

図 A-10 第4回瀬戸内海環境情報基本調査データを用いた、底質 TOC に対する底生動物の出現頻度分布(棒グラフ)と確率密度関数(黄線)。赤点線は、底生動物が底質 TOC に対し一様分布した際の確率密度分布。表 A-1 の No. 81~120 までの種

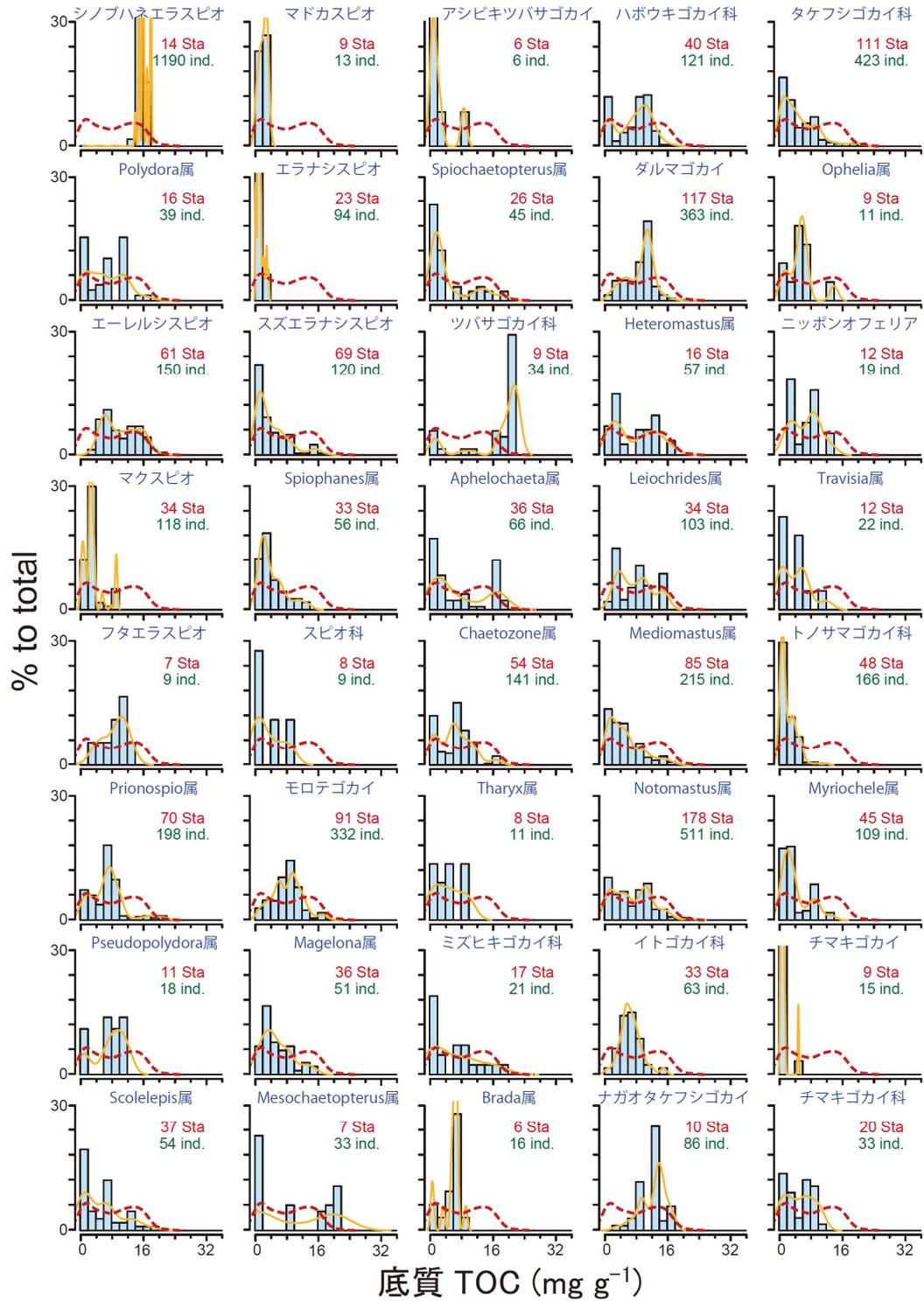


図 A-11 第4回瀬戸内海環境情報基本調査データを用いた、底質 TOC に対する底生動物の出現頻度分布(棒グラフ)と確率密度関数(黄線)。赤点線は、底生動物が底質 TOC に対し一様分布した際の確率密度分布。表 A-1 の No. 121~160 までの種

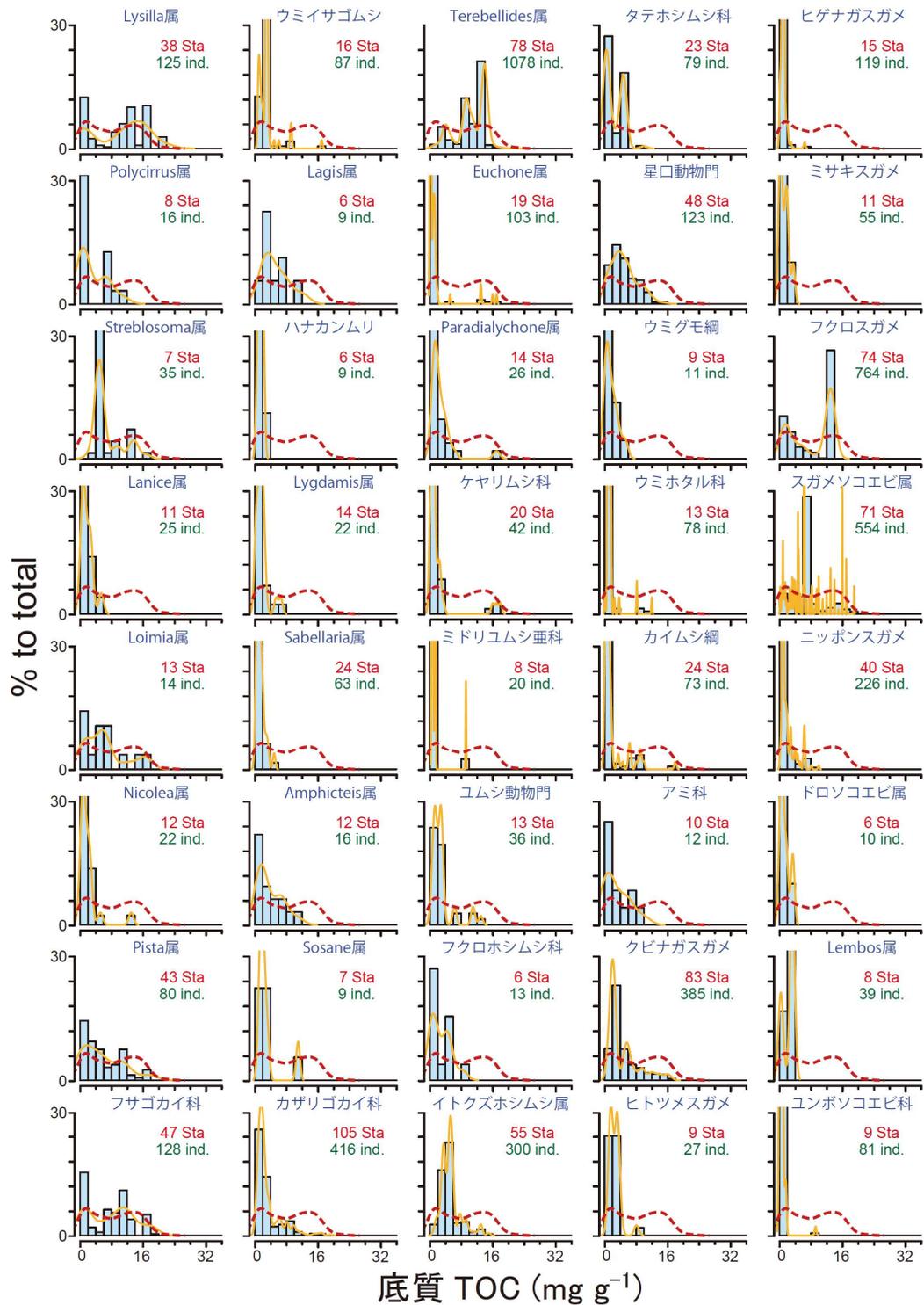


図 A-12 第4回瀬戸内海環境情報基本調査データを用いた、底質 TOC に対する底生動物の出現頻度分布(棒グラフ)と確率密度関数(黄線)。赤点線は、底生動物が底質 TOC に対し一様分布した際の確率密度分布。表 A-1 の No. 161~200 までの種

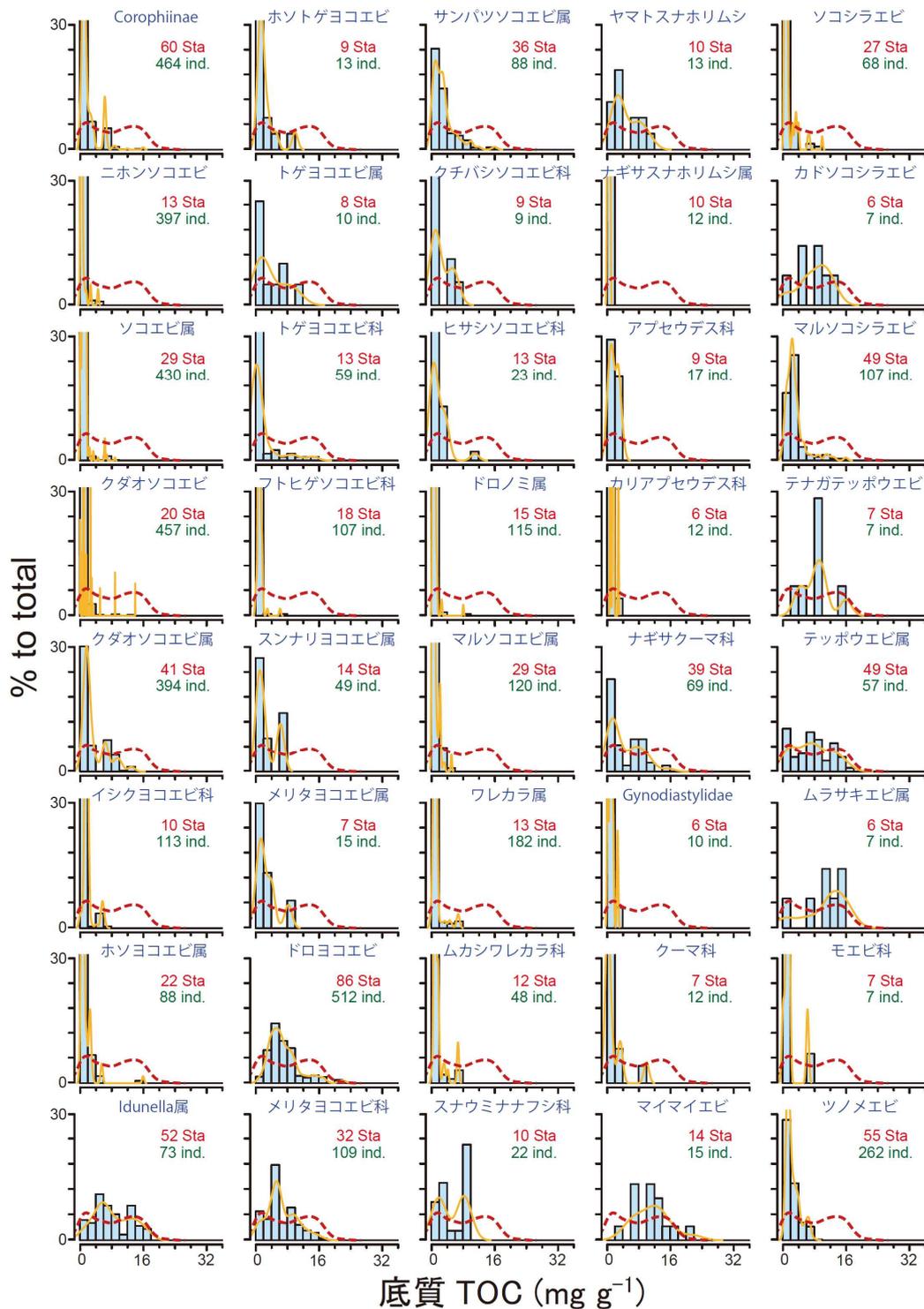


図 A-13 第 4 回瀬戸内海環境情報基本調査データを用いた、底質 TOC に対する底生動物の出現頻度分布（棒グラフ）と確率密度関数（黄線）。赤点線は、底生動物が底質 TOC に対し一様分布した際の確率密度分布。表 A-1 の No. 200~240 までの種

