

かの報告があるが、HREELSの測定結果と総合して考えると次の結論が得られる。(1) Si(111)7×7表面では、0.25分子層以下の被覆率において強い化学吸着を行う。電荷移動のモデルで解析すると、C₆₀は1分子あたり(3±1)個の電子をダングリング・ボンドから供給されている。(2) 1分子層の被覆率において、約23%のC₆₀は強い相互作用(化学吸着)を示す。それらのC₆₀分子間をvan der Waals力で物理吸着したC₆₀が配列する。これが、STMで観測される局所的な規則配列構造に対応するものと考えられる。(3) Si(100) 2×1表面ではC₆₀は主にvan der Waals力により吸着する。

ここでは、実験結果の解析に電荷移動のモデルを用いた、次の課題として、(1) 図5に示された電子状態(LUMO)の観察、(2) 化学吸着における波動関数の重なり、つまり、共有結合性の理解がある。筆者らはこのような吸着子と表面原子との相互作用の理解が、表面に任意構造の原子・分子配列を形成するための第一歩であると考えている。

文 献

1) H. W. Kroto, J. E. Fischer and D. E. Cox: *The Fullerenes* (Pergamon,

- 1993).
 2) 篠原久典, 斎藤弥八: 『フラレーンの科学と物理』(名古屋大学出版会, 1997).
 3) X. D. Wang, T. Hashizume, H. Shinohara, Y. Saito, Y. Nishina and T. Sakurai: *Jpn. J. Appl. Phys.* **31** (1992) L983.
 4) D. Chen, J. Chen and D. Sarid: *Phys. Rev. B* **50** (1994) 10905.
 5) H. Xu, D. M. Chen and W. N. Creager: *Phys. Rev. Lett.* **70** (1993) 1850.
 6) S. Suto, K. Sakamoto, T. Wakita, C.-W. Hu and A. Kasuya: *Phys. Rev. B* **56** (1997) 7439.
 7) D. Chen and D. Sarid: *Surf. Sci.* **329** (1995) 206.
 8) D. Klyachko and D. M. Chen: *Phys. Rev. Lett.* **75** (1995) 3693.
 9) T. Hashizume, X. D. Wang, Y. Nishina, H. Shinohara, Y. Saito, Y. Kuk and T. Sakurai: *Jpn. J. Appl. Phys.* **31** (1992) L880.
 10) H. Ibach and D. L. Mills: *Electron Energy Loss Spectroscopy* (Academic, 1982).
 11) S. Suto, K. Sakamoto, T. Wakita, M. Harada and A. Kasuya: *Surf. Sci.* (印刷中).
 12) S. Modesti, S. Cerasari and P. Rudolf: *Phys. Rev. Lett.* **71** (1993) 2469.
 13) M. R. Hunt, S. Modesti, P. Rudolf and R. E. Palmer: *Phys. Rev. B* **51** (1995) 10039.
 14) T. R. Ohno, Y. Chen, S. E. Harvey, G. H. Kroll, J. H. Weaver, R. E. Haufler and R. E. Smalley: *Phys. Rev. B* **44** (1991) 13747.

最近の研究から

同期技術と同期現象

田中久陽
大石進一

〈(株)ソニーコンピューターサイエンス研究所 141-0022 東京都品川区東五反田 3-14-13 e-mail: htan@csl.sony.co.jp〉

〈早稲田大学理工学部情報学科 161-0072 東京都新宿区大久保 3-4-1 e-mail: oishi@oishi.info.waseda.ac.jp〉

同期引き込み現象は本質的に非線形現象であり、その非線形性から、生体におけるリズム的機能や相転移的な動的集団現象等の秩序が現れることが知られている。一方、現在の大規模、分散化ネットワーク社会においても同期技術は必須の要素となっている。本稿では、同期現象の一端を捉えるモデリングの展開とその背景となる数理からスタートし、一つの同期技術と界面する様子を眺める。また、LSI技術にインパクトを及ぼすことが予想される同期問題について述べる。

