

釣り場作りのためのシミュレーション入門

米沢純爾(東京都)

第7回 禁漁区のモデル化 (1998年TFJ No.14に掲載)

川に魚を増やす方法の1つとして禁漁区の設定が古くから行われている。そこで、禁漁区の効果と課題を検討するために、シミュレーションを行ってみたい。これまで使用してきた溪流資源モデル Ver2.0 には、その能力がないためバージョンアップの作業が必要になる。それに関連し、今回はこれまでの連載の中では最も煩雑な数式が登場するが、釣り場作りの作業のため何とかおつきあい願いたい。

河川のどこに禁漁区を設けるか、また魚がどのように移動するかによってモデルの構造は大きく異なる。ここでは現実に良くありそうなケースを想定するとともに、なるべくシンプルなモデルを作成することに主眼を置く。一般に溪流河川では釣り場の上流側に禁漁区を設けるのが普通であろう。河川の上流部には鱒類の産卵に適した場所が多いことや、禁漁区で再生産された魚が徐々に流下し、下流の釣り場において釣獲が期待されることが、その利点と考えられる。

従って、ここでは図1に示したように河川の最上流部に禁漁区があり、その下流側が釣り場、更にその下流部は鱒類の生息に適さない区域がある場合を想定し、それらを順にA区、S区、C区とする。加えてモデルをシンプルにするため3区間には滝や堰堤等があり魚は流下するだけで、遡上はできないものとする。流下した魚がもとの棲み場へ遡上できないような河川は、残念ながら今の日本にはごく普通にみられるであろう。

溪流資源モデル Ver2.0 では、魚の減耗要因を漁獲死亡と自然死亡の2つに区分し、移動による釣り場外への逸散は自然死亡の一部に含めてモデルを構築したが、これからは寿命や捕食動物等による減耗を自然死亡と呼び、流下による減耗とは区別することにする。そこでこれまで使用してきた全減少係数Z、漁獲係数F、自然死亡係数Mに加え、新たに流下係数Vを考慮することにする。この流下係数Vは、ある瞬間の生息数に対する流下数の割合である。流下係数は厳密には生息場所、季節、魚の年齢等によって異なるであろうが、それらを全て考慮すると非常に複雑なモデルになってしまうため、ここでは生息場所による差異のみを考慮し、季節と年齢による差異は無いものとみなす。流下した魚は流下先の区間内に速やかに広がって分布するものとし、自然死亡係数については生息場所による差異がないものとする。以上で移動モデルに関する基本設定ができたので、各区の生息数を表す式を算出しよう。

禁漁区における生息数の変動:

はじめに禁漁区(A区)における生息数の変動について検討する。ある年の産卵日に、A区にj才魚(加入済み群)が N_A 尾生息しているとする。A区における流下係数を V_A 、全減少係数を Z_A とすると、この区では周年釣りが行われないので全減少係数は期間に関係なく一定である。

すなわち、

$$Z_A = M + V_A$$

産卵日から t 日後の生残率を S_{At} とすると、既に何度も使用してきた生残モデルにより、

$$S_{At} = e^{-Z_A \cdot t}$$

従って、産卵日から t 日後の生息数を N_{At} とすると、

$$N_{At} = N_A \cdot S_A = N_A \cdot e^{-Z_A \cdot t} \quad \text{①式}$$

図2に示したように①式は単調に減少する曲線を描く。なお、これから行う作業は産卵日から t 日後における生息数や釣獲数を表す式を求めることである。「産卵日から日後」という語句が頻繁に登場し、冗長な表現になるのを避けるため、以後はこれを単に t 日あるいは t と表現することにする。実際には鱒類の産卵は長期にわたって行われるが、溪流資源モデルではモデルの構造を簡潔にするため、全親魚が同じ日の午前0時に産卵すると想定されていることも、ご承知いただきたい。

