

空港島建設に伴う底生魚類群集への影響評価の試み：
 IBI 手法による環境監視データの解析

小出水規行* ・吉田 司** ・有山啓之***
 矢持 進**** ・玉井恭一***** ・中村義治*****
 入江隆彦***** ・阪上雄康***** ・小谷野喜二*****

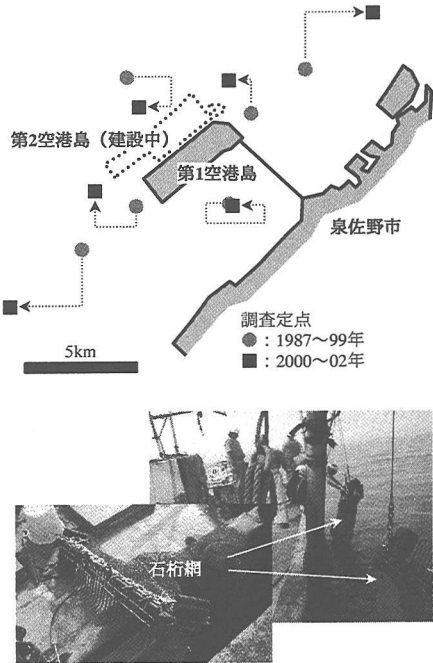
関西国際空港島の建設による底生魚類群集への影響を調べるために、空港島周辺海域における 1987～2002 年の魚類調査データ（計 77 魚種 5,721 個体）を解析した。解析では全種数・個体数、多様度指数 H' と類似度指数 C_H をはじめ生物保全指数 IBI の各評価指標を利用した。全種数・個体数の経年変動は I 期工事の埋立～施設・運用期（1989～97 年）に減少、その後は増加する傾向にあった。 H' と C_H の変動は期間を通じて H' が漸増、 C_H が減少傾向にあり、空港島周辺の群集は質的に異なるものへと遷移している過程が推察された。魚類群集構造に関しての評価 7 項目による IBI は全種数・個体数の変動と類似し、空港島の建設過程に関連性が認められた。

1. はじめに

関西国際空港が開港して以来、現在までに約 8 年が経過した。当空港では建設工事による周辺海域への影響を監視するために、工事着工前から環境や生物に関するモニタリング調査が実施されている。現在、蓄積されたデータは膨大な量となり、GIS 等を利用したデータ整理が行われているが（関西国際空港株式会社・日本水産資源保護協会、2002）、その解析については十分ではない。

本論文では関西国際空港における生物モニタリングのうち、底生魚類を対象とするデータ解析を実施した。解析では一般に、生物資源や生態系への定量的影響評価が課題となる。しかし、通常のモニタリング調査においては調査定点数が少ない他、データは種名・個体数等の記録が中心となる。定量的予測手法として知られる HEP や IFIM 等（水産工学研究所、2000）の使用ができず、簡便な手法に頼らざるを得ない。

本論文においては影響評価の試みとして、評価指標に種数・個体数、生物群集指標 H' と C_H をはじめとし、生物保全指数 IBI を取上げた。これらの指標は種・個体数データから計算され、特に IBI は河川魚類への環境改変の影響や生息場評価に利用されている。本論文では IBI の考え方を拡張し、IBI の沿岸海域での適用を試みた。



図一1 空港島周辺における魚類調査定点と石桁網による魚類採捕風景

2. 材料と方法

(1) 解析データ

a) 魚類調査

解析データとして、関西国際空港が実施した 1987～2002 年（16 年間）の魚類調査データを用いた。調査は空港島から半径 10 km 以内、水深 15～20 m の 6 定点において（図一1）、毎年 2、5、8、11 月に行われた。各定点は 2000 年以降、第 2 空港島の建設にあたり、それまでの場所から数 km 移動した。

各時期及び各定点の調査内容は同一である。調査では漁船 1 隻を使用して、1 定点あたり 15 分間、石桁網 2 丁（そのうち 1 丁の後方には幼稚魚採捕用のカバーネット