1. はじめに

現在の技術には大規模化、分散化、ネットワーク化の傾向に応じて“同期”という概念が一層広く深く浸透してきている。良く知られる例に、通信系の同期、電力システムの同期、並列アルゴリズムの同期、マイクロ波発振のコヒーレント同期等があるが、最近では超伝導 Josephson 接合素子列、インターネットのルーティングメッセージの同期現象¹⁾等々、これからの技術にも顔を出している。一方、“非同期”方式という概念も浸透してきているが、これは“同期”方式の単なるアンチテーゼというより、それ自身の固有の因果律に基づくものであり(例えば文献2の非同期式プロセッサ)、“同期”方式と“非同期”方式の境界はなかなか入り組んでいるように思われることがある。このような同期技術を支えるメカニズムはシステムレベル(例えば文献1のインターネットのルーティングプロトコル)か

ら、後に述べる Josephson 接合素子列等の固体物理レベルまで多様であり、全ての“同期”に関する統一理論は期待できそうにない。しかし、このシステムレベルの同期現象と固体素子レベルの同期現象には本質的に共通する構造があるのも事実である。それは各要素の時間発展に固有の安定した“リズム”が存在して、その要素間のリズムの相互干渉が線形な重ね合わせではないという点である。逆に言えば、この構造に注目するだけで、現在の技術の多様な同期のありかたを鳥瞰することができるように思われる。工学の分野においては how を問う応用先行となることが多く、why や what に関わる面倒な問題は後まわしになりがちである。しかし、そのような本質的なメカニズムを明瞭なコトバで捉える努力を続けることで、一つの同期問題の産物が他の同期問題の理解に役立ち、有益なヒントをもたらすことが期待できるかもしれない。このような立場から(発

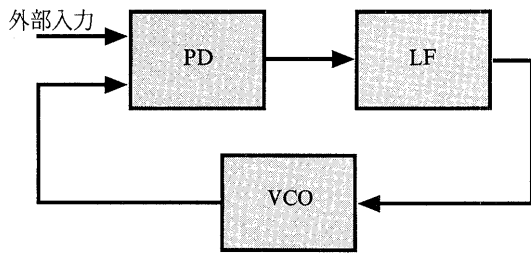


図1 PD, LF, VCO はそれぞれ位相比較器, ループフィルター, 電圧制御発振器を表す. 入力, 出力信号波形により PD の非線形特性が決定される.

展途上ではあるが), 最近我々が興味を持って追求してきた同期現象に関する一つのトピックを紹介したい.

2. 蛍の集団同期明滅と同期現象の位相モデル

従来の通信網に加え, 急速に日常生活に浸透してきた PHS, 携帯電話等は多くの場合, 位相同期回路 (phase-locked loops; PLL) やこの類の回路を内蔵している. 位相同期回路は非線形なフィードバック回路であり, 図1のブロック図が示すように, 外部信号を内部の電圧制御発振器 (VCO) の出力信号と比較し, その誤差に応じて発振器の周波数を制御する. 本質的な点は, この位相比較 (PD) 特性は非線形であるということ, この非線形性ゆえに, 外部信号位相に対して内部信号位相を同期追従することが可能になる. 実用に際して, 出力周波数の通倍回路, チャージポンプ回路等がループ内に付加され, 図1よりも複雑になることがある. また PLL には全ての要素をデジタルに実現した全デジタル型や部分的にアナログなタイプ等, 多様なタイプが存在するが, その本質である“非線形性”と“フィードバック性”は全ての型の PLL に共通するものである. ここでは, もっとも簡素でアナログ的な PLL の動作メカニズムについて考える. この回路の動作モデルは, 非線形振動子の同期現象に対する従来の一般的なモデルの枠組に収まらないように思われ, この技術上の産物である PLL の示す幾分特殊とも思われる特性が何を意味するのか問うことが, 本稿の一つの目的である. 後に述べるように, 蛍の適応的な同期現象を従来の同期現象モデル (位相モデル) から理解しようとするとき, このようにむしろ特殊と思われた PLL の動作メカニズムは意外に普遍的な枠組を考える手掛かりになるように思われる.

