

平成 30 年 5 月 23 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26286086

研究課題名(和文) 注入同期の実現可能限界を達成する最適設計論の確立および応用開拓

研究課題名(英文) Optimal design method realizing the maximal limit of injection-locking and its applications.

研究代表者

田中 久陽 (Tanaka, Hisaaki)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・准教授

研究者番号：20334584

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 9,200,000円

研究成果の概要(和文)：注入同期により発振器の周波数安定性の向上が可能である。そのため様々な応用を念頭に盛んに研究が進められている。ところが注入同期の性能を最適化する理論や解析的設計手法は、その必要性にも関わらず、これまで確立されていなかった。本研究は新規な非線形最適化理論を構築することにより、注入同期の性能最適化を初めて可能にした。さらに本研究は、注入同期型E級発振器を例として、発振器における引き込み周波数帯(ロックレンジ)の最大化の実現可能性を理論、数値シミュレーション、回路実験によりはじめて実証した。

研究成果の概要(英文)：Injection-locking of nonlinear oscillators to an external periodic forcing is a fundamental phenomenon which adjusts their frequencies to that of an external forcing. Such injection-locking enables to stabilize the frequency of the oscillator, and it has a long history and produces a large variety of applications. In our research, we develop a method for maximizing the frequency range of an external forcing sustaining the injection-locked mode (i.e., locking range or synchronization band), based on our newly developed optimization theory. As a case study of optimizing synchronizability, we design the input waveforms that maximize locking ranges in an injection-locked Class-E oscillator, by using our optimization theory. Further, we verify the optimality of these inputs through systematic numerical calculations and experiments.

研究分野：計算科学

キーワード：非線形最適化 注入同期 マイクロエレクトロニクス

1. 研究開始当初の背景

注入同期現象とは自励発振系に外部信号を強制注入すると発振系が外部信号に同期する現象で基本的な物理現象である。これを利用する技術は真空管時代に端を発し、現在のミリ波等の高周波数帯での利用、省電力設計、回路の微細化の要請から、その現代的リバイバルが盛んである。たとえばミリ波帯を用いるベースバンド通信において、注入同期回路は通信の品質を保証する必須構成要素であり、VLSI 技術のオリンピックと呼ばれる国際会議 ISSCC では、注入同期回路に関連する発表が過去数年間、毎年複数件が報告されている。一方で、サイエンスとしても Nature, Science 誌等において注入同期に関連する物理現象や生体リズム (生物時計) の研究が頻繁に発表され、特に生物時計の制御に関しては、これまで阪府大などが開発している「植物工場」とよばれる屋内での植物の高効率生産技術において、光や温度の刺激による生物時計制御のために注入同期系の設計が生産高に直結する重要な要素となっている。

しかし、これらの必要性にも関わらず、注入同期系の設計には系統的設計論が存在せず、現場では経験や勘に頼らざるを得ない状況である。例えばミリ波発振器の場合、真空管時代のアドラーの方程式の弱非線形性の前提のもとで能動素子の非線形性を考慮し、過去数十年にわたり基本波/分数調波/高調波に係わる同期理論が研究されてきたが、(a) 依然として入力为正弦波から大きく異なる場合や発振器の非線形性が強い場合の取り扱いが困難であり、現在のパルス入力や非線形性の強い CMOS 回路などに対しては有効な設計論が存在せず、設計上の唯一の拠りどころは回路シミュレーションによる試行錯誤となっている。また、(b) 諸々の現実的制約条件のもとで注入同期系の能力を最大化する最適設計論も存在しなかった。この状況下で、研究代表者 (田中) らの過去の基盤 B 研究は、パワー制約という新たな視点から変分解析により、注入同期技術を最適化する理論・アルゴリズムを開拓した。しかし、これは消費パワー一定という限定的ケースにのみ成立する適用範囲の限定された結果であり、例えばパルス入力などは取り扱いが不可能であった。

2. 研究の目的

以上の経緯から、田中らは過去の基盤 B 研究 (2011~2013 年度「変分解析を軸とした同期・引き込み最適化アルゴリズムの開拓と現実的問題への応用」) での前提条件であるパワー制約を越え、より広いクラスの現実的制約条件下で、「注入同期系の性能向上限界は存在し、それが達成可能か?」という究極的な基本問題の解決に踏みこむ必要が生じた。その結果、上記の課題(a)(b)の背後には意外な数学的構造が存在し、無限次元の極値問題として (パルス入力も解として許容し) 「可解」となることが理論的に明らかとなり ([雑誌論