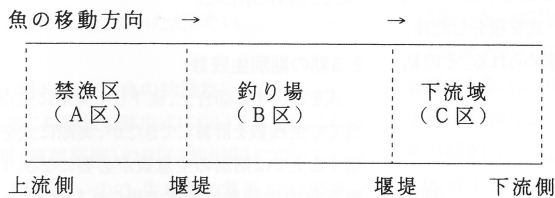


図1. 区間の設定と魚の移動方向

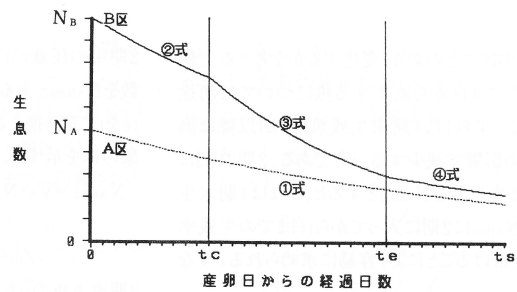


図2. 禁漁区と釣場における産卵日当初生息魚の生息数変動

釣場当初生息魚の動向:

続いて、釣り場(B区)に産卵日当初から生息している魚について、生息数の変動を検討しよう。B区の流下係数を V_B 、産卵日の生息数を N_B とする。B区では全減少係数が一定ではないため、生残率を期間ごとに検討する必要がある。産卵日から解禁までを1期、解禁期間中を2期、終漁から次の産卵日までを3期とし、各期の全減少係数をそれぞれ Z_{B1} 、 Z_{B2} 、 Z_{B3} と添字で区別すると、

$$Z_{B1} = Z_{B3} = M + V_B$$

$$Z_{B2} = F + M + V_B$$

t 日が1期に当たる場合は、 t 日までの生残率を

S_{B1t} とすると、

$$S_{B1t} = e^{-Z_{B1} \cdot t}$$

従って、 t 日の生息数を N_{Bt1} とすると、

$$N_{Bt1} = N_B \cdot S_{B1t} = N_B \cdot e^{-Z_{B1} \cdot t} \quad \text{②式}$$

t 日が2期に当たる場合には、1期と2期で全減少係数が異なるので、生残率を2段階に分けて計算しなければならない。1期の生残率を S_{B1} とすると、1期の日数は t_c であるから、

$$S_{B1} = e^{-Z_{B1} \cdot t_c}$$

2期に入ってから t 日までの生残率を S_{B2t} とすると、この間の日数は $t-t_c$ なので、

$$S_{B2t}=e^{-ZB2 \cdot (t-t_c)}$$

従って、t日の生息数を N_{B2t} とすると、

$$N_{B2t}=N_B \cdot S_{B1} \cdot S_{B2t}=N_B \cdot e^{-ZB1 \cdot t_c} \cdot e^{-ZB2 \cdot (t-t_c)} \quad \text{③式}$$

t日が3期に当たる場合には、生残率を段階に分けて計算しなければならない。1期の生残率については上記の通りである。

2期の生残率を S_{B2} 、とすると、2期の日数は t_e-t_c であるから

$$S_{B2}=e^{-ZB2 \cdot (t_e-t_c)}$$

3期に入ってから t 日までの生残率を S_{B3t} とすると、この間の日数は $t-t_c$ であるから、

$$S_{B3t}=e^{-ZB3 \cdot (t-t_c)}$$

従って、t日の生息数を N_{B3t} とすると、

$$\begin{aligned} N_{B3t} &= N_B \cdot S_{B1} \cdot S_{B2} \cdot S_{B3t} \\ &= N_B \cdot e^{-ZB1 \cdot t_c} \cdot e^{-ZB2 \cdot (t_e-t_c)} \cdot e^{-ZB3 \cdot (t-t_e)} \quad \text{④式} \end{aligned}$$

②～④式を図2に示した。利用者の多い釣り場では解禁期間中に生息数が大きく減少するため、当初の生息数が禁漁区よりはるかに多くても1年後には両者の差が縮まったり、あるいは逆転するようなケースも生じる。

禁漁区から釣場への流下数:

さて、本題はA区からB区へ流下する魚について、生息数の変動を数式化することである。最初にも述べたように、今回は指数満載の長々しい式が続出するうえ、積分まで登場する。閉口される向きもあろうが、高校時代に学んだ数学が実際に役に立つと思えば喜ばしくもあろう。なるべく易しく解説するように努めるので、おつき合い願いたい。

はじめに流下数を算出するための基本式を示す。ある瞬間におけるA区からB区への瞬間流下数を NV_t とすると、

$$NV_t = V_A \cdot N_{At} = V_A \cdot N_A \cdot e^{-Z_A \cdot t} \quad \text{⑤式}$$