2.1 位相同期回路 (PLL)

図1の回路の動作を記述する方程式を与えよう. 入力信号, (VCO の) 出力信号波形が例えば共にサイン波であるとき, それぞれの位相を $\theta_{IN}(t)$, $\theta(t)$ として, 位相比較器 (PD) の出力は入, 出力信号 $\sin \theta_{IN}$, 及び $\cos \theta$ の積で与えられる. その積はループフィルター (LF) を通過し, LF としてローパスフィルターを用いることで, 同期の目的において好ましくない高調波, ノイズが抑制される. このため LF を通過すると高調波 $\sin(\theta_{IN} + \theta)$ は抑制され,

出力電圧は近似的に $\sin(\theta_{IN} - \theta)$ に比例する量で与えられる. この電圧の時間積分が VCO における出力位相の変化分に比例し, この時間積分が常に 0 となる時 (即ち, 入力信号が存在しない時) は, VCO は固有の周波数 (自然周波数) Ω のサイン波を出力し続ける. ローパスフィルターとして, ここではラグフィルターと呼ばれる最もシンプルな場合を考える. そうすると, 以上に述べたループ内の諸量の関係を整理して, θ に関する支配方程式は簡単な計算から (近似的に) 次のように与えられる.

$$\tau \ddot{\theta}(t) + \dot{\theta}(t) = \Omega + Kh(\theta_{IN}(t) - \theta(t)). \quad (1)$$

ここで $h(\cdot)$ は \sin 関数で与えられ, K はループを一巡して得られるゲインを表し, τ はフィルターの時定数を表している. $\tau=0$, 即ちフィルターが存在せず全域通過の時,

$$\dot{\theta}(t) = \Omega + Kh(\theta_{IN}(t) - \theta(t)) \quad (2)$$

によって与えられる. 以上は従来多くの教科書で扱われている内容で特に目新しいものではない.

2.2 位相モデル

一般に, リミットサイクル振動子が十分弱い摂動を受け, その波形自体は保持される一方, 弱い摂動のためにゆっくりとしたタイムスケールでその振動の位相が駆動されることがある. このときリミットサイクルは構造安定であるので, 十分に弱い摂動に対してリミットサイクル近傍には位相の座標系が常に存在して, その位相に関して閉じた方程式が導かれる. その導出の数学的な詳細は別に譲り^{3,4)}得られる結果を述べると, その位相のダイナミクスは前出の (2) 式によって与えられ, Ω は無摂動時の自然周波数, K は摂動の強度を表し, 周期関数 $h(\cdot)$ の形状はリミットサイクルとその近傍の構造及び摂動 (例えば他の振動子からの干渉) の仕方によって一意に求められる. 複数のリミットサイクルが弱い干渉を及ぼしあうとき, 同様にして, その位相のダイナミクスを抽出することができる. 位相モデル (2) 及びその結合系は以上のような意味で普遍的な存在であり, このモデルを用いて結合振動子系の協同現象, 分岐現象に近年深い理解が得られてきている. 例えば蔵本による大域結合位相モデル

$$\begin{aligned} \dot{\theta}_i(t) &= \Omega_i + (K/N) \sum_{j=1}^N \sin(\theta_j(t) - \theta_i(t)), \\ i &= 1, \dots, N, \quad N \rightarrow \infty \end{aligned} \quad (3)$$

は, 自然周波数 Ω_i が i に依存してある分布をもつ均一なリミットサイクル集団から導びかれ, 空間スケールが無視できる場合の協同現象を捉えたモデルとして深い理解が得られてきた.⁵⁾ ここで自然周波数 Ω_i のばらつきは集団同期を妨げる効果を持ち, これに対抗して相互干渉の強度 K を増していくと, ある臨界値 $K=K_c$ が存在して, $K < K_c$ では $r=0$ の非同期状態が持続し, この K_c をわずかにでも越えると部分的引き込み状態がこの非同期状態から分岐する. この挙動は解析的に記述が可能である. 臨界値 $K=K_c$ はダイナミカルなセルフコンシステント理論から求まり,

$$r = |N^{-1} \sum_{j=1}^N \exp(i\theta_j(t))| \geq 0 \quad (4)$$

によって与えられる秩序変数が臨界強度 K_c の近傍で $(K-K_c)^{1/2}$ のオーダーで急峻に立ち上がり、 $r=0$ の非同期状態から新たに部分的引き込み状態が分岐することが得られる。⁵⁾ モデル (2), (3) は普遍的なモデルであるため色々なところに顔を出す。例えば多数の Josephson 接合素子を直列に接続して直流電流を流した時、個々の素子のゆっくりとした時間スケールでの位相のダイナミクスを抽出することが可能となる。その結果は (3) 式に帰着されることが明らかにされ (ただしシステムサイズ N は有限かつ大)、コヒーレント発振を与える臨界電流値とコヒーレンシーを预言する有用な応用をもたらした。⁶⁾ 現在までに大域結合モデル (3) に関する理論は更に深化され、一般化もなされている。大同による理論は上記の秩序変数 r を一般化した“秩序関数”を導入することにより (3) 式の位相比較特性 \sin を一般の周期関数に拡張することを可能とし、(特殊な場合を除き) 秩序関数のノルム (上記の r に対応) は $K-K_c$ に比例して緩やかに立ち上がることを明らかにしている。⁷⁾

