昆虫の高温に対する抵抗性の頻度分布及び比較撒布度 $1/k^2b^2m^2$ に関する考察

清　久　正　夫

Considerations on the Frequency Distribution of Resistability of Insects to Abnormally High Temperature and Relative Deviation of Variation $1/k^2b^2m^2$

Masao KIYOKU

The writer had inferred indirectly that the time mortality curve is a cumulative curve of frequency distribution that the resistability of insects to heat is distributed normally against the k-th power of the time X (KIYOKU 1951). Now, in order to determine the resistability to heat directly, the time required to kill each individual in a given population has been measured, respectively; and the frequency distribution curve of heat resistance have been constructed from the data.

According to these experimetal results, the distribution curve of heat resistance, as measured on the normal scale, has been found to be markedly skew. But it has been possible to obtain a distribution which is approximately normal by adopting the simple transformation of the scale of time-the X^k transformation method. The numerical value of k in X^k to be used for transformation must be incresed as 1/4, 1/2, 1 with the rise of temperature.

In these experiments, a new index $1/k^2b^2m^2$ (relative deviation of variation) has been used for estimating the deviation in resistability of insects to heat.

緒　　言

昆虫の高温に対する抵抗性が曝露時間に対して正規分布するということは比較的古くから漠然と知られていたが，筆者はそれは1部の現象であつて温度如何によつてはモードが左寄り又は右寄りとなるので広い温度範囲にわたつては常に正規分布であると言えないとした（清久1951a）．そして斯様な分布を統一的に記載する為，x^k の k の値が温度に対して幾何級数的に変化する所の x^k 型正規分布と定義した（清久1951b）．

この説は他の学者の研究成績に対してもよく適合するけれども（清久1951b），実験成績から組み立てたS型の時間死亡率曲線（抵抗性変異の累積曲線と考える）の型から間接的に推定したものであるから，処理中に2次的要因が入るかも知れないので厳密なことが言えない．故に全く別の直接的実験を行いそれを確かめる必要があつた．

次に上の説が正しいものとして，熱抵抗を x^k 正規分布と考えプロビット解析を実施するに際しそれから推定される中央致死時間や殺虫能率（プロビット回帰直線の回帰係数）は k の値の違つたものの間では比較に用いられない．勿論中央致死時間に就いてはその値を $1/k$ 乗すればよい．然し殺虫能率はそのように簡単には処理出来ない．故にその場合の適当な指数を案出する必要もあつた（清久1954）．

上述の事項は "Probit-Analysis" 適用の面で基礎的重要事項であるから一層確実にする必要があり，尚最近筆者の説に疑をいだく学者がある現況にかんがみ，直接的実験によつて抵抗性の分布が単なる正規分布であるか，筆者のいう x^k 正規分布であるかを確かめ，併せて殺虫能率に代るべき適当な指数 $1/k^2b^2m^2$ の由来を考察したのが本論文である．

I．材料及び方法

実験材料は1定の系統に属するアズキゾウムシ *Callosobruchus chiuensis* の雌雄70対を径12cm．のシャーレにとり，小豆（品種は大納言，水分含有率約13%）40gr．を食餌として与え，30°C 定温器（湿度調節には大型シャーレに入れた水を用う）の中にて産卵，発育せしめて得た成虫の羽化16時間以内のものであつた．実験材料を処定の高温に曝露させる方法は第1図に示した装置の中へ次々に1頭ずつ孔Aより投入した．投入後それが器底に落下した時から昆虫の活動が全く停止するまでの時間を夫々ストップウオッチにて測定し，期様にして得た測定時間を1定の階級に分け，各階級とその階級に属する活動停止虫数とをもつて度数分布表を作つた．本実験に用いた温度は47°C，50°C，53°C 及び 56°C の4種であつてそれぞれの湿度は食塩の過飽和液を用いて調節をした．

