

鉄電極反応における確率共鳴を利用した 非周期信号の検出

課題番号 10640380

平成10年度～平成11年度科学研究費補助金基盤研究(c)(2)
研究成果報告書

平成11年3月

横浜国立大学附属図書館



10813694

研究代表者 石渡 信吾
横浜国立大学工学部助手

200000703
鉄電極反応における確率共鳴を利用
した非周期信号の検出

寄贈 石渡信吾

[1] 研究組織

研究代表者： 石渡 信吾 （横浜国立大学工学部助手）

[2] 研究経費

平成10年度	1, 900 千円
平成11年度	500 千円
計	2, 400 千円

[3] 研究発表

<口頭発表>

- (1) 石渡信吾、中田佳孝、渡辺慎介
「単安定電気回路における確率共鳴の実験」
日本物理学会 1998年秋の分科会 (1998.9)
- (2) 石渡信吾、関谷健太郎、渡辺慎介
「鉄電極反応における確率共鳴の実験」
日本物理学会 1998年秋の分科会 (1998.9)
- (3) 石渡信吾、渡辺慎介
「単安定系における確率共鳴の実験」
九州大学応用力学研究所研究集会
「ソリトン理論の新展開」(1998.11)
- (4) 石渡信吾、中田佳孝、関谷健太郎、渡辺慎介
「単安定系における確率共鳴の実験」
日本物理学会 第54回年回 (1999.3)
- (5) 石渡信吾、清水郁人、渡辺慎介
「鉄-硝酸反応における引込みの実験」
日本物理学会 1999年秋の分科会 (1999.9)
- (6) 石渡信吾、渡辺慎介
「化学振動における引込みの実験」
九州大学応用力学研究所研究集会
「非線形波動のメカニズム」(1999.11)

< 紀要等 >

(1) 石渡信吾、渡辺慎介

「単安定系における確率共鳴の実験」

九州大学応用力学研究所研究集会報告「ソリトン理論の新展開」

(10ME-S1;1999. 4)

(2) 石渡信吾、渡辺慎介

「化学振動における引込みの実験」

九州大学応用力学研究所研究集会報告「非線形波動のメカニズム」

(2000. 4)

目次

[1] 研究組織	.....1
[2] 研究経費	.....1
[3] 研究発表	.....1
[4] 研究成果	.....3
[5] 研究内容	.....4
1. 序論	.....5
2. 電気回路系の実験	.....9
3. 鉄-硝酸反応系の実験	.....14
4. 結論	.....21
参考文献	.....22

[4] 研究成果

(1) 背景：

ノイズにさらされた生体系の信号処理の1つの可能性として、確率共鳴 (Stochastic Resonance: S R) 現象の利用が考えられている。閾値のある2値応答をする素子 (S R素子) にノイズに埋もれた微弱な周期信号を入力すると、信号の山と谷でノイズが閾値を越える確率に差が生じ、これを利用することで高いS/N比で信号の周期を検出することができる。S Rは当初、気候変動のモデルとして提案され (R. Benzi, 1982年)、次いで、S. Fauveらによってシュミット回路で実験された (1983)。生体系の例として、ザリガニの尾の有毛細胞における刺激応答の実験 (F. Mossら、1993) がある。化学反応系では、F. SchneiderらによるBelousov-Zhabotinsky (B Z) 反応におけるS Rの実験 (1996) があり、日本でも、電流制御型のB Z反応による実験が猪本、甲斐らにより行われている (1997)。理論的研究は、1989年のB. McNamara以来盛んに行われているが、興奮系では、FitzHugh-Nagumo方程式に基づいた解析がある (K. Wiesenfeldら、1994)。

一方、濃硝酸中の鉄の不動態-活性態間の反応は、閾値と不応期を有し、神経の刺激応答と非常によく似た反応系を成し、Lillieの神経モデル (1918) として知られている。この反応系は鈴木良次氏により詳しく研究された (1965)。彼は当時、ニューロン回路網のモデルを実現しようとして、興奮性および抑制性結合やダイオード、論理回路等の化学素子を、鉄線と銀線の組み合わせによって構成した。

(2) 目的：

これまでのS Rの研究は、微弱な周期信号からノイズを利用してその周期を検出するものである。S Rの特徴は、通信における検波のように信号を忠実に再現するのとは異なり、通常の検波が不可能なほど強いノイズにさらされた信号に対して、その周期に確率的に同期した応答が得られることである。観点を換えれば、非周期の信号でもその振動パターンだけはS Rによって検出できる。

また、化学反応系は、デジタル回路がノイズで簡単に誤動作するのに対し、パルス幅の狭い高周波ノイズに対しては鈍感であり、さらに、不応期は過剰反応を抑制する働きがある。このように、電気回路に比べ一見応答の遅い化学反応系の方が、むしろノイズの強い自然環境では有利なこともある。ザリガニは急流のノイズの多い環境下で、外敵の振動パターンを検出しその接近を察知す

ると考えられる。加えて、ザリガニの有毛細胞は多数で協同的に相互作用して、さらに検出効率を高めているとの指摘がある。

さらに、鉄-硝酸反応系は生体系特に神経系により近い化学反応系であることが大きな特徴であり、生体におけるSRを模擬し得る実験系が構成できる。そして、鈴木論理回路を応用することで、多体系（結合系）への拡張が可能である。また、本反応の周期は約1秒であり、周期200秒のBZ反応に比べ遥かに短いことは、実際の実験遂行にあたって非常に大きな利点である。この種の確率的応答の統計処理には多数のデータを必要とするが、本実験では20分程度の反応時間で十分なデータが得られる。また、温度制御上も短時間なら高精度の制御が可能である。

本研究は、生体系の情報処理、特に末端の神経細胞における刺激応答を模擬する化学反応系を確立し、生体系特有の信号処理の特徴を明らかにすることを目標においた。具体的には、鉄電極反応における閾値を有する2値応答性を利用して、確率共鳴（SR）現象によってノイズに埋もれた微弱な非周期信号の振動パターンの検出を試みた。そこで、計画の当初、

- (i) 鉄電極反応の安定性および再現性の向上
- (ii) 化学反応特有の不应性のSR効果に及ぼす影響の解明
- (iii) 非周期信号の振動パターンの検出
- (iv) SR素子の結合による検出効率の向上

の4点を目的に掲げた。

(3)研究成果：

- (i) 鉄電極反応の安定性および再現性の向上

鉄電極面下で生じる反応生成物の沈降により下降流がつくられる。振動反応の安定性はこの電極近傍の流体力学的安定性によると考えた。そこでまず、電極形状の工夫を試みた。メタクリル系樹脂で鉄線を包埋し、先端反応面の周囲を数mmの厚みで平坦化することによって反応面下の流れの安定化を計った。さらに、反応液の雰囲気の一均一化を試みた。反応が進むと対極で発生した水素が硝酸に溶解し飽和して鉄電極面に小泡が析出し、これが下降流を乱す。そこで、実験前に空気をバブリングして溶存酸素で溶存水素のブロックを試した。その結果、小泡の発生を抑え、安定で再現性のよい振動反応を得ることができた。1素子の反応の再現性が大幅に改善されたことにより、非線形散逸系の新たな実験系確立に目途がたったと言える。

- (ii) 化学反応特有の不应性のSR効果に及ぼす影響の解明

刺激応答特性に基づいて、マルチファンクションシンセサイザ(1946)より微弱信号とノイズの加算波形をポテンショスタット(HA-101BS)を介して鉄電極に印加し、その応答波形をデジタルオシロスコープで測定、FFTで解析した。その結果、検出効率が最大となる最適ノイズ強度の存在を確認し、確率共鳴現象を捉えることができた。本反応系では不応期の動的変化に基づく”不完全な”応答が存在し、SR現象を複雑にしていることがわかった。そこで、より単純な系である単安定電気回路に戻って周波数特性を調べた。この系では回路の固有周波数付近で検出効率が最大になるという生物系を考察する上で興味ある特性を得た。しかし、この周波数特性を本反応系で確認するまでには至らなかった。不完全応答を克服するための新たな方法を見付けなければならない。

(iii) 非周期信号の振動パターンの検出

単安定回路で予備的な実験を行い、検出の可能性を示した。最初、時定数の異なる回路を2段結合して、時定数の違いによる応答波形の取りまとめを試みたが、素子の高精度の温度制御を必要とし、生体にとっては不向きであることがわかった。素子の多段化よりもむしろ多素子並列化による信号処理の方が、生体のおかれた環境下では有利であり、かつ実現可能であることが推測された。

ここでは、多素子化は現段階では困難であるため、検出したい信号パターンをノイズに埋め込んで繰り返し発振させ、これを1素子で受けて、時間平均で多素子の集合平均の代わりとした。その結果、元波形を時間平均したよりも、SR素子の応答波形を時間平均した方が、信号パターンの再現性が良いことがわかった。

本反応系で同様に試みたが、不完全応答により回路系のような明確な効果は得られなかった。ここでは、素子ではなく測定法の工夫により不完全応答に対する対処法を試した。これは別の意味で、多段化の有効性を示すものである。

(iv) SR素子の結合による検出効率の向上

(ii)、(iii)で生じた不完全応答の問題により、結合系での信号検出まで至らなかった。しかし一方で、1素子反応の再現性が大幅に改善されたことにより、素子間の相互作用である引き込み(同期)現象を研究対象とできるようになった。そこで実施計画を変更し、2素子の相互作用の実験に切り替えた。

(v) 2素子相互作用の実験

電極を微動ステージに固定して正確な位置制御を行い、2素子間の結合強度を調整可能にすることによって、同期現象を長時間に渡って再現よく捉えるこ

とができた。引込む過程では周期のみならず振幅も変化して位相を周期の短い方に合わせることを見い出した。これは不応期が動的に変化する化学反応系特有の性質である。

以下に本研究の成果をまとめる。

- ① 鉄電極反応の再現性が得られ、非線形散逸系の新たな実験系確立に目途がたった。
- ② 確率共鳴現象を化学反応系において、十分の精度で見い出すことができた。
- ③ 電気回路系において、1素子での繰返し計測による時間平均から、S R素子の多素子並列化の微弱信号検出に対する有効性を間接的に示した。
- ④ 非線形振動子の相互作用を再現性よく観測できる化学反応系を得た。

本反応系は興奮系として刺激応答の実験に、また自励振動系として引き込み等の同期現象の実験に利用できる。そして、神経系に近い反応系である本反応で確率共鳴現象を捉えたことは、今後、生物の行う情報処理の特性を解明していく上で、本実験系が貴重な知見を与えるものと期待できる。さらに、③のS R素子を用いた微弱信号検出は工学的応用において新たな可能性を開くものと考えられる。

[5] 研究内容

以下に本研究内容を説明する。

1. 序 論

ノイズの多い環境下で生体の感覚器官が行う信号処理の1つの可能性として、確率共鳴現象が近年注目されている。閾値のある2値応答をする非線形素子にノイズに埋もれた微弱な周期信号を入力すると、信号の山と谷でノイズが閾値を越える確率に差が生じ、確率的に信号に同期した応答が得られる。ノイズを逆に利用することで高いSN比で信号の周期を検出することができる。このようなノイズを利用した微弱信号検出という観点から、神経の刺激応答に近い化学反応系と、さらにこれを模擬する電気回路系における2つの実験について報告する。

§ 1.1 確率共鳴

確率共鳴 (Stochastic Resonance) ^{1), 2)} は、1982年Benziらによって大氷河期の周期的到来と10万年周期の地球の公転軌道の歪みを対応づけるために考え出された概念である³⁾。その後、シュミットトリガー回路(1983年)⁴⁾ やリング状レーザ(1988年)⁵⁾ でこの現象が実験的に見いだされた。そして1993年Mossらはザリガニの尾の有毛細胞における神経の刺激応答の実験によって、確率共鳴現象が生物の信号処理に利用されている可能性を示した⁶⁾。

理論的には当初、双安定系の力学的モデルが研究されてきた⁷⁾。overdampedな系で、double-wellのポテンシャル U (図1.1.1(a)) および外力として微弱な周期信号 $A\sin(\omega_0 t)$ とノイズ $F(t)$ からなる次式を考える。

$$\frac{dx}{dt} = -\frac{\partial U}{\partial x} + A\sin\omega_0 t + F(t) \quad (1)$$

ポテンシャル $U(x)$ は $x=\pm c$ に極小値を持ち、その間のポテンシャル障壁を U_0 とする。周期外力はこの両側のポテンシャルの谷の深さを周期 $2\pi\omega_0$ で交互に変える働きをする。すなわち、

$$\tilde{U} = U - (A\sin\omega_0 t)x \quad (2)$$

今このポテンシャルの例えば右側に粒子が捕らわれているとして、図1.1.1(a)のようにポテンシャルが $\tilde{U}=U+Ax$ の状態(破線)でも $\tilde{U}(c)<0$ であり、周期外力だけでは障壁を越えられないものとする。この状態で左向きに外力のノイズ成分が作用すると、粒子は障壁を越えて左側の谷に移動する。ノイズの向きと大きさ及び周期外力の位相といった条件が合えば粒子は隣の谷に遷移する。この

遷移確率はノイズが小さいときは低く、ノイズがある程度の大きさになると高くなり、粒子の遷移は信号に同期するようになる（図1.1.1(b)）。さらにノイズが大きくなるとノイズ成分だけで U_0 を越えてしまう状態になり信号との相関は低くなる。同期の度合いは位置 $x(t)$ のパワースペクトルから次のSN比（SNR）として表される。

$$SNR = 10 \log_{10} \frac{S}{N} \quad (3)$$

ここで、 N は $f_0 (= \omega_0 / 2\pi)$ における背景ノイズの値、 S は信号成分のピーク値である。このSNRの入力ノイズ強度 D に対する依存性は理論的には

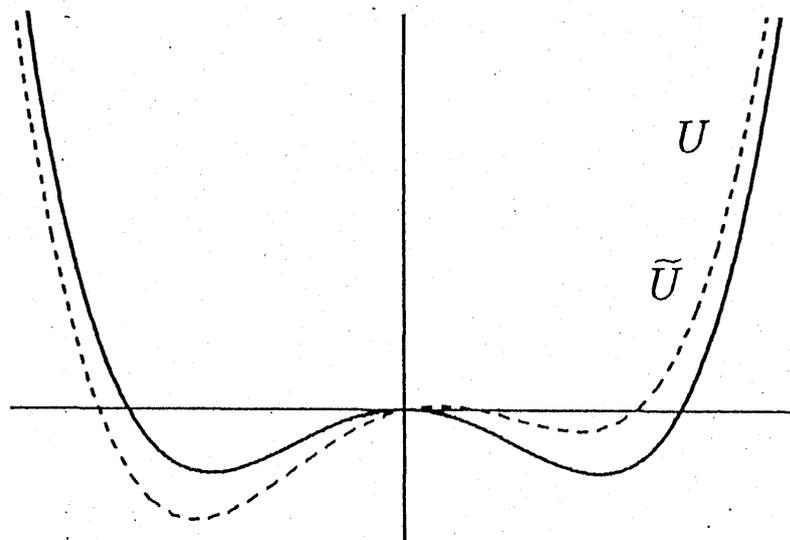
$$SNR \propto \left(\frac{Ac}{D} \right)^2 \exp \left(-\frac{U_0}{D} \right) \quad (4)$$

となることが知られている。すなわち、上に凸の曲線となりSNRが最大値をとるノイズ強度 $D=D^*$ が存在する。確率共鳴現象の特徴は、このように粒子の遷移が信号だけでは決して同期せずノイズによって同期すること、 $D < D^*$ の領域ではノイズの増加に伴ってSN比が高まること、そして同期が最も強くなる最適のノイズ強度が存在することである。

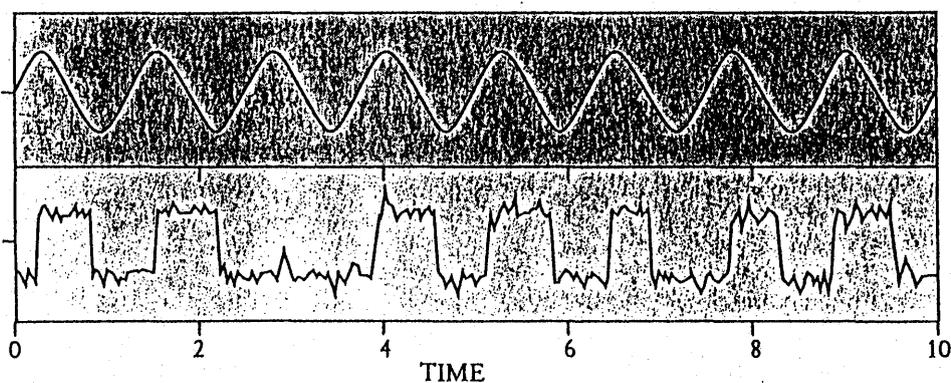
一方、ザリガニに代表される神経応答の系は単安定な系であり、非対称ポテンシャルのモデルで議論される。ここでは後で述べる実験に即して、図1.1.2に示すようにノイズが如何に閾値 U_0 を越えるかという観点からその性質を述べる。閾値を越えない微弱信号に対して系は決して応答しないが、ノイズの加算によって信号の山でノイズが閾値を越える確率は高くなる。閾値を越えると系はパルス応答（発火）する。もちろん、信号の谷部でもノイズが大きければ閾値を越えてパルス応答することもあるが、応答パルスの出現頻度は信号の山と谷で差が生じる。ノイズ強度が適当なら信号周期に確率的に同期した出現頻度となる。この応答波形のスペクトルはイレギュラーな応答による背景ノイズと周期信号の周波数 f_0 のピークおよびパルス波形に依存する高調波成分よりなる。双安定系の場合と同様に、SNRは最適のノイズ強度の存在を示す（図1.1.3）。Mossらのザリガニの実験結果を図1.1.4に転載する。図で、■がザリガニの尾の有毛細胞の刺激応答特性から得られたSNRである。◇は神経のモデル方程式であるFitzhugh-Nagumo方程式のシミュレーションによるSNR、実線は式(4)をフィットさせたものである。

このように確率共鳴現象は、双安定系と単安定系の両方に現れる。

§ 1.2 引き込み現象



(a) double-well potential



(b) ポテンシャルの周期的変動と応答波形

図 1.1.1 双安定系の閾値応答

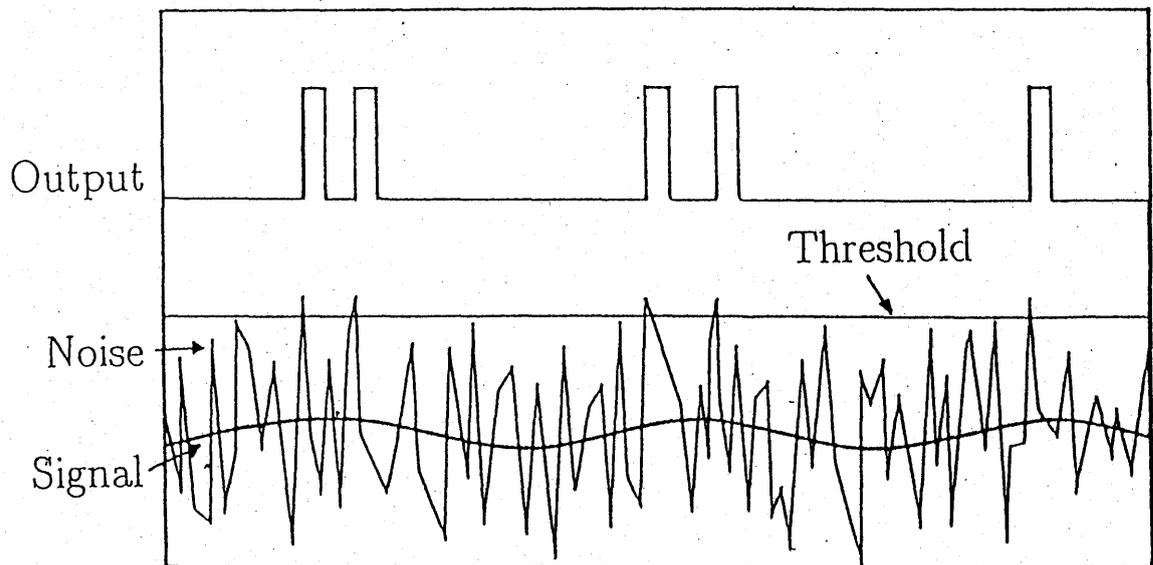
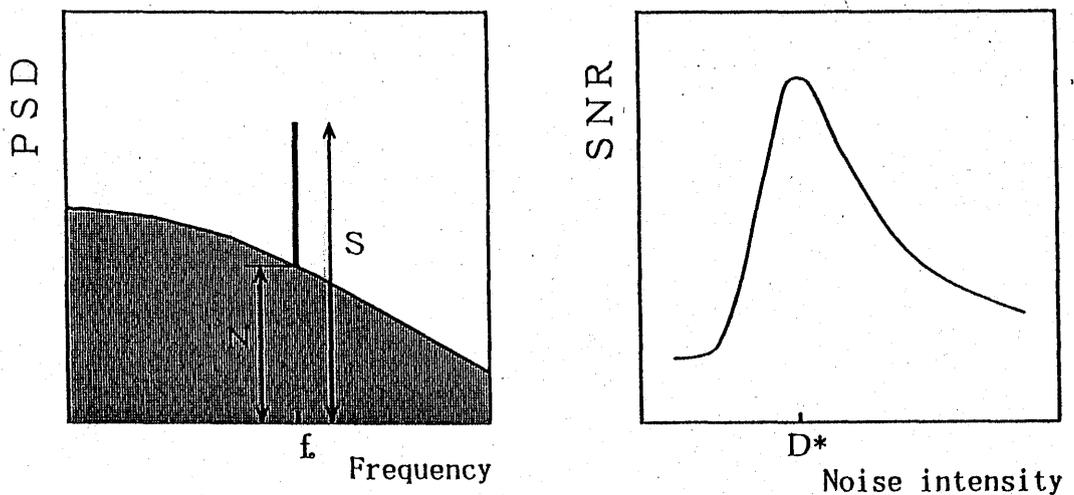


図 1.1.2 単安定系(興奮系)の閾値応答



出力波形のスペクトル

ノイズ強度に対する
SNRの変化

図 1.1.3 応答波形のスペクトルとSNR

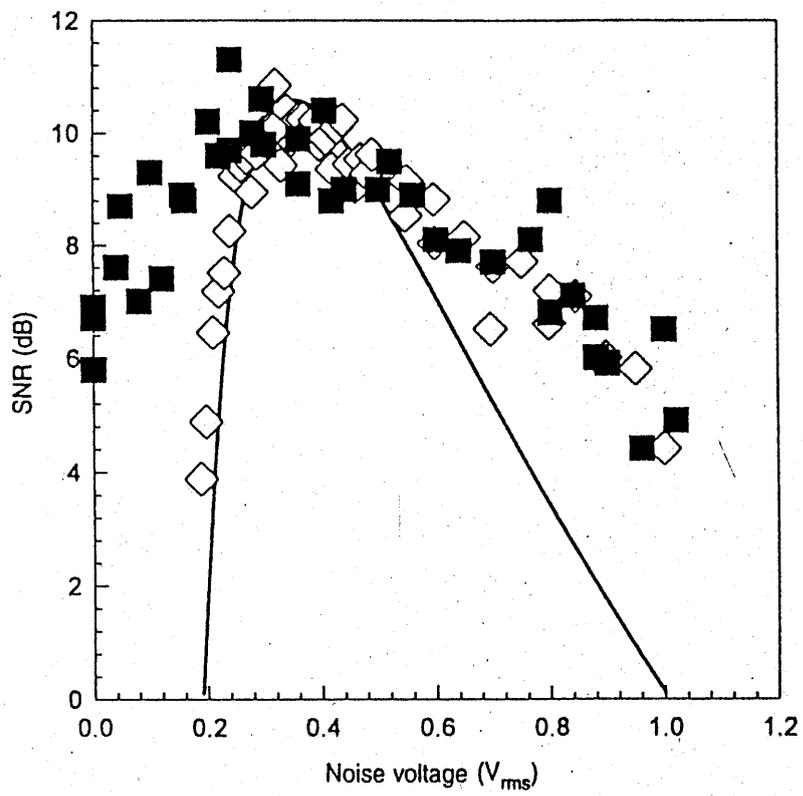


図 1.1.4 ザリガニにおける確率共鳴
(文献 6) より転載)

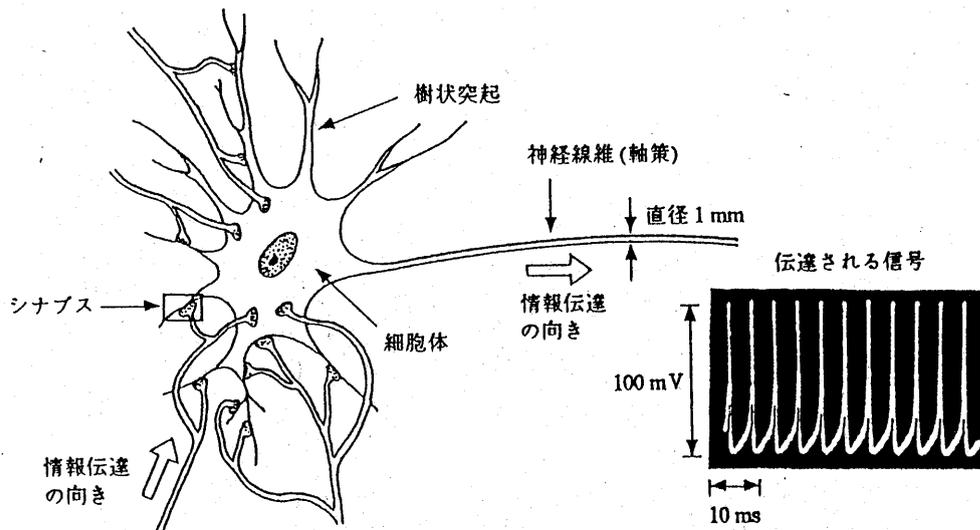


図 1.3.1 神経細胞とインパルス
(文献 15) より転載)

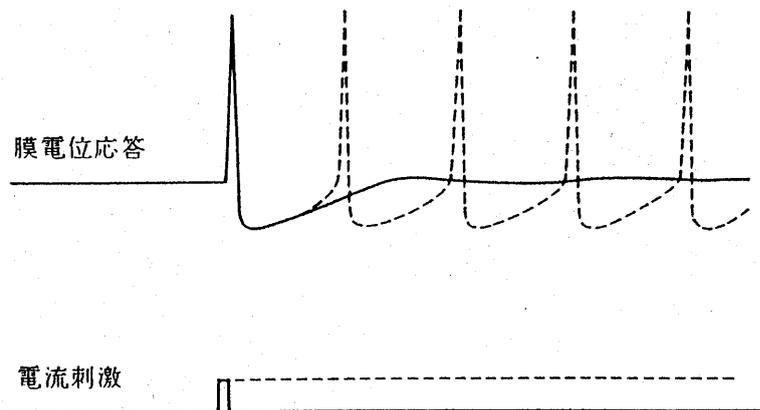


図 1.3.2 電流刺激に対する膜電位応答
(文献 15) より転載)

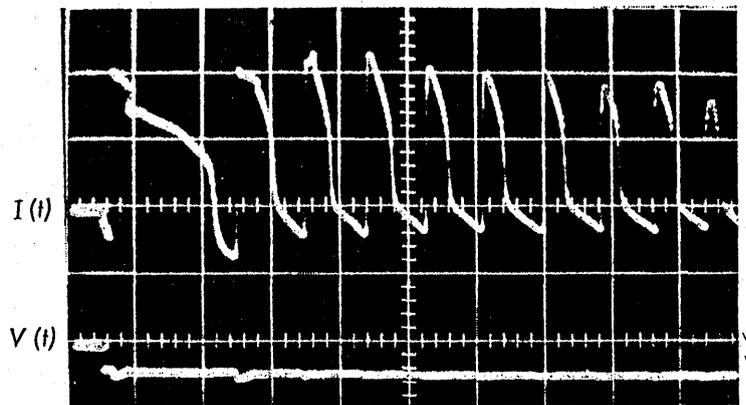


Fig. 5. A relaxation oscillation of the electrode current while the voltage is kept constant (about 0.5 volt). The concentration is 10 N. Scales: 150 mA/cm²/div., 0.9 volt/div., 0.5 sec/div.