2.3 蛍の適応的同期明滅

顕著な集団同期引き込み現象の一例として、東南アジア各地で見られる蛍の同期明滅は有名である。特に *Pt. malaccae* という種は、外部から受ける周期的光刺激 (蛍の明滅を模倣した人工的光パルス) に追従して広い周波数の範囲で位相のラグ無く周波数を同期することの実験結果が報告されている。⁸⁾ (追試を試みて、再現がうまく行かないという報告もある。⁹⁾ 文献 8 の実験結果を認めて、この現象を前出の位相モデル (2) あるいは (3) から説明しようとする、例えば次のような矛盾が生じる。蛍の明滅リズムの位相に着目して、その位相が (2) に従うとする。そこで、(2) において外部からの(光)刺激の周波数 Ω_{IN} が蛍の自然周波数 Ω と幾分異なるとしよう。ここで光刺激の(時刻 t における) 位相 $\theta_{IN}(t)$ は $\theta_{IN}(t) = \Omega_{IN} \cdot t + \phi(t)$ と与えられて、これを (2) 式に代入する。そうすると、蛍が $\theta_{IN}(t)$ に引き込まれるためには ($\dot{\theta}(t) = \Omega_{IN}$ より) $\Omega_{IN} - \Omega = Kh(\phi(t))$ が必要となる。ところが、実際には $h(\cdot)$ は \sin 的形状であり、極端な非線形性はないことが知られていて、かつ K は蛍にとって生理学的に“常識的な”値をとること (即ち、任意に大きな値をとることは出来ない) から、上の関係を満足するような位相差がほぼ 0 になるような ($\phi(t) = \text{const.} \approx 0$) 引き込み状態は存在しない、という矛盾した結論を与える。

Ermentrout¹⁰⁾ は前記の位相モデルにより東南アジア蛍の集団同期の再現を試みた。彼は上記の矛盾を回避するモデルとして従来の位相モデル (2), (3) に新たに“周波数変数” $\omega_i(t)$ を導入して、次のようなモデルを提出した。

$$\dot{\theta}_i(t) = \omega_i(t),$$

$$\begin{aligned} \dot{\omega}_i(t) &= \kappa(\Omega_i - \omega_i(t)) + (K/N) \sum_{j=1}^N h(\theta_j(t) - \theta_i(t)), \\ i &= 1, \dots, N. \end{aligned} \quad (5)$$

ここで $h(\cdot)$ は \sin 的形状であり、 κ を小さく選んで充分高い同期のコヒーレンシーを得ることが可能になる。(正確には文献 10 では $h(\cdot)$ の特性に少々工夫がされているが、基本的には $h(\cdot) = \sin$ である。また結合強度 K も正確には i, j に依存するが、上のようにしても本質を損なわないと期待できる。)

PLL に親しんでいる人には、この Ermentrout の発想、即ちモデル (2) から二階の位相モデル (1) 及び (5) への拡張は自然な印象を受けるのではなからうか。というのは、PLL においても (2) 式の $\tau=0$ (即ち、ループフィルターがなく、全域通過のとき) の一次ループでは“定常位相誤差”が残ってしまうが、(1) 式のクラス二次ループで完全積分フィルター (演算増幅器を含む) を用いることで定常位相誤差を 0 にすることが可能となるからである。

2.4 “慣性力”の起源とその効果

二階の位相モデル (5) は別の意外に身近なところでも知られている方程式である。発電機の系統の出力電圧位相を記述する揺動方程式 (の最も簡単な場合) がそれであり、直観的には棒磁石の集団が磁気力、トルク、ダンピングの力を受けて運動している状態を表している。(現実の発電所系列では慣性定数 ((5) 式では正規化して 1 となっている) 及び K は i, j に依存して大きく異なる。) このように二階の位相モデル (1), (5) の一つの観方は $\kappa=0$ におけるハミルトン系がトルク Ω_i とダンピング $-\omega_i$ によって摂動されたメカニカルな系と見なすことである。

