

東京湾内湾に造成された人工砂浜海岸における魚類群集の構造

宍戸太郎*・青木 茂・金子誠也・佐野光彦

Fish assemblage structures on artificial sandy beaches in inner Tokyo Bay, central Japan

Taro SHISHIDO*, Shigeru AOKI, Seiya KANEKO and Mitsuhiko SANO

Abstract: Daytime seine net sampling was conducted on three artificial sandy beaches (Inage, Kemigawa and Makuhari) formed on reclaimed land at Mihama, Chiba Prefecture, central Japan, in September and November 2017, and May and July 2018. A total of 1091 individual fishes, representing 19 families and 23 species, were collected throughout the study period. Five species (*Lateolabrax japonicus*, *Platichthys bicoloratus*, *Konosirus punctatus*, *Hypoatherina valencienni* and *Plecoglossus altivelis altivelis*) were dominant, accounting for 87.4% of all individuals. Almost all of the species collected were represented only by juveniles, suggesting that the artificial sandy beaches were used as an important juvenile habitat by a variety of fishes. Although no differences in total numbers of fish species and individuals, and species composition were found among the three beaches, the mean standard length of fish pooled for each species tended to be smaller on Kemigawa Beach than the other two beaches. This difference may be due to the protected aspect of the former beach, resulting in relatively low wave activity, due to the construction of inwardly-curved groins on either side of the beach.

Keywords: Artificial sandy beach, Fish assemblage, Juvenile, Tokyo Bay

東京大学大学院農学生命科学研究科生圏システム学専攻

〒113-8657 東京都文京区弥生 1-1-1

Department of Ecosystem Studies, Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo, Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8657, Japan

*連絡著者：宍戸太郎

〒113-8657 東京都文京区弥生 1-1-1

Tel: 03-5841-8921

Fax: 03-5841-8921

E-mail : tetutaroo6@gmail.com

1. はじめに

砂浜海岸は、地球上の氷結しない海岸線の三分の二を占めており (McLACHLAN and DEFEO, 2018), 日本列島においても海岸線の多くの部分を占めている (佐野, 2017)。砂浜海岸 (以下, 砂浜) は、一見すると海底環境が単調なため、生物の生息場としては重要でないといわれることが多い。しかし実際には、波浪や堆積物、潮汐などの相互作用により複雑な海底環境が生み出され、これまでに魚類をはじめとする数多くの生物が採集されている (佐野, 2017; 須田, 2017; McLACHLAN *et al.*, 2018)。したがって、砂浜は沿岸浅海域の生態系や生物多様性を理解するうえで重要な水域の

1つであるといえる。特に魚類においては、砂浜の無脊椎動物を主要な餌としていることや、成魚と比べ、稚魚が多くみられることなどから、砂浜は魚類の餌場や稚魚の生息場となっている可能性が示唆されている (e.g., LASIAK, 1986; 須田, 2002; INOUE *et al.*, 2005; NAKANE *et al.*, 2011; 井上, 2017; McLACHLAN and DEFEO, 2018; OLDS *et al.*, 2018)。こうしたことから、砂浜は魚類にとって重要な生息場の1つであると考えられている。

砂浜を含む浅海の沿岸域は、港湾建設や埋め立てなどによる人工改変を受けやすい場所でもある。特に東京湾の内湾（富津岬と観音崎を結んだ線以北の海域）では、かつて干潟や浅瀬が広がっていたが、1970年代までにそのほとんどが消失した（荒山ほか, 2002; 河野ほか, 2012）。一方、近年では、失われた海岸環境を取り戻そうとする動きがあり、そのための施策の1つとして人工砂浜が造成されるようになった（菅原, 1977）。特に、千葉市美浜区のいなげの浜や検見川の浜、幕張の浜はその良い例であり、これらの人工砂浜は、干潟と浅瀬が完全に消失した埋立地先の海岸部に造成されている（風呂田, 1997a）。中でもいなげの浜はわが国初の人工砂浜である（小倉ほか, 2010）。しかし、これらの人工砂浜にどのような生物が生息しているのか、とりわけ魚類についてはまだほとんどわかっていないのが現状である。

さらに、これら3つの人工砂浜のうち、検見川の浜には内側に湾曲した突堤が両端にあるため、いなげの浜や幕張の浜よりは波浪に対して保護的な環境が形成されている可能性がある。例えば、保護的な砂浜では沖合からの波浪が直接には進入できないため、開放的な砂浜よりも波高が低く、波当たりが弱い環境となる（時岡ほか, 1972; CLARK, 1997; 青木ほか, 2016）。波浪環境は魚類群集の構造に影響を与える要因の1つであるといわれており、波浪の穏やかな環境では遊泳力に乏しい小型魚や稚魚が多く出現することが知られている（NAKANE *et al.*, 2013; TATEMATSU *et al.*, 2014; 荒山・河野, 2015）。検見川の浜は、いなげの浜や幕張の浜よりも波浪が穏やかなことが推測されるため、前者の砂浜と後2者の砂浜との間では異なる

魚類群集が形成されている可能性がある。

そこで本研究では、いなげの浜、検見川の浜、幕張の浜の3つの人工砂浜において魚類を複数の月にわたって採集し、これらの砂浜に出現する魚類群集の構造を明らかとするとともに、砂浜間でその群集構造に違いがあるのかどうかを調べた。また、物理的環境（水質、波浪、底質など）と生物的環境（魚類の餌生物としての無脊椎動物の個体数密度）を調べることで、魚類群集構造と環境特性との関係についても検討した。

2. 材料と方法

2.1 調査地の概要と調査期間

調査は、千葉市美浜区のいなげの浜（北緯 35° 36'56", 東経 140° 03'45"）、検見川の浜（北緯 35° 37'46", 東経 140° 02'47"）、幕張の浜（北緯 35° 38' 19", 東経 140° 02'07"）の3つの人工砂浜において、2017年9月、11月、2018年5月、7月に実施した（Fig. 1）。いなげの浜は1976年に造成された延長1200mの人工砂浜である（菅原, 1977; 高荷, 2002）。この砂浜は沖合3kmにあった砂を用いて造成されており、砂浜の両端には長さ200mの直線状の突堤が存在する（菅原, 1977）。検見川の浜は1988年に造成された延長1300mの人工砂浜であり（高荷, 2002）、造成用の砂には富津と小櫃川河口のものが用いられている（千葉県土木部港湾建設課, 1982）。この砂浜の両端には、内側に湾曲した長さ593mの突堤が、また中央部付近には長さ約200mのY字状の突堤がある（熊田・小林, 2000）。幕張の浜は1979年に造られた延長1820mの人工砂浜であり、造成には沖合の砂が用いられている（田中, 1980）。この砂浜は4基の直線状の突堤によって3分割されており、それぞれの突堤の長さは北側から順に250, 82, 250, 180mである（田中, 1980; 小林ほか, 2013）。これら3つの人工砂浜は河川や水路を挟んで隣接しており、本調査域における朔望平均満潮位と干潮位の差は約2mである（菅原, 1977; 田中, 1980; 熊田・小林, 2000）。

調査は、それぞれの砂浜において、水深約1mの場所に、50m以上の間隔で4定点を設けて行っ

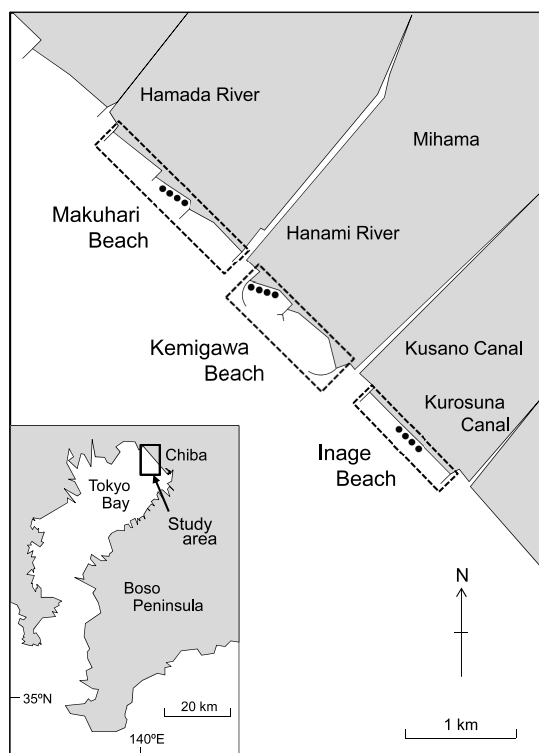


Fig. 1 Map of the study area at Mihama, Chiba Prefecture, central Japan, showing three artificial sandy beaches (Inage, Kemigawa and Makuhari). ●, sampling point.

た (Fig. 1)。各定点において小潮前後の日中に物理的環境、生物的環境、および魚類の調査を同時に実施した。なお、物理的環境である砂浜勾配の測定は、大潮の干潮時に4定点の中央部で行った。

2.2 物理的環境

各月の各砂浜の4定点において、水質、波浪、底質の調査を行った。また、砂浜勾配の測定は2018年9月に行った。

2.2.1 水質

多項目水質計 Quanta (HACH 社製) を用いて、水温 (°C)、塩分、濁度 (NTU)、溶存酸素量 (mg/L) を測定した。測定は各月の各定点で1回とした ($n = 4$ /砂浜/月)。

2.2.2 波浪

波浪環境の指標として、波高 (cm) と波浪周期 (s) を測定した。波高は、目盛りの付いたプラスチック製の測定棒を鉛直に立て、測定棒を通過した波の峰と谷の水位 (cm) を目視で3分間測定し、峰の最大値と谷の最小値の差を求めることで算出した。波浪周期は、30秒間に測定棒を通過した波の峰の数を計数し、その逆数に30を乗じることで求めた。測定は各月の各定点で1回とした。

2.2.3 底質

砂の中央粒径値と底質中の有機物含量 (以下、強熱減量) を調べた。直径5cmの円筒形コアサンプラーを海底の表面から深さ約10cmまで挿入し、底質試料を採取した。試料の採取は各月の各定点で1回とした。採取した試料は100gを中央粒径値の測定に、30gを強熱減量の測定に供した。それぞれの分析・測定は以下の手順で行った。

中央粒径値は、ふるいわけ分析法 (日本海洋学会, 1986; 土質試験法編集委員会, 1990) によって調べた。まず、試料を研究室にて脱塩処理を行い、過酸化水素水を加えて底質中の有機物を分解した後、60°Cの恒温槽内で十分に乾燥させた。次に、この試料を、目合い2000, 1000, 500, 250, 125, 63 μm の篩を用いてふるい振とう機 A-3 PRO (FRITSCH 社製) でふるった。ふるいわけ後、それぞれの篩に残った試料を電子天秤で0.01gまで秤量し、各粒径サイズの累積重量が50%となる値を中央粒径値 (μm) とした。

