

平成 30 年 6 月 20 日現在

機関番号：11201

研究種目：基盤研究(C) (特設分野研究)

研究期間：2015～2017

課題番号：15KT0101

研究課題名(和文) 植物の発熱現象において観察される自己相似性と長期記憶過程の数理的解析

研究課題名(英文) Mathematical analyses of self-similarity and long-range dependence observed in a plant's heating phenomenon

研究代表者

伊藤 菊一 (Ito, Kikukatsu)

岩手大学・農学部・教授

研究者番号：50232434

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：早春に開花するザゼンソウは、肉穂花序と呼ばれる特異器官が特異的に発熱し、当該温度を23℃程度に維持できる恒温性を有している。本研究においては、ザゼンソウ体温時系列に対し、現時点温度から次時点温度へのジャンプ量を取り、その特性を解析した。その結果、ジャンプ量のヒストグラムは尖度が高く、正規分布等の通常の古典的分布とは異なることが明らかとなった。さらに、ヒストグラムへのモデル分布の解析を行った結果、負の整数値をも取る混合Poisson分布におけるPoisson強度が小さい状況が良くフィットすることが判明した。また、得られた結果はKolmogorov-Smirnov検定により肯定的に検証された。

研究成果の概要(英文)：The spadix of skunk cabbage can generate and maintain an internal temperature of about 23°C even when the ambient air temperature drops below freezing. In the present study, we took the increment process of the temperature time series and consider it as an 'elastic' force that always tries to backlash its temperature to an intrinsic target temperature. Here, we proposed a mixed Poisson distribution for the model of the 'elastic' force, and our analyses resulted by Kolmogorov-Smirnov test showed that the proposed distribution is a plausible candidate of the model. Moreover, the parameters of the model well captured the linear behavior of the expectations of 'elastic' forces. Collectively, the linearity of the expected increments over displacements of temperatures indicated that the backlash could be considered as the elastic force of a spring as described by Fuch's law.

研究分野：システム生物学

キーワード：発熱現象 時系列解析 自己相似性 長期記憶過程 植物

1. 研究開始当初の背景

寒冷湿地のサトイモ科自生植物ザゼンソウは発熱器官を有する大変珍しい植物であり、春先に発熱により自らの体温を温度制御する事で種子を育成する。例え外気温が氷点下であっても、1週間程度の発熱期間中は、体温は22~23度の一定値にほぼ保持され、個体ごとに異なる中心的温度の周りでランダムに変動する。

この温度制御メカニズムについては従来、生化学・分子生物学的観点や生物物理学的観点から少しずつアプローチがなされて来ている。例えば、呼吸代謝量と温度の逆相関の関係性や温度時系列がカオス性をもつ非平衡非線形系である事などが代表者らによって示されてきた。

これら各観点の微視的および巨視的な事象を一部とするような、温度制御メカニズムの全体像の解明が望まれている。

発熱器官の温度時系列のサンプルを図1に示す。時系列の前半は雌期と呼ばれ種子を育成している期間であり、この期間中は温度制御がなされるが、後半の雄期ではもはや温度制御が適切になされない。雌期の時系列については自己相似性および長期記憶性という非平衡系の顕著な特性を持つ事を確認しており、我々の研究対象はこの雌期の温度制御のメカニズムである。

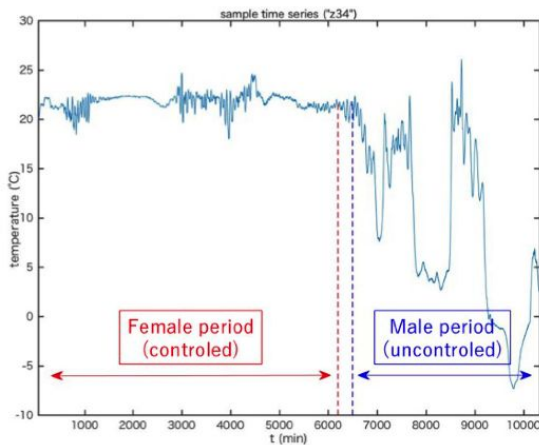


図1. 発熱器官の温度時系列サンプル

2. 研究の目的

上記の温度制御メカニズム全体像の解明に繋がるようなロジック化として、制御機構の数理モデル化、およびそれに付随する温度時系列に対するデータ解析的考察を行う。特に、マイクロとマクロをつなぐようなメソスコピックな知見、あるいは共通のベースとなるような知見を得る事を期している。