* 正会員 博(農) (独法)農業工学研究所主任研究官農村環境部
 ** (社)日本水産資源保護協会技術専門員
 *** 博(農) 大阪府立水産試験場主任研究員
 **** 正会員 農 博 大阪市立大学助教授工学部環境都市工学科
 ***** 理 博 (独法)水産総合研究センター西海区水産研究所石垣支所長
 ***** 水 博 (独法)水産総合研究センター水産工学研究所水産土木工学部長
 ***** 農 博 (独法)水産総合研究センター中央水産研究所生物生態部長
 ***** 関西国際空港(株)建設事務所 調査係長
 ***** 関西国際空港用地造成(株)事業推進部 企画課長

表-1 出現魚種の生態的特性の一覧

利用 ¹⁾	生息 ²⁾	種名	利用	生息	種名	利用	生息	種名	利用	生息	種名
定住	潜砂	コモンサカタザメ	定住	底底	ヒメジ	産卵	遊泳	シロギス	成育	遊泳	マサバ
		ガンゾウビラメ			ギンボ			シログチ			イボダイ
		タマガンゾウビラメ			ネズミゴチ			コモンフグ			アミメハギ
		イシガレイ			ハタタテヌメリ			ナシフグ			カワハギ
		マガレイ			マハゼ			ショウサイフグ			ウマヅラハギ
		マコガレイ			スジハゼ			シマフグ		迷込	キアンコウ
		メイトガレイ			アカハゼ	潜砂	産卵	マアナゴ			イイジマダルマガレイ
		ゲンコ			コモチジャコ			ハモ			ナガダルマガレイ
		アカシタビラメ			イトヒキハゼ			アカタチ			オオシタビラメ
		イヌノシタ			アカウオ			ヒラメ			コウライアカシタビラメ
		クサフグ		遊泳	アカウオ	成育	底底	ホウボウ			ハチ
		イザリウオ			コノシロ			オニカナガシラ			ハナメゴチ
		ヨウジウオ			カタクチイワシ			シマイサキ			メゴチ
		カサゴ			メバル			マアジ			トカゲゴチ
		ヒメオコゼ			テンジクダイ			イサキ			セトヌメリ
		ハオコゼ			ヒイラギ			マダイ			ヒゲハゼ
		オニオコゼ			キチヌ			メナダ		一時	ニベ
		イネゴチ			アカエイ			ヤマトカマス			
		クジメ			トカゲエソ			アイゴ			
		アイナメ			マエソ			タチウオ			

1) 林 (1987) の大阪湾利用形態型に準拠した。2) 岡村・尼岡 (1997) 等の生息型に準拠した。

を装着) を曳網した (図-1)。採捕魚類については種名及び個体数がデータとして記録された。

b) データ整理

調査期間を通じて計 77 魚種 5,721 個体が出現した。出現種のほとんどは林 (1987) の大阪湾生息魚類 (全 359 種) に記載され、1997 年の水温上昇に関連する南方系魚種は採捕されなかった。本論文では IBI の解析において各種の生態特性を整理する必要があるため、林 (1987) の大阪湾利用形態型 (定住・産卵・成育・迷込・一時回避の 5 型) 及び岡村・尼岡 (1997) 等の生息型 (潜砂・着底・遊泳の 3 型) にそれぞれの種を分類した (表-1)。

データは全定点を 1 海域として合計し、4 時期を年単位に集計した。これは種の定点間や時期的変動を解析するにはデータ数が足りないこと、底質等の環境調査結果において (関西国際空港株式会社・日本水産資源保護協会, 2002)、定点間に大きな差が認められなかったことに関連する。また、調査期間中の各年は空港島の建設過程に関連させて、I 期工事 (第 1 空港島建設) の護岸期が 1987~88 年 (2 年間)、埋立期が 1989~91 年 (3 年間)、施設 (建設) 期が 1992~94 年 (3 年間)、運用期が 1995~99 年 (5 年間)、II 期工事 (第 2 空港島建設) の護岸・埋立期が 2000~02 年 (3 年間) に対応する。