文] ⑦), さらにこの理論的結果は Tsallis (ツァリス) 統計にしたがうべき分布を示す系にも有効であることが判明した ([雑誌論文] ④)。この予備的結果 ([雑誌論文] ④, ⑦) は、上記の課題(a)(b)に完全な解答を与える具体的アルゴリズムを伴っているため、工学的応用として、マイクロエレクトロニクス、および植物工場での生物時計の制御において、従来のどのような研究でも構築できなかった、種々の現実的制約条件 (パワー制約以外に、例えば注入電流の積分制約、振幅制約、それらの混合制約等) に対応可能な系統的設計論が、ここにはじめて構成可能となる見通しを得た。例えば応用上重要な、分数調波/高調波の入力や、あるいはパルス入力のみによる最適制御手法が網羅的に得られるが、これは (過去の田中らの基盤 B 研究を含め) 従来のどのような方法によっても困難であり、また世界のどの研究グループもこれを成し得ていないものである。したがって、本研究は新規な極値問題の枠組みを整備・拡大しつつ、新しい工学的応用として注入同期、さらにべき分布を示す系の最適設計・制御論を構築し、工学・物理の応用分野開拓に踏み込むことを目的とした。

3. 研究の方法

3.1 注入同期の解析の枠組み

まずはじめに、注入同期の解析を目的として利用可能な解析的アプローチについて概説する。注入同期の性能を評価する尺度として、ロックレンジ (locking range) は重要である。ロックレンジとは注入同期が成立する外部信号 (入力) の周波数帯域のことであり、これが広ければ、より柔軟かつロバストな注入同期が得られるからである。これを図 1(A) に示す。ここで、縦軸の $\Delta\omega$ は発振器の自励発振周波数と入力周波数の差 (離調) を表し、横軸は入力の強度を表す。この、くさび状のロックレンジすなわち同期化領域の外では、

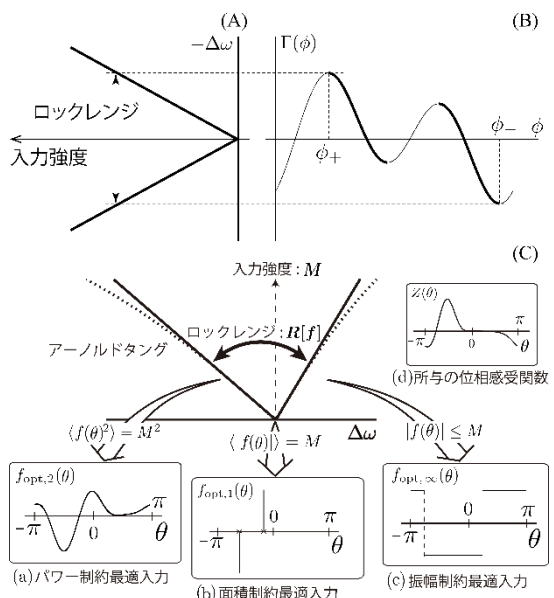


図 1 (A) ロックレンジ, (B) 位相結合関数, (C) 最適入力の様子

同期が成立せず利用不可能となる。以下では入力強度が十分小さな、弱入力の場合を仮定する。この仮定は、現在の電子機器においても、入力（電流）がデバイスを損傷しないために、また省電力性の要請からも、自然で合理的なものである。

工学分野での注入同期の先行研究は、アドラーにはじまり、その後、黒川、大黒らと一般化が進み、かつ解析の対象も広がっているが、その前提条件が発振器は弱非線形、かつ入力はほぼ正弦波と仮定しており、発振器の非線形性が強い場合や、入力が正弦波から大きく外れる場合には、取り扱いが一般に困難となる。

