0.776	0.790	0.803	0.816	0.828	0.840
	0.125	0.083	0.419	0.493	0.544	0.584	0.617	0.647	0.673	0.697	0.719	0.739	0.758	0.776	0.794	0.810	0.825	0.840	0.855	0.869	0.882	0.895
	0.150	0.068	0.437	0.515	0.569	0.611	0.647	0.678	0.706	0.731	0.755	0.776	0.797	0.816	0.834	0.852	0.869	0.885	0.900	0.915	0.929	0.943
	0.175	0.096	0.453	0.535	0.591	0.635	0.673	0.706	0.735	0.762	0.787	0.810	0.831	0.852	0.871	0.890	0.907	0.924	0.941	0.957	0.972	0.987
	0.200	0.087	0.468	0.552	0.611	0.658	0.697	0.731	0.762	0.790	0.816	0.840	0.863	0.885	0.905	0.924	0.943	0.961	0.978	0.995	1.011	1.027
	0.225	0.076	0.481	0.569	0.630	0.678	0.719	0.755	0.787	0.816	0.843	0.869	0.892	0.915	0.936	0.957	0.976	0.995	1.013	1.031	1.047	1.064
	0.250	0.103	0.493	0.584	0.647	0.697	0.739	0.776	0.810	0.840	0.869	0.895	0.920	0.943	0.965	0.987	1.007	1.027	1.046	1.064	1.082	1.099
	0.275	0.107	0.504	0.598	0.663	0.715	0.758	0.797	0.831	0.863	0.892	0.920	0.945	0.970	0.993	1.015	1.036	1.057	1.076	1.095	1.114	1.131
	0.300	0.092	0.515	0.611	0.678	0.731	0.776	0.816	0.852	0.885	0.915	0.943	0.970	0.995	1.019	1.042	1.064	1.085	1.105	1.125	1.144	1.163
	0.325	0.085	0.525	0.624	0.692	0.747	0.794	0.834	0.871	0.905	0.936	0.965	0.993	1.019	1.044	1.067	1.090	1.112	1.133	1.153	1.173	1.192
	0.350	0.094	0.535	0.635	0.706	0.762	0.810	0.852	0.890	0.924	0.957	0.987	1.015	1.042	1.067	1.092	1.115	1.138	1.160	1.181	1.201	1.221
	0.375	0.111	0.544	0.647	0.719	0.776	0.825	0.869	0.908	0.943	0.976	1.007	1.036	1.064	1.090	1.115	1.139	1.163	1.185	1.207	1.228	1.248
	0.400	0.110	0.552	0.658	0.731	0.790	0.840	0.885	0.925	0.961	0.995	1.027	1.057	1.085	1.112	1.138	1.163	1.187	1.210	1.232	1.254	1.275
	0.425	0.097	0.561	0.668	0.743	0.803	0.855	0.900	0.941	0.978	1.013	1.046	1.076	1.105	1.133	1.160	1.185	1.210	1.233	1.256	1.278	1.300
0.450	0.115	0.569	0.678	0.755	0.816	0.869	0.915	0.957	0.995	1.031	1.064	1.095	1.125	1.153	1.181	1.207	1.232	1.256	1.280	1.302	1.325	
0.475	0.104	0.576	0.688	0.766	0.828	0.882	0.929	0.972	1.011	1.047	1.082	1.114	1.144	1.173	1.201	1.228	1.254	1.278	1.302	1.326	1.348	
0.500	0.105	0.584	0.697	0.776	0.840	0.895	0.943	0.987	1.027	1.064	1.099	1.132	1.163	1.192	1.221	1.248	1.275	1.300	1.325	1.348	1.372	

表-7 カニ類 ($T = 20$ 日間, $D = 10^6 \text{ cm}^2/\text{s}$) の1成体あたりの幼生放出数および1年級群越年後生残率に対するメタ個体群存続可能性 ($\lambda_{\max}$) の変化. 青色の計算ケースでは, メタ個体群は存続できるが ($\lambda_{\max} > 1$), 黒色の計算ケースでは, メタ個体群は存続できない ($\lambda_{\max} < 1$).

成体1個体あたりの幼生の放出数（×万個）																						
	0.00	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00	2.25	2.50	2.75	3.00	3.25	3.50	3.75	4.00	4.25	4.50	4.75	5.00	
1 年 級 群 の 越 年 後 の 残 存 率	0.025	0.079	0.229	0.267	0.292	0.312	0.327	0.341	0.353	0.364	0.373	0.382	0.391	0.399	0.406	0.413	0.420	0.426	0.432	0.438	0.443	0.449
	0.050	0.080	0.268	0.312	0.341	0.364	0.382	0.399	0.413	0.426	0.438	0.449	0.459	0.468	0.477	0.486	0.494	0.502	0.509	0.516	0.523	0.529
	0.075	0.108	0.292	0.341	0.373	0.399	0.420	0.438	0.454	0.468	0.482	0.494	0.505	0.516	0.526	0.536	0.545	0.554	0.562	0.570	0.578	0.585
	0.100	0.058	0.312	0.364	0.399	0.426	0.449	0.468	0.486	0.502	0.516	0.529	0.542	0.554	0.565	0.575	0.585	0.594	0.604	0.612	0.621	0.629
	0.125	0.048	0.327	0.382	0.420	0.449	0.473	0.494	0.513	0.529	0.545	0.559	0.572	0.585	0.597	0.608	0.619	0.629	0.639	0.648	0.657	0.666
	0.150	0.085	0.341	0.399	0.438	0.468	0.494	0.516	0.536	0.554	0.570	0.585	0.599	0.612	0.625	0.637	0.648	0.659	0.669	0.679	0.689	0.698
	0.175	0.045	0.353	0.413	0.454	0.486	0.513	0.536	0.556	0.575	0.592	0.608	0.623	0.637	0.650	0.662	0.674	0.686	0.697	0.707	0.717	0.727
	0.200	0.060	0.364	0.426	0.468	0.502	0.529	0.554	0.575	0.594	0.612	0.629	0.644	0.659	0.673	0.686	0.698	0.710	0.722	0.733	0.743	0.754
	0.225	0.110	0.373	0.438	0.482	0.516	0.545	0.570	0.592	0.612	0.631	0.648	0.664	0.679	0.694	0.707	0.720	0.733	0.745	0.756	0.767	0.778
	0.250	0.087	0.382	0.449	0.494	0.529	0.559	0.585	0.608	0.629	0.648	0.666	0.683	0.698	0.713	0.727	0.741	0.754	0.766	0.778	0.790	0.801
	0.275	0.066	0.391	0.459	0.505	0.542	0.572	0.599	0.623	0.644	0.664	0.683	0.700	0.716	0.731	0.746	0.760	0.773	0.786	0.799	0.811	0.822
	0.300	0.054	0.399	0.468	0.516	0.554	0.585	0.612	0.637	0.659	0.679	0.698	0.716	0.733	0.749	0.764	0.778	0.792	0.805	0.818	0.830	0.842
	0.325	0.075	0.406	0.477	0.526	0.565	0.597	0.625	0.650	0.673	0.694	0.713	0.731	0.749	0.765	0.780	0.795	0.809	0.823	0.836	0.849	0.861
	0.350	0.110	0.413	0.486	0.536	0.575	0.608	0.637	0.662	0.686	0.707	0.727	0.746	0.764	0.780	0.796	0.812	0.826	0.840	0.854	0.867	0.880
	0.375	0.089	0.420	0.494	0.545	0.585	0.619	0.648	0.674	0.698	0.720	0.741	0.760	0.778	0.795	0.812	0.827	0.842	0.857	0.871	0.884	0.897
	0.400	0.070	0.426	0.502	0.554	0.594	0.629	0.659	0.686	0.710	0.733	0.754	0.773	0.792	0.809	0.826	0.842	0.858	0.872	0.887	0.900	0.914
	0.425	0.070	0.432	0.509	0.562	0.604	0.639	0.669	0.697	0.722	0.745	0.766	0.786	0.805	0.823	0.840	0.857	0.872	0.887	0.902	0.916	0.930
	0.450	0.055	0.438	0.516	0.570	0.612	0.648	0.679	0.707	0.733	0.756	0.778	0.799	0.818	0.836	0.854	0.871	0.887	0.902	0.917	0.931	0.945
	0.475	0.088	0.443	0.523	0.578	0.621	0.657	0.689	0.717	0.743	0.767	0.790	0.811	0.830	0.849	0.867	0.884	0.900	0.916	0.931	0.946	0.960
	0.500	0.090	0.449	0.529	0.585	0.629	0.666	0.698	0.727	0.754	0.778	0.801	0.822	0.842	0.861	0.880	0.897	0.914	0.930	0.945	0.960	0.975

表-8 底性二枚貝類（砂）（ $T = 2$ 日間, $D = 10^6 \text{ cm}^2/\text{s}$ ）の1成体あたりの幼生放出数および1年級群越年後生残率に対するメタ個体群存続可能性（ λ_{max} ）の変化。青色の計算ケースでは、メタ個体群は存続できるが（ $\lambda_{\text{max}} > 1$ ），黒色の計算ケースでは、メタ個体群は存続できない（ $\lambda_{\text{max}} < 1$ ）。

成体1個体あたりの幼生の放出数（×万個）																						
	0	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800	850	900	950	1000	
1 年 級 群 の 越 年 後 の 残 存 率	0.005	0.005	0.241	0.281	0.307	0.327	0.344	0.358	0.371	0.382	0.392	0.402	0.411	0.419	0.427	0.434	0.441	0.448	0.455	0.461	0.467	0.472
	0.010	0.130	0.281	0.327	0.358	0.382	0.402	0.419	0.434	0.448	0.461	0.472	0.483	0.493	0.503	0.512	0.520	0.529	0.536	0.544	0.551	0.558
	0.015	0.012	0.307	0.358	0.392	0.419	0.441	0.461	0.478	0.493	0.507	0.520	0.533	0.544	0.555	0.565	0.575	0.584	0.593	0.602	0.610	0.618
	0.020	0.014	0.327	0.382	0.419	0.448	0.472	0.493	0.512	0.529	0.544	0.558	0.572	0.584	0.596	0.607	0.618	0.628	0.638	0.647	0.656	0.665
	0.025	0.001	0.344	0.402	0.441	0.472	0.498	0.520	0.540	0.558	0.575	0.590	0.604	0.618	0.630	0.642	0.654	0.665	0.675	0.685	0.695	0.705
	0.030	0.093	0.358	0.419	0.461	0.493	0.520	0.544	0.565	0.584	0.602	0.618	0.633	0.647	0.661	0.673	0.685	0.697	0.708	0.719	0.730	0.740
	0.035	0.057	0.371	0.434	0.478	0.512	0.540	0.565	0.587	0.607	0.625	0.642	0.658	0.673	0.687	0.701	0.714	0.726	0.738	0.749	0.760	0.771
	0.040	0.058	0.382	0.448	0.493	0.529	0.558	0.584	0.607	0.628	0.647	0.665	0.681	0.697	0.712	0.726	0.740	0.752	0.765	0.777	0.788	0.799
	0.045	0.023	0.392	0.461	0.507	0.544	0.575	0.602	0.625	0.647	0.667	0.685	0.703	0.719	0.735	0.749	0.763	0.777	0.790	0.802	0.814	0.826
	0.050	0.024	0.402	0.472	0.520	0.558	0.590	0.618	0.642	0.665	0.685	0.705	0.723	0.740	0.756	0.771	0.785	0.799	0.813	0.826	0.838	0.850
	0.055	0.001	0.411	0.483	0.533	0.572	0.604	0.633	0.658	0.681	0.703	0.723	0.741	0.759	0.775	0.791	0.806	0.821	0.835	0.848	0.861	0.874
	0.060	0.001	0.419	0.493	0.544	0.584	0.618	0.647	0.673	0.697	0.719	0.740	0.759	0.777	0.794	0.810	0.826	0.841	0.855	0.869	0.882	0.895
	0.065	0.001	0.427	0.503	0.555	0.596	0.630	0.661	0.687	0.712	0.735	0.756	0.775	0.794	0.812	0.828	0.844	0.860	0.875	0.889	0.903	0.916
	0.070	0.128	0.434	0.512	0.565	0.607	0.642	0.673	0.701	0.726	0.749	0.771	0.791	0.810	0.828	0.846	0.862	0.878	0.893	0.908	0.922	0.936
	0.075	0.096	0.441	0.520	0.575	0.618	0.654	0.685	0.714	0.740	0.763	0.785	0.806	0.826	0.844	0.862	0.879	0.895	0.911	0.926	0.941	0.955
	0.080	0.097	0.448	0.529	0.584	0.628	0.665	0.697	0.726	0.752	0.777	0.799	0.821	0.841	0.860	0.878	0.895	0.912	0.928	0.944	0.959	0.973
	0.085	0.064	0.455	0.536	0.593	0.638	0.675	0.708	0.738	0.765	0.790	0.813	0.835	0.855	0.875	0.893	0.911	0.928	0.945	0.960	0.976	0.991
	0.090	0.064	0.461	0.544	0.602	0.647	0.685	0.719	0.749	0.777	0.802	0.826	0.848	0.869	0.889	0.908	0.926	0.944	0.960	0.977	0.992	1.008
	0.095	0.065	0.467	0.551	0.610	0.656	0.695	0.730	0.760	0.788	0.814	0.838	0.861	0.882	0.903	0.922	0.941	0.959	0.976	0.992	1.008	1.024
	0.100	0.031	0.472	0.558	0.618	0.665	0.705	0.740	0.771	0.799	0.826	0.850	0.874	0.895	0.916	0.936	0.955	0.973	0.991	1.008	1.024	1.040

表-9 底性二枚貝類（砂）（ $T = 20$ 日間, $D = 10^6 \text{ cm}^2/\text{s}$ ）の1成体あたりの幼生放出数および1年級群越年後生残率に対するメタ個体群存続可能性（ λ_{max} ）の変化。青色の計算ケースでは、メタ個体群は存続できるが（ $\lambda_{\text{max}} > 1$ ），黒色の計算ケースでは、メタ個体群は存続できない（ $\lambda_{\text{max}} < 1$ ）。

