

1 Techniques for estimation of tidal elevation and confinement (~salinity)
2 histories of sheltered harbours and estuaries using benthic foraminifera:
3 examples from New Zealand. Hayward, B. W., Scott, G. H., Grenfell, H. R.,
4 Carter, R. and Lipps, J. H. 2004. *The Holocene* 14, 2, 218–232.
5 底生有孔虫を使用した、庇護された湾とエスチュアリーの高さと閉塞(塩
6 分)の歴史を評価するための技術(ニュージーランドを例に)

7

8 要旨

9 ニュージーランドの湾と低塩分エスチュアリーからの現生の底生有孔虫のセ
10 ンサスデータを使った潮位の高さと閉塞(塩分示標)を評価する技術を記し、後
11 期完新世シーケンスの堆積環境の復元に有用であることを評価する。我々は、
12 完新世の環境(庇護された潮間帯の湾や入江、あるいは低塩分エスチュアリー)
13 に最も応用できる現世のデータセットを活用することで、完新世の化石動物相
14 の潮間帯や潮下帯における高さを推定するための、簡易的現世アナログ手法を
15 記す。正準対応分析は、ニュージーランドの5つのエスチュアリーを横断する
16 有孔虫のセンサスデータから、閉塞勾配の合成を抽出するために使用した。こ
17 の勾配は、有孔虫組成に基づいて、ニュージーランドの現世と完新世のエスチ
18 ュアリーや湾のサンプルに適用可能な、ニュージーランド閉塞指標を発展させ
19 るのに使った。完新世の高度と閉塞(古塩分)の歴史を評価する方法の有用性は、
20 エスチュアリーの潮流口と中央部の評価にある。2つの地震性の垂直変位は、
21 Hawkesw 湾の Ahuriri 入江のコア 1.1m で認識された。(1)下部潮間帯から潮
22 下帯への 1-2m の沈降(c. 500 BP)、(2)潮下帯から上部潮間帯への 1.5-2.5m の
23 隆起(1931年の Napier 地震)、その後、閉塞が徐々に進行してより小さい入江
24 になった。実質的な閉塞(恐らく塩分減少)は、オークランドの Rangitopuni エ

25 スチュアリー0.8m のコアで認識され，二枚貝のザルガイの多産層の広域的消
26 滅が付随している．花粉学は，このイベントはかなりの数の人間の移住(c. 600-
27 800 BP)による，流域の森林開拓に関連していることを示す．石灰質殻の化石化
28 過程での溶解は，我々の研究したエスチュアリーのコアの高度推定の精度を低
29 下させる重大な要因だが，溶解は淡水の流入の増加によるようである．膠着質
30 有孔虫の化石化過程における分解と消失は，これらの短いコアでは重要ではな
31 いようだ．

32

33 序

34 後期完新世の沿岸海成環境における，自然の環境変化と人間によって誘発さ
35 れた環境変化を決定する有力な方法は，年代の新しい堆積シーケンスにおける
36 生物変化の化石記録の分析を通して行われる．大型化石の記録は，通常断片的
37 で，1 つの堆積シーケンスやコアからそれらの全体像を把握するのは容易では
38 ないが，微化石は通常はより豊富で，それらの歴史は小さいコアサンプルから
39 容易に決定できる．有孔虫は特に良い記録と分類学的組成を持ち，多くのタク
40 サが汎世界的に分布し，気候に影響された分布をしているために，これらの環
41 境における一般的な環境分布はよく知られている(e.g., Scott *et al.*, 1990; 1996;
42 Wang, 1992; Hayward *et al.*, 1999a; Debenay, 2000).

43 潮汐湿地のトランセクトに沿って採取した底生有孔虫群の定量的研究は，特
44 定の群集と種の分布が潮の高さ，特に満潮レベル近辺で，強く影響されること
45 を示した(e.g., Scott and Medioli, 1986; Scott and Leckie, 1990; Gehrels 1994;
46 Gehrels *et al.*, 2001; Jennings *et al.*, 1995; Haslett *et al.*, 1998; 2001;
47 Hayward *et al.*, 1999a; 1999b; Horton, 1999; Horton *et al.*, 1999a). これは，

48 完新世の海水準変動を記録するため有孔虫を用いた現世の研究(e.g., Scott and
49 Medioli, 1980; Thomas and Varekamp, 1991; Scott *et al.*, 1995; Haslett *et al.*,
50 1998; Edwards and Horton, 2000; Edwards, 2001; Cann *et al.*, 2002; Gehrels,
51 2002; Hayward *et al.*, 2002)または沿岸地域の地震による垂直変位の記述に有
52 孔虫を用いた現世の研究(e.g., Jennings *et al.*, 1995; Guibault *et al.*, 1996;
53 Nelson *et al.*, 1996; Shennan *et al.*, 1999; Goff *et al.*, 2000; Chague-Goff *et*
54 *al.*, 2000)を導く。これらの研究は、有孔虫の種組成を現世のものと比較するこ
55 とによって、有孔虫の化石群の堆積した標高の範囲を推測するために、主観的
56 な方法を通常用いていた。

57 潮位の高さと底生有孔虫の関係は、イギリスの海岸周辺(Horton *et al.*,
58 1999a)とメーン(Gehrels, 1994)の海岸の、現世の潮間帯及び湿地の動物群のデ
59 ータセットを用いて較正され、そしてこれら 2 地域の潮間帯の有孔虫群集から
60 過去の海水準を推定するための有孔虫に基づく変換関数がつくられた(Horton
61 *et al.*, 1999b; Gehrels, 2000)。世界の 1 地域における底生有孔虫の分類学的セ
62 ンサスデータに基づく変換関数や他の方法は、群集組成にいくらかの違いがあ
63 るため、他地域に直接適用できない。

64 最近のほとんどの研究は、潮位差に依存し、 $\pm 0.1-0.5\text{m}$ の精度を持つ高潮
65 線付近に有孔虫の狭い帯状分布があるため、過去の潮位の高さの推定に湿地の
66 有孔虫を使用することに焦点を当てている(e.g., Hayward *et al.*, 1999b)。新生
67 代の有孔虫の化石群集は、通常の陸棚、漸深海帯と深海帯で、古水深を推定す
68 るための海盆分析で一般的に使用されていたが(e.g., Hayward, 1990; King *et*
69 *al.*, 1993)、これらの推定は水深に依存し、 $\pm 10-2000\text{ m}$ の精度である。平均
70 潮位よりも深い場所(潮下帯から潮間帯)の沿岸環境の、完新世の高さの歴史を

71 推定するために有孔虫化石を使う研究はまれで(e.g., Scott *et al.*, 1976;
72 Hayward *et al.*, 2002), なぜならば高さの帯状分布の広いことと, 適度に庇護
73 されたエスチュアリーと港環境ですら, 潮間帯や浅い潮下帯に生息しない種が,
74 潮流や波浪でそこに運搬されるからである(e.g., Wang and Murray, 1983).

75 マサチューセットの Great Marshes のようないくつかの環境では, 有孔虫の
76 分布パターンは潮位の高さとは関連していないように見える(de Rijk, 1995; de
77 Rijk and Troelstra, 1997). ここでの分布パターンは淡水の湧き出し, 降雨, 洪
78 水と潮汐による海水流入の間のバランスの変化に起因する塩分変動を反映する.
79 同様の地下水湧き出しの説明は, ニュージーランドの標準的な潮流口の縁辺の
80 平均高潮位より上に生息する低塩分 *Trochammina salsa* 群集の産状の説明に
81 用いられた(e.g., Hayward *et al.*, 1996; 1999a).