強熱減量の測定は、環境庁水質保全局水質管理課 (1988) の底質調査方法の改変法に従った。試料を60°Cの恒温槽内で十分に乾燥させた後、恒量化したるつぼに入れ、550°Cで6時間強熱した。このとき、強熱前後で減少した試料重量の割合として強熱減量 (%) を求めた。なお、秤量は0.001g単位で行った。

2.2.4 砂浜勾配

トータルステーション CS-101F (トプコン社製)

を用いて、満潮時の汀線付近から干潮時の水深1.2 mの地点までの砂浜断面をレベル測量した。測量は、2018年9月に、各砂浜の4定点の中央部で1回行った ($n = 1/\text{砂浜}$)。さらに、測量時にラネルとリッジの有無も確認した(須田・南條, 2017)。

2.3 生物的環境

各月の各砂浜の4定点において、浮遊性、表在性、埋在性の無脊椎動物を採集した。

2.3.1 浮遊性無脊椎動物

濾水計を取り付けたプランクトンネット(口径30 cm, 側長50 cm, 網目100 μm)を汀線と平行方向に40 m曳網し、浮遊性無脊椎動物を採集した。曳網は各月の各定点で1回とした。採集した浮遊性無脊椎動物はただちに5%中性ホルマリン溶液で固定し、研究室に持ち帰った。標本は、プランクトン標本分割器で分割した後、実体顕微鏡下において目のレベルで同定を行い、それぞれの目ごとに個体数を計数した。分割前の個体数は、計数した個体数に分割数をかけることで概算した。この概算値を濾水量で割って、1 m^3 あたりの個体数密度を算出した。

2.3.2 表在性無脊椎動物

ソリネット(幅50 cm, 高さ10 cm, 網目335 \times 335 μm)を汀線と平行方向に5 m曳網(曳網面積は2.5 m^2)して、表在性無脊椎動物を採集した。曳網は各月の各定点で1回とした。採集した表在性無脊椎動物はただちに5%中性ホルマリン溶液で固定し、研究室に持ち帰った。標本は、実体顕微鏡下において目のレベルで同定を行い、それぞれの目ごとに個体数を計数した。なお、個体数が多かった場合には、計数を行う前に適宜、分割を行った。分割方法および分割前の個体数の概算は、浮遊性無脊椎動物と同様の方法で行った。個体数密度は1曳網(2.5 m^2)あたりで求めた。

2.3.3 埋在性無脊椎動物

直径10 cmの円筒形コアサンプラーを海底の

表面から約15 cmの深さに挿入して、1178 cm^3 の砂を採取した。砂はその場で目合い1 mmの篩でふるい、埋在性無脊椎動物を採集した。採集は各月の各定点で1回とした。採集した埋在性無脊椎動物はただちに5%中性ホルマリン溶液で固定し、研究室において実体顕微鏡下で網のレベルまで同定した。個体数の計数は網ごとに行い、密度は1コア(1178 cm^3)あたりの個体数で示した。

2.4 魚類

各月の各砂浜の4定点において、小型地曳網(長さ16 m, 高さ1.5 m, 袖網の目合い6 mm, 袋網の目合い5 mm)を用いて魚類を採集した。地曳網は、間口を6 mに保ちながら、汀線と平行方向に50 m曳網(曳網面積は300 m^2)した。曳網は各月の各定点で1回とした。採集した魚類は現場でただちに10%中性ホルマリン溶液で固定し、研究室に持ち帰った。標本は、主に中坊(2013)や沖山(2014)に従って種の同定を行い、各種の個体数を計数した。ただし、イシガレイ *Platichthys bicoloratus* とクサフグ *Takifugu alboplumbeus* の学名はそれぞれ尼岡(2016)とMATSUURA(2017)に従った。個体数密度は1曳網(300 m^2)あたりの値とした。また、デジタルノギスを用いて、各個体の標準体長(以下、体長)を0.1 mm単位で計測した。

採集された魚類は、体長や形態学的特徴、既存の知見(中村, 1969; 落合・田中, 1986; 益田ほか, 1988; 中坊, 2013; 沖山, 2014)を参考にしながら、各個体の発育段階に基づき仔魚、稚魚、成魚の3つに区分した。さらに、食性を調べた既往研究の結果に従って、各魚種を浮遊性無脊椎動物食、アミ類食、等脚類食、多毛類食、デトリタス食の5グループに分類した(KANOU *et al.*, 2004; INOUE *et al.*, 2005; NAKANE *et al.*, 2011; MIKAMI *et al.*, 2012; TATEMATSU *et al.*, 2014)。なお、既往研究によって食性を決めることができなかった種については、NAKANE *et al.* (2011)の方法に従って消化管内内容を調べることで食性を明らかにした。

2.5 解析方法

物理的環境の各項目、浮遊性、表在性、埋在性無脊椎動物の個体数、魚類の種数、総個体数および体長について、月間（2017年9月、11月、2018年5月、7月）および砂浜間（いなげの浜、検見川の浜、幕張の浜）で違いがみられるかどうかを調べるために、一般化線形モデル（GLM）に基づく尤度比検定を行った。目的変数は、物理的環境の各項目、無脊椎動物の個体数、魚類の種数、総個体数および体長とし、説明変数は月、砂浜およびそれらの交互作用とした。さらに、優占した魚種の体長組成について砂浜間での違いを調べるために、2018年5月に採集されたスズキ *Lateolabrax japonicus* とイシガレイを用いて尤度比検定を行った。目的変数は各魚種の体長とし、説明変数は砂浜とした。これらのモデルの誤差分布は、物理的環境の各項目および魚類の標準体長については正規分布、魚類の種数についてはポアソン分布、無脊椎動物および魚類の個体数については負の二項分布とした。リンク関数には、正規分布においては identity、ポアソン分布および負の二項分布においては log を指定した。月間あるいは砂浜間で有意差がみられた場合には、多重比較検定（HOLM-BONFERRONI test）を用いて、どの月間あるいは砂浜間で差があるのかを検定した。月と砂浜の交互作用が存在した場合には、各砂浜における月間での有意差の有無と、各月における砂浜間での有意差の有無を尤度比検定によって調べた。月間あるいは砂浜間に有意差が存在した場合には、多重比較検定により、どの月間あるいは砂浜間に有意差が存在したのかを検定した。

魚類の種組成について、月間および砂浜間でどの程度異なるのかを明らかにするために、各月の各砂浜で採集した各種の個体数に基づき類似度を求め、クラスター分析を行った。類似度には BRAY-CURTIS 類似度（BC）を、クラスター連結には群平均法を用いた（小林, 1995; 土居・岡村, 2011）。

$$BC = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |X_{iA} - X_{iB}|}{\sum_{i=1}^n (X_{iA} + X_{iB})}$$

ここでは、 X_{iA} と X_{iB} はそれぞれある月の砂浜 A と B における種 i の個体数を表し、種組成が完全に異なる場合は $BC = 0$ 、まったく同じ場合には $BC = 1$ となる。なお、個体数が種によって大きく異なるとき、類似度指数は個体数の多い種の影響を受けやすい。このため、本解析においては個体数の少ない種の貢献度を高めるために、各種の個体数を対数変換 $[\log(x + 1)]$ した。

以上の解析には、統計ソフト R 3.4.0 を用いた。また、それぞれの検定における有意水準は 5% とした。

3. 結果

3.1 物理的環境

3.1.1 水質

各月の各砂浜における水温、塩分、濁度、溶存酸素量の結果を Fig. 2 に示した。これらの各項目について月間および砂浜間で違いがみられるかどうかを調べるために、GLM を用いて尤度比検定を行ったところ、すべての項目において月と砂浜の交互作用がみられた（Table 1）。そこで、これらの各項目について各砂浜における月間での有意差の有無と、各月における砂浜間での有意差の有無を尤度比検定によって調べた（Table 1）。

水温は、すべての砂浜において月間での有意差がみられた。いなげの浜では 7 月、9 月、5 月、11 月の順に、また検見川の浜では 7 月、9 月、11 月、5 月の順に高かった。幕張の浜では 7 月 > 9 月 > 11 月 = 5 月となった。各月における砂浜間での違いについては、7 月を除くと、各月で有意差がみられた。9 月では検見川や幕張の浜がいなげの浜よりも高く、11 月では検見川、幕張、いなげの浜の順に高かった。一方、5 月ではいなげの浜が検見川や幕張の浜よりも高かった。しかし、いずれの月においても砂浜間の差はわずかで、最大でも 1.4°C であった。

塩分は、すべての砂浜において月間での有意差がみられた。いなげや検見川の浜では 5 月、9 月、11 月、7 月の順に高く、幕張の浜では 5 月 > 9 月 = 11 月 > 7 月であった。各月における砂浜間での違いについては、すべての月で有意差がみられ