成体1個体あたりの幼生の放出数（×万個）																						
	0	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800	850	900	950	1000	
1 年 級 群 の 越 年 後 の 残 存 率	0.005	0.005	0.193	0.222	0.242	0.258	0.271	0.283	0.292	0.301	0.309	0.316	0.323	0.329	0.335	0.340	0.346	0.351	0.355	0.360	0.364	0.369
	0.010	0.097	0.223	0.259	0.282	0.300	0.316	0.329	0.340	0.351	0.360	0.369	0.377	0.384	0.391	0.398	0.404	0.410	0.416	0.422	0.427	0.432
	0.015	0.012	0.244	0.282	0.308	0.329	0.346	0.360	0.373	0.384	0.395	0.404	0.413	0.422	0.430	0.437	0.444	0.451	0.457	0.464	0.470	0.475
	0.020	0.015	0.259	0.300	0.329	0.351	0.369	0.384	0.398	0.410	0.422	0.432	0.442	0.451	0.459	0.468	0.475	0.483	0.490	0.496	0.503	0.509
	0.025	0.000	0.271	0.316	0.346	0.369	0.388	0.404	0.419	0.432	0.444	0.455	0.466	0.475	0.484	0.493	0.501	0.509	0.517	0.524	0.531	0.537
	0.030	0.134	0.282	0.329	0.360	0.384	0.404	0.422	0.437	0.451	0.464	0.475	0.486	0.496	0.506	0.515	0.524	0.532	0.540	0.548	0.555	0.562
	0.035	0.098	0.292	0.340	0.373	0.398	0.419	0.437	0.453	0.468	0.481	0.493	0.504	0.515	0.525	0.535	0.544	0.552	0.561	0.569	0.576	0.584
	0.040	0.061	0.300	0.351	0.384	0.410	0.432	0.451	0.468	0.483	0.496	0.509	0.521	0.532	0.543	0.552	0.562	0.571	0.580	0.588	0.596	0.604
	0.045	0.024	0.309	0.360	0.395	0.422	0.444	0.464	0.481	0.496	0.511	0.524	0.536	0.548	0.558	0.569	0.579	0.588	0.597	0.606	0.614	0.622
	0.050	0.025	0.316	0.369	0.404	0.432	0.455	0.475	0.493	0.509	0.524	0.537	0.550	0.562	0.573	0.584	0.594	0.604	0.613	0.622	0.630	0.639
	0.055	0.026	0.323	0.377	0.413	0.442	0.466	0.486	0.504	0.521	0.536	0.550	0.563	0.575	0.587	0.598	0.608	0.618	0.628	0.637	0.646	0.655
	0.060	0.000	0.329	0.384	0.422	0.451	0.475	0.496	0.515	0.532	0.548	0.562	0.575	0.588	0.600	0.611	0.622	0.632	0.642	0.651	0.661	0.669
	0.065	0.000	0.335	0.391	0.430	0.459	0.484	0.506	0.525	0.543	0.558	0.573	0.587	0.600	0.612	0.624	0.635	0.645	0.655	0.665	0.674	0.684
	0.070	0.000	0.340	0.398	0.437	0.468	0.493	0.515	0.535	0.552	0.569	0.584	0.598	0.611	0.624	0.635	0.647	0.658	0.668	0.678	0.688	0.697
	0.075	0.000	0.346	0.404	0.444	0.475	0.501	0.524	0.544	0.562	0.579	0.594	0.608	0.622	0.635	0.647	0.658	0.669	0.680	0.690	0.700	0.710
	0.080	0.134	0.351	0.410	0.451	0.483	0.509	0.532	0.552	0.571	0.588	0.604	0.618	0.632	0.645	0.658	0.669	0.681	0.692	0.702	0.712	0.722
	0.085	0.101	0.355	0.416	0.457	0.490	0.517	0.540	0.561	0.580	0.597	0.613	0.628	0.642	0.655	0.668	0.680	0.692	0.703	0.713	0.724	0.734
	0.090	0.102	0.360	0.422	0.464	0.496	0.524	0.548	0.569	0.588	0.606	0.622	0.637	0.651	0.665	0.678	0.690	0.702	0.713	0.724	0.735	0.745
	0.095	0.103	0.364	0.427	0.470	0.503	0.531	0.555	0.576	0.596	0.614	0.630	0.646	0.661	0.674	0.688	0.700	0.712	0.724	0.735	0.745	0.756
	0.100	0.068	0.369	0.432	0.475	0.509	0.537	0.562	0.584	0.604	0.622	0.639	0.655	0.669	0.684	0.697	0.710	0.722	0.734	0.745	0.756	0.766

表-10 底性二枚貝類（泥）（ $T=2$ 日間, $D=10^6$ cm²/s）の1成体あたりの幼生放出数および1年級群越年後生残率に対するメタ個体群存続可能性（ $\lambda_{\max}$ ）の変化。青色の計算ケースでは、メタ個体群は存続できるが（ $\lambda_{\max}>1$ ），黒色の計算ケースでは、メタ個体群は存続できない（ $\lambda_{\max}<1$ ）。

		成体1個体あたりの幼生の放出数（×万個）																					
		0	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800	850	900	950	1000	
1 年 級 群 の 越 年 後 の 残 存 率	0.005	0.096	0.226	0.259	0.288	0.300	0.320	0.329	0.342	0.351	0.362	0.370	0.379	0.385	0.393	0.400	0.407	0.413	0.417	0.423	0.429	0.435	
	0.010	0.008	0.255	0.302	0.330	0.353	0.371	0.387	0.401	0.412	0.424	0.435	0.445	0.454	0.462	0.470	0.478	0.485	0.492	0.499	0.505	0.512	
	0.015	0.131	0.283	0.331	0.363	0.386	0.405	0.424	0.440	0.454	0.466	0.478	0.489	0.499	0.509	0.518	0.527	0.535	0.543	0.551	0.558	0.565	
	0.020	0.055	0.301	0.353	0.385	0.412	0.435	0.453	0.470	0.485	0.499	0.512	0.524	0.535	0.546	0.556	0.565	0.574	0.583	0.591	0.599	0.607	
	0.025	0.017	0.313	0.371	0.406	0.435	0.458	0.478	0.496	0.512	0.527	0.540	0.553	0.565	0.576	0.587	0.597	0.607	0.617	0.626	0.634	0.643	
	0.030	0.000	0.331	0.386	0.424	0.453	0.478	0.499	0.518	0.535	0.551	0.565	0.579	0.591	0.603	0.615	0.626	0.636	0.646	0.655	0.665	0.673	
	0.035	0.000	0.341	0.400	0.439	0.470	0.496	0.518	0.538	0.556	0.572	0.587	0.601	0.615	0.627	0.639	0.651	0.662	0.672	0.682	0.692	0.701	
	0.040	0.129	0.353	0.412	0.453	0.485	0.512	0.535	0.556	0.574	0.591	0.607	0.622	0.636	0.649	0.662	0.673	0.685	0.696	0.706	0.716	0.726	
	0.045	0.096	0.363	0.424	0.466	0.499	0.527	0.551	0.572	0.591	0.609	0.626	0.641	0.655	0.669	0.682	0.694	0.706	0.718	0.729	0.739	0.749	
	0.050	0.060	0.370	0.434	0.478	0.512	0.540	0.565	0.587	0.607	0.626	0.643	0.658	0.673	0.688	0.701	0.714	0.726	0.738	0.749	0.760	0.771	
	0.055	0.061	0.379	0.444	0.489	0.524	0.553	0.579	0.601	0.622	0.641	0.658	0.675	0.690	0.705	0.719	0.732	0.745	0.757	0.769	0.780	0.791	
	0.060	0.027	0.387	0.453	0.499	0.535	0.565	0.591	0.615	0.636	0.655	0.673	0.690	0.706	0.721	0.736	0.749	0.763	0.775	0.787	0.799	0.810	
	0.065	0.027	0.395	0.462	0.509	0.546	0.576	0.603	0.627	0.649	0.669	0.688	0.705	0.721	0.737	0.752	0.766	0.779	0.792	0.805	0.817	0.829	
	0.070	0.028	0.400	0.470	0.518	0.556	0.587	0.615	0.639	0.662	0.682	0.701	0.719	0.736	0.752	0.767	0.781	0.795	0.809	0.821	0.834	0.846	
	0.075	0.029	0.406	0.478	0.527	0.565	0.597	0.626	0.651	0.673	0.694	0.714	0.732	0.749	0.766	0.781	0.796	0.810	0.824	0.837	0.850	0.862	
	0.080	0.001	0.413	0.485	0.535	0.574	0.607	0.636	0.662	0.685	0.706	0.726	0.745	0.763	0.779	0.795	0.810	0.825	0.839	0.853	0.866	0.878	
	0.085	0.001	0.419	0.492	0.543	0.583	0.617	0.646	0.672	0.696	0.718	0.738	0.757	0.775	0.792	0.809	0.824	0.839	0.853	0.867	0.881	0.894	
	0.090	0.001	0.423	0.499	0.551	0.591	0.626	0.655	0.682	0.706	0.729	0.749	0.769	0.787	0.805	0.821	0.837	0.853	0.867	0.881	0.895	0.908	
	0.095	0.001	0.429	0.506	0.558	0.599	0.634	0.665	0.692	0.716	0.739	0.760	0.780	0.799	0.817	0.834	0.850	0.866	0.881	0.895	0.909	0.922	
	0.100	0.131	0.434	0.512	0.565	0.607	0.643	0.673	0.701	0.726	0.749	0.771	0.791	0.810	0.829	0.846	0.862	0.878	0.894	0.908	0.922	0.936	

表-11 底性二枚貝類（泥）（ $T=20$ 日間, $D=10^6$ cm²/s）の1成体あたりの幼生放出数および1年級群越年後生残率に対するメタ個体群存続可能性（ $\lambda_{\max}$ ）の変化。青色の計算ケースでは、メタ個体群は存続できるが（ $\lambda_{\max}>1$ ），黒色の計算ケースでは、メタ個体群は存続できない（ $\lambda_{\max}<1$ ）。

		成体1個体あたりの幼生の放出数（×万個）																				
1 年 級 群 の 越 年 後 の 残 存 率		0	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800	850	900	950	1000
	0.005	0.055	0.179	0.204	0.226	0.239	0.249	0.259	0.270	0.276	0.288	0.291	0.296	0.301	0.309	0.314	0.321	0.322	0.325	0.330	0.335	0.339
	0.010	0.000	0.209	0.233	0.256	0.276	0.291	0.302	0.314	0.326	0.330	0.337	0.347	0.353	0.359	0.365	0.372	0.375	0.381	0.387	0.391	0.396
	0.015	0.099	0.224	0.261	0.283	0.299	0.317	0.332	0.342	0.351	0.363	0.372	0.379	0.386	0.394	0.401	0.406	0.412	0.419	0.424	0.430	0.435
	0.020	0.058	0.241	0.277	0.301	0.321	0.339	0.354	0.365	0.376	0.385	0.397	0.405	0.413	0.420	0.428	0.435	0.442	0.448	0.454	0.459	0.465
	0.025	0.017	0.244	0.286	0.314	0.340	0.356	0.371	0.385	0.396	0.407	0.418	0.427	0.435	0.443	0.451	0.458	0.465	0.472	0.478	0.484	0.490
	0.030	0.000	0.270	0.301	0.331	0.350	0.372	0.386	0.400	0.414	0.425	0.435	0.445	0.454	0.462	0.470	0.478	0.486	0.493	0.499	0.506	0.512
	0.035	0.000	0.263	0.308	0.342	0.366	0.384	0.401	0.416	0.428	0.440	0.451	0.461	0.470	0.480	0.488	0.496	0.504	0.511	0.518	0.525	0.532
	0.040	0.135	0.277	0.321	0.353	0.376	0.397	0.413	0.428	0.441	0.454	0.465	0.476	0.486	0.495	0.504	0.512	0.520	0.528	0.536	0.543	0.550
	0.045	0.100	0.283	0.333	0.364	0.387	0.406	0.424	0.440	0.454	0.466	0.478	0.489	0.499	0.509	0.518	0.527	0.536	0.544	0.551	0.559	0.566
	0.050	0.101	0.286	0.338	0.370	0.397	0.417	0.434	0.451	0.465	0.478	0.490	0.502	0.512	0.522	0.532	0.541	0.550	0.558	0.566	0.573	0.581
	0.055	0.064	0.297	0.345	0.379	0.404	0.426	0.444	0.461	0.476	0.489	0.502	0.513	0.524	0.535	0.544	0.554	0.563	0.571	0.579	0.587	0.595
	0.060	0.065	0.301	0.353	0.387	0.413	0.434	0.454	0.470	0.486	0.499	0.512	0.524	0.536	0.546	0.556	0.566	0.575	0.584	0.592	0.600	0.608
	0.065	0.028	0.308	0.361	0.395	0.421	0.443	0.462	0.479	0.495	0.509	0.522	0.535	0.546	0.557	0.567	0.577	0.586	0.595	0.604	0.612	0.620
	0.070	0.029	0.315	0.364	0.400	0.427	0.451	0.470	0.488	0.504	0.518	0.532	0.544	0.556	0.567	0.578	0.588	0.597	0.607	0.615	0.624	0.632
	0.075	0.030	0.318	0.370	0.407	0.435	0.458	0.478	0.496	0.512	0.527	0.541	0.554	0.566	0.577	0.588	0.598	0.608	0.617	0.626	0.635	0.643
	0.080	0.031	0.321	0.377	0.413	0.441	0.465	0.486	0.504	0.520	0.536	0.550	0.563	0.575	0.586	0.597	0.608	0.618	0.627	0.637	0.645	0.654
	0.085	0.000	0.326	0.382	0.419	0.448	0.472	0.493	0.511	0.528	0.544	0.558	0.571	0.584	0.595	0.607	0.617	0.627	0.637	0.647	0.656	0.664
	0.090	0.000	0.331	0.387	0.424	0.454	0.478	0.499	0.518	0.536	0.551	0.566	0.579	0.592	0.604	0.615	0.626	0.637	0.647	0.656	0.665	0.674
	0.095	0.000	0.335	0.393	0.429	0.459	0.484	0.506	0.525	0.543	0.559	0.573	0.587	0.600	0.612	0.624	0.635	0.645	0.656	0.665	0.675	0.684
	0.100	0.000	0.340	0.397	0.434	0.465	0.490	0.512	0.532	0.550	0.566	0.581	0.595	0.608	0.620	0.632	0.643	0.654	0.664	0.674	0.684	0.693