82 熱帯と亜熱帯のエスチュアリーと沿岸のラグーンでは, 有孔虫群集は, 外洋
83 から離れるとともに, 多様な石灰質群集から低い多様性の膠着質群集へと整然
84 とした組成変化を示す(Debenay, 2000; Debenay *et al.*, 2000). これらの環境の
85 閉塞の概念は, 「沿岸領域における特定のポイント」へ「海洋リザーバー中の溶
86 解した元素」が達するために要した経過時間で定義され, 必ずではないが, 大
87 抵は塩分減少と相関する. Debenay (2000)は熱帯領域の有孔虫動物相の分類学
88 的構成に基づいた Ic という閉塞示標を提唱し, そしてそれは乾燥していない地
89 域では, 「閉塞示標の増加」と「エスチュアリーの塩分の低下」の傾向の間に良
90 い相関があったことを明らかにした. 塩分計測地点はすぐに設置できるが, 閉
91 塞水域からの 1 日中ないしより長期の連続データはめったに入手できない. 代
92 わりに, 我々は「エスチュアリーや港の入口」と「最も奥の場所」の間を標準

93 化した距離を用いる。

94 本論文では、過去の潮位の高さや潮下帯の深さを推定するために現世アナロ
95 グ手法の使用を研究し、閉塞変動を塩分の示標として推定するためにニュージ
96 ーランド閉塞示標を提唱する。これらは底生有孔虫のセンサスデータに基づき、
97 2つのニュージーランドの後期完新世の港とエスチュアリーの様相に適
98 用される。これらの方法はより客観的に、一貫性を持って、そして時折、定性
99 的な評価よりも正確な示標を提供する。

100

101 汽水性有孔虫の分布の影響要因

102 定量的な先行研究では、潮位の高さと‘塩分’が、ニュージーランドの温帯
103 の港とエスチュアリーの様相を引き起こす原因となる
104 2つの最も重要な要因(15のうち、Hayward *et al.*, 1999aの図11)であると結
105 論づけている(Hayward and Hollis, 1994)。これらの関係を説明するために、
106 クラスタとトレンド除去した正準対応分析を、ニュージーランドの庇護され
107 た湾と潮流口とエスチュアリーからの281の底生有孔虫センサスデータセット
108 に適用した(図1;表1)。14サンプル群集をクラスタ分析と樹状図とトレンド
109 除去した2次元正準対応分析配列から抽出した(Canoco, ter Braak, 1985)(図
110 2)。

111 Canoco図でプロット上のデータ(図2)は、主に潮位の高さ(潮汐サイクルにお
112 ける干出の程度の指標)のベクトルと閉塞(淡水と通常海洋塩分との比例距離—
113 塩分示標)のベクトルの間に位置する。この図は、過去の研究が示した次のこと
114 を裏付ける。すなわち、標準からほぼ標準の塩分では、*Jadammina macrescens*
115 (J)、*Miliammina obliqua* (Mo)と*Trochammina inflata* (Tn)の卓越する群集は

116 最高の高潮線を特徴づける．塩分が減少するにつれ，最高の高潮線では
117 *Haplophragmoides wilberti* (H)や *Trochamminita salsa* (Tr)が卓越する群集
118 になる．中位から低位の潮位の，ほぼ標準的な塩分では *Ammonia aoteana* と
119 *Elphidium excavatum* s.l. (Ec, Ew)の組み合わせさせた群集が卓越し，塩分低下
120 とともに，*Miliammina fusca* (M), *Haplophragmoides wilberti*, 最終的に
121 *Trochamminita salsa* の卓越する群集になる．潮間帯下部から潮下帯でも，塩
122 分低下に伴う帯状分布が見られ，様々な浅海種からなる標準海洋塩分群集
123 (mar)(e.g., *Elphidium charlottense*, *Patellinella inconspicua*,
124 *Quinqueloculina* spp.)から *Ammonia aoteana*, *Haynesina depressula* と
125 *Elphidium advenum* s.l. で構成される群集(AH)となり，より汽水な
126 *Scherochorella moniliforme-Textularia earlandi* 群集(STx)へ変わる．

127 潮位の高さや塩分を考慮した，ニュージーランドの汽水有孔虫の群集の概略
128 の分布を図示した先行研究の図は(Hayward and Hollis, 1994; Hayward *et.al.*,
129 1999a), 拡張したデータセットに基に，新たに本論で決定した，14 群集(図 3 と
130 4)の分布に修正された．

131 より低塩分の汽水性群集(特に AM, M, H, Tr)は，庇護された湾と入江の
132 境界付近のより高塩分な環境で，より高潮位レベルまで分布し，エスチュアリー
133 のより低塩分環境では，より広範囲で標高分布を持つ(図 3 と 4)．例えば，
134 *Miliammina fusca* と *Trochamminita salsa* 群集はしばしば，港の平均高潮線
135 よりも上に生息するが(e.g., Hayward *et al.*, 1996), エスチュアリーのより低塩
136 分の場所では潮間帯はもとより潮下帯にすら分布を拡大することもあり得る
137 (e.g., Hayward *et al.*, 1997)．この塩分低下に伴ういくつかの群集の標高の減
138 少の傾向は，おそらくエスチュアリーの，より高密度で高塩分の塩水の上によ

139 り低塩分の海水がのる層状構造に関連している(e.g., Debenay *et al.*, 2000). ほ
140 ぼ標準塩分の湾と入江の縁における, 高潮線付近の塩性低地に最も低塩分の
141 *Trochamminita salsa* 群集が存在するのは, おそらく, 大潮と大潮の間に, こ
142 の地点での, 淡水の湧き出しと雨により起こったのだろう.

143 エスチュアリーのも最も低塩分の上部の範囲での, 有孔虫群集の広い高度分布
144 は, これら環境での潮位や過去の海水準を推定するための価値を減らす. しか
145 し, これらと同様の群集のいくつかは, ほぼ標準塩分の庇護された湾と入江の
146 縁の周辺のより高い潮位レベルを識別するために, 重要な潜在的用途がある.
147 これらの理由で, 我々の現世のセンサスデータを, 2 つの異なる環境である湾
148 とエスチュアリーにおける潮位の高さの推定に使用するために 2 つのセットに
149 分けた.

150

151 データと方法

152 底生有孔虫の 281 の現世センサス調査のデータセットは, ニュージーランド
153 の庇護された湾とエスチュアリーにおける多数の先行研究から, この研究のた
154 めに集めた(表 1, 図 1). 群集の大部分は, 短い小型のコアを使って堆積物の表
155 層 1cm から抽出した 10cm³ のサンプルから入手した. サンプルの大部分は,
156 海岸線と直交するトランセクトに沿って, 潮位の高さ 5–20cm の間隔で採取
157 し, 一方, 他の試料は有孔虫群集の空間分布の図示を目的とした研究から得た.
158 センサスデータセットは, 稀な種に大きな多様性が見られ, 特に外洋環境から
159 のものはこの傾向が強い(Hayward *et al.*, 1999a). 群集の比較を容易にするた
160 め, これらの稀な種の多くを属あるいはより高次の分類群にまとめた(付録 1).
161 データセット調査は, 生きている個体を数える時に生ずる個体群の密集と季節