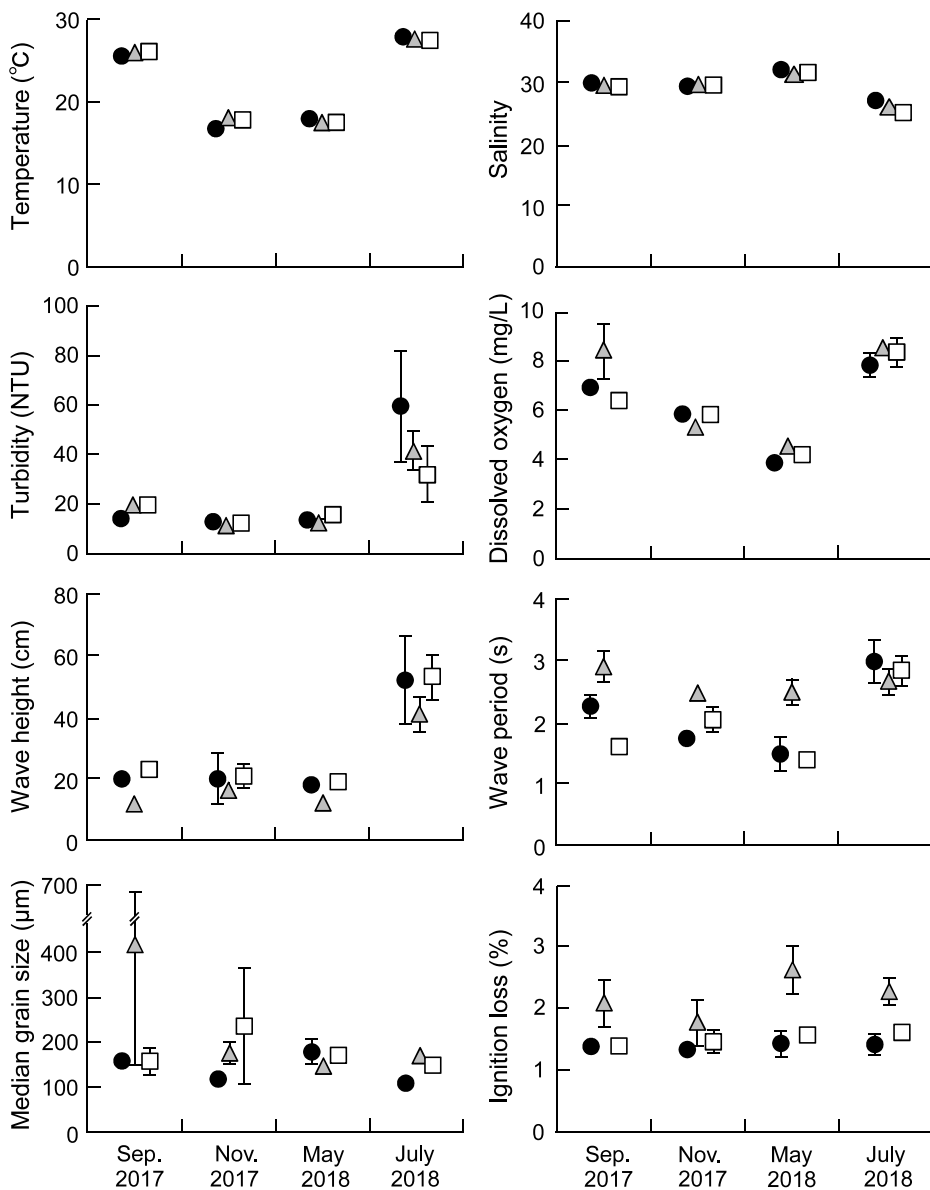


Fig. 2 Physical environmental factors (water temperature, salinity, turbidity, dissolved oxygen, wave height, wave period, median grain size and organic content, indicated by ignition loss) on Inage Beach (●), Kemigawa Beach (▲) and Makuhari Beach (□) in September and November 2017, and May and July 2018. Data include means \pm standard deviations ($n = 4$).

た。9月ではいなげの浜で高く、幕張の浜で低かった。11月では検見川や幕張の浜はいなげの浜よりも高かった。5月においてはいなげ、幕張、

検見川の浜の順に高く、7月ではいなげ、検見川、幕張の浜の順に高かった。しかし、いずれの月においても砂浜間の差はわずかで、最大でも2.2の

差であった。

濁度は、すべての砂浜において月間での有意差がみられ、いずれの砂浜においても7月が他の月よりも高かった。各月の砂浜間での違いは、11月を除くと、各月で有意差がみられた。9月においては検見川や幕張の浜がいなげの浜よりも高く、5月では幕張の浜が検見川の浜よりも高かった。一方、7月では多重比較検定で差が検出されなかったが、Fig. 2をみると、いなげの浜で高く、検見川や幕張の浜で低い傾向がみられた。

溶存酸素量についても、すべての砂浜において月間での有意差がみられた。いなげの浜では7月、9月、11月、5月の順に高く、検見川と幕張の浜ではそれぞれ9月 = 7月 > 11月 = 5月、7月 > 9月 = 11月 > 5月であった。各月の砂浜間での違いは、7月を除くと、各月で有意差がみられ、9月においては検見川の浜がいなげや幕張の浜よりも高かった。一方、11月ではいなげや幕張の浜で高く、5月では検見川の浜がいなげの浜よりも高かった。

3.1.2 波浪

各月の各砂浜における波高と波浪周期の結果をFig. 2に示した。波浪周期では月と砂浜の交互作用がみられたため、各砂浜における月間での有意差と各月における砂浜間での有意差を調べた(Table 1)。

波高は月間での有意差がみられ、7月は他の月よりも高かった。また、砂浜間でも有意差が認められたが、多重比較検定では差が検出されなかった。しかし、Fig. 2をみると、いなげや幕張の浜は検見川の浜よりも高い傾向にあった。

波浪周期は、すべての砂浜において月間での有意差がみられ、いなげの浜では7月 > 9月 > 11月 = 5月であった。検見川の浜においては、尤度比較検定で月間の有意差が認められたが、多重比較検定では差が検出されなかった。しかし、9月は他の月よりもやや長い傾向にあった(Fig. 2)。幕張の浜では7月 > 11月 > 9月 = 5月となった。各月における砂浜間での違いについては、7月を除くと、各月で有意差がみられた。9月では検見

川、いなげ、幕張の浜の順で、また11月では検見川、幕張、いなげの浜の順で長かった。5月においては、検見川の浜でいなげや幕張の浜よりも長かった。

3.1.3 底質

各月の各砂浜における中央粒径値と強熱減量の結果をFig. 2に示した。尤度比較検定の結果、どちらの項目でも月と砂浜の交互作用がみられた(Table 1)。

中央粒径値は、いなげと検見川の浜において月間での有意差がみられ、前者の浜では5月 = 9月 > 7月 = 11月であった。一方、後者の浜においては、9月が7月よりも大きかった。各月の砂浜間での違いについては、9月と7月に有意差がみられた。9月では多重比較検定で差が検出されなかったが、検見川の浜がいなげや幕張の浜よりも大きい傾向にあった(Fig. 2)。7月では検見川や幕張の浜がいなげの浜よりも大きかった。

強熱減量については、検見川と幕張の浜において月間での有意差が認められ、どちらの浜も5月と7月が他の月よりも高い傾向にあった。各月の砂浜間での違いについては、すべての調査月において有意差がみられた。9月、11月、5月においては検見川の浜でいなげや幕張の浜よりも高く、7月では検見川、幕張、いなげの浜の順で高かった。

3.1.4 砂浜勾配

9月に測量した各砂浜の勾配は、いなげの浜で1/27、検見川の浜と幕張の浜で1/24であった。勾配はいなげの浜でやや緩やかであったものの、砂浜間で大きな違いはみられなかった。また、どの砂浜においても、満潮時の汀線付近から干潮時の水深1.2 mの地点までに、幅5-15 m程度のラネルとリッジがそれぞれ1列存在した。

3.2 生物的環境

3.2.1 浮遊性無脊椎動物

採集された浮遊性無脊椎動物は主にカラヌス類やキクロプス類であった。各月の各砂浜における1 m³あたりの浮遊性無脊椎動物の総個体数をFig.

Table 1. Results of likelihood-ratio (LR) tests examining the effects of month and beach on physical environmental factors using a generalized linear model (GLM).

	df	LR χ^2	<i>p</i>	HBT
Water temperature				
Month	3	24077.7	<0.001	
Beach	2	12.6	<0.01	
Month×Beach	6	101.8	<0.001	
Month in IN	3	19500.0	<0.001	Jul>Sep>May>Nov
Month in KM	3	8636.8	<0.001	Jul>Sep>Nov>May
Month in MK	3	4725.9	<0.001	Jul>Sep>Nov=May
Beach in Sep.	2	23.9	<0.001	KM=MK>IN
Beach in Nov.	2	506.4	<0.001	KM>MK>IN
Beach in May	2	15.9	<0.001	IN>KM=MK
Beach in July	2	4.6	0.102	
Salinity				
Month	3	8462.3	<0.001	
Beach	2	139.1	<0.001	
Month×Beach	6	225.2	<0.001	
Month in IN	3	2022.3	<0.001	May>Sep>Nov>Jul
Month in KM	3	22520.0	<0.001	May>Sep>Nov>Jul
Month in MK	3	2080.1	<0.001	May>Sep=Nov>Jul
Beach in Sep.	2	23.9	<0.001	IN>MK
Beach in Nov.	2	221.7	<0.001	KM=MK>IN
Beach in May	2	102.4	<0.001	IN>MK>KM
Beach in July	2	190.7	<0.001	IN>KM>MK
Turbidity				
Month	3	135.2	<0.001	
Beach	2	4.2	0.122	
Month×Beach	6	22.7	<0.001	
Month in IN	3	48.7	<0.001	Jul>Sep=Nov=May
Month in KM	3	138.7	<0.001	Jul>Sep=Nov=May
Month in MK	3	25.0	<0.001	Jul>Sep=Nov=May
Beach in Sep.	2	14.3	<0.001	KM=MK>IN
Beach in Nov.	2	3.1	0.216	
Beach in May	2	13.6	<0.01	MK>KM
Beach in July	2	6.6	<0.05	—
Dissolved oxygen				
Month	3	619.7	<0.001	
Beach	2	16.7	<0.001	
Month×Beach	6	46.0	<0.001	
Month in IN	3	350.5	<0.001	Jul>Sep>Nov>May
Month in KM	3	163.6	<0.001	Sep=Jul>Nov=May
Month in MK	3	263.6	<0.001	Jul>Sep=Nov>May
Beach in Sep.	2	19.6	<0.001	KM>IN=MK
Beach in Nov.	2	40.9	<0.001	IN=MK>KM
Beach in May	2	11.8	<0.01	KM>IN
Beach in July	2	5.7	0.058	
Wave height				
Month	3	266.9	<0.001	Jul>Sep=Nov=May
Beach	2	21.5	<0.001	—
Month×Beach	6	2.8	0.828	

Wave period				
Month	3	158.6	<0.001	
Beach	2	89.7	<0.001	
Month×Beach	6	88.2	<0.001	
Month in IN	3	90.5	<0.001	Jul>Sep>Nov=May
Month in KM	3	12.0	<0.01	—
Month in MK	3	154.1	<0.001	Jul>Nov>Sep=May
Beach in Sep.	2	100.5	<0.001	KM>IN>MK
Beach in Nov.	2	62.3	<0.001	KM>MK>IN
Beach in May	2	62.8	<0.001	KM>IN=MK
Beach in July	2	3.0	0.220	
Median grain size				
Month	3	8.9	<0.05	
Beach	2	7.8	<0.05	
Month×Beach	6	20.3	<0.01	
Month in IN	3	56.4	<0.001	May=Sep>Jul=Nov
Month in KM	3	10.5	<0.05	Sep>May
Month in MK	3	4.1	0.253	
Beach in Sep.	2	7.3	<0.05	—
Beach in Nov.	2	4.8	0.089	
Beach in May	2	5.9	0.052	
Beach in July	2	36.0	<0.001	KM=MK>IN
Ignition loss				
Month	3	52.4	<0.001	
Beach	2	336.4	<0.001	
Month×Beach	6	46.2	<0.001	
Month in IN	3	3.6	0.312	
Month in KM	3	39.1	<0.001	May>Sep=Nov, Jul>Nov
Month in MK	3	22.5	<0.001	Jul>Sep=Nov, May>Sep
Beach in Sep.	2	67.7	<0.001	KM>IN=MK
Beach in Nov.	2	19.8	<0.001	KM>IN=MK
Beach in May	2	150.1	<0.001	KM>IN=MK
Beach in July	2	180.3	<0.001	KM>MK>IN

Holm–Bonferroni test (HBT) was conducted when the GLM and LR test results indicated significant effects.

—, The HBT results indicated no significant differences among months or beaches. IN, Inage Beach; KM, Kemigawa Beach; MK, Makuhari Beach.