(2) 魚類群集の多様度 H' と類似度 C_n の計算

生物群集の解析では多様度 H' と類似度 C_n が定量的指数として汎用される (木元, 1976)。本論文においては IBI との比較のためにも年別の H' と C_n を計算した。

t 年の H'_t は (1) 式で求めた。ここで、 p_i は魚種 i が全種個体数に占める割合である。 H'_t は $p_1 = \dots = p_s$ の時に最大となり、全種数 S とともに増加する。 H'_t の最小値

は 0 である (木元, 1976)。

$$H'_t = - \sum_{i=1}^S p_i \ln p_i \dots\dots\dots (1)$$

t 年の $C_{n,t}$ は調査開始 (1987) 年と比較する形で (2) 式により計算した。ここで、 n_i は魚種 i の個体数、 $N_{1987(t)}$ は 1987 (t) 年の全種個体数である。 $C_{n,t}$ は 0 以上 1 未満の値をとり、 $t=1987$ 年 (両群集が同一) の場合は $C_{n,t}=1$ となる (木元, 1976)。

$$C_{n,t} = \frac{2 \sum_{i=1}^S n_{1987,i} \cdot n_{t,i}}{\left(\sum_{i=1}^S n_{1987,i}^2 + \sum_{i=1}^S n_{t,i}^2 \right) N_{1987} \cdot N_t} \dots\dots\dots (2)$$

$$\sum_{i=1}^S n_{1987,i}^2 = \frac{\sum_{i=1}^S n_{1987,i}^2}{N_{1987}^2} \quad \sum_{i=1}^S n_{t,i}^2 = \frac{\sum_{i=1}^S n_{t,i}^2}{N_{1987}^2}$$

(3) IBI の算出方法

a) IBI の概要

IBI (Index of Biotic Integrity : 生物保全指数) は人間活動 (例えば、埋立、干拓、河川改修等の環境改変) が魚類群集に与える影響評価指数として定義され、アメリカやヨーロッパの河川において広く利用されている (Karr, 1981 ; Steedman, 1988)。現在では、世界各国で研究事例が蓄積され、日本では小出水・松宮 (1997) により関東地方の河川が評価されている。

IBI の計算は対象魚類の地域性、生態特性を把握して、事前に群集の種多様性、環境指標種の有無、個体生産性等に関連する 10 個程度の評価項目を設定する。解析データから各評価項目の値を求め、その値を 5・3・1 のいずれかの得点に換算する。得点は基本的に種数や個体数等の多い場合が 5、平均・標準の場合が 3、少ない場合が 1

表-2 IBI の評価項目とその得点基準

概念	項目	得点基準 ¹⁾		
		5	3	1
種多様性	①遊泳種	≥9	8~4	≤3
	②着底種	≥13	12~9	≤8
	③潜砂種	≥9	8~5	≤4
環境変動性	④定住種	≥18	17~13	≤12
	⑤迷込種	≥3	2~0	—
再生産性	⑥成魚・稚魚採捕	≥27	26~21	≤20
生産性	⑦採捕全数	個体数 ≥423	422~3	≤292

1) ブートストラップ法(データシミュレーション)により各項目(種数及び個体数)のデータ分布を推定し、値の大きい方から累積相対度数100~75, 75-25, 25~0%の階級をそれぞれ5, 3, 1に設定した。

となり、それぞれ人間活動による影響の度合い(少ない方が5)を定量化している。得点基準の作成方法は様々であり、既報や学識経験者の意見による経験的方法(Karr, 1981)、データ解析を通じての統計的方法(Steedman, 1988; 小出水・松宮, 1997)が検討されている。

