

報 文

誘蛾燈に飛來する蛾類種數並び
に個體數の數學的取扱

鳥 居 酉 藏 Torizo TORII

東京文理科大學動物學教室

昭和14年3月11日受領

I 緒 論

筆者は昨夏下田にて誘蛾燈に飛來する蛾の種數並びに個體數の時間的累積値に著目して少く数学的考察を試みた。然るに蛾類の時間的累積狀況は種數に於いては單分子反應式が適用され、個體數に關しては最小自乘線の適用が可能なることを察知し得たので茲に之を報告する。本文に入るに先だち終始指導誘掖せられた恩師八木誠政博士に衷心より深謝し、同定等に便宜を與へられた農事試験場技師河田薫氏に謝意を表する。

II 一般的飛來現象

筆者は昨夏下田にて一地點(11)に於いて數夜繼續的に蛾類の燈火採集を行ひ其の結果として種數並びに個體數の飛來狀況に關し次の如き成績を得た。即ち(1)徹宵成績は種數總計に於いても個體數總和に於いても各夜に於いて略々近似し、殊に種數は薄暮と薄明期を除けば各時間小計が概略近似してゐる。(2)かかる關係は同一環境内に季節を同じうして生棲する蛾類の何れが關與しても大した差がない。依つて生態學の見地より次の如き考察が可能となる。凡そ蛾類が燈火に集光し得るには先づ固有の最適照度(19)(22)以内に居合はすことが先決條件となり、従つて光源の照度と環境内の蛾類相とが關係して來る。今一定時間内に飛來せし蛾類の種數或は個體數を X_i とせば、之は光源の光學的諸性特に誘蛾可能全照度(E)と蛾相の貧富に關聯し一義的に決定さるべく、若し種數或は個體數を單位とする密度を D_a とすると

$$X_i = K_i \cdot E \cdot D_a \dots \dots \dots (1)$$

$$\therefore \sum X_i = E(K_1 D_{a1} + K_2 D_{a2} + \dots + K_t D_{at})$$

$$= \sum_{K, D_a=1}^t K \cdot D_a \cdot E \text{ となし得やう。}$$

即ち蛾相が豊富ならば一定光源に飛來する狀況も盛なるべく、従つて時間別の數値は蛾相の時間的衰退に伴つて減少しなければならぬ。然るに前二項に擧げた如き結果が見られるのは、畢竟各種蛾類が廣き環境内に於いて多數混在する場合には、其等の固有最適照度と活動性の周期(4)及び光源に對する空間的位置の相異等に依る統計學的性質の必然から、有効照度内で趨光可能状態に置かれる蛾類の數が各經過時間を通じて略々近似する結果と解され、

活動状態に伴ひ有効照度内に他から移入したり、又は遮蔽の位置を脱して集光するに到る数は、外的條件に變化なき限り、時間的に一樣に保持されると見てよい。従つて累積値は時間に伴ひ比例的に増加するものと假定し得やう。

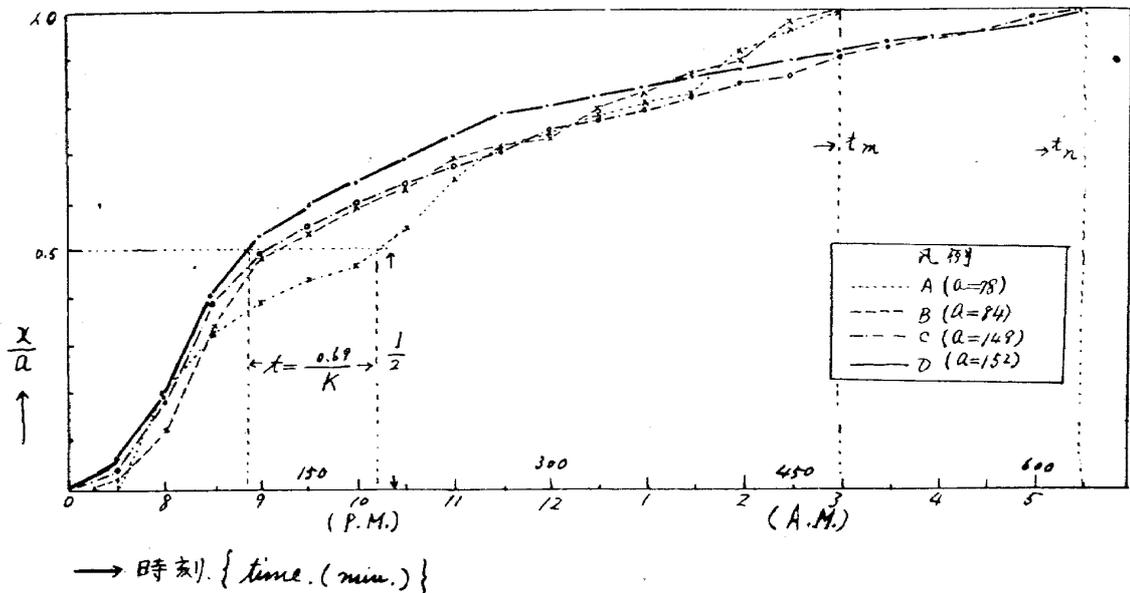
故に $K_1 D_{a1} \doteq K_2 D_{a2} \doteq K_3 D_{a3} \doteq \dots \doteq K_t D_{at}$ より