3. 研究の方法

ザゼンソウ群生地での実測による温度時系列のフィールドデータに対する数理解析およびデータ解析的考察を両輪として、温度制御挙動のモデリングを行う。その途上において、分子生物学者である代表者・伊藤と数理科学者である分担者・川崎が互いの知見から率直な意見交換を行い、相手の考え方・手法等に意識を払いながら相互理解を深めつつ徐々に思考の歩を進めていく事が重要である。

4. 研究成果

各現在温度値での、温度時系列の差分列をとりその分布を調べた。この差分列は、各現在温度値から次時点へのジャンプ量であり、現在温度が制御ターゲットである中心温度からどれくらい離れている時にどれくらい中心温度へ揺り戻そうとする作用が働くか、を意味する。データからそのままヒストグラムをとると成形が良くないが、一種の平滑化をする事で、ほぼそれらしいヒストグラムが得られる事が分かった。

そのヒストグラムからは、現在温度が中心温度より低い(高い)時には中心温度へ向けて温度を上げ(下げ)ようとするだけでなく、さらに温度を下げて(上げて)しまう場合もある事が見てとれる(図2)。しかも現在温度が中心温度より低いほど正值の確率が大きく、中心温度より高いほど負値の確率が大きい。また、現在温度が中心温度に近いほど、ヒストグラムの集中性が高くなり、左右対称性が高くなる。

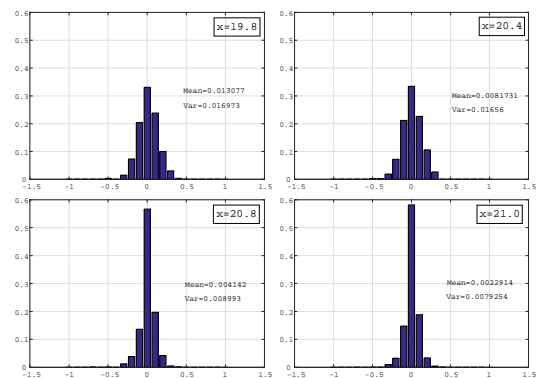


図2. 差分系列のヒストグラム(中心温度低い低い側)

すなわち、温度制御は、中心温度周辺で、中心温度からの変位に応じて揺り戻しの作用が働くが、常に正值の作用と負値の作用がせめぎ合いをしており、両方向の作用がランダムに起こっているような状況である。これは温度制御が、化学的には発熱反応が可逆反応であり両者が常に同時に起こっている事に対応する。

このような状況のモデルとして、我々は正値および負値の単位熱量の仮想的な発熱因子が単位時間に発生される事を表す Poisson 分布をそれぞれとり、それらの混合分布をとる事でジャンプ量の正値および負値を表す事を考えた(図3)。負値の発熱因子の発生は吸熱反応に対応する。なお、温度時系列データはフィールドデータでありそのままではノイズが多いので、一種の平滑化を施した上で解析を適用している。