3に示した。尤度比検定の結果、月と砂浜の間に交互作用が存在した (Table 2)。

総個体数は、すべての砂浜において月間での有意差がみられた。いなげや幕張の浜では9月が他の月よりも多く、同様の傾向は検見川の浜でもみられた。また、7月を除くと、各月の砂浜間でも有意差がみられ、9月ではいなげの浜が検見川や幕張の浜よりも多かった。11月と5月においては多重比較検定で差が検出されなかったが、11月では検見川の浜で多く、幕張の浜で少ない傾向にあった (Fig. 3)。一方、5月ではいなげの浜で多く、検見川の浜で少ない傾向となった。

3.2.2 表在性無脊椎動物

表在性無脊椎動物で優占していたのはアミ類であった。各月の各砂浜における1曳網 (2.5 m²) あたりの表在性無脊椎動物の総個体数とアミ類の個体数を Fig. 3 に、また尤度比検定の結果を Table 2 に示した。いずれの項目においても月と砂浜の交互作用が認められた。

総個体数は、すべての砂浜において月間での有意差がみられた。いなげの浜では5月が9月よりも多く、検見川や幕張の浜でも5月は他の月よりも多かった。各月における砂浜間での違いについては、5月を除く各月において有意差が認められ

Table 2. Results of LR tests examining the effects of month and beach on the abundances of zooplankton (total), epifaunal invertebrates (total and mysids) and infaunal invertebrates (total and polychaetes) using a GLM.

	df	LR χ^2	<i>p</i>	HBT
Total zooplankton				
Month	3	165.6	<0.001	
Beach	2	17.8	<0.001	
Month×Beach	6	22.6	<0.001	
Month in IN	3	69.5	<0.001	Sep>Nov=May=Jul
Month in KM	3	38.5	<0.001	Sep>Nov=May, Jul>May
Month in MK	3	73.7	<0.001	Sep>Nov=May=Jul
Beach in Sep.	2	36.7	<0.001	IN>KM=MK
Beach in Nov.	2	7.7	<0.05	—
Beach in May	2	7.7	<0.05	—
Beach in July	2	1.8	0.416	
Total epifaunal invertebrates				
Month	3	279.7	<0.001	
Beach	2	11.0	<0.01	
Month×Beach	6	31.2	<0.001	
Month in IN	3	68.2	<0.001	May>Sep
Month in KM	3	50.5	<0.001	May>Sep=Nov=Jul
Month in MK	3	454.4	<0.001	May>Sep=Nov=Jul
Beach in Sep.	2	46.7	<0.001	KM>IN=MK
Beach in Nov.	2	8.1	<0.05	—
Beach in May	2	5.2	0.074	
Beach in July	2	25.9	<0.001	KM>MK
Mysids (epifaunal)				
Month	3	1089.7	<0.001	
Beach	2	6.2	<0.05	
Month×Beach	6	36.6	<0.001	
Month in IN	3	741.2	<0.001	May>Sep=Nov=Jul
Month in KM	3	102.3	<0.001	May>Sep=Nov=Jul
Month in MK	3	275.5	<0.001	May>Sep=Nov=Jul
Beach in Sep.	2	0.7	0.701	
Beach in Nov.	2	19.4	<0.001	MK>KM
Beach in May	2	5.0	0.083	
Beach in July	2	41.5	<0.001	KM>IN=MK
Total infaunal invertebrates				
Month	3	25.0	<0.001	Jul>May
Beach	2	14.0	<0.001	KM>IN=MK
Month×Beach	6	12.4	0.053	
Polychaetes (infaunal)				
Month	3	31.2	<0.001	
Beach	2	13.6	<0.01	
Month×Beach	6	14.4	<0.05	
Month in IN	3	13.4	<0.01	—
Month in KM	3	18.9	<0.001	—
Month in MK	3	14.5	<0.01	—
Beach in Sep.	2	1.1	0.572	
Beach in Nov.	2	9.2	<0.01	—
Beach in May	2	16.2	<0.001	KM>IN=MK
Beach in July	2	7.2	<0.05	—

For abbreviations, see Table 1.

HBT was conducted when the GLM and LR test results indicated significant effects.

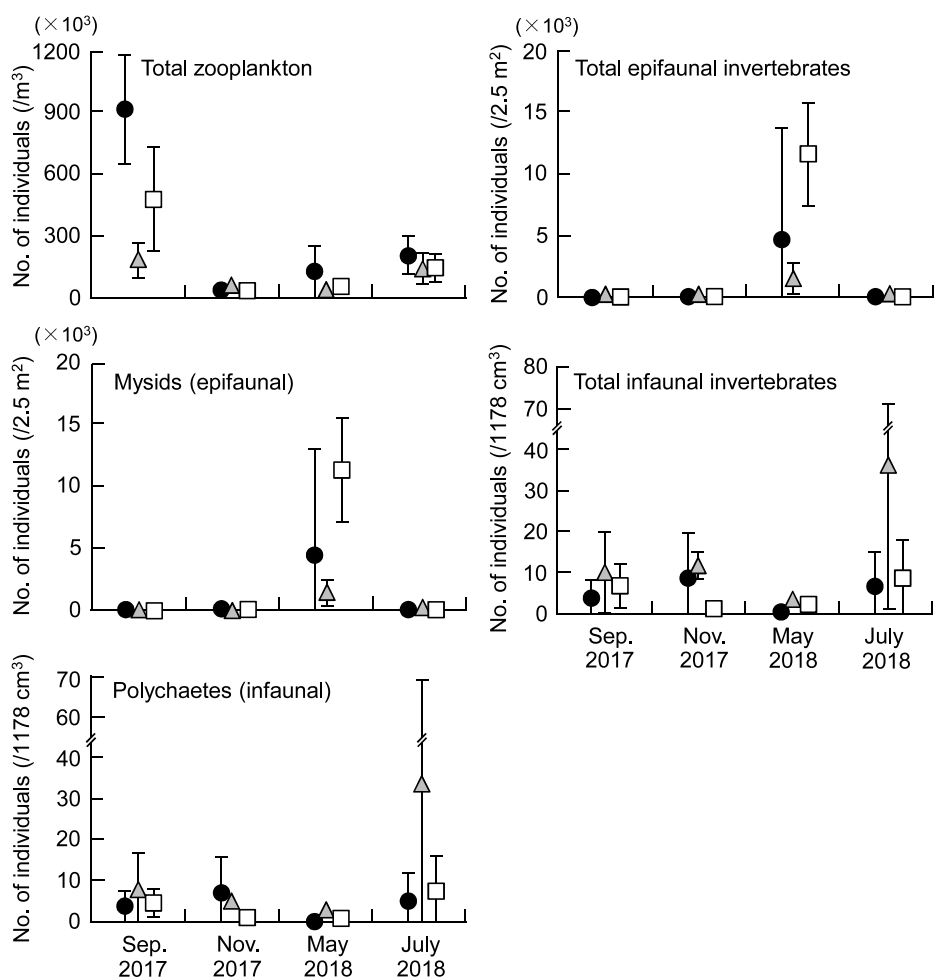


Fig. 3 Mean individual numbers (\pm standard deviations, $n = 4$) of zooplankton (total) per m^3 , epifaunal invertebrates (total and mysids) per 2.5 m^2 and infaunal invertebrates (total and polychaetes) per 1178 cm^3 , collected by plankton net, sledge net and core sampler, respectively, on Inage Beach (●), Kemigawa Beach (△) and Makuhari Beach (□) in September and November 2017, and May and July, 2018.

た。9月では検見川の浜でいなげや幕張の浜よりも多く、7月では検見川の浜が幕張の浜よりも多かった。11月は多重比較検定で有意差が検出されなかったが、検見川の浜でいなげや幕張の浜よりもわずかに多い傾向がみられた (Fig. 3)。5月は、統計的に有意ではなかったが ($p = 0.074$)、Fig. 3をみると幕張の浜で多い傾向にあった。

アミ類の個体数についても、すべての砂浜にお

いて月間での有意差が認められ、どの砂浜でも5月は他の月よりも多かった。各月の砂浜間での違いは、11月と7月に有意差がみられた。11月では幕張の浜が検見川の浜よりも多く、7月では検見川の浜がいなげや幕張の浜よりも多かった。また、統計的には有意ではなかったが ($p = 0.083$)、5月においては幕張の浜で多い傾向がみられた (Fig. 3)。

3.2.3 埋在性無脊椎動物

埋在性無脊椎動物で優占していたのは多毛類であった。各月の各砂浜における1コア (1178 m³) あたりの埋在性無脊椎動物の総個体数と多毛類の個体数を Fig. 3 に示した。多毛類の個体数については、月と砂浜の間で交互作用がみられた (Table 2)。

総個体数は月間での有意差がみられ、7月は5月よりも多かった。また、砂浜間でも有意差が存在し、検見川の浜はいなげや幕張の浜よりも多かった。

多毛類の個体数では、各砂浜における月間での有意差が認められたが、いずれの砂浜においても多重比較検定で差が検出されなかった。しかし、Fig. 3 をみると、いなげの浜では11月にやや多く、検見川や幕張の浜では7月に多い傾向が認められた。各月の砂浜間では、9月を除く各月において有意差がみられたが、11月と7月においては多重比較検定で差が検出されなかった。しかし、11月ではいなげの浜で、また7月では検見川の浜で多い傾向がみられた (Fig. 3)。5月においては検見川の浜がいなげや幕張の浜よりも多かった。

3.3 魚類群集の構造

3.3.1 採集された魚類

各月の各砂浜で採集された各魚種の個体数、体長、発育段階、食性を Table 3 に示した。調査期間を通して3つの砂浜で採集された魚類は、稚魚を中心とした合計19科23種1091個体であった。月ごとにみると、9月は7種97個体、11月は5種9個体、5月は10種791個体、7月は10種194個体であった。個体数の多かった魚種は、スズキ (508個体)、イシガレイ (183個体)、コノシロ *Konosirus punctatus* (149個体)、トウゴロウイワシ *Hypoatherina valenciennei* (63個体)、アユ *Plecoglossus altivelis altivelis* (51個体) の5種であり、これらで全体の87.4%を占めた。これらの優占種はすべて稚魚であり、特定の月や砂浜で多く採集された。スズキは5月の幕張の浜、イシガレイとアユは5月の検見川の浜、コノシロは7月の検見川の浜、トウゴロウイワシは9月のいなげ

の浜で多かった。

3.3.2 種数と総個体数

各月の各砂浜における1曳網 (300 m²) あたりの種数と総個体数を Fig. 4 に、また尤度比検定の結果を Table 4 に示した。総個体数については月と砂浜の交互作用がみられた。

種数は月間での有意差がみられ、5月 = 7月 > 9月 = 11月であった。一方、砂浜間では有意差があるとはいえなかった。総個体数は、すべての砂浜で月間の有意差がみられ、検見川の浜においては5月 = 7月 > 9月 = 11月、幕張の浜では5月 > 9月 = 7月 > 11月であった。いなげの浜では多重比較検定で差が検出されなかったが、9月が他の月よりもやや多い傾向にあった (Fig. 4)。各月の砂浜間での有意差は、5月と7月にみられた。5月では幕張の浜がいなげの浜よりも多く、7月では検見川の浜がいなげや幕張の浜よりも多かった。

3.3.3 種組成

各月の各砂浜で採集した各魚種の個体数に基づき類似度を求め、クラスター分析を行ったところ、類似度0.2で6つのグループに分かれた (Fig. 5)。これらの各グループをみると、魚類の種組成は11月を除き、月ごとに類似していた。また、各月における砂浜間の類似パターンは月ごとに異なっており、調査期間を通してみられた一定の傾向はなかった。

3.3.4 体長

各月の各砂浜で採集された全個体の体長組成を Fig. 6 に示した。尤度比検定の結果、月と砂浜の間に交互作用が存在した (Table 5)。

全個体の体長は、すべての砂浜において月間での有意差がみられた。いなげの浜では11月が他の月よりも大きく、同様の傾向は検見川の浜でもみられた。一方、幕張の浜では9月と7月が5月よりも大きかった。各月の砂浜間での違いについては、11月を除いた各月で有意差がみられた。9月や7月では幕張の浜でいなげや検見川の浜よりも

Table 3. Number of individuals, size ranges in standard length (SL), developmental stages (DS) and feeding habits (FH) of fish species caught by seine net on artificial sandy beaches (Inage, Kemigawa and Makuhari) in each month (September and November 2017, and May and July 2018).