IBIは各評価項目の得点を合計したものに等しい。IBIの値が高いほど、群集は人間活動による影響が少ないことをあらわす。このことからIBIは H' や C_n とは異なり、群集の生物学的・生態的特徴を考慮した総合評価指数となる。魚類群集を通じての生態環境における健全性のものさしとも換言されている(Karr, 1981)。

b) 評価項目の設定

沿岸海域におけるIBIはKoizumiら(2000)による予備的解析がある。本論文においてはその事例及び河川のIBIを参考にし、表-1にまとめた魚類の生態特性を活用して7つの評価項目を設定した(表-2)。

項目①~③は生息空間の種多様性を評価する(表-2)。項目①は遊泳種数により底上、②は着底種数により底面、③は潜砂種数により底下(中)の利用状況を評価する。項目④及び⑤は環境変化の指標として採用した。項目④は定住種数で環境の安定性、⑤は迷込種数で海流や水温をはじめ環境に変化が生じたことを意味する。項目⑥は再生産(産卵・成育)環境の機能評価として、成魚と稚魚の両者が採捕された魚種数を設定した(表-2)。項目⑦は個体生産性の評価であり、全魚種個体数を適用した。

c) 得点基準の作成

対象魚類(表-1)の人為的環境変化による反応はほとんど知られていない。各評価項目の値に対する得点基準については、経験的方法を利用できないため、解析対象年及び空港島周辺海域に限定した相対評価として、暫定的な基準を統計的に作成した。

各評価項目の基準作成にはブートストラップ法を利用した。本方法は対象データ分布の正規性を仮定することなく、コンピュータから仮想データを発生させ、そのデータから分布の平均や信頼区間等を推定する(石村, 1993)。

データ数の少ない場合や一般に区間推定できない統計量(例えば相関係数)に対して利用されている。

基準作成の手順は評価項目の各年の値(1987~2002年の計16個)の中から1つを無作為(ランダム)に抽出し、そのデータ数が10,000個になるまで同様の作業を繰り返した。10,000個のデータを大きい順に並び替え、上位2,500番より大きい値(全体の25%)を得点5、2,500~7,500番の値を得点3(50%)、7,500番より小さい値を得点1(25%)に対応させた。本手順により設定した各評価項目の得点基準を表-2に示す。

3. 結果と考察

(1) 種数と個体数の変動

図-2は各年の(a)全魚種数における大阪湾利用形態型の種構成及び(b)定住種における生息型別種数を示す。全魚種数は年間15~28種の範囲にあり、3項移動平均によるトレンド(図中の実線)を見ると、種数の変動は小さいが、I期工事の施設~運用期半ばに減少し、その後は増加する傾向にある[図-2(a)]。また、各年の利用形態型による種構成は平均75%が定住種となり、空港島周辺海域の群集は定住種が優占する生息場と考えられた。

定住種における生息型別種数は期間を通じて着底、潜砂、遊泳種の順に多かった[図-2(b)]。それぞれの変動は運用期半ばまで互いに異なっているが、それ以降は全体的に増加する傾向にある。

図-3は個体数の経年変動を種数(図-2)と同様に示したものである。各年の全個体数は168~661個体の範囲にあり、経年変動のトレンドは種数よりも明確である[図-3(a)]。全個体数はI期工事の埋立~運用期半ばまで減少し、その後は元のレベルまで回復する傾向にある。さらに、利用形態型による個体数構成はほとんどの個体を定住種が占めた。

定住種の生息型別個体数は着底と潜砂種が同レベル、遊泳種が少なかった[図-3(b)]。それぞれの変動は互いに異なり、潜砂種は増減を繰り返しながら緩やかに増加した。着底と遊泳種は変動幅に差があるが、全魚種個体数と類似のトレンドを示した。