162 変動の問題を避けるために、総数あるいは遺骸群集を扱った。

163 調査した2つのコアは、手で堆積物に押し込んだアルミニウムチューブ(直径
164 7.62 cm)で長さ1.2 mから得て、その中の堆積物を使用した。コアは縦に半裁
165 し、堆積物を記載し、10 cm³あるいは20 cm³のサンプルを等間隔に、そして
166 明瞭な堆積物の変化の付近で採取した。表層とコアサンプルは、0.063 mmの
167 ふるいで洗って乾燥し、四塩化炭素で浮かばして、有孔虫を抽出した。サンプ
168 ルは約100-200個の底生有孔虫を含むサブサンプルに分け、その後、顕微鏡下
169 で有孔虫を分類し、数えた。それぞれのコアの上部5 cmのサンプルは、試料採
170 取時点では生きていた標本か否かを調べるため、ローズベンガルで処理し、遺
171 骸群のセンサス総数を得た。

172

173 ニュージーランド閉塞示標(塩分)

174 エスチュアリー(潟)の塩分が非常に変動するのは、エスチュアリーの種類(塩分く
175 さび、部分的混合、完全混合; Pinet, 1992)、潮汐サイクル、淡水流入量の変
176 動、水中の成層構造に関係する。各地点での1回の測定値や1日のモニタリン
177 グですら、地点間とエスチュアリー間を比較するために有意な結果を必ずしも
178 得れるわけではない。さらに、塩分と有孔虫の分布の間の因果関係は十分に理
179 解されていないが、恐らく群集組成は1年間及び月齢のサイクルと1回の潮汐
180 サイクルによる、塩分の平均値と変動範囲の組み合わせの影響を受けている。
181 加えて、季節的気候や異常気象や嵐の影響もあるだろう。

182 有孔虫分布から塩分を正確に推定するには、各地点で1年間以上の継続記録
183 が最小必要条件である。このようなプロジェクトの計画とコストは重要なので、
184 エスチュアリーにおける塩分示標は調査すきだ。予想通り、エスチュアリーで

185 は、入口では外洋と同じ海水で、小川や川が流れ込む奥部では淡水であり、塩
186 分勾配を示すだろう。エスチュアリーは、潮位の日周性で複雑になるが、
187 長期間では平均値は徐々に減少する。我々は、閉塞(エスチュアリーの入口と最
188 奥の間の比例距離)を塩分示標に用いる、2つの異なる研究方法を調査した。

189

190 回帰分析

191 ここで、我々はエスチュアリーでは下流に向かって塩分が徐々に増加し、陸
192 側末端と海側末端の間の距離の1次関数か2次関数で塩分を近似できると仮定
193 する。我々は、よく研究された1か所の汽水エスチュアリー環境の調査から、
194 有孔虫の産出量と距離の関係を調査した。

195 水路が開削された Rangitopuni 川の汽水エスチュアリーは、ニュージーラン
196 ドのオークランドの Waitemata 湾の奥部に位置する(Hayward *et al.*, 1997)。
197 そのエスチュアリー(図 1)は長さ 16 km で、上流は狭く(幅 10-200 m)、
198 Waitemata 湾の中流と合流する付近で、幅が最大 1 km に広がる。いくつか大
199 きな溺れ谷があるが、淡水の主な水源は Rangitopuni 川である。潮位差は 2.6-
200 3.5m である(大潮と小潮)。塩分の差は、エスチュアリーの最奥で約 0-20‰、入
201 口で約 30-35‰である(Slinn 1968)。サンプルはエスチュアリーの下流に向かっ
202 て一定間隔で2つずつ(1つは潮下帯、もう1つは平均高潮線)で採取し、潮間
203 帯でのサンプルのトランセクトはエスチュアリーの中央に向かって設けた。こ
204 の計画は、エスチュアリーの群集の概略を提供するが、潮位差を超えた場所の
205 サンプルも含むので、エスチュアリーをさかのぼる距離よりも、種の存在量の
206 ばらつきはかなり増加する。センサスデータは 68 種を記載したが、散在的に分
207 布するいくつかのタクサは、属かそれよりも高次の分類群にまとめたので(付録

208 1), 56 地点から 43 の分類群が分析対象となる. 種の多様性の範囲は 3 から 24
209 の分類群までである. 種の多様さは, *Ammonia aoteana*, *Miliammina fusca*,
210 *Trochammina inflata* の標本が 75%を上回る群集では非常に多様性が低い. 最
211 も広域に分布するのは, *Miliammina fusca*, *Ammonia aoteana*, *Trochammina*
212 *fusca*(それぞれ 46, 37 と 32 地点)である.

213 既知の分布から経験的に求められた式(変換関数)は, 過去の環境パラメータ
214 を推測することに普通に使われた(Sachs *et al.*, 1997). 我々は, Rangitopuni
215 エスチュアリーを下っていきながら, 百分率のスケールを用いて種の存在量と
216 距離との関係づけるために, 回帰直線を使用する. 多くの分類群の存在量が距
217 離とは, わずかにあるいは全く関係ない. それは部分的に標高と強い関係があ
218 るからだ. データ地点は図中で広く分散し, パターンは識別できず, 回帰統計
219 は直線関係を示さなかった. このグループは多くの方解石分類群を含み, それ
220 らの存在量と永続性は, 特にエスチュアリーの入口周辺では低い. *Elphidium*
221 *advenum* のようないくつかの有孔虫は関係を示すが, その関係を実証するデー
222 タは不十分である. *Trochammina inflata* はより生息密度の高い種の一例で,
223 エスチュアリー中に分布し, *Ammonia pustulosa*, *Ammotium fragile*,
224 *Elphidium excavatum*, *Elphidium gunteri*, *Haynesina depressulus*,
225 *Miliammina obliqua*, *Schlerochorella moniliforme* と同様に, その存在量は距
226 離と関係ないかほぼ関係ない.

227 エスチュアリー中に分布する生息密度の高い種のうち, *Ammonia aoteana* は
228 エスチュアリー上流に向かって存在量が減少する傾向にある. 回帰は 1%のレ
229 ベルで有意だが, 適合度は低い($R^2=0.24$). *Portatrochamina sorosa* も似た応答
230 をとる($R^2=0.29$). しかし, 適合度はエスチュアリーの距離の 5%~65%の間の

231 13 地点からのデータに基づき，重回帰(1)で改善される($R^2=0.45$)

232

$$233 \quad d1=46.1-1.537\times 1-0.375\times 2 \quad (1)$$

234 (d=距離%， $\times 1$ =% *P. sorosa*, $\times 2$ =% *A. aoteana*).

235

236 *Miliammina fusca*, *Trochamminita salsa* と *Haplophragmoides wilberti* の存

237 在量は，エスチュアリーの上流に向って増加し，それぞれの地点で直線関係は

238 有意である(1%レベル). *Miliammina fusca* のデータは，最良の適合度を示す

239 ($R^2=0.36$). この生息密度の高い持続的な種は，エスチュアリーの上流の 5~

240 100%の間の 46 地点のデータを使った，距離の最良な単独の種に基づく見積り

241 である(恐らく最も広い高さの範囲を持つため).

242

$$243 \quad d2=32.3+0.632\times 1 \quad (2)$$

244 ここで $\times 1$ =% *M. fusca* である直線モデルとの一致度は，3つの分類群を使用す

245 る重回帰でかなり上昇した.

$$246 \quad d3=25.4+0.822\times 1+0.561\times 2+0.871\times 3 \quad (3)$$

247 ここで $\times 1$ =% *H. wilberti*, $\times 2$ =% *M. fusca*, $\times 3$ =% *T. salsa* である. この見積

248 もりは，エスチュアリー上流の 29%~100%までの 25 地点のデータを使用して

249 いる.

