

1-5 目視による個体数推定

1-5-1 ライントランセクト法による個体数推定の原理

2人の観察者がセスナ機の右側と左側の座席に座り、窓から進行方向のそれぞれ右側と左側の海面を目視観察する状況を考える。セスナ機の総移動距離を L 、各観察者の観察する横距離（セスナ機の進行方向に直角な距離）を w とすると、観察海面面積は $2Lw$ である。なお、セスナ機が一定の高度を保ちつつ水平飛行を行えば、窓からの観察範囲を固定することにより w を一定値に保つことができる。この観察で見落としが全くなく ($g(0) = 100\%$)、2名が合計 n 頭のスナメリを発見できたとすると、観察面積内の個体密度 D は $n/2Lw$ となる。観察面積を調査海域全体を代表できるように選んでいれば、 D はそのまま全域の生息密度の推定値となる。

$$D(\text{estimated}) = n/2Lw \quad (1-1)$$

これに調査海域面積 A を乗じて、全域の個体数推定値を得る。

$$N(\text{estimated}) = An/2Lw \quad (1-2)$$

このように観察者の観察横距離を固定して、観察者が調査線上を移動しながら観察する方法はストリップトランセクト法と呼ばれる。一方、事前に横距離を固定せずに、観察者が調査線上を移動しながら観察し、発見があると、発見頭数の計数のみならず対象物までの横距離を測定する方法はライントランセクト法と呼ばれる（岸野，1991）。

ライントランセクト法を採用すると、進行方向近くの個体に較べて遠くの個体を見落とす恐れがある。しかし、この方法では横距離の測定データをもとに、発見確率と横距離の関係を定量的に表し、この関係から有効探索幅の推定値 $w(\text{estimated})$ を得ることにより、ライントランセクト法でも上記の個体数推定の考え方を適用できる。

$$D(\text{estimated}) = n/2Lw(\text{estimated}) \quad (1-3)$$

$$N(\text{estimated}) = An/2Lw(\text{estimated}) \quad (1-4)$$

ただし、個体数の推定精度を求める時に、 $w(\text{estimated})$ の推定精度の考慮が必要となる。個体数推定値の精度を変動係数 cv （推定値の分散の平方根／推定値）を用いて表現すると

$$cv[N(\text{estimated})]^2 = cv[n]^2 + cv[w(\text{estimated})]^2 \quad (1-5)$$

$N(\text{estimated})$ の精度は総発見個体数 n のばらつきと有効探索幅の推定精度に影響される。同じ長さ l の k 本の調査線からの発見頭数が n_1, n_2, \dots, n_k であった時 ($L = lk, n = \sum n_j$)、総発見個体数 n の分散推定値は経験的に次のように与えられる (Buckland *et al.*, 1993)。

$$\text{Var}(n) = k \sum (n_j - n/k)^2 / (k-1) \quad (1-6)$$

(1-6) から明らかなように、 n_j のばらつきが大きいと $\text{var}(n)$ が大きくなり、個体数推定値の精度が落ちる。

今回、採用する長崎方式はライントランセクト法に基づくが、部分的にストリップトランセ

クト法の考え方も採用している。つまり、観察者の眼の疲労を防ぐために発見効率の悪い遠方は観察せず、1名の探索幅を横距離で50m以上450m以内に固定し、この範囲内でスナメリまでの横距離データをとるものである。

1-5-2 調査線の配置と長さ

個体数推定値の精度を高めるために、調査線の配置と長さを原則的に以下のようにする。

- 1) 調査線は海岸線に垂直に近くなるように東西方向あるいは南北方向にひく
- 2) 各調査線は海岸から水深60mまでとする
- 3) 複数の平行な調査候補線を設定し、実際の調査線をこの中から系統抽出する

1)は調査線ごとの発見個体数のばらつきを小さくすることとセスナ機の運航の都合を考えている。瀬戸内海ではスナメリは岸から1海里以内で多く発見されている。もし岸に平行に調査線をひくと、岸に近い線で多く発見され遠い線で発見が少なくなり、調査線ごとの発見個体数のばらつきが大きくなると予想される。一方、岸に垂直に調査線をひくと、どの線も岸寄りから遠くまでカバーするので、ばらつきが小さくなる。調査線を東西あるいは南北に固定すると、パイロットがGPSを用いた飛行を行いやすくなるし、予定した線上をきちんと飛んでいるを記録係が確認するのも、また何らかの理由で調査線上を離れた後に元の所に戻ってくるのにも便利である。