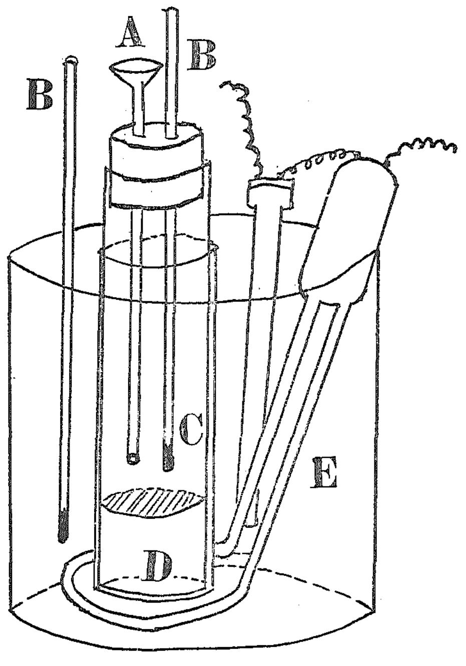

Fig.　1.　Apparatus of Exporiment.

A: Hole of the test tube
B: Thermometer
C: Test tube
D: Saturated solution of $CaCl_2$
E: Water bath

II．実験成績

昆虫が活動を停止するまでの時間の各階級に属する活動停止虫数，それの百分率，それの累積度数百分率及びそれに対応するプロビットを第1表に示す．

第1表の成績に基ずき活動停止までの時間を横軸に，活動停止の百分率を縦軸にとつて度数分布図を画くと第2図のとおりであつて，それら4個の内 56°C 以外はいずれもモードがやゝ左に片寄つているように思われる．

III．度数分布の型に関する考察

第2図に示した4個の度数分布が正規分布と見做らされるかどうかを簡単に判定する試みとしてプロビット図上解析により，時間を横軸にプロビットを縦軸にとつて作図すれば 56°C のみは大体1直線となるが，其の他は1本の直線で示すことが出来ない（第3図上段）．

そこで前報の方法（清久1951b）に基づき，横軸にとつた数値の x^k 転換を行う．即ち 56°C はそのまゝ（$k=1$），53°C 及び 50°C は $k=\frac{1}{2}$，47°C は $k=\frac{1}{4}$ とする．その結果はいずれも完全に1直線化が出来た（第3図下段）．

故に本回の実験によつても高温に対する昆虫の抵抗性の分布は k が温度の上昇に対して2を公

Table 1.　Experimental Results.

Temperature tested C°	Class (Sec.)	Number of response	Response rate in percentage	Cumulative response	Response rate in probit
	0—240	1	2	2	2.943
	240—300	5	10	12	3.873
	300—360	3	6	18	4.084
	360—420	12	24	42	4.798
	420—480	10	20	62	5.305
	480—540	7	14	76	5.706
	540—600	5	10	86	6.080
47	600—660	2	4	90	6.281
	660—720	2	4	94	6.554
	720—780	1	2	96	6.750
	780—840	0	0	96	6.750
	840—1020	0	0	96	6.750
	1020—1080	1	2	98	7.053
	1080—1320	0	0	98	7.053
	1320—1380	1	2	100	—
	0— 90	4	8	8	3.594
	90—120	13	26	34	4.587
	120—150	18	36	70	5.524
	150—180	7	14	84	5.994
50	180—210	3	6	90	6.281
	210—240	4	8	98	7.053
	240—270	0	0	98	7.053
	270—300	1	2	100	—
	0— 40	3	6	6	3.445
	40— 50	7	14	20	4.158
	50— 60	8	16	36	4.691
	60— 70	11	22	58	5.201
53	70— 80	12	24	82	5.915
	80— 90	4	8	90	6.281
	90—100	3	6	96	6.750
	100—110	1	2	98	7.053
	110—120	0	0	98	7.053
	120—130	1	2	100	—
	0— 20	8	16	16	4.005
	20— 30	19	38	54	5.100
56	30— 40	17	34	88	6.175
	40— 50	5	10	98	7.053
	50— 60	1	2	100	—