これはご覧の通り、流下係数 V_A に t におけるA区生息数 N_{At} を掛けたものである。A区からB区へは連続的に流下するが、A区生息数が時間とともに減少するため、図に示したように瞬間流下数も同様に減少する。⑤式で得られる値はあくまでも瞬間の流下数であるから、産卵日から t 日までの累積流下数が必要な場合には、⑤式を0から t まで積分する必要がある。

1期流下魚の生息数:

流下魚は、流下した瞬間からB区の減耗要因によって減少するが、上記したようにB区では全減少係数が一定ではないため、期間ごとに検討する必要がある。始めに1期にA区からB区に流下する魚(以下、1期流下魚という)について生残数の算出式を求める。まず、1期のある瞬間 t に流下した魚について考えよう。この魚の1期末における生残数を NV_{t/t_c} とする。t～ t_c の日数は t_c-t であるから、この間の生残率を S_{B1t/t_c} とすると、

$$S_{B1t/t_c} = e^{-ZB1 \cdot (t_c-t)} \quad \text{⑥式}$$

図3に⑥式を示した。当然ながら早い時期に流下した魚ほど生残率は低い。瞬間 t の流下数

NV_tに、tからtcまでの生残率を掛けたものが、1期末の生残数NV_{t/tc}であるから、

$$NV_{t/tc} = NV_t \cdot SB_{1t/tc} = VA \cdot NA \cdot e^{-ZA \cdot t} \cdot e^{-ZA \cdot (tc-t)} \quad \text{⑦式}$$

⑦式は図3に示したような曲線になる。この⑦式の値は上記したように、ある瞬間に流下した魚の1期末における生残数である。従って、⑦式からtcまで積分することにより、1期流下魚の1期末生残数を求めることができる。その値をN_{AB1tc}とし、実際に計算してみよう。

$$N_{AB1tc} = \int_0^{tc} VA \cdot NA \cdot e^{-ZA t} \cdot e^{-ZB_1 \cdot (tc-t)} dt \quad \text{⑧式}$$

積分に関係しない係数を外へ出すと、

$$N_{AB1tc} = VA \cdot NA \cdot e^{-NB_1 \cdot tc} \cdot \int_0^{tc} e^{(ZB_1 - ZA) \cdot t} dt \quad \text{⑧' 式}$$

いよいよ積分をするのであるが、ご承知のようにe^xという関数は微分積分には極めて都合にできている。e^xは微分しても積分しても答えはe^xであるという優れものである(正確には不定積分ではe^x+cというように定数がつく)。もし、この便利な指数がベースになっていなければ、この後の積分式はいっそう複雑なものになったであろう。なお、Xに係数が付く場合は、

$$\int e^{a \cdot x} dx = e^{a \cdot x} / a + C$$

蛇足ながら、指数関数の基礎を遙か昔にお忘れになった方もおられるかと思うので参考までに、

$$e^a \times e^b = e^{(a+b)}$$

$$e^a \div e^b = e^a \times e^{-b} = e^{(a-b)}$$

$$e^0 = 1$$

これらの関係から⑧'式は簡単に積分できる。

$$\begin{aligned} N_{AB1tc} &= VA \cdot NA \cdot e^{-ZB_1 \cdot tc} \cdot \left[e^{(ZB_1 - ZA) \cdot t} \right]_0^{tc} / (ZB_1 - ZA) \\ &= VA \cdot NA \cdot e^{-ZB_1 \cdot tc} \{ e^{(ZB_1 - ZA) \cdot tc} - 1 \} / (ZB_1 - ZA) \\ &= VA \cdot NA (e^{-ZA \cdot tc} - e^{-ZB_1 \cdot tc}) / (ZB_1 - ZA) \quad \text{⑨式} \end{aligned}$$

この結果はZ_{B1}-Z_A=0の場合には、分母が0になり不都合である。

その場合には、⑦式のe^{(Z_{B1}-Z_A)・t}の項に、Z_{B1}-Z_A=0を代入後、積分すればよい。途中の計算を省略し、結果のみを書くと、

$$N_{AB1tc} = VA \cdot NA \cdot tc \cdot e^{-ZB_1 \cdot tc} \quad \text{⑨' 式}$$

興味のおありの方はご自分で途申の計算して見ていただきたい。⑨、⑨'式は1期末tcにおける生残数であるが、1期の任意のtにおける生残数はtcをtに置き換えることにより得られる。1期流下魚のt日における生残数をN_{AB1t1}とすると、