図-4は定住の(a)着底種と(b)潜砂種において個体数の多かった代表(優占)種の経年変動を示す。着底種のアカハゼはI期工事の護岸期から減少し、ハタタテメリは全期間を通じて増加した[図-4(a)]。潜砂種のアカシタビラメとマコガレイはI期工事の埋立~運用期にかけて減少、イヌノシタは運用期から出現し、増加傾向にある[図-4(b)]。このように、種数や個体数の変動には様々なパターンが認められる。各変動を整理し、統括した見解を得るために、次節からは群集を観点とする解

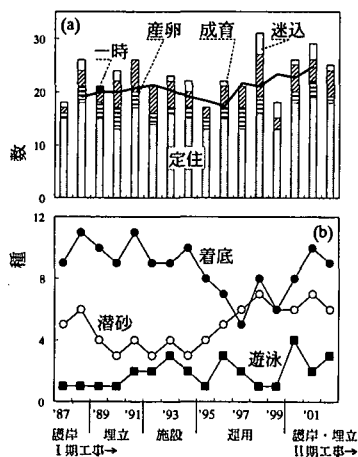


図-2 各年の全魚種数における大阪湾利用形態の構成 (a) 及び定住種における生息型別種数 (b)

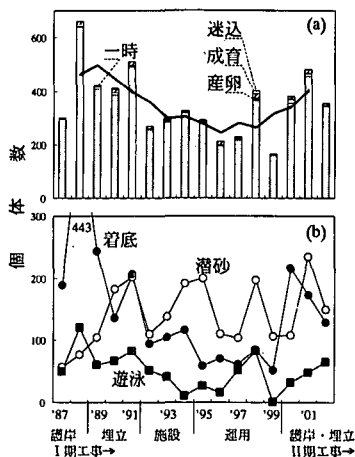


図-3 各年の全個体数における大阪湾利用形態の構成 (a) 及び定住種における生息型別個体数 (b)

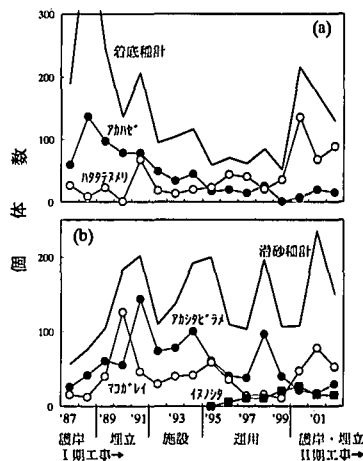


図-4 各年の定住種における代表的な着底種 (a) 及び潜砂種 (b) の個体数

析を行った。

(2) H' と C_n の変動

図-5は多様度指数 H' と類似度指数 C_n の経年変動を示す。 H' の範囲は2.0~2.5となり、その経年変動については漸増傾向にある。一方、 C_n の範囲は1.0~0.4となり、その経年変動は H' と反対に減少傾向にある。

H' の増加は図-4における優占種の減少 (アカシタビラメ等) や増加 (ハタテヌメリ等) に関連し、結果として、各魚種個体数の割合が等しくなる (多様性が増す) 方向に向かったと考えられる。 C_n の減少は種組成が1987年から徐々に変化し、イヌノシタ [図-4(b)]をはじめ個体数は少ないが、期間途中に10数種が新たに加わったことに関連する。 H' と C_n の変動は全魚種数や個体数 (図-2, 3) と類似していないこともあり、空港島の建設過程との明確な関連性は認められない。しかし、空港島周辺の群集が以前とは質的に異なるものへと、遷移している過程が推察された。

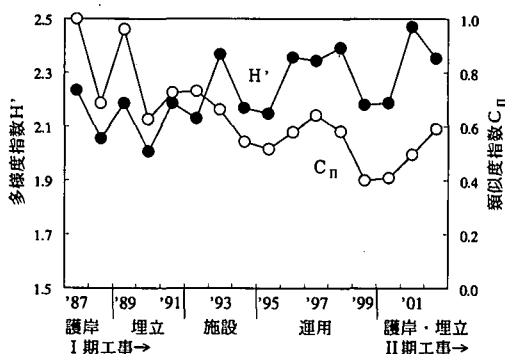


図-5 各年の多様度指数 H' と類似度指数 C_n

(3) IBI の変動

表-2に基づき計算した各年の IBI (35 点満点) について、評価項目ごとの値とその得点を表-3に取りまとめた。表-3の中から、IBI についての経年変動とそのトレンドを図-6に示す。