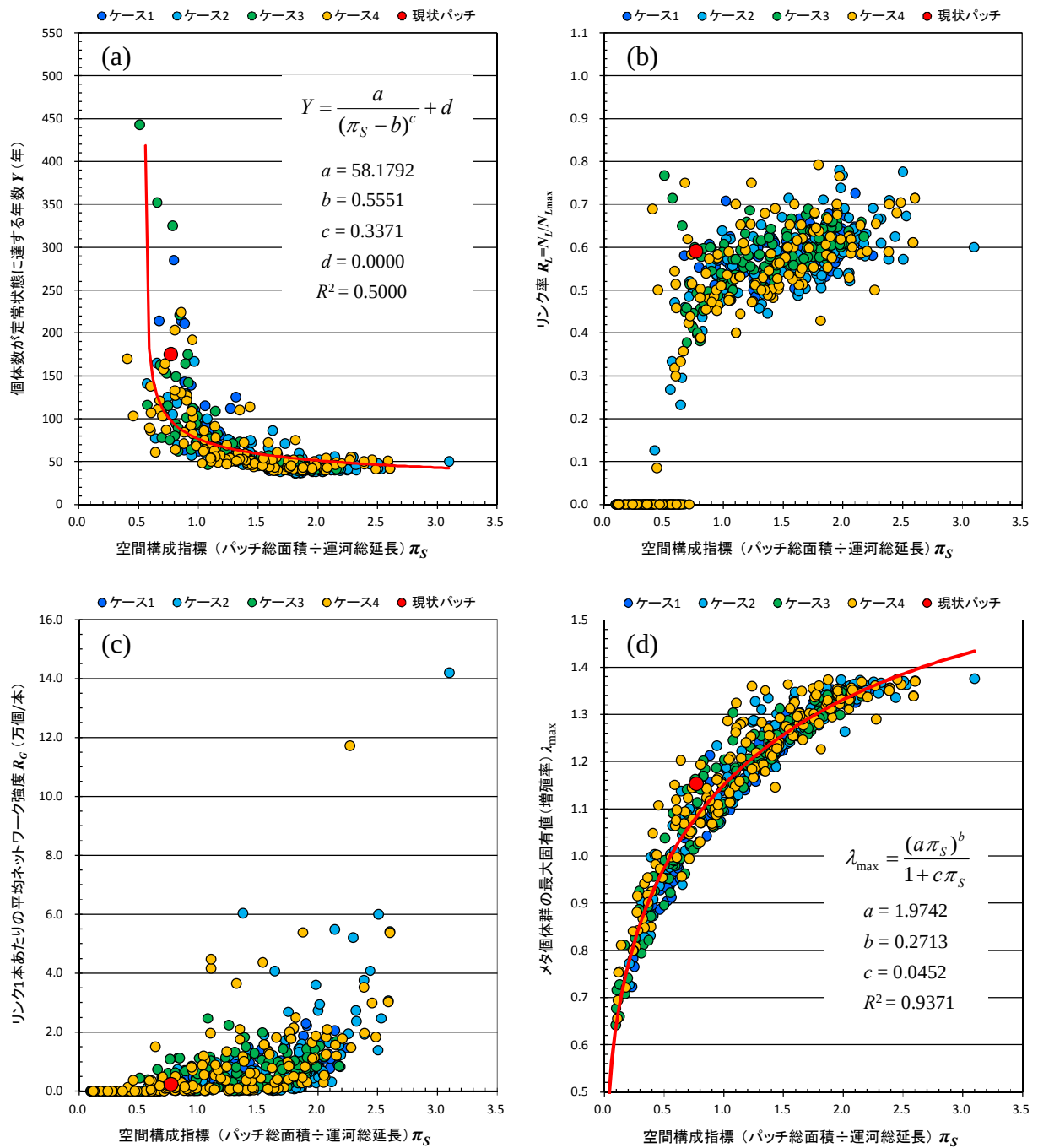


図-7 カニ類 ($T = 2$ 日間, $D = 10^4 \text{ cm}^2/\text{s}$) の生態系ネットワーク指標と空間構成指標 (パッチ総面積) との関係

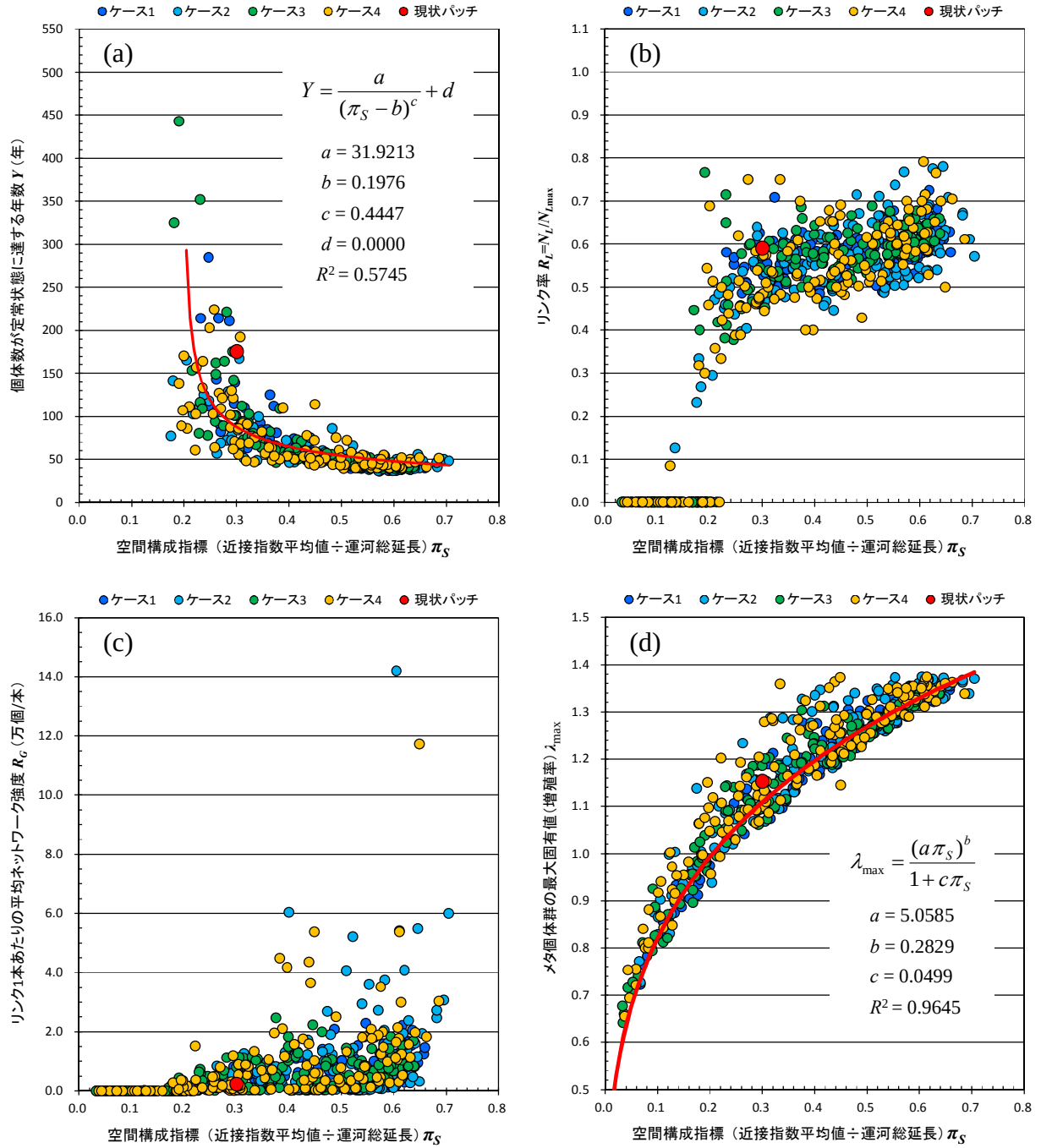


図-8 カニ類 ($T = 2$ 日間, $D = 10^4 \text{ cm}^2/\text{s}$) の生態系ネットワーク指標と空間構成指標 (近接指数平均値) との関係

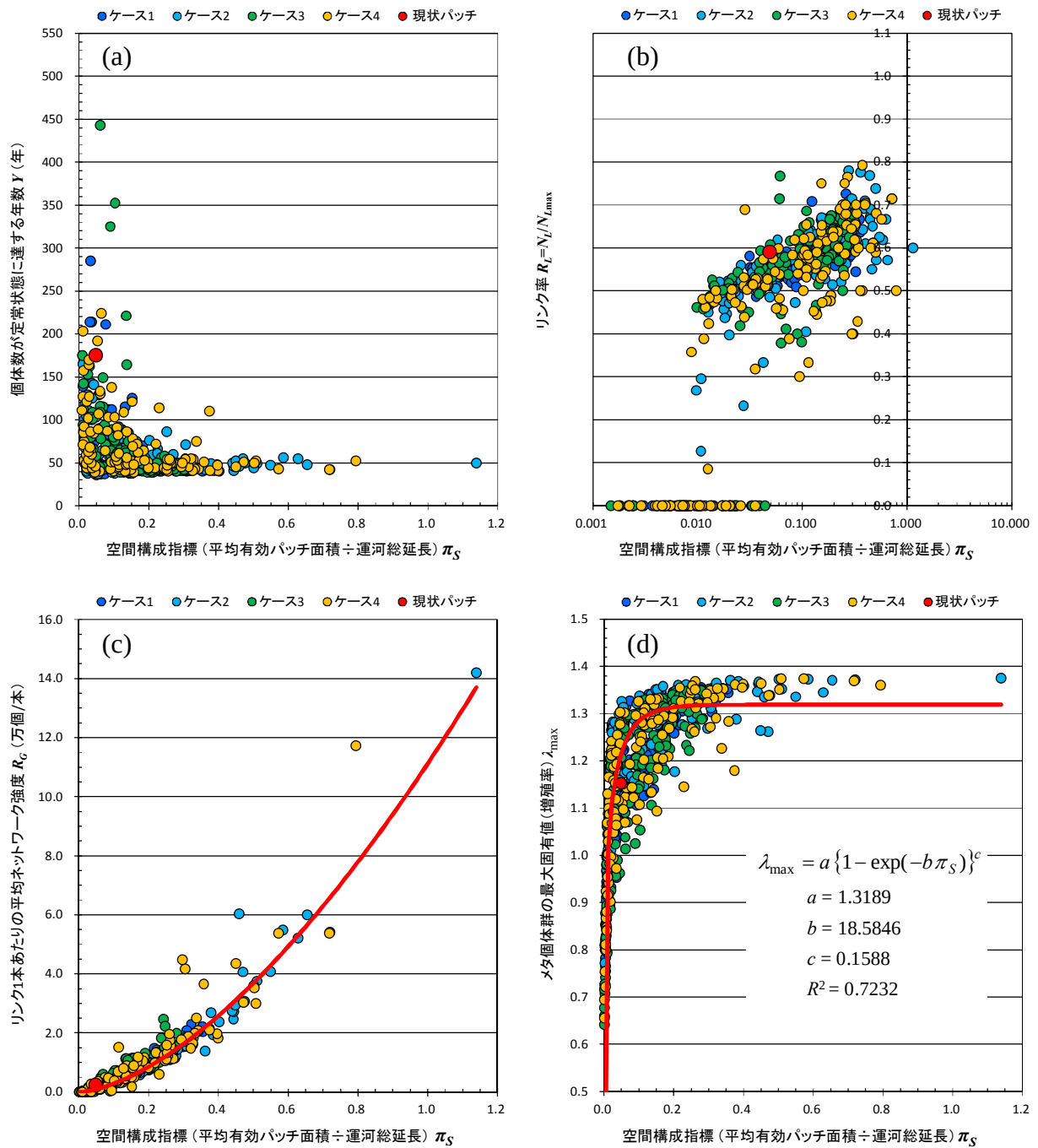


図-9 カニ類 ($T = 2$ 日間, $D = 10^4 \text{ cm}^2/\text{s}$) の生態系ネットワーク指標と空間構成指標 (平均有効パッチ面積) との関係