図 1.3.3 鉄電極の定電位刺激による電流変化
(文献 14) より転載)

非線形振動系は、§ 1.1の双安定系と単安定系との対比で言えば、無安定系である。僅かに異なる周期を持つ2つの非線形振動子を弱く相互作用させると、それらの周期が一致（同期）するいわゆる「引き込み」現象が観測される。引き込み現象は力学系だけでなく広く生物系にも見受けられる現象である。熱帯地方のマングローブの樹上でのホタルの集団発光や心臓の心筋細胞の同期はその顕著な例である。実験系としては、塩水振動子やBZ反応で引き込みが研究されている。

同期状態にある振動子のパラメータがゆっくり変化していく場合、振動子本来の固有周期が徐々に変わり、はじめの同期状態が崩れ、新たな同期状態へ遷移する様子が観測される。この引き込みの周波数には一般に序列があることが知られている。p:qの引き込み状態からr:sの引き込み状態へ遷移する間に、p+r:q+sの引き込み状態が存在する。これは、

$$\frac{p}{q} \oplus \frac{r}{s} = \frac{p+r}{q+s} \quad (5)$$

の演算で表される。p:qの引き込みを分数p/qで表すとき、式(6)の演算はその間にある既約分数のうちで分母が最小となる分数を生成する。これを樹形図に表したものが図1.2.1のFarey樹である。Farey樹では、まず両端に0/1と1/1を配し、(6)の演算で1/2をつくりそれを2段目に置く。以下、1/2+1/1=2/3と0/1+1/2=1/3を3段目に、1/2+2/3=3/5、2/3+1/1=3/4、...を4段目に作っていく。Farey樹は各引き込みパターンの強弱関係を表しており、上段のパターンほど引き込みが強いことを意味する。

§ 1.3 目的

Mossらの指摘のように、生物がノイズの多い環境下で、例えばザリガニが外敵のバスの接近する振動音といった微弱信号をノイズを逆に利用して検出しているとするれば、生物は確率共鳴によって信号をどこまで感知しうるのか？このような興味から、神経に類似の応答を示す化学反応とさらにこれらを模擬する電気回路において、我々は2つの単安定系の実験を行った。化学反応はLillieの神経モデル(1918年)⁸⁾としてよく知られる濃硝酸中での鉄の腐食反応を元にした鉄電極反応である。図1.3.1と図1.3.2に神経の刺激応答を示す。図1.3.3は鉄電極反応における定電位刺激に対する電流応答を表している。神経の膜電位応答に近い応答特性を持っている。一方、電気回路はOPアンプを用いた単安定マルチバイブレータ回路を、神経応答に似せて少し変形した回路である。

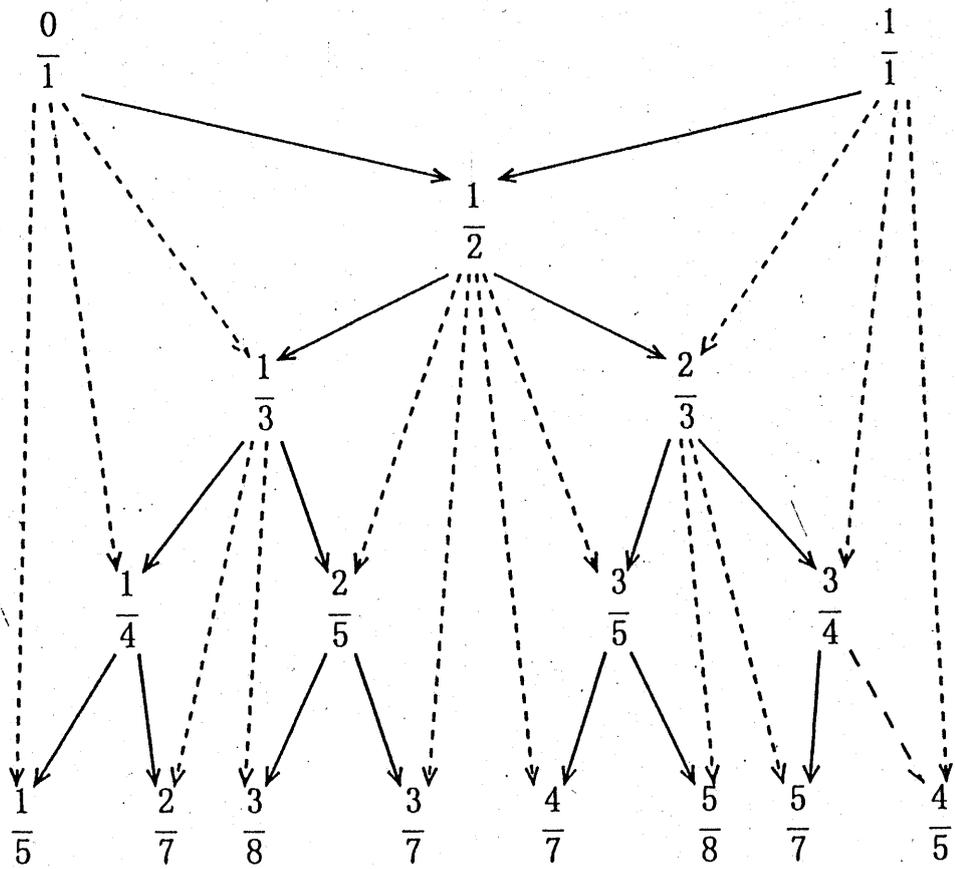


图1.2.1 Farey树

我々は、生体系の情報処理、特に末端の神経細胞における刺激応答を模擬する化学反応系を確立し、生体系特有の信号処理の特徴を明らかにすることを目標にしている。本研究では、鉄電極反応における閾値を有する2値応答性を利用して、確率共鳴（SR）現象によってノイズに埋もれた微弱な非周期信号の振動パターンの検出を試みた。

まず、単安定回路で確率共鳴の性質を概観し、SN比のノイズ強度依存性とその周波数依存性について述べる。次に、鉄電極反応において、その基本となる振動反応の性質と閾値応答特性を説明し、回路と同様のノイズ強度依存性が得られることを示す。

2. 電気回路系の実験

§ 2.1 単安定回路

単安定マルチバイブレータ回路は主にトリガーパルスを生成する回路として使われ、連続発振を避ける目的で入力側に微分回路が、また一定振幅のトリガーパルスを得るために出力側にリミッター回路が設けられている。本実験に用いる単安定回路はこれら微分回路とリミッター回路を外したむき出しの単安定マルチバイブレータである。むき出しにすることによって、後で述べる化学反応系やさらには神経系の応答に近い非線形素子を実現できる。図2.1.1にその単安定回路を示す。コンデンサCに並列に入れたダイオードDのクランプ作用により単安定動作を行わせている。応答のパルス幅はRとCの時定数で決まり、これと出力側の抵抗比 $R_1:R_2$ によって不応期の長さが決まる。閾値は入力側のダイオードの個数によって変えることができる。1個目のダイオードでクランプ用ダイオードの電位降下を補償し、2個目のダイオードで約+0.5Vの閾値を作っている。

回路素子は応答速度の異なる2通りを用いた。

	<回路 I >	<回路 II >
OP アンプ	LF411	μ A741
ダイオード	1S1588	1S1588
コンデンサ	3.3nF	22nF
帰還抵抗 R	100k Ω	200k Ω

R_1 、 R_2 には共に100k Ω のトリマー抵抗を用い、 $R_1:R_2=1:10$ になるように調整した。回路 I は応答の速いSR素子、回路 II は応答の遅いSR素子に相当する。周波数領域が約1桁異なるように設定した。

§ 2.2 自励振動

回路 I で直流電圧を入力端に印加する。電圧が閾値(約+0.5V)を越えると回路はHopf分岐して振動状態となる。臨界値0.5Vにおける振動の周波数は6.5kHzである。直流電圧を増すと周波数は上昇する。2.0Vで13.8kHzである(図2.2.1)。図2.2.2に回路 II についての入力電圧と自励振動の周波数との関係を示す。回路 I も7kHzの辺りで同様の周波数変化を示す。

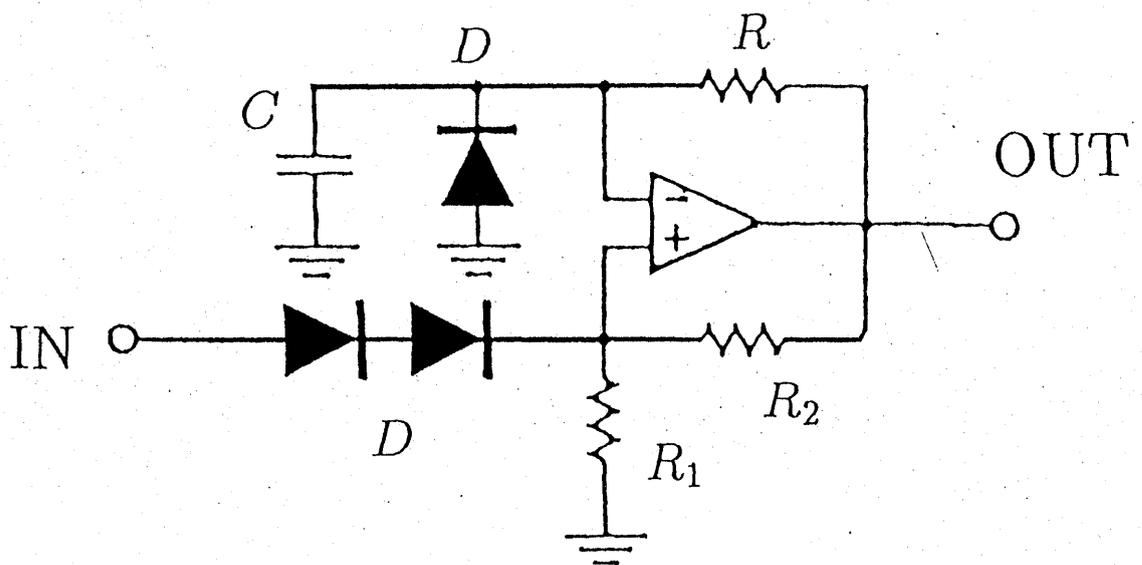


図2.1.1 単安定マルチバイブレータ回路

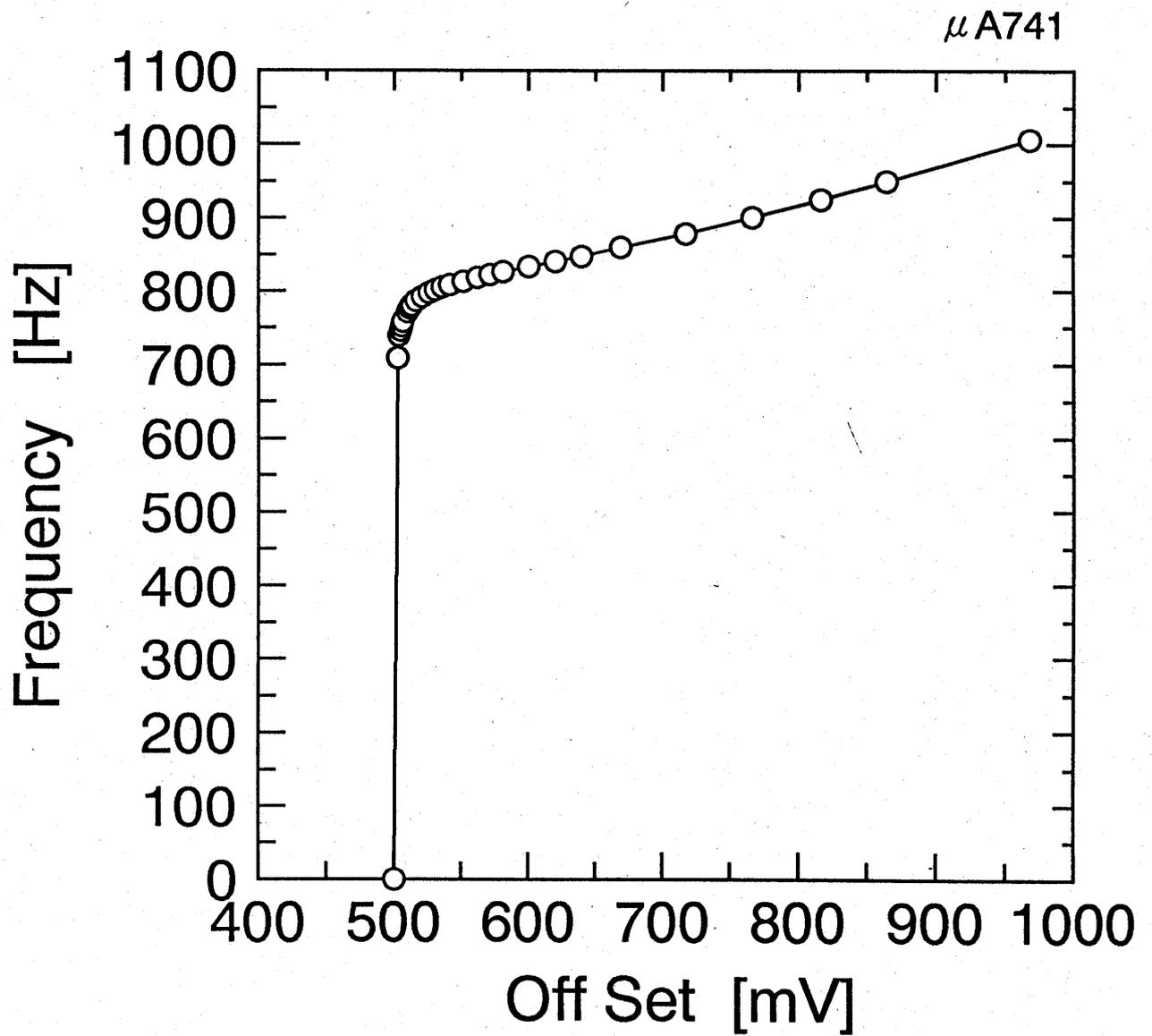
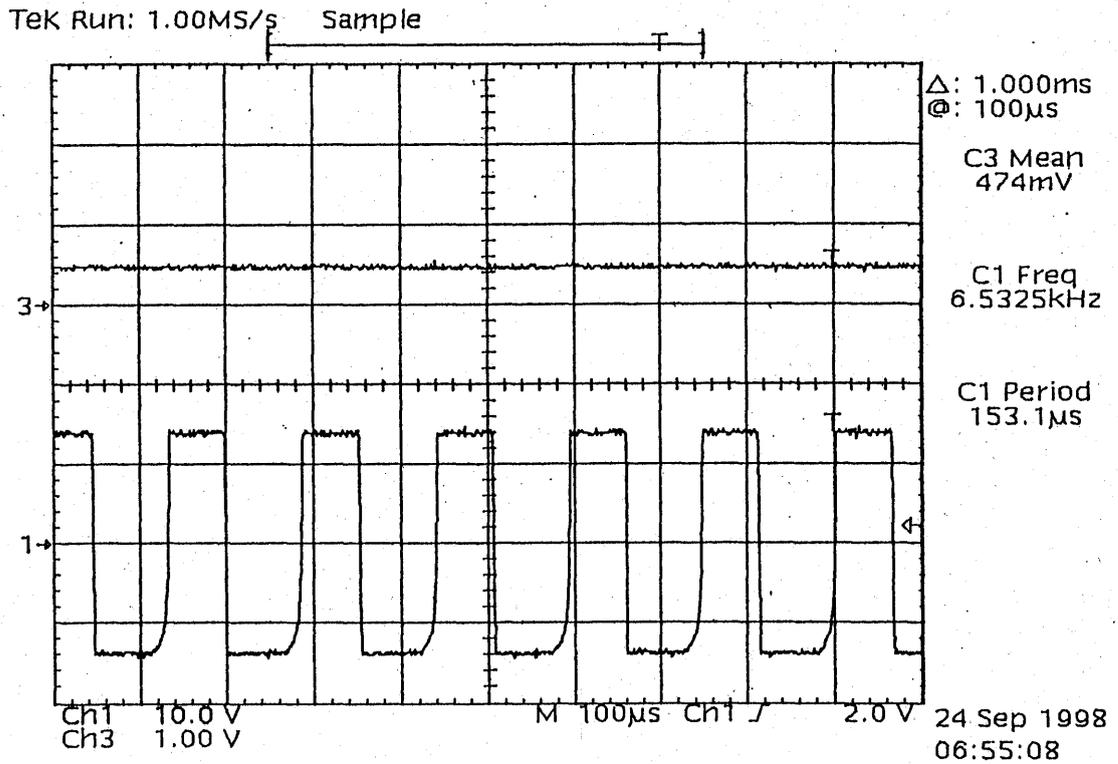
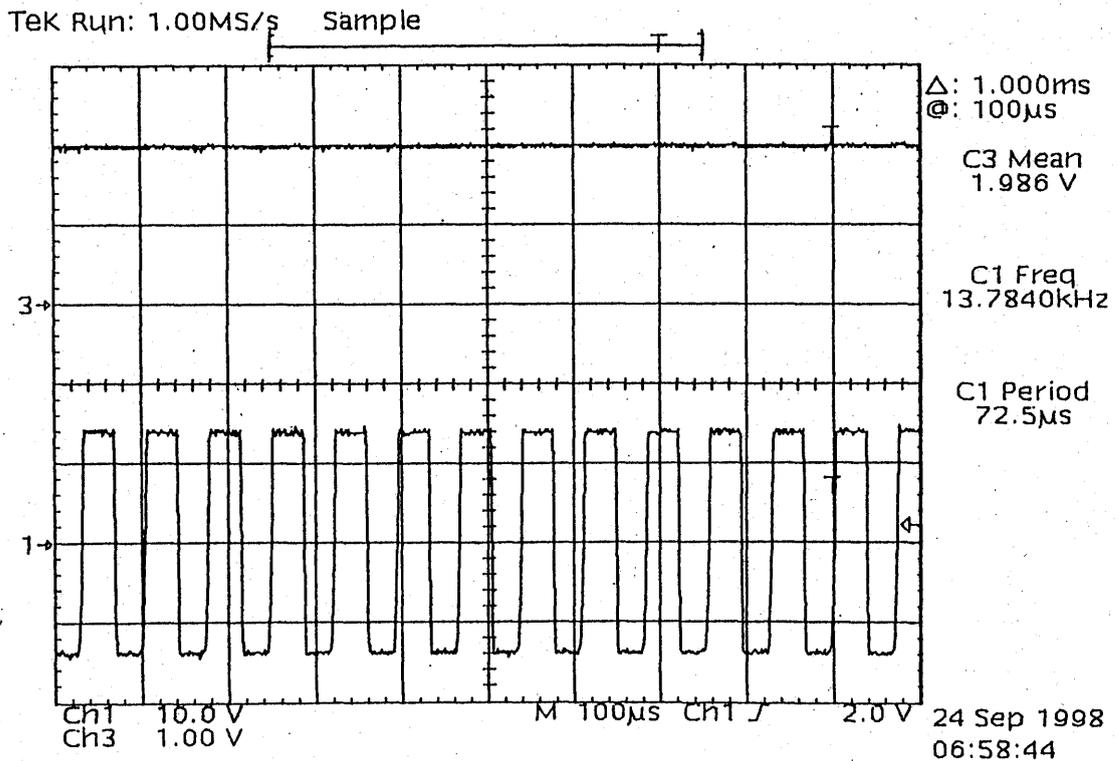


図 2.2.2 自励振動の周波数



(a) $V_{IN}=0.5[V]$



(b) $V_{IN}=2.0[V]$

図 2.2.1 単安定回路の自励振動

§ 2.3 刺激応答

回路 I について、閾値をまたぐ振幅の正弦波に対する応答を図2.3.1に示す。オフセット0V、振幅2Vp-p の正弦波は山の部分で閾値を越え、回路 I はパルス応答する。この条件では周波数が8.5kHzまでは応答のパルス間隔が縮まることによって正弦波の山と回路 I パルスは1 : 1に反応する。しかし、さらに周波数を上げると1 : 1では反応できなくなり、10kHzでは正弦波2周期に対して1回反応する2 : 1反応となり、5kHzの場合と同じ反応波形が得られる。これらはコンデンサの充放電に基づく時定数に起因している。パルスは一定振幅で反応している。パルス幅もほぼ一定である。

これらは化学反応系の不応期に基づく反応に相当するが、電気回路と異なり、化学反応系では反応のパルス振幅は刺激強度によって異なり、パルス幅もそれに依って変化する。次章で示す様に、化学反応系では不応期は外力によって動的に変化する。

§ 2.4 確率共鳴

発振器で正弦波とノイズを加算して単安定回路に入力し、そのパルス反応を測定した。発振器のノイズは500kHzまでフラットな周波数成分をもつ。ここでは、SRのノイズ強度依存性と最適ノイズ強度に対する周波数依存性について実験を行った。以下、回路 II についての結果を示す。

(1) 確率共鳴の実験・その1 - ノイズ強度依存性 -

回路 II に周波数400Hz、振幅0.2Vp-pの正弦波とノイズを加算入力した場合を図2.4.1(a)~(d)に示す。なお、ここでは便宜上、入力ノイズ強度は発振器の表示値で表すことにする。実効的なノイズ強度は表示値の半分程度である。各図で、一番上の図が入出力の波形を示し、上段が正弦波の信号、中段が信号+ノイズの入力波形、下段がその反応波形である。電圧軸のレンジはそれぞれ200mV/div、2V/div、10V/divであり、時間軸は2msec/divである。2、3番目の図はそれぞれ入力波形、反応波形のスペクトルである。これらはデジタルオシロスコープを用いて測定し、コンピュータでフーリエ変換(FFT)して求めた。

図2.4.1(a)は正弦波の振幅は閾値0.5Vを越えず、ノイズも小さくて回路はほとんど反応しない。ノイズが0.5Vの閾値を越えたからといって必ず反応するとは限らない。OPアンプのスルーレートより速い変化には追従できないからである。つまりある程度の幅をもって閾値を越えないと反応しないのである。理想的なOPアンプによる数値シミュレーションでは振幅のみによって閾値が決

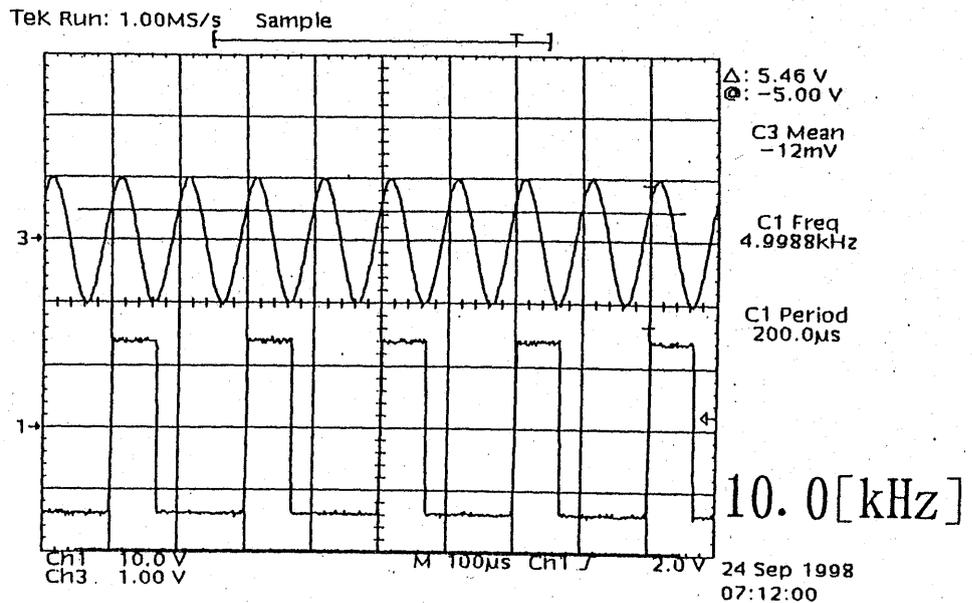
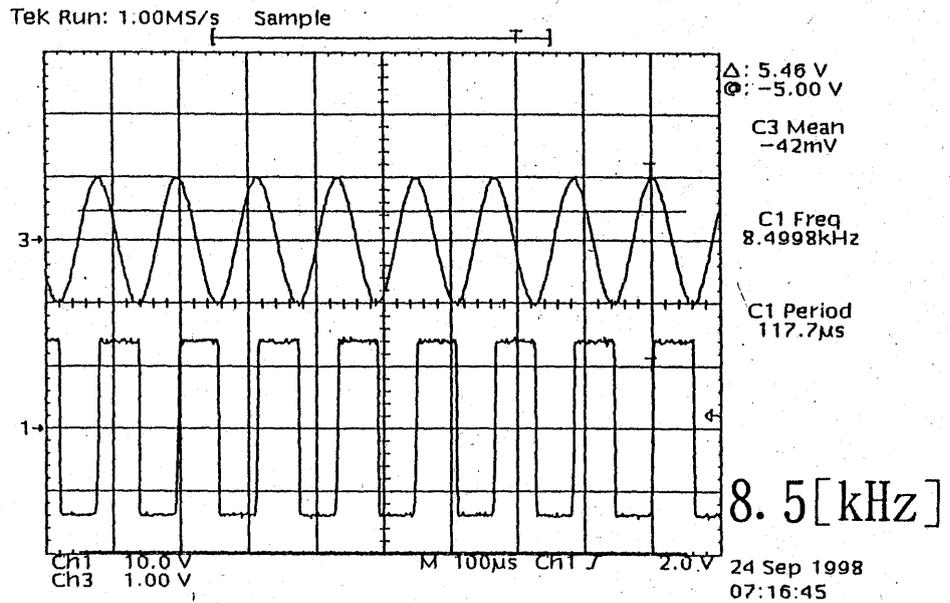
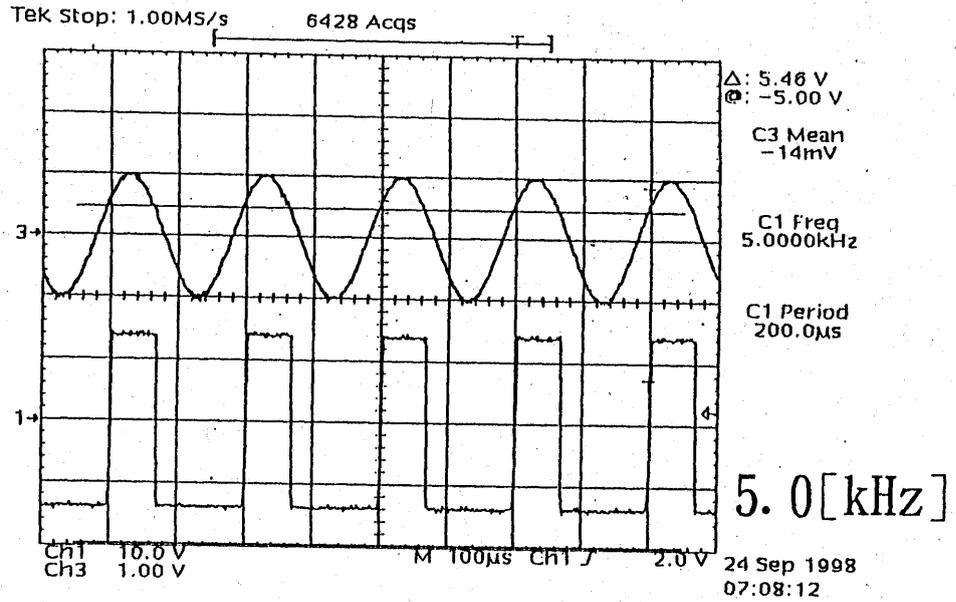


図 2.3.1 周期外力に対する応答

まるのに対して、実際の回路では振幅だけでなく幅にも閾値が存在するのである。図2.4.1(a)では、ノイズが小さいために閾値以下の信号（正弦波）は検出されないことを表す。

図2.4.1(b)はノイズ強度12Vp-pの場合である。信号の山でパルスが観察できるが、まばらで、あまり応答していない。この応答波形のスペクトルには僅かに周波数400Hzの信号成分は現れている。

図2.4.1(c)はノイズ強度16Vp-pの場合である。信号の山の部分で頻繁に応答し、そのスペクトルにも十分に強い400Hzのピークが観測できる。後で示すように、これが最適ノイズ強度の場合である。

さらのノイズ強度を増した場合を図2.4.1(d)に示す。ノイズ強度は20Vp-pである。この領域では、信号の谷部でも応答するようになり、ランダムな周波数成分が増し、信号成分が減少していることがわかる。

ノイズ強度を変えて同様な測定を行い、応答波形のSN比を求めると、図2.4.2が得られる。(a)は入力波形のSN比である。通常の線形応答ではノイズの増加に伴ってSN比は減少する。一方、単安定回路の応答波形では最初、閾値以下の信号は検出されないが、ノイズの増加によって検出されるようになり、あるノイズ強度で検出率の最大値をとる。ここでは、その最適ノイズ強度は16Vp-pである。

(2) 確率共鳴の実験・その2－周波数依存性－

ノイズ強度が高いと、回路はノイズのみで頻繁に励起されその応答は自励振動的になる。図2.4.1(d)では650Hzあたりにノイズ成分のピークがあることがわかる。当初、この中心周波数650Hzが確率共鳴の周波数限界ではないかと予想し、その前後の周波数領域100～1200HzでのSNRを調べた。その結果を図2.4.3に示す。予想に反し、650Hzを越えても信号成分は検出された。信号周波数700Hzでは発振器のノイズ強度を増すほどにSN比は増加し、発振器の出力が追いつかず、最適値を見いだせなかった。この700Hzの場合、スペクトル分布の山に埋もれることなく700Hzのピークが現れており、むしろ他の信号周波数の場合よりピーク値は大きかった。また、自励振動の周波数より速くは応答できないはずにもかかわらず、それより高周波側でも信号周期は検出され、それぞれに最適ノイズ強度が得られることが分かった。各信号周波数における最適ノイズ強度を図2.4.4に示す。700Hzにピークが見えるが、その値はこれよりも大きくなるはずである。