$$\sum_{K, Da=1}^t K \cdot D_a \doteq K \cdot D_a \cdot t$$

依つて $\sum X_i \doteq K \cdot E \cdot D_a \cdot t \dots \dots \dots (2)$

III 種數累積値

時間的累積値曲線を作圖すれば個體數に於いては果して正しく直線状 (9.11) を呈するが種數のそれは恰も拋物線状をなし決して直線とは見做されない (第1圖)。



第 1 圖

(i) 該當數式 これは種類累積値が取扱上重複を避け一度集光せる種は以後累加せぬ爲結果に於いて上記の D_a があたかも時間に対応して減少して行く形となり、其値も時間別種數の總和即ち $\sum X_i$ では表現し得なくなることに起因するのである。結局新たに飛來した種のみ著目する譯であるが、種の活動周期と場の觀念を無視しては推論の不可能なることは少しも變らない。今終夜中に飛來せるものが a 種を算し、一定時間迄に x 種累積されたとすると累積値曲線の傾向から、 x の時間的增加と之に伴ふ $(a-x)$ の減少とは互に一定の數理的關係にある如く判斷される。依つてこの關係を次の如く假定して見る。即ち

$$\frac{dx}{dt} = K(a-x) \dots \dots \dots (3)$$

$$-\ln(a-x) = Kt + C$$

然るに $t=0$ の時 $x=0$, $\therefore -\ln(a-0) = 0 + c$, 即ち