250 Rangitopuni エスチュアリーの上流の 8.59%の距離の平均二乗誤差の平方根

251 (RMSE)を伴う式(3)は，3つの分類群全てがそろそろ時に使用すべきである. 式

252 (2)はより大きいエラーを生じるが(RMSE=21.84%の距離)，しかし

253 *Miliammina fusca* の広い分布によってその実用性が高まる. Rangitopuni エ

254 スチュアリーより外側の場所と中央部からのデータに基づくと、式(1)は
255 11.55%の距離の RMSE を持ち、類似した環境で実用的だろう。

256

257 正準対応分析

258 回帰分析が種の存在量の地形のトレンドのデータを分析するのに対して、こ
259 こで焦点をあてるのは有孔虫の存在量に基づく分類群の産出の低次元表示であ
260 る。Rangitopuni エスチュアリーの研究のセンサスデータは(Hayward *et al.*,
261 1997), 共通種の傾向を除去した対応分析の配列を構成するために, Waimauku
262 エスチュアリー(Hollis *et al.*, 1995), Helena Bay エスチュアリー(Hayward,
263 1993), Puhoi エスチュアリー(Topping, 1973)と Oparara ラグーン(Hayward
264 と Hollis, 1994)のセンサスデータを組み合わせた(図 5)。正準対応分析は, エス
265 チュアリー上流に向かう距離に関する閉塞ベクトルを求めるために使用した
266 (総合的な塩分示標として使用)。このベクトル軸上の各共通種(c_i)の値は, 0 と
267 100 の間の基準値がつけられ, ベクトル上で最小距離(*Elphidium charlottense*)
268 と最大距離(*Trochammina salsa*)の間の距離を比例配分する(図 5; 表 2)。

269 これらの値を次式を用いて, ニュージーランド閉塞示標(NZCI)を計算する。

270

$$271 \text{ NZCI} = \sum (p_i \times c_i) \quad (4)$$

272 ここで p_i =種 i の相対存在量の百分率で, c_i は正準対応分析ベクトルから読み取
273 った閉塞値である(図 5)。算出される NZCI は淡水の値 100 と海水約 35‰の値
274 の 0 との間の値をとる。

275

276 潮位の高さあるいは水深を推定する現世アナログ方法

277

278 潮位の高さの標準化

279 ニュージーランド周辺の最大の潮位は、0.7 m (Cook strait)から 5 m
280 (Nelson 北西)までである。したがって、動物相に関する現世の潮位レベルは、
281 モダンアナログ法に用いられる全域的なデータセットに包含するため、標準化
282 した示標に変換する必要がある。化石群集の潮位の高さの見積もりの結果、標
283 準化示標という用語で表現されるが、これは調査地区の現在の潮差に変換する
284 必要がある。標準化した潮位レベル示標(STLI)は、ここでは次式を用いる。

285

$$286 \text{STLI} = A/T$$

287 ここで A は ELWS(大潮の干潮時の海水準)からの高さの測定値(m), T は ELWS
288 と EHWS の間の合計潮差(m)である。

289

290 モダンアナログ法(MAT)

291 コアの各化石有孔虫群の堆積したところの潮位の高さあるいは潮下帯の深さ
292 の推定を、モダンアナログ法(MAT)を用いて行った。これは古環境パラメータ
293 を推定するための斉一的なアプローチである。MAT は変換関数の方法に使わ
294 れ、現世の浮遊性有孔虫のセンサスデータを用いた海面水温の見積られた地点
295 では、コアの最上部の化石群のデータから現世の海面水温のより精密な換算を
296 MAT はもたらした(e.g., Barrows *et al.*, 2000)。群集のセンサスデータから海
297 面水温を推定する使用に加えて、MAT は pH や他の古環境変動のような事象を
298 推定するために、すでに花粉と珪藻のデータに使われていた(e.g., Bartlein and
299 Whitlock, 1993; Birks *et al.*, 1990)。

300 我々は、研究対象の化石群集と最も類似する現世群集を見つけ、その潮位の
301 高さを化石群集の最良の高さに使うため、現世のニュージーランドの庇護され
302 た湾あるいはエスチュアリーの底生有孔虫群集の、相対的存在量のセンサスデ
303 ータを含む2つの現世データセットのうち1つを用いる(表1). 二乗弦距離を、
304 化石群集と現世アナログ群集間の相違点の測定値として使った(Prell, 1985).
305 アルゴリズムはエクセルのマクロで書かれた.

306 相違性係数は類似度を定量化する一方で、相違性係数はサンプリングの分布
307 のばらつきを含んでいないので、有意性の検定は入手できない. 各々の化石群
308 集と最も類似したセンサス組成(最小相違性係数)の現世群集を、化石群集の潮
309 位の高さや潮下帯の深さを見積もるモダンアナログとして使用した. 3つの方
310 法を試し、各見積もりを比較した(図6-7).

311

312 (1)5つの最も類似した現世群集の潮位の高さの平均と範囲

313 (2)10の最も類似した現世群集の平均潮位の高さ

314 (3)相違性係数が0.4未満の全現世群集の平均潮位の高さ. Ortiz and Mix (1996)

315 は、海面水温を見積もるために、信頼できると認定した類似物を相違性係数0.2
316 未満とした.

317

318 これらの見積もりの信頼性は、いくつかの要因に左右され、特に、現世アナロ
319 グデータセットで表される環境範囲の広さによる.

320

321 **堆積圧密効果**

322 MATの見積もりに基づいた各コア採取地点を通じての「過去の潮位の高さ」

323 あるいは「潮下帯の水深」をグラフ化する際に、我々は、その地点の浅くなる
324 速度を堆積埋積速度より小さいと仮定する．なぜならば下位の堆積物の圧密の
325 ためである．圧密量は、下位の堆積物の層厚と特性、堆積時間、そして地震の
326 揺れによる脱水と圧密量に依存する．有孔虫に基づく MAT による標高の推定
327 は、各地点での圧密と堆積埋積と圧密の相対的な影響に制限を与える．

328

329 完新世への適用

330

331 有孔虫の組織の化石化過程時の損失

332 汽水性シーケンスでの古環境示標として有孔虫を使用することの潜在的な問
333 題は、いくつかの膠着質有孔虫の死後の分解と酸性状態下での石灰質有孔虫の
334 殻の溶解の影響を受けやすいことだ．これらのプロセスは、群集の全体構成を
335 変える潜在能力を持ち(完全に除去するまではいかなくとも)、誤った解釈を導
336 く．

337 我々の観察(e.g., Carter *et al.*, 2000)は、膠着質汽水性有孔虫の様々な種が、
338 埋没深度の増加につれ、死後の化石化過程の分解のされやすさが異なることを
339 示唆する．したがって、薄い殻の *Miliammina obliqua* は死後すぐに消滅し、
340 その後、*Haplophragmoides wilberti*, *Jadammina macrescens*, *Miliammina*
341 *fusca*, *Trochamminita salsa* の分解が始まる．通常の潮間帯の膠着質有孔虫の
342 中で、*Trochammina inflata* は分解に最も抵抗力がある．

343 死後直後に発生する、急速な化石化過程に伴う損失のいくらかは(e.g., 表層
344 付近の炭酸溶解)、全センサスデータを遺骸に限定することで減じることができ
345 る(i.e., 生きた標本を除外する; Murray, 2000)．研究されたシーケンスで明確

346 な化石化過程に伴う損失の証拠があるなら、我々はやっかいな種(e.g., この研
347 究では *Miliammina obliqua*)を除去し、百分率を再計算して、化石とそれに比
348 較される現世のデータセットを調整することを推奨する.