そこで、先行研究の一般化と見做される、位相方程式の導出と、それによる注入同期の解析について説明する。ここで扱う発振器はリミットサイクル解を持つ非線形振動子とみなせる。そのダイナミクスは一般に、次の方程式に従う。

$$\frac{dx}{dt} = F(x) + I(t) \quad (1)$$

ここで、 $x(\in \mathbf{R}^n)$ は状態変数、 $I(t)(\in \mathbf{R}^n)$ は周期的入力を表す。ここでは、簡単のため（一般性を失わず）、入力 $I(t)$ は回路中の1点に注入される入力 $f(t) \in \mathbf{R}$ とする。このとき、リミットサイクル解を $x_0(\in \mathbf{R}^n)$ とすると、これに沿って発振位相に相当する $\psi (\in [0, 2\pi] \equiv S)$ という（局所的な）変数が導入される。その結果、入力 f が弱入力という仮定の下で、式(1)は $x = x_0$ の近傍において次の ψ についての方程式に縮約される。

$$\frac{d\psi}{dt} = \omega + Z(\psi) \cdot f(t) \quad (2)$$

ここで、 ω は自励発振周波数、 $Z(\psi)$ は位相感受関数とよばれる周期関数である。さらに入力の周波数を $\Omega (\sim \omega)$ とすると、 ψ に代わる変数 $\phi = \psi - \Omega t$ が定義され、速い動きに関する平均化により、 ϕ について閉じた次の位相方程式が得られる。

$$\frac{d\phi}{dt} = \Delta\omega + \Gamma(\phi) \quad (3)$$

ただし $\Gamma(\phi) = \langle Z(\theta + \phi)f(\theta) \rangle$ 。ここで、 $\langle \cdot \rangle$ は θ についての1周期にわたる平均を示し、 $\Gamma(\phi)$ は位相結合関数とよばれる。なお、以下では、式(2)や式(3)への縮約を「位相縮約」とよぶ。

図1(B)はロックレンジの導出を説明している。注入同期が成立するための必要十分条件は、 ϕ が $d\phi/dt = 0$ かつ $\Gamma'(\phi) < 0$ をみたすことであり、位相結合関数の最大値 $\Gamma(\phi_+)$ と最小値 $\Gamma(\phi_-)$ の範囲内に離調 $(-\Delta\omega)$ が入っていることが導かれる。

以上は、1:1引き込み（すなわち、 $\omega : \Omega \approx 1 : 1$ ）の場合であるが、同様のことが $m : n$ 引き込み（すなわち、 $\omega : \Omega \approx m : n$ ）の場合に成立する。その場合の位相方程式は、

$$\frac{d\phi}{dt} = \Delta\omega + \Gamma_{m/n}(\phi) \quad (4)$$

ただし $\Gamma_{m/n}(\phi) = \langle Z(m\theta + \phi)f(n\theta) \rangle$ となる。実際に所与の発振器に対し位相方程式を導く際、上記の位相感受関数 Z を正確にかつ効率良く求めることが重要である。これは例えば〔雑誌論文〕⑥のような複雑な発振器に対しても、インパルス応答関数法により、回路シミュレーター（SPICE）から直接に、数値的に得ることが可能になっている。

3.2 変分法によるアプローチ

以上の準備のもとで、注入同期を最適化する最適化問題が定式化される。ロックレンジを最大化する場合は、入力 f に対し、次の汎関数を定義する。

$$J[f] \equiv R[f] + \lambda(f(\theta) - C) \quad (5)$$

ここで、 $R[f]$ は f に対し（図2(B)のように、一般に一意に定まる）ロックレンジを与え、具体的には

$$R[f] = \Gamma(\phi_+) - \Gamma(\phi_-) \\ = \langle \{Z(\theta + \phi_+) - Z(\theta + \phi_-)\}f(\theta) \rangle \quad (6)$$

と表示される。ここで ϕ_+ および ϕ_- は、それぞれ位相結合関数 $\Gamma(\phi)$ が最大・最小となる ϕ を表している。また、 $\langle f(\theta) - C \rangle = 0$ は入力 f の1周期平均が C となる制約条件であり、特に $C = 0$ のときチャージバランス制約とよばれる。これはつまり、注入される正味の電荷がゼロになるという制約である。また式(5)の λ はラグランジュの未定乗数である。要するに式(5)により、 $\langle f(\theta) \rangle \equiv C = 0$ という制約を満たす f のうち、 $R[f]$ を最大にする最適解 f_{opt} を決めるための (f, λ) についての極値問題が定式化される。