$$c = -\ln a, \text{ 依つて } -\ln(a-x) = Kt - \ln a \dots \dots \dots (4)$$

之より $K = 1/t \ln \frac{a}{a-x}$

或は $K = 2.3026 \frac{1}{t} \log \frac{a}{a-x}$

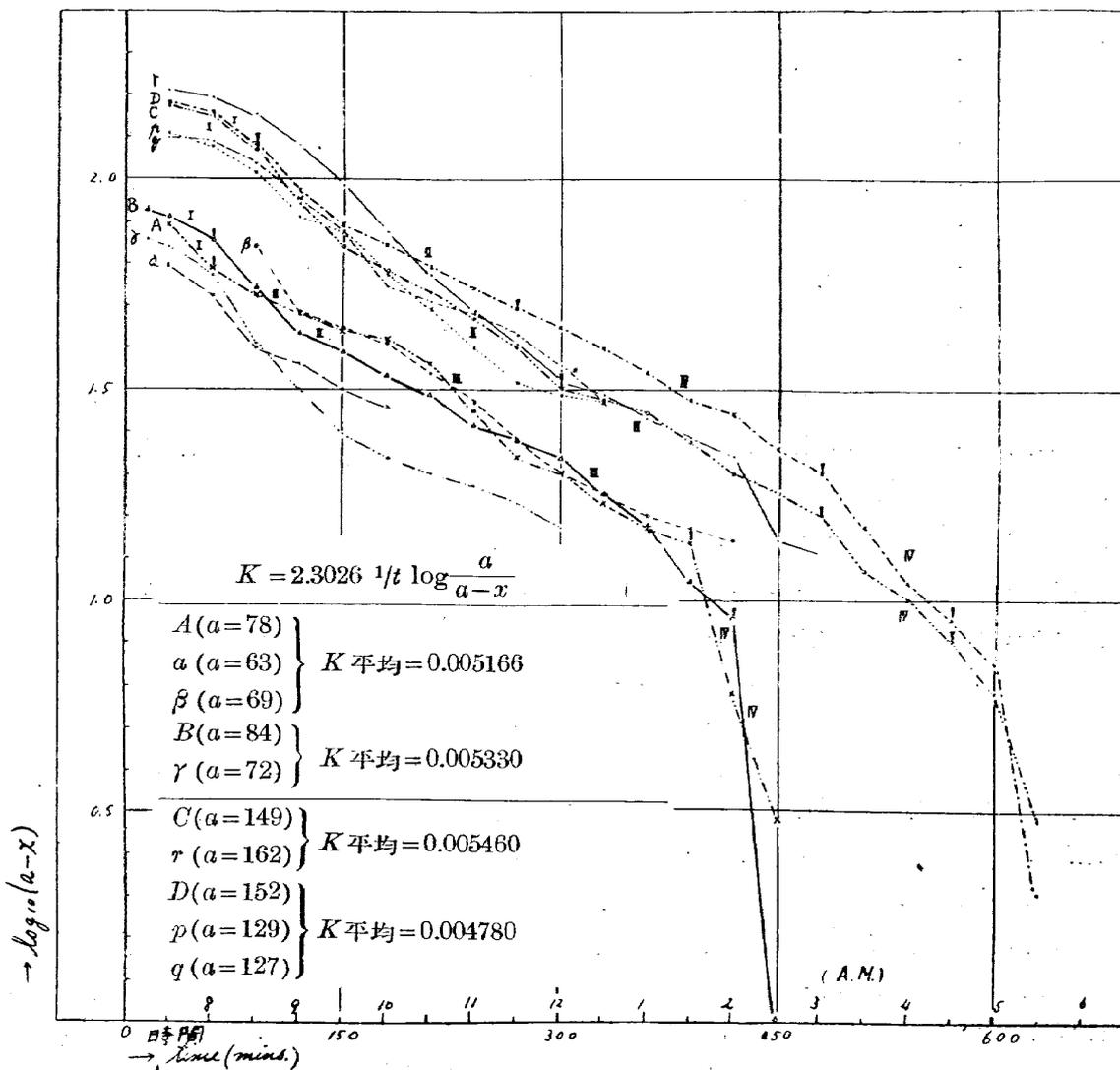
} (5)

之は恰も單分子反應式と數學的表現を同ふし、特殊な複利的増加 (1, 2, 3) を辿る事を示すもので、累積値曲線が一次反應式の曲線と類似した型をしてゐる事とよく符合してゐる。筆者はより正確を期する爲、(4) を變形して

$$a-x = ae^{-kt} \dots \dots \dots (6)$$

従つて $\log(a-x) = \log a - kt \log e$

即ち K が一定ならば $\log(a-x)$ を時間的に plot して得られる半對數曲線は直線となるといふ一般性を利用した。之には筆者の資料のみならず野村氏の資料 (9) も借用し、之等より 4 個の半對數曲線 (第 2 圖 A, B, C, D) を作圖した。



第 2 圖 陽趨光性蛾類の種類累積傾向(誘蛾燈より見たる)を示す半對數曲線

然るに何れも夫々各地毎に同様な下向進行系列 (8) を呈し薄明期を除けば大體直線となつた。故に (5) 式より K の値を計測せしに (第 1-2 表). 之も亦薄明, 薄暮の兩期を除き各系 $\frac{5}{10000}$ 内外の差で近似的に一致し, 一次反應式の適用可能性は一層明確となつた。