Family	Species	SL (mm)	DS	FH	September 2017			November 2017			May 2018			July 2018			Total
					IN	KM	MK	IN	KM	MK	IN	KM	MK	IN	KM	MK	
Clupeidae	<i>Sardinella zunasi</i>	29-91	L-A	Zo			6			1					4		18
	<i>Konosirus punctatus</i>	27-127	J	De					5					1	143		149
Engraulidae	<i>Engraulis japonica</i>	29-94	L-A	Zo	1		3										7
Cyprinidae	<i>Tribolodon brandtii</i>	151	J	Po					1								1
Osmeridae	<i>Hypomesus nipponensis</i>	56	J	Zo					1								1
	<i>Plecoglossus altivelis altivelis</i>	33-49	J	Zo								51					51
Mugilidae	<i>Mugil cephalus cephalus</i>	26-36	J	Zo							24	2					26
Atherinidae	<i>Hypoatherina valenciennei</i>	32-67	J	Zo			15										63
Triglidae	<i>Chelidonichthys spinosus</i>	13-33	J	My							13	1					14
Platycephalidae	<i>Platycephalus</i> sp. 2	31-153	J	Po, My	1		1				1						5
Lateolabracidae	<i>Lateolabrax japonicus</i>	26-84	J	My							13	484	3	1	7		508
Sparidae	<i>Acanthopagrus schlegelii</i>	28-51	J	My									1		2		3
Teraponidae	<i>Terapon jarbua</i>	32	J	Is													1
Oplegnathidae	<i>Oplegnathus fasciatus</i>	18-29	J	Zo									2	6	1		9
	<i>Oplegnathus punctatus</i>	18-35	J	Zo										3			3
Kyphosidae	<i>Kyphosus vaigiensis</i>	23	J	Zo									1				1
	<i>Gymnogobius urotaenia</i>	20-23	J	Zo							1	1	2				4
Gobiidae	<i>Acanthogobius flavimanus</i>	29-105	J	Po									1	6	1	8	18
	<i>Favonigobius gymnauchen</i>	32	J	Is						1							1
Pleuronectidae	<i>Platichthys bicoloratus</i>	23-78	J	Po							16	150	15		2		183
Triacanthidae	<i>Triacanthus biaculeatus</i>	25-66	J	Po			9										14
Monacanthidae	<i>Stephanolepis cirrhifer</i>	12, 15	J	Zo										1	1		2
Tetraodontidae	<i>Takifugu alboblunbeus</i>	76-114	A	My							8	1					9
Number of species					5	3	5	1	4	0	4	8	6	7	5	20	23
Total number of individuals					53	10	34	5	4	0	32	254	505	15	159	20	1091

Data pooled for four replicate sweeps on each beach.

IN, Inage Beach; KM, Kemigawa Beach; MK, Makuhari Beach.

DS: L, larvae; J, juveniles; A, adults.

FH: De, detritus feeders; Is, isopod feeders; My, mysid feeders; Po, polychaete feeders; Zo, zooplankton feeders.

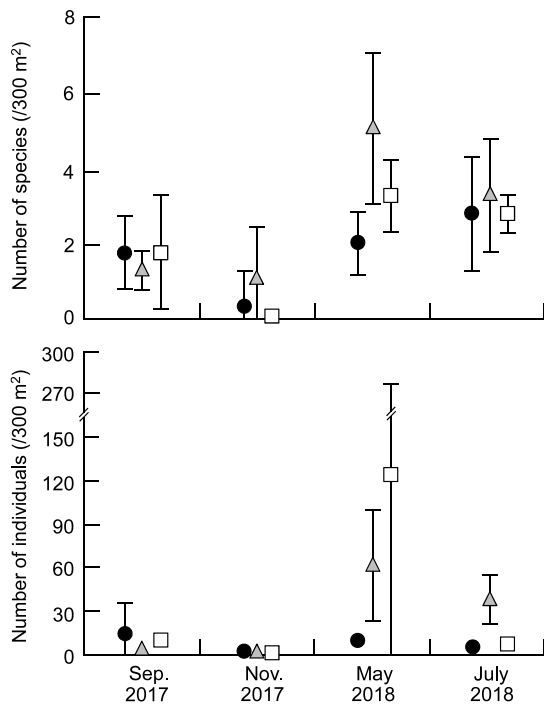


Fig. 4 Mean numbers (\pm standard deviations, $n = 4$) of fish species and individuals per 300 m² collected by seine net on Inage Beach (●), Kemigawa Beach (▲) and Makuhari Beach (□) in September and November 2017, and May and July, 2018.

大きく、5月ではいなげ、幕張、検見川の浜の順に大きかった。

5月に採集された優占種のスズキとイシガレイの体長組成を Fig. 7 に示した。両種の体長はそれぞれ砂浜間で有意に異なり、スズキは幕張の浜で検見川の浜よりも大きく、イシガレイはいなげ、幕張、検見川の浜の順に大きかった (Table 5)。

4. 考察

4.1 物理的環境

調査した物理的環境項目のうち、月間の違い(すなわち季節変化)が3つの砂浜(いなげの浜、検見川の浜、幕張の浜)において同様のパターンでみられたのは、水温、塩分、濁度、溶存酸素量、波高であった。

東京湾では、水温と気温の季節変化がほぼ一致しており、夏に高く、冬に低くなることが知られている(風呂田, 1997b; 東京湾海洋環境研究委員会, 2011)。本研究においても同様の傾向がみられ、水温は9月、7月に高く、11月、5月に低かった。

東京湾の湾奥では、夏の高温期に塩分の低下が著しいことが報告されている(風呂田, 1997b; 東京湾海洋環境研究委員会, 2011)。本研究でも同様に、塩分は5月に高く、7月で低かった。これは、湾奥に流入する淡水供給量が夏に多くなることが影響していると考えられている(東京湾海洋環境研究委員会, 2011)。さらに、この塩分低下は、水塊構造や季節風の方向と深い関係にあるといわれている。風呂田(1997b)によると、夏に湾内で成層が形成され、さらに湾口から湾奥へ向かう季節風(南風)が卓越すると、塩分の低い表層水が湾奥に吹き寄せられるため、塩分低下が助長されるという。

また、塩分と同様に、本研究でみられた濁度と波高の季節変化も夏の季節風の影響を受けて生じた変化であると推察される。両項目は7月において他の月よりも顕著に高かった。これは、夏の季節風によって湾口から吹き寄せられた波が湾奥で高くなるとともに、海底がその波によって攪乱され、濁度が高くなったものと考えられる。

東京湾内湾の表層域では、溶存酸素量は夏に高くなり、冬に低くなることが報告されている(石井・大畑, 2010)。この現象は、植物プランクトンの光合成による酸素発生量を反映したものとされている。本研究においても概ね同様の傾向を示し、溶存酸素量は7月で最も多かった。

一方、砂浜間での違いが調査期間を通して同様にみられた項目は、波高と強熱減量であった。波高は検見川の浜で他の砂浜よりも低く、逆に強熱減量は検見川の浜で高い傾向を示した。波高が検見川の浜で低いという結果は、この砂浜の波浪環境が相対的に穏やかであるということの意味している。これは、検見川の浜において、内側に湾曲して設置された突堤が、沖合からの波浪をある程度、防いでいるためと考えられる (Fig. 1)。この

Table 4. Results of LR tests examining the effects of month and beach on the total numbers of fish species and individuals using a GLM.

	df	LR χ^2	<i>p</i>	HBT
Number of species				
Month	3	37.6	<0.001	May=Jul>Sep=Nov
Beach	2	3.5	0.171	
Month×Beach	6	8.5	0.206	
Number of individuals				
Month	3	93.5	<0.001	
Beach	2	4.4	0.110	
Month×Beach	6	47.1	<0.001	
Month in IN	3	8.5	<0.05	—
Month in KM	3	81.1	<0.001	May=Jul>Sep=Nov
Month in MK	3	84.9	<0.001	May>Sep=Jul>Nov
Beach in Sep.	2	3.8	0.148	
Beach in Nov.	2	3.6	0.167	
Beach in May	2	20.1	<0.001	MK>IN
Beach in July	2	92.6	<0.001	KM>IN=MK

For abbreviations, see Table 1.

HBT was conducted when the GLM and LR test results indicated significant effects.