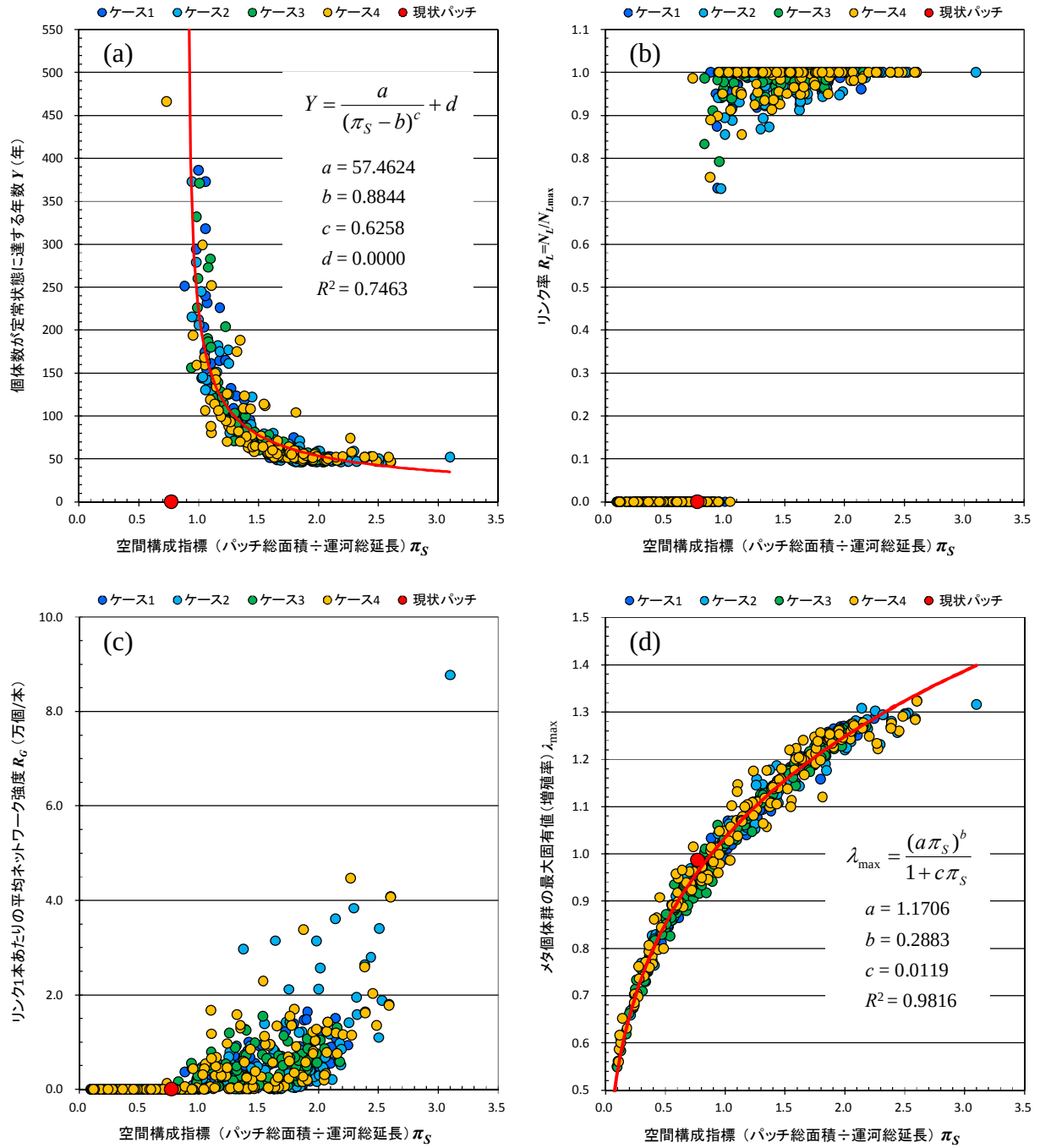


図-10 カニ類 ($T = 20$ 日間, $D = 10^4 \text{ cm}^2/\text{s}$) の生態系ネットワーク指標と空間構成指標 (パッチ総面積) との関係

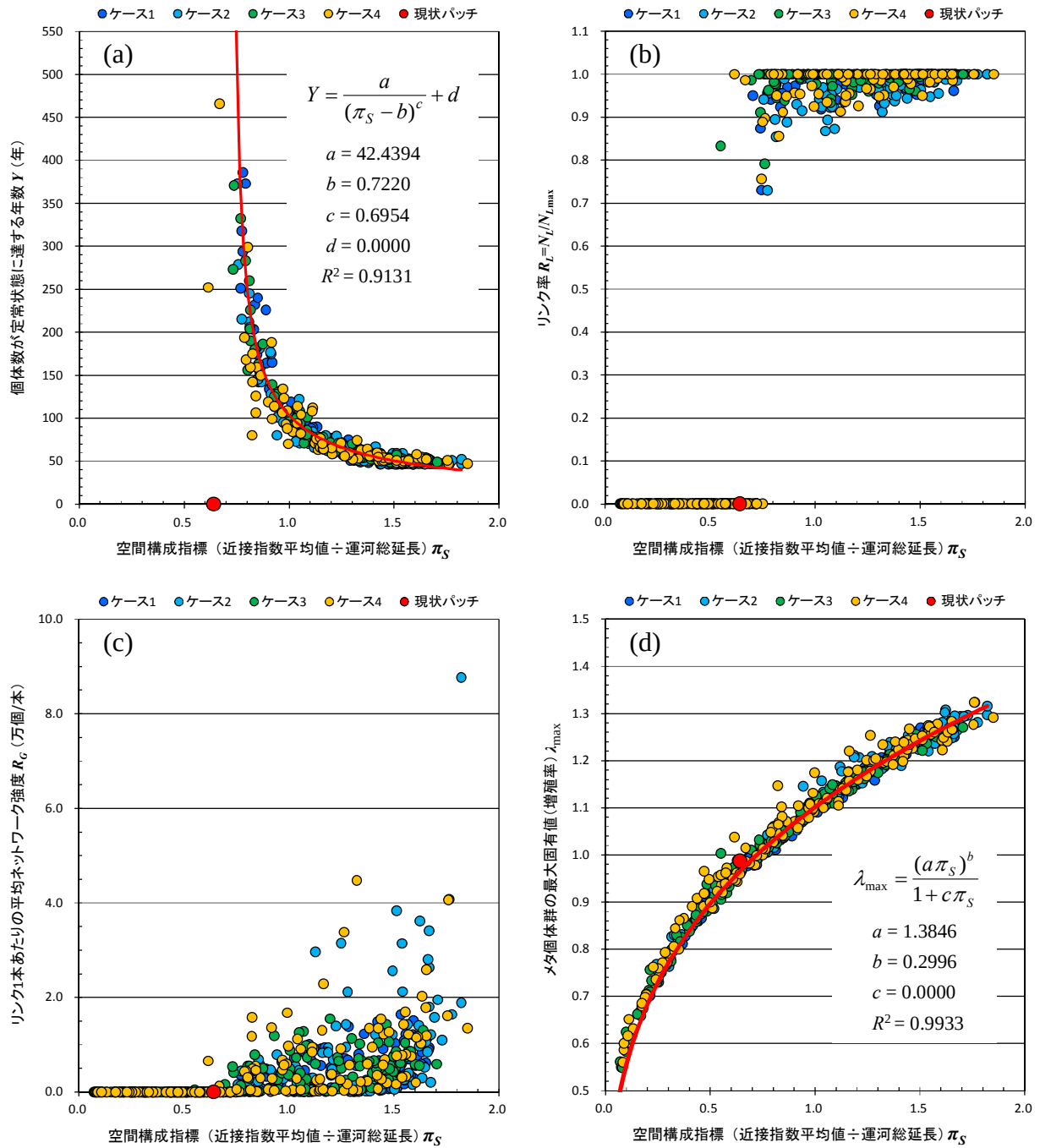


図-11 カニ類 ($T = 20$ 日間, $D = 10^4 \text{ cm}^2/\text{s}$) の生態系ネットワーク指標と空間構成指標 (近接指数平均値) との関係

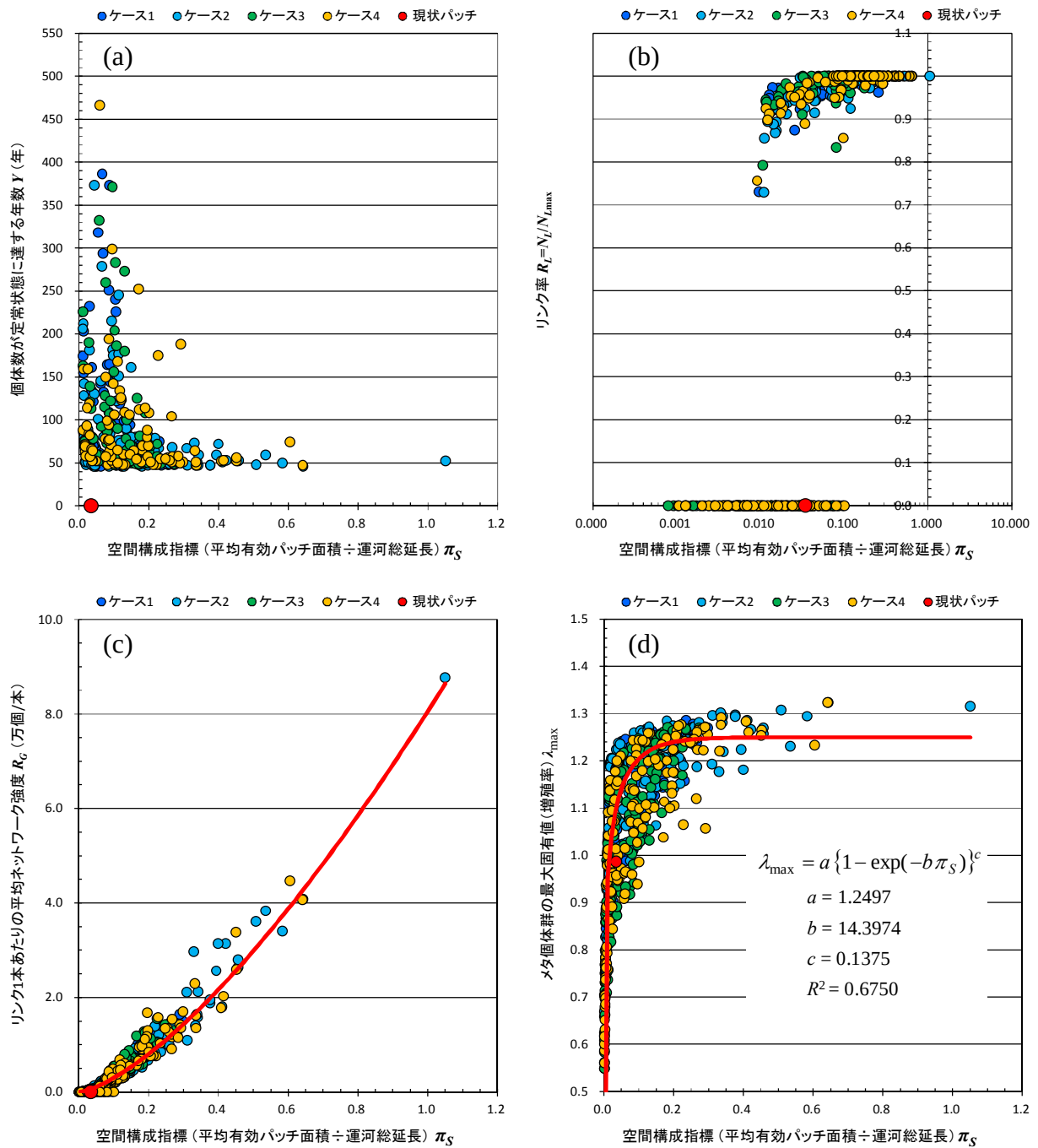


図-12 カニ類 ($T = 20$ 日間, $D = 10^4 \text{ cm}^2/\text{s}$) の生態系ネットワーク指標と空間構成指標 (平均有効パッチ面積) との関係

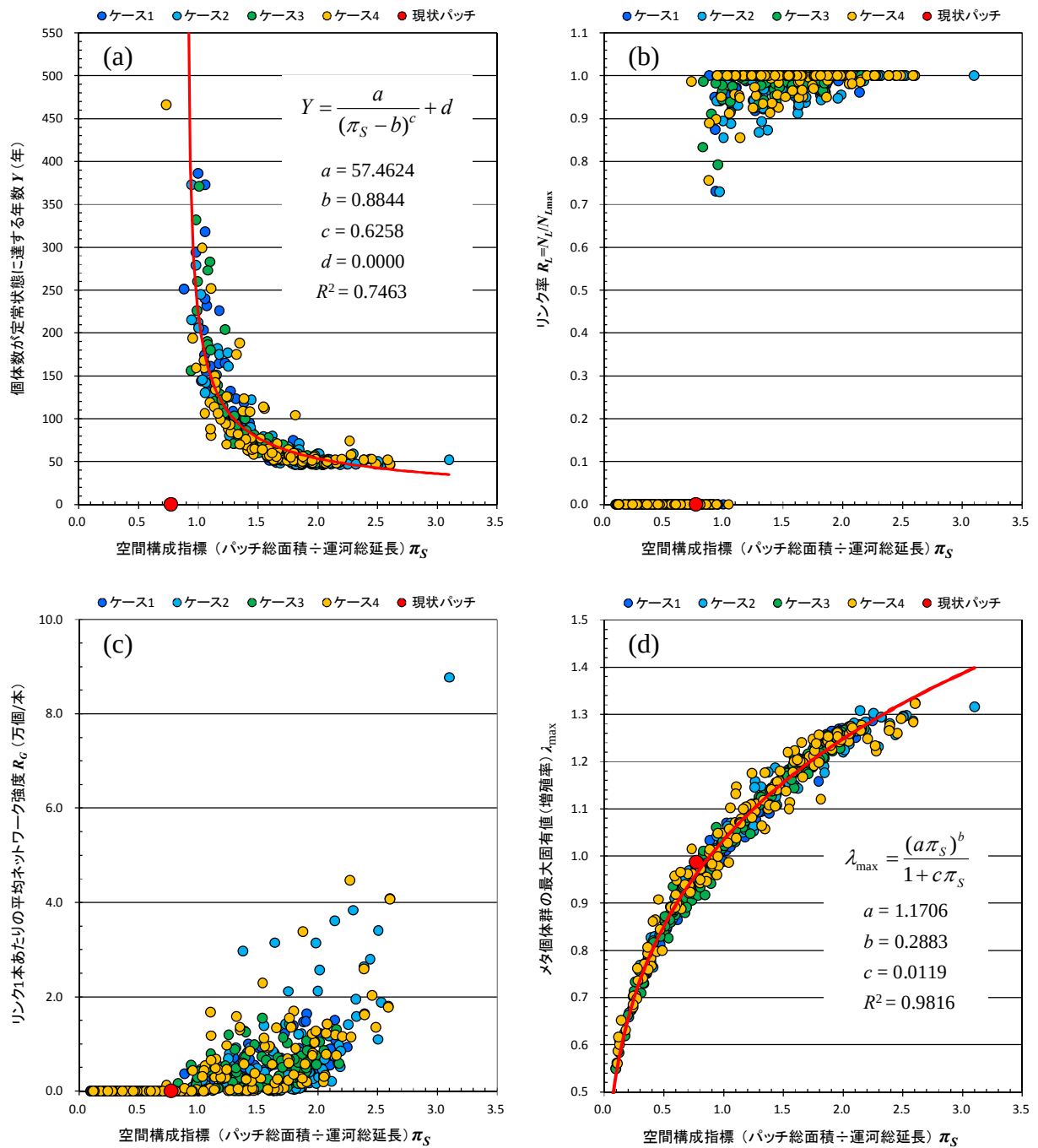


図-13 カニ類 ($T = 2$ 日間, $D = 10^5 \text{ cm}^2/\text{s}$) の生態系ネットワーク指標と空間構成指標 (パッチ総面積) との関係