この極値問題が一意に解をもつためには、もう一つ制約条件が必要である。たとえばパワー＝一定とした入力、すなわち、 $\langle f^2(\theta) \rangle = \text{一定}$ という制約条件を課すと、その最適解 f_{opt} は、変分法を用いて

$$f_{\text{opt}}(\theta) = \frac{1}{2\lambda} \{Z(\theta + \phi_+) - Z(\theta + \phi_-)\} \quad (7)$$

と求まり、その極大性も確認される。ここで $\lambda = \frac{1}{2} \sqrt{P/Q}$ 、ただし $P = \langle f^2(\theta) \rangle$ 、 $Q = \langle \{Z(\theta + \phi_+) - Z(\theta + \phi_-)\}^2 \rangle$ であり、 ϕ_{\pm} は Z についての非線形方程式から数値的に得られる。

以上においては、変分法（オイラー・ラグランジュ方程式）が用いられ、これによる最適解は式(7)の ϕ_{\pm} に対し、一般に複数得られることが判明した。これらは、田中の過去の基盤B研究（2011～2013年度「変分解析を軸とした同期・引き込み最適化アルゴリズムの開拓と現実的問題への応用」）の成果である。しかし、その他にも最適解があるのか、さらにそれらの中でベストな最適解（すなわち物理的境界）とは何であるか、についての情報は変分法によっては原理的に得られず、モヤモヤした感じが残っていた。

4. 研究成果

4.1 注入同期の物理限界の存在: 不等式によるアプローチ

ところが, 当該の基盤 B 研究により, このベストな最適解の存在や非存在, さらにより広いクラスの制約条件下での最適解が議論でき, 注入同期の物理限界の存在が明らかになった. 以下の基本的な問題は応用上重要であるが, これらも解答可能となった.

P1 上で述べたパワー制約された入力 ($\langle f^2(\theta) \rangle = P = \text{一定}$) に対し, 1:1引き込みのロックレンジを最大化するものは存在するか? もし, 存在するならば, それは唯一か? また, その最大ロックレンジの物理的な意味はどのように特徴付けられるのか?

P2 上記のパワー制約入力に代わり, 面積制約された入力 (つまり, その値の絶対値の積分が一定値に抑えられた入力) に対し, 1:1 引き込みのロックレンジを最大化するものは存在するか? あるいは振幅制約された入力 (つまり, その絶対値が一定値以内に抑えられた入力) の場合はどうか? それらはどうのように特徴付けられるのか?

P3 以上での1:1引き込みの最適化問題は, 一般の $m:n$ 引き込みの場合にも成り立つか? もし, そうならば, その場合の最大ロックレンジはどのように特徴付けられるのか? また, 1:1引き込みの場合とどのような関係があるのか?

これらの基本問題 **P1**, **P2**, **P3** に対し, ある意味で完全な解答が可能であることを (以下の **S1**, **S2**, **S3** において) 示す. その準備として, まず入力 f の属すクラスとして p 乗可積分関数 $L^p(S)$ を導入する.

$$\|f\|_p \equiv \langle |f(\theta)|^p \rangle^{\frac{1}{p}} = M < \infty \quad (8)$$

ただし, $p \geq 1$ であり, M は正定数とする. 特に $p = 2$ の場合, 式(8)は $\langle f^2 \rangle = M^2$, すなわち f のパワーが M^2 に制約されることを示す. また, $p = 1$ の場合, $\langle |f| \rangle = M$, すなわち f の「面積」が M に制約される. 一方, $p = \infty$ では式(8)は $\|f\|_\infty = M$ に相当し, $\|f\|_\infty$ は $|f(\theta)|$ の本質的上限 (ess. sup) なので $|f(\theta)| < M$ (殆んど全ての $\theta \in S$) となる. 要するに, これらの f には微分可能性や連続性も必要とせず, **3.2** の変分法によるアプローチで暗黙に仮定していたよりも広いクラスの関数となっている.