700Hzの場合には自励振動の周波数に近く、ノイズ強度が高ければノイズにより自励的に振動している状態にある。ノイズによるパルス間隔のバラツキが信号

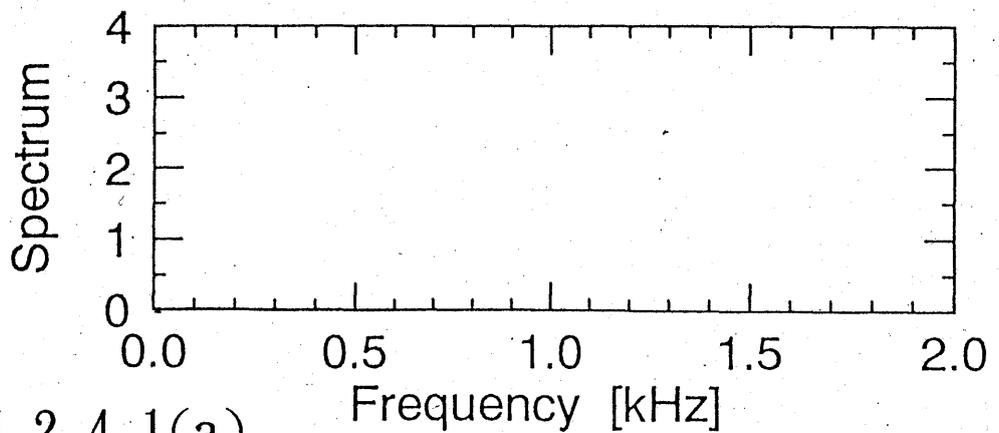
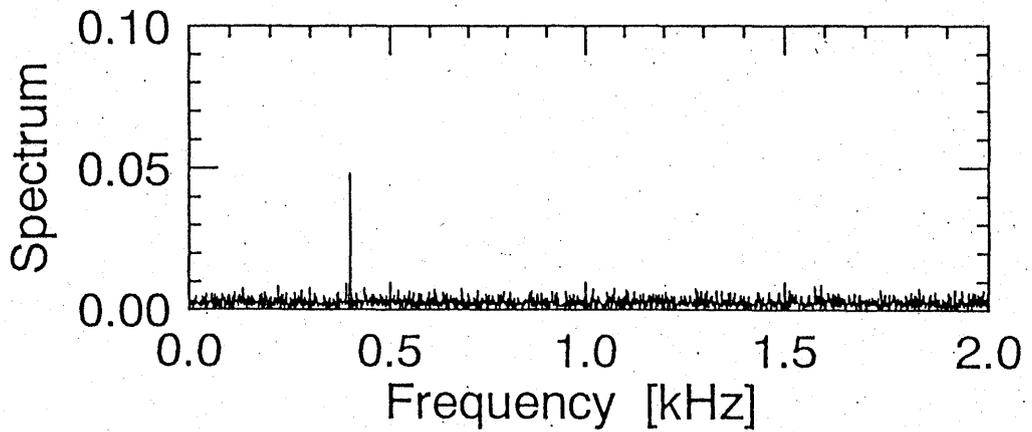
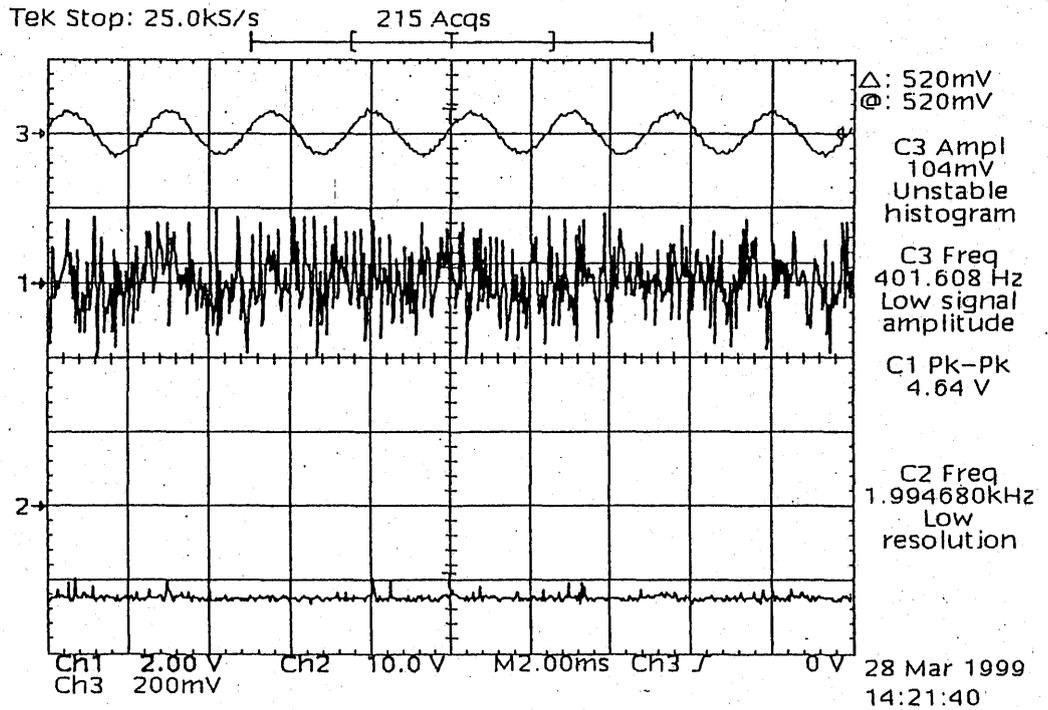


図 2.4.1(a) 応答波形とスペクトル：ノイズ強度10[V]

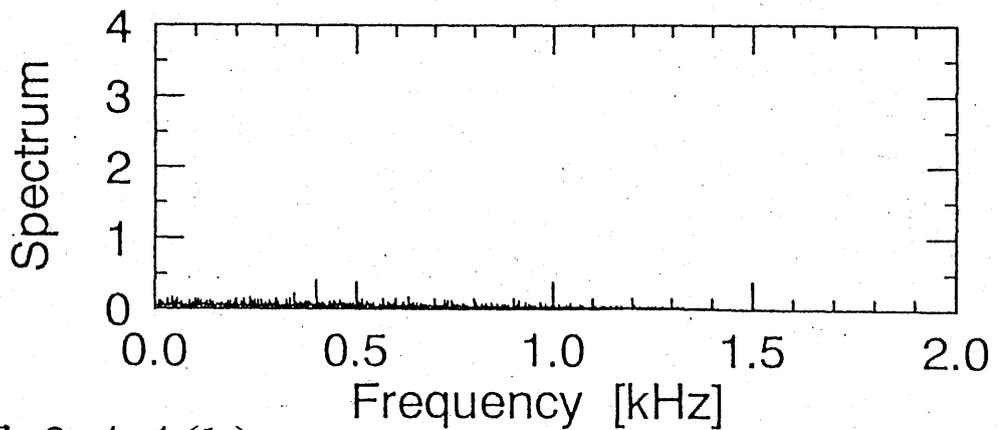
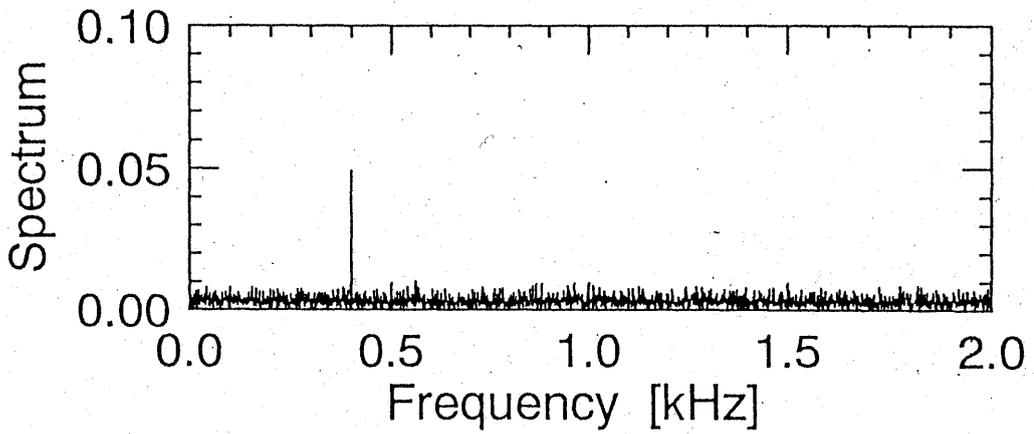
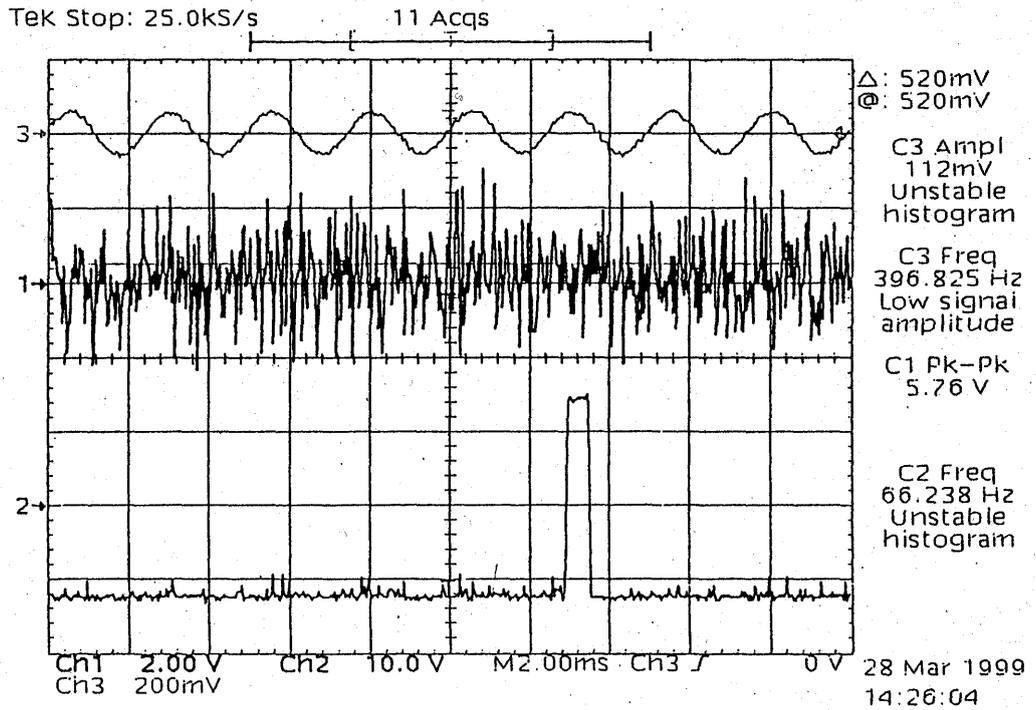


図 2.4.1(b)
 応答波形とスペクトル：ノイズ強度12[V]

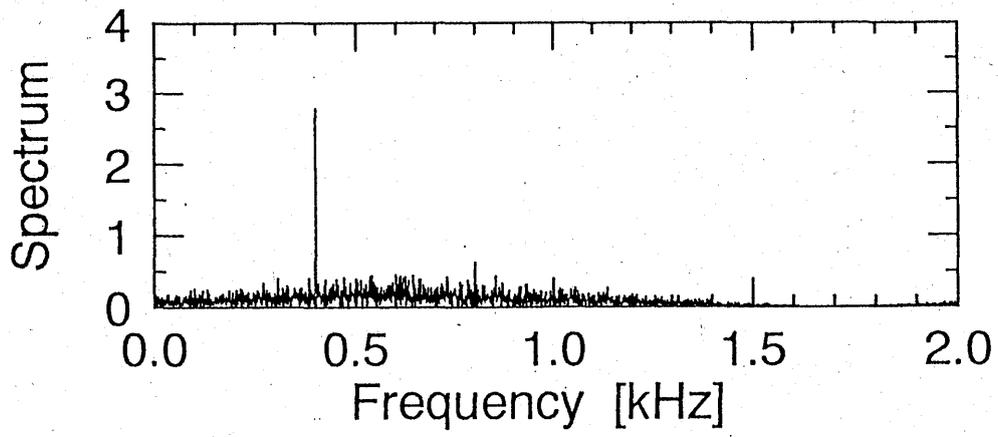
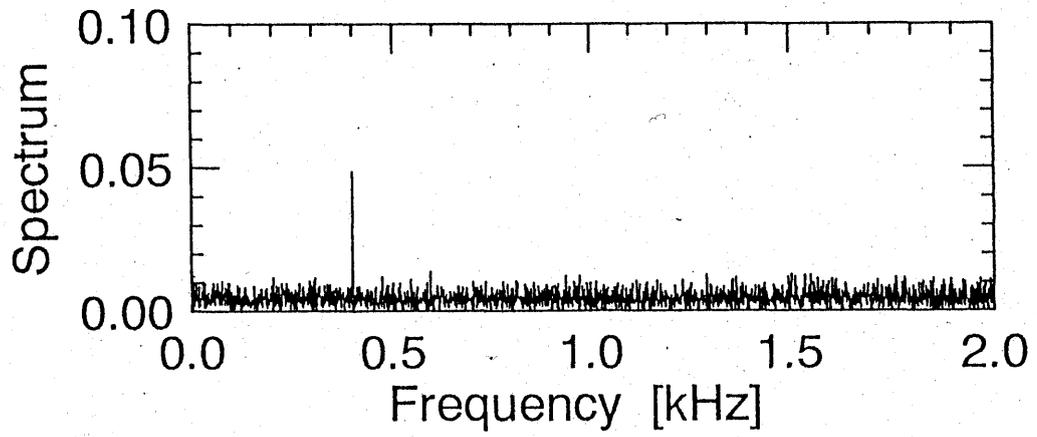
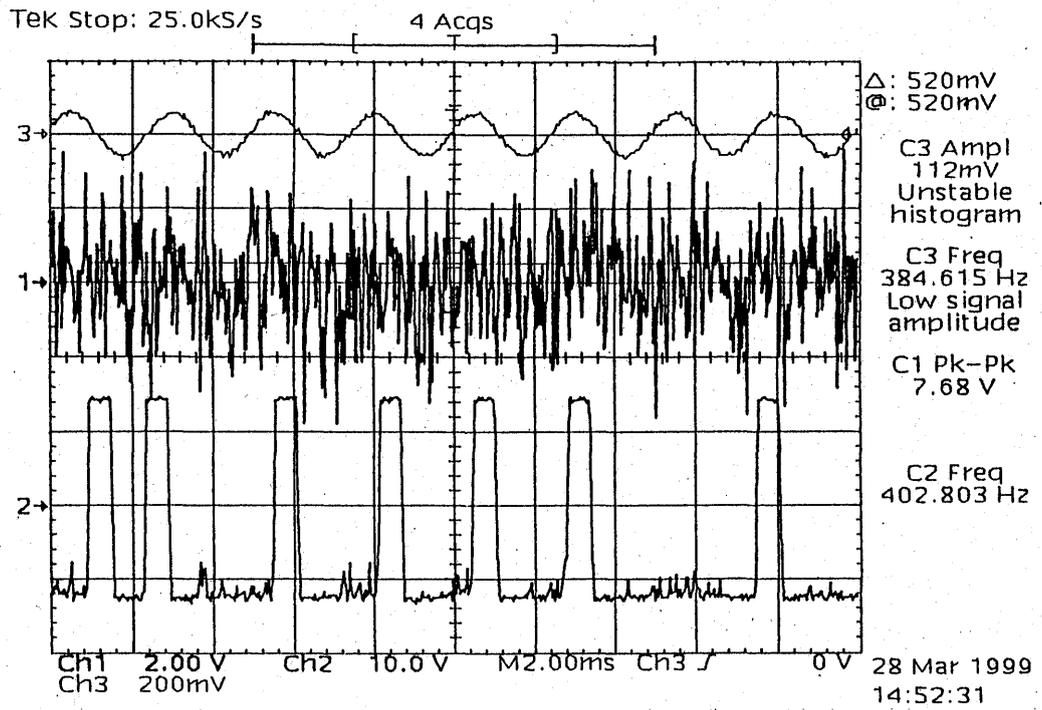


図 2.4.1(c)
 応答波形とスペクトル：ノイズ強度16[V]

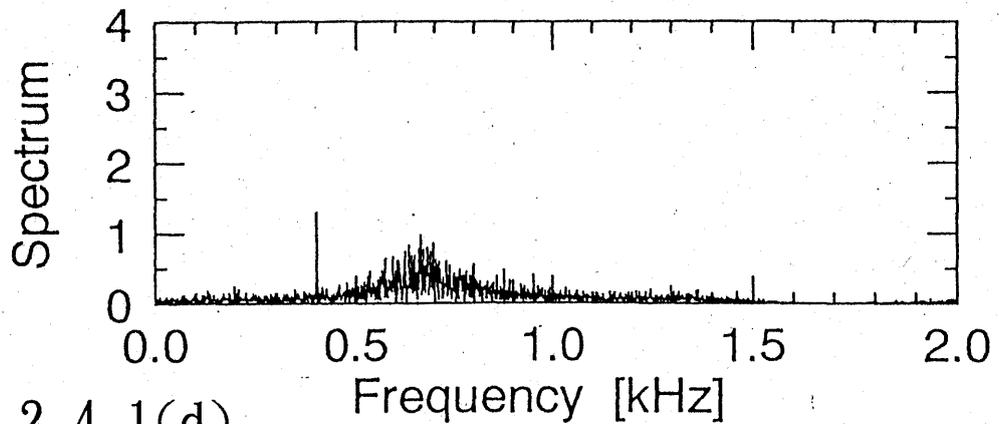
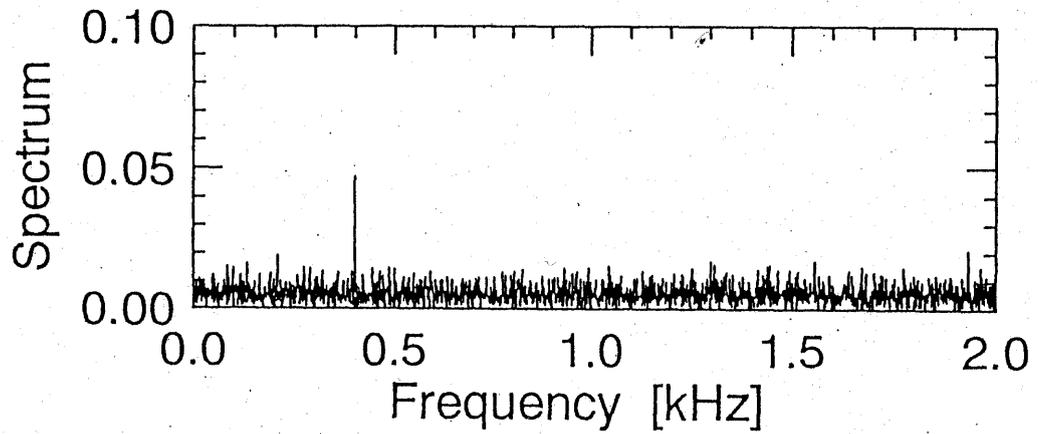
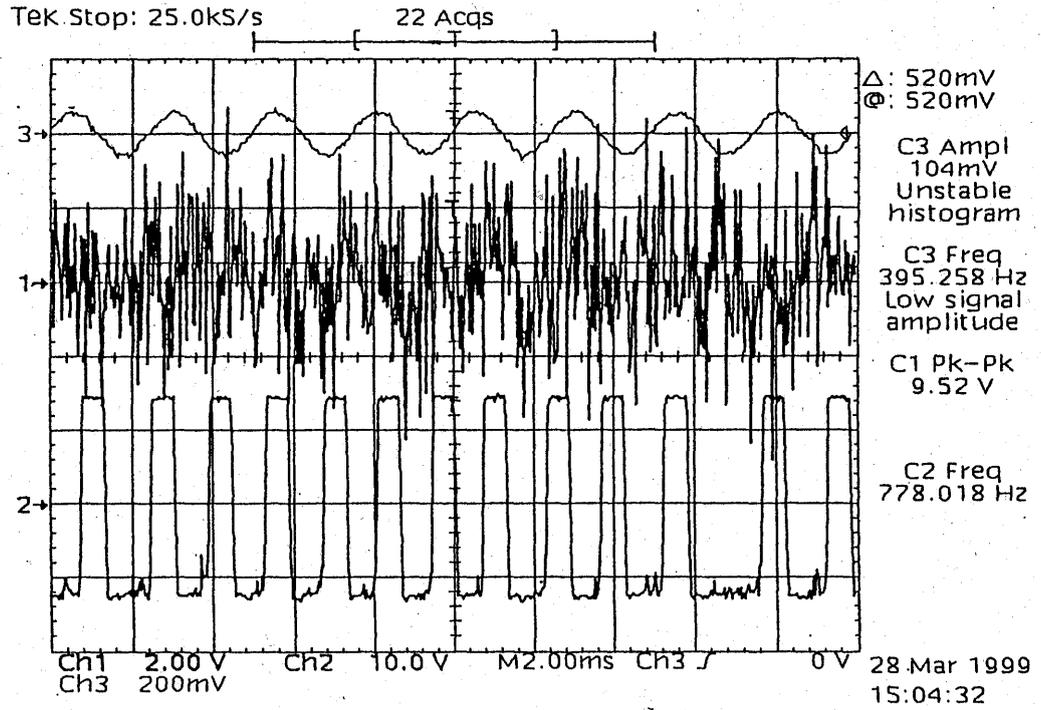
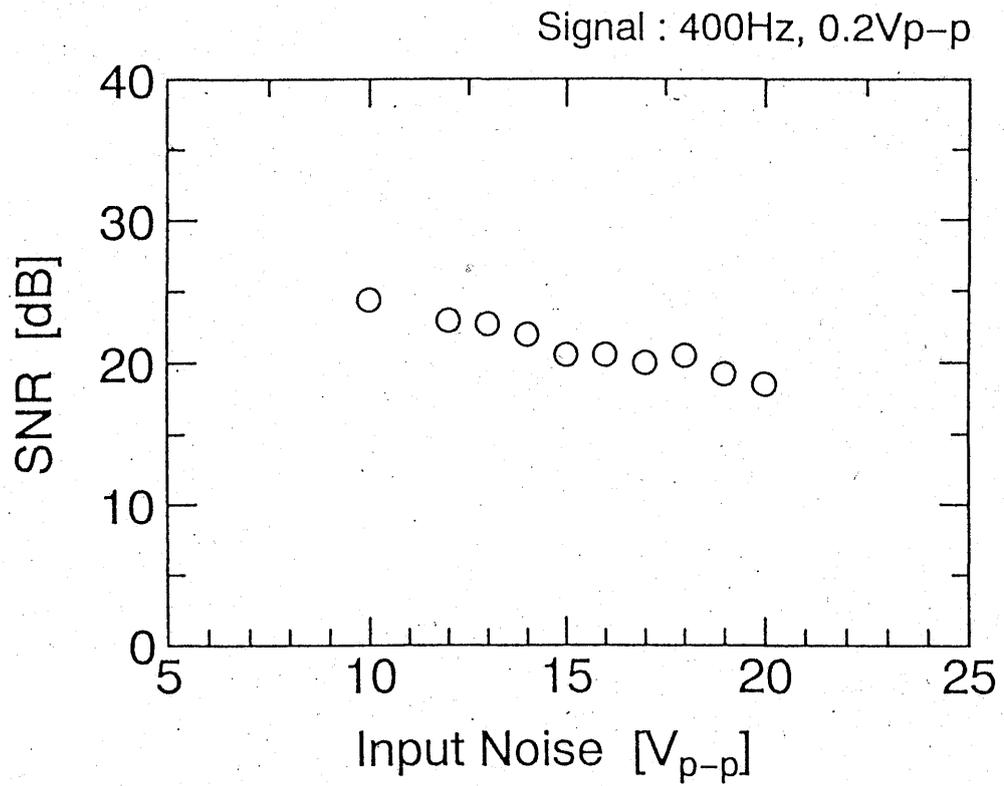
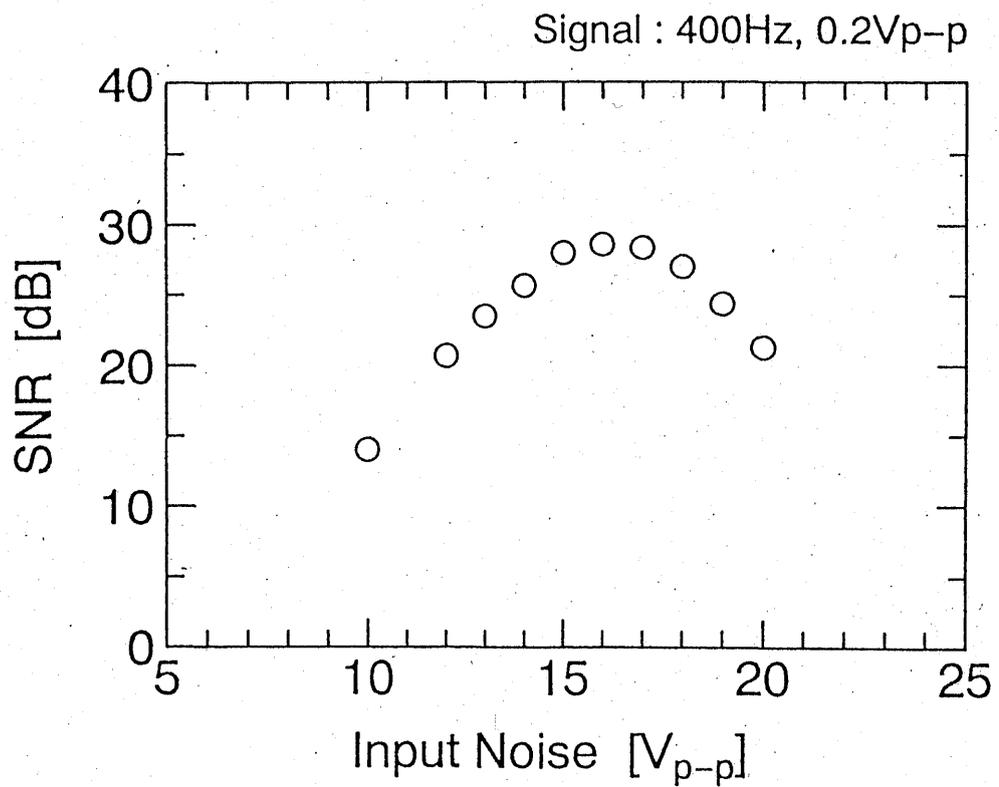


図 2.4.1(d)

応答波形とスペクトル：ノイズ強度20[V]



(a) 入力波形のSNR



(b) 応答波形のSNR

図 2.4.2 入力波形と応答波形のSNR

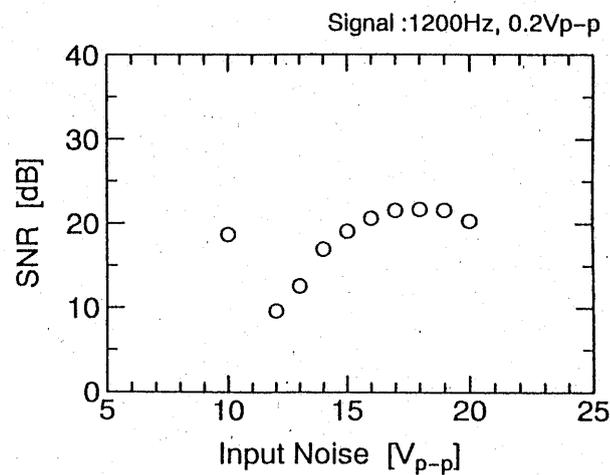
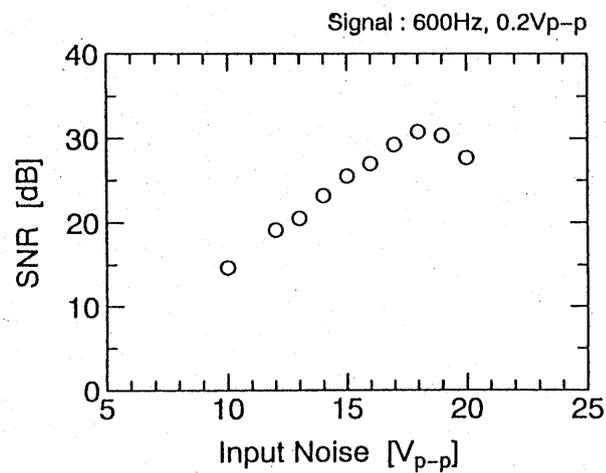
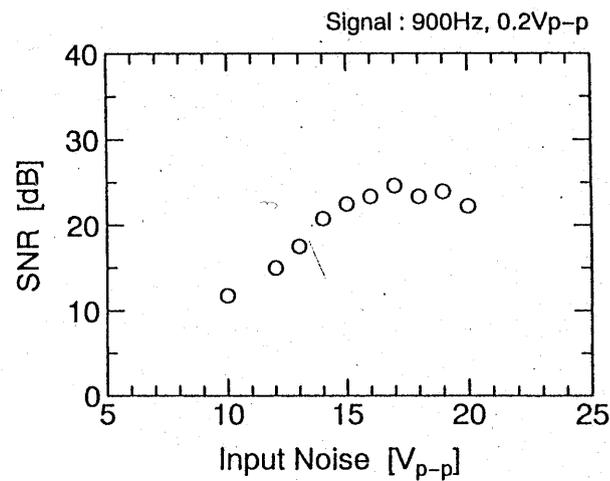
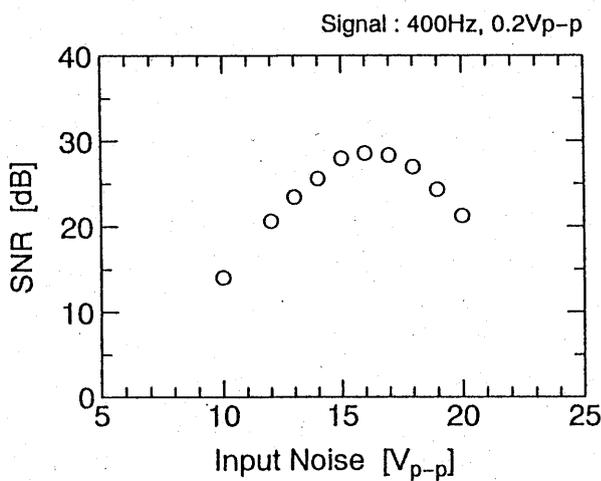
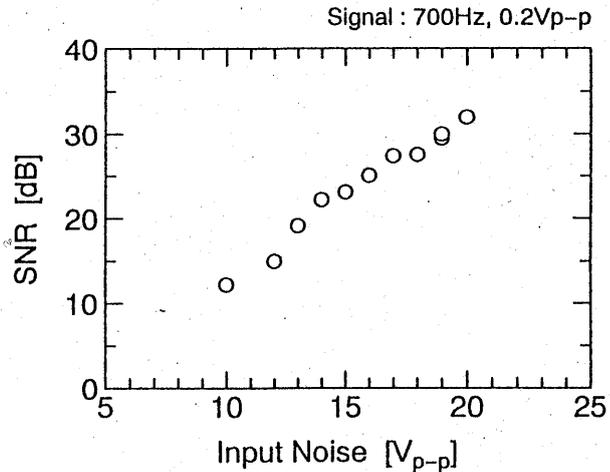
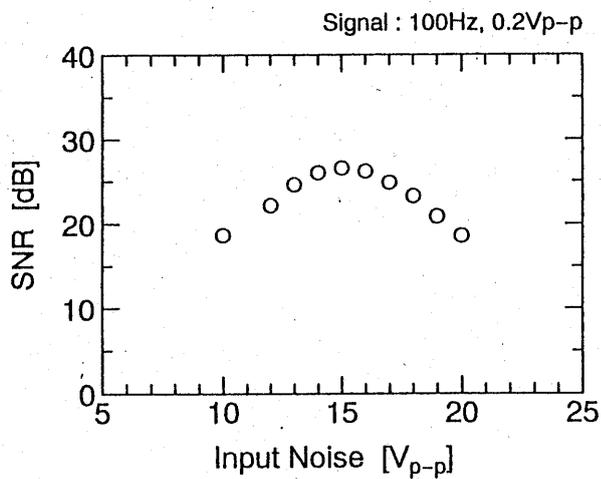