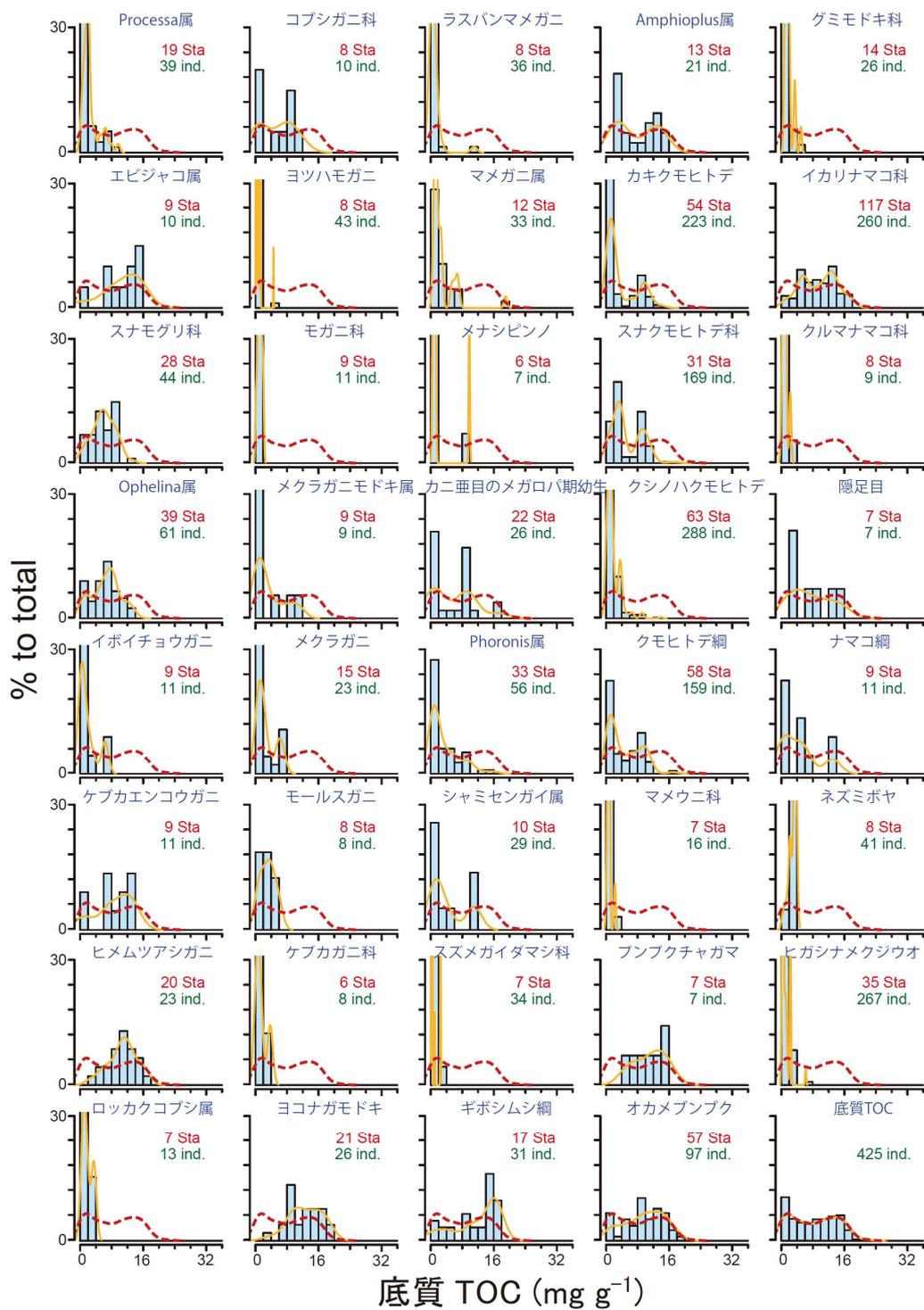


図 A-14 第 4 回瀬戸内海環境情報基本調査データを用いた、底質 TOC に対する底生動物の出現頻度分布（棒グラフ）と確率密度関数（黄線）。赤点線は、底生動物が底質 TOC に対し一様分布した際の確率密度分布。表 A-1 の No. 240~279 までの種

## 2.4 水深

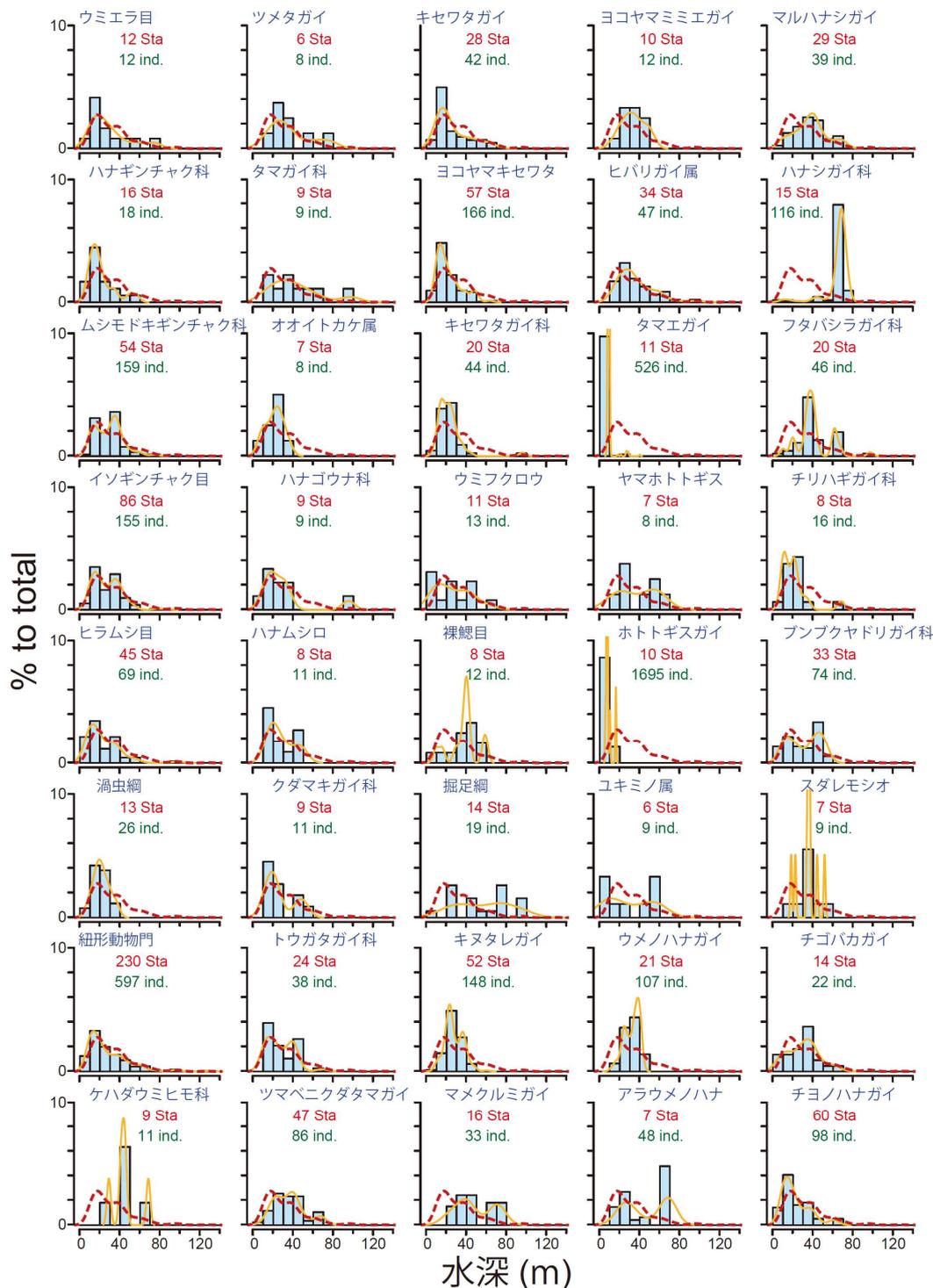


図 A-15 第4回瀬戸内海環境情報基本調査データを用いた、水深に対する底生動物の出現頻度分布 (棒グラフ)と確率密度関数(黄線)。赤点線は、底生動物が水深に対し一様分布した際の確率密度分布。表 A-1 の No. 1~40 までの種

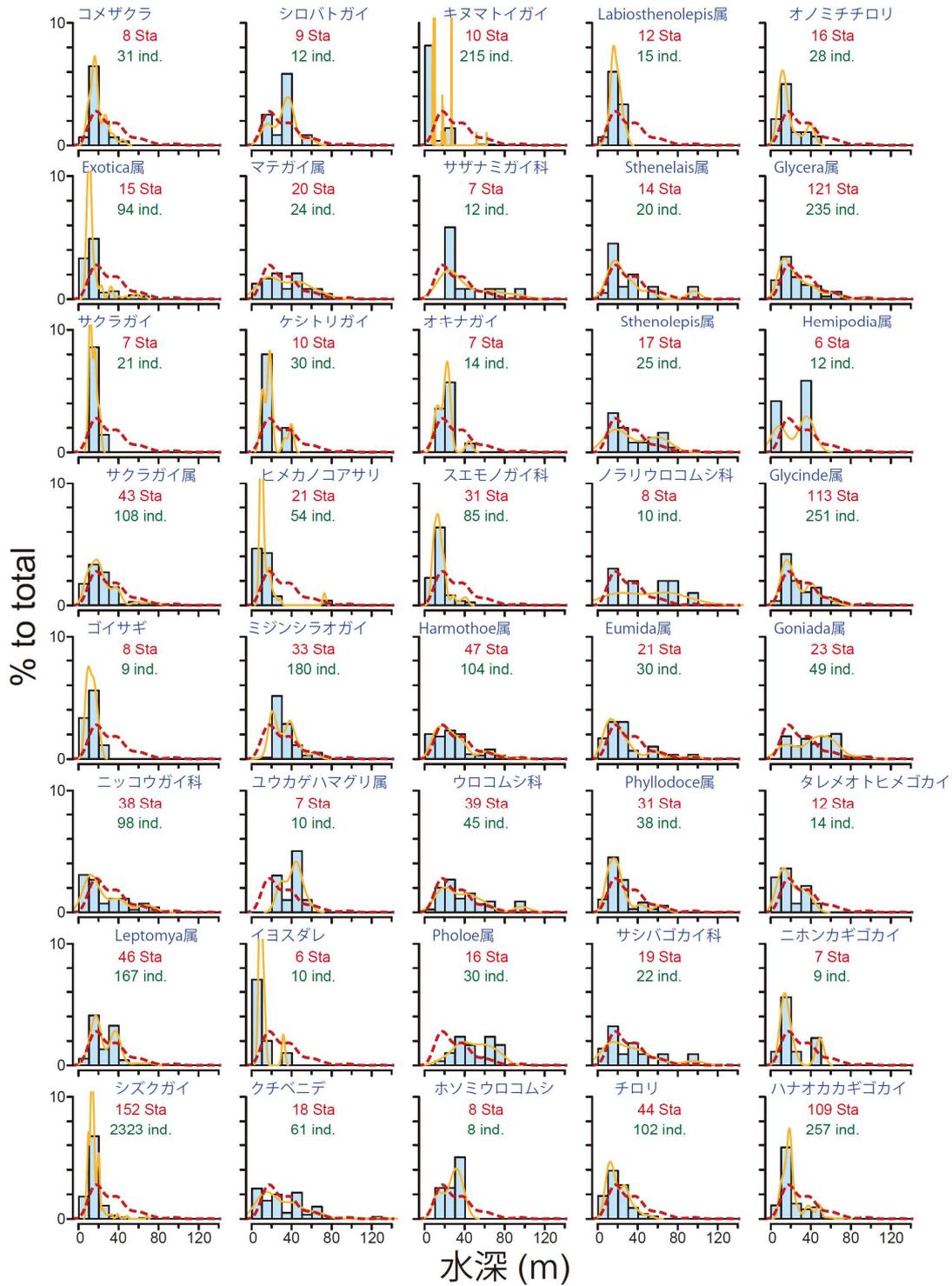


図 A-16 第 4 回瀬戸内海環境情報基本調査データを用いた、水深に対する底生動物の出現頻度分布 (棒グラフ) と確率密度関数 (黄線)。赤点線は、底生動物が水深に対し一様分布した際の確率密度分布。表 A-1 の No. 41~80 までの種

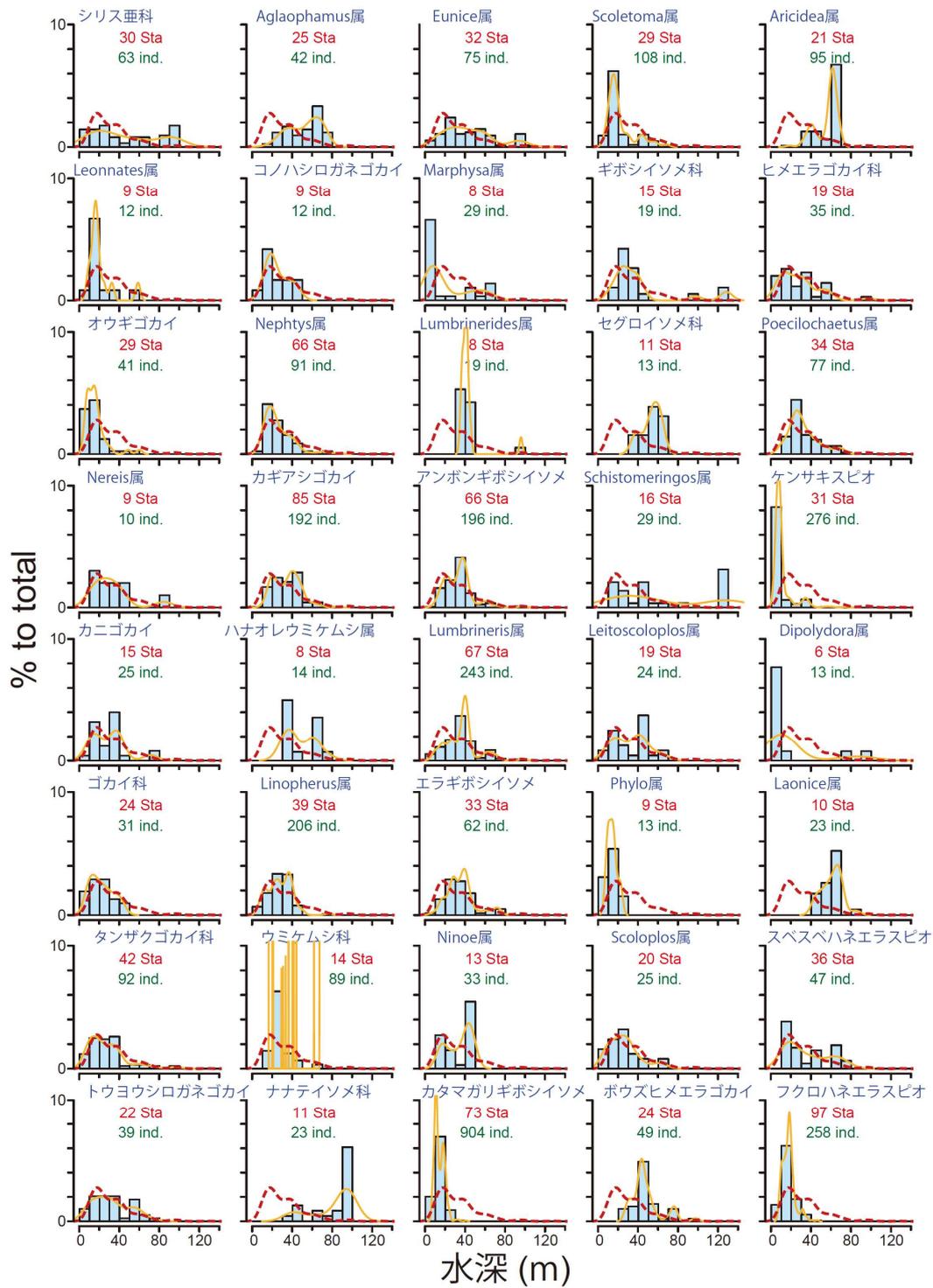


図 A-17 第4回瀬戸内海環境情報基本調査データを用いた、水深に対する底生動物の出現頻度分布 (棒グラフ) と確率密度関数 (黄線)。赤点線は、底生動物が水深に対し一様分布した際の確率密度分布。表 A-1 の No. 81~120 までの種