ような波浪環境では、海底の攪乱は少なく、デトリタスが沈殿しやすい状態となることが予測される。検見川の浜において、強熱減量が高かったのは、このためであると考えられる。

4.2 生物的環境

調査した生物的環境項目のうち、月間の違いが3つ砂浜で同様にみられたのは、浮遊性無脊椎動物と表在性無脊椎動物の総個体数、およびアミ類（表在性無脊椎動物）の個体数であった。浮遊性無脊椎動物の総個体数は9月で、また表在性無脊椎動物の総個体数とアミ類の個体数は5月で最も多かった。浮遊性無脊椎動物において優占したカイアシ類（カラヌス類やキクロプス類）は、南日本の沿岸浅海域では夏に多いことが知られている（広田, 1998; INOUE *et al.*, 2008）。また、アミ類は初夏を中心に多いことが報告されている（広田, 1998; INOUE *et al.*, 2008）。したがって、本研究においても同様の結果が得られた。

一方、調査期間を通した砂浜間での違いは、埋存性無脊椎動物の総個体数にみられ、検見川の浜で多い傾向にあった。これは、4.1節で述べたよ

うに、検見川の浜では他の砂浜よりも波浪が穏やかで、デトリタスが沈殿しやすかったためと考えられる。デトリタスは多毛類を含む多くの埋存性無脊椎動物の餌となることが知られている（堀越・菊池, 1976）。

4.3 魚類群集の構造

4.3.1 採集された魚類

調査期間を通して3つの砂浜で採集された魚類は、主に稚魚であった。自然の砂浜では成魚と比べ、稚魚が多く生息することが、日本を含めた世界各地から報告されており（e.g., LASIAK, 1986; 須田, 2002; BENAZZA *et al.*, 2015; 井上, 2017; McLACHLAN and DEFEO, 2018; OLDS *et al.*, 2018）、本調査地においても同様の結果となった。特に、優占種のスズキ、イシガレイ、コノシロ、トウゴロウイワシ、アユの5種については、すべての個体が稚魚であった。これらの優占種は特定の月や砂浜において多く採集され、スズキは5月の幕張の浜に、イシガレイとアユは5月の検見川の浜に、コノシロは7月の検見川の浜に、トウゴロウイワシは9月のいなげの浜に多かった。東京湾の浅所

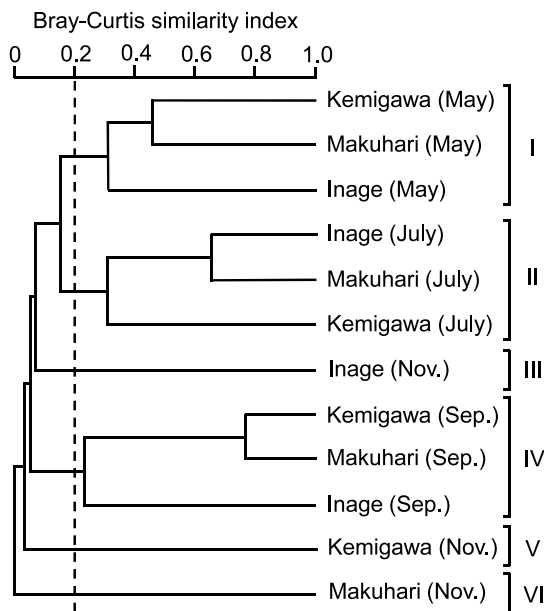


Fig. 5 Dendrogram of a cluster analysis showing similarities of fish assemblages, based on number of individuals of each fish species on each artificial sandy beach (Inage, Kemigawa and Makuhari) in September and November 2017, and May and July 2018. Assemblages divided into six groups (I-VI) at a Bray-Curtis similarity index level of 0.2.

では、本研究結果と同様に、これら5種の稚魚は上記した特定の月や季節に出現することが知られている(加納・横尾, 2011)。以下では、それぞれの種の個体数がなぜ砂浜間で異なったのか、その理由について考察する。

スズキの稚魚は5月の幕張の浜で多かった。5月に幕張の浜と他の砂浜の間で違いがみられた物理・生物的環境項目をみると、それらは表在性無脊椎動物の総個体数とアミ類の個体数であった。両項目は統計的には有意でないものの、幕張の浜で多い傾向にあった。本種の稚魚は主にアミ類を食べて成長するため(Table 3), アミ類をはじめとする表在性無脊椎動物の多い5月の幕張の浜は、稚魚の有効な餌場となっていた可能性がある。このために、スズキの稚魚は5月の幕張の浜で多

かったのかもしれない。

イシガレイの稚魚は5月において検見川の浜で多く採集された。5月の物理・生物的環境のうち、検見川の浜と他の砂浜との間で違いがみられた項目は、塩分、波高、波浪周期、強熱減量、浮遊性無脊椎動物と埋在性無脊椎動物の総個体数、多毛類の個体数であった。ただし、塩分は砂浜間の差がわずかであったため(Fig. 2), 魚類の分布に大きな影響は与えないものと考えられる。また、イシガレイの稚魚は多毛類食であるため(Table 3), 浮遊性無脊椎動物の総個体数も本種の分布に大きな影響は及ぼさないものと思われる。一方、波高は検見川の浜で低く、波浪周期はその逆の傾向を示し、検見川の浜で長かった。これは検見川の浜の波浪環境が相対的に穏やかであることを示している。本種のような底生魚は厳しい波浪にある程度は耐えられることが知られているが(TATEMATSU *et al.*, 2014), 魚類全般についてみると、波浪の穏やかな環境では遊泳力に乏しい稚魚や小型魚が多く出現する(NAKANE *et al.*, 2013; TATEMATSU *et al.*, 2014; 荒山・河野, 2015; OLDS *et al.*, 2018)。本研究で採集されたイシガレイ稚魚は、まだ体長の小さな個体であったため(Fig. 7), 波浪の穏やかな環境を好んで生息する可能性がある。また、検見川の浜では、本種の稚魚の餌となっている多毛類や埋在性無脊椎動物の個体数が多かった。以上のことから、5月の検見川の浜は他の砂浜よりも波浪が穏やかで、多毛類を含む埋在性無脊椎動物が多い環境であったため、イシガレイ稚魚は検見川の浜に多く出現した可能性がある。

コノシロは7月において検見川の浜で多く採集されたが、物理・生物的環境の中で検見川の浜と他の砂浜との間で異なった項目は、波高、強熱減量、埋在性無脊椎動物の総個体数、アミ類と多毛類の個体数であった。波高は検見川の浜で低く、それとは逆に強熱減量は検見川の浜で高かった。これは、上述したように、検見川の浜は他の砂浜よりも波浪が穏やかで、デトリタスが多いためである。本種の稚魚はデトリタス食であり(Table 3), また検見川の浜で採集された多くの

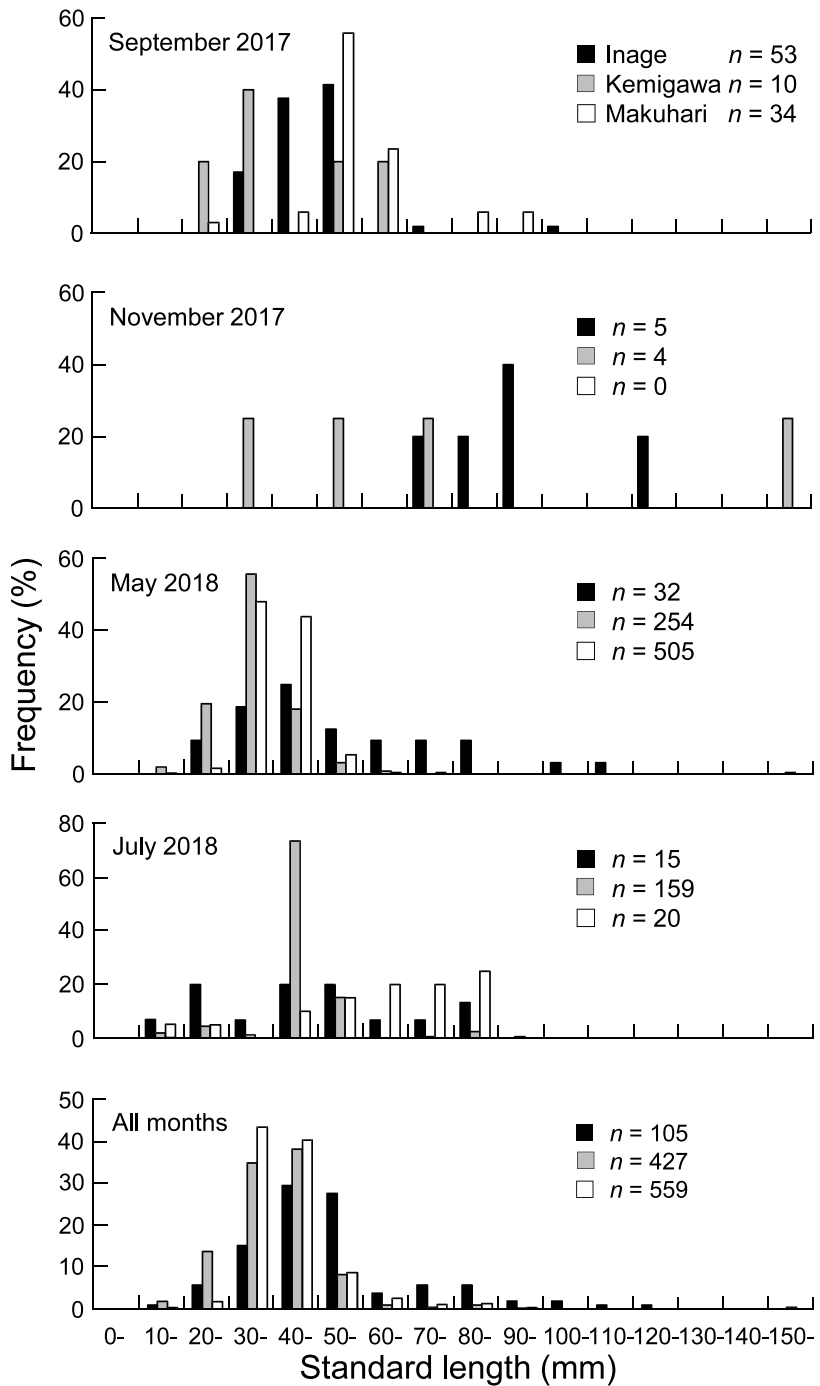


Fig. 6 Frequency distributions of standard lengths of all fishes collected on Inage, Kemigawa and Makuhari beaches in each month (September and November 2017 and May and July 2018).

Table 5. Results of LR tests examining the effects of month and beach on standard lengths of all fishes collected during the study period and of *Lateolabrax japonicus* and *Platichthys bicoloratus* collected in May using a GLM.

	df	LR χ^2	<i>p</i>	HBT
All fishes				
Month	3	330.8	<0.001	
Beach	2	96.9	<0.001	
Month×Beach	5	95.7	<0.001	
Month in IN	3	31.6	<0.001	Nov>Sep=May=Jul
Month in KM	3	128.5	<0.001	Nov>Sep, Nov>Jul>May
Month in MK	2	354.9	<0.001	Sep=Jul>May
Beach in Sep.	2	22.7	<0.001	MK>IN=KM
Beach in Nov.	1	0.4	0.521	
Beach in May	2	149.2	<0.001	IN>MK>KM
Beach in July	2	31.2	<0.001	MK>IN=KM
<i>L. japonicus</i> in May				
Beach	1	9.0	<0.01	MK>KM
<i>P. bicoloratus</i> in May				
Beach	2	56.8	<0.001	IN>MK>KM

For abbreviations, see Table 1.

HBT was conducted when the GLM and LR test results indicated significant effects.