図 2.4.3 SNRの周波数依存性

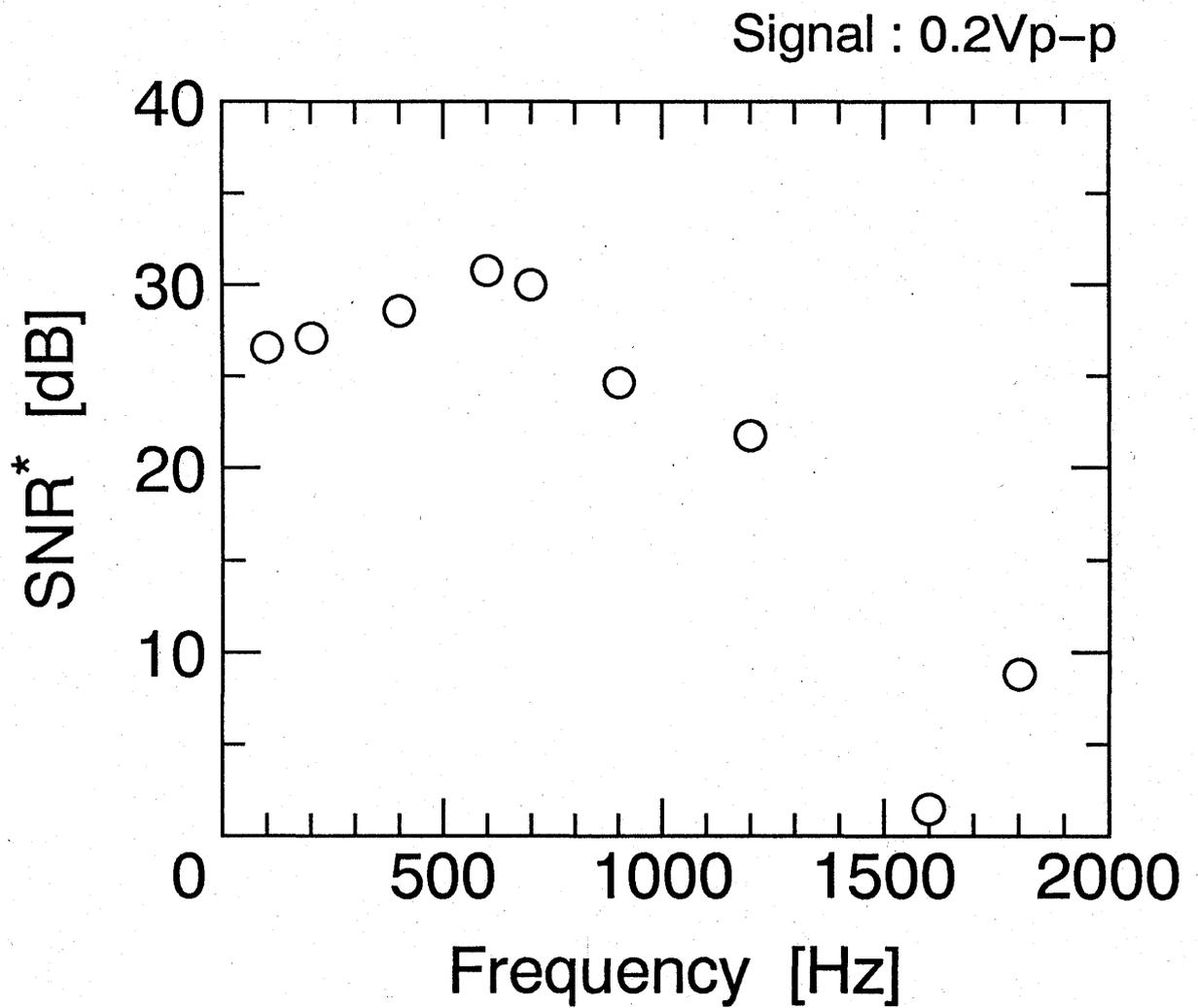


図 2.4.4 最適ノイズ強度における
SNRの周波数特性

周期に引き込まれてその間隔が整えられるために、高いSN比が得られると考えられる。

一方、§ 2.3の正弦波応答では900~1600Hz程度までは2:1応答しており、高周波領域では、信号周期に対応するパルス間隔は存在しない。それにもかかわらず、信号周波数のピークが現れるのは、2:1応答が確率的であることに起因することがわかった。2:1応答が時々乱れ3回に1度の応答が現れる。そのためパルスのあるなしの順番がそこで入れ替わるために、周期2の構造が崩れ、逆に周期1に対応する信号周波数のスペクトルとして観測される。このことは、間隔2と3から成るランダムなパルス列のスペクトルを調べるで示すことができた。これもノイズの効果と言える。

このように、確率共鳴の本来の周波数領域を越えて、自励振動付近およびさらに高周波の領域においても、その検出の仕方は異なるものの、信号周波数の検出が可能であることが明らかになった。金丸らはFitzHugh-Nagumo方程式のシミュレーションにおいて検出効率が最大となる信号周波数とその系の固有周波数とほぼ一致することを見い出しており⁹⁾、我々の結果と一致する。

§ 2.5 パターン検出

当初、応答速度の異なる単安定回路を2段構成して、前段に速い速度の回路を、後段に遅い回路を配して、前段の応答を後段で積分して信号の検出効率の上昇を計った。しかし、これを実現するためには、回路の状態を精度よく制御しなくてはならず、生物に行う情報処理には不向きであった。そこで、多素子並列化を考えた。1つの非周期信号を多素子で同時に受信する。それぞれは異なるノイズにさらされて各受信機(SR素子)に到達する。その応答波形の集合平均をとるのである。現時点で可能な方法として、1素子による繰り返し信号の時間平均処理を試みた。これには、デジタルオシロスコープのアベレーシング機能を利用することができる。非周期信号の代わりに時間的に局在したある波形パターンを用い、ノイズに加算して、同位相で波形の取り込みを行い、時間平均を実行した。その結果を、図2.5.1に示す。上の図は、1回のサンプリングによる波形データである。各図で4つの波形は上から、トリガー信号、埋め込んだ波形パターン、ノイズを加算した入力信号、単安定回路の応答波形である。電圧軸はそれぞれ、10V/div、200mV/div、5V/div、10V/divである。時間軸は20msec/divで、サンプリングは5kS/secで行った。1回の応答では信号のあるところで応答頻度が上がっていることはわかるが、波形の形状までは判断できない。下の図は、これを50回アベレーシングした波形である。応答波形は、元の信号の形状をよく再現している。入力波形のアベレーシングより再現性が

高いことがわかる。

もちろん、性質のよいノイズでかつ無限の測定精度があれば、入力波形の時間平均は元の信号を忠実に再現するはずである。しかし、限られた測定精度の下では、SR素子の方が性能がよいことがあり得ると考えられる。

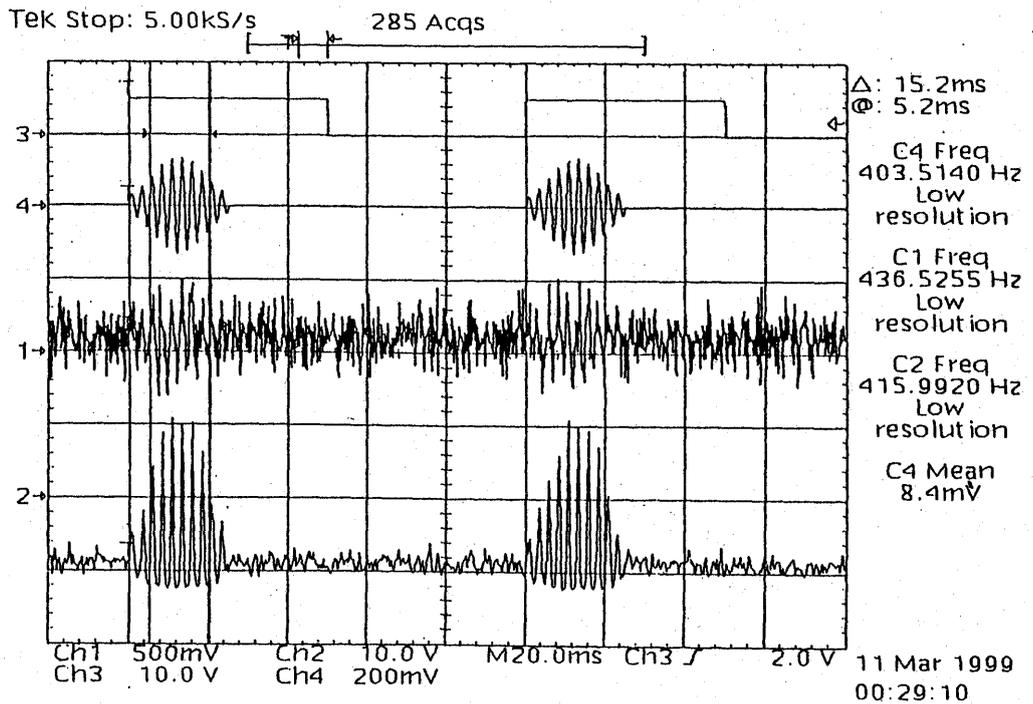
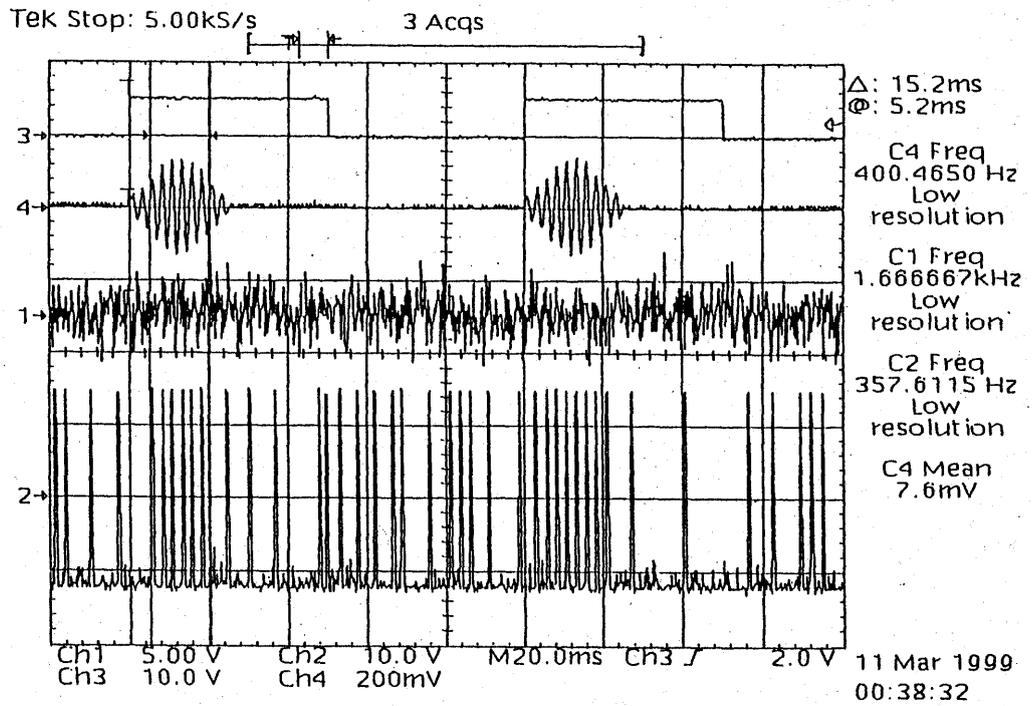


図 2.5.1 波形パターンの検出

3. 鉄-硝酸反応系の実験

§ 3.1 鉄-硝酸反応

化学振動系として最もよく知られ、最も精力的に研究されてきた化学反応は Belousov-Zhabotinsky (BZ) 反応である。現在でもカオスやパターン形成、協同現象の研究における貴重な実験系である。1982年以降、反応液を連続的に交換していくCSTR実験¹⁰⁾によって、安定な振動を長時間続けられるようになった。BZ反応はこの交換反応液の流量によって興奮系(単安定系)をつくりだせる。1996年、Guderianらはこの興奮系のBZ反応において流量に周期的変化とランダム変動を加えて、確率共鳴現象が起こることを示した¹¹⁾。一方、猪本、甲斐らはBZ反応を電流制御することによって興奮系を実現し、電流変化に対して確率共鳴現象を確認、最適ノイズ強度の信号周波数依存性を報告している¹²⁾。雨宮、山口らは光感应性の金属触媒とCSTRにより光強度と流量の2パラメータによる確率共鳴の実験を試みている¹³⁾。

これに対し、鉄-硝酸系におけるパルス伝播の実験は、1920年代に始まり、1960年代鈴木良次により詳細に研究された¹⁴⁾。彼はパルス伝播だけではなく振動反応についても研究した。さらに鉄線と銀線を組み合わせることによって興奮性および抑制性の結合を可能にし、ダイオードや論理回路を化学素子で構成できることを示した。しかしその後、このパルス伝播や振動反応に関して、BZ反応のような組織的な研究はなされなかった。

濃硝酸中に置かれた鉄線は酸化被膜を形成して不活性な状態になる。これを不動態と呼ぶ。この状態にある鉄線の一部に機械的あるいは電氣的な刺激を与えて局所的に酸化被膜を破ると鉄がイオン化する。イオン化で生じた過剰な電子はそのまわりの酸化被膜を還元して活性化させる。この状態を活性態と呼ぶ。一方、イオン化した Fe^{2+} は溶液中の水酸イオン OH^- や酸素イオン O^{2-} と反応して酸化鉄 Fe_2O_3 となり、活性化した鉄の表面に析出して再び酸化被膜を形成する。うまい条件のとき、局所的な活性態が鉄線に沿って毎秒数cmから数10cmの速さで伝播する現象が観察できる。硝酸濃度が低くなると酸化被膜の溶解反応が生じ、9N(規定濃度)以下では不動態を保てなくなる。この前後では活性態と不動態が交互に現れる振動状態が見られる。これは神経の興奮現象と類似している。しかし、濃硝酸中では安定な振動を持続させることは難しい。また、固体-液体界面の反応であるため、金属中の不純物、反応液の雰囲気、電極面の磨き方等不確定な要因が多く、本来、反応の再現性は乏しい。そこで、鉄線をポテンシオスタットで電位制御することによって、0.5~2Nの低濃度での穏やかな

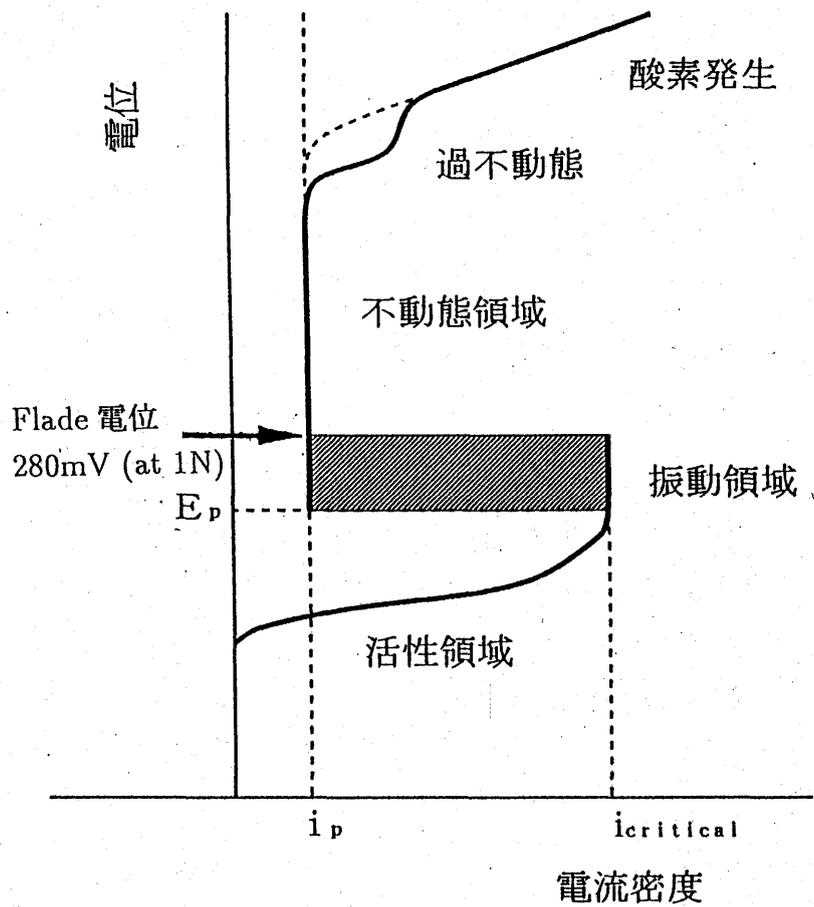
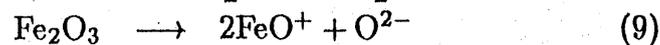
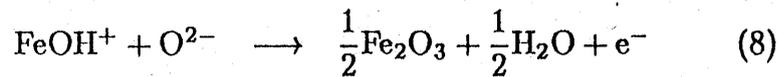
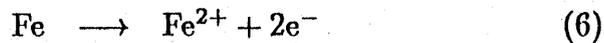


図 3.1.1 鉄の分極曲線

反応を実現した。さらに、後述するように、電極形状を工夫することによって、長時間に及ぶ安定な振動反応を実現した。

この反応の分極曲線（電流－電圧特性）を図3.1.1に示す。鉄電極電位によって不動態領域、振動領域、活性領域に分かれる。図より負性抵抗の領域で振動していることがわかる。ここで、不動態領域と振動領域の境界をFlade電位と呼ぶ。Flade電位はpHにより異なり、pH値が高くなる（硝酸濃度が低下する）と低くなる。この電位が本実験の閾値である。従って、鉄電極の電位はこれより上なら不動態（興奮系）、下なら振動状態（自励振動系）となる。

鉄電極の先端面での反応を以下に示す。



(6)は鉄のイオン化であり、イオン化の電流を正の電流値とする。(7)、(8)が電極面近傍における酸化鉄 Fe_2O_3 の生成反応である。 Fe_2O_3 の濃度が高くなると鉄電極面へ析出して酸化皮膜を形成する。(9)、(10)はその酸化皮膜の溶解反応である。その他にも、硝酸イオン NO_3^- が亜硝酸イオン NO_2^- になる反応や2価の鉄イオン Fe^{2+} が3価の鉄イオン Fe^{3+} になる反応が生じている。亜硝酸は不動態化を促進すると考えられており、反応を複雑にさせている一因である。ここでは(6)から(10)の反応に基づいて振動反応のメカニズムを説明する。

まず、(6)で鉄がイオン化し、(7)-(8)の反応で Fe^{2+} から3価の酸化鉄 Fe_2O_3 が生じる。このとき電流が急に上昇する。鉄のイオン化が進み Fe_2O_3 濃度が高くなると、鉄電極面に析出し酸化皮膜を形成し始める。これによって鉄のイオン化の有効面積が減少しイオン化が抑えられてくる。この間、電流は緩やかに減少する。酸化皮膜が電極面を完全に覆うと鉄のイオン化は止まり、電流はほとんど流れなくなる。 Fe^{2+} の供給が断たれ、 Fe_2O_3 は拡散によって減少し始める。電極面近傍の Fe_2O_3 濃度が十分下がると酸化皮膜の形成は止まり、(9)-(10)の溶解反応が顕著になる。酸化皮膜は徐々に薄くなり電極面のどこかで破れると、そこから再び鉄がイオン化する。過剰の電子はその周りの酸化皮膜を還元して、一気に酸化皮膜はなくなり、電流は急上昇する。これが振動反応のメカニズムである。

鉄-硝酸反応は鉄電極の電位により興奮性にも振動性にもでき、その反応は神経の刺激応答や自励振動に非常に近い性質を有している。BZ反応に比べ周期が非常に短く、10分で1000回以上の振動を得ることができる。再現性さえ得られれば、神経系の応答を模擬する実験系を新たに構築することができる。我々はこの反応系において安定な周期振動を長時間持続させ、再現性を得て、非線形散逸系の新たな実験系として確立することを目指している。

§ 3.2 実験装置

図3.2.1に実験装置の概略を示す。参照電極 (RE) と鉄電極 (作用極; WE) との電位差をポテンショスタットで一定に制御している。ここでは、参照電極は反応槽の外に置き、塩橋によって液絡させている。鉄線は側面を樹脂で覆い先端面のみを反応面としている。対極 (CE) には白金電極を用いる。銀-塩化銀電極を参照電極として、鉄電極の電位が設定電位に保たれるように、鉄電極と白金電極の間の電流をポテンショスタットで自動調節する。鉄電極は側面を樹脂で覆い先端面のみを反応面とした。

長時間に渡る安定な振動を得るために、以下の工夫を行った。

まず、この振動過程を観察すると、 Fe_2O_3 生成時に電極面下で下降流が生じていることが分かった。したがって、 Fe_2O_3 は単に拡散によるだけでなく、この下降流によっても持ち去れると考えられる。また、この下降流が層流状に流れているとき、振動も安定していること、反応の進行に伴って鉄線は溶けて先端面が樹脂の中に埋没するようになると、振動も不規則になる傾向にあることなどが観測された。我々はこの下降流の安定化が規則的な振動反応の要因と考えた。そこで、下降流に伴う側面からの反応液の流入を円滑にすることを狙って、電極形状を工夫した。すなわち、側面の樹脂を厚くし、鉄線がその中心に来るように包埋することによって、反応面の周囲に広い平らな面を形成した。これにより、長時間の安定な振動反応を得ることができるようになった。

しかし、実験毎の再現性を得るまでには至らなかった。そこで、反応の再現性を得るために反応液の雰囲気を整えることを試みた。実は、同じ溶液で繰り返し実験すると、徐々に振動が不規則になり、鉄電極面には細かな泡の析出が観測されるようになる。小泡は水素の泡で、対極で発生した水素が反応液に溶け込み、過飽和になって鉄電極に析出したものと考えられる。この小泡が下降流を乱し振動を不規則にしていると考えられる。そこで、実験前に反応液に空気をバブリングすることで、予め溶存酸素の量を増加させておいた。すると小泡の析出は認められず、振動も安定した。溶存酸素が溶存水素と反応して、水素をブロックしたためと思われる。この実験前の空気のバブリングによって、

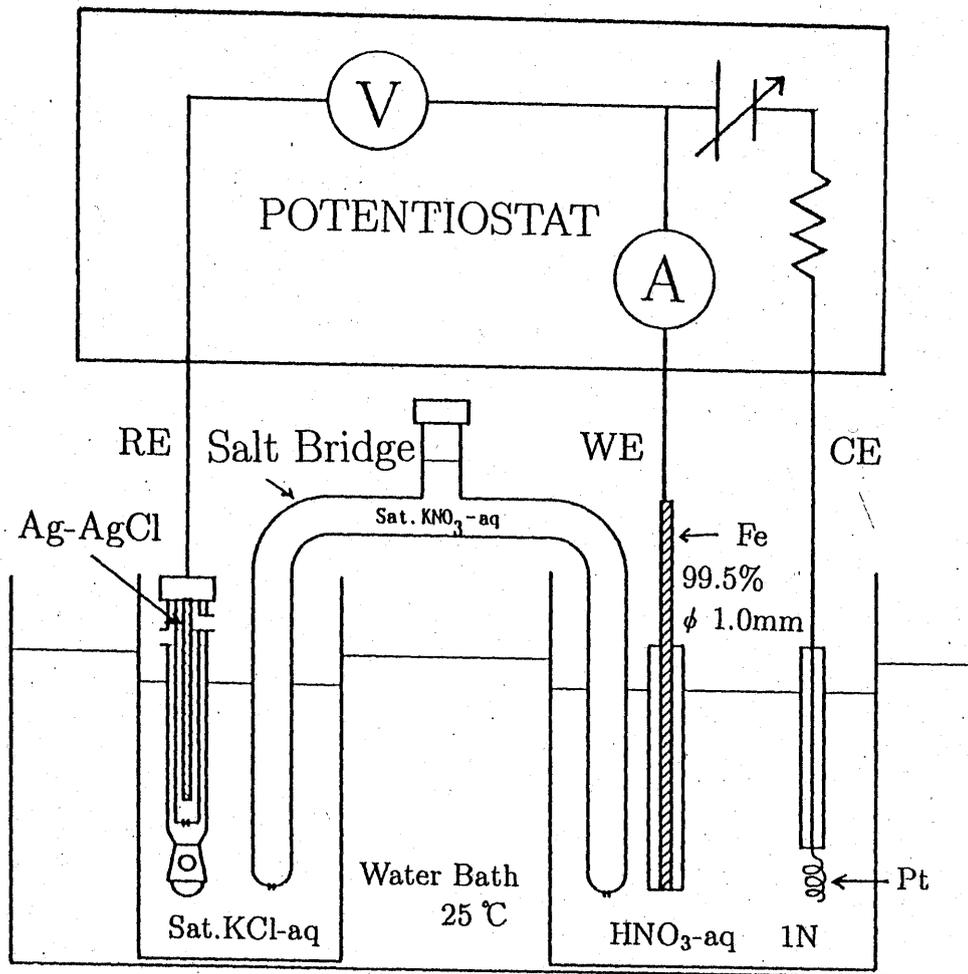


図 3.2.1 実験装置の概略

反応の再現性がはじめて得られるようになった。

以下に述べる実験の条件は、鉄線の純度99.5%、線径1.0mm、硝酸濃度1N、液温25.0℃である。この条件では、Flade電位は実測で280mV（対銀-塩化銀電極電位、以降この電位で表す）である。

§ 3.3 振動反応

図3.3.1（上段）に振動の様子を示す。反応開始から750sec後、10sec間に渡っての電流密度の変化を表している。振幅は約1.5A/cm²、振動周期は約0.8secである。同じ実験の700-800sec間の振動周期の変化を同図下段に示す。この間に130回振動している。この実験における振動周期の全変化を図3.3.2に示す。1500sec間、2000回の振動反応である。反応のはじめ、周期は一旦短くなり、それから徐々に長くなって、300secあたりでピークを向かえる。その後は時間経過に対し直線的な変化を示す。この直線部分では周期の変動が大きくなる場合が多い。振動は非常に安定で、周期の変化率は1回の振動当たり+0.05%である。

これは1999.11.1の実験データであるが、これより1ヶ月ほど前の1999.9.22のデータをこのデータに重ねて示す（図3.3.3）。1ヶ月の時間を隔てて、振動周期の時間変化が非常によく一致している。これが現在得られている反応の再現性である。

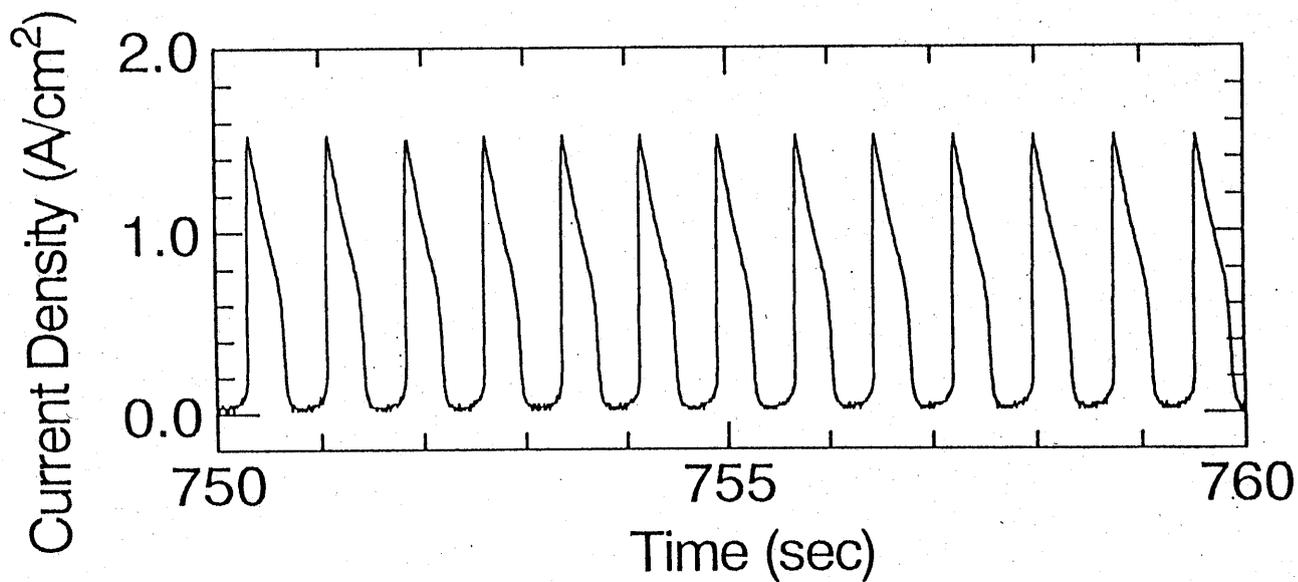
図3.3.4に設定電位が異なる場合の振動周期の時間変化を示す。電位が高いほど不動態の傾向が強くなり、振動周期は長くなる。引き込み現象を調べるとき、この電位による周期の違いを利用する。