349

350 有孔虫の組織の再堆積や死後移動

351 湾やエスチュアリーで行われた現世の標準海洋の塩分に生息する有孔虫殻の
352 存在量は、エスチュアリーの入口の外洋に面した海岸がどのくらい嵐や強い海
353 流にさらされたかに強い影響を受ける。嵐や強い海流は有孔虫の殻を浮遊させ
354 て運搬するからである(e.g., Murray *et al.*, 1982). 湾やエスチュアリー内にお
355 ける有孔虫の殻の混合と運搬の量は、潮流の強さ(潮位差の影響をかなり受け
356 る; e.g., Wang, 1992)と風で引き起こされた波の海岸での砕ける場所の露出に
357 よって決まる。これらの混合と運搬のプロセスは、同じ状況では現世の表層堆
358 積物の群集に、完新世の化石群集と同程度の影響を与えると考えられるので、
359 センサスデータの調整は必要ない。

360 湾やエスチュアリー環境への完新世以前の有孔虫群集の再堆積も、集水域が
361 新生代の軟らかく侵食された海洋性堆積岩の場所では可能だ。再堆積した有孔
362 虫化石が認識された場所では、分析前にセンサスデータからそれらを除去する
363 必要がある。しかしながら、それらの産出は河川の流入量(あるいは集水域の大
364 規模な土砂崩れ)の増加を示すので記載する必要はある。

365

366 Ahuriri ラグーンと Napier のコア A4

367

368 環境と先行研究

369 1931年のNapier地震(マグニチュード7.8)は、256人の死者を出したニュー
370 ジーランドで過去最大の地震である。地震に伴う垂直変位量は、75 kmの沿岸
371 地区に及び、南で1.8 mの沈降、北で2.7 mの隆起を起こした(Hull, 1990a).
372 Napierの大規模で浅いAhuriri入江では、1.3–2 m隆起して高い干潟になっ
373 た後、干拓されて畑やNapier空港になった。隆起と干拓の後には、入江の小
374 さな干潟のみが残った(図1).

375 1.1 mコア(A4)がPoraitiの角から採取され、そこは現世のAhuririの入江
376 の縁における高潮塩湿地(MHWS下0.1 m)である(V21/408 841, 図1)。これは
377 コアの地点S2に隣接し(Chague-Goff *et al.*, 1998)、我々はいくつかの広い間
378 隔の有孔虫サンプルに基づいて、深度0.25mのところでは1931年のNapier地
379 震の隆起を以前に特定した(Chague-Goff *et al.*, 2000).

380 現世のAhuriri入江での短い3本の潮間帯のコア(深さ0.7–1.2 m)を、堆積
381 学、化学、地質年代学的方法で分析した(Chague-Goff *et al.*, 1998)。その内
382 の1本のコアのみが、堆積学的な(泥から砂への変化)や化学的方法で、1931
383 年の地震隆起イベントを特定できる(Chague-Goff *et al.*, 2000)。Ahuriri入江
384 の南端の泥炭とエスチュアリー堆積物を貫く深い掘削の研究は、その区域が
385 3500年前から1700年前の間に約8 m沈降し、500年前にさらに約1 m沈降
386 し、1931年の地震で隆起したことを示した(Hull, 1986; 1990b).

387

388 結果(図6; 付録2)

389 コアA4は、ザルガイ(*Austrovenus stutchburyi*)の貝殻が散在する均質な緑
390 灰泥からなり、深度0.83–0.78 mに貝殻層がある。0.30 mより上は、色がわ
391 ずかに暗くなる。サンプルの1つ(0.16–0.14 m)は10 cm³のサンプルからたっ

392 た 6 標本しかないため、これに基づく見積もりは信用できない。シーケンスの
393 下部(1.06–0.36 m)は、かなり多数の標本(800–8000 標本/cm³)があり、中央
394 部(0.33–0.19 m)で減少し(250–1000 標本/cm³)、上部(<0.16 m)でさらに減少
395 した(6–230 標本/cm³)。コアの基底部の種の多様性は(Fisher α 指標; e.g.,
396 Murray, 1991), 比較的 low (α は 2–3.5), その上位(0.84–0.46 m)で α は 4–
397 6 に増加し、さらに上位(0.40–0.19 m)で α は 2–2.5 に再び減少し、最終的に
398 0.11–0.01 m で α は約 1.5 となる。唯一の例外は、他のサンプルよりも多様な
399 1 群集である(0.26–0.24 m)。

400 有孔虫群集の定性的分類は(図 4), 以下の群集を示す。 *Ammonia* (A)群集
401 (1.06–0.93 m), *Ammonia-Haynesina* (AH) 群集 (0.84–0.31 m), *Ammonia*
402 と *Ammonia-Miliammina* と *Elphidium excavatum clavatum* (A, M, Ec)
403 の混合群集(0.30–0.14 m)と *Haplophragmoides* (H) 群集(0.11–0.01 m)であ
404 る。

405 NZ 閉塞示標値は 0.31 m より下で比較的 low (NZCI <25), 0.30~0.14 m の
406 間で閉塞値がわずかに増加し(NZCI 28–42), 0.11 m より上でかなり増加する
407 (NZCI 62–63)。回帰式 d1 と d3 は、0.3 m より上位、特に 0.11 m より上で、
408 閉塞値が増加する、類似の傾向を示す。しかし、回帰式 d2 は、 *Miliammina*
409 *fusca* の相対的に低い存在量のために、全体的にはほとんど変化を示さない。

410 A4 コアは庇護された湾や潮流口の環境なので、湾のセンサデータを潮位
411 の高さのモダンアナログ式の見積もりに使った。Ahuriri では、大潮の潮差は
412 1.4 m がある。選択したモダンアナログ式サンプルの全 3 つの方法は類似の標
413 高の変化の曲線を示す、すなわち、堆積初期の 1.06 m–0.93 m は干潮時の海

414 水準で、その後 0.73–0.31 m で、潮下帯への 1.5–3 m の沈降があり、その後、
415 約 0.30 m での満潮時の海面へ 2–3 m 上昇した。

416

417 解釈

418 Ahuriri 入江のコアの有孔虫群集は、明らかに 2 回の急速な地震性垂直変位
419 量を記録する。1 つ目は、MAT による見積もりで、1–2 m の沈降(多様性の低
420 い干潮の海水準を示す *Ammonia* 群集から、より多様性の高い潮下帯の
421 *Ammonia-Haynesina* 群集)を記録し、塩分変化はない。深度 0.84–0.82 m に
422 おける MAT の有孔虫群集の潮位の見積もりは、中間的深度を示し(図 6)、これ
423 は全群集に影響を与えた沈降イベントの前後の群集を一緒に分析したためであ
424 る。この変位は貝殻層と一致し、沈降前に干潮レベルで堆積したかもしれない。
425 このイベントは掘削地点近くで Hull(1986; 1990b)が泥炭からエスチュアリー
426 の堆積物へ変化したことから 500 年前の沈降(c.1 m)と認識したものに対比され
427 る可能性がある。

428 3 つの MAT 曲線の全てが、2 つの変位イベントの間に潮下帯の堆積物が 0.5
429 m 堆積したことに対応するわずかな浅海化を示す。第 2 のイベント(確実に 1931
430 年の Nepier 地震による隆起)は、潮下帯の AH 群集から潮間帯の A 群集への色
431 のわずかな変化の見られるレベルで認識できる。MAT が見積もった隆起量は 2
432 –3 m で、過去に測定された 1.3–2 m の隆起量(Marshall, 1933; Hull, 1990 a)
433 よりも大きい。MAT が見積もった隆起後の標高は、満潮時の海面の平均値より
434 も約 0.4 m 下で、0.3 m の堆積物の累積のために MHWS 下で満潮時の海面の
435 平均値よりも約 0.1 m 浅くなった。これらの後の見積もりはかなり範囲を制約
436 し(図 6)、完全に現世の環境と一致した。歴史上の隆起の測定が正しいと仮定す