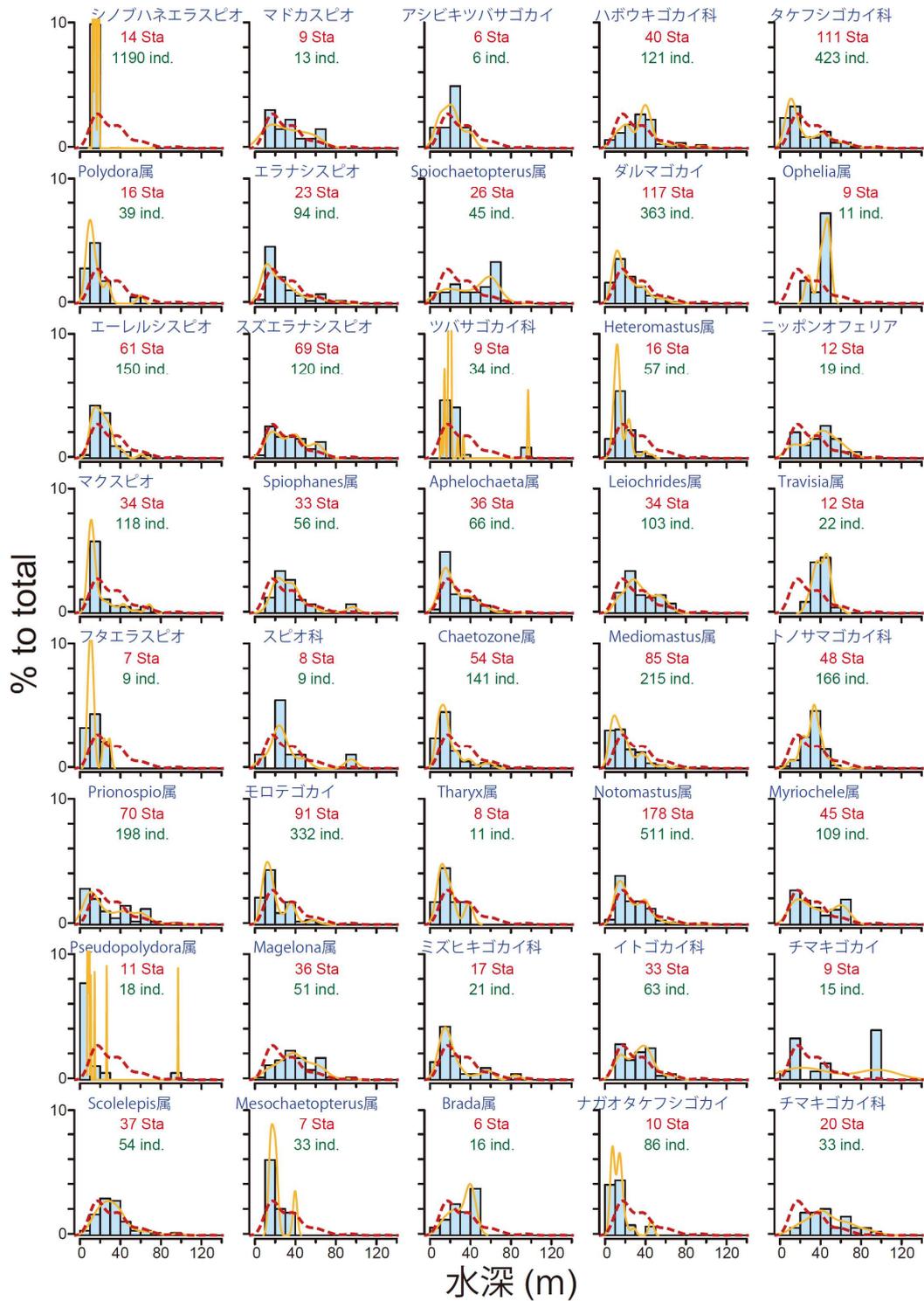


図 A-18 第 4 回瀬戸内海環境情報基本調査データを用いた、水深に対する底生動物の出現頻度分布 (棒グラフ) と確率密度関数 (黄線)。赤点線は、底生動物が水深に対し一様分布した際の確率密度分布。表 A-1 の No. 121~160 までの種

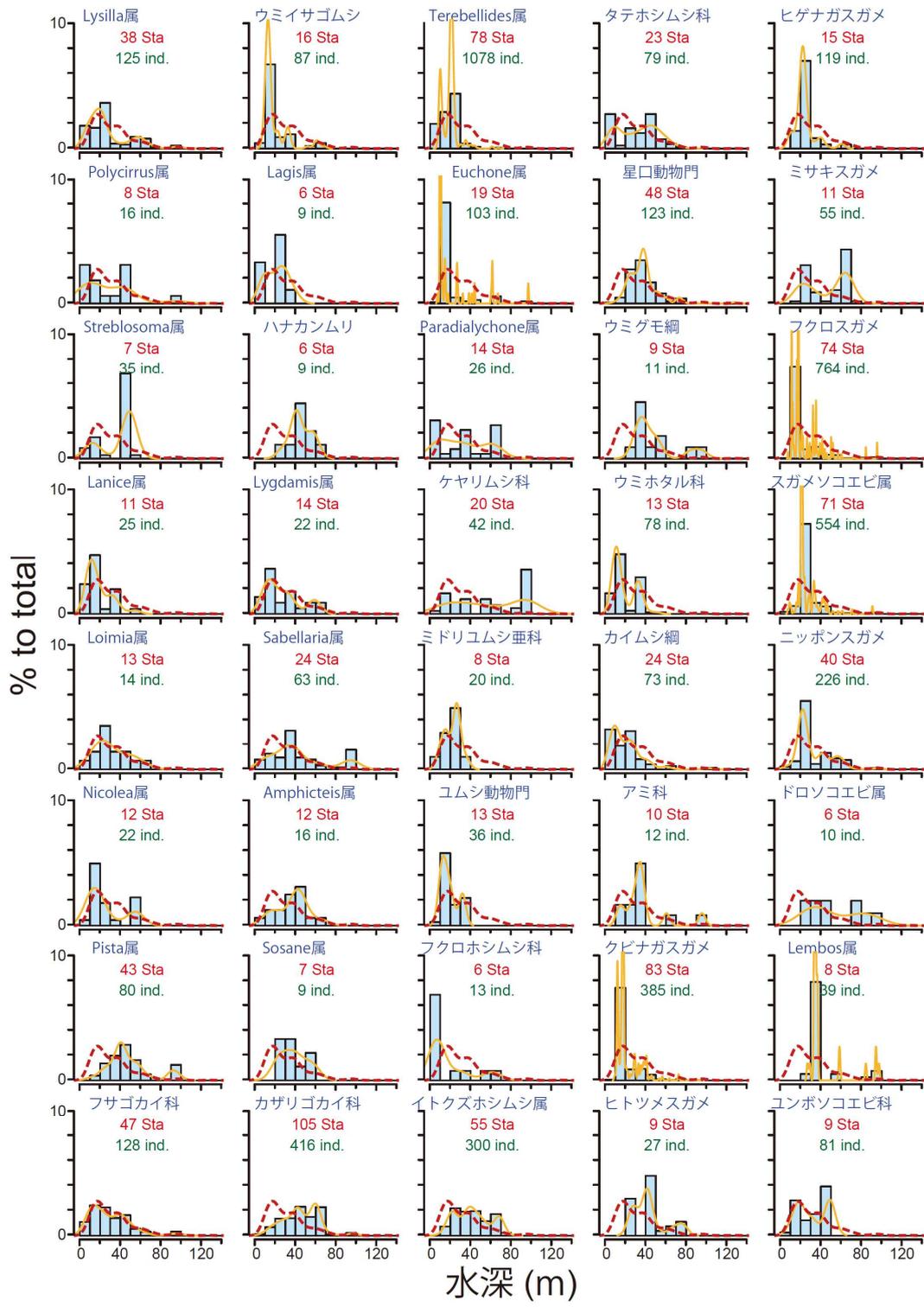


図 A-19 第 4 回瀬戸内海環境情報基本調査データを用いた、水深に対する底生動物の出現頻度分布 (棒グラフ) と確率密度関数 (黄線)。赤点線は、底生動物が水深に対し一様分布した際の確率密度分布。表 A-1 の No. 161~200 までの種

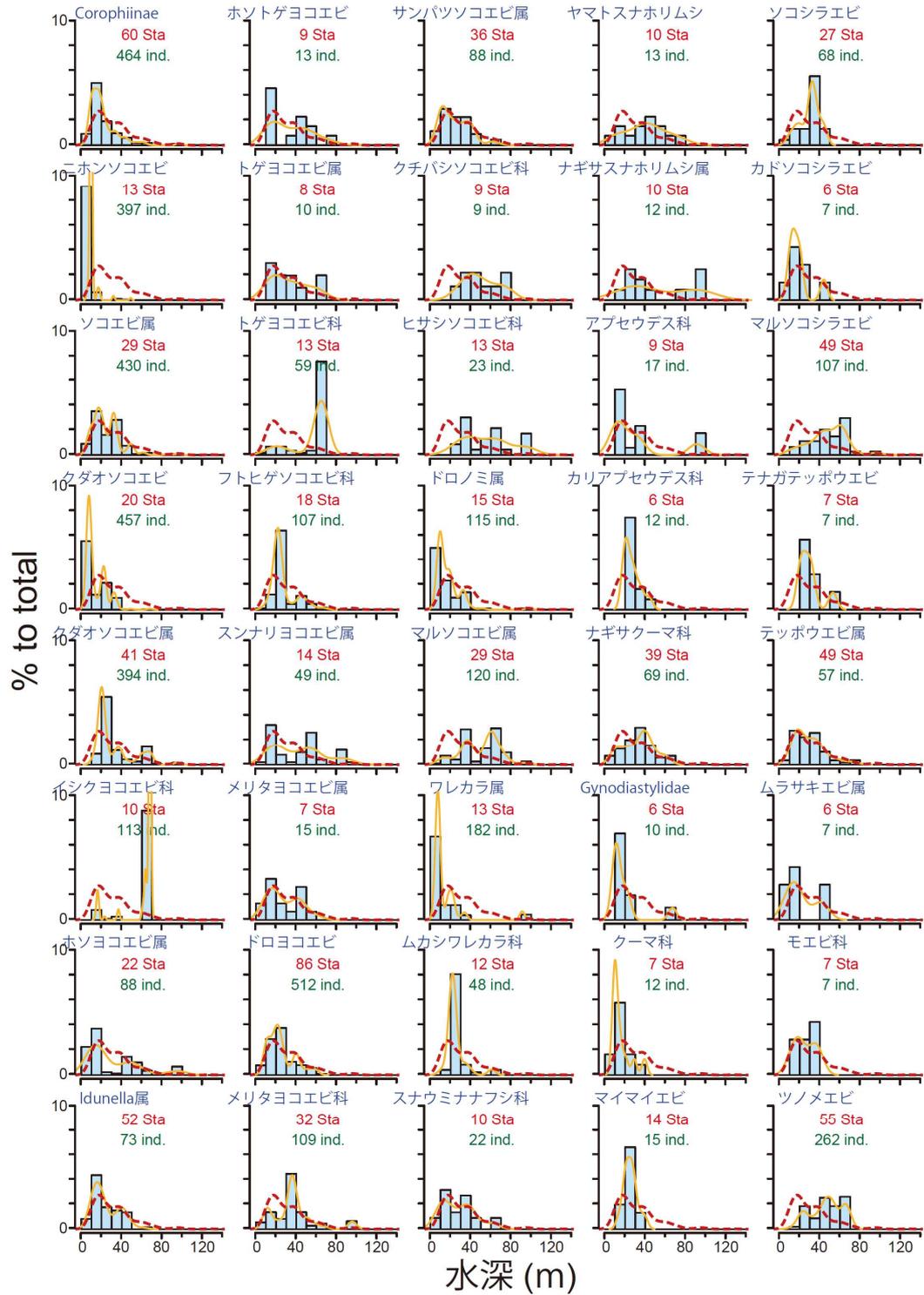


図 A-20 第 4 回瀬戸内海環境情報基本調査データを用いた、水深に対する底生動物の出現頻度分布 (棒グラフ) と確率密度関数 (黄線)。赤点線は、底生動物が水深に対し一様分布した際の確率密度分布。表 A-1 の No. 201~240 までの種