§ 2.4 刺激応答

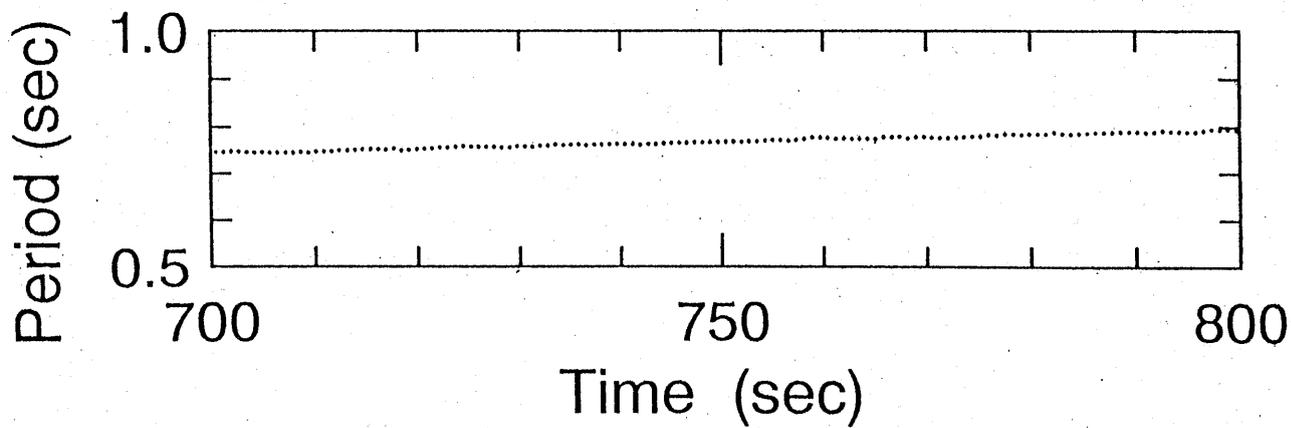
応答波形の性質を見るために、興奮系における外力応答の実験を試みた。

(1) 応答領域

鉄電極電位をFlade電位より上の350mVに設定し不動態の状態に置く。設定電位に外部から負の電圧パルスを加算する。このパルスによって一時的にFlade電位以下になると鉄電極はしばらく活性化し再び不動態に戻る。電圧パルスがFlade電位を越えてもその時間が短いと活性化は起こらない。活性化するには、酸化皮膜を還元するに十分な電気量が投入されなければならないからである。従って、外力応答には電圧の閾値の他に電気量の閾値も存在する。設定電位から負の側に計ったパルス振幅とその幅を変えて、外力応答の有無を調べた（図3.4.1）。ここで特徴的な点は振幅がFlade電位以下でも応答する領域が存在することである。直流的には活性化しない電位でも過渡的には応答するのである。



(a) 電流変化



(b) 周期

図 3.3.1 電流変化と振動周期

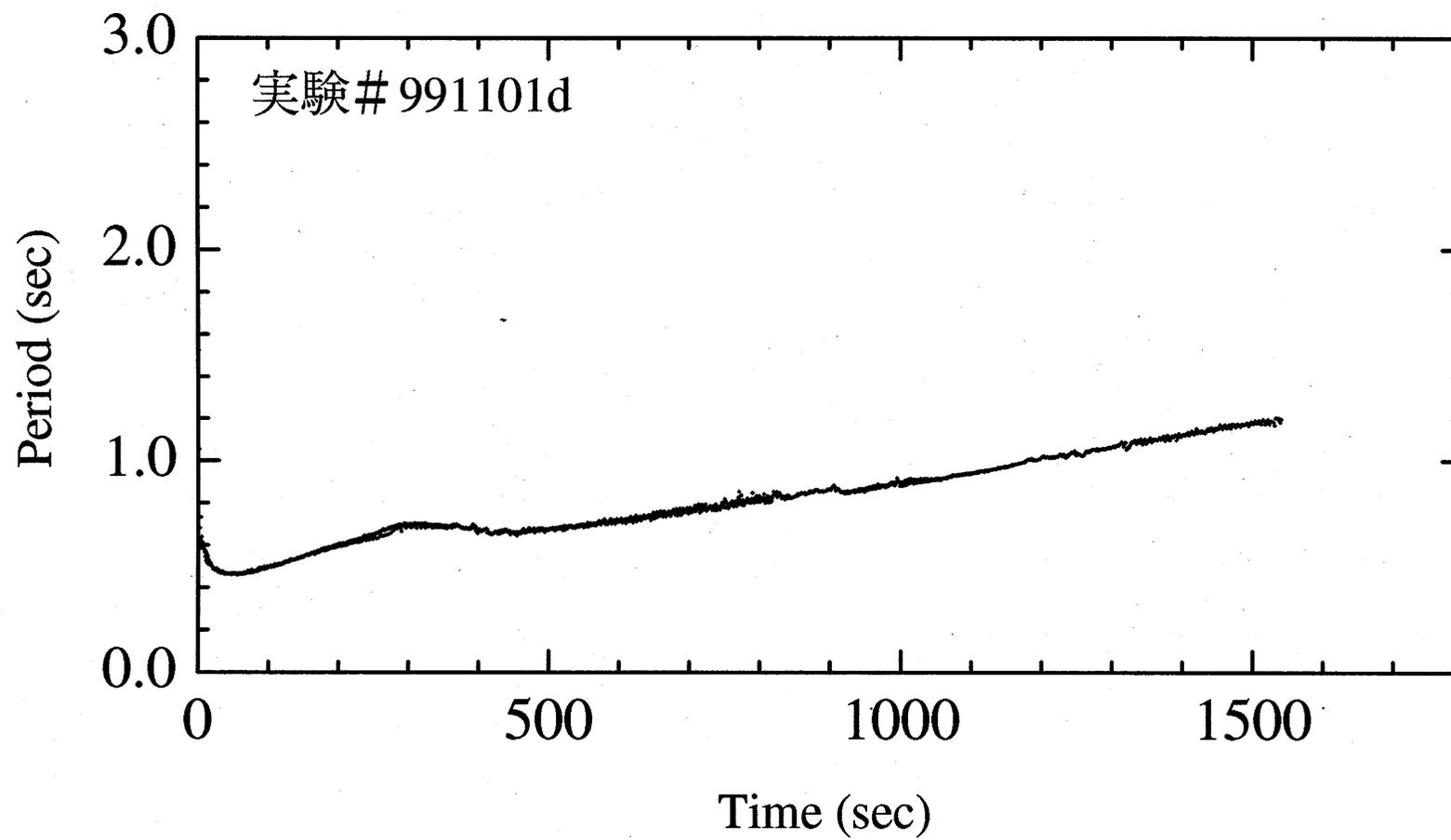


図 3.3.2 周期変化

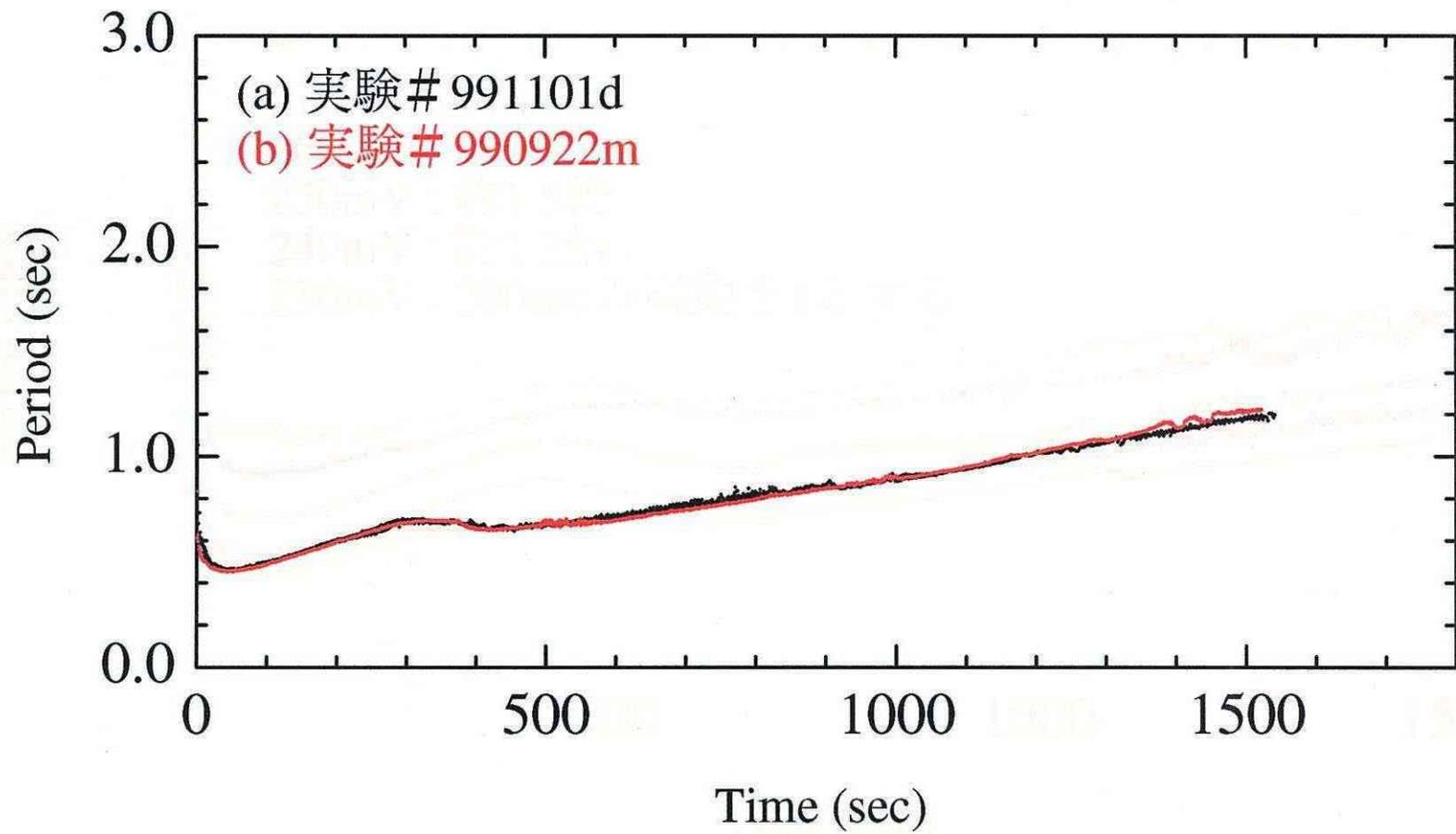


図 3.3.3 振動反応の再現性

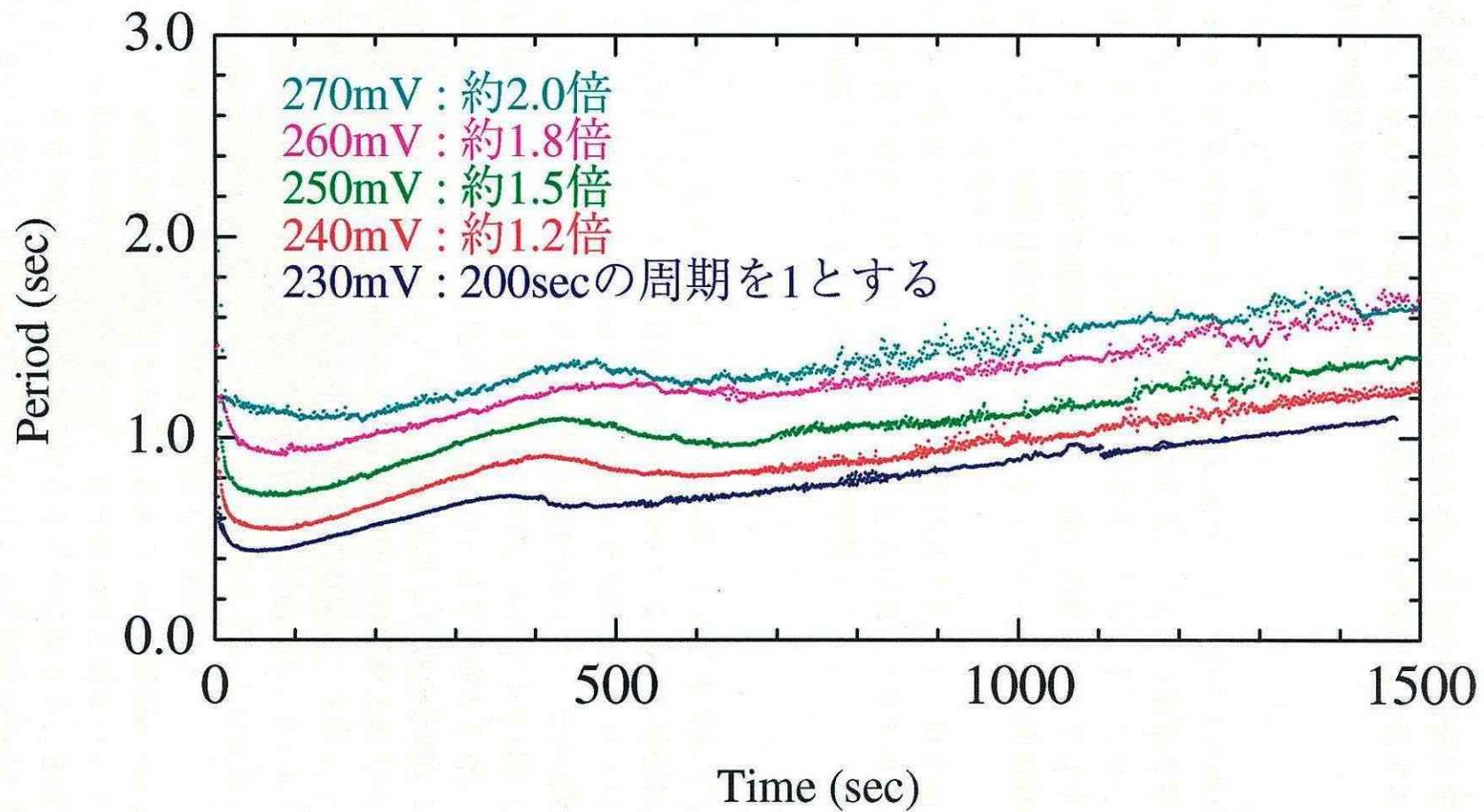


図 3.3.4 異なる設定電位に対する振動周期

(2) 不応期

不応期は電気回路の場合と異なり固定してはならず、外力の振幅が大きいと不応期は短くなる。すなわち、不応期は刺激強度によって動的に変化する。刺激強度と不応期との関係を図3.4.2に示す。

(3) 連続刺激に対する応答パターンの変化

繰返しパルスに対する応答波形の違いを図3.4.3に示す。図の①では8回のパルスに対して1回応答している。この間が不応期である。パルスの振幅を増すと③では3回に1回、さらに増すと⑤では毎回応答するようになる。しかし、その応答波形は小さくなる。神経の刺激応答に似て、強い刺激に対しては小出しに応答する。このように不応期は応答波形を変えることによって、刺激強度に対し動的に変化することが分かる。

これら興奮系における外力応答は、神経の刺激応答に非常によく似た性質を持つ。これらの性質は確率共鳴だけでなく、引き込み現象にも反映されると考えられ、位相の同期には振幅の変化を伴うことが予想される。

§ 3.5 確率共鳴

鉄電極電位を350mVとし、ポテンショスタットの外部入力端子を介して信号+ノイズを印加する。発振器のノイズでは鉄電極を活性化するための電圧幅が得られない。そこで、ノイズは発信器の直流電圧の値とその時間幅をコンピュータの疑似乱数で振って構成した。乱数はKnuthの減算法を用いた。この乱数から生成したノイズ波形とそのスペクトルを図3.5.1に示す。スペクトルは0.1~10 Hzの範囲で平坦である。乱数で振る電圧の範囲を入力ノイズ強度とした。

周波数0.1Hz、振幅0.024Vの正弦波とノイズを加算入力した場合を図3.5.2(a)~(d)に示す。電気回路の場合と同様に、各図で一番上の図が入出力の波形を示し、上段が正弦波の信号、中段が信号+ノイズの入力波形、下段がその応答波形である。電圧軸のレンジはそれぞれ200mV/div、200mV/div、50.0mV/divであり、時間軸は2sec/divである。2、3番目の図はそれぞれ入力波形、応答波形のスペクトルである。スペクトル成分も同様にして求めた。

図3.5.2(a)はノイズ強度30mVの場合である。正弦波の振幅は閾値350mVを越えず、ノイズも小さくて回路はほとんど応答せず、信号は検出されない。ノイズ強度が70mVになると、信号の山でパルスが観察できるようになるが、まばらで、あまり応答していない(図3.5.2(b))。図3.5.2(c)はノイズ強度130mVの場合である。信号の山の部分で頻繁に応答し、0.1Hzのスペクトルは最大となる。さらにノイズ強度を増した場合を図3.5.2(d)に示す。ノイズ強度は250mVである。こ

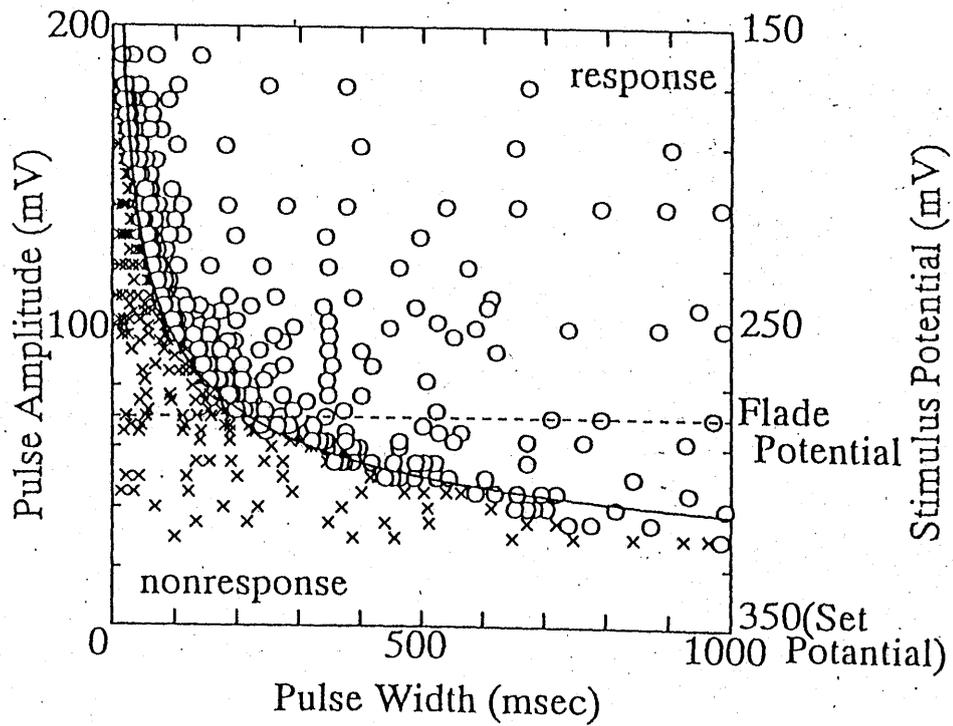
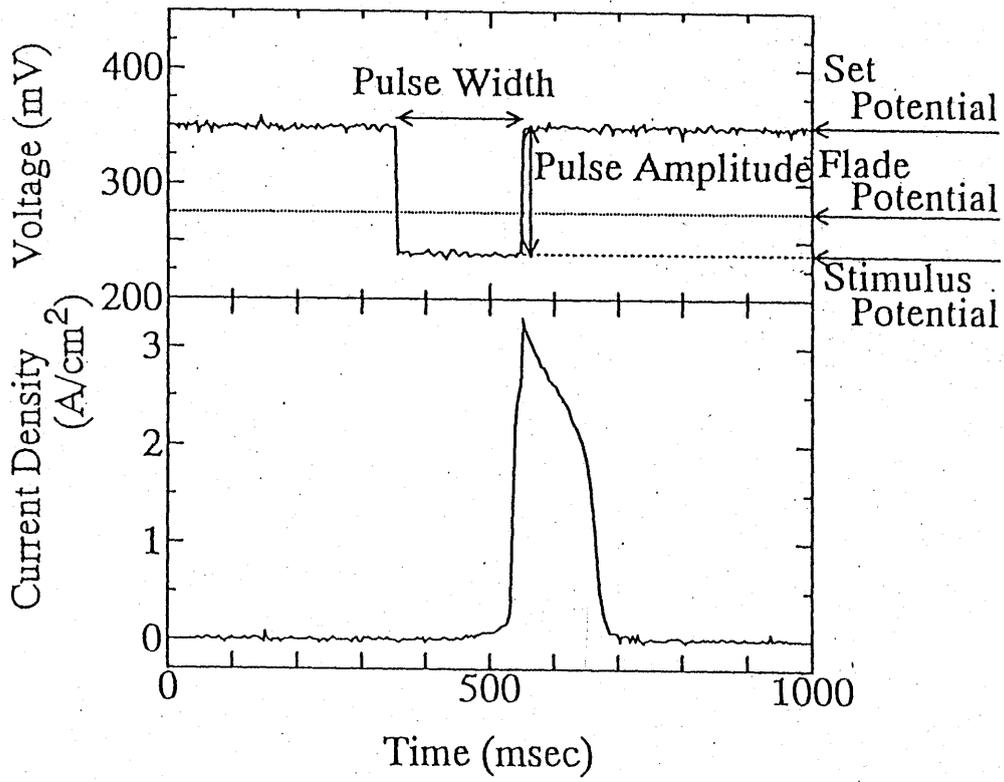


図 3.4.1 電圧刺激に対する応答領域

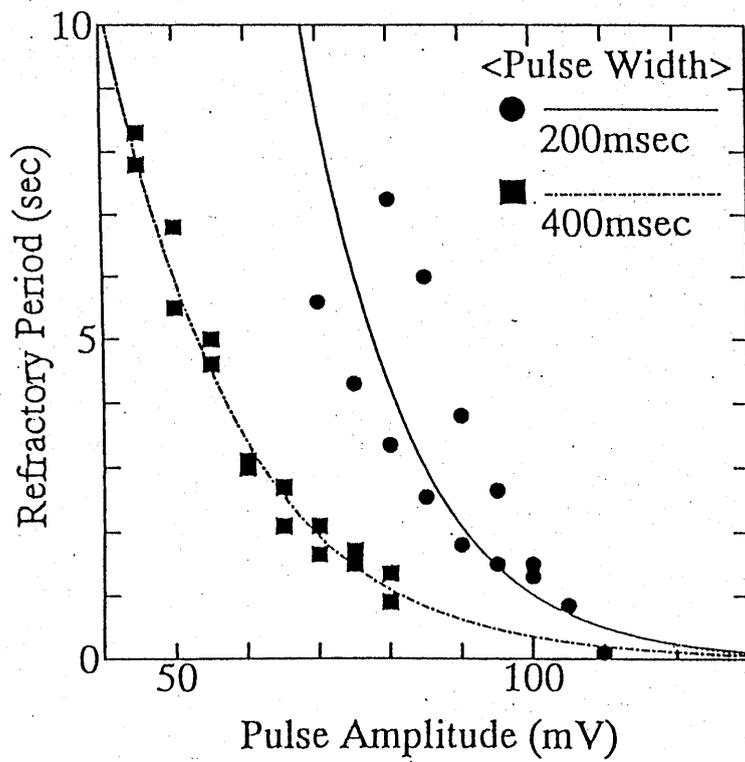
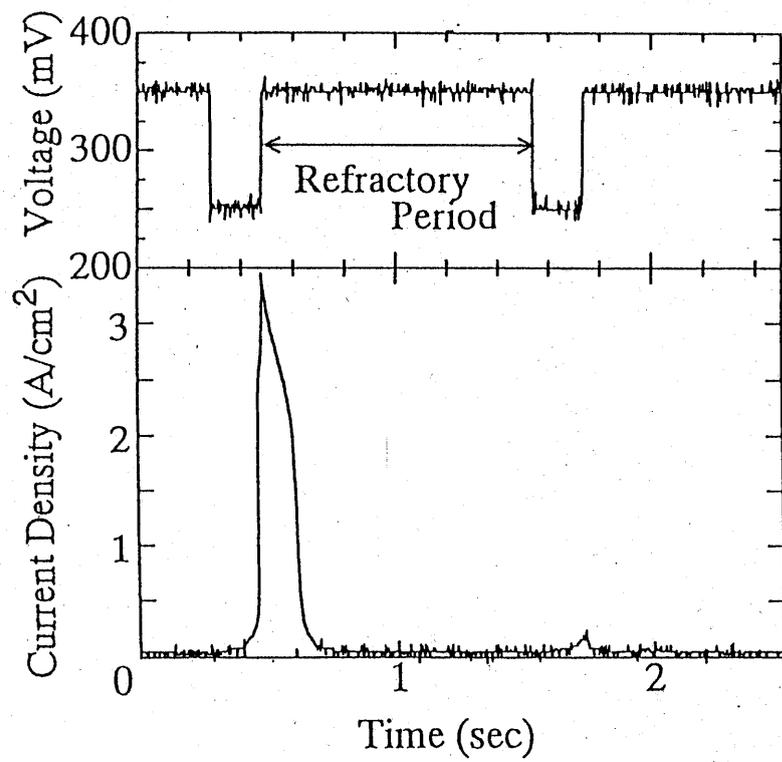
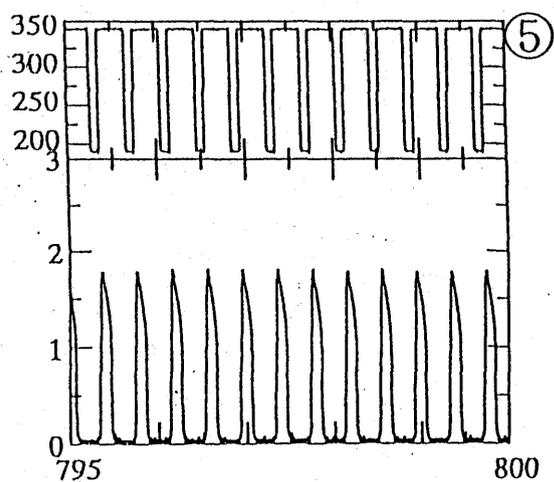
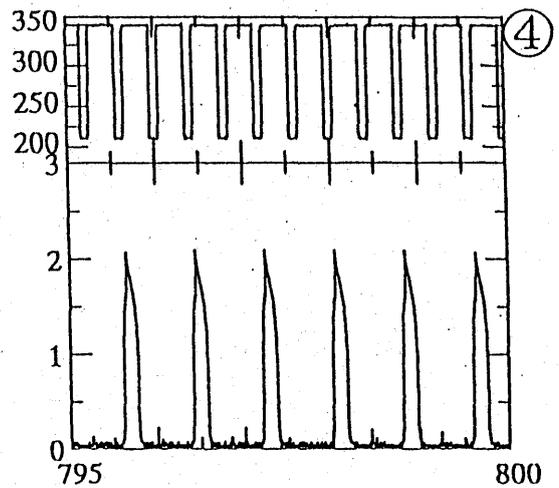
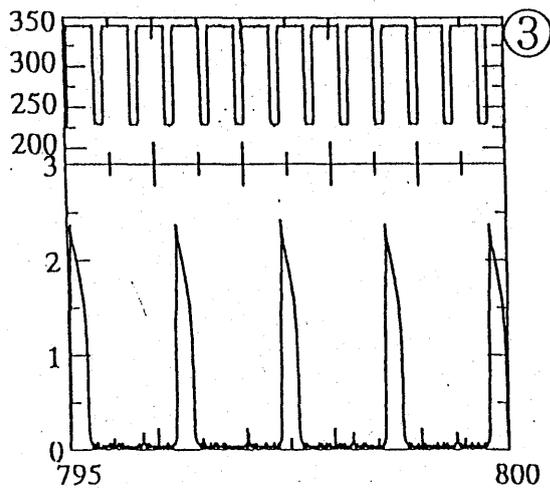
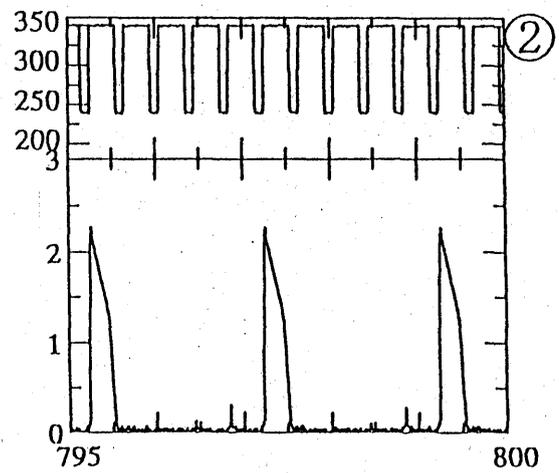
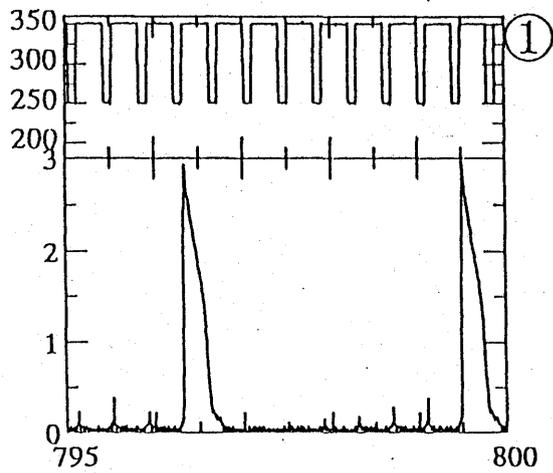