実はもう一つの観方があり、これを少し丁寧に説明しよう。モデル (2), (3) のような一階の位相モデルは弱く相互作用するリミットサイクル集団から位相のダイナミクスを抽出して得られた。このとき相互作用の強度は固定されたパラメーターと見なされていた。ところが、この相互作用自身が要素 (リミットサイクル) の活動に依存してゆっくり駆動されることもあり得る。これは例えばニューロン集団においてシナプス結合強度がニューロンの活動に応じて変化する例に見られる。¹¹⁾ また、前記の PLL ではフィルターの存在がこれに対応していた。このような状況を捉えるモデルとして、相互作用の強度が要素の活動に応じてゆっくり変動する次のようなモデルが提出されている。¹²⁾

$$\begin{aligned} \dot{x}_i(t) &= F_i(x_i(t), s_i(t), s_j(t)), \\ \dot{s}_i(t) &= \epsilon G_i(s_i(t), x_i(t), x_j(t)), \quad i, j = 1, 2. \end{aligned} \quad (6)$$

ここで ϵ は充分小で、 $s_{i,j}$ は上で述べたゆっくり動く結合強度と見なされる。また $s_i = s_j = 0$ で $\dot{x}_i = F_i(x_i, 0, 0)$ はリミットサイクル解 X_i を持つとする。このとき X_i 上の座標系で (6) 式を書き直して、 $s_{i,j} = O(\epsilon)$ のときに早い動きからゆっくりした動きが抽出でき、平均化定理から最終的に次のような位相モデルの存在が証明される。

$$\begin{aligned}\dot{\Theta}_i(t) &= \Omega_i + \epsilon [a_i \cdot \omega_i(t) + b_i \cdot \omega_j(t) + H(\Theta_j(t) - \Theta_i(t))], \\ \dot{\omega}_i(t) &= \epsilon [\omega_i(t) \cdot I(\Theta_j(t) - \Theta_i(t)) + \omega_j(t) \cdot J(\Theta_j(t) - \Theta_i(t)) \\ &\quad + Z(\Theta_j(t) - \Theta_i(t))], \quad i, j = 1, 2.\end{aligned}\quad (7)$$

ここで自然な仮定のもとで $b_i = 0$, $H(\cdot) \equiv 0$, $I(\cdot) \equiv \text{const.}$, $J(\cdot) \equiv 0$ となり得て, 前記の蛍のモデル (5) は (7) 式の特別な場合として含まれることが分かる。(文献12では標準形を求めることを重視しているために (7) 式と異なる形が得られているが, 文献12の結果を玩味して位相モデル (1), (5) に対応する形に整理すると (7) 式が得られる。)

以上は, むしろ数学上の興味から得られたものであるが, その解釈も少々興味深い。それは, 散逸系であるリミットサイクル集団にある観方をすると, 保存系的な構造 (正確にはハミルトン系+散逸等の摂動) が現れるという点である。散逸系が保存系の摂動から得られる一般常識の逆と言って良いのだろうか? 前項までに述べたように, 一階の位相モデル (2), (3) と二階の位相モデル (1), (5) は, その現れる分野の違いのためか組織的に調べられることがなかったように思われる。筆者は二階の位相モデルが一階の位相モデルと本質的に異なる点があつて, どのように現れるかという点をいくらか明らかにしてきた。以下にその要点を紹介する。まず最も低自由度の場合

$$\tau_i \ddot{\Theta}_i + \dot{\Theta}_i = \Omega_i + K_i h(\Theta_j - \Theta_i), \quad i, j = 1, 2 \quad (8)$$