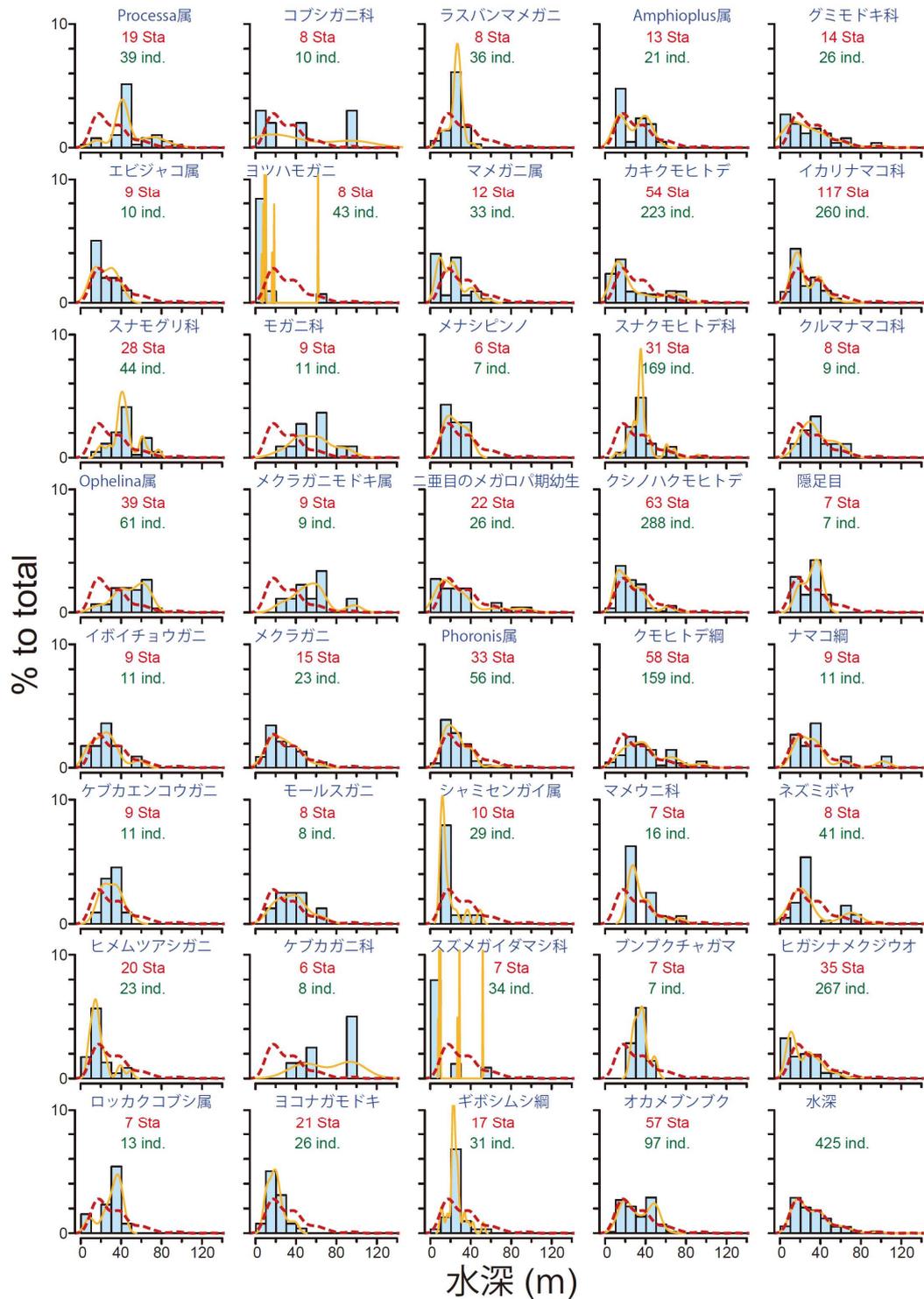


図 A-21 第4回瀬戸内海環境情報基本調査データを用いた、水深に対する底生動物の出現頻度分布 (棒グラフ) と確率密度関数 (黄線)。赤点線は、底生動物が水深に対し一様分布した際の確率密度分布。表 A-1 の No. 241~279 までの種

## 2.5 泥温

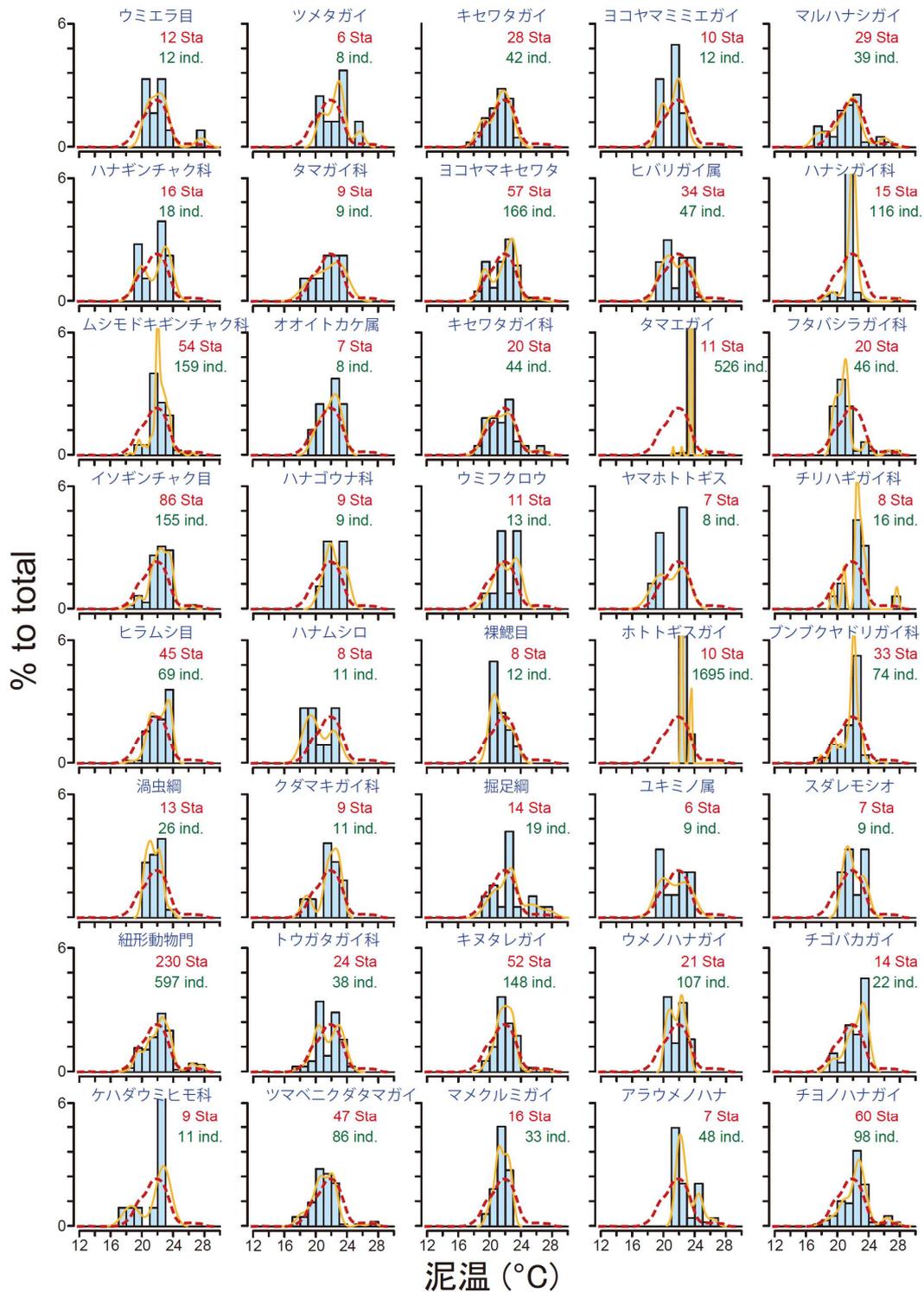


図 A-22 第4回瀬戸内海環境情報基本調査データを用いた、泥温に対する底生動物の出現頻度分布(棒グラフ)と確率密度関数(黄線)。赤点線は、底生動物が泥温に対し一様分布した際の確率密度分布。表 A-1 の No. 1~40 までの種

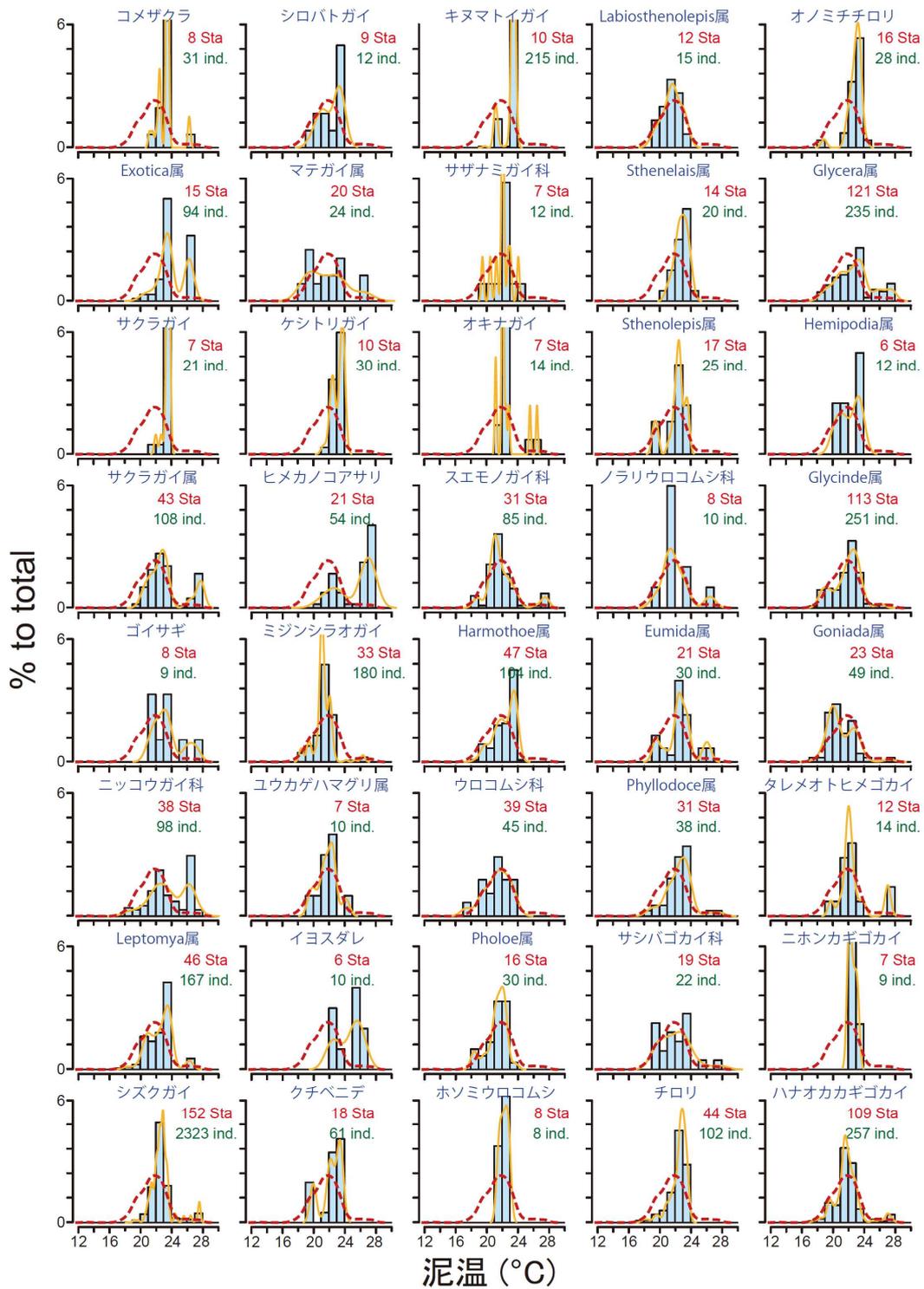


図 A-23 第 4 回瀬戸内海環境情報基本調査データを用いた、泥温に対する底生動物の出現頻度分布 (棒グラフ) と確率密度関数 (黄線)。赤点線は、底生動物が泥温に対し一様分布した際の確率密度分布。表 A-1 の No. 41~80 までの種

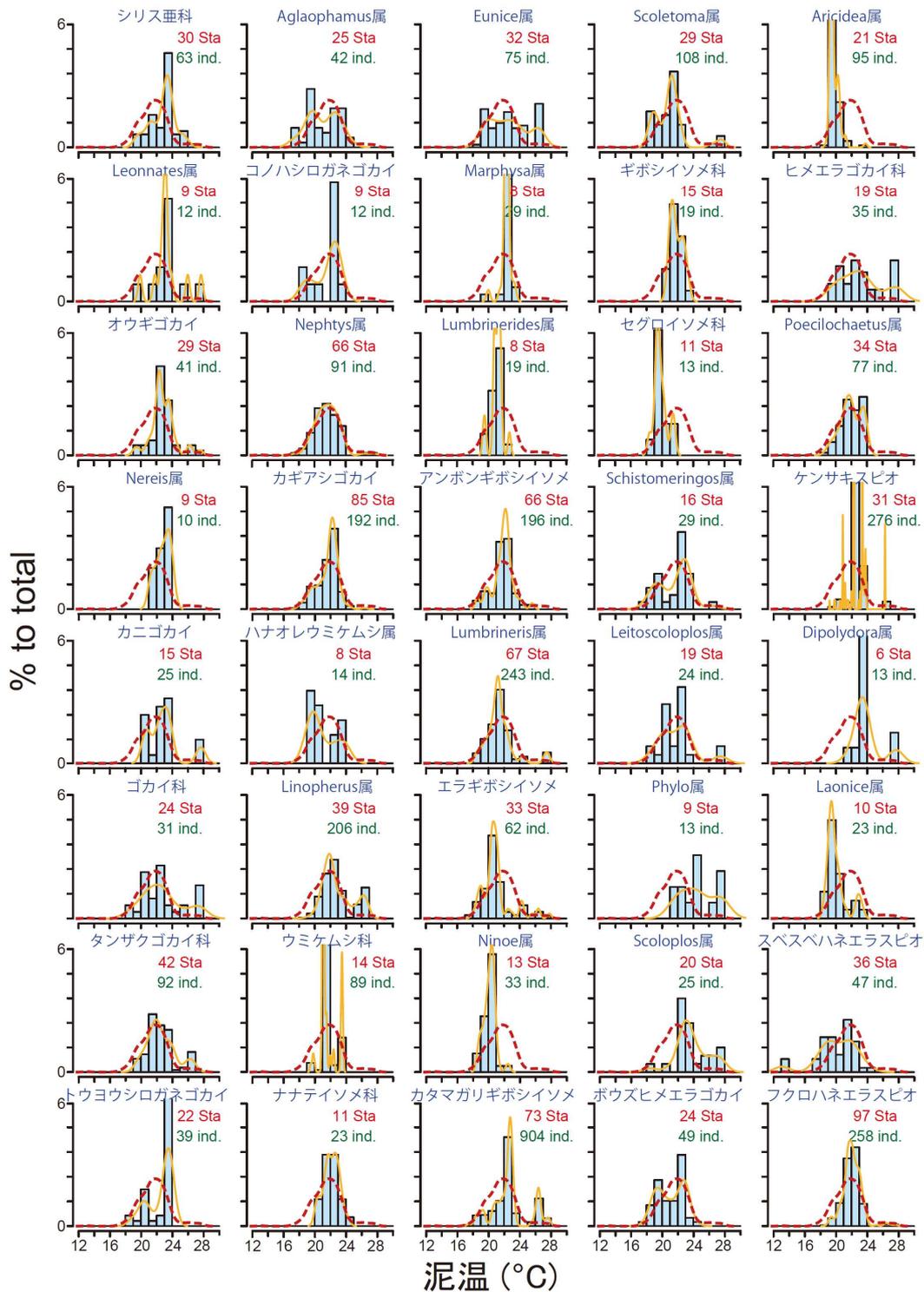


図 A-24 第4回瀬戸内海環境情報基本調査データを用いた、泥温に対する底生動物の出現頻度分布 (棒グラフ) と確率密度関数 (黄線)。赤点線は、底生動物が泥温に対し一様分布した際の確率密度分布。表 A-1 の No. 81~120 までの種