比とする幾何級数的系列の x^k 型正規分布であるという風に統一記述が出来るように思われる．

勿論これは概算であるから更に厳密な統計的処理を実施すると次の通りであつた．

先ず FISHER の方法にしたがい累積率の推定量として k-統計量を用い

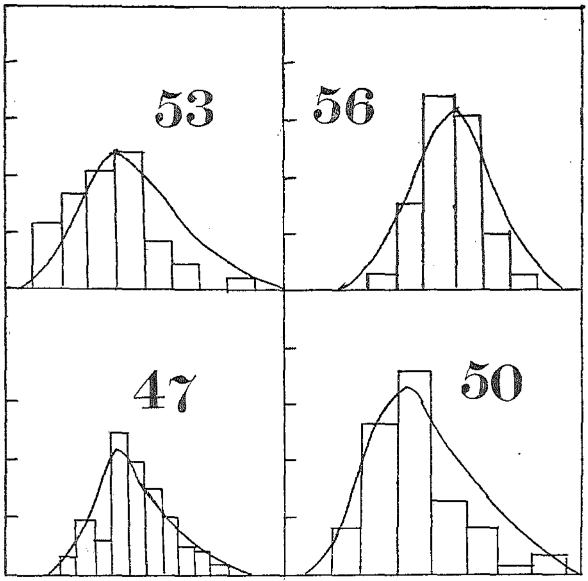

Fig. 2. Histgrams and Frequency Distribution Curves. *Ordinate*: Frequency, *Abscissa*: Time in Seconds

$$G_1 = K_3 / K_2^{\frac{3}{2}} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (1)$$

$$G_2 = K_4 / K_2^{2} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (2)$$

と定義し，正規分布ならG_1及びG_2の期望値が夫々0となる性質を利用する．これらの統計学的検定の為にはG_1とG_1の分散の平方根との比（分布曲線の歪の有無の検定のため），及びG_2とG_2の分散の平方根との比（正規性検定のため）を算出し，それらを夫々t-検定する（但しn＝∞：危険率 0.05：t＝1.96）．この検定結果は第2表の通りである．

第2表に示した結果によれば$G_1 / \sqrt{V(G_1)}$, $G_2 / \sqrt{V(G_2)}$はいずれも危険率0.05のtの値1.96より小さいので，それらはx^k転換に

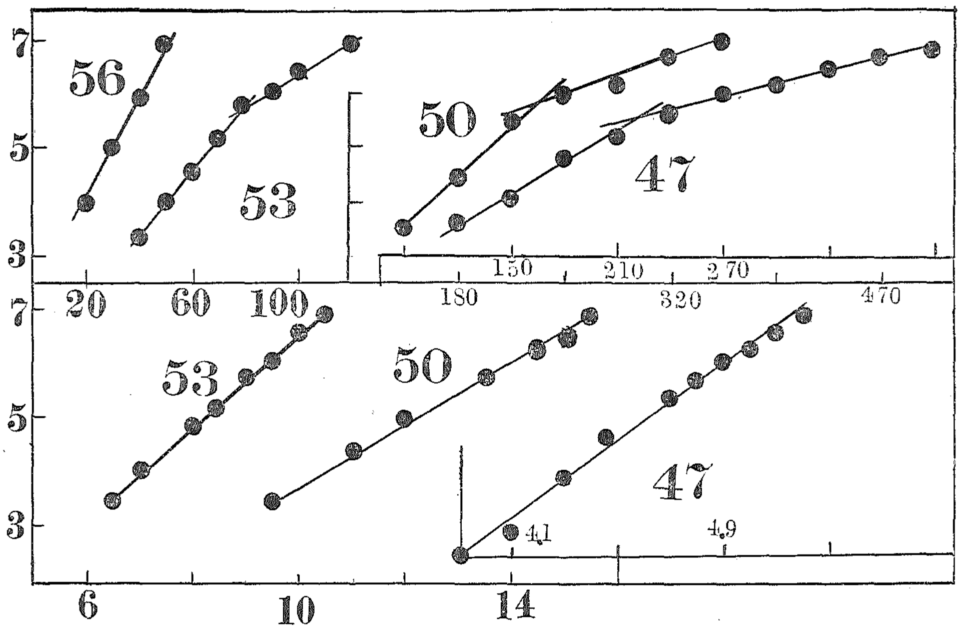

Fig. 3. The Linearity of Time Response Regression Lines for Different Temperatures.