各年の IBI は17~31 点の範囲にあり、その経年変動は I 期工事の埋立~運用期半ばに減少し、それ以降は増加する傾向にあった (図-6)。IBI の埋立~運用期における減少は既存の底質環境データ (関西国際空港株式会社・日本水産資源保護協会, 2002) からは関連性を見出せなかったが、埋立による底質や地形等の変化により、生息場を制約するような影響が群集に及んだものと推察される。また、IBI の運用期~II期工事における増加は I 期工事が終了し、環境が安定したことによる生息場機能の再生過程を示唆するものと考えられる (図-6)。

IBI の経年変動は図-2, 3 の全種数及び個体数の経年変動と類似し、それぞれの相関も高く有意であった (全種数 $r=0.886$, 全個体数 $r=0.774$, $P<0.01$)。これは設定した評価項目はそれぞれ独立であるが、各項目の得点を合計したとき、項目①~③の合計点は全魚種数の評価に相当する。さらに、対象魚類の多くが定住種のため、項目④の得点も全魚種数に近い評価となっている。したがって、本論文の IBI は種数と個体数の変動を総合評価したに過ぎない。今後 IBI を改良する面で本評価項目を再検討し、いくつかを削除するとともに、各々変動している魚種個体数を精査し、環境指標や栄養段階等に関連する新たな評価項目の設置も必要である。

本論文の解析は空港島周辺海域に限られているが、IBI の結果からは空港島の建設過程に関連するトレンドを把握することができた。しかしながら、その傾向が空港島

表-3 年別の IBI における各評価項目の得点とその値 (カッコ内)

工事過程		Ⅰ期工事												Ⅱ期工事			
		護岸期		埋立期			施設期			運用期				護岸・埋立期			
年		'87	'88	'89	'90	'91	'92	'93	'94	'95	'96	'97	'98	'99	'00	'01	'02
評価項目	①遊泳	1(1)	3(4)	3(5)	3(7)	5(9)	3(7)	3(7)	3(6)	3(4)	3(7)	3(8)	3(8)	1(2)	3(8)	3(7)	3(6)
	②着底	3(10)	5(14)	3(10)	5(13)	3(12)	3(11)	3(10)	3(12)	1(8)	3(9)	1(5)	3(10)	3(9)	3(9)	3(12)	3(10)
	③潜砂	3(7)	3(8)	3(6)	1(4)	3(5)	1(3)	3(6)	1(4)	3(5)	3(6)	3(8)	5(13)	3(7)	5(9)	5(10)	5(9)
	④定住	3(15)	5(18)	3(15)	3(13)	3(17)	3(14)	3(16)	3(15)	3(13)	3(15)	3(13)	3(16)	3(13)	5(18)	5(19)	5(18)
	⑤逃込	3(1)	3(2)	3(0)	3(2)	3(0)	3(0)	3(1)	3(2)	3(0)	3(1)	3(0)	5(4)	5(3)	3(1)	5(3)	3(1)
	⑥再生産	1(18)	3(26)	3(21)	3(24)	3(26)	3(21)	3(23)	3(22)	1(17)	3(22)	3(21)	5(31)	1(18)	3(26)	5(29)	3(25)
	⑦個体数	3(300)	5(661)	3(422)	3(411)	5(510)	1(269)	3(298)	3(327)	3(293)	1(213)	1(229)	3(402)	1(168)	3(380)	5(483)	3(355)
IBI		17	27	21	21	25	17	21	19	17	19	17	27	17	25	31	25