第 1 表

第 2 表

時間 (分)	x	$K=2.3026$ $1/t \log \frac{a}{a-x}$	各區の K の平均値	K の總 平均値	時間 (分)	x	$K=2.3026$ $1/t \log \frac{a}{a-x}$	各區の K の平均値	K の總 平均値
30	16	0.007650	(I)	0.005166 ($a=78$)	15	2	0.001604	0.002564 (I)	0.005330 ($a=84$)
60	25	0.006440			0.005534 (II)	45	12		
90	30	0.005394	0.004807 (III)			75	29	0.005647	
120	34	0.004770			0.007242 (IV)	105	41	0.006376	
150	36	0.004127	(IV)			135	45	0.005700	
180	42	0.004295			—	165	50	0.005481	
210	50	0.004878	—			195	53	0.005112	
240	56	0.005273			—	225	58	0.005212	
270	58	0.005040	—			255	60	0.004913	
300	61	0.005076			—	285	62	0.004701	
330	63	0.004995	—			315	66	0.004890	
360	65	0.004977			—	345	69	0.004993	
390	72	0.006727	—			375	73	0.005421	
420	75	0.007757			—	405	75	0.005515	
450	78	—	—	435		83	0.010186		
					465	84	—		

氣 温 | 23°—21.5° (—1.5°)

氣 温 | 23.8°—20° (—3.8°)

(昭和 13 年 7 月 27 日, 下田)

(昭和 13 年 7 月 28 日, 下田)

(ii) K の吟味 以上の考察に基けば累積種數の時間的消長は K の値に直接現はるべきで、之の吟味は飛來狀況究明の一方便となるであらう。筆者は K の値の周期的變化に基いて一夜間を 4 又は 5 の時期に區劃した所其の時刻は各夜略々一致せる事を見た。何れの資料も其の總數に關はらず、之等の中間の期間、即ち終夜の大部分は、半對數曲線では直線的主要部分を構成し、 K の値は $\frac{5}{10000}$ 内外の差で最も近似してゐる。筆者は之の部分の K の平均値が累積傾向の大勢の趨歸を指示するものと考へこの平均値を以つて地方的乃至季節的蛾相の一常數と認め、誘蛾燈使用時に於ける種類累積比率と名付けた。恐らく薄暮の頃には、光源の相對的效果が減殺される上、更に蛾類の活動周期が大いに關與して、飛來種數に變化を來した結果に基づくものであらう。下田では飛來の止む 1 時間前に既に種數の累積が終つてゐるが K のみではこの終末の狀況は十分盡されない。

楮 K の平均値としては 7 月下旬下田の成績より 0.005166 及び 0.005330 を算し、野村氏の福岡草場 (9) の資料より算定した 8 月下旬の値 0.00478 及 0.00546 と比較し甚だ酷似した結果となるが之は偶然の一致といふべく、 t の絶對値即ち累積の繼續される時間では後者の方が 2 時間半も永く、よく季節及び場の特長を顯著してゐる。而して K の周期的消長は外的條件の變化に隨伴する蛾類の活動性の消長に關聯すべく、これは (1) 式により理論的には

等しく表はさるべき時間別小計 X_i が K の消長と一致して増減してゐることからも十分窺知される。尙 K の大小は單に比の値 $x:a$ の大小に伴ふのみで、それが直ちに a の絶對値の大小を示さぬ事は勿論である。

(iii) 蓋然種數の豫察 K は累積比率で且つその平均値は地方的乃至季節的恒數と見做し得る以上、同一地域で短時間燈火採集を試みた結果より（途中條件に大なる變化なきものとして）其儘終夜繼續して得らるべき種數を蓋然的に豫察し得なければならない。これは (6) 式の變形式

$$a = \frac{x}{1 - e^{-Kt}} \dots \dots \dots (7)$$

第 3 表 總種數の計算例

時間 (分)	x	K の平均値	採集總數 (a)	計算値 總種數
165	50	0.005330	84(B)	85
270	58	0.005166	78(A)	77
210	97	0.004780	152(D)	149
240	109	0.005460	149(C)	148

より容易に計算し得る筈である。筆者は次の計算例 (第 3 表) に示す如く徹宵成績により K の平均値を用ひて理想的數値を得たので、更に半夜で中止した結果に就き之等の K を適用して第 4 表を算出した。之の結果に徴すると計算値は何れも徹宵採集の數値と近似し、累積種數が環境の蛾相に依り略々一定するものと前提すれば、相當信用し得るものと云へ