437 ると、我々の MAT の見積もりによる潮下帯は、約 1 m はおそらく深すぎ、湾
438 のアナログセットの中のいくつかより深い水深 5–6 m の現世サンプルの影響
439 をかなり受けている。

440 沈降と同じように、深度 0.30–0.28 m に見られる隆起イベントをまたいだ
441 群集は、2 つの両成分の種によって中間の標高が見積られ、これは隆起前後の
442 有孔虫の混合を示唆する。

443 たった 6 標本(0.16–0.14 m)のサンプルから推定した MAT 標高は、干潮で、
444 実際よりかなり低く、信用性はない。0.26–0.24 m の試料のより高い多様性は、
445 10 の MAT 手法の平均値から換算された潮間帯下部の高さを反映し、沿岸の嵐
446 の時に、より高塩分の潮下帯有孔虫が洗い流された可能性を示唆する。

447 Ahuriri 入江の閉塞状況は、1931 年の Napier 地震より前は比較的開いて
448 いて、塩分が高かった。この隆起後、入江の深さと大きさはかなり減少し、有
449 孔虫に基づく閉塞示標と、小規模の範囲での回帰式は予想されていたものより
450 もわずかに増加した。より有意な閉塞の増加は、深度 0.11 m の低い多様性の
451 *Haplophragmoides* 群集の侵入を示し、これは塩分のさらなる減少に伴った現
452 在の塩水湿地の植生の拡大を表すと推測される。

453

454 **Rangitopuni エスチュアリー、オークランドのコア R5**

455

456 **環境**

457 Rangitopuni はオークランドの Waitemata 湾へ流下する最大の川である(図
458 1)。Riverhead と Hobsonville の間の潮下帯のエスチュアリーチャンネルは、軟
459 らかく薄黒い泥の厚い堆積物を覆う泥質干潟との境界となっている(Hayward

460 *et al.*, 1999c). いくつかのチャネルの土手では厚い泥がザルガイの貝殻層を覆
461 っている. Riverhead 近くの長さ 0.9 m のコア(R5)は, これらのシーケンスを
462 採取するため, ELWS 干潮の海面の平均値から約 1.3 m 上の位置にある. オー
463 クランド地域は, プレート境界の変形地帯の外側に位置し, 完新世の地殻変動
464 の証拠はない.

465 花粉学的研究は, Lucas Creek 周辺の貝殻層を覆うエスチュアリーの同じ 0.8
466 m のコアシーケンスを以前に扱った(Hume and McGlone, 1986)(図 1). このコ
467 アは, 人間がニュージーランドに到来し, 影響を及ぼした期間(800 年前)を記録
468 している. 貝殻層より上位の木炭と花粉記録は, 元々あった亜熱帯広葉樹林
469 の焼失と開拓(シダ類の胞子の増加)の後に, 外来種のマツとイネ科植物の花粉
470 の移入(約 150 年前のヨーロッパの移住者の到来)のあったことを記録している.
471

472 結果(図 7 ; 付録 3)

473 コア R5 は緑灰泥から成り, 2 つの厚さ 0.03 m の貝層を挟む(0.60–0.57, 0.32
474 –0.29m). 貝層はザルガイ(*Austrovenus stutchburyi*)を主体とし, いくつかは
475 合弁で生息姿勢を保っている. 散在的なザルガイの殻の産出は, コアの基底部
476 (0.87m)から, 上位の貝層(0.32 m)までの泥内に見られる. 0.29 m より上では
477 貝殻は見られず, この地点の数 km の範囲内でも表層の泥には見られなかった.
478 下位の貝層(0.60–0.57 m)の合弁のザルガイの放射性年代は 1418 ± 39 BP を記
479 録している(Wk 9397, cal. AD 1000; Stuiver *et al.*, 1998).

480 このコアの有孔虫の存在量の低さのため, 20 cm^3 のサンプルを処理した. そ
481 れにも関わらず, 3 サンプル(0.87–0.85, 0.75–0.73, 0.28–0.26 m)は 30 個体
482 以下なので, それらの結果は信頼できない. 下位の貝殻層周辺のサンプルは,

483 400–1000 個体/cm³ と比較的高い存在量だが、ほとんどの区間は 30–100 個
484 体/cm³ の適度に低い存在量である。ほとんどのコアの区間を通じて種の多様性
485 はとても低い(α 0.4–2), 1 サンプル(0.46–0.44 m)は種の多様性がわずかに
486 に高い(α 3.2). したがって、低いセンサスは、古環境推定には統計的にあまり
487 気にする必要はない。

488 有孔虫群集の定性的分類は(図 4), 以下の群集を示す: *Ammonia*-
489 *Miliammina* (AM)群集(0.87–0.85 m), *Ammonia* (A)群集(0.75–0.23 m),
490 *Haplophragmoides* と *Miliammina fusca* (H, Mf)混合群集(0.22–0 m)である。

491 閉塞示標の値は、次のシーケンスを示す。すなわち、最下部の値(0.87–0.85
492 m)は、NZCI 50 で、深度 0.23 m に向かって中位の閉塞を示す NZCI 28–39 と
493 なり、堆積初期に閉塞性が高いことを示す。深度 0.22 m より上では、閉塞性の
494 実質的増加を示す。3 つの回帰式の全ては、閉塞示標と同じトレンドを示す(図
495 7)。

496 コア R5 はエスチュアリー環境に設置したため、エスチュアリーセンサスデ
497 ータを、潮位のモダンアナログ測定に使用した。Waitemata 湾では 3.5 m の大
498 潮の潮差がある。選択したモダンアナログサンプルの 3 つの方法の全てが同じ
499 標高曲線を示し、潮間帯下部から潮下帯上部(深度 0.85–0.75 m)にかけて最初
500 の水深増大を示す。潮間帯になる水深の急な減少は、0.22 m とその上で見られ
501 る。1 つのサンプルの群集(0.22–0.20m)は、3 つ全ての MAT 換算の方法で平
502 均高潮線以上の標高と見積もられる。

503

504 解釈

505 ここ 2000 年間にオークランド地域の構造運動や汎世界海水準が変動した証

506 拠はない。したがって、潮位の標高の MAT の見積もりは、不正確のように思
507 える。代わりに、このコアは潮間帯下部の中での埋積作用と圧密で、大潮の低
508 潮線より上の約 1.3 m の現在の標高に達したのだろう。1つの例外の他、全
509 てで、5つの最も類似する現世群集の標高の範囲は、潮間帯下部を含む。明ら
510 かに潮間帯上部を示す深度 0.22–0.20 m の動物群は、洪水イベントでの死後
511 運搬の結果として説明できるだろう。不十分な MAT 潮位の見積もりは、これ
512 らのより低塩分エスチュアリー環境におけるいくつかの有孔虫(e.g.,
513 *Miliammina*, *Haplophragmoides*)のより広範囲な標高の範囲を持つことによ
514 る。示唆された標高変動は、明瞭な群集変化と環境変化の結果であり、標高自
515 体の変化の結果ではない。