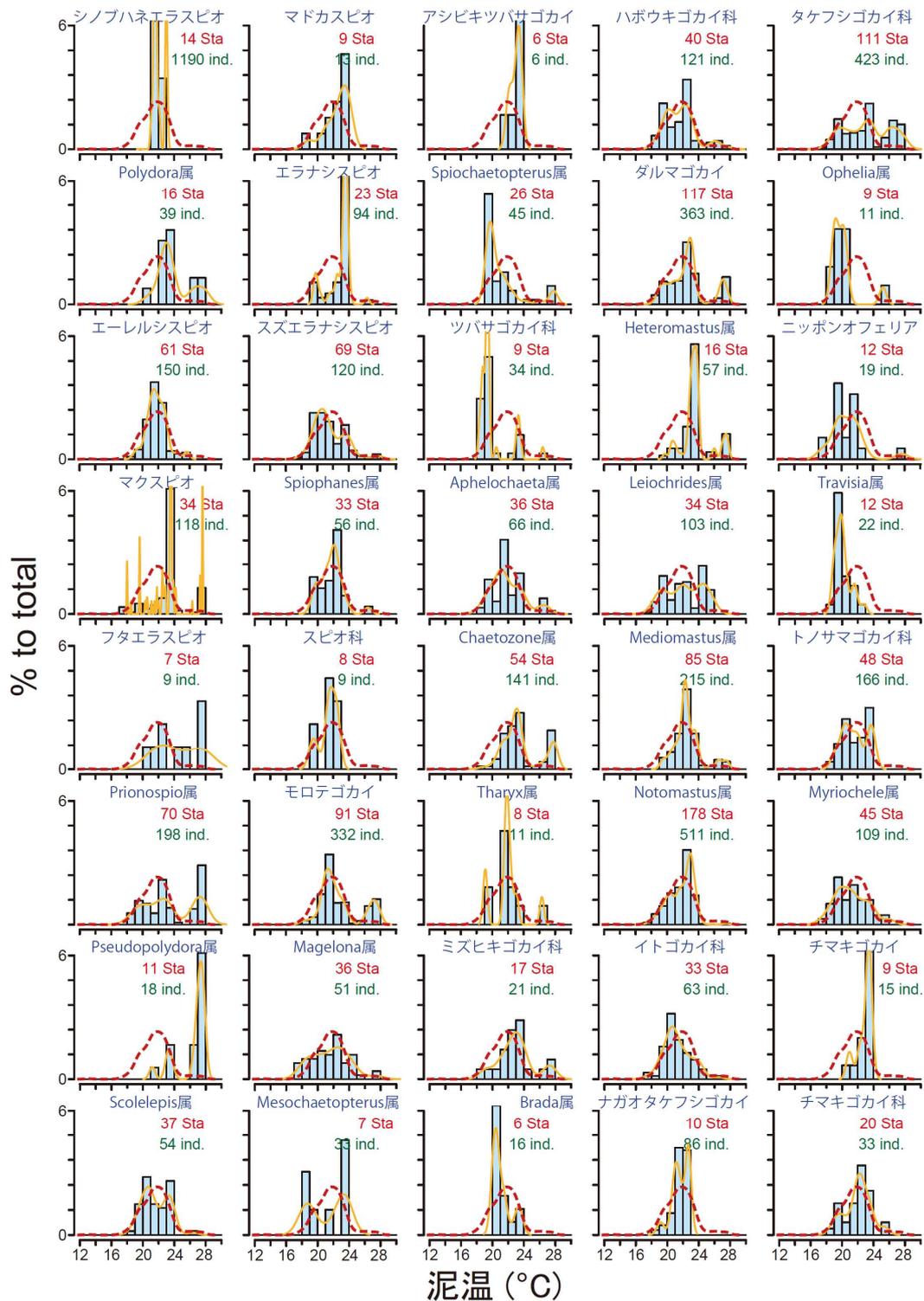


図 A-25 第4回瀬戸内海環境情報基本調査データを用いた、泥温に対する底生動物の出現頻度分布 (棒グラフ) と確率密度関数 (黄線)。赤点線は、底生動物が泥温に対し一様分布した際の確率密度分布。表 A-1 の No. 121~160 までの種

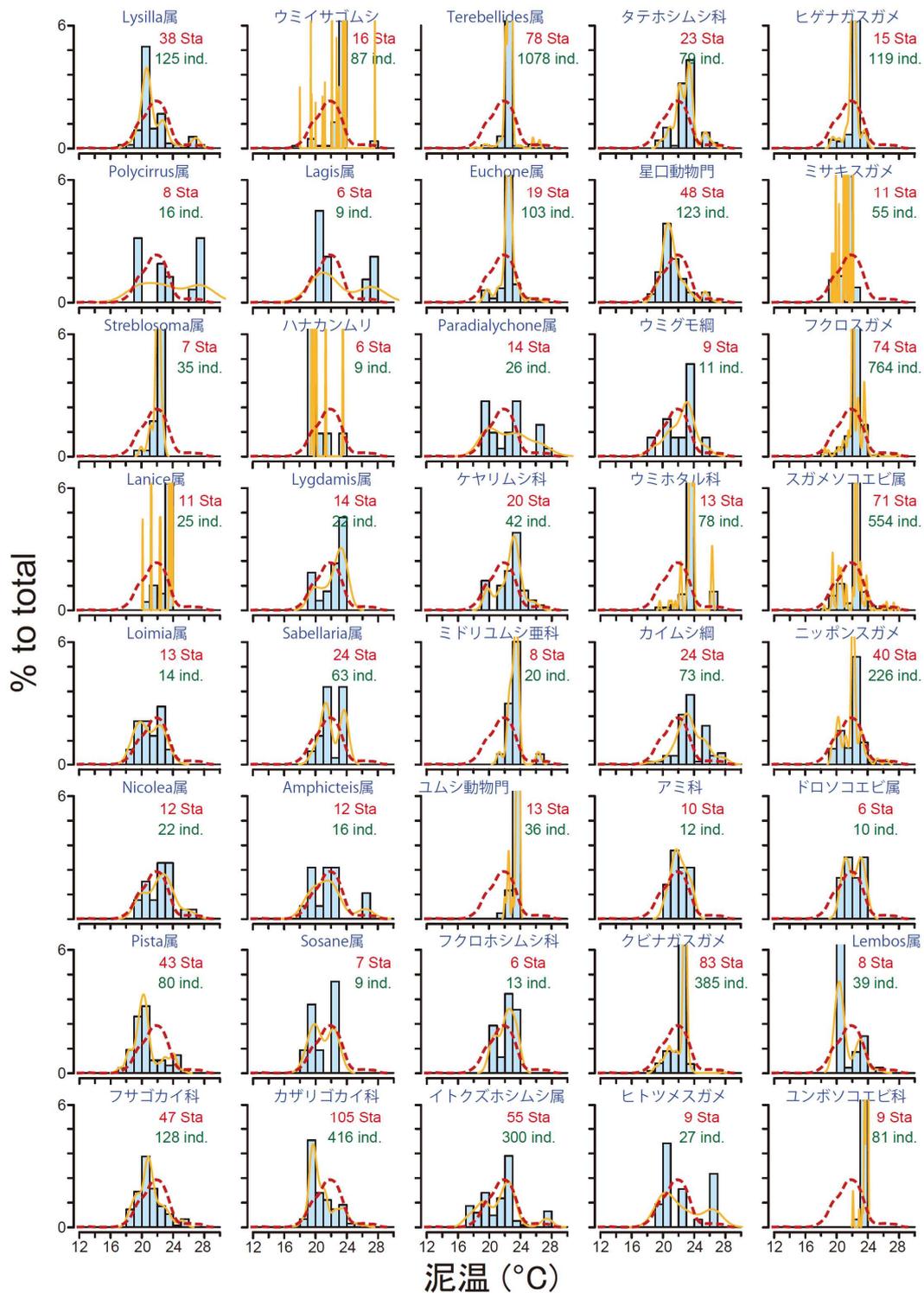


図 A-26 第4回瀬戸内海環境情報基本調査データを用いた、泥温に対する底生動物の出現頻度分布 (棒グラフ) と確率密度関数 (黄線)。赤点線は、底生動物が泥温に対し一様分布した際の確率密度分布。表 A-1 の No. 161~200 までの種

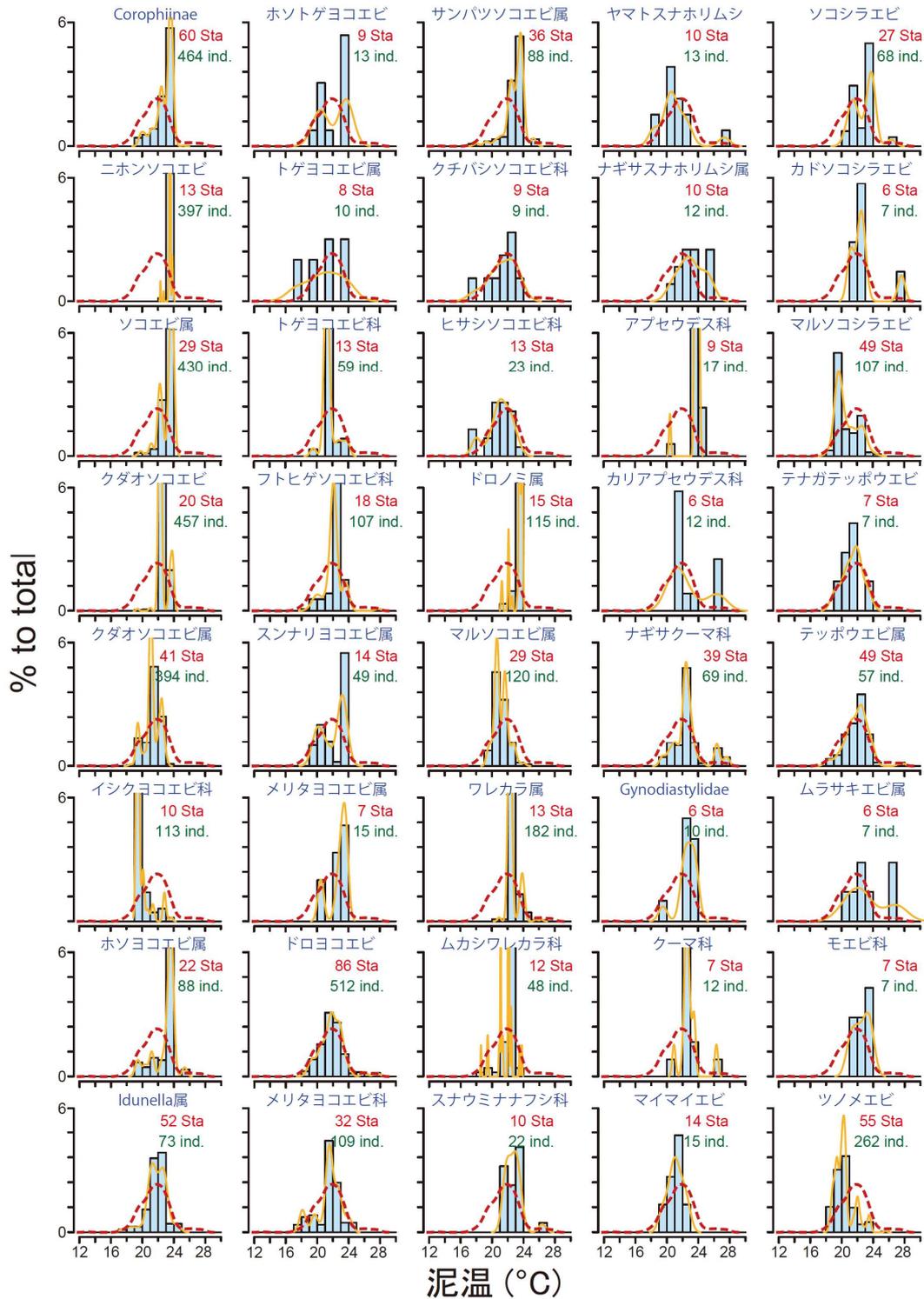


図 A-27 第4回瀬戸内海環境情報基本調査データを用いた、泥温に対する底生動物の出現頻度分布 (棒グラフ) と確率密度関数 (黄線)。赤点線は、底生動物が泥温に対し一様分布した際の確率密度分布。表 A-1 の No. 201~240 までの種