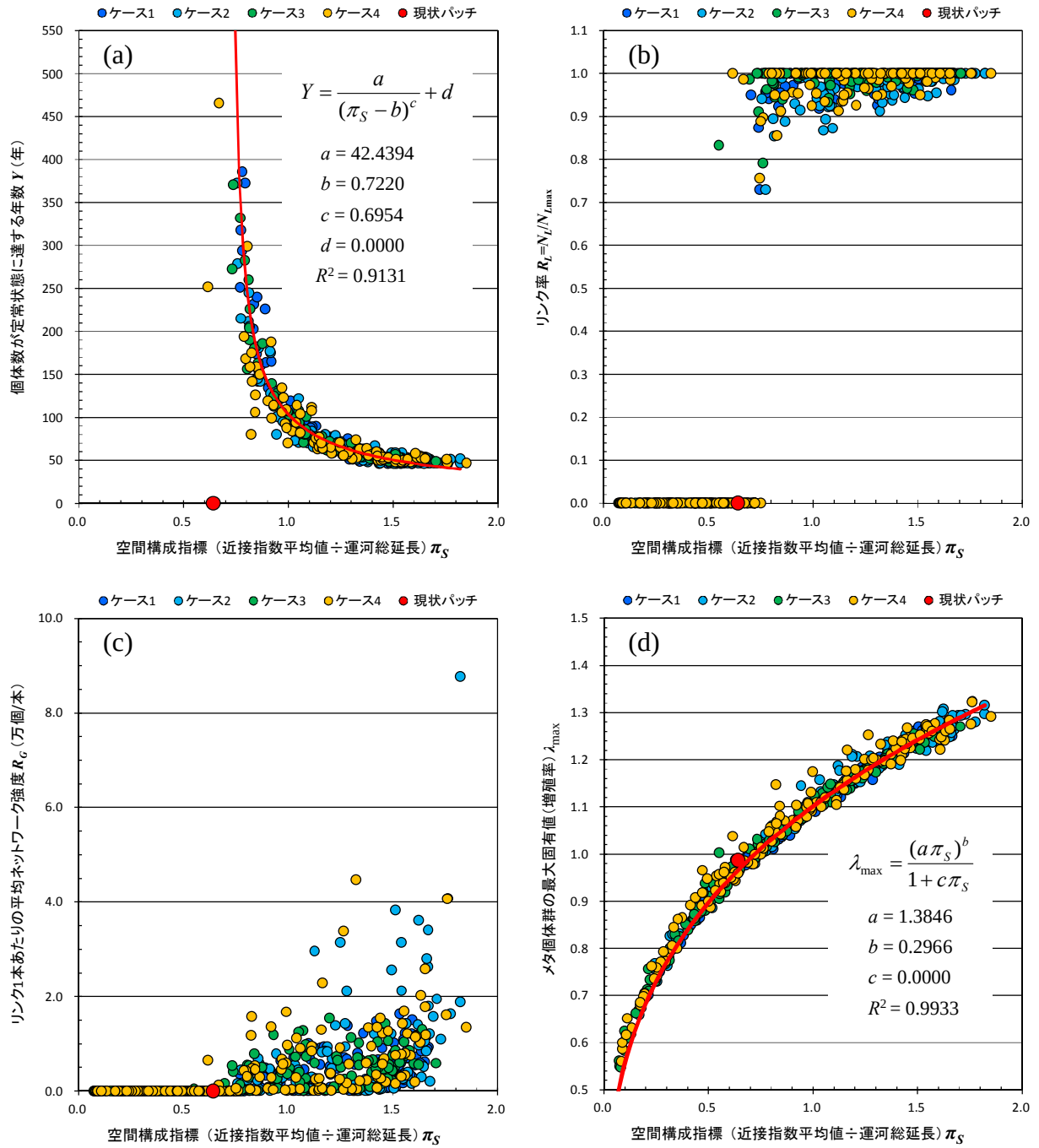


図-14 カニ類 ($T = 2$ 日間, $D = 10^5 \text{ cm}^2/\text{s}$) の生態系ネットワーク指標と空間構成指標 (近接指数平均値) との関係

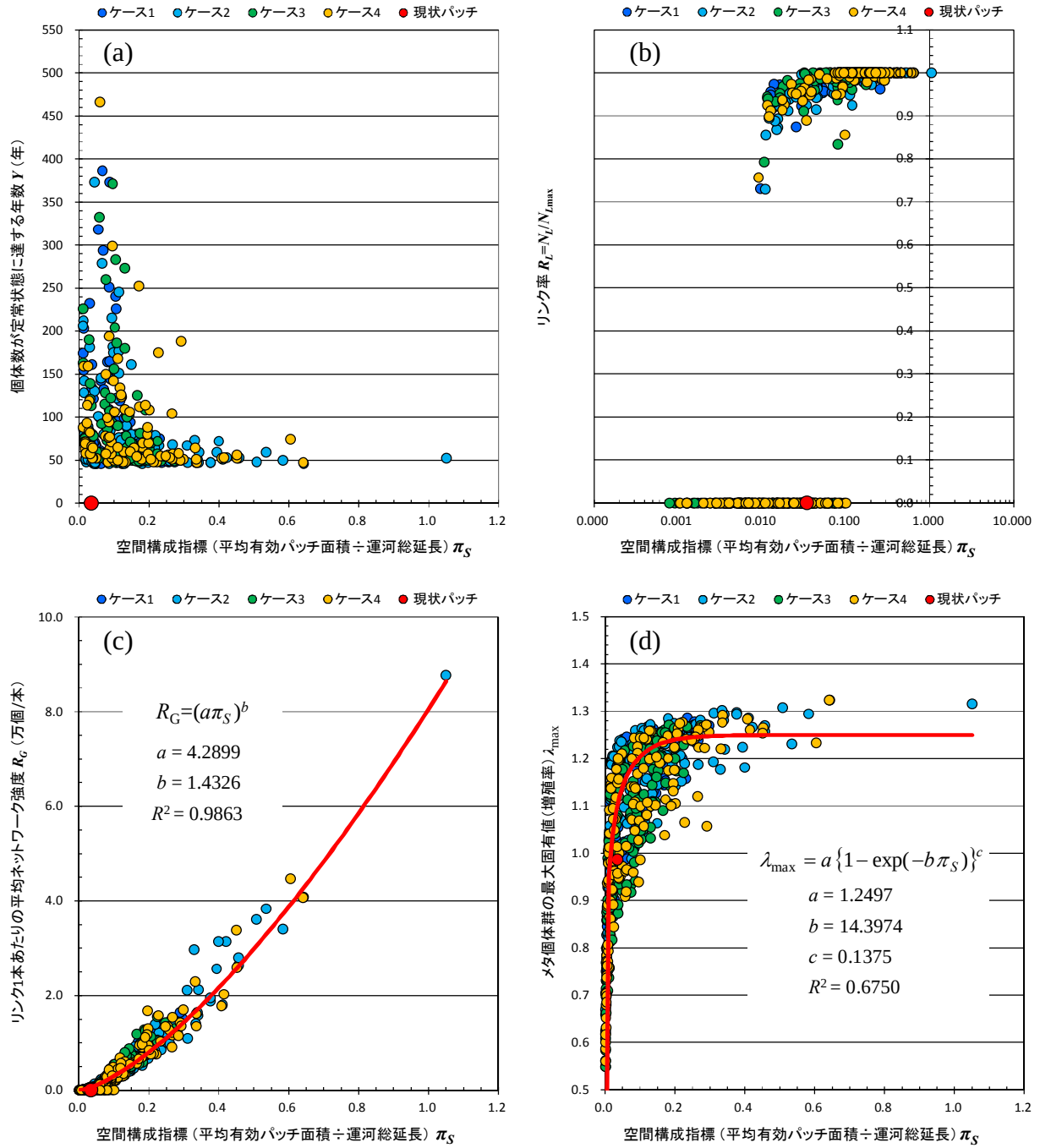


図-15 カニ類 ($T = 2$ 日間, $D = 10^5 \text{ cm}^2/\text{s}$) の生態系ネットワーク指標と空間構成指標 (平均有効パッチ面積) との関係

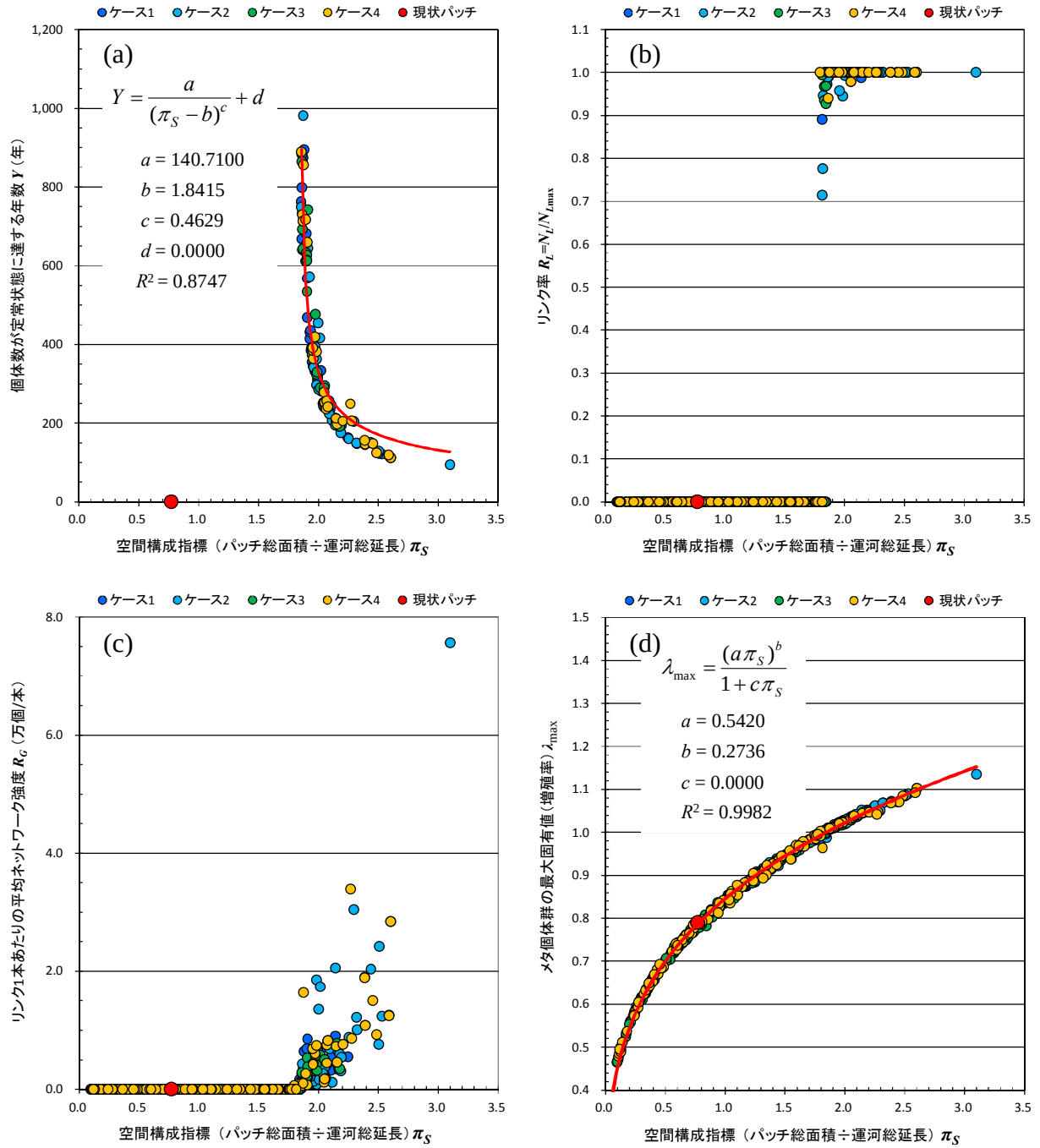


図-16 カニ類 ($T = 20$ 日間, $D = 10^5 \text{ cm}^2/\text{s}$) の生態系ネットワーク指標と空間構成指標 (パッチ総面積) との関係