2)は分布についての既往知見から、3)はBuckland *et al.*(1993)が推奨する方法であり、例えば、上から m 本の調査候補線から1本を無作為に選び、後は m 本ごとに系統的に調査線を抽出する($m=2, 3, 4, \dots$)。

1-5-3 調査線の数

調査海域全域をおおう複数の平行な調査線をひくことを想定し、調査海域ごとに調査線数と個体数推定精度の関係について検討する。

状況を簡単にするために、各調査海域を長方形に近似する。瀬戸内海は横長の長方形となり、上辺が中国、下辺は四国の沿岸線となる。調査線は南北方向の縦向きに設定する。仙台湾～内房沿岸は縦長の長方形で、左辺が沿岸線、右辺が水深60m線で、調査線は東西方向の横向きに設定する。どの海域であれ、調査線の長さ l (km)は海域内で同一で、長方形の右辺(瀬戸内海の場合)か上辺(仙台湾～内房沿岸の場合)かの長さに等しいとする。また、調査線の本数を k とする。調査線をスナメリの分布と無関係に無作為に(実際には系統的に)置くとすれば、調査線あたりの発見頭数は、どの調査線でも等しいことが期待される。この状況で、調査線あたりの発見頭数は調査線に依存せず、その平均を m 、分散を s^2 とする。 m は、海域密度 D (頭数/km²)、有効探索幅 w (estimated)と l から、

$$m = 2D w(\text{estimated}) l \quad (1-7)$$

分散 s^2 は不明であるが、ここでは簡単のために平均と分散の比例関係を想定し

$$s^2 = m \quad (1-8)$$

r は分布の集中度を示す指標となる平均・分散比である（1本の調査線の探索面積ごとの個体数がランダムな変動をする時に1、この個体数が集中分布をする時に >1 ）。

さて総発見頭数 n の期待値は km 、その分散は ks^2 となる。そこで(1-5)から、

$$\begin{aligned} cv[N(\text{estimated})]^2 &= ks^2/(km)^2 + cv[w(\text{estimated})]^2 \\ &= r/(km) + cv[w(\text{estimated})]^2 \\ &= r/(2Dklw(\text{estimated})) + cv[w(\text{estimated})]^2 \quad (1-9) \end{aligned}$$

有効探索幅の推定値は、過去の長崎沿岸域での調査（今回と同じ長崎方式）から、

$w(\text{estimated}) = 0.144\text{km}$ 、 $cv[w(\text{estimated})] = 0.06$ と得られている。これを代入して

$$cv[N(\text{estimated})] = [r/(0.288Dkl) + 0.0036]^{1/2} \quad (1-10)$$

(1-10)から、個体数推定の精度が高くなる（ $cv[N(\text{estimated})]$ を小さくする）ための条件は

- ・ r が小さい（調査線ごとの発見数のばらつきが小さい）
- ・ 生息密度 D が高い
- ・ 調査線の本数 k が多い
- ・ 調査線長 l が長い

このうち、 r は直接的に制御できず、スナメリが偶然に調査海域内の特定の場所に集まっている時に調査をしてしまうと、 r は大きくなってしまふ。個体のこのような海域内空間配置は同じ日の中でも時間帯で変化することは十分に考えられる。ただし、調査海域を分布密度の濃淡をもとに複数の海域に分けると、 r をある程度は小さくすることができるかもしれない。

1993-94年に実施された長崎周辺でのセスナ機目視観察からの調査ごとの発見頭数と r の変動を表 1-1~1-3 に示す。同じ海域でも r が大きい時、あるいは発見頭数の少ない時に密度の推定精度（個体数の推定精度と等しい）が悪いことが分かる。同じ海域でも調査ごとに密度の推定値が変動し、1回の調査からの推定精度は26~67%と決して良くない。今回は各海域1回の調査を原則としているので、調査線の本数を増やすなど調査計画を十分に検討する必要がある。

表1-1 大村湾セスナ機目視調査での調査ラインごとの発見頭数 (Yoshida *et al.*, 1998)