In the above figure, the respose is shown in terms of probit and exposure time in seconds, whereas in the below one, that is shown in terms of probit and exposure time in X^k scale.

Table 2.　Test of X^k-normal Distribution

Temperature tested C°	K	G_1	$V(G_1)$	$G_1/\sqrt{V(G_1)}$	G_2	$V(G_2)$	$G_2/\sqrt{V(G_2)}$
56	1	0.447	0.058	1.85	0.218	0.448	0.32
53	1/2	0.620	0.058	0.26	1.321	0.448	1.95
50	1/2	1.030	0.058	0.04	1.178	0.448	1.76
47	1/4	0.021	0.058	0.08	0.094	0.448	0.14

よつて正規型であると断定することが出来る．然し若し x^k 転換をほどこさないで計算すれば $G_2/\sqrt{V(G_2)}$ の値が温度によつては1.96より大きい場合がある（47°C.では3.94，50°C.では2.46）からそのまゝのものでは正規分布であるとは言えない．

所で本回の実験で得た k の値を前回の実験で得た k の値（清久1951b）と比較すると本回の実験の47°C.の $k=\frac{1}{4}$，50°C.及び53°C.の $k=\frac{1}{2}$，50°Cの $k=1$ に対し，前回の実験の46°C.及び48°C.は $k=2$，50°C.は $k=4$，53°C.は $k=3$ であるから相互に大分趣が違つている．然し前回の実験は昆虫の致死点が目標であつたに対し本回のは高温による活動停止点（おそらく熱昏睡であろう）が目標となつているから k の絶対値が違つても余り問題にはならないだろう．要は k の値が温度によつて相対的に変化するか否かがわかれば本回の実験目的は達せられる．

以上要するに高温に対する昆虫の抵抗性の分布は単なる正規分布ではなくて k が温度の上昇に対して幾何数的系列を示す所の x^k 正規分布であるという前説を実験的に確認することが出来た．

Ⅳ　比較撒布度 $1/k^2b^2m^2$ に関する考察

熱抵抗の分布は曝露時間 x に対して x^k 正規分布であることが確かめられるので，この種の実験成績をプロビット解析する際に用うる x^k-プロビット回帰直線は

$$Y=5+b_k(x^k-m^k)^{*} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(3)$$

で示される．但しYはプロビット，x^k は k 乗された時間，m^k は k 乗れさた中央値，b_k は回帰係数で標準偏差 σ_k の逆数である．

(3)式から m^k 及び b_k 又は $1/\sigma_k$ を統計学的に推定することが出来るが，温度の如何で k の値が異なつたものゝ間の m_k や b_k を比較することは出来ない．勿論 m^k は $1/k$ 乗すればよいが b_k は $1/k$ 乗しても意味がない．そこで k の値の如何にかゝわらず比較が出来る指数を案出したその経過は次のとおりである．

---

* X^k 正規分布の分布函数は

$$F_{k(x)}=\exp[-(x^k-m^k)^2/2\sigma_k^2]/\sqrt{(2\pi\sigma_k^2)}$$

累積度数分布は

$$F_{k(x)}=\int_{-\infty}^{x}\exp[-(x^k-m^k)^2/2\sigma_k^2/\sqrt{(2\pi\sigma^2{}_k)}\,dx$$

$$=(2\pi)^{-\frac{1}{2}}\int_{-\infty}^{t}\exp[-\frac{t^2}{2}]\,dt$$

但し標準化する為，$m=0$，$\sigma=1$ の正規分布とした．従つてこの場合の正規当価偏差 t は

$$t=\frac{1}{\sigma_k}(x^k-m^k)$$

これをプロビットYで示せば

$$Y=5+\frac{1}{\sigma_k}(x^k-m^k)$$

$$\text{又は}=5+b_k(x^k-m^k)$$

本回の実験によつて頻度$F_{(x)}$がX（但し時間xのk乗されたもの）に対し$N(m\cdot\sigma^2)$の正規分布するとしたから，$\frac{X}{m}$に対しては$N\left[1\cdot\left(\frac{\sigma}{m}\right)^2\right]$である．これの標準化された正規分布即ち$N(0\cdot1)$に於ける変量は$\left[\left(\frac{X}{m}-1\right)\Big/\left(\frac{\sigma}{m}\right)^2\right]$である．よつてこの場合の正規当価偏差tは