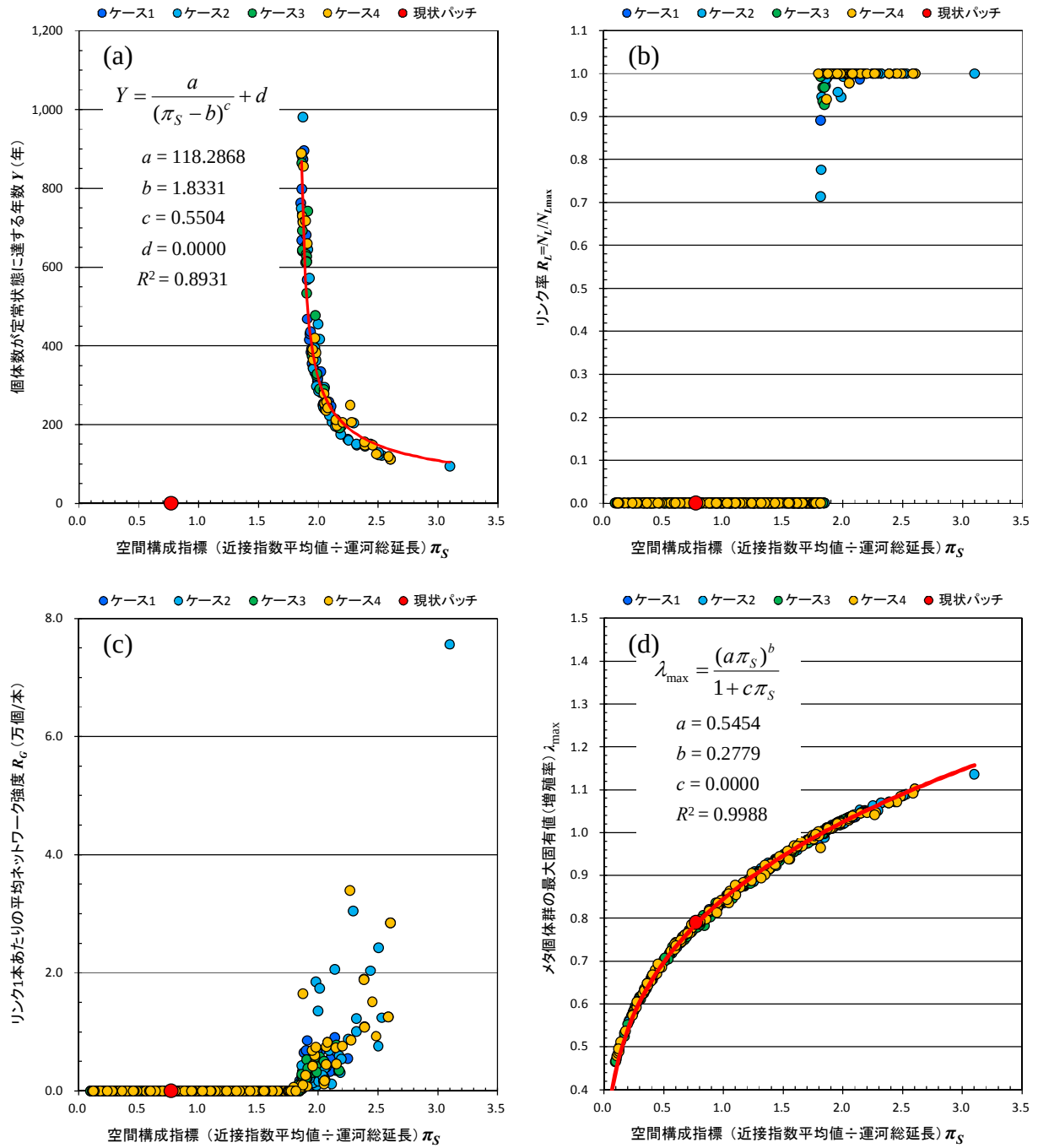


図-17 カニ類 ($T = 20$ 日間, $D = 10^5 \text{ cm}^2/\text{s}$) の生態系ネットワーク指標と空間構成指標 (近接指数平均値) との関係

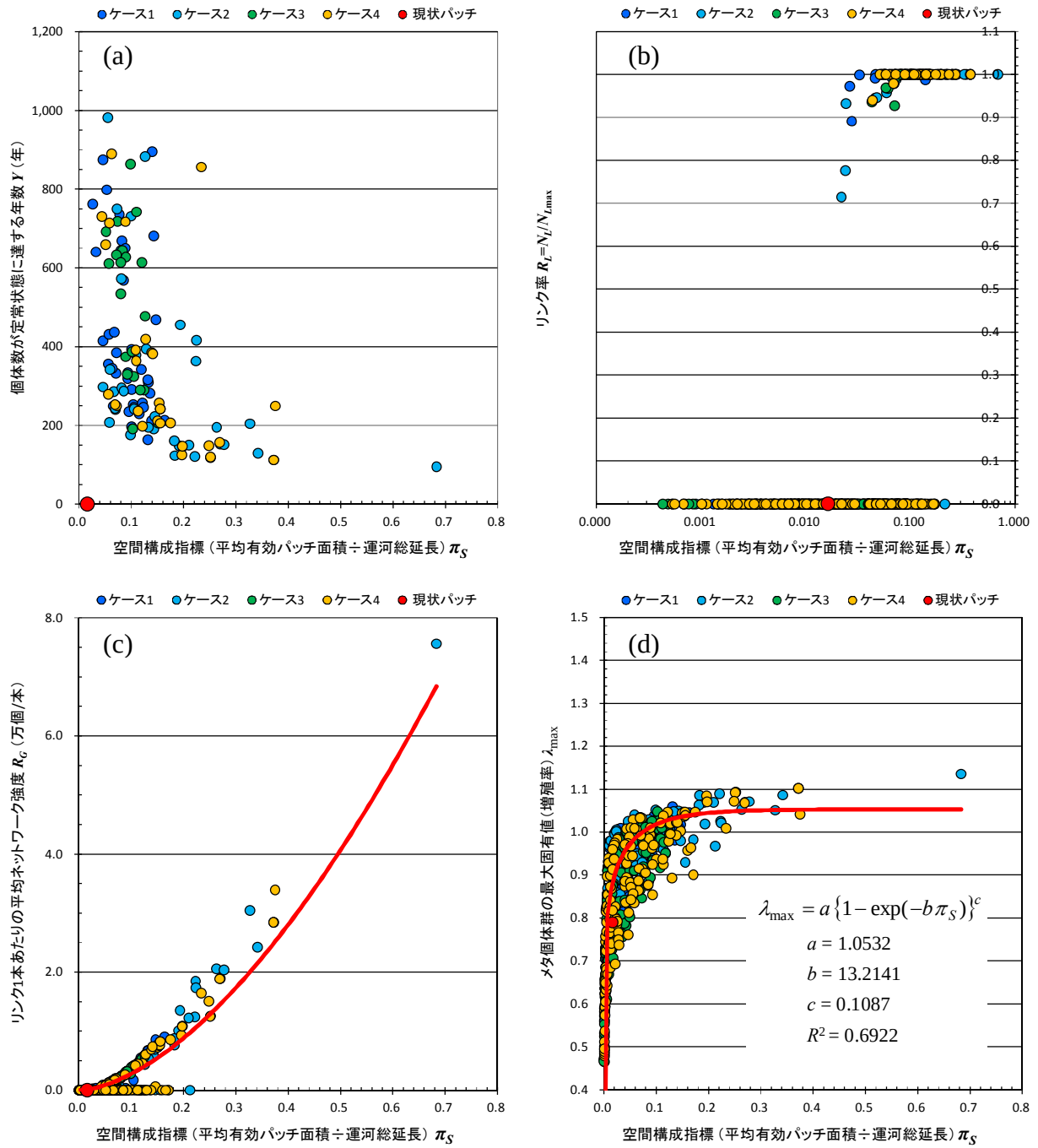


図-18 カニ類 ($T = 20$ 日間, $D = 10^5 \text{ cm}^2/\text{s}$) の生態系ネットワーク指標と空間構成指標 (平均有効パッチ面積) との関係

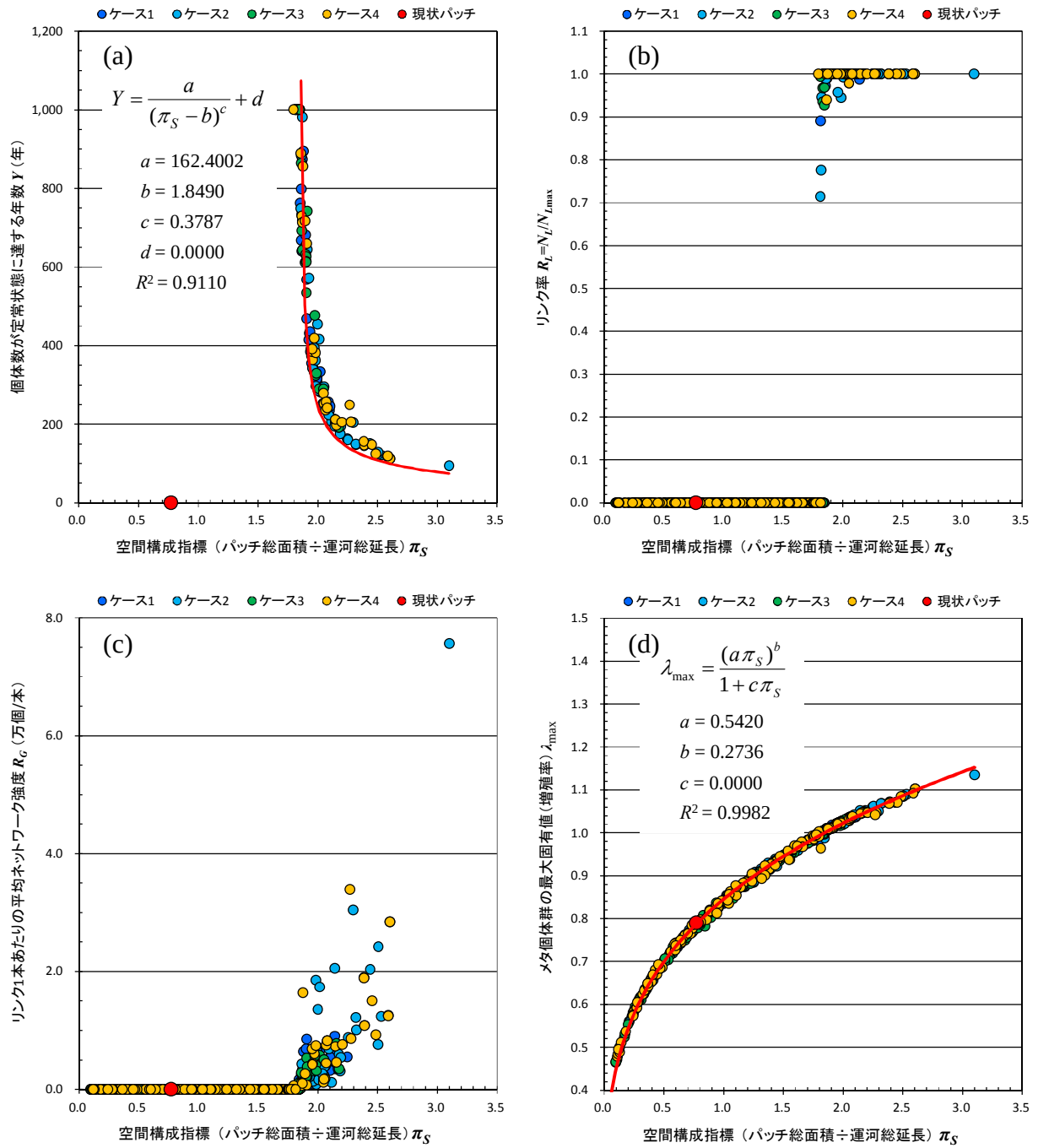


図-19 カニ類 ($T = 2$ 日間, $D = 10^6 \text{ cm}^2/\text{s}$) の生態系ネットワーク指標と空間構成指標 (パッチ総面積) との関係

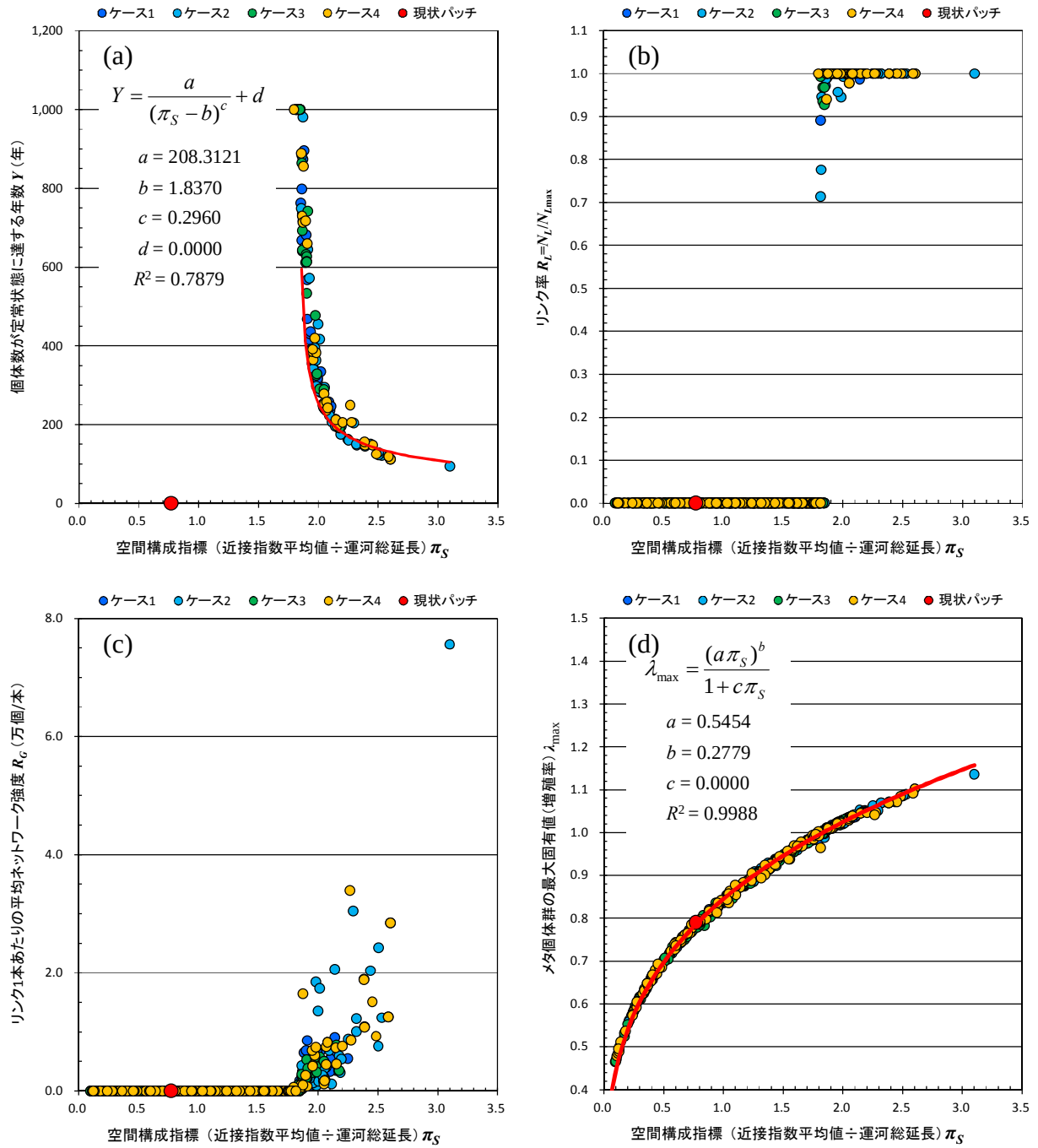


図-20 カニ類 ($T = 2$ 日間, $D = 10^6 \text{ cm}^2/\text{s}$) の生態系ネットワーク指標と空間構成指標 (近接指数平均値) との関係