図 3.4.2 刺激強度と不応期の関係



(上段) X軸:Time (sec)
Y軸:Voltage (mV)

(下段) X軸:Time (sec)
Y軸: Current
Density (A/cm^2)

図 3.4.3 連続刺激に対する応答パターンの変化

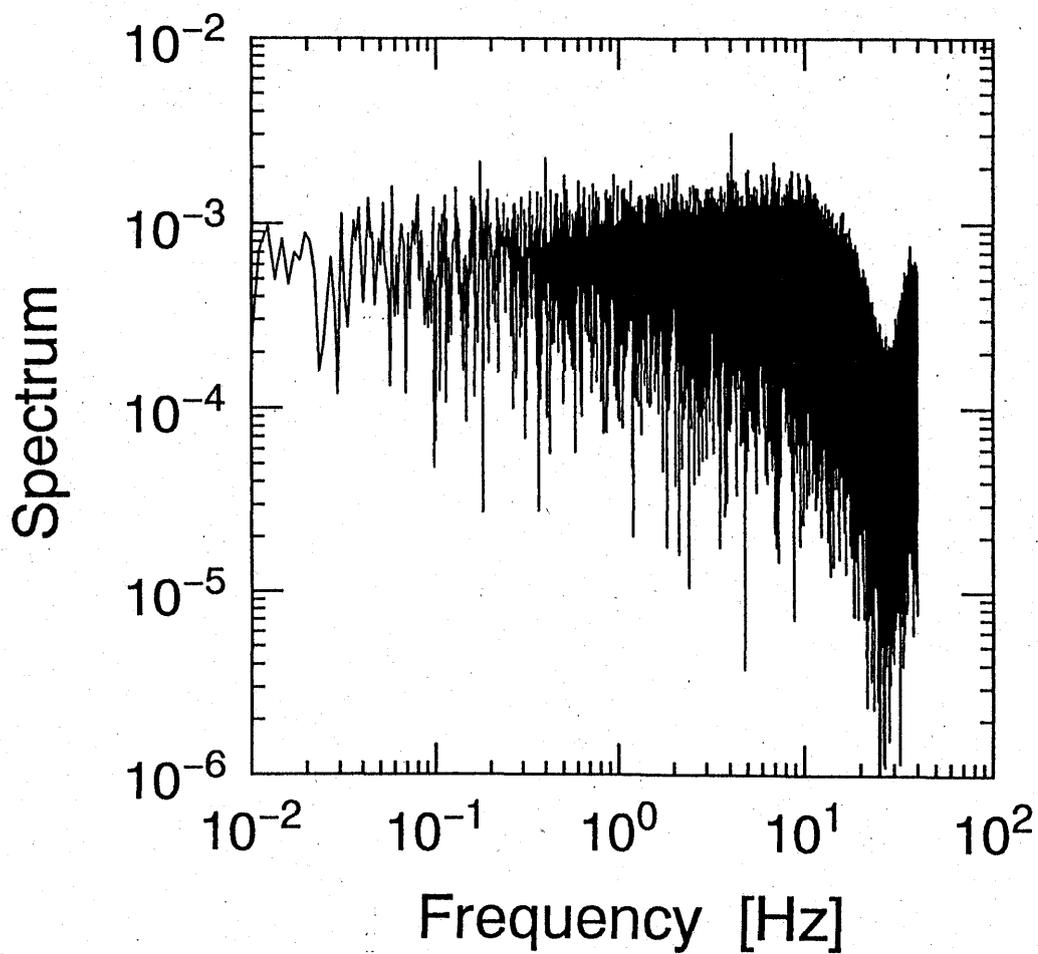
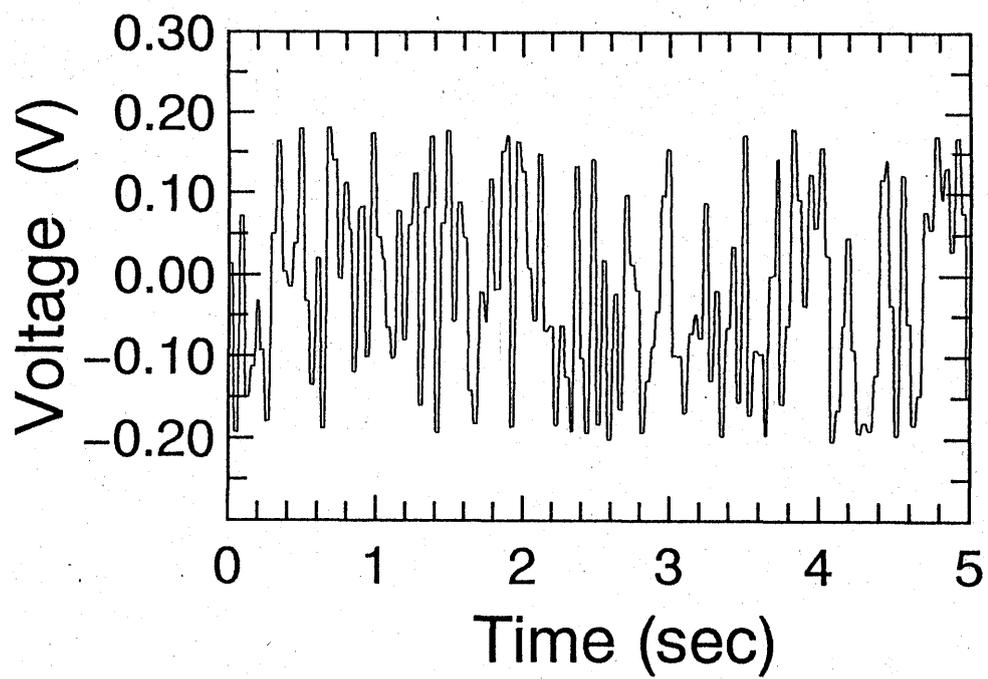


図 3.5.1 疑似乱数から生成したノイズ波形とそのスペクトル

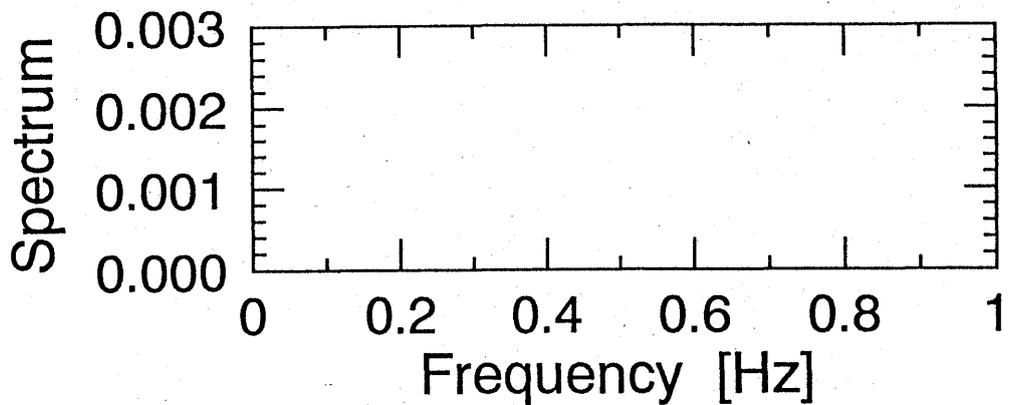
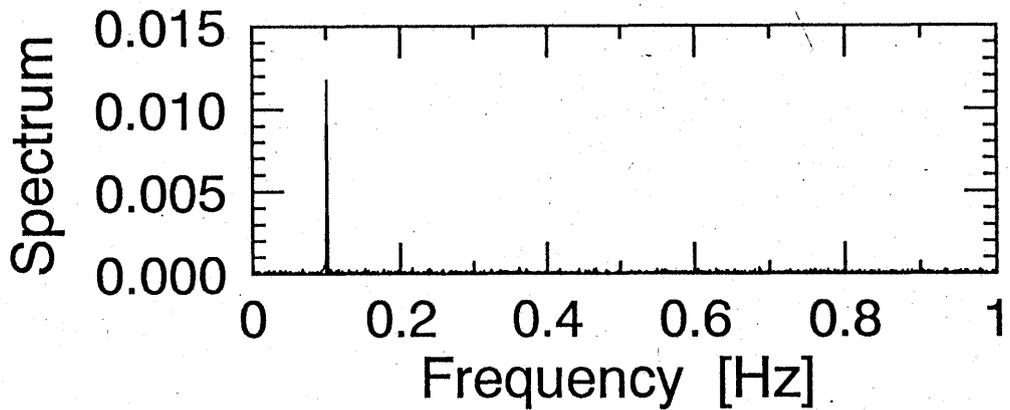
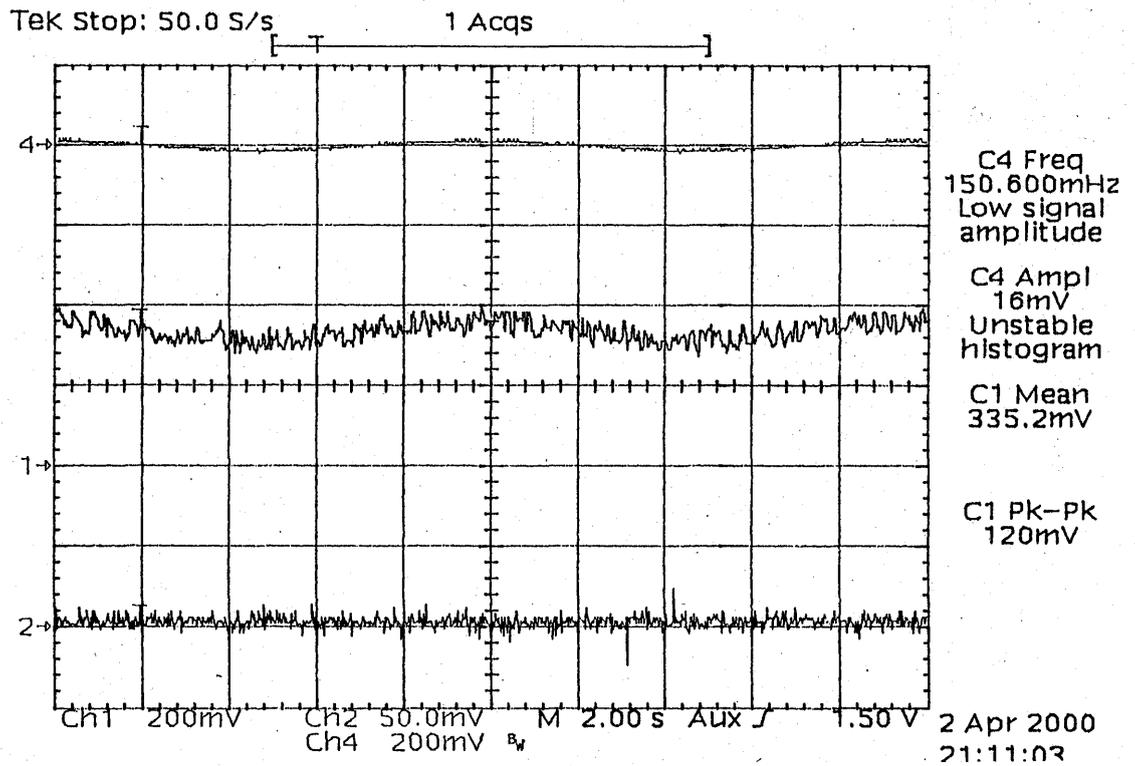


図 3.5.2(a)

応答波形とスペクトル：ノイズ強度30[mV]

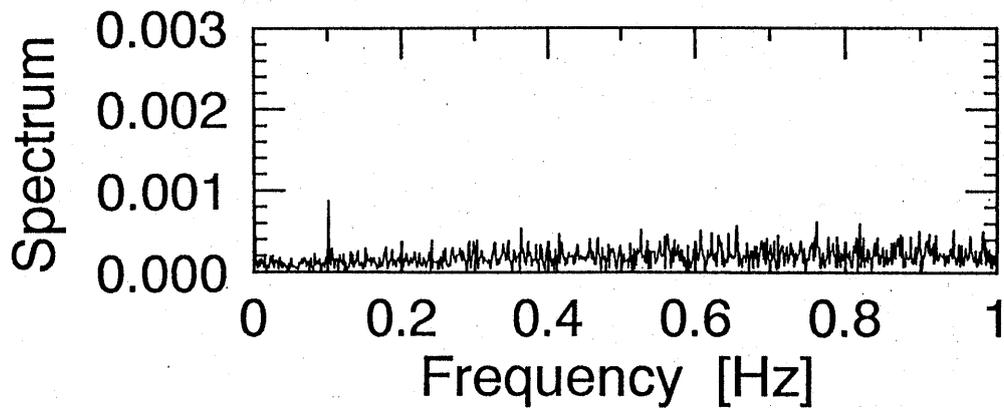
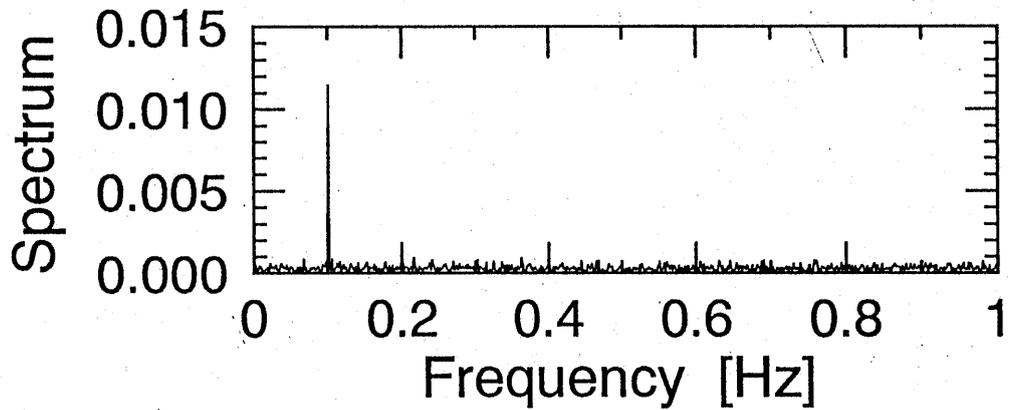
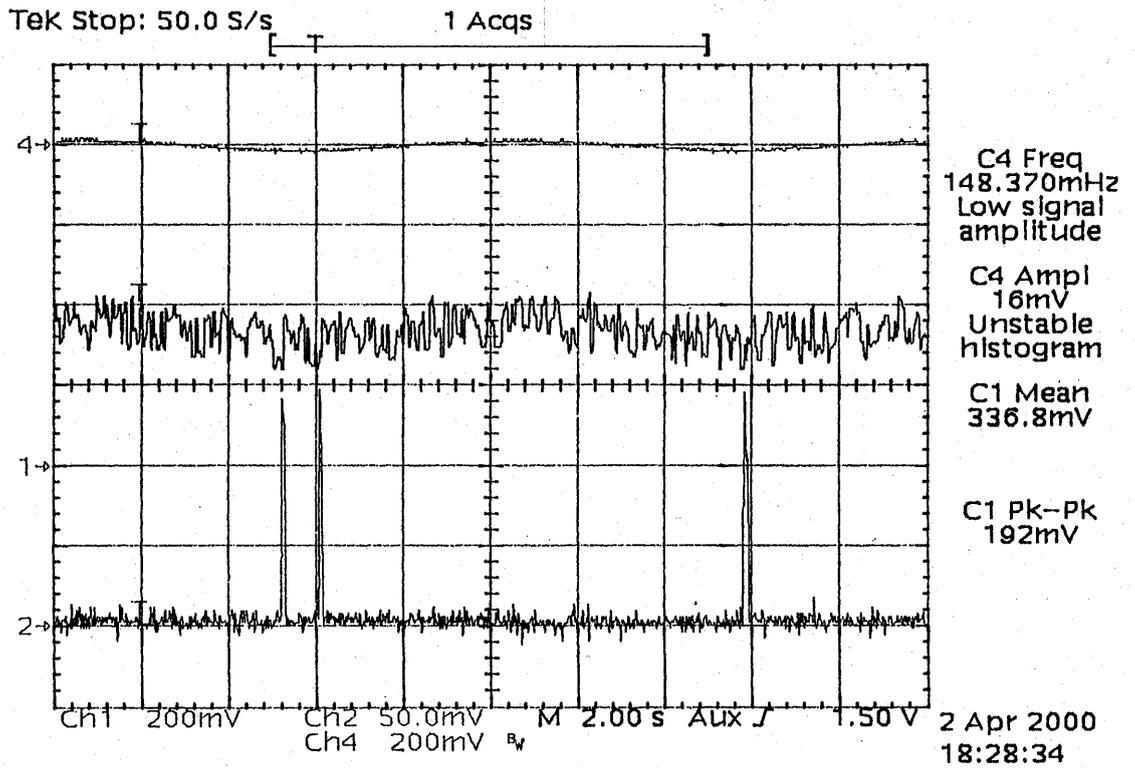
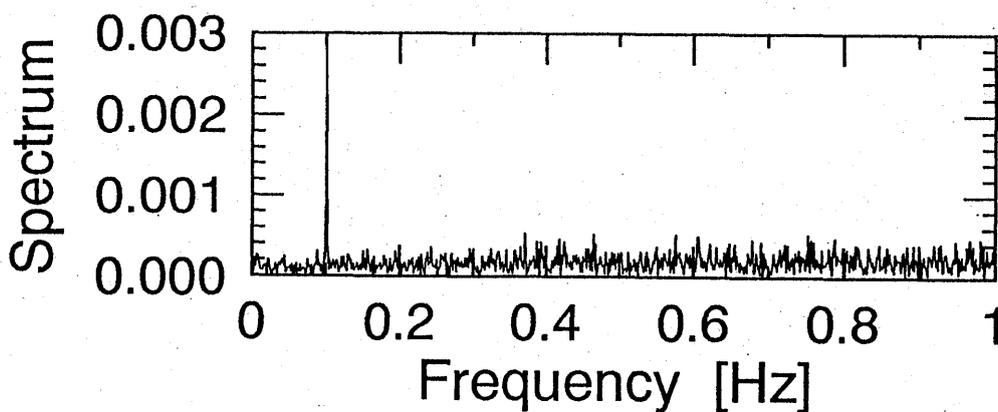
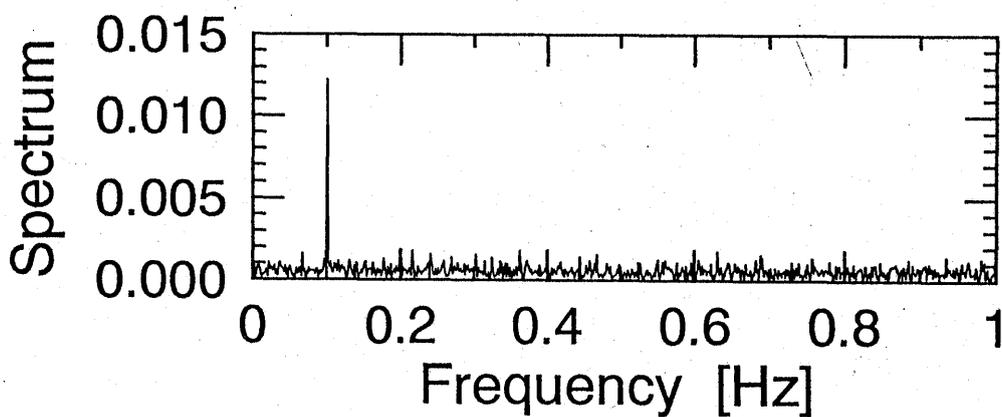
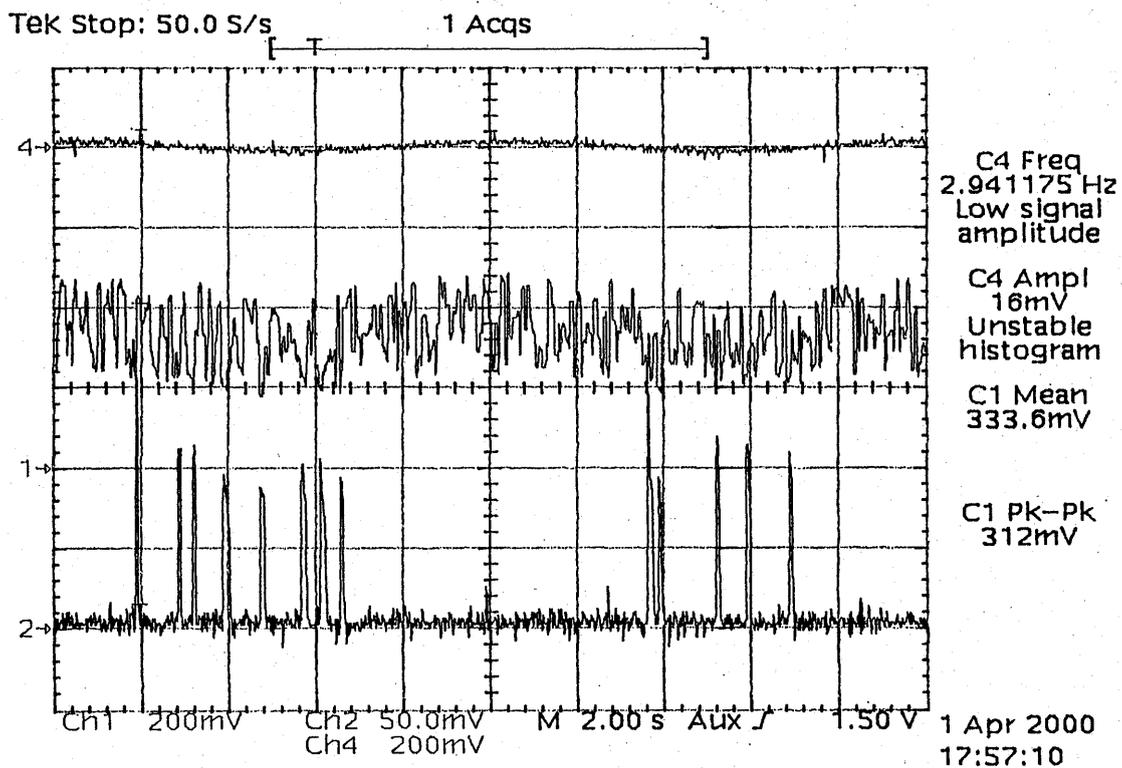


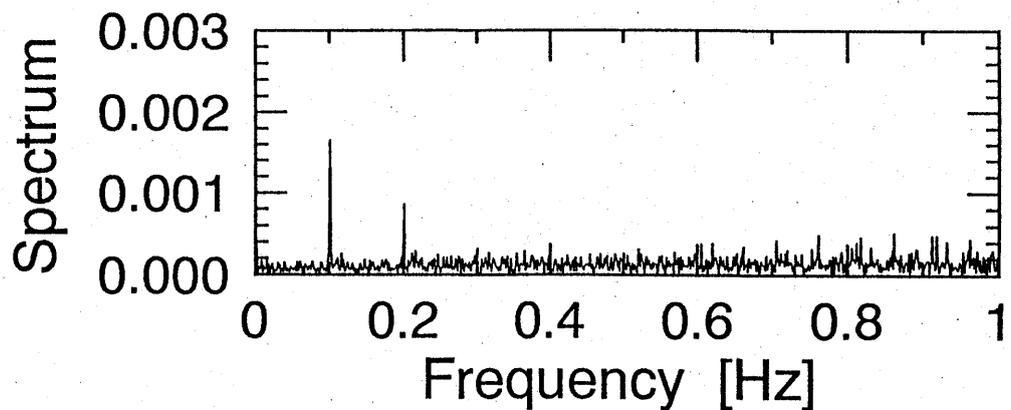
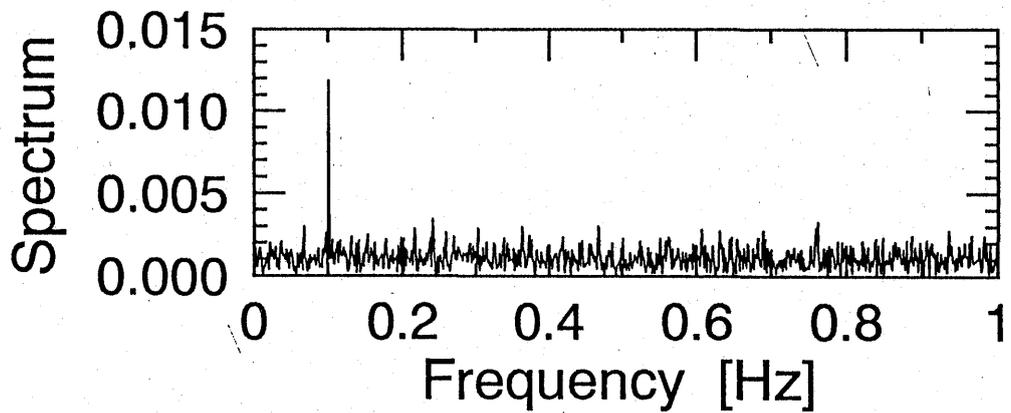
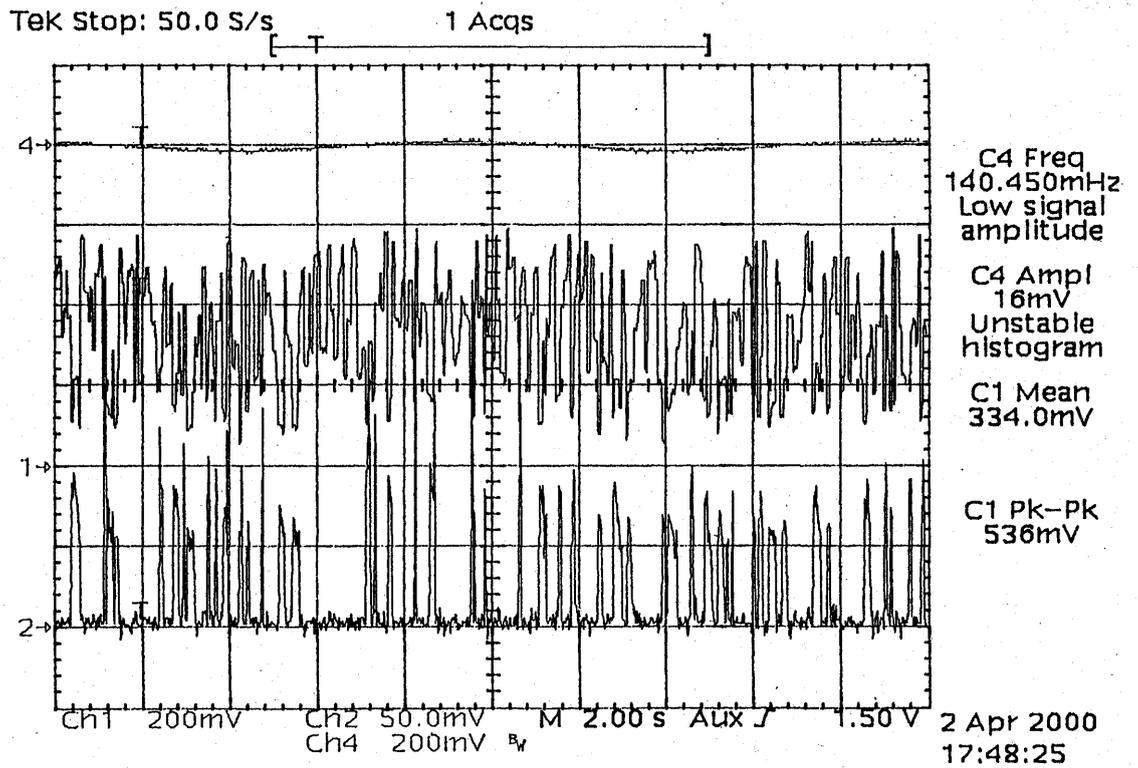
図 3.5.2(b)

応答波形とスペクトル：ノイズ強度70[mV]



☒ 3.5.2(c)

応答波形とスペクトル：ノイズ強度130[mV]



☒ 3.5.2(d)

応答波形とスペクトル：ノイズ強度250[mV]