第 4 表 採集を中断せる結果に計算法を適用して終夜に得らるべき總種數を計算す

日 附	時 間 (分)	採集種數 (x)	自動採集器による採集種數	計算に用ひられた K の 値	計 算 總 種 數	採 集 月 採 集 地
24 日 (α)*	150	34	—	0.005166	63	7 月, 下田
26 日 (β)*	300	55	—		69	
29 日 (γ)*	285	57	—		72	
21 日 (p)*	300	99	127	0.004780	129	8 月, 福岡
22 日 (q)*	300	97	127		127	
25 日 (r)*	450	149	155		162	

* $\alpha \cdot \beta \cdot \gamma \cdot p \cdot q$ 及 r 等は圖表 II 所載の記號である。

やう。殊に草場 (9) の例では、觀察中止後自動採集器を使用して得た結果と極めてよく一致し、一次反應式の適用性は一層よく立證されたかの觀がある。次に之等概算總種數に基き $\log(a-x)$ を時間的に求め、第 2 圖の α, β, γ 及 p, q, r を作圖せる所之等も亦肯定的結果を示し、特に β に於いては點火時刻に拘はらざる事も察知された。

又終夜中に採集し得られる種數の半數を得るには何時間を要するかといふに、

$$(5) \text{ 式と } x=a/2 \text{ となり, } Kt = \ln \frac{a}{a/2} = \ln 2$$

$$\therefore t = 2.3/K \log_{10} 2 = \frac{0.69}{K}$$

となり所要時間は總種數に關せず、只 K との逆比例關係のみで求め得る。本式に依ると何れも點火後 2 時間餘になり、觀測結果と大體一致してゐる (第 1 圖参照)。

(iv) 実験式と偏差系列 K の平均値を用ふれば (6) 式より或る季節に於ける一般的傾向を示す実験式が誘導される。筆者は下田の 27 日、28 日、29 日 3 夜の各時間別平均累積種数より K の平均値 0.005562 を求め之を K の一般的数値として $x = a(1 - e^{-kt})$ に適用し $a = 80$ (平均累積總種数) を代入して実験式

$$x = 80(1 - 0.9944t) \dots \dots \dots (8)$$

を算出した。この式から一般的時間別累積値(第 3 圖)を誘導し之と各夜の實測値との偏差系列を求めれば偏差の循環性に依つて累積状況、従つて飛來現象の究明が試みられることになる。

何れも午後 8 時→9 時半及午前 1.5 時→3 時に互つて増加を示してゐる。恐らく此の期には何等かの原因(多分氣象要因)で蛾類一般の活動性が高められるのではなからうか。26 日は特に日没後一時間経た午後 8 時半に點火した上、途中氣象條件も他日より稍異つてゐるにも拘はらず、累積傾向は略々一致してゐて、這般の推論結果と矛盾しない。點火後 30 分間に示した偏差の増大は暗適應(4)が薄暮の頃より充分であるといふ必然の結果に基く。尙各夜とも大體 12 時附近が周期の轉換時刻に相當する如く思推されるのは注目に値する。

III 個體數累積値

(i) 一般式と偏差系列 個體數の時間的累積値は時間別小計の積算に過ぎず、略々直線的である。然し(2)式の D_a は實測困難なる故一般に直線を示す方程式 $x = a + mt$ を用ひて數學的當儀法(8)に依り一般的傾向線を求めんとした。今求め得た直線上の各時間に應ずる點の數値を $x_i = a + mt_i$ ($i = 1, 2, 3, \dots$) とすると、實測累積値 X_i との差 $X_i - x_i$ 即ち $X_i - (a + mt_i)$ は正負區々であるから、該直線が實測値の何れにも最も平均的に近接し得る爲には $\sum \{X_i - (a + mt_i)\}^2$ を最小ならしむる a 及 m を係數とする所謂最小自乘線(8)たるを要す。かゝる a, m は次の方程式を解いて得られる。

$$S = \sum \{X_i - (a + mt_i)\}^2 \text{ と置けば}$$

$$\left. \begin{array}{l} \frac{\partial S}{\partial a} = 0 \\ \frac{\partial S}{\partial m} = 0 \end{array} \right\} \text{ 即ち } \left. \begin{array}{l} \sum X_i - na - m \sum t_i = 0 \\ \sum t_i X_i - a \sum t_i - m \sum t_i^2 = 0 \end{array} \right\} \dots \dots \dots (9)$$