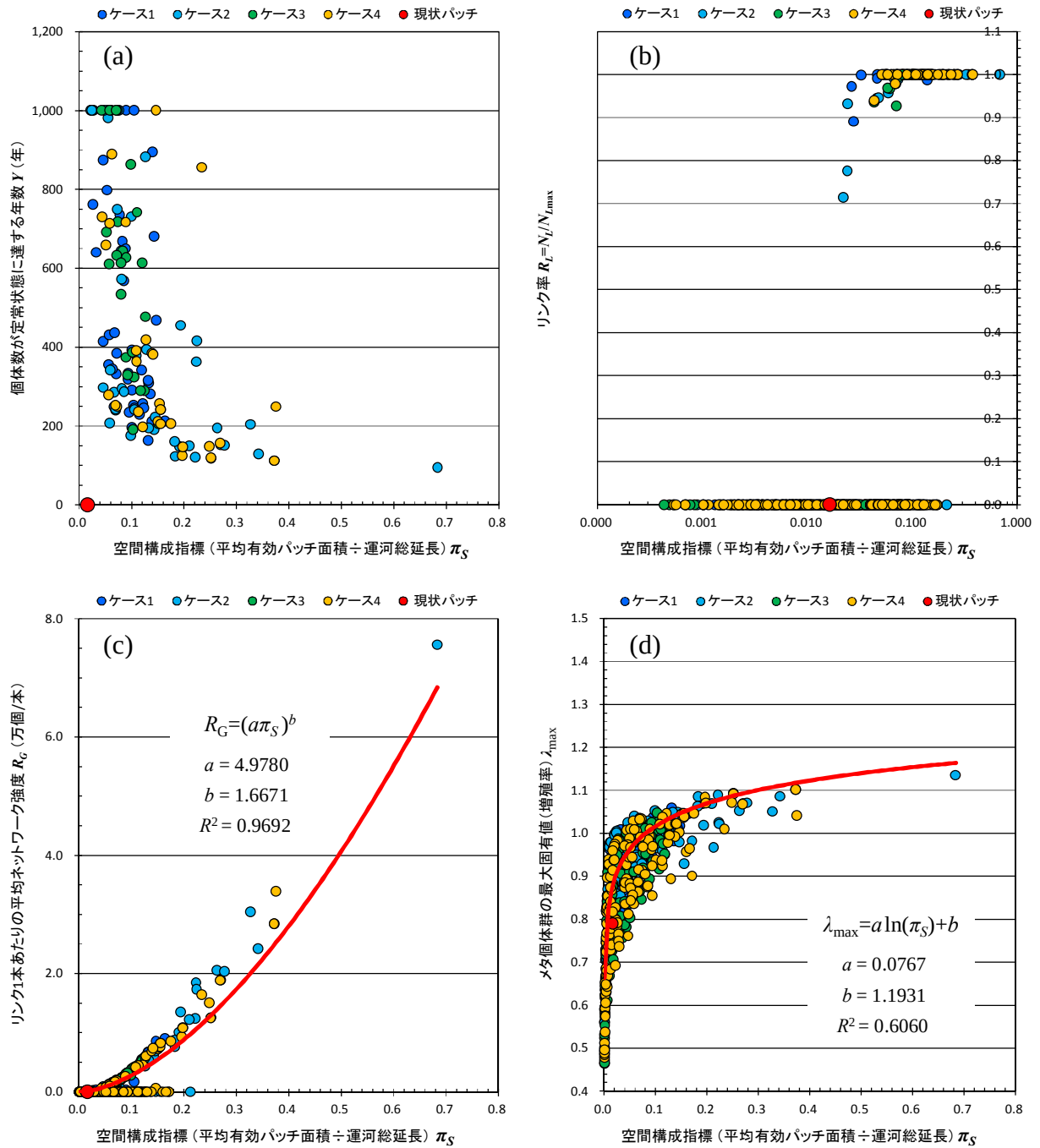


図-21 カニ類 ($T = 2$ 日間, $D = 10^6 \text{ cm}^2/\text{s}$) の生態系ネットワーク指標と空間構成指標 (平均有効パッチ面積) との関係

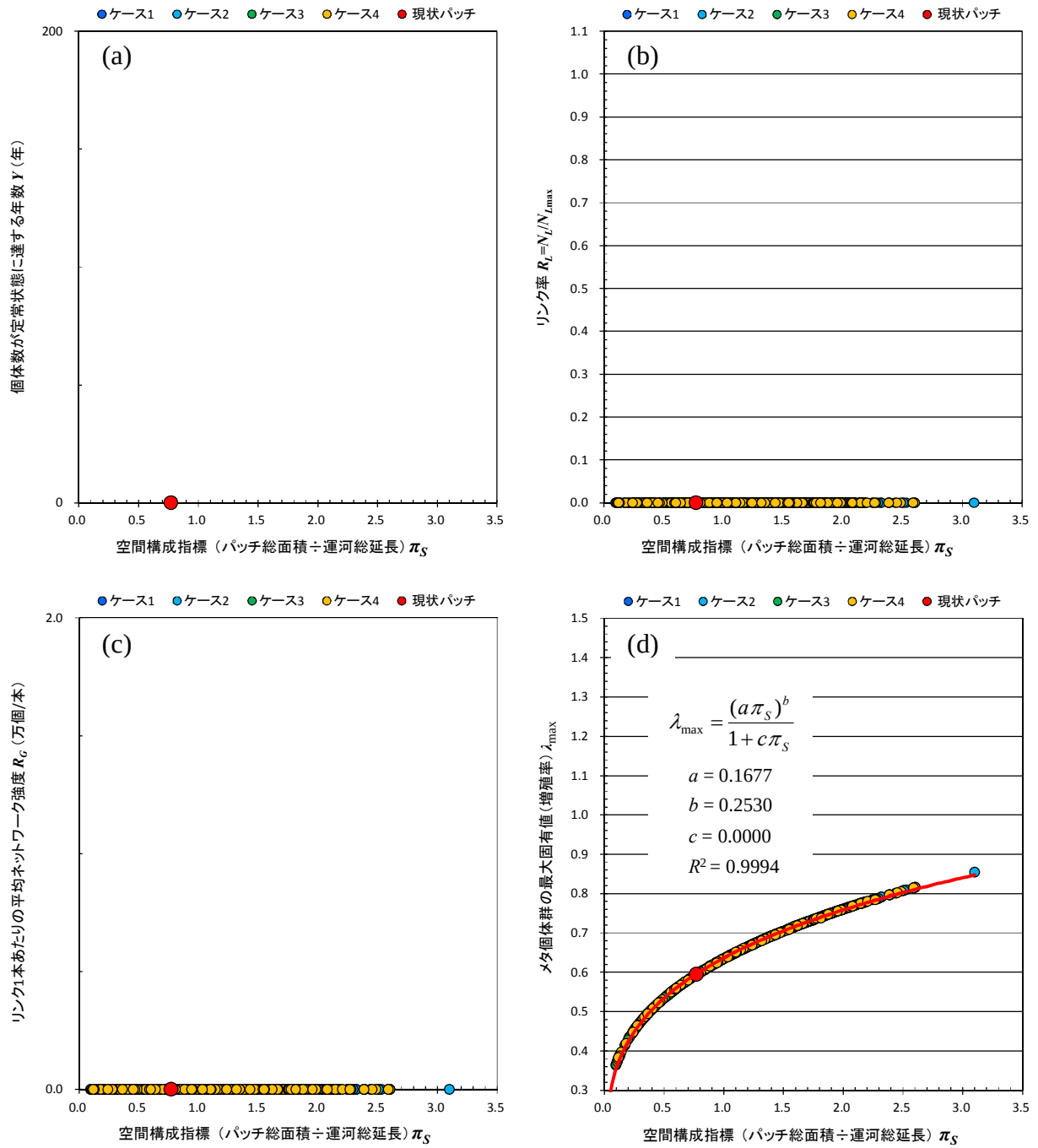


図-22 カニ類 ($T = 20$ 日間, $D = 10^6 \text{ cm}^2/\text{s}$) の生態系ネットワーク指標と空間構成指標 (パッチ総面積) との関係

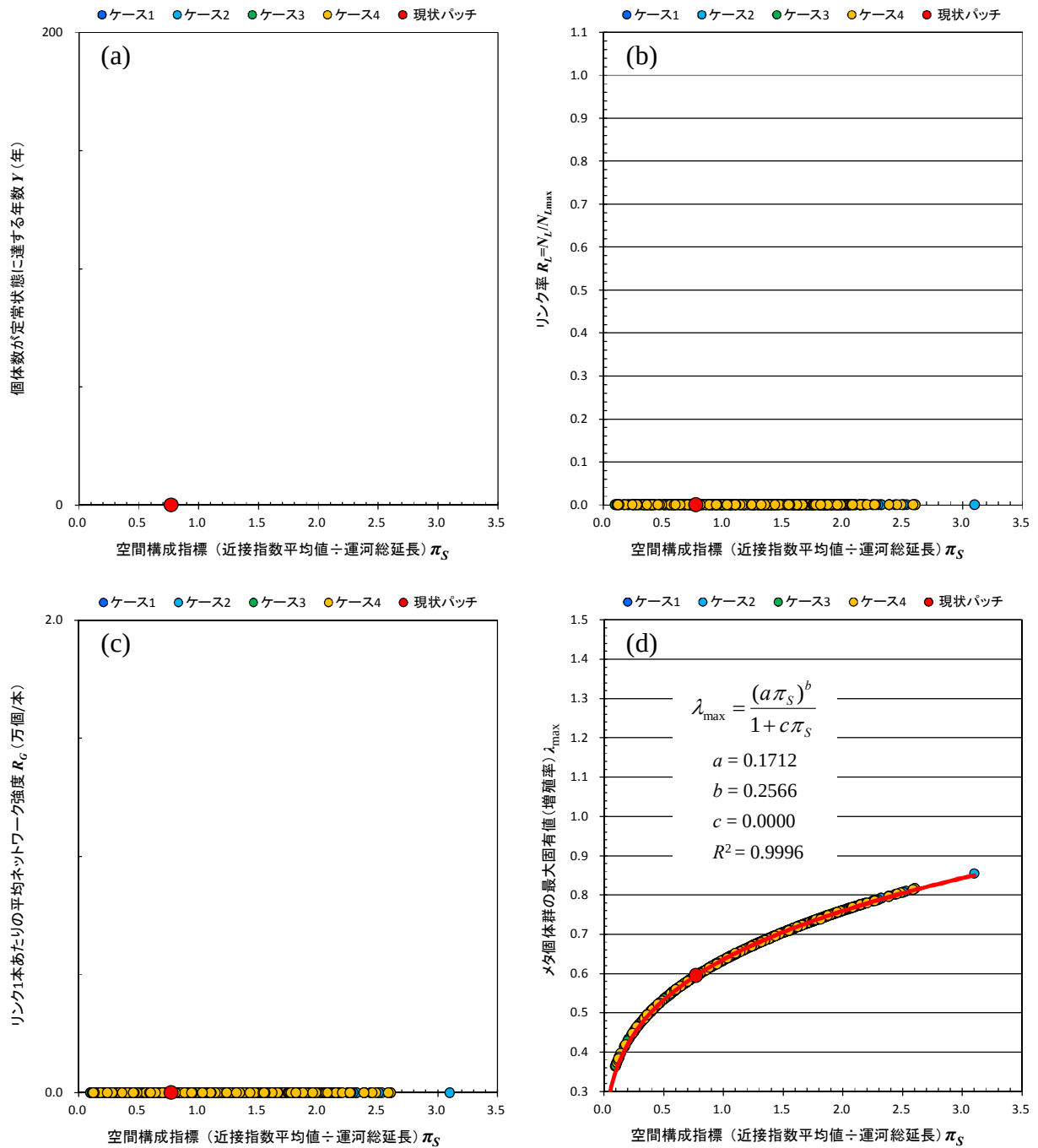


図-23 カニ類 ($T = 20$ 日間, $D = 10^6 \text{ cm}^2/\text{s}$) の生態系ネットワーク指標と空間構成指標 (近接指数平均値) との関係