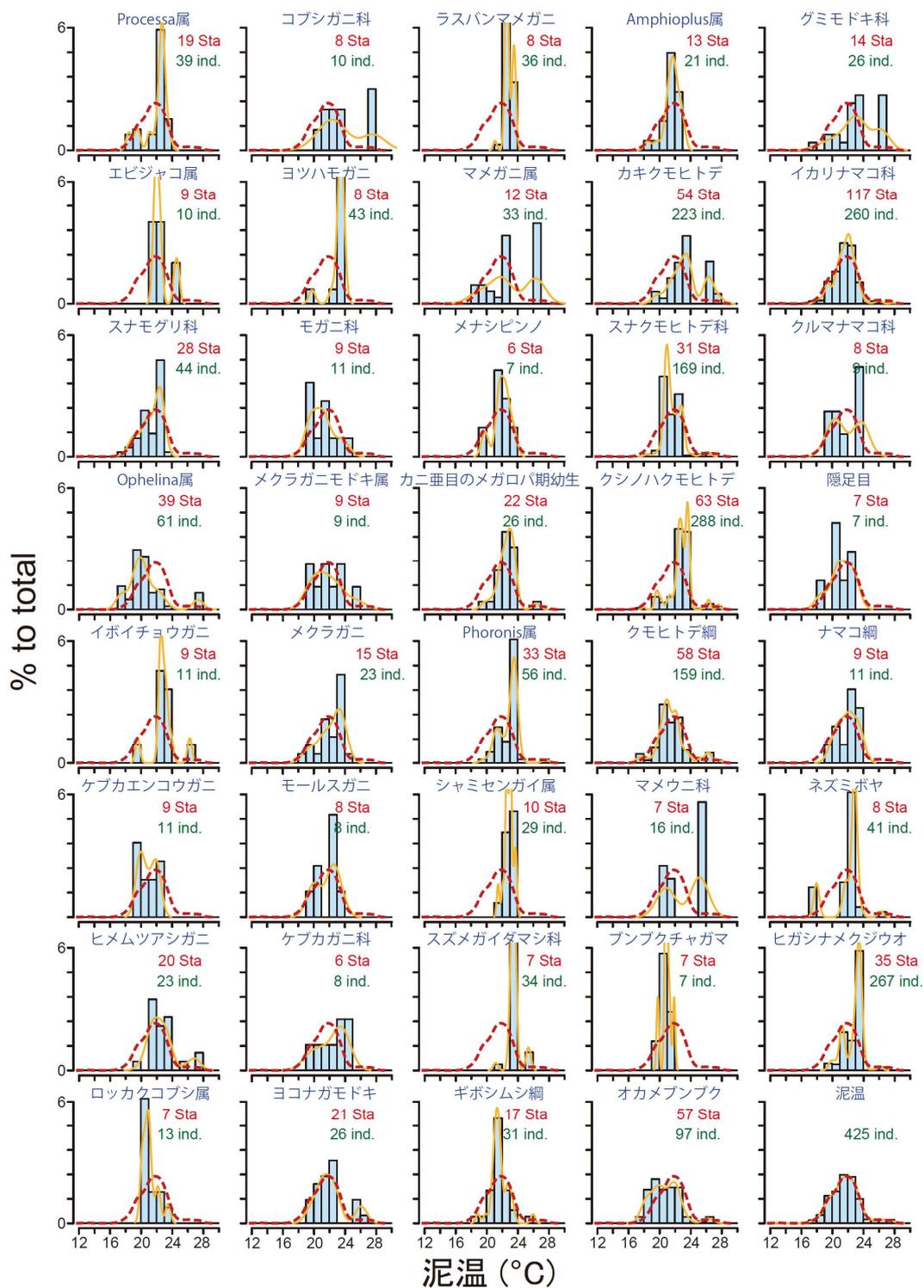


図 A-28 第4回瀬戸内海環境情報基本調査データを用いた、泥温に対する底生動物の出現頻度分布 (棒グラフ) と確率密度関数 (黄線)。赤点線は、底生動物が泥温に対し一様分布した際の確率密度分布。表 A-1 の No. 241~279 までの種

### 3 気候変動による影響評価及び適応策の検討等

#### 3.1 陸域淡水・汚濁負荷流出—海域流動・水質・底質モデル

##### 3.1.1 陸域淡水・汚濁負荷流出モデル

###### 3.1.1.1 淡水流出モデル

降水流出モデルについては、京都大学防災研究所が開発した Hydro-BEAM(小尻ら, 1998)をベースとして改良したものを今年度業務においても使用した。地表面に到達した降水は、蒸発散、表面流出、浸透成分に土地利用に応じて分離された後、河道網に従って流下する。水田以外の土地利用における斜面の表面流出は、kinematic wave 近似、すなわち連続式(B-1)と等流近似された運動方程式(B-2)を組み合わせた 1 次元移流方程式で解析される。

$$\text{連続式} \quad \frac{\partial h_{s,l}}{\partial t} + \frac{\partial q_{s,l}}{\partial x} = r_{s,l} \quad (\text{B-1})$$

$$\text{運動方程式} \quad q_{s,l} = \frac{1}{n_l} h_{s,l}^{5/3} i^{1/2} \quad (\text{B-2})$$

ここに、 $t$ : 時間(s),  $x$ : 位置(m),  $i$ : 斜面勾配( $\text{m m}^{-1}$ ),  $h_{s,l}$ ,  $q_{s,l}$ ,  $r_{s,l}$ ,  $n_l$ : それぞれ土地利用  $l$  における表面流出の水深(m)、表面流出の単位幅流量( $\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$ )、降水量の表面流出成分( $\text{m s}^{-1}$ )、等価粗度係数( $\text{m}^{-1/3} \text{ s}$ )である。水田からの表面流出量はタンクモデルにより算定される。

$$\text{連続式} \quad \frac{dh_{s,Paddy}}{dt} = r_{s,Paddy} - q_{s,Paddy} \quad (\text{B-3})$$

$$\text{運動方程式} \quad q_{s,Paddy} = \sum_j q_{j,Paddy} \quad (\text{B-4})$$

ここに、 $q_{j,Paddy}$ : 過程  $j$  における水田からの単位幅流出量( $\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$ )であり、過程  $j$  には洪水時の畦畔越流、通常時の水位調整の取水及び放流が考慮されている。

河道流は、斜面の表面流出と同様に kinematic wave 近似、すなわち連続式(B-5)と等流近似された運動方程式(Manning 式 B-6)を組み合わせた 1 次元移流方程式で解析される。

$$\text{連続式} \quad \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (\text{B-5})$$

$$\text{運動方程式} \quad Q = \frac{A}{N} R^{2/3} I^{1/2} \quad (\text{B-6})$$

ここに、 $A$ : 流積( $\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$ )、 $Q$ : 流量( $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$ )、 $I$ : 河道勾配( $\text{m m}^{-1}$ )、 $N$ : Manning の粗度係数( $\text{m}^{-1/3} \text{ s}$ )、 $R$ : 径深(m)、 $q$ : 斜面からの単位幅流出量( $\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$ )である。

降水の表面流出成分と浸透成分の分離は、鉛直 1 次元不飽和浸透流の基礎式(B-7)(Richards, 1931)を直接解析することによって求める。なお、水平(斜面)方向の浸透流は、鉛直 1 次元解析における消滅項(B-7 式右辺第 2 項)として取り扱い、動水勾配を斜面勾配で近似した Darcy 則を適用し、間接流出(中間流出・地下水流出)として河道に流出させる。

$$\frac{\partial \theta_l}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left\{ K_{z,l}(\theta_l) \left( \frac{\partial \psi_l(\theta_l)}{\partial z} + 1 \right) \right\} - K_{H,l}(\theta_l) i \quad (\text{B-7})$$

ここに、 $\theta$ ,  $K_{z,l}$ ,  $K_{H,l}$ ,  $\psi$ , :それぞれ土地利用  $l$  における土壌水分量( $m^3$ -water  $m^{-3}$ -pore)、鉛直方向の不飽和透水係数( $m s^{-1}$ )、水平(斜面)方向の不飽和透水係数( $m s^{-1}$ )、圧力水頭(m)である。土壌水分量－圧力水頭－不飽和透水係数の関係式には Brooks and Corey (1964)モデルを採用し、土壌物理パラメータについては文献(岡・角屋, 1975; 岡・角屋, 1976; 岡, 1979; 岡ら, 1980; 岡, 1983; 岡, 1986; 坂井・取出, 2009; 小杉, 2007)を参考に設定した。蒸発散量の算定方法には Hamon 法(Hamon, 1961)を採用した。

### 3.1.1.2 汚濁負荷流出モデル

#### (a) 予測変数

汚濁負荷流出モデルの予測変数は、海域の水質・底質モデルのそれと一致させることが理想であるが、環境省(2016)で整備されている汚濁負荷発生量は COD、TN、TP の 3 項目のみであること、長期予測モデルの構築・検証に必要な主要河川(一級水系本川)の水質観測データにおいても、比較的観測頻度が高く、かつ均質性が保持された長期データの取得が可能な項目は SS、COD、TN、TP に限られることなど、詳細な分画情報が入手できないなどの制約がある。

周知のとおり、流域内で発生した汚濁物質は水の動きに伴って移動するが、粒子態と溶存態で主要となる流出経路が異なる。斜面流出では、粒子態は直接流出(表面流出および中間流出)が、溶存態は土壌内浸透・地下水流出が主要な経路であり、河道内においては、粒子態は堆積・巻上が生じることが知られている。本業務では、降水形態の変化による汚濁負荷流出への影響を予測することが主な目的であるため、粒子態と溶存態の分画はモデル構築においては最低限必要なことと考えられる。

以上を踏まえて、本業務では表 B-1 に示す項目を陸域汚濁負荷流出モデルの予測変数とした。

表 B-1 陸域汚濁負荷流出モデルの予測変数と再現性の検討対象項目

分類項目	予測変数	再現性の検討対象項目
土砂(鉱物粒子)	粒径別(9 ランク)土砂量	SS (粒径 2mm 以下)
有機物	粒子態 COD(PCOD)、溶存態 COD(DCOD)	COD (=PCOD+DCOD)
窒素	粒子態窒素(PTN)、溶存態窒素(DTN)	TN (=PTN+DTN)
リン	粒子態リン(PTP)、溶存態リン(DTP)	TP (=PTP+DTP)

#### (b) 点源からの汚濁負荷流出量

3.1.1.1 章の淡水流出モデルは 3 次メッシュごとに 2 斜面 1 河道の構造を有している。降水に左右される面源負荷流出については、(c)～(g)に後述するとおり、斜面流出のモデル化を進めるが、降水に左右されない点源負荷流出については特定事業場等の施設からの排水が直接河道に排出されるものとした。なお、本モデルにおける面源は、環境省(2016)の「平成 27 年度水質総量削減に係る発生負荷量等算定調査及び汚濁負荷削減対策等の検討業務報告書」(以下、「平成 27 年度発生負荷量調査」と略す)の表 1.2.5 に記載されている排出源のうち、「その他系」の「土地系」の「土地からの流出」とし、それ以外は全て点源として取り扱った。

点源から負荷流出量については、上記の平成 27 年度発生負荷量調査の原簿データを活用して 3 次メッシュのデータベースを構築し、それを汚濁負荷流出モデルに入力した。発生負荷量が多い

生活系(下水処理場やし尿処理場など)・産業系(工場や発電所など)の特定事業場に関しては、可能な限り住所や緯度経度情報を収集してその位置を特定し、3次メッシュ上に配置した(図B-1)。合併処理浄化槽、単独処理浄化槽、生活雑排水など特定事業場以外の生活系発生負荷量については、「一般廃棄物処理実態調査」(環境省)の処理形態別人口と下水処理場処理区域の情報を3次メッシュで整備して原単位法で算定した。なお、原単位については平成27年度発生負荷量調査の報告書を参照した。その他、位置が特定できなかった事業場等については、平成27年度発生負荷量調査の市町村別の集計値を該当する3次メッシュに均等配分した。このような処理を経て、最終的に得られた3次メッシュのCOD・TN・TP汚濁負荷発生量を図B-2に示す。