を考えよう。ここで $\tau_1 = \tau_2 = 0$ の一階の位相モデル ($h(\cdot) = \sin$) は時差ボケ等を説明するサーカディアンリズムの外挿的モデルとして提出されており,¹³⁾ 任意の Ω_i, K_i に対し可解であることが証明されている。(即ちカオティックにはなり得ない。) 一方, $\tau_i \neq 0$ の二階のモデルは前記の位相同期回路の相互結合系として知られており,^{14, 15)} 応用上, 相互同期の限界, 即ち同期から非同期へ転移するパラメータ値を求めることが問題であった。遠藤ら¹⁵⁾ は, この相互同期系 (8) 式を回路及び数値実験から詳しく調べ, 広い範囲の現実的な回路パラメータに対し, 同期, 非同期の臨界状態の近傍において鋭クノイズを発生する領域があることを確認し, これがカオティックであることを裏付けるデータを得た。筆者はこの結果に対し, (8) 式によって定まるベクトル場の構造を詳しく解析することから,

(i) (8) 式における同期, 非同期の臨界状態は不安定平衡点を結ぶホモクリニック軌道の存在に対応すること, 更に (ii) 臨界の近傍では, このホモクリニック軌道近傍のベクトル場に沿って馬蹄型写像が生成され, 同期が僅かにはずれたノイズな状態がカオティックであり得ることの証明を得た。

実は, ここでのカオスは従来の低次元カオスの分類上, 新しいクラスに属するものであり, 最近, 国府らによって得られていた数学上の抽象的成果 (orbit-flip homoclinic 分岐)^{16, 17)} に対応する最初の現実的な実存系を与えることになった。¹⁸⁾

一方, 高次元系の極限 (5) (但し $h(\cdot) = \sin$, $N \rightarrow \infty$) に対

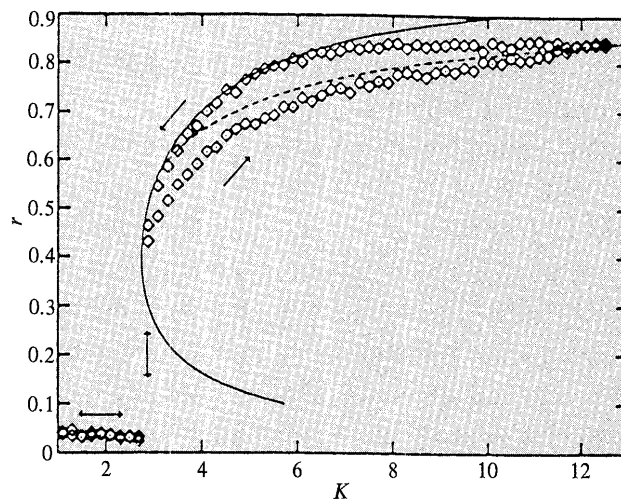


図2 慣性項をもつ位相モデル (5) の示すヒステリシス集団同期の一例。縦軸は同期のコヒーレンス (4), 横軸は振動子間の結合強度を示す。二つの曲線 (実線, 破線) はそれぞれセルフコンシステント関係式より得られる。(ここでは Ω の分布は Lorentz 分布に従うとした。) \diamond は理論値に対応する数値実験結果 ($N=500$)。詳しくは文献 20 を参照のこと。

して, その協同現象は $\kappa=0$ のハミルトン系の場合に熱平衡状態として 2 次相転移を示すことは知られていたが,¹⁹⁾ $\kappa \sim O(1)$ ではどうなるか未知であった。我々はここで蔵本⁵⁾ と同様なセッティングで, 系の初期条件依存性を考慮したセルフコンシステント理論により以下を明らかにした。

- (i) 二階の系 (5) 式は蔵本の系 (3) 式とは異なる不連続的ジャンプ, ヒステリシスを伴う相転移を呈し, そのインコヒーレント状態 ($r=0$) から (部分的) コヒーレント状態へジャンプを示す臨界強度 K_c は, 対応する (3) 式の K_c より常に大きくなる。逆に, 一度コヒーレンスを得ると結合強度 K を減少していても, これが持続し, 同じ結合強度 K に対し先と異なるより高いコヒーレンスを得ることが導かれる。これらに対し κ のある範囲で理論と数値シミュレーションの良い一致を得た。^{20, 21)}
- (ii) 一方, $\kappa \rightarrow 0$ となるにつれ, モデル (5) は多重の異なる同期周波数を持つ多数のクラスターを持ち, このパターンが安定化し, (i) におけるクリアーな相転移は (数値的に有限系で調べてみる限り) 認められない。²²⁾