$Z_{B1}-Z_A \neq 0$ の場合、

$$N_{AB1t1}=V_A \cdot N_A \cdot (e^{-Z_A \cdot t}-e^{-Z_{B1} \cdot t}) / (Z_{B1}-Z_A) \quad \text{⑩式}$$

$Z_{B1}-Z_A=0$ の場合、

$$N_{AB1t1}=V_A \cdot N_A \cdot t \cdot e^{-Z_{B1} \cdot t}$$

なお、2期、3期についても $Z_{B2}-Z_A \neq 0$ の場合と $Z_{B2}-Z_A=0$ のような場合分けが必要になるが、煩雑になるのでこれ以降は Z_{B1} 、 Z_{B2} 、 Z_{B3} のいずれも Z_A とは等しくないものとして話を進める。

次に、⑨式で算出した1期末生残数 N_{AB1tc} が、2期のB区でどのように変化するかを考える。2期に新たにA区から流下する魚については別途考えるとすれば、1期末生残魚は2期以降は漁獲等の影響で減少する一方である。2期のt日における生息数を N_{AB1t2} とすると、これは1期末生残数 N_{AB1tc} に2期に入ってからt日までの生残率 S_{B2t} を掛けることにより容易に求められる。すなわち、

$$\begin{aligned} N_{AB1t2} &= N_{AB1tc} \cdot S_{B2t} \\ &= V_A \cdot N_A \cdot (e^{-Z_A \cdot tc}-e^{-Z_{B1} \cdot tc}) \\ &\quad \cdot e^{-Z_{B2} \cdot (t-tc)} / (Z_{B1}-Z_A) \quad \text{⑪式} \end{aligned}$$

同様に、1期流下魚が3期のt日にどのくらい生残しているかを考える。それを算出するには⑨式に2期中の生残率 S_{B2} と、3期に入ってからtまでの生残率 S_{B3t} を掛ければよい。3期のt日における生残数を N_{AB1t3} とすると、

$$\begin{aligned} N_{AB1t3} &= N_{AB1tc} \cdot S_{B2} \cdot S_{B3t} \\ &= V_A \cdot N_A \cdot e^{-Z_{B2} \cdot (te-tc)} \cdot e^{-Z_{B3} \cdot (t-te)} \cdot (e^{-Z_A \cdot tc}-e^{-Z_{B1} \cdot tc}) / (Z_{B1}-Z_A) \quad \text{⑫式} \end{aligned}$$

⑩～⑫式を図4に示した。1期中はA区からの流下があるので、生残数は徐々に増加するが、2期以降は減少を続ける。

2期流下魚の生残数:

2期中にA区からB区へ流下した魚の、2期末における生残数を算出する。1期と同様の考え方により、⑧式の積分期間を $t_c \sim t_e$ に、B区における生残率を $e^{-Z_{B2} \cdot (te-t)}$ にそれぞれ変更して計算すればよい。2期流下魚の2期末生残数 N_{AB2te} とすると、

$$N_{AB2te} = \int_{t_c}^{t_e} V_A \cdot N_A \cdot e^{-Z_A \cdot t} \cdot e^{-Z_{B2} \cdot (te-t)} dt$$

式が多くなるので計算結果は割愛する。2期中の任意のt日における、2期流下魚の生残数を N_{AB2t2} とすると、これは上式を積分した後、 t_e をtに置き換えることにより求められる。その結果のみを示すと、

$$N_{AB2t2}=V_A \cdot N_A \cdot e^{-Z_A \cdot tc} \cdot \{e^{-Z_A \cdot (t-tc)}-e^{-Z_{B2} \cdot (t-tc)}\} / (Z_{B2}-Z_A) \quad \text{⑬式}$$

2期流下魚のうち、3期のtまで生残する魚の数を N_{AB2t3} とすると、これに2期末生残数 N_{AB2te} に3期に入ってからtまでの生残率 S_{B3t} を掛ければ求められる。すなわち、

$$\begin{aligned} N_{AB2t3} &= N_{AB2te} \cdot S_{B3t} \\ &= V_A \cdot N_A \cdot e^{-Z_A \cdot tc} \cdot e^{-Z_{B3} \cdot (t-te)} \cdot \{e^{-Z_A \cdot (te-tc)}-e^{-Z_{B2} \cdot (te-tc)}\} / (Z_{B2}-Z_A) \quad \text{⑭式} \end{aligned}$$