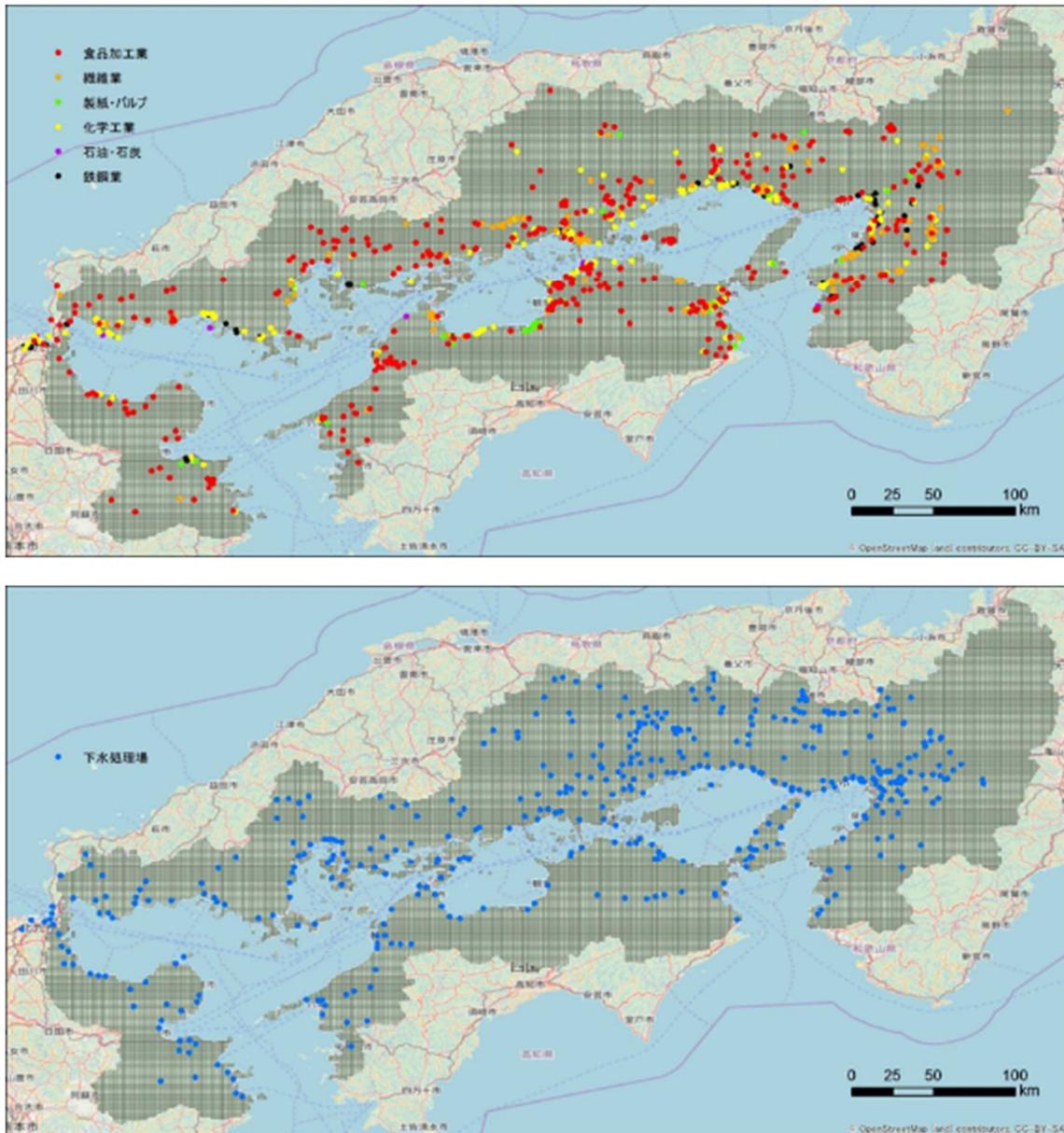


図 B-1 3次メッシュ上の位置を特定した産業系特定事業場(上)と下水処理場(下)の分布

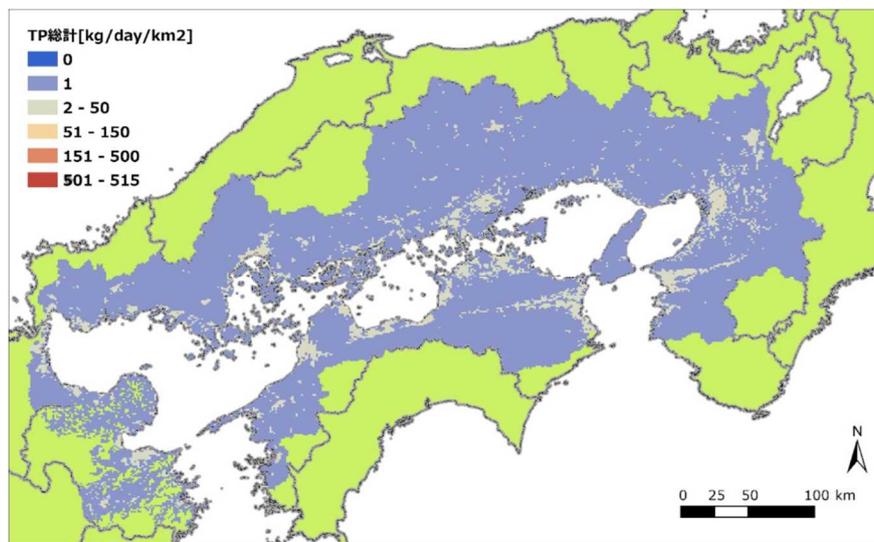
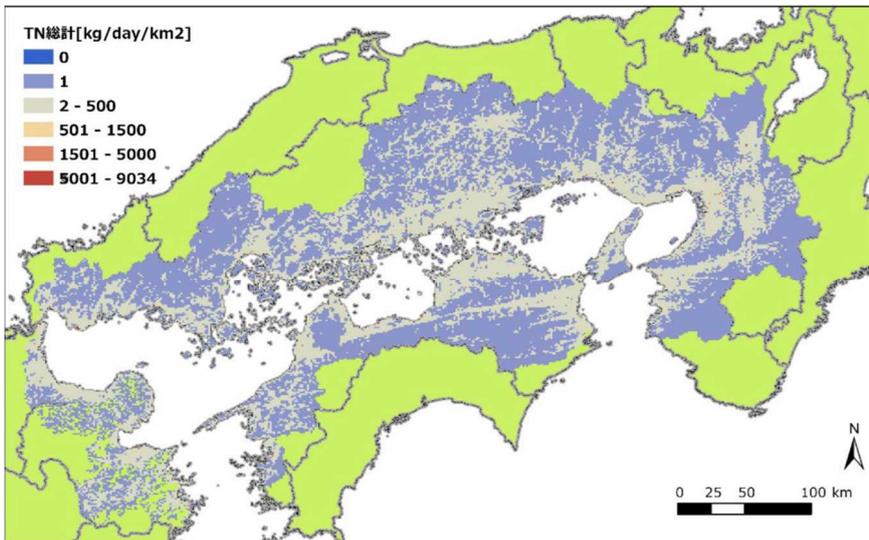
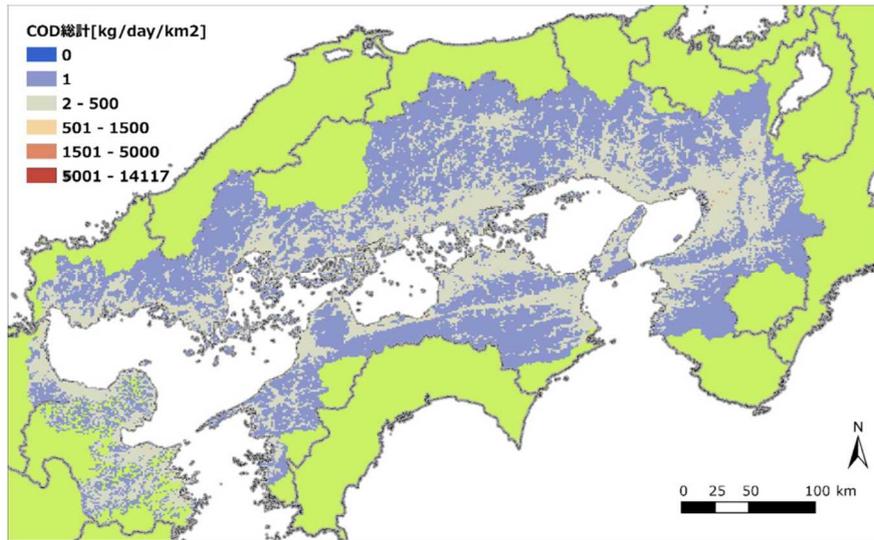


図 B-2 3次メッシュの COD(上)、TN(中)、TP(下)発生負荷量

(c) 森林、市街地等の浸透域、畑地・果樹園からの土砂流出

土壌斜面を有する土地利用、すなわち森林、市街地等の浸透域、畑地・果樹園からの土砂流出については、侵食力を stream power:  $qI$  ( $q$ : 単位幅当たりの淡水流出量  $\text{m}^2/\text{s}$ ,  $I$ : 斜面勾配)とする Hayashi et al. (2015)のモデルをベースとした。

$$q_{M,L}^* = \beta_{M,L}^* \left\{ q_L^* I_L^* - (q_c^* I_c^*)_L \right\}^{\alpha_L} \quad (\text{B-8})$$

$$q_{M,L}^* = \frac{q_{M,L}}{\rho_s (1 - \lambda_s) \sqrt{sgd_a^3}} \quad (\text{B-9})$$

$$I^* = \frac{I}{s} \quad (\text{B-10})$$

$$q_L^* = \frac{q_L}{\sqrt{sgd_a^3}} \quad (\text{B-11})$$

ここに、 $q_{M,L}$ : 物質  $M$  (粒径ランク  $M$  の土粒子)の単位幅当り流出量( $\text{kg}^{-1} \text{m}^{-1} \text{s}$ )、 $q_{M,L}^*$ :  $q_{M,L}$ の無次元量、 $(q_c^* I_c^*)_L$ : 無次元移動限界 stream power、 $\rho_s$ : 土粒子の単位体積重量( $\text{kg m}^{-3}$ )、 $\lambda_s$ : 空隙率( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ )、 $s$ : 土粒子の水中比重(無次元)、 $g$ : 重力加速度( $\text{m s}^{-2}$ )、 $d_a$ : 代表粒径( $\text{m}$ )、 $q_L$ : 単位幅あたりの淡水直接流出(表面流出+中間流出)量( $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ )、 $q_L^*$ :  $q_L$ の無次元量、 $\alpha_L$ : 定数であり、下付き  $L$ を付してあるものは土地利用別であることを意味する。 $\beta_{M,L}^*$ は物質  $M$ の流出率(無次元)であり、次式の変数分離型で表されるものとする。

$$\beta_{M,L}^* = R_L D_M \quad (\text{B-12})$$

ここに、 $D_M$ : 粒径ランク  $M$ の土粒子が斜面表層の混合砂内で占める重量割合( $\text{kg kg}^{-1}$ )である。 $R_L$ は土地利用  $L$ の流出率(無次元)であり、裸地で最大値 1 をとり、土壌の性状、植生、土地管理の状況によって変化する調整パラメータである。

(B-8)式において移動限界を超えない降水時には、濃度 0 の雨水、すなわち純水が流出することになってしまう。そこで、降水負荷を加えたものを適用した。モデルパラメータを整理すると、斜面からの土砂流出量は最終的に(B-13)式の型で表される。

$$q_{M,L} = \beta_L D_M (q_L I - \gamma_L)^{\alpha_L} + r_M q_L \quad (\text{B-13})$$

ここに、 $\alpha_L$ ,  $\beta_L$ ,  $\gamma_L$ : モデルパラメータである。 $r_M$ は物質  $M$ の降水質であり、土砂流出シミュレーションでは降水の SS 濃度( $\text{kg m}^{-3}$ )に相当する。

(d) 水田からの土砂流出

上記(a)の土砂流出モデルは斜面の雨水流出に伴う土壌侵食を想定したものであるため、畦畔で囲まれた水田にもそのまま適用できるとは考えにくい。また、水田は、多くは低平地に存在し、山地においても棚田といった階段状になっているため、耕作地の斜面勾配は非常に小さく、GIS の標高データより求めた斜面勾配に適用性があるとは言い難い。事実、降水流出モデルにおいても、他の土地利用では

kinematic wave model であるのに対し、水田のみはタンクモデルを適用している。

水田からの土砂(SS)流出を予測する手法・モデルについては、現時点において確立しているものが存在しない。ここでは、ひとまず対象地域内の水田全てを斜面勾配  $I = 0.001$  に固定し、(B-14)式を用いて算定することとした。

$$q_{M,L} = \beta_L D_M (q_L - \gamma_L)^{\alpha_L} + r_M q_L \quad (L = \text{水田}) \quad (\text{B-14})$$

(B-14)式の $\beta_L$ および $\gamma_L$ は、(B-13)式のそれぞれと同じ単位・次元を有するパラメータであるが、固定値となった $I$ を含んでいるという点に違いがある。

#### (e) 市街地の不浸透域からの土砂流出

市街地の不浸透域からの土砂(SS)流出の算定には、一般的に使用されている路面堆積モデル(例えば、國松・村岡, 1989)をベースとして、(B-15)式および(B-16)式を用いた。

$$q_{M,L} = \min \left( S_M \Delta x / \Delta t, \beta_L D_M (q_L - \gamma_L)^{\alpha_L} \right) + r_M q_L \quad (L = \text{市街地}) \quad (\text{B-15})$$

$$S_M^{n+1} = \min \left\{ S_{\max,M}, S_M^n + \Delta S_M \Delta t - \frac{\Delta t}{\Delta x} (q_{M,L} - r_M q_L) \right\} \quad (L = \text{市街地}) \quad (\text{B-16})$$

ここに、 $S_M$ ,  $S_{\max,M}$ ,  $\Delta S_M$ : 単位面積あたりにおける物質  $M$  の路面堆積量(kg m<sup>-2</sup>)、上限堆積量(kg m<sup>-2</sup>)および堆積速度(kg m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>)、 $\Delta x$ : 斜面長(m)、 $\Delta t$ : 時間増分(s)であり、式(6-9)中の上付き  $n$  と  $n+1$  は時間ステップを表す。

#### (f) 粒子態物質(PCOD、PTN、PTP)の流出の基礎式

粒子態物質 PCOD、PTN、PTP の流出については、上記(a)～(e)で算定される最細粒径の土粒子中に常に一定の割合で存在しているものと仮定し、式(6-10)で算定する。なお、(B-13)式と同様に、ここでも降水負荷を考慮している。

$$q_{M,L} = C'_{M,L} q_{SS1,L} + r_M q_L \quad (\text{B-17})$$

ここに、 $q_{SS1,L}$ : 最細粒径土粒子の掃流流出量(kg m<sup>-1</sup> s<sup>-1</sup>)、 $C'_{M,L}$ : 最細粒径土粒子の単位重量あたりに含まれる粒子態物質  $M$  の重量(g kg<sup>-1</sup>)である。

#### (g) 溶存態物質 DCOD、DTN、DTP の流出の算定式

溶存態物質 DCOD、DTN、DTP の流出については、流出経路別に常に一定の濃度  $C_{M,L}$  を設定し、表面流出、中間流出、地下水流出に分けて(B-18)式で算定する。

$$q_{M,L} = C_{M,L} q_L \quad (\text{B-18})$$

#### (h) 河道モデル

河道における土砂輸送の解析には、浮遊砂と掃流砂の非平衡交換過程を考慮した、高橋ら(1999)のモデルを適用した。なお、高橋ら(1999)では単一粒径のモデルの提案・精度検証が論じられているが、こ