(n は觀測回数)

筆者は下田の結果に就き 27 日、28 日の時間別平均個體數を用ひて得たる聯立方程式

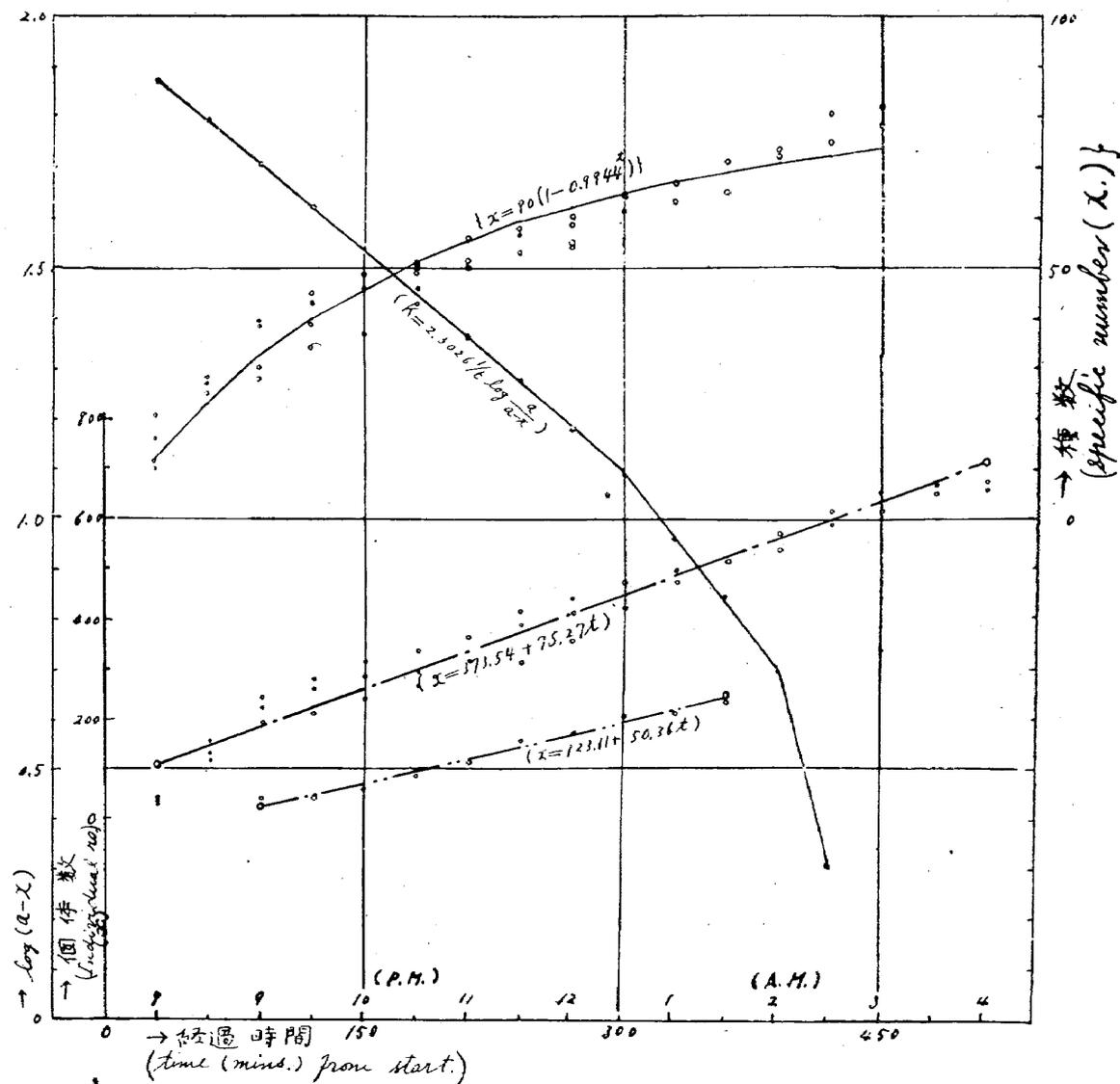
$$\left. \begin{array}{l} 6990 = 17a + \frac{17}{2}m \\ \frac{22232}{2} = \frac{17}{2}a + \frac{422}{4}m \end{array} \right\} \text{ を解き } \left. \begin{array}{l} a = 373.54 \\ m = 75.27 \end{array} \right\}$$