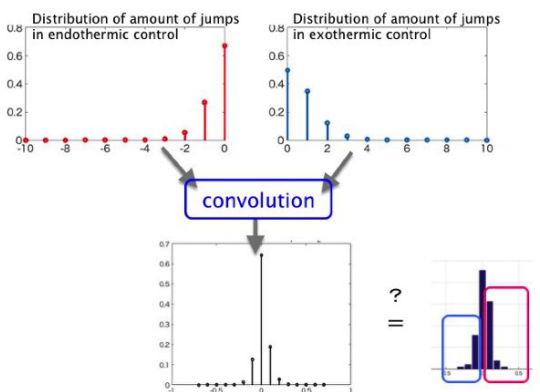


図3：発熱および吸熱のせめぎ合いを表す混合 Poisson 分布モデル

理論的モデルと実測値は非常に良く合っているように見受けられた。図4(a)は現在温度が中心温度より低い側でのヒストグラムであり、左カラムが「平滑化なし」のヒストグラムへのモデル当てはめの結果であり、右カラムが「平滑化あり」の結果である。平滑化量のある程度上げるとモデルへのフィットが非常に良い事が分かる(そもそも平滑化がないと、ヒストグラムの成形自体が良くない)。同様に、図4(b)は現在温度が中心温度付近の領域であり、ここでは平滑化がなくともだいがフィットが良い。

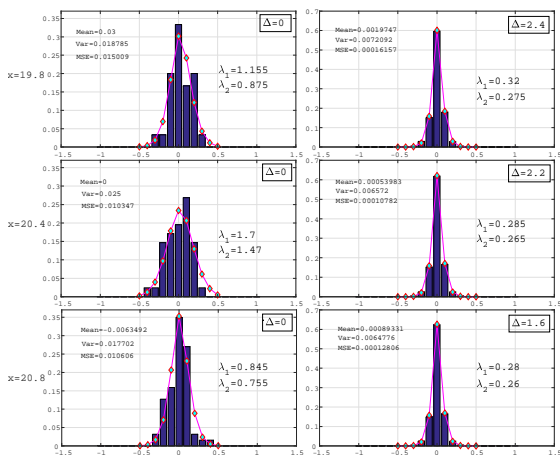


図4(a)：幾つかの現在温度でのヒストグラムとモデル当てはめの結果(現在温度が中心温度より低い側)

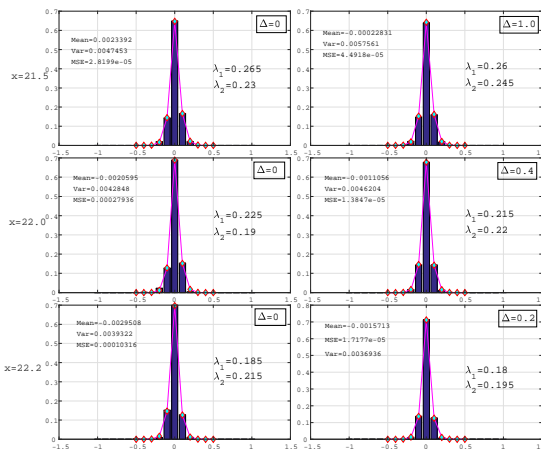


図4(b)：同(現在温度が中心温度より低い側)

このモデル当てはめについては、モデル妥当性を仮説検定(Kolmogorov-Smirnov 検定)により検証した。結果は、上記の平滑化パラメータを適当に上げていくと「妥当」となる(今の場合、棄却されない)温度範囲が広がっていく事が分かった(表1)。ここにおいて、ジャンプ量の各現在温度値での期待値と分散が、混合 Poisson 分布のパラメータで記述され、それが実測値に対し1つの理論値となる。

次に、現在温度値を横軸、ジャンプ量期待値を縦軸としてプロット図をとると、中心温度付近ではほぼ直線(中心温度で横軸と交わる、負の傾きの直線)となる事が分かった(図3)。この事は、中心温度への揺戻し作用の温度制御は、平均的にはバネの復元力

$$y = -k(x - x_0)$$

と全く同じ形(中心からの変位の一次関数)であるという事を意味する。しかも、データからとった期待値実測値と、上記モデルから推定した期待値理論値が中心温度付近ではほぼ一致する事が確かめられた。やはり、提案する混合 Poisson 分布は有力なモデル候補と考えられる。さらに分散についても同様に実測値と理論値をプロットしたところ、ほぼ一致し、しかも中心温度付近で定数となる事が見出された。この事は、中心温度への揺戻しが、シーソーのように「現在温度が下がれば中心温度へ向けて、上げるように働き、上がれば中心温度へ向けて、下げるように働く」という事が自動的に(その切り替えにエネルギーを使う事無く)なされる事を可能にしていると思われる。これは、中心温度付近では平衡系としての様相を呈している事を意味しており、その結果として線形系の制御挙動になっているという事になる。