調査線番号	93.8.28	93.11.20	94.2.4	94.5.31
1	0	0	1	0
2	3	15	4	0
3	1	0	1	9
4	0	0	0	4
5	1	0	0	7
6	1	0	0	0
7	1	2	1	5
8	0	0	0	2
9	2	0	0	1
10	5	1	0	3
11	1	1	1	8
12	3	1	2	1
計	18	20	10	40
平均	1.58	1.25	2.08	3.33
標準偏差	1.51	4.25	1.19	3.26
r	1.44	14.45	0.68	3.18
D (estimated)	0.6	0.3	1.1	0.6
D 推定精度* (%)	29.8	67.1	49	26.4

*推定値の変動係数. 沿岸と沖合域の2つに事後的に分けて, 層別推定4回の調査データを使ったときの精度は20.1%

表1-2 有明海セスナ機目視調査での調査線ごとの発見頭数 (Yoshida *et al.*, 1997)

調査線番号	93.5.05	93.7.22	93.8.31	94.1.25
1				
2	0	2	0	0
3	5	12	2	7
4	17	4	3	18
5	18	4	5	0
6	7	1	22	4
7	4	2	3	1
8	8	2	13	0
9	0	8	1	14
10	4	1	19	24
11	61	2	4	0
12	4	0	3	4
13	1	12	2	2
14				
計*	129	50	77	74
平均	10.75	4.17	6.42	6.17
標準偏差	16.88	4.20	7.37	8.12
r	26.51	4.23	8.46	10.70
D(estimated)	1.9	0.7	1.2	1.1
D 推定精度** (%)	31.3	50.9	30.6	34.4

* 全発見. このうち海面反射の激しかった発見データは推定に使用せず

** 推定値の変動係数. 水深5m以浅と以深の2つに事後的に分けて層別推定
4回の調査データを使った時の精度は18.6%

表1-3 橘湾セスナ機目視調査での調査線ごとの発見頭数 (Yoshida *et al.*, 1997)

調査線番号	93.8.28	93.11.05	94.2.5
T1	5	4	0
T2	0	2	17
T3	6	3	7
T4	3	3	82
T5	10	12	133
T6	0	0	0
T7	3		0
計*	27	24	239
平均	3.9	4.0	34.1
標準偏差	3.5	4.1	52.6
r	3.2	4.3	81.0
D(estimated)	0.6	0.5	3.1
D 推定精度** (%)	46.2	52.8	49.1***

* 全発見. このうち海面反射の激しかった発見データは推定に使用せず

** 推定値の変動係数. 水深50m以浅と以深の2つに事後的に分けて層別推定

*** 82頭からなる1群は極端に大きい群れサイズのために推定に使用せず
3回の調査データを使った時の精度は28.5%

個体数の目標推定精度を調査海域ごとに一定に保つためには、生息密度 D の低い海域、あるいは調査線長 l の短い海域では、調査線の本数 k を多めに設定する必要がある (D が $1/2$ の海域あるいは l が $1/2$ の海域で k を 2 倍、 D が $1/2$ かつ l が $1/2$ の海域で k を 4 倍)。大村湾を想定して、 k と個体数推定精度の関係を図 1-7 に示す。 k を多くするほど精度が上がるが、この例では k が 40 本以上にしても精度はさほど向上しない。