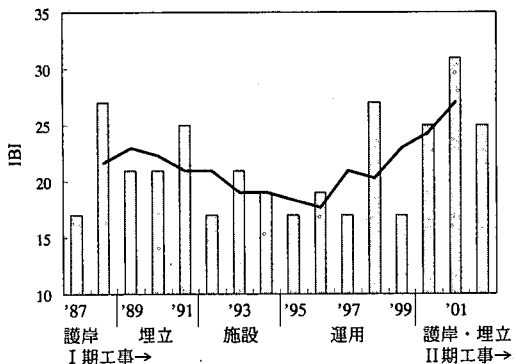


図-6 各年の IBI (実線は 3 項移動平均によるトレンド)

種数及び個体数は I 期工事の埋立～施設・運用期 (1989～97 年) まで減少, その後は増加する傾向にあった。

② H' と C_n の経年変動は H' において漸増, C_n において減少傾向にあった。空港島の建設過程との関連性は見出せなかったが, 空港島周辺の群集には種の交替が生じ, 質的に異なるものへと遷移している過程が推察された。

③ IBI については 7 つの評価項目を設定した。IBI の経年変動は全種数・個体数のものと類似し, I 期工事の埋立～運用期まで減少, その後は増加する傾向にあった。空港島の建設過程との関連性が認められるが, 評価項目の再検討や大阪湾における変動の位置付け等の課題が残された。

参 考 文 献

- 石村貞夫 (1993): すぐわかる統計解析, 東京図書(株), 204 p.
- 岡村 収・尼岡邦夫編・監修 (1997): 日本の海水魚, 山と溪谷社, 783 p.
- 関西国際空港株式会社・日本水産資源保護協会 (2002): 平成 13 年度海域データ整理・解析業務報告書, 212 p.
- 木元新作 (1976): 動物群集研究法 I, 共立出版(株), 192 p.
- 小出水規行・松宮義晴 (1997): Index of Biotic Integrity による河川魚類の生息環境評価, 水産海洋研究会報, 61 巻, pp. 144-156.
- 水産工学研究所 (2000): 生態系における構造と機能の評価方法に関するレビュー, 水産工学研究集録, 8 号, 205 p.
- 林 凱夫 (1987): 大阪湾の利用形態からみた魚類相, 自然史研究, 2 巻, pp. 57-63.
- Karr, J. R. (1981): Assessment of biotic integrity using fish communities, Fisheries, Vol. 6 No. 6, pp. 21-27.
- Koizumi, N., Y. Matsumiya, T. Tatsukawa, A. Moriyama and T. Yoneda (2000): Development and assessment of index of biotic integrity for the coastal region of Japan, Proc. 12 th APD-IAHER, pp. 623-629.
- Steedman, R. J. (1988): Modification and assessment of an index of biotic integrity to quantify stream quality in southern Ontario, Can. J. Fish. Aquat. Sci., Vol. 45, pp. 492-501.

建設によるものと確定することはできない。それを確かなものにするには, さらに広域な魚類群集との比較が必要である。現在, 大阪湾においては漁獲統計データが存在するが, そのデータは漁業対象種のものに限られている。したがって, 対象種は少なくなるが, 統計データと共通する種について比較検討することも今後の課題である。

現在, 空港島では II 期工事の埋立が進行している。生物に与える影響は一般に時間遅れで現れる。今後も本モニタリング調査を継続させてデータを蓄積, 解析するとともに, 空港島建設を事例として, 人為的な環境開発に伴う生物への影響評価のあり方を模索して行く必要がある。

4. おわりに

本論文では関西国際空港島の建設による底生魚類群集への影響をみるために, 種数・個体数, 多様度指数 H' と類似度指数 C_n , 生物保全指数 IBI の各評価指標に関する解析を行った。主な結論は以下になる。

- ① 空港島周辺海域における 1987～2002 年の魚類調査結果では計 77 魚種 5,721 個体が確認され, 各年の全