稚魚は体長 50 mm 以下の小型魚であった。したがって、コノシロが7月の検見川の浜で多かった理由としては、餌のデトリタスが他の砂浜よりも多く存在したことや、波浪が穏やかであったことが考えられる。

トウゴロウイワシは9月のいなげの浜で多かった。9月にいなげの浜と他の砂浜との間で違いがみられた物理・生物的環境項目は、水温、濁度、浮遊性無脊椎動物の総個体数であった。ただし、水温と濁度については、砂浜間での差がわずかであったため (Fig. 2)、魚類の分布にはほとんど影響を与えないものとする。一方、浮遊性無脊椎動物の総個体数はいなげの浜で顕著に多かった。本種の稚魚は、カラヌス類やキクロプス類などを食べる浮遊性無脊椎動物食魚である (Table 3)。したがって、浮遊性無脊椎動物が多かった9月のいなげの浜は、トウゴロウイワシの稚魚にとって重要な餌場となっていた可能性があり、そのために個体数が多かったのかもしれない。

アユは5月において検見川の浜でのみ採集された。本種の稚魚は浮遊性無脊椎動物食であるが (Table 3)、5月における浮遊性無脊椎動物の総個体数はいなげの浜で多く、検見川の浜では少ない傾向を示した。したがって、本種が検見川の浜でのみ採集されたのは、餌量とは関係なく、別の理由によるものと考えられる。Table 3をみると、アユと同じ浮遊性無脊椎動物食であるボラ *Mugil cephalus cephalus* の稚魚は、5月の検見川の浜において多く採集されていることがわかる。ボラの稚魚は表層遊泳魚であるため、波浪環境の厳しい場所を避け、穏やかな場所を好むことが知られている (瀧ヶ崎・佐野, 2013; TATEMATSU *et al.*, 2014; 青木ほか, 2016)。本研究において、検見川の浜は他の2つの浜よりも波浪が穏やかであり、ボラの稚魚が検見川の浜で多かったのは、このためであると考えられる。アユの稚魚も表層遊泳魚であるため、ボラの稚魚と同様の理由で、検見川の浜に多く分布していたのかもしれない。

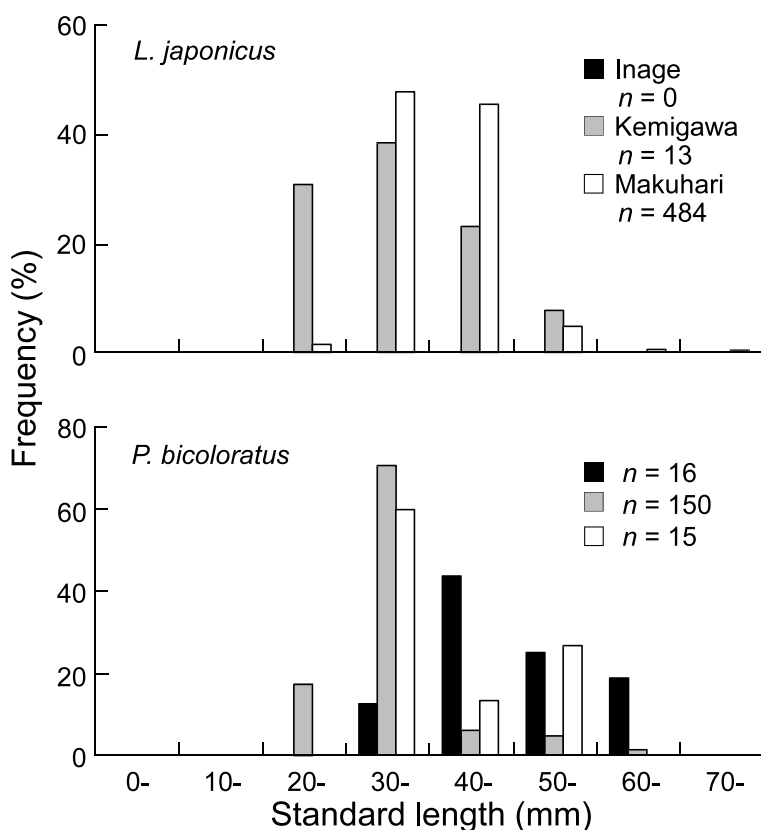


Fig. 7 Frequency distributions of standard lengths of the two most dominant fish species, *Lateolabrax japonicus* and *Platichtys bicoloratus*, collected on each artificial sandy beach in May 2018.

4.3.2 種数と総個体数

一曳網 (300 m²) あたりの魚類の種数は月間で有意な差がみられ、5月、7月に多く、9月、11月で少なかった。また、一曳網あたりの総個体数は、いなげの浜では9月が他の月よりもやや多い傾向にあったものの、検見川や幕張の浜では5月に多かった。したがって、本調査地における魚類の種数と総個体数は概ね春に多く、秋に少ないという傾向が認められた。このような季節変化は自然砂浜からも報告されている (SUDA *et al.*, 2002; SELLESLAGH and AMARA, 2007; INOUE *et al.*, 2008; 岩本ほか, 2009)。

次に、各月の砂浜間による違いをみると、種数

については有意な差はみられず、どの砂浜も同じような種数を示す傾向にあった。一方、総個体数では5月と7月にそれぞれ差が認められた。しかし、それらの差は月ごとに異なったパターンを示し、5月では幕張、検見川、いなげの浜の順に多く、7月では検見川の浜がいなげや幕張の浜よりも多かった。したがって、調査期間を通してみた場合、総個体数においても種数と同様に、砂浜間での違いは明瞭ではなかったといえる。

既往研究では、砂浜における魚類の種数と総個体数は波浪の穏やかな場所で多くなることが報告されている (e.g., ROMER, 1990; CLARK, 1997; INUI *et al.*, 2010; NAKANE *et al.*, 2013; TATEMATSU *et al.*, 2014)。本調査地においては調査期間を通して、

波浪は検見川の浜で他の砂浜よりも穏やかであった。また、強熱減量や埋在性無脊椎動物の総個体数も検見川の浜で高い値を示した。それにもかかわらず、魚類の種数と総個体数は砂浜間で明瞭に異なっていた。したがって、本調査地でみられた波浪などの環境の違いは、優占種の分布に影響を与えた可能性はあるものの(4.3.1項参照)、魚類の種数や総個体数にはあまり影響を及ぼさなかったと考えられる。以上のことから、本調査地における魚類の種数と総個体数は砂浜間よりも季節間で異なることが明らかとなった。

4.3.3 種組成

クラスター分析の結果、種組成は主に月によって分かれた。これは、優占種を含む多くの魚種が、特定の月でのみ採集されたためであると考えられる(Table 3)。また、このような魚種では、ほとんどの個体が稚魚であった。稚魚の出現する季節や月は、魚種によってそれぞれ異なることが知られており(加納・横尾, 2011)、本調査地においても同様な結果が得られた。これらの結果は、多くの魚種にとって、本調査地の砂浜は稚魚期の一時を過ごす場所となっていることを示唆する。

また、各月における砂浜間の類似パターンは月ごとに異なっており、調査期間を通した一定のパターンは認められなかった。したがって、種組成は砂浜間で明らかに異なるとはいえなかった。以上のことから、本調査地における魚類の種組成は、種数と総個体数と同様に、砂浜間よりも季節間で異なることが明らかとなった。

4.3.4 体長

採集された魚類全個体の体長は、すべての砂浜において月間で有意な差がみられ、いなげや検見川の浜においては11月が他の月よりも大きい傾向にあった。また、幕張の浜では9月と7月が5月よりも大きかった(11月は魚類が採集されなかった)。したがって、本調査地においては概ね5月から11月にかけて季節がすすむほど、体長の大きい魚類が採集されたといえる。このような傾向は、日本の自然砂浜においても報告されている

(NANAMI and ENDO, 2007; 須田ほか, 2014)。

全個体の体長について各月の砂浜間で比較したところ、11月を除いた各月で有意差がみられ、検見川の浜で小さい傾向が認められた。また、優占種のズキとイシガレイにおける5月の体長も検見川の浜で小さかった。検見川の浜はいなげや幕張の浜よりも波浪が穏やかであることから、4.3.1項で述べたアユやボラと同様に、遊泳力に乏しい小型の稚魚がそのような環境を好み、多く出現したと考えられる。

5. 結論

本研究により、千葉市美浜区の埋立地に造成された人工砂浜(いなげの浜、検見川の浜、幕張の浜)では、自然の砂浜と同様に、稚魚を中心とした魚類群集が形成されることが明らかとなった。特に、個体数の多かった魚種では、稚魚期における餌場や波浪からの避難場として、これらの砂浜を利用している可能性が示唆された。また、種数や総個体数、種組成、体長においては、自然の砂浜でみられるような季節変化が認められた。以上のことから、本調査地の人工砂浜は自然の砂浜に近い機能を持ち、稚魚にとっての重要な生息場の1つとなっていることが示唆された。砂浜を含む浅海の沿岸域は、港湾建設や埋め立てなどによる人工改変を受けやすい場所であり、特に東京湾の内湾では自然の砂浜や干潟はほとんど残っていない(荒山ほか, 2002; 青木ほか, 2016)。そのような中であって、本調査地のような砂浜は魚類の重要な生息場として、今後、適切に管理される必要があると思われる。

本研究では、3つの人工砂浜間における魚類群集構造の違いについても調べた。検見川の浜はいなげの浜や幕張の浜と異なり、内側に湾曲した突堤が砂浜の両端にあるため、保護的な環境となっていた。このため、波高、強熱減量、埋在性無脊椎動物の総個体数に砂浜間で違いが認められた。これらの物理・生物的環境の違いは魚類の種数、総個体数、種組成には影響を与えなかったが、体長においてはその影響が示唆され、検見川の浜では体長の小さな個体が出現する傾向にあった。こ

れは、遊泳力に乏しい小型の稚魚が、波浪の影響を避けるために、穏やかな検見川の浜に分布したためであると考えられる。また、本調査地において多く採集されたイシガレイ、コノシロ、アユの稚魚も、検見川の浜を餌場とともに、波浪からの避難場として利用していた可能性が示唆された。このように、突堤の形状は砂浜における物理・生物的環境に影響を与え、多少なりとも魚類群集の構造を変える可能性がある。このため、人工砂浜の造成の際に突堤を建設する場合は、その形状についても考慮する必要があると思われる。

謝 辞

本研究を実施するにあたり、人工砂浜での採集調査を許可していただいた船橋市漁業協同組合、市川市行徳漁業協同組合（現市川市漁業協同組合）、南行徳漁業協同組合（現市川市漁業協同組合）、千葉県農林水産部水産課、千葉県千葉港湾事務所、千葉市美浜公園緑地事務所、野外調査にご協力をいただいた東京大学大学院農学生命科学研究科生圏システム学専攻水域保全学研究室の片岡優理氏、柳原和彦氏、丸山智朗氏、小室拓央氏、土屋 渚氏、北見駿也氏、有益なご助言をいただいた同研究室の岡本 研准教授、川井田 俊博士（現島根大学エスチュアリー研究センター助教）、水産大学の須田有輔教授、匿名の査読者、英文校閲をしていただいたGraham HARDY博士に心より御礼申しあげる。

引用文献

尼岡邦夫 (2016): 日本産ヒラメ・カレイ類. 東海大学出版部, 平塚, 229 pp.