ここでは粒径別に解析できるように基礎式を拡張している。なお、河道断面の形状については矩形を仮定している。

$$\text{浮遊砂} \quad \frac{\partial A_w C_M}{\partial t} + \frac{\partial Q_w C_M}{\partial x} = q_{sM} + B\omega_M \quad (\text{B-19})$$

$$\text{掃流砂} \quad \rho_s (1 - \lambda_s) B \frac{\partial Z_M}{\partial t} + \frac{\partial Bq_{BM}}{\partial x} = -B\omega_M \quad (\text{B-20})$$

ここに、 $A_w$ ,  $Q_w$ : それぞれ降水流出モデルで算定される河道流積( $\text{m}^2$ )および流量( $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$ )、 $C_M$ : 粒径ランク  $M$  の河道断面平均土砂濃度( $\text{kg m}^{-3}$ )、 $q_{sM}$ : 粒径ランク  $M$  における斜面からの単位幅当りの土砂流入量( $\text{kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ )、 $\rho_s$ : 土粒子の単位体積重量( $\text{kg m}^{-3}$ )、 $\lambda_s$ : 河床堆積土砂の間隙率( $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ )、 $B$ : 河道幅( $\text{m}$ )、 $Z_M$ : 粒径ランク  $M$  の層厚( $\text{m}$ )、 $q_{BM}$ : 粒径ランク  $M$  の単位幅当り掃流砂量( $\text{kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ )、 $\omega_M$ : 粒径ランク  $M$  における単位面積当たりの掃流砂から浮遊砂への遷移量( $\text{kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ )である。なお、 $\rho_s$  と  $\lambda_s$  については、一般に泥、砂、それらの混合状態で値が異なることが知られているが、ここではいずれの粒径ランクにおいても同じ値として単純化し、モデルの調整パラメータとして取り扱うことにした。

浮遊砂と掃流砂の交換量  $\omega_M$  の算定には次式を用いた(高橋ら, 1999)。

$$\frac{\omega_M}{\rho_s (1 - \lambda_s) \sqrt{sgd_M}} = 0.012 \tau_{*M}^2 - \frac{w_{0M} \alpha C_M}{\rho_s (1 - \lambda_s) \sqrt{sgd_M}} \quad (\text{B-21})$$

$$\tau_{*i} = \frac{u_*^2}{sgd_i} = \frac{n^2 g U^2}{sgd_i R^{1/3}} \quad (\text{B-22})$$

ここに、 $s$ : 土粒子の水中比重( $=\rho_s/\rho_w-1$ ,  $\rho_w$ : 水の単位体積重量)(無次元)、 $g$ : 重力加速度( $\text{m s}^{-2}$ )、 $d_M$ : 粒径ランク  $M$  の粒径( $\text{m}$ )、 $\tau_{*M}$ : シールズ数(無次元せん断応力、無次元掃流力)、 $u_*$ : 摩擦速度( $\text{m s}^{-1}$ )、 $\alpha$ : 底面近傍と鉛直平均した浮遊砂濃度の比( $=1.6$ , Parker et al, 1986; 泉, 2002)、 $n$ : Manning の粗度係数( $\text{m}^{-1/3} \text{ s}$ )、 $U$ : 断面平均流速( $\text{m s}^{-1}$ )、 $R$ : 径深( $\text{m}$ )である。 $w_{0M}$  は粒径ランク  $M$  の浮遊砂の水中沈降速度( $\text{m s}^{-1}$ )であり、Rubey(1933)の式より粒径別に算定して与えた。

掃流砂量  $q_{BM}$  の算定には芦田・道上(1972)の式を用いた。

$$\frac{q_{BM}}{\rho_s (1 - \lambda_s) F_M u_{*eM} d_M} = 17 \tau_{*eM} \left( 1 - \frac{\tau_{*cM}}{\tau_{*M}} \right) \left( 1 - \frac{u_{*cM}}{u_*} \right) \quad (\text{B-23})$$

$$\tau_{*eM} = \frac{u_{*eM}^2}{sgd_M}, \quad \tau_{*cM} = \frac{u_{*c}^2}{sgd_M} \quad (\text{B-24})$$

$$u_{*eM} = \frac{U}{6.0 + 5.75 \log_{10} \left[ R / \left\{ d_M (1 + 2\tau_{*M}) \right\} \right]} \quad (\text{B-25})$$

$$\frac{\tau_{*cM}}{\tau_{*cm}} = \left\{ \frac{\log_{10} 19}{\log_{10} (19d_M / d_m)} \right\}^2 \frac{d_M}{d_m} \quad (d_M/d_m \geq 0.4) \quad \text{or} \quad 0.85 \quad (d_M/d_m < 0.4) \quad (\text{B-26})$$

ここに、 $\tau_{*eM}$ ,  $u_{*e}$ : それぞれ粒径ランク  $M$  の無次元有効せん断応力および有効摩擦速度、 $\tau_{*cM}$ ,  $u_{*c}$ : それぞれ粒径ランク  $M$  の無次元限界せん断応力および限界摩擦速度、 $F_M$ : 粒径ランク  $M$  の土粒子が河床表層において占める割合 ( $\text{kg kg}^{-1}$ )、 $d_m$ ,  $\tau_{*cm}$ : それぞれ河床表層の平均粒径 (m) およびその無次元限界せん断応力である。粒径別の無次元限界せん断応力については岩垣(1956)の式により算定した。 $F_M$  と  $d_m$  の算定には河床に堆積した土砂粒径の鉛直分布と表層の定義が必要である。ここでは河床表面を常に高さ 0 とした鉛直グリッドを用意し、各時間で算定された土砂堆積厚速度 ( $\text{m s}^{-1}$ ) を下方移動速度に見立てた移流方程式を解くことにより、各層の粒径別土砂量を算定した。表層は鉛直グリッドの最上層とし、その層厚は 5cm とした。

COD、TN、TP については、上述のとおり、「粒子態(PCOD、PTN、PTP)は最細粒径の土粒子中に常に一定の割合で存在している」の仮定に従い、粒子態は最細粒径の土粒子と同様の沈降・堆積・巻上げをしつつ流下するものとした。

### (i) モデルパラメータ

土砂の粒径ランクについては、0.050~16 mm の値域で 9 区分した。斜面の表層土の粒度組成を示すパラメータ  $D_M$  は、固定パラメータとして扱い、図 B-3 に示す粒径加積曲線を土地利用毎に与えた。

表 B-2 および表 B-3 に土砂(SS)および COD、TN、TP 流出のモデルパラメータを示す。ここに記した値は、極力文献から情報を収集するとともに、次節に記す再現シミュレーションを通じて調整を行ったものではあるが、同じ再現性を示すパラメータの組み合わせが複数存在すること、モデルに考慮しなかった素過程が存在するなど、不確実な点が多く含まれているといわざるを得ない。

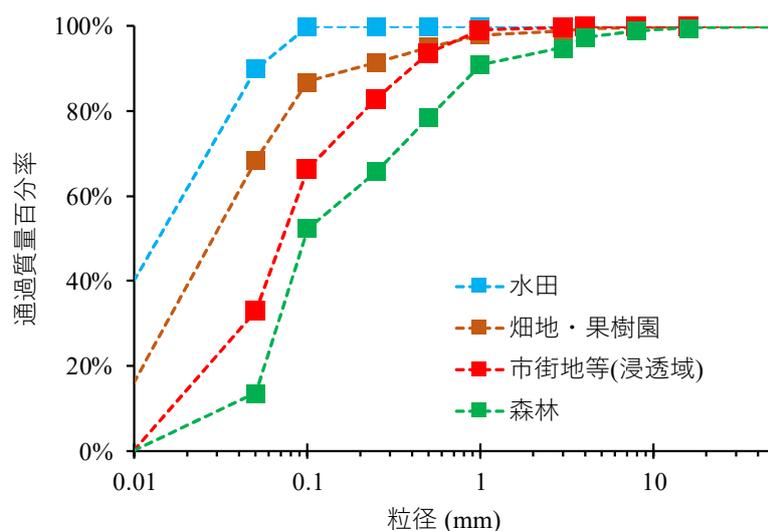


図 B-3 土砂流出モデルに使用した土地利用別粒径加積曲線



表 B-2 土砂(SS)流出のモデルパラメータ

(a) 森林、市街地(浸透域)、畑地・果樹園

	変数	単位	森林	市街地 (浸透域)	畑地・ 果樹園	備考
土粒子の単位体積重量	$\rho_s$	kg/m <sup>3</sup>	2650	2650	2650	全土地利用共通(一般的な土粒子比重Gs = 2.65)
土粒子の水中比重	$s$	kg/kg	1.65	1.65	1.65	全土地利用共通(= Gs-1)
間隙率	$\lambda_s$	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	0.40	0.40	0.40	全土地利用共通
代表粒径	$d_a$	mm	0.40	0.40	0.36	団粒サイズ(村上ら, 2000)
土砂流出率	$R_L$	-	0.0040	0.0100	0.0150	(Tunning)
無次元移動限界 $qI$	$q^*cL^*$	-	0.008	0.008	0.000	(村上ら, 2000; Hayashi et al., 2015)
土砂流出パラメータ	$\alpha_L$	(kg-m-s単位)	1.67	1.67	1.50	(村上ら, 2000; 坂西・早瀬, 1994)
	$\beta_L$	(kg-m-s単位)	2729	6823	2147	(他のパラメータ設定値より算定された値)
	$\gamma_L$	mm <sup>2</sup> /s	0.425	0.425	0.000	斜面長500m、勾配0.01で降水強度0.3mm/h相当(森林・市街地等)
降水質	$r_M$	mg/L	2.75	2.75	2.75	全土地利用共通(笹田ら,2004; 金木ら,2010) 最細粒径粒子

(b) 水田

	変数	単位	水田 (I=0.001)	備考
土粒子の単位体積重量	$\rho_s$	kg/m <sup>3</sup>	2650	全土地利用共通(一般的な土粒子比重Gs = 2.65)
土粒子の水中比重	$s$	kg/kg	1.65	全土地利用共通(= Gs-1)
間隙率	$\lambda_s$	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	0.40	全土地利用共通
代表粒径	$d_a$	mm	0.12	(Tunning)
土砂流出率	$R_L$	-	1.0000	(Tunning)
土砂流出パラメータ	$\alpha_L$	(kg-m-s単位)	1.50	(畑地・果樹園と同じ)
	$\beta_L$	(kg-m-s単位)	10.3	(他のパラメータ設定値より算定された値)
	$\gamma_L$	mm <sup>2</sup> /s	0.000	(畑地・果樹園と同じ)
降水質	$r_M$	mg/L	2.75	全土地利用共通(笹田ら,2004; 金木ら,2010) 最細粒径粒子

(c) 市街地(不浸透域)

	変数	単位	市街地 (不浸透域)	備考
SS粒子の単位体積重量	$\rho_s$	kg/m <sup>3</sup>	2650	全土地利用共通(一般的な土粒子比重Gs = 2.65)
SS粒子の水中比重	$s$	kg/kg	1.65	全土地利用共通(= Gs-1)
間隙率	$\lambda_s$	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	0.40	全土地利用共通
SS粒径	$d_a$	mm	0.05	(モデルの最細粒径)
SS流出率	$R_L$	-	0.000002	(Tunning)
SS堆積速度	$\Delta S_M$	kg/m <sup>2</sup> /day	0.00101	(Tunning)
SS最大堆積量	$S_{max,M}$	kg/m <sup>2</sup>	0.00505	(Tunning)
SS流出パラメータ	$\alpha_L$	(kg-m-s単位)	1.67	(市街地の浸透域と同じ)
	$\beta_L$	(kg-m-s単位)	10.9	(他のパラメータ設定値より算定された値)
	$\gamma_L$	mm <sup>2</sup> /s	27.8	斜面長500mで降水強度0.2mm/h相当
降水質	$r_M$	mg/L	2.75	全土地利用共通(笹田ら,2004; 金木ら,2010) 最細粒径粒子

表 B-3 COD、TN、TP 流出のモデルパラメータ

流出形態 流出経路	変数	単位	項目	市街地 (不浸透域)	市街地 (浸透域)	水域	森林	畑地・ 果樹園	水田	備考
粒子態掃流 表面流出 + 中間流出	$C'_{ML}$	g/kg	PCOD	64.36	64.36	0.00	60.00	60.00	71.89	(和田・三浦, 1986; 河田・西田, 1973; 笹田ら, 2004; 金木ら, 2010; 武田ら, 1991; 南條, 1989など)
			PTN	11.50	11.50	0.00	20.00	20.00	6.31	
			PTP	2.00	2.00	0.00	1.50	1.00	2.32	
溶存態 表面流出	$C_{ML}$	g/m <sup>3</sup>	DCOD	1.172	1.172	1.172	1.172	1.172	1.172	全土地利用共通(降水質を分画)
			DTN	0.603	0.603	0.603	0.603	0.603	0.603	
			DTP	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	
溶存態 中間流出 地下水流出	$C_{ML}$	g/m <sup>3</sup>	DCOD	0.000	1.200	1.200	1.000	2.500	3.800	(和田・三浦, 1986; 河田・西田, 1973; 笹田ら, 2004; 金木ら, 2010; 武田ら, 1991; 南條, 1989など)
			DTN	0.000	0.400	0.400	0.159	2.475	0.495	
			DTP	0.000	0.001	0.001	0.001	0.010	0.071	
降水質	$r_M$	g/m <sup>3</sup>	PCOD	0.130	0.130	0.130	0.130	0.130	0.130	全土地利用共通(笹田ら,2004; 金木ら,2010)
			PTN	0.067	0.067	0.067	0.067	0.067	0.067	
			PTP	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	0.024	