更に, 式(8)に加え, 先に述べたチャージバランス制約を導入する.

$$\langle f(\theta) \rangle = 0. \quad (9)$$

以上のもとで, **3.2** でのパワー制約のもとでの注入同期のロックレンジの最大化は, 次の最適化問題として定式化される.

$$\begin{aligned} & \text{maximize } R[f] \\ & \text{subject to } \langle f(\theta) \rangle = 0, \|f\|_p = M. \end{aligned} \quad (10)$$

ここで, **3.2** と同様に, 少し工夫をして, $\|f\| = M$ の下で $J[f] = R[f] + \lambda \langle f(\theta) \rangle$ を最大化する f と λ を求める問題に焼き直すことができる. さらに, この $J[f]$ は, 式(6)により次のように2つの関数 f と g の内積として表示が可能である:

$$J[f] = \langle f(\theta) [\bar{Z}(\theta) + \lambda] \rangle \equiv \langle f(\theta) g(\theta) \rangle, \quad (11)$$

ただし $g(\theta) = \bar{Z}(\theta) + \lambda$, $\bar{Z}(\theta) \equiv Z(\theta + \Delta\phi) - Z(\theta)$ および $\Delta\phi \equiv \phi_+ - \phi_-$ であり, この $\Delta\phi$ は変数 θ の座標変換 $\theta + \phi_- \rightarrow \theta$ により自然に導入された.

3.2 では, この $J[f]$ の最大化に変分法を用いたが, 式(11)をみれば, この問題はしかるべき構造をもつことに気がつく. そのキーとなるのが, 次のヘルダーの不等式 (Hölder's inequality) である.

$$\|fg\|_1 \leq \|f\|_p \|g\|_q, \quad (12)$$

ただし, この p, q は $1 \leq p, q \leq \infty$, $p^{-1} + q^{-1} = 1$ を満たす. この式(12)より, 式(11)の $J[f]$ を最大化することは,

$$\begin{aligned} J[f] &= \langle fg \rangle \leq \langle |fg| \rangle \\ &= \|fg\|_1 \leq \|f\|_p \|g\|_q = M \|g\|_q \end{aligned} \quad (13)$$

において全ての等号が成立する入力 f を, 所与の $g (= \bar{Z}(\theta) + \lambda)$ について求めることに帰着する. 紙面の制約から詳細は他に譲り, (先の **P1**, **P2**, **P3** にそれぞれ対応して) 得られた結果を以下に整理する. その大枠は, 図 1(C)の(a), (b), (c)に示すように, $1 < p < \infty$ (特に $p = 2$), $p = 1$, $p = \infty$ の3通りに分類される¹. 各々の概要は以下の通りである.

S1 $1 < p < \infty$ の場合, 1:1引き込みにおいて, 最適な入力 ($\equiv f_{\text{opt},p}$) は $L_p(S)$ 内で唯一存在する. この $f_{\text{opt},p}$ は, Z により陽に与えられ, このベストな最適入力に対応する最大ロックレンジとは, ヘルダーの不等式(12)の右辺に他ならない.

S2 $p = 1$ の場合の1:1引き込みにおいても最大ロックレンジに上限が存在する. 一般的な Z に対し $L_1(S)$ 内でしかるべき正負一対のパルス入力 ($\equiv f_{\text{opt},1}$) を設計することにより, この上限へパルスの幅を細くするにつれ, いくらかでも漸近可能である. このパルス入力の形状は上記の **S1** での最適入力における $p \rightarrow 1$ の極限と整合し, このロックレンジの上限は, ヘルダーの不等式(12)の右辺で $p = 1$, $q = \infty$ とおいたものに相当する. 一方, $p = \infty$ の場合の1:1引き込みにおいて, 最適入力 ($\equiv f_{\text{opt},\infty}$) は $L_\infty(S)$ 内で唯一存在し, Z により陽に表示され, **S1** の最適入力での $p \rightarrow \infty$ の極限に一致する. これに対応する最大ロックレンジは, ヘルダーの不等式の右辺で $p = \infty$, $q = 1$ とおいたものに相当する.

¹ 本報告書では, 周期的自発発火を示す Hodgkin-Huxley ニューロンモデルから得られる Z を一例とする. これは, 図 1(C)の(d)に示すとおりである.