図4に示したように⑬式は単調増加、⑭式は単調減少を示す。

3期流下魚の生残数:

産卵日から翌年の産卵日までの日数を t_s 、3期中にA区からB区へ流下してきた魚の3期末生残数を N_{AB3t_s} とすると、1期と同様の考えで、⑧式の積分期間を $t_e \sim t_s$ に、B区における生残率を $e^{-Z_B \cdot (t_s-t)}$ にそれぞれ変更して計算すればよい。

すなわち、

$$N_{AB3t_s} = \int_{t_e}^{t_s} V_A \cdot N_A \cdot e^{-Z_A \cdot t} \cdot e^{-Z_B \cdot (t_s-t)} dt$$

これについても計算結果を割愛し、3期中の任意の t 日における、3期流下魚の生残数を示す式のみを記載する。すなわち、3期流下魚の任意の t 日における生残数を N_{AB2t3} とすると、

$$N_{AB2t3} = V_A \cdot N_A \cdot e^{-Z_A \cdot t_c} \cdot \{e^{-Z_A \cdot (t-t_e)} - e^{-Z_B \cdot (t-t_e)}\} / (Z_B - Z_A) \quad \text{⑮式}$$

⑮式を図4に示した。

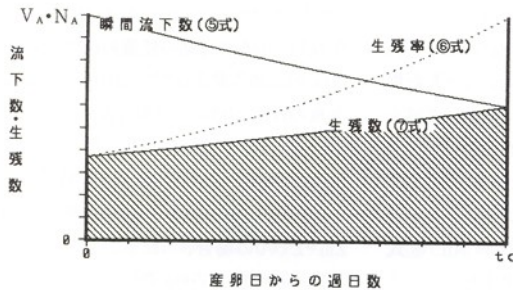


図3. 1期の瞬間 t に流下した魚の1期期末までの生残率と生残数

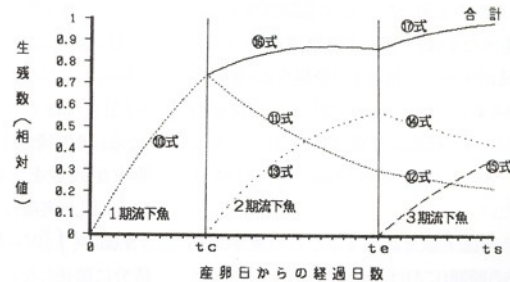


図4. 禁漁区から釣り場に流下した魚の生残数

2、3期の期別生残数:

式を算出する都合上、流下した時期に焦点を当てて生残数を計算してきたが、実際に式を利用する上では期別の生息数が必要になる。1期流下魚の生残数は⑩式で得られるもののみである。2期には、1期流下魚の生残魚と、2期中に新たに流下してくる魚が混在している。従って2期の t 日における生息数を N_{AB12t2} とすると、これは⑪式と⑬式を合計したものである。すなわち、

$$\begin{aligned} N_{AB12t2} &= N_{AB1t2} + N_{AB2t2} \\ &= V_A \cdot N_A \cdot e^{-Z_B(t-t_c)} \cdot (e^{-Z_A \cdot t_c} - e^{-Z_{B1} \cdot t_c}) / (Z_{B1} - Z_A) + V_A \cdot N_A \cdot e^{-Z_A \cdot t_c} \\ &\quad \cdot \{e^{-Z_A \cdot (t-t_c)} - e^{-Z_{B2} \cdot (t-t_c)}\} / (Z_{B2} - Z_A) \quad \text{⑯式} \end{aligned}$$