$$t=\frac{m^2}{\sigma^2}\left(\frac{X}{m}-1\right) \qquad (4)$$

$t=1$とすれば$\frac{X}{m}$と$\left(\frac{\sigma}{m}\right)^2$との間には次の関係が見られる．

$$\frac{X}{m}-1=\left(\frac{\sigma}{m}\right)^2 \qquad \therefore\ \frac{X}{m}=1+y \qquad (5)$$

但し$y=\left(\frac{\sigma}{m}\right)^2$とする．(5)式中XもmもAに$k$乗されたものであるからその比$\frac{X}{m}$は当然$k$の値の如何で変化する．故にもとに直すと$1/k$乗すればよい．即ち

$$\left(\frac{X}{m}\right)^{\frac{1}{k}}=(1+y)^{\frac{1}{k}}=1+\frac{1}{k}y+\frac{\frac{1}{k}\left(\frac{1}{k}-1\right)}{2}y^2+\cdots\cdots \qquad (6)$$

$\left(\frac{X}{m}\right)^{\frac{1}{k}}$の平均値Eは，$E\left[\left(\frac{X}{m}\right)^{\frac{1}{k}}\right]=1+\frac{\frac{1}{k}\left(\frac{1}{k}-1\right)}{2}\cdot\left(\frac{\sigma}{m}\right)^2 \qquad (7)$

次に$\left(\frac{X}{m}\right)^{\frac{1}{k}}$の分散Vは，$V\left[\left(\frac{X}{m}\right)^{\frac{1}{k}}\right]=E\left[\left(\frac{X}{m}\right)^{\frac{2}{k}}\right]-E\left[\left(\frac{X}{m}\right)^{\frac{1}{k}}\right]^2$

$$=1+\frac{\frac{2}{k}\left(\frac{2}{k}-1\right)}{2}\cdot\left(\frac{\sigma}{m}\right)^2-\left[1+\frac{\frac{1}{k}\left(\frac{1}{k}-1\right)}{2}\cdot\left(\frac{\sigma}{m}\right)^2\right]^2$$

$$=\left(\frac{1}{k}\right)^2\left(\frac{\sigma}{m}\right)^2=\sigma^2/k^2m^2 \qquad (8)$$

(8)式は分散であるがmの比較値となつているので特に比較撒布度と呼ぶ．回帰直線を用いて示すと$\sigma=\frac{1}{b}$であるから(8)式は，$U_{k(x)}=1/k^2b^2m^2 \qquad (9)$

依つてkの異なる間の比較の為には(9)式を用いればよい．本実験に於ける4種の温度の下の比較撒布度を計算すれば第3表である．尚これらの値と温度との間に見られる法則性及びその応用的意義については別の論文にて報告する．

Table 3. Relative Deviation of Variation.

Temperature tested C°	56	53	50	47
$1/K_2b_2m_2\times100$	7.49	6.59	7.35	7.58

V 摘　要

本論文は高温に対する昆虫の抵抗性が時間に対して正規分布するのではなくて，x^kのkが温度に対して幾何級数的に変化するx^k正規分布であるということを直接的実験によつて確かめ，kの異なる場合の殺虫能率の比較を容易にする為の1つの指数として比較撒布度$1/k^2b^2m^2$の由来を考察したものである．

引　用　文　献

1) 清久正夫 (1951a)：京都学芸大学学報，No. 1, P. 89—100.
2) 清久正夫 (1951b)：防虫科学，No. 16 (II)，P. 119—130.
3) 清久正夫 (1954)：農業統計研究，Vol. 2 (I)，P. 25—30.