S3 ここでは簡単のため Z , f , および以下で定義する Z_n , f_m はいずれもフーリエ級数表示が可能なクラスの関数とする:

$$Z_n(\theta) \equiv a_0/2 + \sum_j (a_{nj} \cos nj\theta + b_{nj} \sin nj\theta),$$

$$f_m(\theta) \equiv c_0/2 + \sum_k (c_{mk} \cos mk\theta + d_{mk} \sin mk\theta).$$

また対応する $\Gamma_{m/n}(\phi) = \langle Z(m\theta + \phi)f(n\theta) \rangle$ も, Z , f のフーリエ級数から項別積分により, フーリエ級数表示可能とする. このとき三角関数の積の公式から

$$\Gamma_{m/n}(\phi) = \langle Z(m\theta + \phi)f(n\theta) \rangle = \langle Z_n(m\theta + \phi)f_m(n\theta) \rangle$$

である. この式は, **S1**, **S2** で得られている 1:1 引き込みの最適入力を得るアルゴリズムにおいて, Z を Z_n とおきかえるのみで一般の $m:n$ 引き込みの最適入力が $f_m(n\theta)$ の形で得られることを示す. 図 3 の (a), (b) はそれぞれ 1:1 引き込みと 1:2 引き込みの最適入力を示すが, 1:2 の場合は 1:1 の場合に比べ波形がシンプルになっている. これは Z_n (ただし, ここでは $n=2$) において, 図 3(c) に示す元の Z での高調波からの寄与が少なくなるためであり, 一般に n が大きくなるにつれこの傾向が顕著になる ([雑誌論文] ⑤).

これらの結果により, **P1**, **P2**, **P3** への解答が得られた. 以上の **S1**, **S2**, **S3** およびこれらに関する最適化アルゴリズムの基礎として, いくつかの定理が得られている ([雑誌論文] ⑦). すなわち, これまでの先行研究では出来なかった次のことが可能になった.

- ① 「注入同期の物理限界」の存在証明・本質を示すこと,
- ② パルス入力の取り扱い,
- ③ ロックレンジの最大化, 安定性の最大化, 一般の $m:n$ 引き込みでの最適化問題が系統的に解答可能となること.

要するに, 以上により弱入力の場合の注入同期の物理限界に対し, 一般的に成立する「基本法則」のようなものがあることが判明した.

4.2 応用例

本研究の成果は様々な応用が可能であるが, その一例として, 最近パワーエレクトロニクス分野で注目されている E 級発振器への応用を念頭に, 図 1 に示す注入同期型 E 級発振器における引き込み周波数帯 (ロックレンジ) の最大化が可能であることを実験と理論の両面から示した. 具体的には, 次の結果を得た.

(1) 回路方程式に対して, われわれの最適化理論を適用し, 理論的に最適な入力信号波形を得た. 入力信号に課される制約条件が面積一定制約の場合は位相差 π の正負一対のパルス波, 2 乗平均 (実効値) 一定制約の場合は正弦波に近い連続波, 振幅一定制約の場合は矩形波が最もロックレンジを大きくすることが検証された.

(2) (1) で得られた入力波形は実験においてもロックレンジを最大化することを, 面積制約, 2 乗平均 (実効値) 制約, 振幅制約の三

つの現実的条件下における系統的な実験により確認した.

要するに, 理論的に得られた最適入力波形の最適性が現実的な電子回路の実験系において初めて検証された.

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 8 件)

- ① 矢部洋司, 西川功, 中田一紀, 守川知行, 関屋大雄, 安藤芳晃, 田中久陽, 注入同期のロックレンジを最大化する入力信号波形—CMOS リングオシレータを例として—, 電子情報通信学会論文誌 C, J99-C(6) 巻, 2016, 298-313, 査読有
https://search.ieice.org/bin/summary.php?id=j99-c_6_298
- ② 田中久陽, 非線形問題とヘルダーの不等式, 電子情報通信学会 基礎・境界ソサイエティ Fundamentals Review, 9(3) 巻, 2016, 219-228, 査読有
DOI: 10.1587/essfr.9.3_219
- ③ 田中久陽, 物理分野に現れる可解な最適化問題の最近の話題, 京都大学数理解析研究所講究録, 2027 巻, 2016, 93-108, 査読無
<http://www.kurims.kyoto-u.ac.jp/~kyodo/kokyuroku/contents/2027.html>
- ④ Hisa-Aki Tanaka, Isao Nishikawa, Jürgen Kurths, Yifei Chen and István Z. Kiss, Optimal synchronization of oscillatory chemical reactions with complex pulse, square, and smooth waveforms signals maximizes Tsallis entropy, Europhysics Letters, 111(5) 巻, 2015, 50007, 査読有
DOI: 10.1209/0295-5075/111/50007
- ⑤ Hisa-Aki Tanaka, Synchronization limit of weakly forced nonlinear oscillators, Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical, 47(40) 巻, 2014, 402002, 査読有
DOI: 10.1088/1751-8113/47/40/402002
- ⑥ Tomoharu Nagashima, Xiuqin Wei, Hisa-Aki Tanaka, Hiroo Sekiya, Locking Range Derivations for Injection-Locked Class-E Oscillator Applying Phase Reduction Theory, IEEE TRANSACTIONS ON CIRCUITS AND SYSTEMS I-REGULAR PAPERS, 61(19) 巻, 2014, 2904-2911, 査読有
DOI: 10.1109/TCSI.2014.2327276
- ⑦ Hisa-Aki Tanaka, Optimal entrainment with smooth, pulse, and square signals