3期には1期流下魚の生残魚、2期流下魚の生残魚、及び3期に新たにA区から流入してくる魚の3種類がある。3期中の任意の t 日における、流下魚の生残数を N_{ABt3} とすると、これは⑫式、⑭式、⑮式を合計したものである。従って、

$$\begin{aligned} N_{ABt3} &= N_{AB1t3} + N_{AB2t3} + N_{AB3t3} \\ &= V_A \cdot N_A \cdot e^{-Z_{B2}(t-t_c)} \cdot e^{-Z_{B3} \cdot (t-t_e)} \cdot (e^{-Z_A \cdot t_c} - e^{-Z_{B1} \cdot t_c}) \\ &\quad / (Z_{B1} - Z_A) + V_A \cdot N_A \cdot e^{-Z_A \cdot t_c} \cdot e^{-Z_{B3} \cdot (t-t_e)} \cdot \{e^{-Z_A \cdot (t-t_c)} - e^{-Z_{B2} \cdot (t-t_c)}\} \\ &\quad / (Z_{B2} - Z_A) + V_A \cdot N_A \cdot e^{-Z_A \cdot t_e} \cdot \{e^{-Z_A \cdot (t-t_e)} - e^{-Z_{B3} \cdot (t-t_e)}\} / (Z_{B3} - Z_A) \quad \text{⑰式} \end{aligned}$$

この辺でそろそろリタイアされたくなくなった方もおられるかもしれないが、あともう少しの辛抱である。この機会に頭の体操を十分にしておくことは、将来のボケ防止に多大な効果が期待される?ので是非がんばっていただきたい。

釣り場当初生息魚の釣獲数:

次に釣獲数の算出式について考える。これは2期(解禁期間)のB区(釣り場)についてのみ考えればよいので、生息数の算出よりは簡単である。2期に釣獲対象となるのは、産卵日から解禁日までB区に生残していた魚、1期中にA区から流下し2期始めまでB区に生残していた魚、2期中にA区からB区に流下する魚の3種類である。以下、それぞれについて釣獲尾数の算出式を求める。

はじめに産卵日当初からB区に生息している魚について検討する。解禁日の生息数を N_{Btc} とすると、これは②式の t に t_c を代入すれば求められる。すなわち、

$$N_{Btc} = N_B \cdot e^{-Z_B \cdot t_c}$$

解禁期間中の任意の t 日までの釣獲数を C_{Bt} とすると、 t_c から t までの生残率が S_{B2t} であるから、これまで何度も使用してきた漁獲モデルにより、

$$\begin{aligned} C_{Bt} &= F \cdot N_{Btc} \cdot (1 - S_{B2t}) / Z_{B2} \\ &= F \cdot N_B \cdot e^{-Z_{B1} \cdot t_c} \cdot \{1 - e^{-Z_{B2} \cdot (t - t_c)}\} / Z_{B2} \end{aligned}$$

1期流下魚の釣獲数:

次に1期流下魚の釣獲数について検討しよう。1期流下魚の2期当初における生息数 N_{AB1tc} は⑨式で求められる。 $t_c \sim t$ までの生残率が S_{B2t} であるから、 t 日までの釣獲数を C_{AB1t} とすると、通常の漁獲モデルにより、

$$\begin{aligned} C_{AB1t} &= F \cdot N_{ABtc} \cdot (1 - S_{B2t}) / Z_{B2} \\ &= F \cdot V_A \cdot N_A \cdot (e^{-Z_A \cdot t_c} - e^{-Z_{B1} \cdot t_c}) \cdot \{1 - e^{-Z_{B2} \cdot (t - t_c)}\} / Z_{B2} / (Z_{B1} - Z_A) \end{aligned} \quad \text{⑱式}$$

2期流下魚の釣獲数:

2期流下魚の釣獲数を算出するには積分が必要である。 t における瞬間流下数 N_{vt} は⑤式で求められるが、このうち終漁 t_e までに釣獲される魚の数を C_{t/t_e} とする。

また、流下から終漁までの生残率を S_{B2t/t_e} とすると、この間の日数は $t_e - t$ であるから、

$$S_{B2t/t_e} = e^{-Z_{B2} \cdot (t_e - t)}$$

通常の漁獲モデルにより、

$$\begin{aligned} C_{t/t_e} &= F \cdot N_{vtc} \cdot \{1 - e^{-Z_{B2} \cdot (t_e - t)}\} / Z_{B2} \\ &= F \cdot V_A \cdot N_A \cdot e^{-Z_A \cdot t} \cdot \{1 - e^{-Z_{B2} \cdot (t_e - t)}\} \end{aligned} \quad \text{⑲式}$$