しかも、この期待値および分散の現在温度に亘っての挙動が混合 Poisson 分布モデルのパラメータにより、捉えられている事が分かる(図5)。

● sample 2 (n=5500)

Δ	x	22.8	9	23.0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	24.0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	25.0	1	2	3	4	5	6	7	8			
$\Delta = 0$	5%	x	x	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o		
$\Delta = 0.2$	5%	x	x	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	
$\Delta = 0.4$	5%	x	x	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o
$\Delta = 0.8$	5%	x	x	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o
$\Delta = 1.2$	5%	x	x	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o
$\Delta = 1.6$	5%	x	x	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o
	1%	x	x	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o

表 1. 混合 Poisson 分布の仮説検定 (o は帰無仮説の混合 Poisson 分布が棄却されない事、x は棄却される事を表す)

要約すると、中心温度付近では、平衡系として、平均的にはバネの復元力と同じ力学系が働いている；カオス性が強くなるのは、恐らく中心温度付近の外側の温度領域であり、そこでは非線形非平衡系の力学系が作用していると予想される。後者については、今後の研究につなげたい。

以上のように、背景で述べた温度制御メカニズム全体像の理解へ一歩大きく前進する成果が得られたと考えている。生化学的・分子生物学的観点や生物物理学的観点からも調べる事はまだ多数あるが、いずれも平衡系 / 非平衡系それぞれでの挙動につながるような分子的挙動や微視的ダイナミクス等を調べるという方針になる事を想定している。そのような非線形系としてのモデル化が、先に得られた温度制御のカオスの挙動の理解につながるものと考えている。特に、中心温度付近では平衡線形系であり、カオスにつながる非平衡非線形系は中心温度付近の外側の領域の挙動に現れており、今後の研究としてはその温度領域の分析を対象とする事になる。

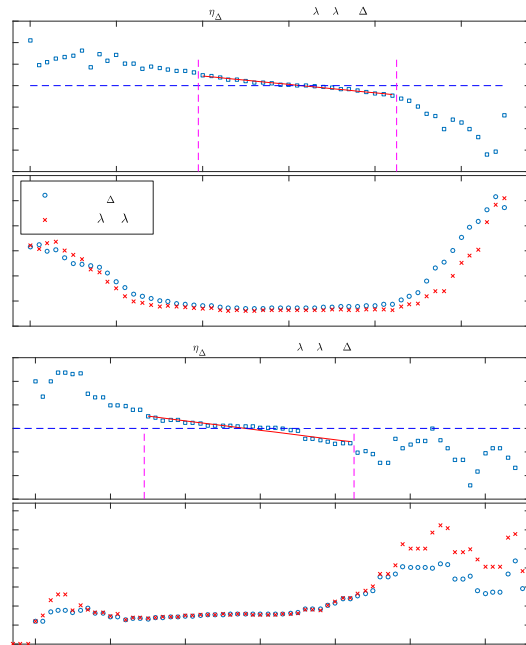


図 5 . 各現在温度における期待値と分散の実測値と混合 Poisson モデルからの理論値

5 . 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

Umekawa, Y. and Ito, K., The Biochemical Basis for Thermoregulation in Heat-Producing Flowers, Sci. Rep., 6, 24830 (2016)

[学会発表] (計 1 件)

川崎秀二、伊藤菊一、ザゼンソウ温度制御メカニズムのデータ解析的考察—混合 Poisson 分布により平衡状態を捉える、応用統計学会、東京 (2017)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

出願状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況 (計 0 件)

名称：

発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

伊藤 菊一 (Ito, Kikukatsu)
岩手大学・農学部・教授
研究者番号：50232434

(2) 研究分担者

川崎 秀二 (Kawasaki, Shuji)
岩手大学・理工学部・准教授
研究者番号：10282922

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

なし