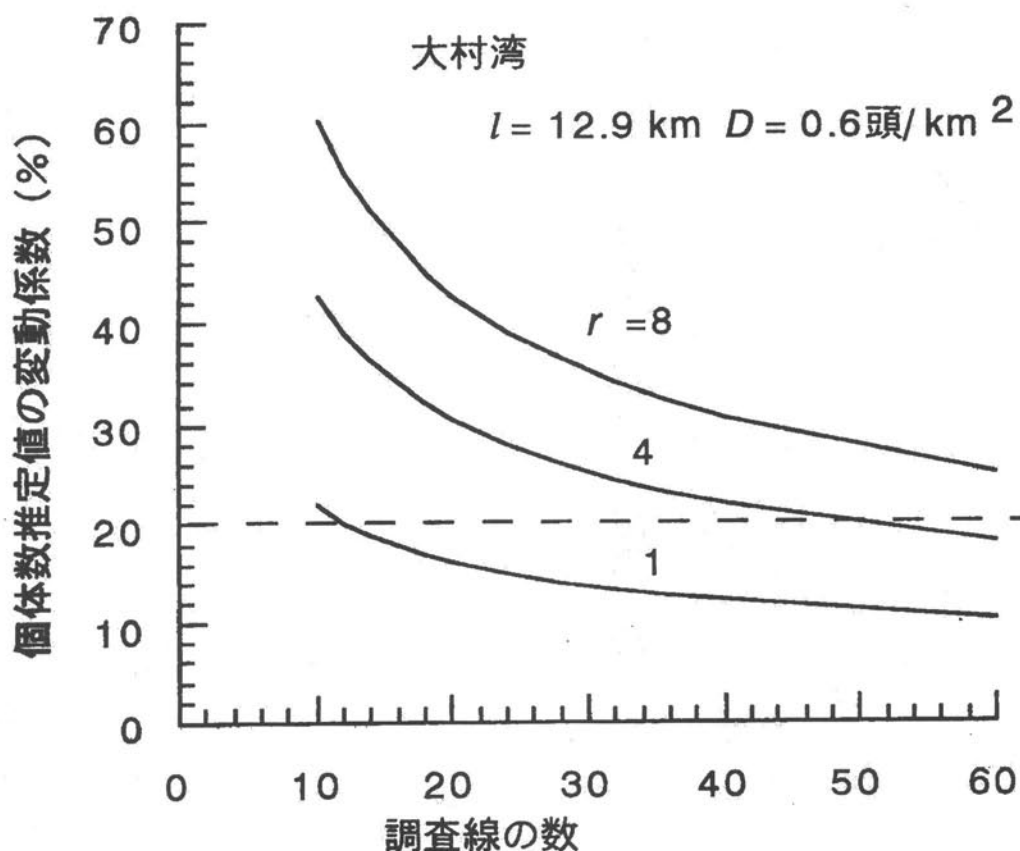


図 1-7 大村湾での 1 回のセスナ機目視調査案から予想される個体数推定精度

1-6 海域別の調査計画

1-6-1 有明海・橘湾

1993-94 年のセスナ機目視調査での調査線の設定を以下のように変更する。

- 1) 橘湾西部の水深 60m 以深域を密度ゼロとみなして調査しない。
- 2) 推定精度を高めるために、有明海・橘湾ともに 2 海里 (緯度 2') 間隔に東西方向の調査線を置き、有明海で 19 本、橘湾で 5 本とする (図 2-1 参照)。個体数推定精度として 20% 以内を目