516 主要な閉塞示標の増加と群集変化は、上位の貝層の最上部で起き(0.23–0.22
517 m)、全てのザルガイの消滅と一致する。Lucas Creek の近くの、花粉学的に年
518 代決定されたコアとの層序的対比が正しいのなら、このレベルは森林の初期の
519 開墾が行われた流域での人間活動の開始を示す。閉塞示標の実質的増加は、お
520 そらく、淡水流入の増加の結果、塩分の低下が起きたことによる。ザルガイは
521 このイベントより前に、似たような泥に生息していたようだが、増加する淡水
522 と細粒堆積物の減少(しばしば提示されている)が、これらが *Rangitopuni* エス
523 チュアリー中でザルガイが消滅した主因と思われる。

524 化石化過程時の損失の可能性があるため、このコアの標高と閉塞示標の推定
525 を入手するために遺骸群集のみのセンサスデータを使用した。しかしながら、
526 これは気づいていたことだが、2つの最上位のサンプル(0.05–0 m)は、生きて
527 いる石灰質有孔虫(e.g., *Ammonia*, *Elphidium*)(ローズベンガルに着色された)

528 をわずかに含み，そのうちいくつかは溶解の兆候を示している．この観察は，
529 深度 0.22 m 以上で記録された主要な群集変化のいくつか(i.e., 全石灰質殻の損
530 失)は，エスチュアリーの水域における炭酸塩を溶解する状態(pH 低下)の開始
531 による．このレベルは，膠着質種の絶対量(泥/cm³)の 5 から 20 位の増加を示し，
532 それゆえに塩分減少が pH 変動と関連しているようだ．

533 最下位の 2 サンプルは有孔虫の絶対量が低く，石灰質有孔虫と膠着質有孔
534 虫の混合から成る．膠着質の分類群は，その上位(0.63–0.23 m)の *Ammonia* 群
535 集中の膠着質の分類群と同様の低い絶対量レベルだが，石灰質の *Ammonia* と
536 *Elphidium* はわずかに少なく，かなりの溶解の兆候を示す．したがって，前期
537 (pre-AD 1000)は pH が低く，石灰質有孔虫のかなりの溶解が起こったことを示
538 唆する．この説明は現在のところ不明である．

539

540 議論

541 これらの後期完新世の有孔虫シーケンスの試験的な研究は，潮間帯と潮下帯
542 上部と庇護された湾の環境の歴史の高分解能な解釈にとって「標高を推定する
543 MAT」と「ニュージーランド閉塞示標」の潜在能力を明確に示した．

544

545 MAT による標高推定

546 庇護された湾あるいは潮流口環境(e.g., Ahuriri 入江)では，潮位の MAT によ
547 る推定は比較的正確なように思われる．世界の他地域のように，高精度の標高
548 推定は，高潮線付近に生息する群集(e.g., *Jadammina*, *Trochammina inflata*,
549 *Haplophragmoides* 群集)の狭い高度分布からもたらされる．潮間帯の低部と
550 中部の推定はやや精度が落ち，潮下帯ではさらに精度が落ちる．しかしながら，

551 MAT が潮下帯へ向かっての多様性の増加(図 6)と潮間帯の *Elphidium*
552 *excavatum* s.l.の存在量の低下に基づいて、潮間帯と潮下帯(MLT 以下)の標高
553 を識別することは可能であるように見える。ニュージーランド周辺の潮下帯の
554 湾と入江の有孔虫分布の先行研究は(e.g., Hayward *et al.*, 1994; 1997), これら
555 の庇護された環境下の 0–10m の範囲内の潮下帯で、正確な MAT 推定値が得
556 られることに対してほんのわずかな見込みしかなかった。

557 より低塩分のエスチュアリー環境では(e.g., Rangitopuni エスチュアリー),
558 標高の MAT 見積もりは、5 つの最も類似した現世エスチュアリー群集のより
559 広い標高範囲を反映するため、あまり信用できない(図 7)。これは、より低塩分
560 環境に生息する共通種の多くが、潮間帯と潮下帯での生息範囲が広いためであ
561 る。しかしながら、いくつかのエスチュアリー環境では、有孔虫群集により潮
562 間帯上部や潮下帯を特定できると確信する。現世エスチュアリーの有孔虫群集
563 データセットの拡張は、より低塩分環境での MAT 見積もりの精度の改善に貢
564 献するだろう。

565

566 塩分示標

567 NZ 閉塞示標と回帰式(d1–d3)を用いて作成されたグラフは、両コアサンプ
568 ルで全く同じ変化を示す(A4 の d2 を除く)。両方の例では(図 6 と図 7), NZCI
569 曲線は d1 (主に *Ammonia* に基づく)の値と d3 (主に *Haplophramoides* と
570 *Miliammina* に広く基づく)の値の平均をとる傾向にある。各サンプルの全セン
571 サス値に基くと、NZCI の利点は、様々な環境状態による種組成のかなりの多
572 様性を持つ、群集において閉塞変化を認識できる点で回帰式(1~3 種のみに基づ
573 づく)よりも優れている。これは、NZCI が 5 つの様々なエスチュアリーと沿岸

574 のラグーン環境からの全センサスデータに基づくということと、回帰式の場合
575 はその対象が数種の個体群の存在に頼るわけではないからだ。回帰式は、エス
576 チュアリーに沿った距離の1次関数として種の存在量をモデルする一方、NZCI
577 は環境変数に関するエスチュアリー内の、種の産出の低次元的視点を示す正準
578 対応分析に基づく。その配列での種の位置は、主な変化をもたらすサンプルに
579 よって決まる。

580 したがって、NZ 示標は閉塞の度合いを決定する上で、定性的な評価よりも
581 客観的な曲線を提供するため、ニュージーランド周辺で一般的に使用されるの
582 が好ましい。温帯のニュージーランドのエスチュアリーと沿岸のラグーンでは、
583 閉塞の増加は塩分減少と密接な相関関係があるように見え、ほとんどの場合、
584 塩分変動の良い示標になるようだ。いくつかの湾の高潮線の縁辺では、CI 値の
585 減少は必ずしも湾の水の低塩分化を反映する必要はなく、むしろ塩湿地と塩分
586 低湿地での淡水の湧き出しの増加と降雨の残留を反映する。

587 Ahuriri では、比較的軟らかい後期中新世と鮮新世の泥岩が集水域に露出
588 している。ここで再堆積した、保存良好な有孔虫化石(しばしば現世まで生息時
589 代が及ぶ)は、浅いラグーンに生息する種とは明確に異なる深海の種であるので、
590 区別できる。再堆積した有孔虫化石を認識した場所では、分析前にセンサスデ
591 ータから取り除くべきだ。しかしながら、それらの産出は記載すべきで、これ
592 により河川の流入量の増加(あるいは集水域での大規模な土砂崩れ)を示す。

593

594 化石化過程時の損失

595 Ahuriri コアでは、オリジナルな有孔虫群集の化石化過程時の選択的ロスは
596 見られなかったが、鮮新世と現世の標準海水の有孔虫殻の小規模な再堆積によ

597 る死後導入は明らかである。(特に潮下帯の群集)。見つかった所では、鮮新世の
598 有孔虫(深海の底生種なので、現世の浅いラグーンの種と区別される)は、塩分や
599 標高の推定に使用する前に、センサスデータから除去すべきだ。これらの有孔
600 虫はおそらく集水域周辺の川の氾濫で運搬された。おそらく沿岸の嵐の間の潮
601 の流入で侵入した、現世の内側陸棚の有孔虫は、湾と入江の入口やその周辺の
602 潮下帯環境を特徴づける現世の遺骸の一部であり、センサスデータから除去さ
603 れていなかった(e.g., Hayward *et al.*, 1996).