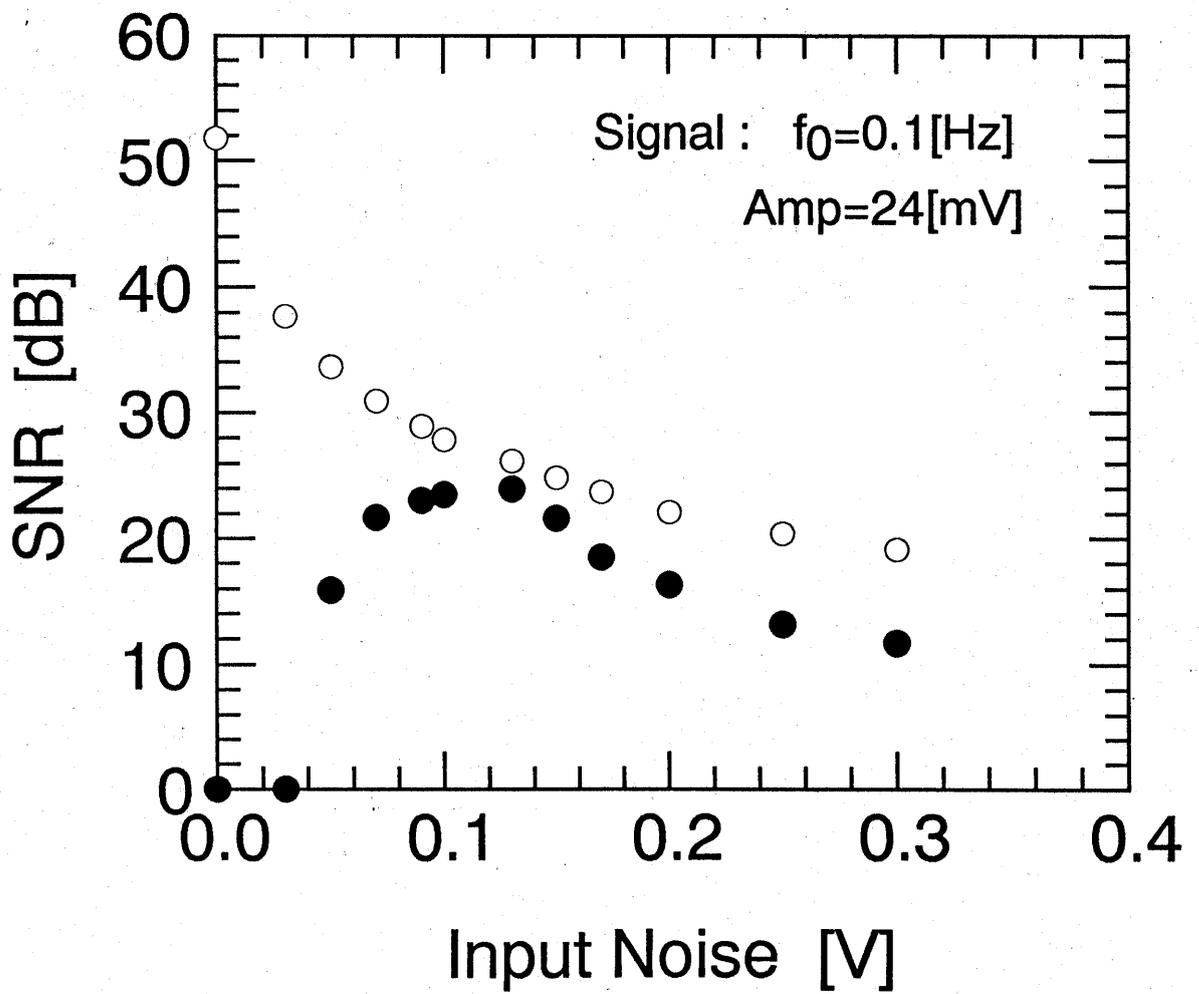


図 3.5.3 SNR

- 応答波形のSNR
- 入力波形のSNR

の領域では、信号の谷部でも応答し、信号のスペクトル成分は減少している。この図からわかるように、信号の谷部でまれに応答する方が応答パルスの振幅は大きい。そして山部で頻繁に応答するときはパルスは小さい。不応期の動的变化に伴って、鉄電極は本来の1個分に満たない不完全な応答を示す。このため、FFTにおいては信号に共鳴した成分の寄与が低くなり、電気回路に比べて信号の検出効率をはるかに劣る。

SNRを図3.5.3に示す。電気回路には劣るものの、信号の80周期分に及ぶ十分な測定時間によって、SNRの明瞭な変化と捉えることができた。確率共鳴特有のSN比の最大値と急な立ち上がりおよび緩やかな減少カーブを示している。

§ 3.6 パターン検出

電気回路で行った時間平均の方法を現実の反応系で試してみた。結果のみ示す。図3.6.1は、単安定回路のときと同様に、電圧軸はそれぞれ、10V/div、50mV/div、100mV/div、50mV/divである。時間軸は5sec/divで、サンプリングは10S/secで行った。下の図が41回アベレージングした波形である。応答波形は回路の場合より明確ではない。むしろ元波形のアベレージングの方が再現性がよい。これは、信号の山部で希に応答する時の方が、応答振幅が大きく、応答頻度を乱すためと考えられる。

そこで、応答振幅を一定にすることを試みた。これもデジタルオシロスコープで簡単に試すことができる。受ける電圧のレンジを十分小さくするのである。図3.6.2の下の図は応答波形を図3.6.1の10分の1の5mV/divにとった例である。各回の応答波形は測定レンジからはずれ測定器の最大値で加算平均される。これで一定振幅の応答を模擬することができる。(a)より(b)の方が明瞭な波形が得られた。しかし、電気回路の再現性にははるかに及ばない。

§ 3.7 引き込み

デュアルポテンショスタットを用いて2本の鉄電極の電位を独立に制御する。設定電位を変えることで周期の異なる振動状態をつくり、電極間隔によって結合強度を変化させて、相互作用の過程を調べた。ここでは、1:1に引込む過程と1:2の引き込みおよび1:2の状態から2:3の状態への遷移過程について観測例を掲げる。

(1) 1:1の引き込み

2本の鉄電極電位を230mV(電極1)と240mV(電極2)にして僅かに異なる周期の振動状態をつくった。ここでは最初から電極間隔を最短の7mmに設置し

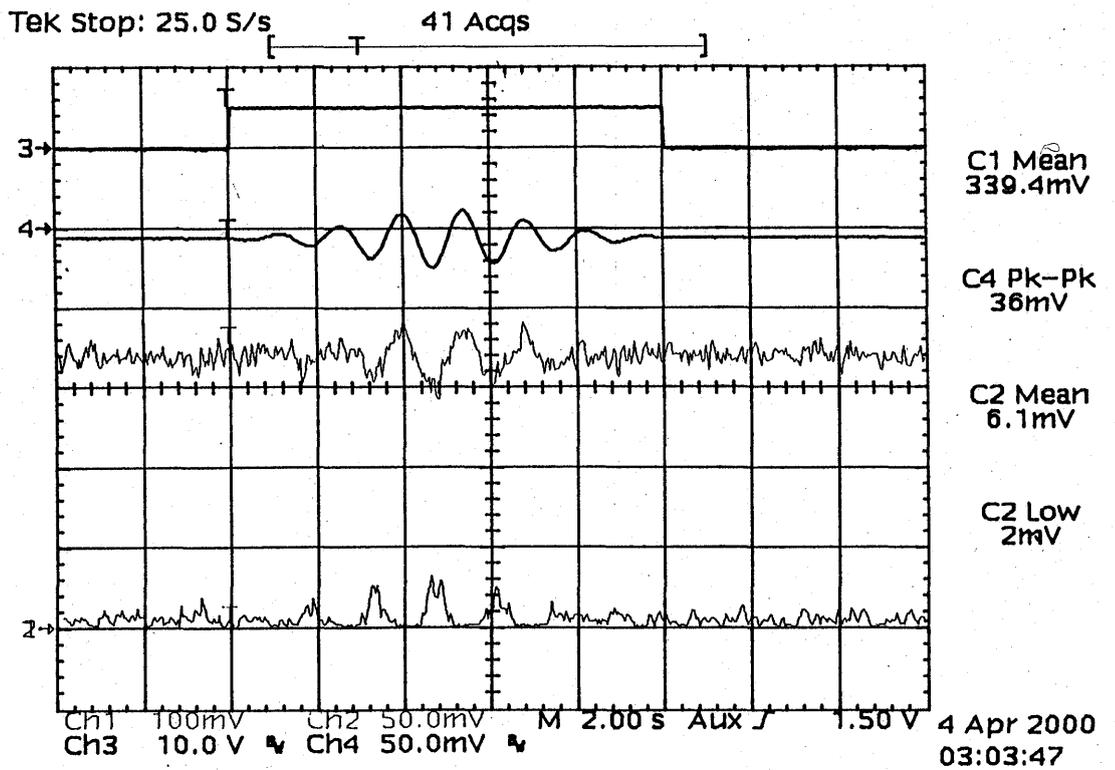
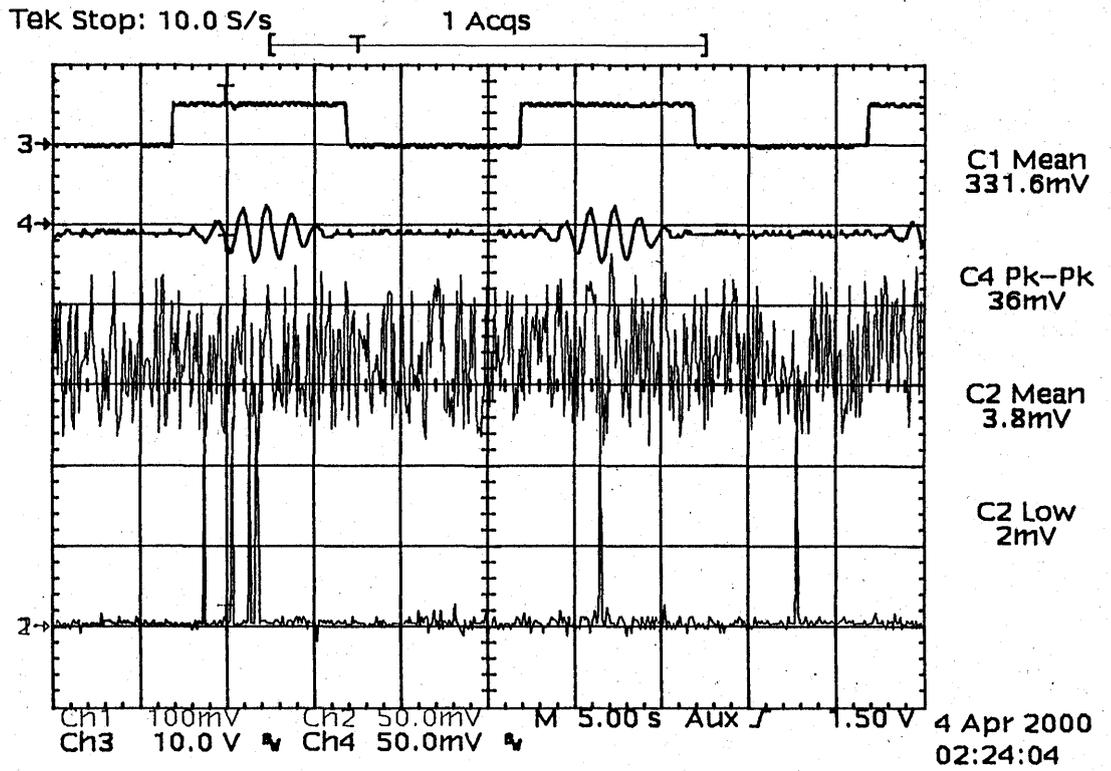
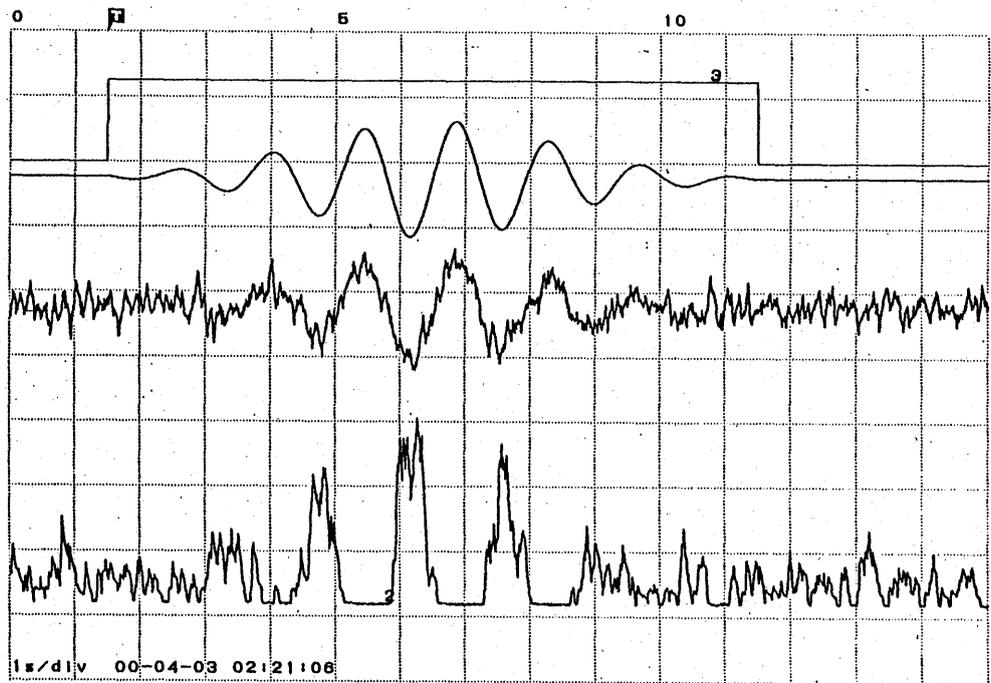
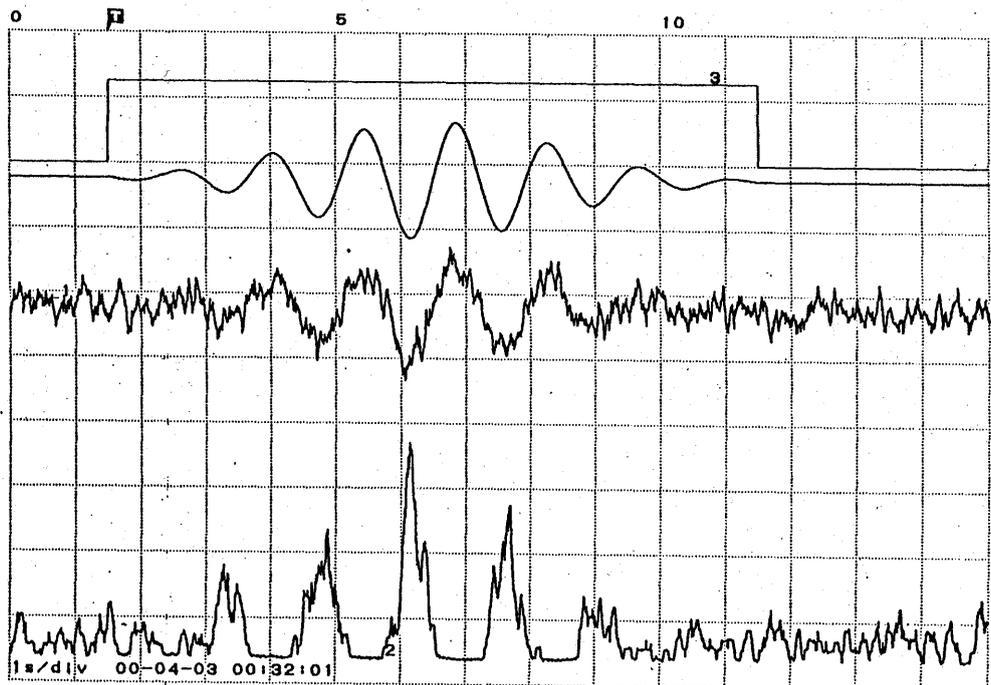


図 3.6.1 鉄電極による波形パターンの検出



(a) 切り詰めなしの場合



(b) 切り詰めありの場合

図 3.6.2 応波形切り詰めの効果

て反応を開始させた。反応開始直後から同期した。その様子を図3.7.1(a)に示す。同期は反応開始から約400secつづいた。途中200sec辺りで、同期が周期的にはずれる現象が観測された。その周期は10sec程度であった。これらの過程を図3.7.1(b)～(d)に示す。また、全過程における2本の鉄電極の周期変化を図3.7.2に示す。同期中は、周期の変動が非常に少ない。同期によってより安定な振動状態が実現していることがわかる。特徴的なのは、同期中の周期が周期の短い方に一致している点である。互いの周期が歩み寄るのではなく、短い周期が選択される。これは結合が興奮性であることに由来していると考えられる。つまり、動的な不応期は縮めることはできても、延ばすことはできないからである。400sec後、同期がはずれると、お互いの周期は単独のときより乱れる。同期はしていないが、互いに影響し合っていることがわかる。同期が周期的にはずれる場所で、周期と振幅の変化を詳しく調べた(図3.7.3)。その結果、周期だけでなく振幅も変化させて位相を同期していることがわかった。

(2) 1 : 2 の引き込み

電極電位を230mV(電極1)と270mV(電極2)に設定して、周期が約2倍異なる振動状態をつくった。ここでも最初から電極間隔を最短にして反応を始めた。反応開始100secから600secに渡って同期した。同期する過程を図3.7.4(a)に、同期がはずれる過程を図3.7.4(b)に示す。同様に、全過程における周期変化を図3.7.5に示す。図3.7.6は同期を確認するために、電極1の周期を2倍にしてプロットしたものである。電極2の周期とよく一致している。電極1の周期は電極2の影響を受けて2周期で振動していることがわかる。

(3) 引き込みパターンの遷移

この実験は空気バブリング以前の観測例であり、その後再現してはいないが、非常に特徴的な引き込みパターンの遷移過程を捉えており、その過程を図3.7.7に載せる。はじめ1 : 2に引込んだ状態から2 : 3に引き込み状態が遷移していく過程を280sec間に渡って示す。ここで、1 : 2から2 : 3への遷移過程を考える。図1.2.1のFarey濡では、この間に4 : 7、3 : 5、5 : 8等の引き込みパターンが現れることになるが、4 : 7や5 : 8より上段にある3 : 5の方が引き込みが強く、その状態が顕著に現れることを意味する。図3.7.7の結果はこの特徴をよく捉えている。

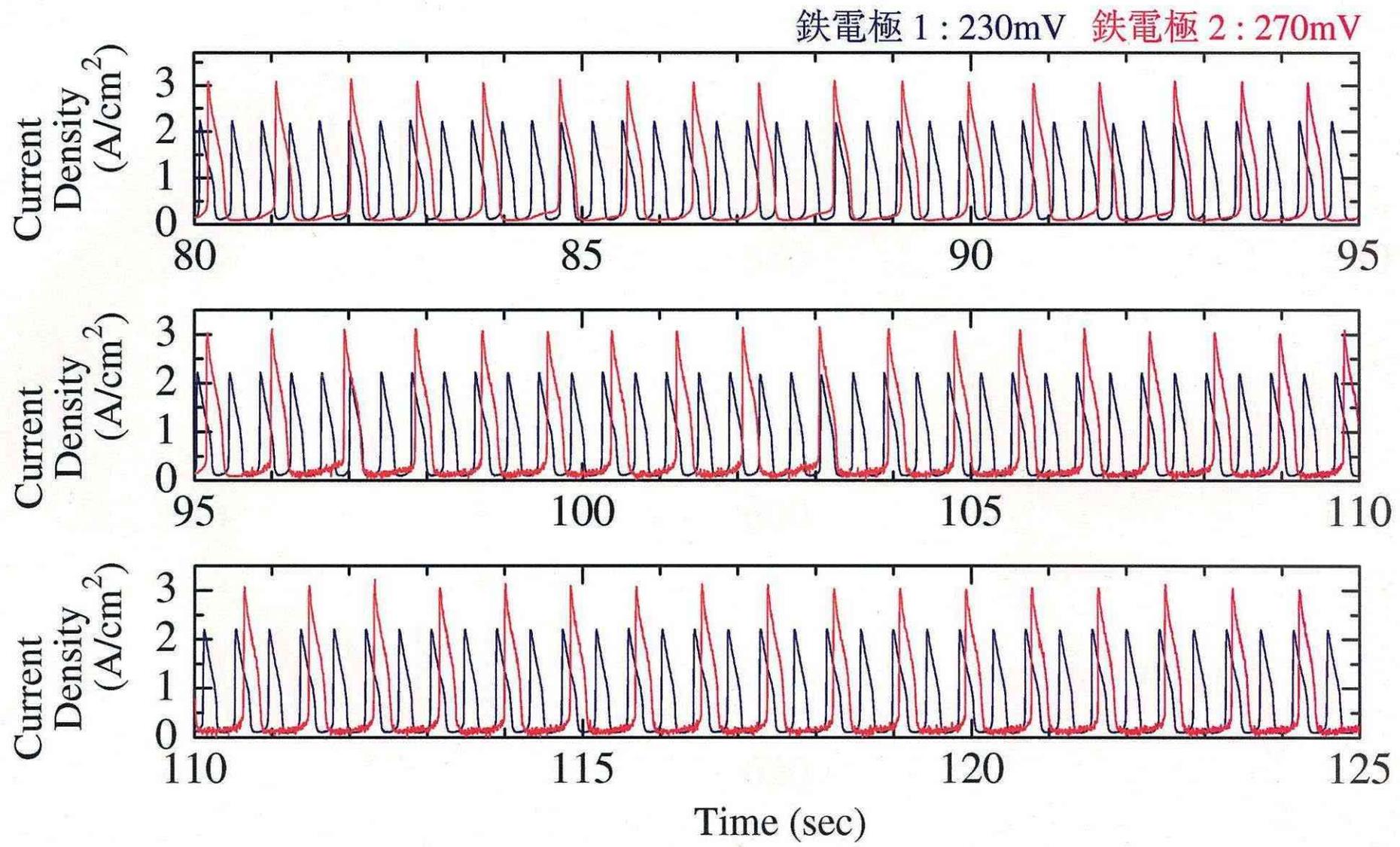


圖 3.7.4(a) 1 : 2 同期 (同期過程)

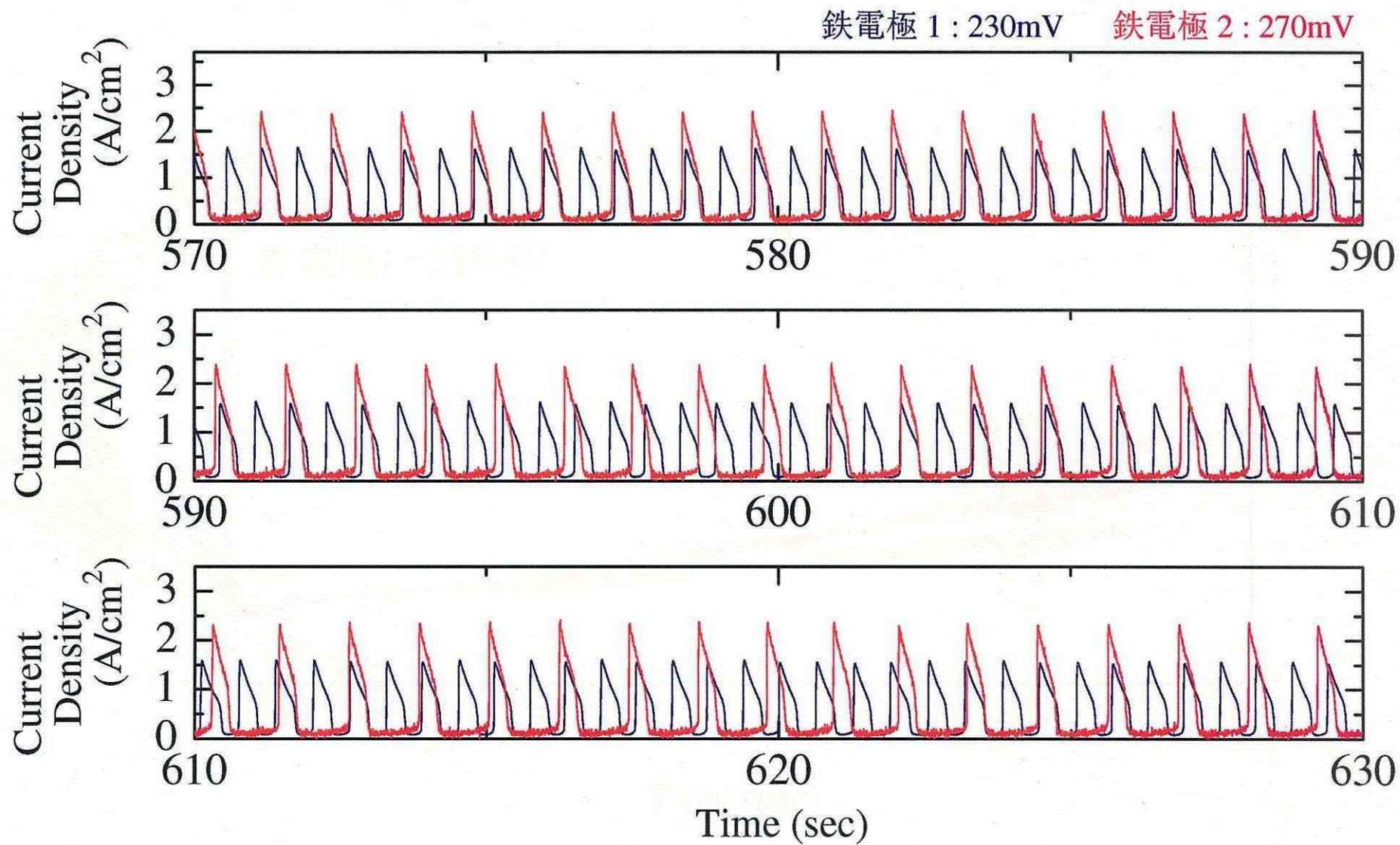


圖 3.7.4(b) 1 : 2 同期 (非同期過程)