in weakly forced nonlinear oscillators, PHYSICA D-NONLINEAR PHENOMENA, 288 巻, 2014, 1-22, 査読有
DOI: 10.1016/j.physd.2014.07.003

- ⑧ 田中久陽, 注入同期の物理限界, 応用数理, 24(3)巻, 2014, 103-109, 査読有
DOI: 10.11540/bjsiam.24.3_103

[学会発表] (計 7 件)

- ① 田中久陽, Simple inspirations and discoveries in optimizing synchrony for Complex systems, 非線形科学研究集会 (招待講演), 2017

- ② 田中久陽, 「位相縮約振動工学」と関連する最適化問題, 日本応用数理学会研究部会「数理設計」第 19 回研究集会 (招待講演), 2017

- ③ 田中久陽, 中川 正基, 関屋 大雄, 非線形問題に内在する最適性の探求～注入同期回路設計への応用と新規な振動工学の開拓～, 電子情報通信学会 非線形問題・システムと回路研究会 (招待講演), 2017

- ④ 田中久陽, 物理分野に現れる可解な最適化問題の最近の話題, 京都大学数理解析研究所研究集会「最適化技法の最先端と今後の展開」(招待講演), 2016

- ⑤ 田中久陽, CCS の進む方向へのひとつのヒント～屋久島, 情報通信, ヘルダー不等式の三位一体一, コミュニケーションサイエンス研究会 (CCS) (招待講演), 2015

- ⑥ 田中久陽, Nonlinear Optimization from Holder's Inequality (for Fun and Profits), 明治大学先端数理科学インスティテュート (MIMS)「現象数理学拠点」共同研究集会 (招待講演), 2015

- ⑦ Hisa-Aki Tanaka, Simple Inspirations and Discoveries in Complex Communication Sciences, 3rd Japan-Korea JointWorkshop on Complex Communication Sciences (JKCCS' 14) (招待講演), 2014

[図書] (計 2 件)

- ① 田中久陽, 中尾裕也, 千葉逸人, 丸善出版, ストロガッツ 非線形ダイナミクスとカオス: 数学的基礎から物理・生物・化学・工学への応用まで, 2015, 1-523

- ② Hisa-Aki Tanaka, Springer-Verlag GmbH, Mathematical Approaches to Biological Systems Networks, Oscillations, and Collective Motions, 2015, 77-99. (分担執筆. Chap. 4 を担当.)

[産業財産権]

○取得状況 (計 1 件)

名称: 最適波形の演算方法, プログラム及び最適波形演算装置

発明者: 田中久陽, 矢部洋司

権利者: 同上

種類: 特許

番号: 特許第 6273871 号

取得年月日: 平成 30 年 1 月 19 日

国内外の別: 国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田中久陽 (TANAKA, Hisa-Aki)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科
・准教授

研究者番号: 20334584

(2) 研究分担者

徳田 功 (TOKUDA, Isao)

立命館大学・理工学部・教授

研究者番号: 00261389

関屋 大雄 (SEKIYA, Hiroo)

千葉大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号: 20334203

福田 弘和 (FUKUDA, Hirokazu)

大阪府立大学・工学 (系) 研究科 (研究院)・准教授

研究者番号: 90405358

(3) 連携研究者

唐沢 好男 (KARASAWA, Yoshio)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・教授

研究者番号: 40313407

本城 和彦 (HONJO, Kazuhiko)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・教授

研究者番号: 90334573

水柿 義直 (MIZUGAKI, Yoshinao)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・教授

研究者番号: 30280887