標とするが、調査時に r が大きく目標精度を下回ることがあるかもしれない (図1-8)。

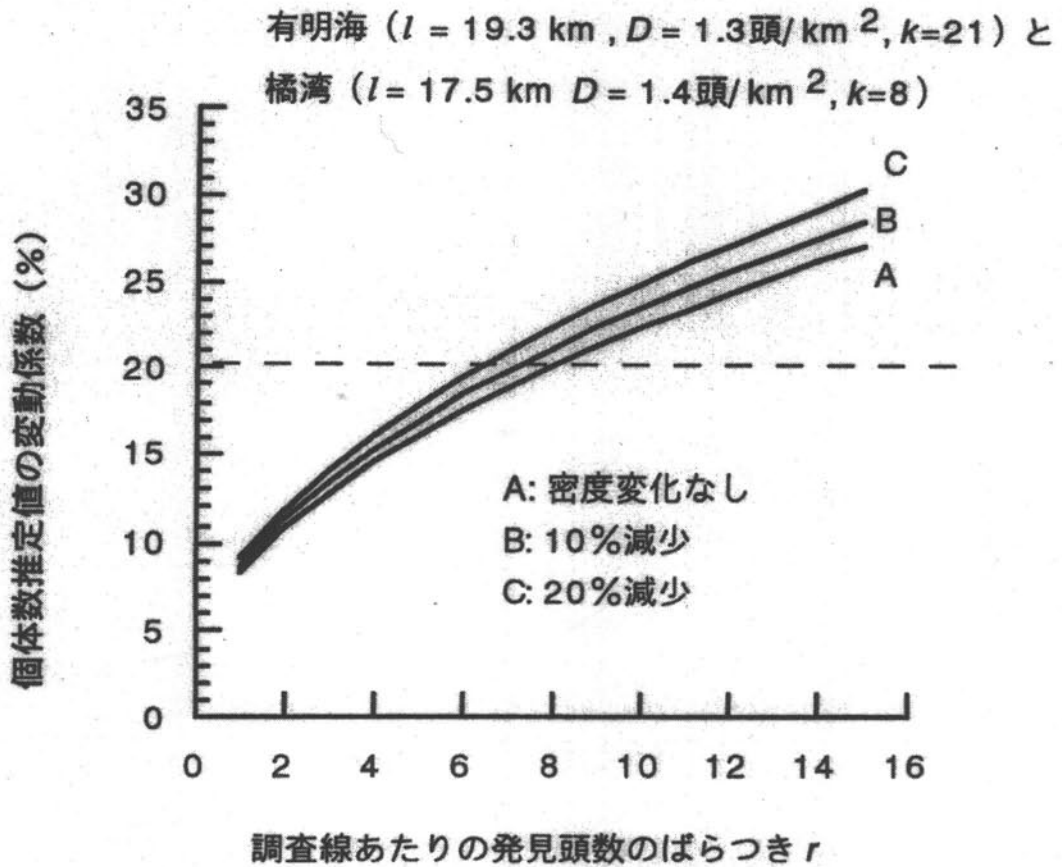


図1-8 有明海・橘湾での調査案から予想される個体数推定精度. 密度 D は 1993-94 の推定値を使用. 今回の調査時までの密度の減少を考慮. $r=4$, D 変化なしを想定した時, 有明海のみ, 橘湾のみ, 海域全体の精度はそれぞれ 17.3, 27.3, 14.3%.

なお, この図では, 有明海, 橘湾で別々に推定精度を求め, 合算して両海域全体の精度を以下の式で求めた.

$$cv[N_{\text{estimated}}] = 1/[N_1(\text{estimated}) + N_2(\text{estimated})] \times \sqrt{[cv[N_1(\text{estimated})]N_1]^2 + [cv[N_2(\text{estimated})]N_2]^2}^{1/2} \quad (1-11)$$

$$N_i(\text{estimated}) = A_i D_i \quad \text{有明海: } i=1, \text{ 橘湾: } i=2$$

1回の飛行時間の制約(1-4-3)を考慮して、飛行回数は3回、調査日数は3日、調査時期は平成11年3月とする。

1-6-2 大村湾

調査線の設定は1993-94年のセスナ機目視調査と同じとする。つまり東西方向に12本の調査線(1海里間隔つまり緯度1'間隔)とする(図2-2参照)。この調査(1本の調査線での探索面積0.5海里)では海域面積の半分を調査することになる。 $D=0.6$ 頭数/km², $r=1$ という楽観的状況(現在の生息密度は1993-94年より減少している可能性と r がもっと大きい可能性)の下、12本の調査線からの個体数推定精度は20.2%である(図1-7)。この程度の精度では、1-3-3で述べたように、個体数の減少の検出には十分とは考えられない。そこで同一日に2回調査を繰り返し、計26本の調査線を置く。のべ飛行時間は約4時間となる。調査時期は平成11年3月とする。

1-6-3 瀬戸内海

南北方向に調査線を設定する。瀬戸内海は有明海より調査面積は広く調査線を長くとれるが、密度は低いと考えられる。決して有利な条件を有していない。さらに、スナメリがほぼ全域的に分布する有明海と異なり、海域内での密度のばらつきが大きいと予想される。したがって r が極めて大きくなり(例えば $r>8$)、推定精度の向上が期待できない(図1-9)。そこで全域を密度の低いと予想される東部(今治の近くの来島海峡以東)と高いと予想される西部に分割する。

案1

東部は9海里間隔に13本、西部は6海里間隔に21本とする。なお、東部については、分布密度の低いと予想される大阪湾と水深60m以深域の割合の高い紀伊水道は調査を行わない。以上の状況での予備的な精度の見積もりを図1-9に示す。東部ではパラメータ(D と r)の値の想定した範囲で精度が100%をゆうに越え、極端に精度が悪く、信頼幅はマイナスの個体数も含んでしまう。この東部の調査は実質的に意味を持たない。(1-11)を用いて形式的に求めた瀬戸内海全域の精度も良くない。