を得、実験式として $x = 373.54 + 75.27t \dots \dots \dots (10)$

(t は假定時間) を算出した。蓋し之に依り導來せられる時間毎の累積値と各夜との偏差系列も亦飛來狀況研究上個體數に關して有力なる手掛を供するものである。先づ日没直後の點火後 30 分と夜明の 30 分間の偏差の相似的一致が、飛來數は外界の明るさと蛾類の活動周期

1) 丁度月齡更新期に當り月は全く見られず 26 日を除けば各夜とも晴天無風に近く、氣象的には略々近似してゐた。26 日は前夜曇天で 9 時 10 分、10 時 10 分に約 10 分程驟雨があつた。

に關聯するものなることに著目せしめ、次いで飛來増加の周期性即ち午後 8 時半→10 時頃に互る増加と午前 2 時以後約一時間内外の比較的緩徐な第二回の増加狀況を認知せしめる。



第 3 圖

而して斯かる消長は種數のそれと規を同ふし、飛來増加が或る季節には前半夜の所謂最盛期 (9, 10, 11, 15, 20, 21, 23) の外に後半夜にも一回起り得る事を示し、同時に (1) 式の實測値が外的條件に依り相當變化され勝ちなことをも示唆するものといへやう。一般に時間別個體數は環境の種類が多寡より寧ろ個體數如何に左右されることが考へられ、従つて外的條件に等しく影響される種の個體が多いか少ないかで顯著な變化を呈し種數の消長と必ずしも一致しないが、全體としての飛來狀況に於いては大體相伴つて (9, 11) 變化する様である。26日の偏差は他と著しく異り累積傾向にあることを提示した故別に實驗式 $x = 123.11 + 50.36t$ を算出し之に依つて偏差系列を求めた。然し尙多少他と趣を異にし氣象條件の影響がよく看取される。即ち一時的驟雨のあつた 9 時及 10 時前後が著しく減少し、晴れ上つた 12 時以後にその反動らしきものが見えてゐる。此處でも個體數が種數より外的要因に支配され易き事を物語

つてゐる。只點火直後の 30 分間に偏差が著しく増加してゐる事は種數と規を一つにし適應が既に十分であつた事が原因と考へられる。要するに點火時刻の相異は累積傾向の大勢に關係する事少なかるべく、氣象條件の變化がより大なる傾向支配の力を有するものと云へやう。

IV 摘 要

(1) 誘蛾燈に飛來する蛾類の種數或は個體數は光源の光學的諸性と環境の蛾相に依つてその大勢の趨歸を決定される。而して蛾類の活動性及び固有最適照度等が場に關する統計學的條件に依つて相補はれるものと見れば外的條件に著しき變化なき限りは各一定時間別の數値は略、近似的となるものゝやうである。従つて積算數値は何れも直線的に時間と共に上昇する。

(2) 種數は取扱上重複を避ける結果累積値は時間と共に特殊な複利的増加を示し其の關係式には單分子反應式が適用される。従つて同式を用ひて一般的累積値を決め、之と實測値との偏差系列に著目して飛來狀況を採知し得る。又短時間の燈火採集結果より終夜其儘繼續して得らるべき蓋然種數の豫察が可能となる。