青木友寛・碓井星二・金井貴弘・青木 茂・岡本 研・佐野光彦 (2016): 房総半島内房の開放的な砂浜海岸と保護的な砂浜海岸における魚類群集構造の比較. 日本水産学会誌, **82**, 569-580.

荒山和則・今井 仁・加納光樹・河野 博 (2002): 東京湾外湾の碎波帯の魚類相. うみ, **40**, 59-70.

荒山和則・河野 博 (2015): 砂浜海岸: 波が砕ける場所における仔稚魚の生き残り戦略. 魚類の初期生活史研究 (望岡典隆ほか編), 恒星社厚生閣, 東京, p. 55-64.

BENAZZA, A., J. SELLESLAGH, E. BRETON, K. RABHI, V. CORNILLE, M. BACHA, E. LECUYER and R. AMARA (2015): Environmental control on fish and macrocrustacean spring community-structure, on an intertidal sandy beach. PLoS ONE, **10**, e0117220.

千葉県土木部港湾建設課 (1982): 千葉港臨港公園: 検見川の浜整備計画の概要. 港湾, **59**, 29-33.

CLARK, B. M. (1997): Variation in surf-zone fish community structure across a wave-exposure gradient. Estuar. Coast. Shelf Sci., **44**, 659-674.

土居秀幸・岡村 寛 (2011): 生物群集解析のための類似度とその応用: Rを使った類似度の算出, グラフ化, 検定. 日本生態学会誌, **61**, 3-20.

土質試験法編集委員会編 (1990): 土質試験の方法と解説. 土質工学会, 東京, 615 pp.

風呂田利夫 (1997a): 海岸環境の修復. 東京湾の生物誌 (沼田 眞・風呂田利夫編), 築地書館, 東京, p. 202-218.

風呂田利夫 (1997b): 東京湾の生態系と環境の現状. 東京湾の生物誌 (沼田 眞・風呂田利夫編), 築地書館, 東京, p. 2-23.

広田祐一 (1998): 餌料としてのかいあし類・アミ類の生態. 砂浜海岸における仔稚魚の生物学 (千田哲資・木下 泉編), 恒星社厚生閣, 東京, p. 78-88.

堀越増興・菊池泰二 (1976): ベントス. 海藻・ベントス (元田 茂編), 東海大学出版部, 平塚, p. 149-437.

井上 隆 (2017): 砂浜海岸の魚類. 砂浜海岸の自然と保全 (須田有輔編), 生物研究社, 東京, p. 107-122.

INOUE, T., Y. SUDA and M. SANO (2005): Food habits of fishes in the surf zone of a sandy beach at Sanrimatsubara, Fukuoka Prefecture, Japan. Ichthyol. Res., **52**, 9-14.

INOUE, T., Y. SUDA and M. SANO (2008): Surf zone fishes in an exposed sandy beach at Sanrimatsubara, Japan: does fish assemblage structure differ among microhabitats? Estuar. Coast. Shelf Sci., **77**, 1-11.

INUI, R., T. NISHIDA, N. ONIKURA, K. EGUCHI, M. KAWAGISHI, M. NAKATANI and S. OIKAWA. (2010): Physical factors influencing immature-fish communities in the surf zones of sandy beaches in northwestern Kyushu Island, Japan. Estuar. Coast. Shelf Sci., **86**, 467-476.

石井光廣・大畑 聡 (2010): 東京湾の水質と貧酸素水塊の変動. 沿岸海洋研究, **48**, 37-44.

- 岩本有司・三代和樹・森田拓真・上村泰洋・水野健一郎・海野徹也・小路 淳 (2009): 広島湾奥部の砂浜海岸に出現する仔稚魚. 水産増殖, **57**, 639-643.
- 環境庁水質保全局水質管理課編 (1988): 底質調査方法とその解説, 改訂版. 日本環境測定分析協会, 東京, 175 pp.
- KANO, K., M. SANO and H. KOHNO (2004): Food habits of fishes on unvegetated tidal mudflats in Tokyo Bay, central Japan. Fish. Sci., **70**, 978-987.
- 加納光樹・横尾俊博編 (2011): 東京湾の魚類. 平凡社, 東京, 374 pp.
- 小林昭男・宇多高明・野志保仁・遠藤将利・大草佑介 (2013): 幕張人工海浜における養浜礫の移動堆積状況の実測. 土木学会論文集 B3 (海洋開発), **69**, I_826-I_831.
- 小林四郎 (1995): 生物群集の多変量解析. 蒼樹書房, 東京, 194 pp.
- 河野 博・川辺みどり・石丸 隆 (2012): 東京湾をまるごと見る: 環境と開発の歴史. 江戸前の環境学 (川辺みどり・河野 博編), 東京大学出版会, 東京, p. 11-22.
- 熊田貴之・小林昭男 (2000): 検見川浜を対象にした人工海浜の侵食過程に関する研究. 海洋開発論文集, **16**, 315-320.
- LASIAK, T. A. (1986): Juveniles, food and the surf zone habitat: implications for teleost nursery areas. S. Afr. J. Zool., **21**, 51-56.
- 益田 一・尼岡邦夫・荒賀忠一・上野輝彌・吉野哲夫編 (1988): 日本産魚類大図鑑, 第二版. 東海大学出版部, 平塚, 466 pp.
- MATSUURA, K. (2017): Taxonomic and nomenclatural comments on two puffers of the genus *Takifugu* with description of a new species, *Takifugu flavipterus*, from Japan (Actinopterygii, Tetraodontiformes, Tetraodontidae). Bull. Natl. Mus. Nat. Sci., Ser. A, **43**, 71-80.
- McLACHLAN, A. and O. DEFEO (2018): The Ecology of Sandy Shores, 3rd edition. Academic Press, London, 560 pp.
- McLACHLAN, A., O. DEFEO and A. D. SHORT (2018): Characterising sandy beaches into major types and states: implications for ecologists and managers. Estuar. Coast. Shelf Sci., **215**, 152-160.
- MIKAMI, S., Y. NAKANE and M. SANO (2012): Influence of offshore breakwaters on fish assemblage structure in the surf zone of a sandy beach in Tokyo Bay, central Japan. Fish. Sci., **78**, 113-121.
- 中坊徹次編 (2013): 日本産魚類検索, 第三版. 東海大学出版部, 平塚, 2428 pp.
- 中村守純 (1969): 日本のコイ科魚類. 資源科学研究所, 東京, 455 pp.
- NAKANE, Y., Y. SUDA and M. SANO (2011): Food habits of fishes on an exposed sandy beach at Fukiagehama, South-West Kyushu Island, Japan. Helgol. Mar. Res., **65**, 123-131.
- NAKANE, Y., Y. SUDA and M. SANO (2013): Responses of fish assemblage structures to sandy beach types in Kyushu Island, southern Japan. Mar. Biol., **160**, 1563-1581.
- NANAMI, A. and T. ENDO (2007): Seasonal dynamics of fish assemblage structures in a surf zone on an exposed sandy beach in Japan. Ichthyol. Res., **54**: 277-286.
- 日本海洋学会編 (1986): 沿岸環境調査マニュアル: 底質・生物篇. 恒星社厚生閣, 東京, 266 pp.
- 落合 明・田中 克 (1986): 魚類学 (下). 恒星社厚生閣, 東京, 1140 pp.
- 小倉久子・宮嶋義行・北澤哲弥 (2010): 千葉県のリ海における生態系サービスの変遷. 千葉県生物多様性センター研究報告, **2**, 141-156.
- 沖山宗雄編 (2014): 日本産稚魚図鑑, 第二版. 東海大学出版部, 平塚, 1639 pp.
- OLDS, A. D., E. VARGAS-FONSECA, R. M. CONNOLLY, B. L. GILBY, C. M. HUIJBERS, G. A. HYNDES, C. A. LAYMAN, A. K. WHITFIELD and T. A. SCHLACHER (2018): The ecology of fish in the surf zones of ocean beaches: a global review. Fish Fish., **19**, 78-89.
- ROMER, G. S. (1990): Surf zone fish community and species response to a wave energy gradient. J. Fish Biol., **36**, 279-287.
- 佐野光彦 (2017): 沿岸生態系とその保全. 生物多様性概論 (宮下 直ほか著), 朝倉書店, 東京, p. 102-132.
- SELLESLAGH, J. and R. AMARA (2007): Temporal variations in abundance and species composition of fish and epibenthic crustaceans of an intertidal zone: environmental factor influence. Cybium, **31**, 165-172.
- 須田有輔 (2002): 砂浜の生態と保全. 水産環境の科学 (早川康博・安田秀一編), 成山堂書店, 東京, p. 108-129.

- 須田有輔 (2017): 砂浜生態学の概論. 砂浜海岸の自然と保全 (須田有輔編), 生物研究社, 東京, p. 1-22.
- SUDA, Y., T. INOUE and H. UCHIDA (2002): Fish communities in the surf zone of a protected sandy beach at Doigahama, Yamaguchi Prefecture, Japan. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, **55**, 81-96.
- 須田有輔・中根幸則・大富潤 (2014): 開放的な砂浜海岸である鹿児島県吹上浜のサーフゾーンにおける主要魚種の出現と体長組成. *沿岸域学会誌*, **27**, 27-36.
- 須田有輔・南條楠土 (2017): 鹿児島県吹上浜で観察された砂浜生物のハビタットとしてのリッジーラネル地形. *水産大学校研究報告*, **65**, 131-139.
- 菅原兼男 (1977): 稲毛人工海浜 (いなげの浜) の造成について. *水産土木*, **13**, 29-35.
- 高荷久昌 (2002): 東京湾の港湾における環境施設の形成過程と地域特性. *季刊地理学*, **54**, 73-91.
- 瀧ヶ崎一弥・佐野光彦 (2013): 浜名湖の埋立地に建設された人工水路の魚類群集構造: 隣接した開放的な沿岸海域との比較. *うみ*, **51**, 73-84.
- 田中道治 (1980): 人工海浜造成「幕張の浜」. *土木施工*, **21**, 22-27.
- TATEMATSU, S., S. USUI, T. KANAI, Y. TANAKA, W. HYAKUNARI, S. KANEKO, K. KANOU and M. SANO (2014): Influence of artificial headlands on fish assemblage structure in the surf zone of a sandy beach, Kashimanada Coast, Ibaraki Prefecture, central Japan. *Fish. Sci.*, **80**, 555-568.
- 時岡隆・原田英司・西村三郎 (1972): 海の生態学. 築地書館, 東京, 317 pp.
- 東京湾海洋環境研究委員会編 (2011): 東京湾. 恒星社厚生閣, 東京, 389 pp.

受付: 2019年1月18日

受理: 2019年2月5日