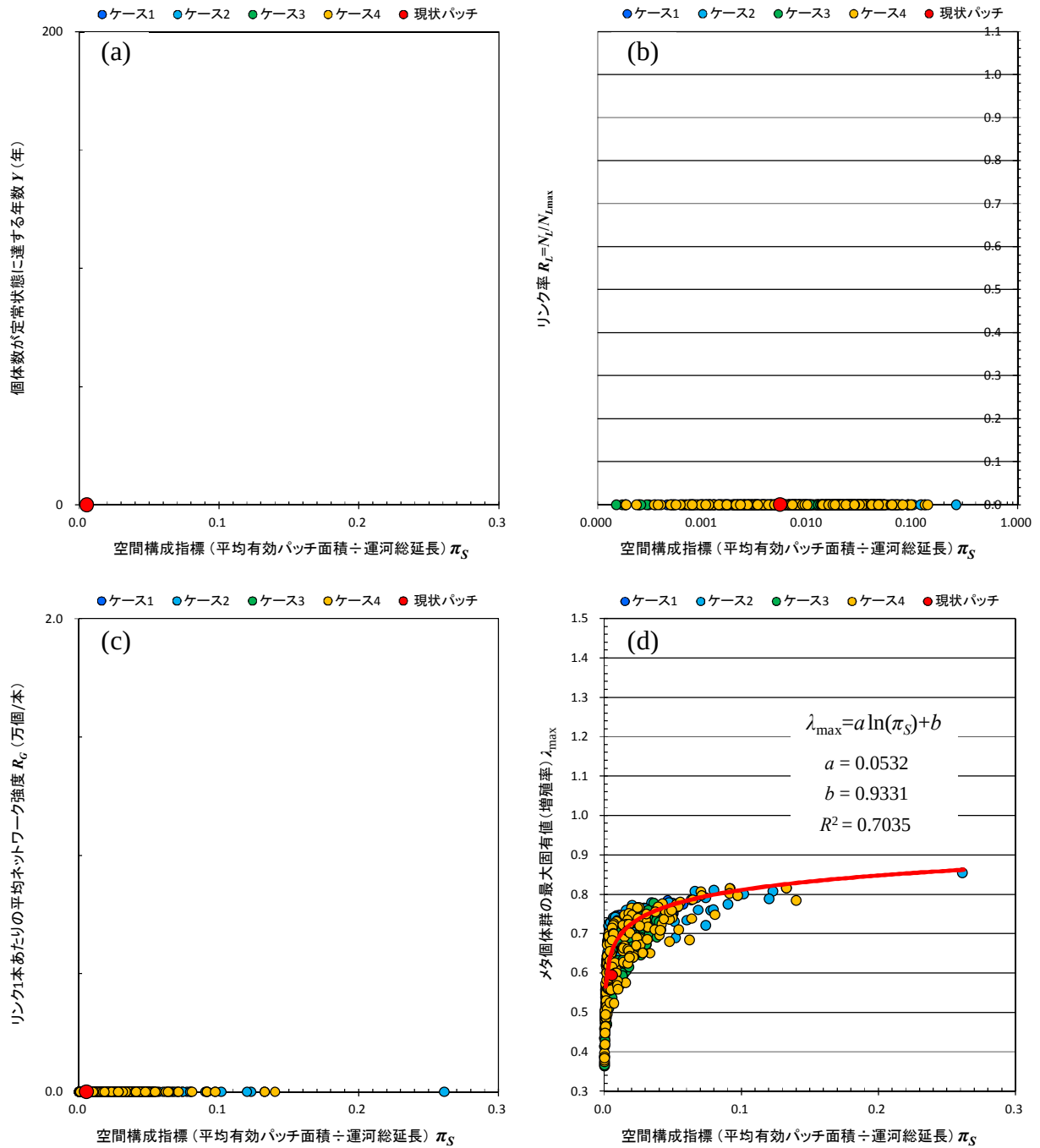


図-24 カニ類 ($T = 20$ 日間, $D = 10^6 \text{ cm}^2/\text{s}$) の生態系ネットワーク指標と空間構成指標 (平均有効パッチ面積) との関係

は、浮遊期間が2日間で拡散係数が 10^4 , 10^5 , 10^6 cm^2/s および、浮遊期間が20日間で拡散係数が 10^4 , 10^5 cm^2/s の場合、パッチ総面積/運河総延長、近接指数平均値/運河総延長、平均有効パッチ面積/運河総延長の増加に伴い、 $\lambda_{\max}$ が1付近に達すると、0より大きな値を取るケースが現れ始め、増加した（図-7b, 8b, 9b, 10b, 11b, 12b, 13b, 14b, 15b, 16b, 17b, 18b, 19b, 20b, 21b）。一方、浮遊期間が20日間で拡散係数が 10^6 cm^2/s の場合は、すべての計算ケースのメタ個体群が1世代目で全滅したため、リンク率は求められなかった（図-22b, 23b, 24b）。リンク1本あたりの平均ネットワーク強度は、浮遊期間が2日間で拡散係数が 10^4 , 10^5 , 10^6 cm^2/s の場合と、浮遊期間が20日間で拡散係数が 10^4 , 10^5 cm^2/s の場合に、パッチ総面積/運河総延長、近接指数平均値/運河総延長、平均有効パッチ面積/運河総延長の増加に伴い、 $\lambda_{\max}$ が1付近に達すると、0より大きな値を取るケースが現れ始め、増加した（図-7c, 8c, 9c, 10c, 11c, 12c, 13c, 14c, 15c, 16c, 17c, 18c, 19c, 20c, 21c）。このリンク1本あたりの平均ネットワーク強度の増加傾向は、空間構成指標が平均有効パッチ面積/運河総延長の場合に明瞭であった（図-9c, 12c, 15c, 18c, 21c）。一方、浮遊期間が20日間で拡散係数が 10^6 cm^2/s の場合は、すべての計算ケースのメタ個体群が1世代目で全滅したため、リンク1本あたりの平均ネットワーク強度は求められなかった（図-22c, 23c, 24c）。

これらの結果は、パッチ総面積の増加、および、パッチ周辺の他のパッチ面積の増加（近接指数の増加）が、カニ類の $\lambda_{\max}$ の上昇、個体群が定常状態になるまでの期間の短縮、生息場間の幼生のネットワークの本数の増加（リンク率の増加）、および、生息場間の幼生のネットワークの太さの増加（リンク1本あたりの平均ネットワーク強度の増加）を引き起こし、メタ個体群存続可能性を増大させることを示す。

パッチ総面積は、単純に対象空間内（運河幹線部）のパッチの総面積を示すのに対し、パッチ周辺の他のパッチ面積は、あるパッチから、カニ類がネットワークを形成できる範囲内にある他のパッチの総面積を示しており、ネットワークの形成に関与する可能性のある周辺のパッチの分布状況および総面積の両方を表す。

パッチ総面積の増加と共に、パッチ周辺の他のパッチ面積も増加するため、パッチ総面積の増加、あるいは、パッチ周辺の他のパッチ面積の増加による、メタ個体群存続可能性の増大への寄与は、個別には求められない。こうした生息場デザインの変更によるメタ個体群存続可能性の増大は、平均有効パッチ面積の増加

が示すパッチへの幼生供給量の潜在的増加と関連すると考えられる。

浮遊期間が2日間、拡散係数が 10^5 cm^2/s のカニ類のメタ個体群の場合、現状のパッチ総面積/運河総延長の値は0.77で、 $\lambda_{\max}$ は0.99と1未満であり、存続できない（図-13d, 14d, 15d）。 $\lambda_{\max}$ が1以上になるパッチ総面積/運河総延長の値は、図-13dの曲線より0.86である。また、近接指数平均値/運河総延長に関しては、現状の値が0.64で、 $\lambda_{\max}$ は0.99と1未満であり、存続できない。 $\lambda_{\max}$ が1以上になる近接指数平均値/運河総延長の値は、図-14dの曲線より0.72である。

これらの結果は、例えば次のようなことを示す。前述した $\lambda_{\max}$ が1以上になるパッチ面積/運河総延長あるいは、近接指数平均値/運河総延長の値から、石の護岸の総延長を、現状（5,000 m）よりも584 m以上増やす、あるいは、個々の石の護岸のパッチの中心から、 $S = 3,718$ mの範囲内に位置する石の護岸のパッチの総延長が、現状（4,156 m）よりも平均で520 m以上増えるように個々の石の護岸を近づける配置に変更することによって、現状では存続できないカニ類のメタ個体群が、存続できるようになると推計される。このように、 $\lambda_{\max}$ を用いることで、現状のシースケープをどのように変更すれば生物が存続するのかについて、定量的に示すことができる。

また、幼生のネットワーク強化に対しても利用することができる。例えば、浮遊期間が2日間、拡散係数が 10^5 cm^2/s のカニ類のメタ個体群の場合、パッチ総面積/運河総延長の値を、0.88から0.96に上げる、あるいは、近接指数平均値/運河総延長の値を、0.75から0.82まで上げると、回帰曲線に基づく個体群が定常状態となる年数の期待値は、元の年数の期待値の50%程度まで低下する（図-13a, 14a）。

前述した $\lambda_{\max}$ が1以上になるパッチ総面積/運河総延長あるいは、近接指数平均値/運河総延長の値から、石の護岸の総延長を、5,715 mである状況から、520 m分増やす、あるいは、個々の石の護岸のパッチの中心から、 $S = 3,718$ mの範囲内に位置する石の護岸のパッチの総延長が、平均4,871 mである状況から、455 m分増えるように、個々の石の護岸を近づけた配置に変更することによって、個体群サイズが飽和するまでに必要な年数は、元の配置で必要であった年数と比べて、50%程度まで短縮されると推計される。その結果、運河幹線部のメタ個体群のみでなんとか存続できる状況であったカニ類のメタ個体群存続可能性は、よりいっそう高まる。

パッチ総面積の増加に伴い、平均有効パッチ面積も増加するが、図-15cに示す通り、リンク1本あたりの平均ネットワーク強度は、平均有効パッチ面積の増加と共に増加することが分かる。このように、パッチ総面積の増加は、ネットワーク強度の増加をもたらし、より強固なメタ個体群の形成を可能にする。

なお、本研究で扱ったハビタット評価モデルは、餌を巡る種内競争による幼生生産数の変動や、環境勾配および一時的な環境攪乱による生残率への影響を考慮していない。こうした条件をモデルへ組み込むことは、今後の課題である。

4. おわりに

4.1 まとめ

東京港京浜運河の生息基盤を広域的に調査し、底生生物の生息場の空間分布を定量化した。また、メタ個体群の存続可能性を示すメタ個体群成長率 $\lambda_{\max}$ およびハビタット評価モデルを新しく提案した。

その結果、現状の生息場は付着性二枚貝類の存続に適しており、底生二枚貝類にとっては困難な状況と考えられた。また、底生動物の生息場としてのシースケープを評価し、現状の生物の存続可能性の程度を定量的に示すだけでなく、存続困難な状態から存続可能な状態とするシースケープの定量的な情報を得ることが可能となった。

4.2 今後の展望

本検討は、「はじめに」に記述したように、水域全体のシースケープのデザインの基礎的検討の段階である。本資料は、運河幹線部を一次元空間と仮定し、モデル生物の存続可能性を高める生息場の空間配置について定量的に検討した段階である。この検討で用いた個体群動態モデルの実海域への適用を目指すためには、まず、既往の知見が不足しているために、任意に設定していたパラメータに関して、入手の困難な文献を対象とした文献情報の収集、あるいは基礎研究の実施を通じて適切な値を取得し、ハビタット評価モデルに導入する必要がある。本研究を踏まえた次の段階として、二次元空間への適用を検討する必要があると考えている。また、生態系サービスの長期安定供給に関わる生物多様性についても、今後考慮してゆく必要がある。一段一段検討を積み重ね、生物の豊かなシースケープのデザインを明らかにし、実海域への適用を目指したいと考えている。

(2017年8月31日受付)

参考文献

- 秋山吉寛・井芹絵里奈・岡田知也 (2014) : 内湾に分布する魚類の生息場と生活史に基づく類型, 国土技術政策総合研究所資料, No.809, 28p.
- 秋山吉寛・井芹絵里奈・岡田知也 (2015) : 沿岸域の環境デザインに向けた魚類の類型, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 71, No. 2, pp. I_1495-I_1500.
- 秋山吉寛・井芹絵里奈・岡田知也 (2016) : 浮遊幼生に着目した生息場の空間配置の検討, 国土技術政策総合研究所資料, No.889, 27p.
- 秋山吉寛・黒岩寛・眞田武・増田龍哉・岡田知也 : 東京港京浜運河周辺の浮遊期をもつ貝類・甲殻類に適したシースケープの検討, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 73, No. 2 (印刷中).
- 岡田知也・古川恵太 (2010) : 運河部の貧酸素水塊に及ぼす内湾部の貧酸素水塊の影響, 海洋開発論文集, 第 26 巻, pp.663-668.
- 佐藤千鶴・古川恵太・岡田知也 (2006) : 京浜運河における底生生物からみた自然再生の可能性, 海洋開発論文集, 第 22 巻, pp.211-216.
- 武田正倫 (1978) : カニの生態と観察, ニュー・サイエンス社, 94p.
- 日本水産資源保護協会 (1985) : 水産生物の生活史と生態, 日本水産資源保護協会, 251p.
- 細見彬文 (1989) : ムラサキイガイの生態学, 山海堂, 137p.
- 松梨順三郎 (1993) : 環境流体汚染, 森北出版株式会社, 407p.
- 宮下直・野田隆史 (2003) : 群集生態学, 東京大学出版会, 187p.
- 安田秀一 (2015) : 内湾における物質分散過程 混合拡散代表時間の意義と Ekman 吹送流や潮汐残差流による物質循環, 海の研究, 第 24 巻, 1 号, pp.1-28.
- BARBIER, E. B., HACKER, S. D., KENNEDY, C., KOCH, E. W., STIER, A. C. and SILLIMAN, B. R. (2011): The value of estuarine and coastal ecosystem services, *Ecol. Monogr.*, Vol. 81, No. 2, pp.169-193.
- BOSTRÖM, C., PITTMAN, S. J., SIMENSTAD, C. and KNEIB, R. T. (2011): Seascape ecology of coastal biogenic habitats: advances, gaps, and challenges, *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, Vol.427, pp.191-217.
- COSTANZA, R., D'ARGE, R., DE GROOT, R., FARBER,

- S., GRASSO, M., HANNON, B., LIMBURG, K., NAEEM, S., O'NEILL, R. V., PARUELO, J., RASKIN, R. G., SUTTON, P. and VAN DEN BELT, M. (1997): The value of the world's ecosystem services and natural capital, *Nature*, Vol.387, 253-260.
- COSTANZA, R., DE GROOT, R., SUTTON, P., VAN DER PLOEG, S., ANDERSON, S. J., KUBISZEWSKI, I., FARBER, S. and TURNER, R. K. (2014): Changes in the global value of ecosystem services, *Global Environ. Chang.*, Vol.26, pp.152-158.
- HANSKI, I. (1999): *Metapopulation Ecology*, Oxford University Press, Oxford, 328p.
- MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT (2005): *Ecosystem and human well-being: Synthesis*, Island Press, Washington, DC, 137p.

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of NILIM

No. 989 October 2017

編集・発行 ©国土技術政策総合研究所

本資料の転載・複写のお問い合わせは
〔〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1
管理調整部企画調整課 電話:046-844-5019〕
E-mail:ysk.nil-kikaku@ml.mlit.go.jp