3. 本稿のまとめと今後のチャレンジ

従来の結合振動子の枠組みを若干広げ“結合強度”自身のダイナミクスを考慮することで, (1), (5), (7) 式のタイプの位相方程式が得られ, これらは従来の固定された結合強度の結合振動子系にみられなかった“周波数変数”のダイナミクス (即ち, 慣性効果) を引き起こすことをみてきた。本来, このクラス方程式系は工学上の動機^{23, 24)} に触発されてきたものであるが, 従来の物理サイドの非線形振動子系の研究との界面に興味ある問題を提供することを紹介した。本稿では結合の仕方が均一で大域的である場合のみを考えたが, 相互作用が大域的でないとき, 空間依存パターン問題^{25, 26)} が本質的になる。本稿で述べた周波数変数を含む二階の位相モデルに関しては, 空間依存パターン問

題は殆んど明らかになっていないと思われる。この問題はそれ自身の興味に加え、応用上(例えば文献27の延長上で)重要となると期待される。

最後に同期技術の一つの現在のチャレンジについて述べる。現在のデジタルシステムの多くは、例えばマイクロプロセッサにおけるように、クロックと呼ばれる制御信号によってその計算の実行が逐次的に行なわれる。クロッキングは人間の脈拍に相当するもので、許容される遅延の内であるべきエネルギー制約のもとで行なわれなければならない。現在、大規模集積回路(VLSI)は大規模、高周波数化の傾向にあるために、クロック分配とタイミング同期設計は困難さを増している。この困難を回避可能な一つの方法として非同期式設計が展開されている²⁾が、前項までに述べた相互同期系が、もしVLSIシステムでも実現されるならばどうだろうか? 従来の同期式回路を放棄することなく、より大規模なクロック分配が比較的少ない回路上のオーバーヘッドと配線数で実現される可能性があるのではないだろうか? 実際、最近のプロセッサは1チップ内にPLLあるいは遅延同期回路(DLL)が組み込まれ、クロック同期のために用いられている。²⁸⁾ここでの同期は一方向的に注入される外部クロックに内部のクロックを同期させる“強制同期”というもので、前述の蛍等に見られる相互同期とは対極的である。ところが、過去のデジタルシステムの黎明期の技術を振り返ってみると、クロック素子の信頼性が十分でなかったため、相互同期方式が積極的に検討され確立されていたことがわかる。²⁹⁾皮肉なことに、現在ますます微小化、高周波数化の進むVLSIシステムは、ノイズ、信号遅延、断線等の問題がより顕在化していく点で、ある意味で黎明期のデジタルシステムに接近しつつあるように思われる。このような現在(及び近い将来)のVLSIの現状において、クロック同期の一つの技術として相互同期技術を再検討してみることは有意義ではなからうか? もし、相互同期手法が実現されると次のような利点が期待される。(i) 自律分散性: 究極的には“外部のクロック源”を取り除き、on-chipのクロック源により相互同期を達成する。(ii) クロック周波数のばらつきに対するロバスト性: 相互同期において各クロックは互いに歩み寄って各々の周波数を揃えることが可能であるが、強制同期ではこれは不可能なため、あらかじめ各々のクロック周波数は十分揃っている必要がある。(iii) 配線の断線に対する耐故障性。

更によりシステムレベルでの通信の同期技術の多様な可能性を従来のmaster-slave方式以外にも追求していくことは、通信とコンピューテーションがもはや不可分である現在、³⁰⁾非常に重要であると思われる。また現在のネットワーク技術にもとづくインターネットでは情報の流れが自明でない統計的性質を示し、これを捉えるチャレンジは既に始まっている。^{31, 32)}

本稿は国際高等研ワークショップ“複雑系の秩序と構造”

における数年来にわたる議論に触発して書かれた。お世話になったオーガナイザー長谷川晃、高安秀樹、伊藤伸泰、郷原一寿、吉田善章の各氏及び参加者の皆様に御礼申し上げます。位相同期回路に関して遠藤哲朗氏、蛍の集団同期明滅に関して大場信義氏、カオスに関連して松本隆氏、相沢洋二氏、蔵本モデルに関して佐々真一氏、西森拓氏、相転移、くり込みの技法に関連して広田良吾氏に、発電所系列に関して岩本伸一氏、東電システム研監視・制御グループの諸氏に有益な御助言を頂いた。重ねて御礼申し上げます。最後に筆者を同期現象に引き込んで下さった渡辺辰夫氏に感謝いたします。