(3) 個體數累積値曲線は直線狀を呈する。依つて實測値より最小自乘線を求めれば一般的傾向線が得られる。之との偏差の循環性は能く飛來狀況の究明に役立つ。

(4) 這般の事項は點火時刻如何に拘はらず大體肯定し得。外的條件に著しき突發的變化なき限り、導來結果より該地某季節の一般的傾向を歸納し得る。

文 獻

- (1) 八木 誠政： 函數生物學，東京（昭和 5 年）
- (2) ————： バイオメトリー，岩波生物學講座（昭和 8 年）
- (3) ————： 生態學實驗法，生物學實驗法講座，建文館（昭和 13 年）
- (4) ————： 二化螟蛾の夜間活動性に就いて，農事試驗場彙報（昭和 10 年）
- (5) W.M. FELDMAN： Biomathematics, London, Charles Griffin & Co. (1923)
- (6) TOSEPH LIPKA. PH.D. 浦口善爲譯，圖式及用器計算法，共立社（昭和 6 年）
- (7) 小平 吉男： 計算器及計算法，岩波物理學講座
- (8) 木村 教雄： 統計法概要，培風館（昭和 7 年）
- (9) 野村 健一： 蛾類の趨光性に就いて，應用動物學雜誌（昭和 12 年）
- (10) 玉貫 光一、夜久 春夫： 誘蛾燈による趨光性昆蟲に關する調査成績第一篇大蛾類，樺太廳中央試驗所報告（昭和 10 年）
- (11) 鳥居 西蔵： 誘蛾燈より見たる蛾類の活動型に就いて（近く植物及動物に發表の豫定）
- (12) ORLANDO, P. J.A. LOCKETT, and D.J. MYERS: Studies in nocturnal Ecology with special reference to climax forests. Ecology, 12: 709 (1931)
- (13) ORLANDO and J.G. KELLER: Studies in nocturnal Ecology, II. Preliminary analysis of activity rhythm in nocturnal forest insects. Ecology, 13: 335 (1932)
- (14) 野村 健一： 尾久島の鱗翅類に就いて，九州帝大農學部，學藝雜誌，510, (1937)
- (15) ————： 屋久島に於ける蛾類の趨光性に關する觀察，昆蟲，11. 50
- (16) 杉山 章平： 有色光線に對する螟蛾の反應，應用動物學雜誌，9. 195
- (17) 岩波 龍夫： 二化螟蛾誘殺數と氣象との關係，應用動物學雜誌，3. 65

- (18) ————— : 燈火の二化螟蛾誘殺效果に就いて, 應用動物學雜誌, 3, 186
 (19) ————— : 二化螟蛾の趨光反應を誘致する最低照度, 應用動物學雜誌. 第2卷, 282
 (20) 上遠 章 : 二化螟蛾と趨光性活動と時刻との關係, 應用動物學雜誌, 2, 263
 (21) 尾崎 重夫 : 昆蟲の趨光性活動と時刻との關係, 應用動物學雜誌, 4, 79
 (22) 籙木外岐雄 : 二化螟蛾の趨光現象に就いて, 植物及動物, 4, 161
 (23) 大森南三郎 : 瀬戸四双島夜間採集に就て, 本誌, 44, 227
 (24) ビー, ビー, ウヅロフ. 素木得一譯 昆蟲と氣候, 養賢堂, 1935

Résumé.

Mathematical Treatment of the hourly cumulative Number
of Species and Individuals of phototropic Moths

Torizo TORII

Zoological Institute, Tokyo Bunka Daigaku

The present paper deals with the cumulative number of species and individuals of phototropic moths that gather around a light trap. Last summer I made some observations on the phototropic response of moths in a field in Shimoda district. From ecological point of view, applying the mathematical method to the data, I was inclined to conclude substantially as follows:

(1) The specific or individual number of phototropic moths that gather around a light trap seems to be dependent on the whole on both the optic quality of the light and the faunal character of the phototropic moths. As it seems that the activity or the optimum intensity of illumination of every moth may be compensated by the statistical condition of the surrounding, the members in a definite time will be approximately equal if there happens no change of meteorological factors. Accordingly the cumulative number increases with an inclination like a straight line in proportion to time.

(2) In consequence of the special treatment in which the repeating cumulation of the same species is avoided, the specific number increases, however, in accordance with the compound interest law as the time passes. And the formula of the monomolecular reaction is applicable to the relation between the hour and the cumulative number. We should be able to observe, therefore, the phototropic response from the residual series after obtaining the general hourly cumulative number by that formula. If we apply the formula to the data of some short time at night, it will also be able to estimate the probable specific number that should be obtained throughout the night.

(3) The cumulative curve of the individual number, will present some straight line. Hence, we should obtain the general curve by its line of least square. Here it is also similar that the cyclical trend of the residual series is available to the investigation of phototropic condition of moths.

(4) The above facts seem to be affirmative on the whole irrespective of the time when the lamp is lit. Under the supposition of no remarkable change of external factors, the results produced by the above method may be said to indicate the general trend of a certain season at some district.