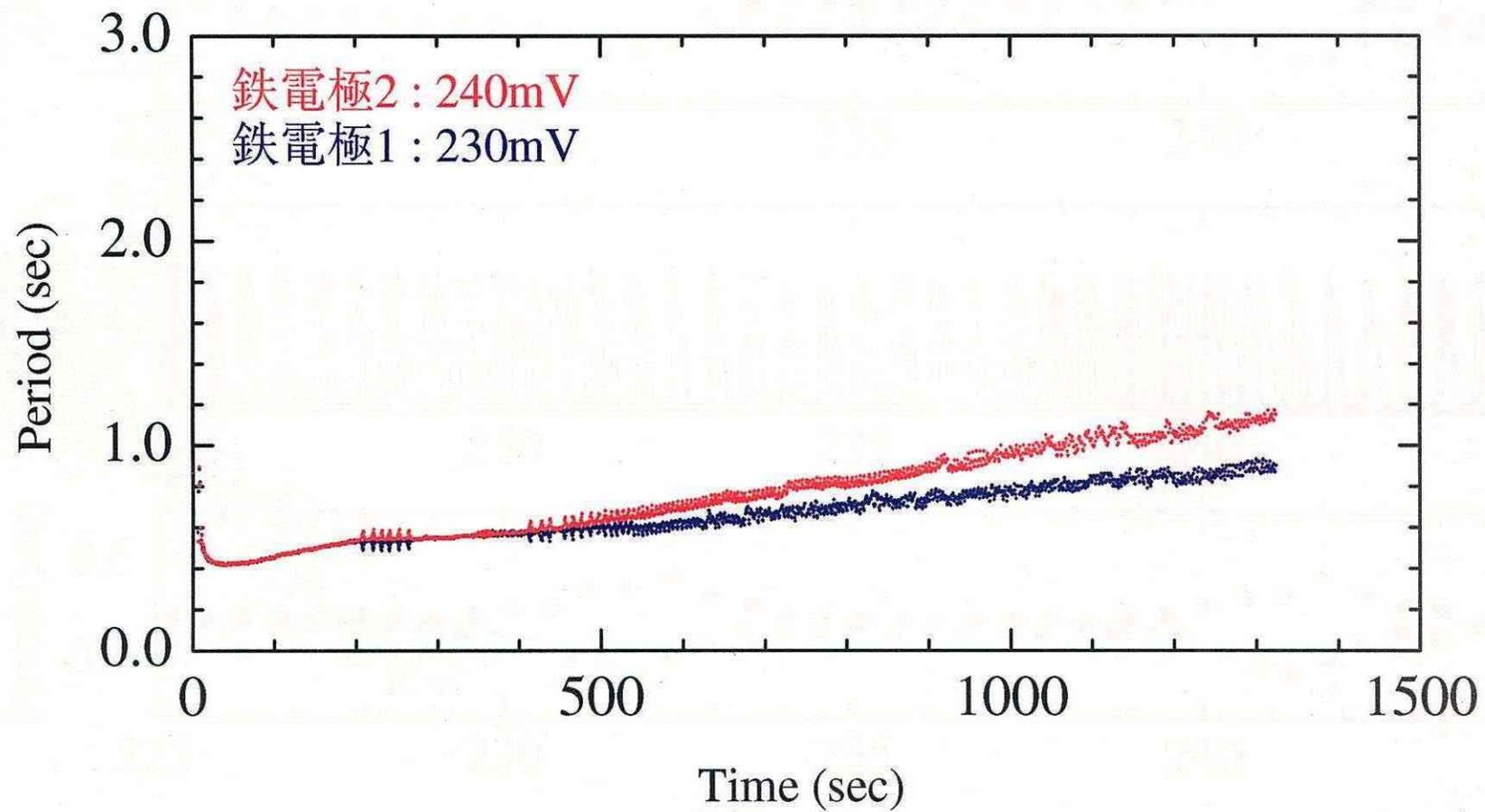


図 3.7.2 2 素子の周期変化

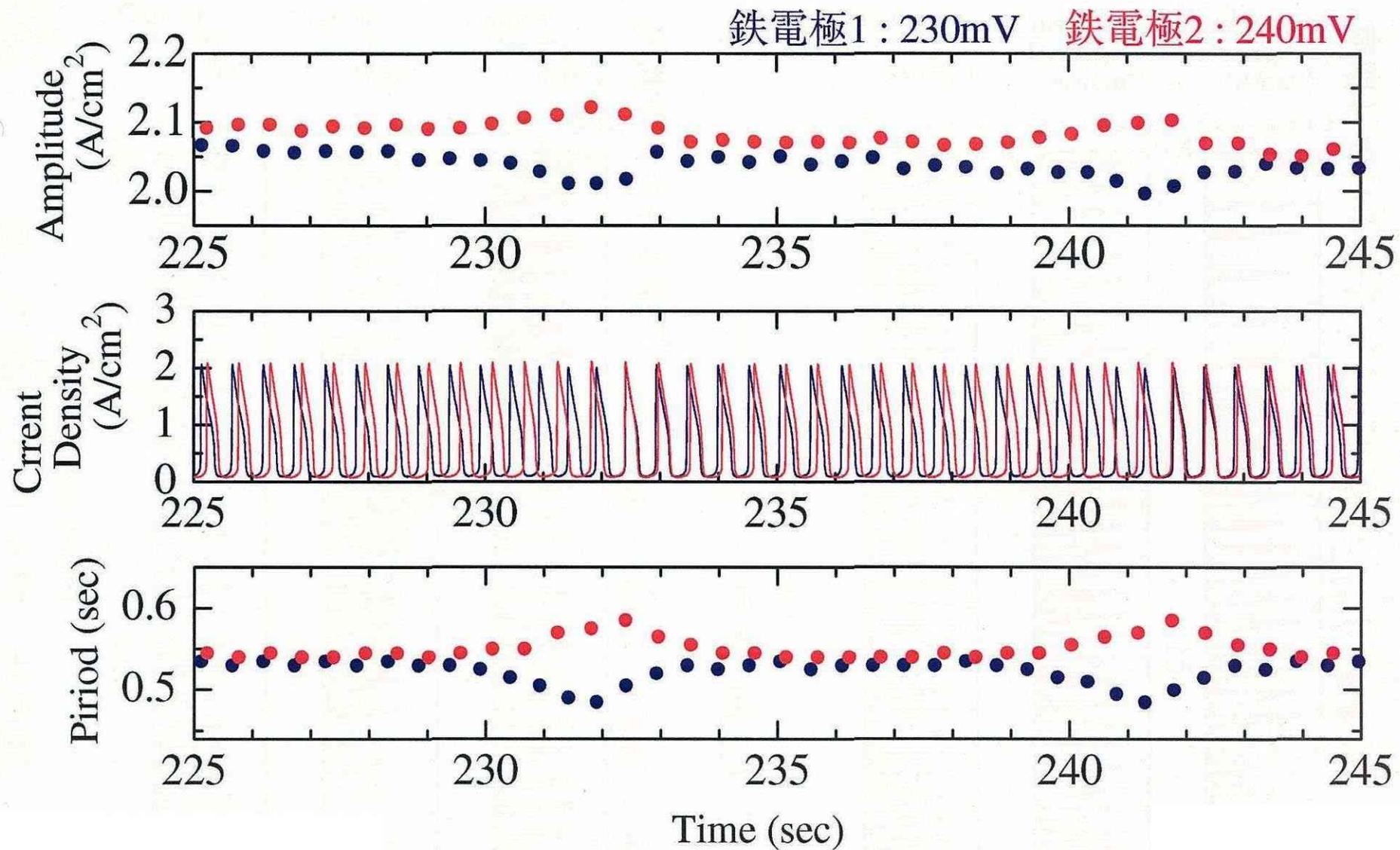


図 3.7.3 相互作用時の振幅と周期の変化

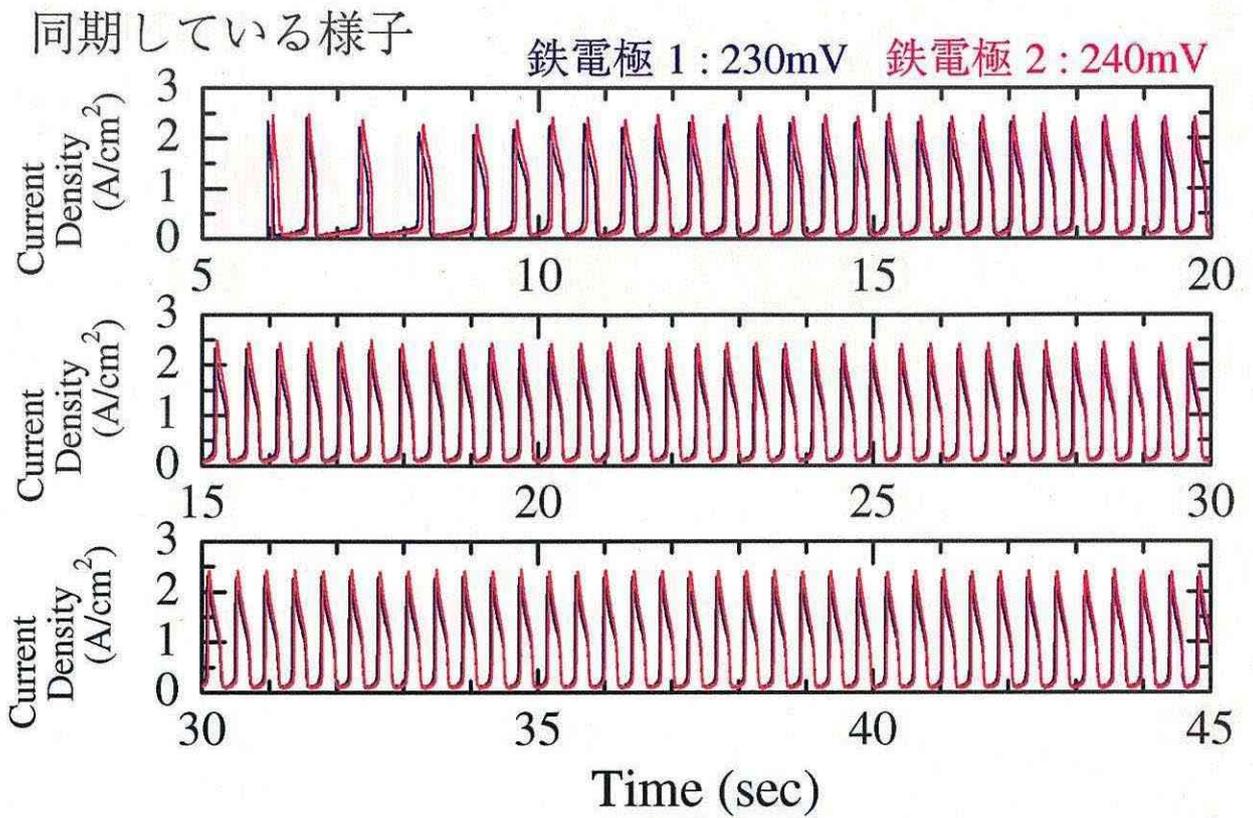


図 3.7.1(a) 1 : 1 同期 (同期)

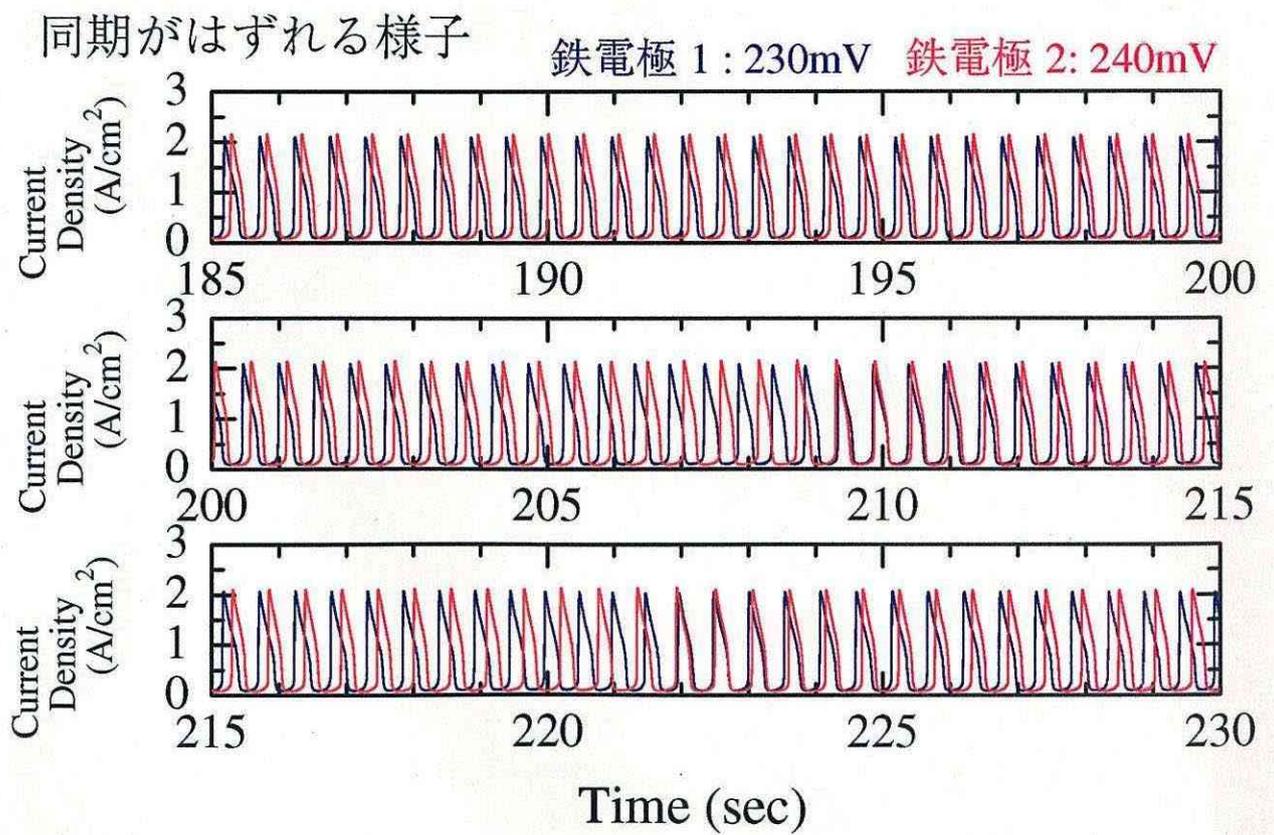


図 3.7.1(b) 1 : 1 同期 (非同期)

再び同期する様子

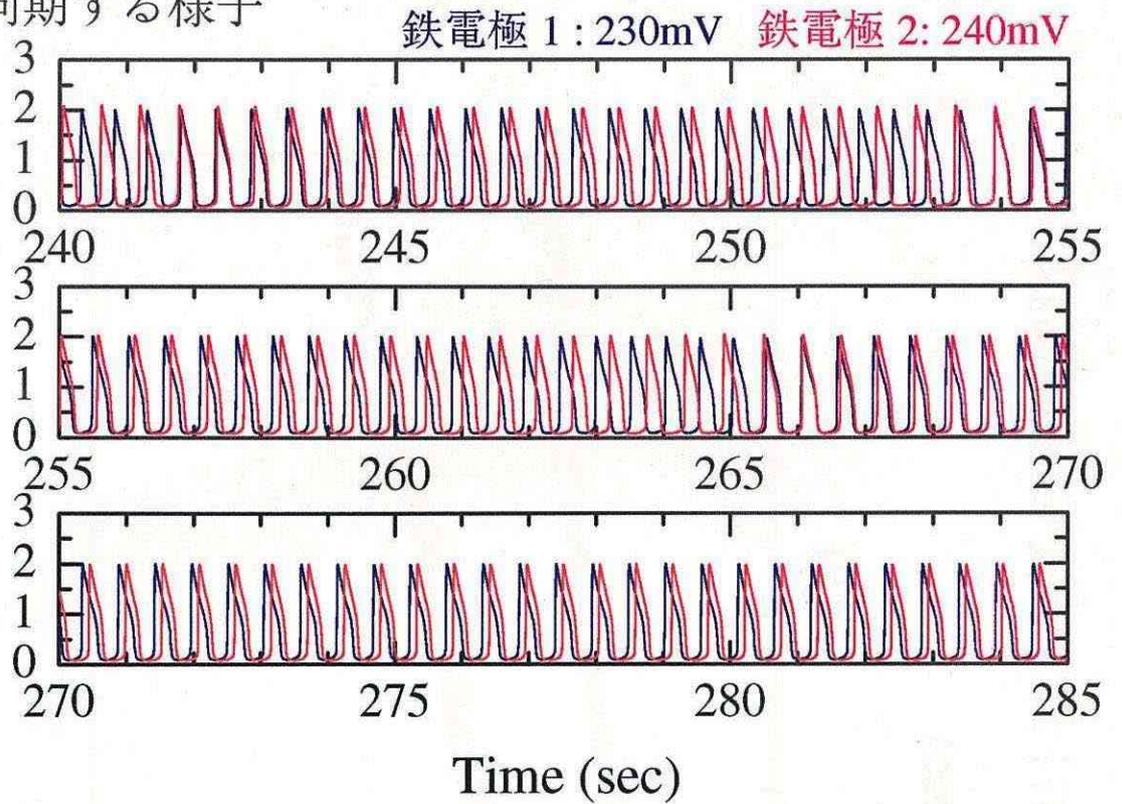


図 3.7.1(c) 1 : 1 同期 (再び同期)

再び同期がはずれる様子

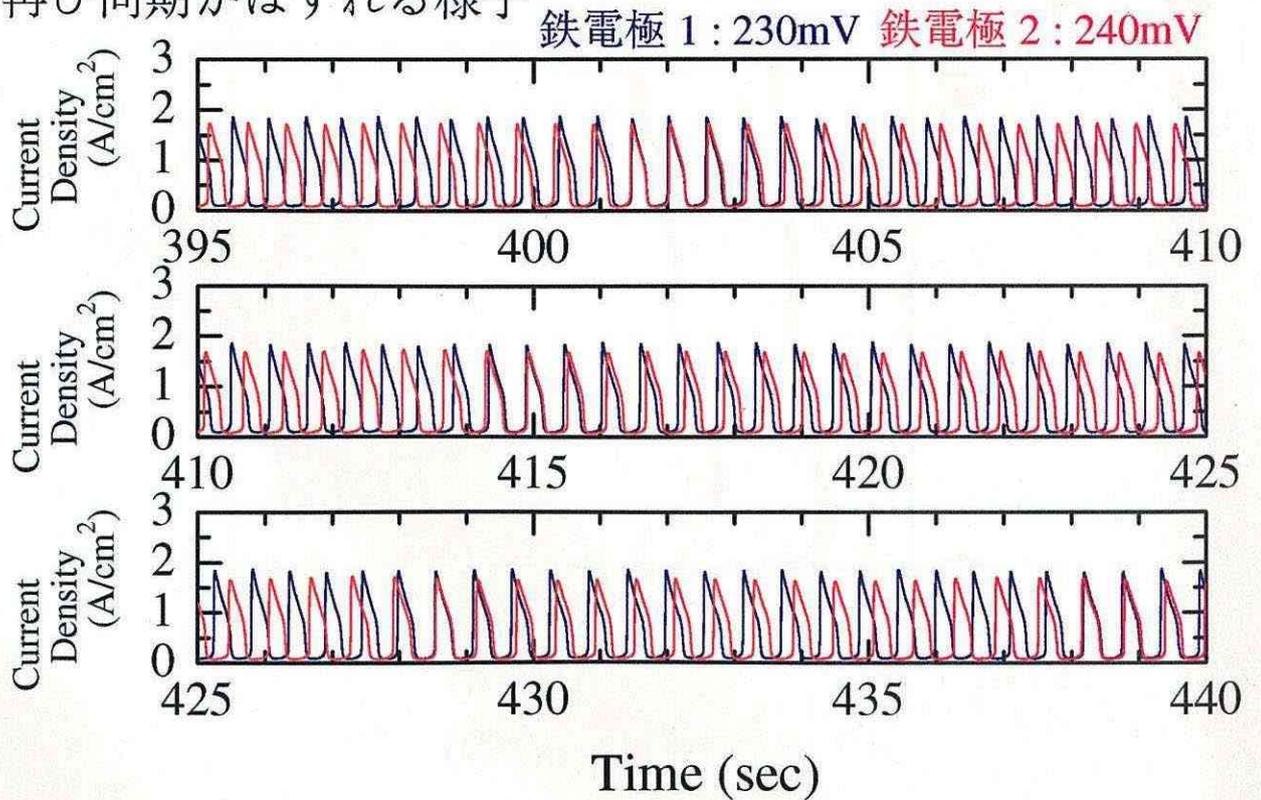


図 3.7.1(d) 1 : 1 同期 (再び非同期)

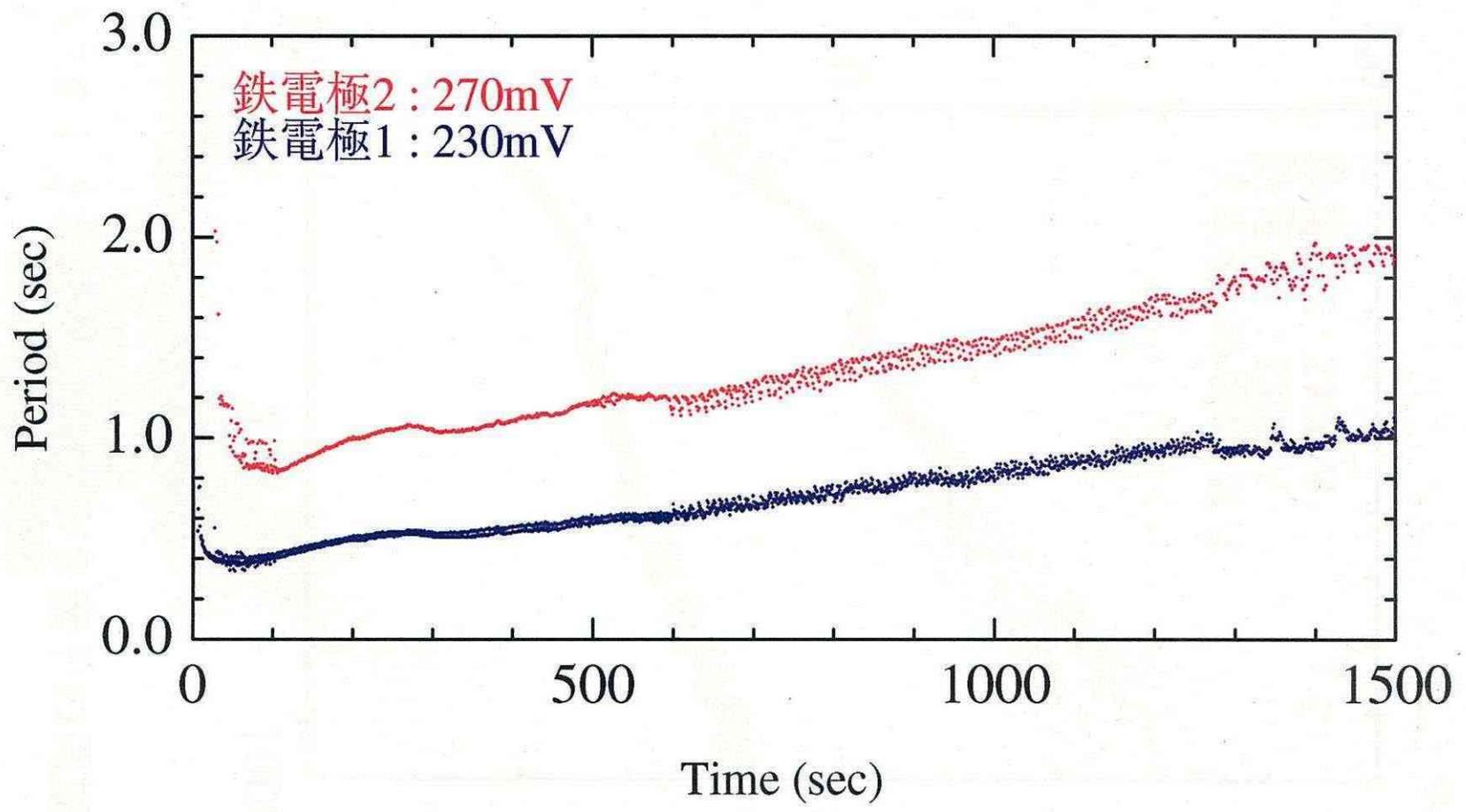


図 3.7.5 1 : 2 同期における 2 素子の周期変化

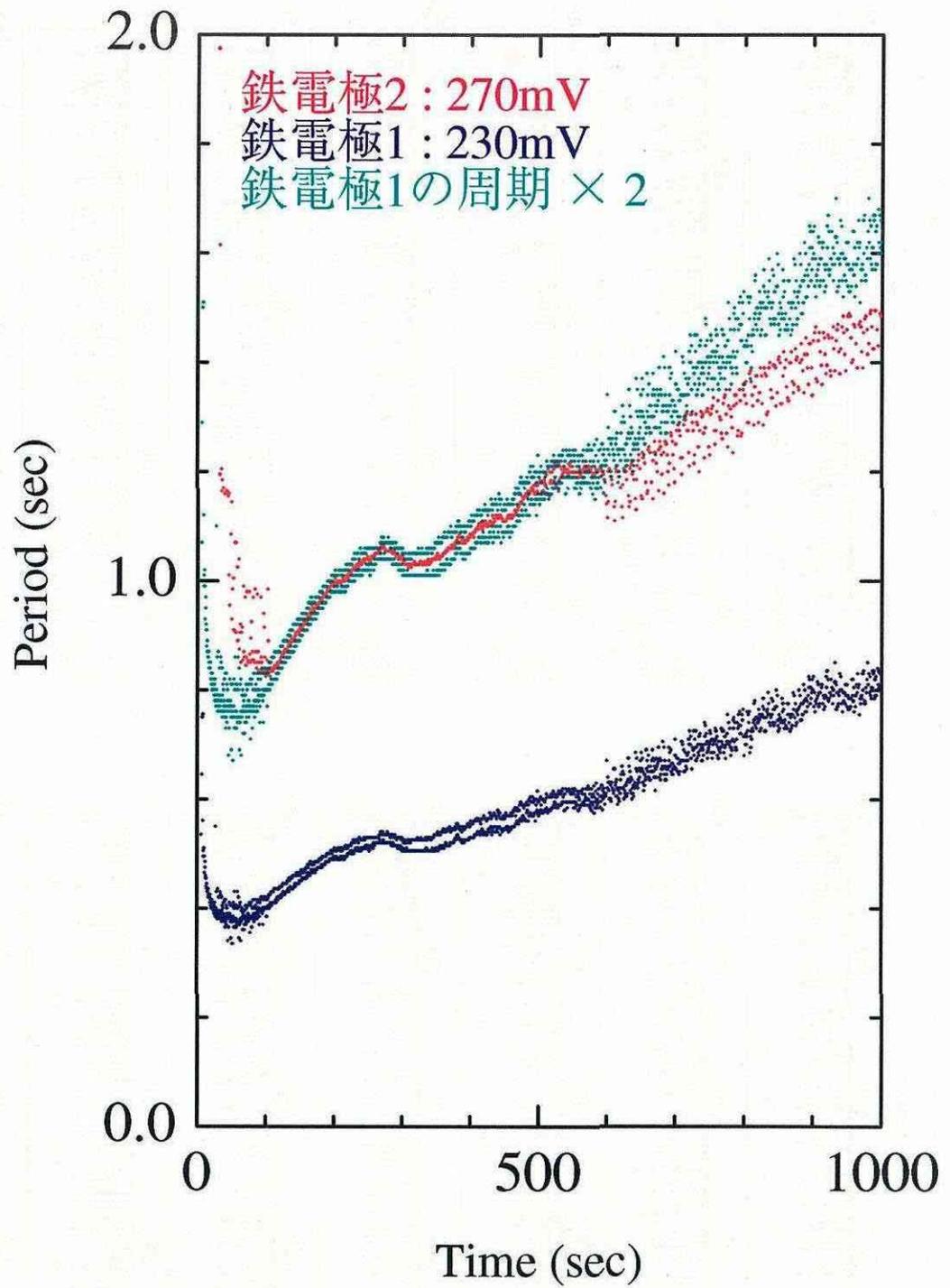


図 3.7.6 1 : 2 同期における 2 素子の周期変化
(拡大図)

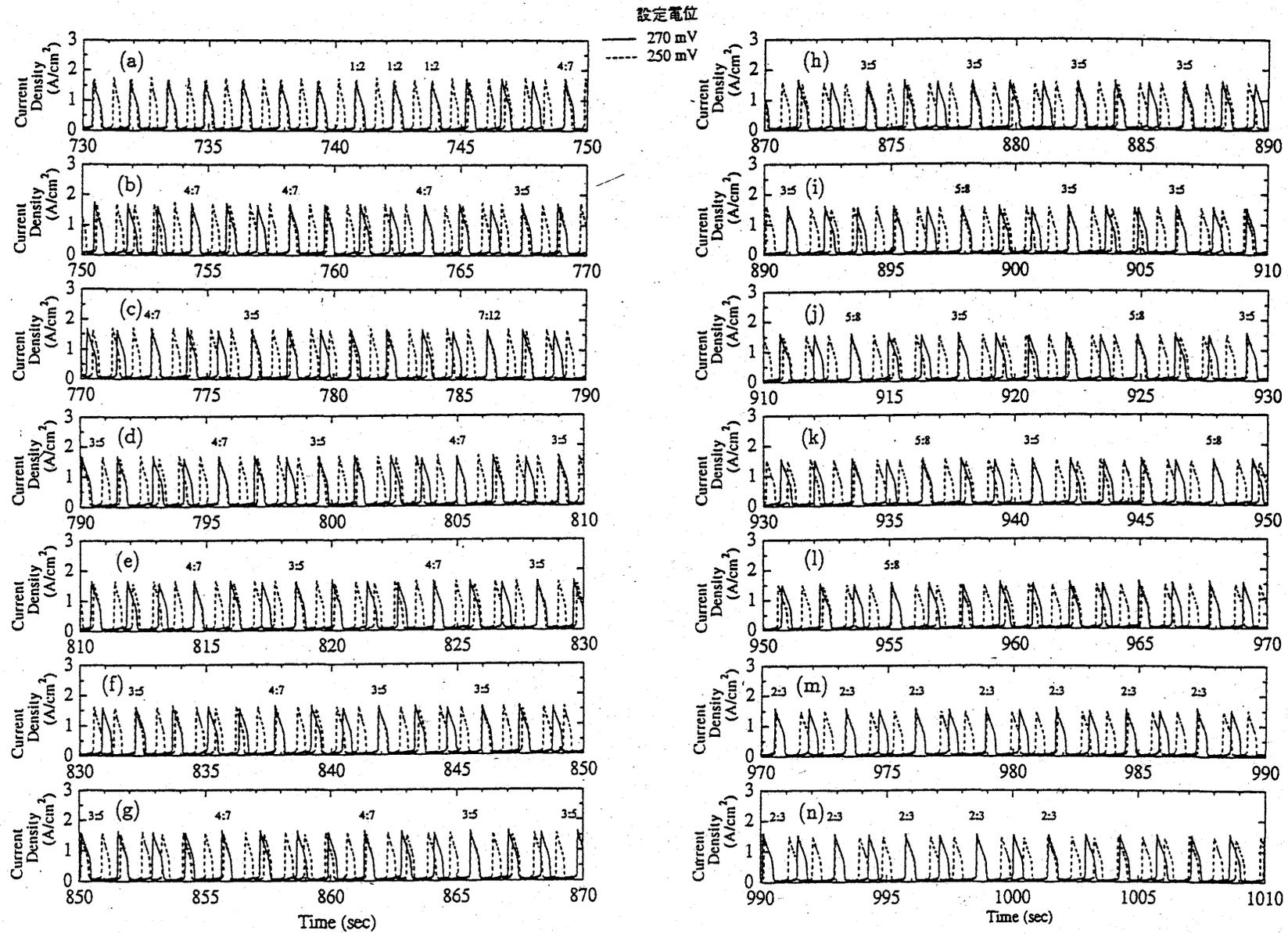


図 3.7.7 1 : 2 同期から 2 : 3 同期への遷移過程

4. 結 論

電極形状の工夫と空気バブリングで、安定な周期振動を長時間、しかも再現性よく得られるようになった。非線形散逸系の新たな実験系、特に神経系を模擬する化学反応系の確立に見通しが出てきた。この点こそが、本研究の最大の成果と言える。

この鉄-硝酸反応系を用いて、興奮系においては確率共鳴現象を十分に精度で検証できるようになった。また、自励振動系においては、引き込み現象を再現性よく捉えることが可能となった。

一方、本題であった、確率共鳴を利用した微弱信号検出については、電気回路においてその効果を間接的に確かめることができたが、化学反応のレベルでは不完全応答の問題があって十分な結果は得られなかった。今後の課題である。

以上、理想回路の数値シミュレーションより実際の単安定回路、さらにより現実的な化学反応のレベルで、神経の刺激応答を模擬し得る実験系を構築によって、生物の行っている情報処理に新たな知見が得られることが期待できる。また、電気回路と化学反応の実験で見てきたように、神経系の振る舞いも閾値をもち2値応答する非線形素子によるものであり、基本的にはbit信号を扱う論理回路と同等である。しかしコンピュータと異なるやり方で、生物はノイズを利用して情報処理を行っているであろうことが指摘されている。確率共鳴を利用した微弱信号検出は工学的応用において新たな可能性を開くものである。

参考文献

- 1) <http://www.umbrars.com/sr/>
- 2) F.モス and K.ビーゼンフェルト: 日経サイエンス **10**(1995)126.
- 3) R. Benzi, G. Parisi, A. Sutera and A. Vulpiani: *Tellus* **34**(1982) 10.
- 4) S. Fauve and F. Heslot: *Phys.Lett.* **97A**(1983)5.
- 5) B. McNamara, K. Wiesenfeld and R. Roy: *Phys.Rev.Lett.* **60**(1988) 2626.
- 6) F. Moss, A. Bulsara and M. Shlesinger: *J.Stat.Phys.* **70**(1993)1.
- 7) B. McNamara and K. Wiesenfeld: *Phys.Rev.A* **39**(1989)4854.
- 8) R. Lillie: *Science* **48**(1918)51.
- 9) T. Kanamaru, T. Horita and Y. Okabe: *Phys.Lett.A* (in press).
- 10) K. Bar-Eli and W. Geiseler: *Phys. Chem.* **87**(1983)3769.
- 11) A. Guderian G. Dechert, K.-P. Zeyer and F. Schneider: *J.Phys.Chem.* **100**(1996)4437.
- 12) O. Inomoto : *Book of abstracts of STATPHYS 20 P007/17* (1998).
- 13) T. Amemiya, T. Ohmori, M. Nakaiwa and T. Yamaguchi: *Ach-Models in Chem.* **135**(1998)231.
- 14) 鈴木良次: 東京医科歯科大学歯科材料研究所報告 **2**(1965)659.
- 15) 松本元、大津展之: 神経細胞が行う情報処理とそのメカニズム 培風館