図5に⑲式を示した。これはある瞬間 t に流下した魚のうち、終漁日までに釣獲される魚の数を示す式である。2期流下魚のうち、解禁期間中に釣獲される魚の数を C_{AB2te} とすると、これを求めるには⑲式を $t_c \sim t_e$ の期間について積分すればよい。従って、

$$C_{AB2te} = \int_{t_c}^{t_e} F \cdot V_A \cdot N_A \cdot e^{-Z_A \cdot t} \cdot \{1 - e^{-Z_{B2} \cdot (te-t)}\} / Z_{B2} dt$$

途中の計算を省略して計算結果のみを示すと、

$$C_{AB2te} = F \cdot V_A \cdot N_A \cdot [(e^{-Z_A \cdot t_c} - e^{-Z_A \cdot t_e}) / Z_A - e^{-Z_{B2} \cdot t_e} \cdot \{e^{(Z_{B2}-Z_A) \cdot t_e} - e^{(Z_{B2}-Z_A) \cdot t_c}\} / (Z_{B2}-Z_A)] / Z_{B2}$$

解禁期間中の任意の t 日までの釣獲数を C_{AB2t} とすれば、その算出式は上式の t_e を t に置き換えたものである。すなわち、

$$C_{AB2t} = F \cdot V_A \cdot N_A \cdot [(e^{-Z_A \cdot t_c} - e^{-Z_A \cdot t}) / Z_A - e^{-Z_{B2} \cdot t} \cdot \{e^{(Z_{B2}-Z_A) \cdot t} - e^{(Z_{B2}-Z_A) \cdot t_c}\} / (Z_{B2}-Z_A)] / Z_{B2} \quad \text{⑳式}$$

従って、1期当初から2期末にかけ、A区からB区へ流下した魚の釣獲数を C_{ABt} とすると、これは⑱式と⑳式を合計した値であるから、

$$C_{ABt} = C_{AB1t} + C_{AB2t} = F \cdot V_A \cdot N_A \cdot (e^{-Z_A \cdot t_c} - e^{-Z_{B1} \cdot t_c}) \cdot \{1 - e^{-Z_{B2} \cdot (t-t_c)}\} / Z_{B2} \\ + F \cdot V_A \cdot N_A \cdot [(e^{-Z_A \cdot t_c} - e^{-Z_A \cdot t}) / Z_A - e^{-Z_{B2} \cdot t} \cdot \{e^{(Z_{B2}-Z_A) \cdot t} - e^{(Z_{B2}-Z_A) \cdot t_c}\} / (Z_{B2}-Z_A)] / Z_{B2} \quad \text{㉑式}$$

⑱、⑲、⑳式を図に示した、撮初に述べたように生残数、釣獲数ともに非常に長々しい式になってしまったが、最も簡単な移動様式を想定してもモデルとしてはこれだけ複雑になってしまうことをご理解いただきたい。煩雑な式の算出に最後までおつき合いただき感謝申し上げます。この数式を用いたシミュレーションは次回に行う予定である。

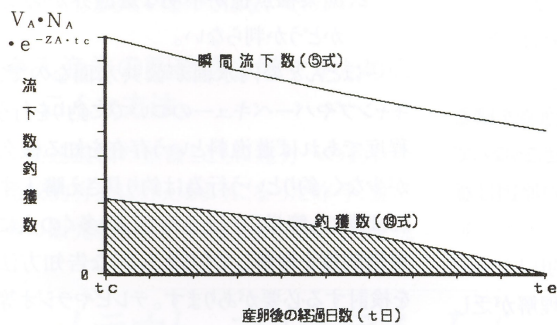


図5. ある瞬間tに流下した魚の2期末釣獲数

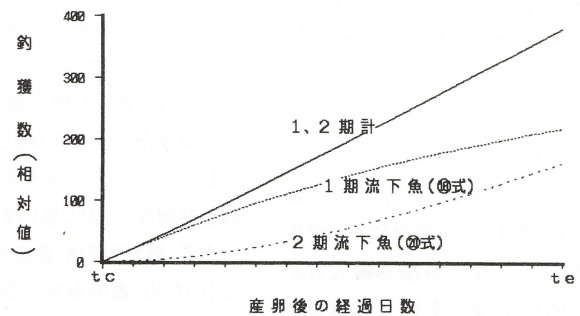


図6. 禁漁区から流下した魚の釣獲数