参考文献

- 1) S. Floyd and V. Jacobson: *Proc. ACM SIGCOMM'93, Ithaca, New York* (ACM Press, 1993) p. 33.
- 2) 南谷 崇: 情報処理 **34** (1993) 72—非同期式プロセッサ.
- 3) Y. Kuramoto: *Chemical Oscillation, Waves and Turbulence* (Springer, Berlin, 1984).
- 4) S. H. Strogatz: *Nonlinear Dynamics and Chaos* (Addison-Wesley, Massachusetts, 1994).
- 5) Y. Kuramoto: *Lecture Notes in Physics* **39** (Springer, New York, 1975) p. 420.
- 6) K. Wiesenfeld, P. Colet and S. H. Strogatz: *Phys. Rev. Lett.* **76** (1996) 404.
- 7) H. Daido: *Physica D* **91** (1996) 24.
- 8) J. Buck: *Q. Rev. Biol.* **63** (1988) 265.
- 9) 大場信義氏(横須賀市立博物館)より私信.
- 10) B. Ermentrout: *J. Math. Biol.* **29** (1991) 571.
- 11) P. R. Adams, S. W. Jones, P. Pennefather, D. A. Brown, C. Koch and C. Lancaster: *J. Exp. Biol.* **124** (1986) 259.
- 12) P. Frankel and T. Kiemel: *SIAM J. Appl. Math.* **53** (1993) 1436.
- 13) S. H. Strogatz: *J. Math. Biol.* **25** (1987) 327.
- 14) K. Dessouky and W. C. Lindsey: *IEEE Trans. Commun.* **32** (1984) 110.
- 15) T. Endo and L. O. Chua: *IEEE Trans. Circuit Syst. I* **37** (1990) 1183.
- 16) H. Kokubu, M. Komuro and H. Oka: *Int. J. Bifn. & Chaos* **6** (1996) 833.
- 17) A. J. Homburg, H. Kokubu and M. Kurupa: *J. Ergod. Th.* **14** (1994) 667.
- 18) H. Tanaka: *Phys. Rev. Lett.* **74** (1995) 1339.
- 19) S. Inagaki: *Prog. Theor. Phys.* **90** (1993) 577.
- 20) H. Tanaka, A. J. Lichtenberg and S. Oishi: *Phys. Rev. Lett.* **78** (1997) 2104.
- 21) H. Tanaka, A. J. Lichtenberg and S. Oishi: *Physica D* **100** (1997) 279.
- 22) 田中久陽: 未出版
- 23) H. Tanaka, S. Oishi and K. Horiuchi: *IEEE Trans. CAS I* **43** (1996) 438.
- 24) H. Tanaka, *et al.*: *Int. J. Bifn. & Chaos* **7** (1997) 681.
- 25) Y. Kuramoto and H. Nakao: *Phys. Rev. Lett.* **76** (1996) 4352.
- 26) H. Daido: *Phys. Rev. Lett.* **78** (1996) 1683.
- 27) N. G. Jensen, A. R. Bishop and D. Dominguez: *Phys. Rev. Lett.* **76** (1996) 2985.
- 28) J. G. Maneatis: 1996 IEEE ISSCC Proc. (IEEE, 1996) p. 130.
- 29) 例えば, J. Yamamoto, M. Ono and S. Usuda: *IEEE Trans. Comm. COM-16* (1968) 1.
- 30) D. G. Messerschmitt: *Proc. IEEE* **84** (1996) 1167.
- 31) M. Takayasu, H. Takayasu and T. Sato: *Physica A* **233** (1996) 824.
- 32) M. Takayasu, A. Y. Tretyakov, K. Fukuda and H. Takayasu: in *Traffic and Granular Flow '97* Springer, Singapore, 1998).

非会員著者の紹介 著者の一人である大石進一氏は1953年浜松生まれ、1976年早稲田大学理工学部電子通信学科卒、1981年同大学理工学研究科博士後期課程修了、工学博士。1980年より早稲田大学勤務。現在、同大学理工学部情報学科教授。非線形解析、精度保証付き数値計算の研究に従事。電子情報通信学会論文賞2回、猪瀬賞受賞。