604 有孔虫群集の中で石灰質有孔虫の部分的や完全溶解は、Rangitopuni エスチ
605 ュアリーコアの基底部と最上部で認識できる。この溶解は、顕著な浅海化と、
606 塩分低下が示す深度、0.23 m での石灰質組織の損失の開始があったところの塩
607 分と標高推定の両方に影響を及ぼす(図 7)。この場合、おそらく炭酸塩溶解は塩
608 分低下と関係するが、推定された浅海化は溶解による。

609 Rangitopuni エスチュアリーの結果は、化石化過程の影響の除去が可能にな
610 るまで、これらの方法を使った、塩分と標高の推定を疑うことなく受けつける
611 ことに注意を向けるべきであることを示す。

612

613 生物擾乱と内生種の潜入深度による影響

614 Ahuriri と Rangitopuni の両コアは、一見、地震性の垂直変位(Ahuriri)や塩
615 分変動(Rangitopuni)といった急な環境変化を記載しているように見える。堆積
616 物の移動、無脊椎動物による生物擾乱あるいは有孔虫の底質への潜入深度
617 (0.25m まで; Ozarko *et al.*, 1997)によって、記録の変質があるにも関わらず、
618 比較的急である。

619 例えば、深度 0.31–0.30 m の Napier 地震の境界では、境界の下の潮下帯の

620 有孔虫(e.g., *Bolivina*, *Haynesina*, *Nonionellina*)と境界の上の潮間帯の有孔虫
621 (e.g., *Elphidium excavatum*, *E. gunteri*) 間で, わずかなオーバーラップがあ
622 るが, 0.30–0.28 m の NZCI と MAT の標高推定はともに, 潮下帯と潮間帯の
623 端成分の中間値をとり, NZCI と MAT の標高推定は有効である(図 6).
624 Rangitopuni コアでは, 深度 0.23–0.22 m の境界をまたいで 98%の群集変化
625 があり, 記録の変質はほとんどないが, この変化のいくらかは, 石灰質有孔虫
626 の溶解の急速な開始によることは疑いの余地はない.
627

628 図の訳

629 図 1 ニュージーランドの地図とモダンアナログサンプルを得た調査区の場合、
630 Rangitopuni エスチュアリー R5 のコア(左)と Ahuriri 入江 A4 のコア(右)の
631 場所の位置

632

633 図 2 トренд除去された正準対応分析(ter Braak, 1985)によるニュージーラ
634 ンドの庇護された湾とエスチュアリーの底生有孔虫の 2 次元の配置. 想定上の
635 環境と塩分示標の傾向とともに, それらの 2 つの最も関係する環境要因をベク
636 トル軸に示す. サンプルは, Bray-curtis 相似性係数を用いたクラスター分析で,
637 14 のクラスター(省略名は図 3 で説明)に分けられる(Rohli, 1989).

638

639 図 3 ニュージーランドの庇護された湾とエスチュアリーで認識された, 14 の
640 底生有孔虫群集の塩分と標高に基づく分布. EHWS = 最大満潮レベル ;
641 MHWS = 平均の満潮レベル ; MHW = 平均の高潮レベル ; MSL = 平均海
642 水準で潮間帯の中部レベル ; MLW = 平均的な干潮レベル.

643

644 図 4 ニュージーランドの庇護された湾とエスチュアリーで認識された 14 の
645 底生有孔虫群集の生態分布を概略化した概観図.

646

647 図 5 5 つのエスチュアリー(Waimamaku, Helena 湾, Puhoi, Rangitopuni,
648 Oparara)からの 140 サンプル中に普通に見られる底生有孔虫の, トренд除去
649 した正準対応分析によって作成した 2 次元配置図. 正準対応分析(ter Braak,
650 1985)によって作成したベクトル軸は, 標高(水深)と閉塞(淡水と通常の海水の

651 場所間の比例距離で塩分示標)という 2 つの最も関係のある環境要因を示す. 部
652 分的正準対応分析は, 有孔虫データの変動の 15.7 %は閉塞示標で, 14.5 %は標
653 高の変動であることを示す. 普通に見られる有孔虫は, ベクトルに沿って最大
654 距離の有孔虫(*Elphidium charlottense*)と最小距離の有孔虫(*Trochammina*
655 *salsa*)間の距離を 0 から 100 として, 閉塞ベクトル上にプロットした点の垂直
656 投影により, 閉塞値(c_i)を配置される.

657

658 図 6 Ahuriri 入江のコア(A4)の, 堆積相, 普通に見られる有孔虫の相対存在量,
659 有孔虫群集, 種の多様性, 有孔虫の絶対量と「見積もられた閉塞示標(NZCI)」,
660 古標高曲線と, 後期完新世の環境変動の解明を示す. 3 つの古標高 MAT 曲線
661 は, 選択したモダンアナログサンプルの様々な方法に基づいて作成した. これ
662 らは(1)5 つの最も類似した現世群集, (2)10 の最も類似した群集, (3)閉塞値の
663 相違値 40 未満の全現世群集の平均値, である. 5 つの最も類似した現世の庇護
664 された湾の群集における標高の範囲も示す. 4 つの閉塞推定曲線を提示し,
665 NZCI = 図 5 に示したニュージーランド閉塞示標, d_1 , d_2 , d_3 は回帰分析の
666 式.

667

668 図 7 Rangitopuni エスチュアリーのコア(R5)の, 堆積相, 普通に見られる有
669 孔虫の相対存在量, 有孔虫群集, 種の多様性, 有孔虫の絶対量と見積もられた
670 閉塞示標(NZCI), 古標高曲線と, 後期完新世の環境変動の解明を示す. 3 つの
671 古標高 MAT 曲線は, 選択したモダンアナログサンプルの様々な方法に基づい
672 て作成した. これらは(1)5 つの最も類似した現世群集, (2)10 の最も類似した群
673 集, (3)閉塞値の相違値 40 未満の全現世群集の平均値, である. 5 つの最も類似

674 した現世の庇護された湾の群集における標高の範囲も示す. 4 つの閉塞の推定
675 曲線を提示し. NZCI = 図 5 に示したニュージーランド閉塞示標, d1, d2,
676 d3 は回帰分析の式.

677

678 表 1 ニュージーランドの完新世の庇護された湾とエスチュアリー環境を推定
679 するモダンアナログセットとして用いたセンサスデータのソース. 調査区の間
680 所は図 1 に示してある. 非公開のデータのコピーは, 論文の責任著者から得た.

681

682 表 2 ニュージーランドの庇護された湾とエスチュアリーでの普通に見られる
683 種の閉塞値(c_i)は, 5 つのエスチュアリーのセンサスデータの正準対応分析から
684 得た(図 5). これらの値を, 有孔虫群集によるニュージーランド閉塞示標の見積
685 もりに用いる.

686

687 付録 1 モダンアナログ手法と回帰分析に用いた, 個体数の少ない種の分類群
688 と分類上のグループ

689

690 付録 2 ニュージーランド Ahuriri 入江のコア A4 (化石記録ファイル番号
691 R21/f420) の有孔虫センサスデータ, 絶対量と多様性(Fisher α 示標)

692

693 付録 3 ニュージーランド Rangitopuni エスチュアリーのコア R5 (化石記録
694 ファイル番号 R10/f156) の有孔虫センサスデータの%, 絶対量, 多様性(Fisher
695 α 示標)と塩分示標

696

697 北村晃寿・依田悠希