

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 3 日現在

機関番号：17501

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24340093

研究課題名(和文) 光フィードバック下の液晶光バルブにおける確率共鳴と同期現象

研究課題名(英文) Stochastic resonance and synchronization in a liquid crystal light valve with an optical feedback

研究代表者

長屋 智之 (Nagay, Tomoyuki)

大分大学・工学部・教授

研究者番号：00228058

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,500,000円

研究成果の概要(和文)： 確率共鳴は内在した周期変化がノイズによって誘起される現象である。ある条件の下で二つの状態が安定になる系では確率共鳴が期待される。液晶光バルブに光フィードバックを課すと、ある条件下で液晶の向きが二つの状態で安定になり、確率共鳴が起こりえる。駆動電圧に周期信号とノイズを加えて確率共鳴の観測を行った。入射光の空間不均一性を避けるために、信号を観測する光電子増倍管の前にピンホールを置いた。そして、二つの状態を示す二値変数の時間発展を観測した。

液晶の傾き変化の時定数に関わる相関のあるノイズを課した。適切な条件の下で、確率共鳴の発現を確認した。この結果は、数値シミュレーションの結果と定性的に一致した。

研究成果の概要(英文)： Stochastic resonance (SR) is widely observed in nonlinear bistable systems with noise and a weak sinusoidal signal. A liquid crystal light valve (LCLV) with optical feedback, which shows an optical bistable property. Then, we have tried to observe the SR in this system.

Firstly, the optical circuit to observe the SR was constructed. The light coming from the reading side of the LCLV is fed back to the writing side by an optical fiber. The amplitude of driving voltage was modified by the weak sinusoidal signal with noise. The state of director in the LCLV, was measured by a photomultiplier. To avoid spatial inhomogeneity, a pinhole was used.

The internal time scale of a system affects the appearance of SR. To clarify the relationship between the relaxation time of the director and the appearance of SR, we added colored noises. Under suitable conditions, the SR was confirmed which agrees a numerical simulation.

研究分野：物性物理学

キーワード：確率共鳴 液晶 光フィードバック

### 1. 研究開始当初の背景

確率共鳴現象は、もともと地球に見られる氷河期と間氷期のくり返し周期(ミランコビッチサイクル)を説明するモデルとして提唱された。周期信号がノイズに共鳴するということから「確率共鳴」と呼ばれ、シュミットトリガー回路やレーザー発振などの物理系で存在が確かめられている。一般に同じ状態で安定な状態が2つあるような系(双安定系)では確率共鳴の発現が期待できる。液晶を用いた研究に関しては、1995年にP.G.Pharpeらは、強誘電性液晶セルにおける確率共鳴の発現を報告した。強誘電性液晶の傾き角が2つの角度で安定になり、電場を印加するとその方向が切り替わる。この系では液晶を挟むガラスに光導電体が付けられており、印加電場を光で制御できる。その後、彼らはネマチック液晶を使用した液晶光バルブ(Liquid Crystal Light Valve: LCLV)を光フィードバック下で動作させた場合に生じる双安定状態での確率共鳴の観測を試みた。LCLVの広い範囲に励起光を照射し、その励起光に場所に応じて異なるノイズを加え、2次元系での確率共鳴の観測を試みた。しかし、使用するレーザー光自信の持つ強度の方より(ガウスビーム特性)によって典型的な確率共鳴は観測できなかった。

### 2. 研究の目的

代表者らは、図1の様に光フィードバック下でLCLVを動作させると、多彩なパターンが観測できることから、パターンダイナミクスに関する研究を行っていた。パターンを生じる理由は、同じ電圧、レーザー光の元で液晶分子の傾き角が2つの角度で安定になるためである。この双安定性を持つ事から確率共鳴の出現が期待できると予測した。P.G.Pharpeらの研究では2次元的な広がりを持った系での確率共鳴を観測しようとしていたために典型的な確率共鳴の観測が出来なかったと予測した。代表者らは、観測する領域を非常に狭くすれば、光フィードバック下のLCLVでの確率共鳴の観測できると予測した。そこで、本研究の目的を光フィードバック下のLCLVでの確率共鳴の観測とし、観測される現象が他の系と何が共通で何が異なるかを明らかにしようとして研究を始めた。また、この系では、非線形振動現象が報告されていることから、確率共鳴の研究が順調に進んで時間に余裕があれば、非線形振動が外部信号に同期する現象の研究を行おうと考えた。

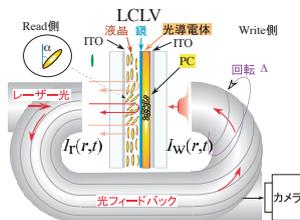


図1 光フィードバック下の液晶光バルブ

### 3. 研究の方法

### (1) LCLV の特性評価

LCLVは、誘電異方性がネマチック液晶を等明電極(ITO)付きガラスで挟み、片方(write側)のガラスのITOの上に光導電体と誘電多層膜ミラーが形成されている。もう片方のガラス板(read側)から光が入り、誘電多層膜ミラーで反射してread側の外に出る。液晶は細長い分子で長軸方向の屈折率 $n_e$ と短軸方向の屈折率 $n_o$ が異なる複屈折性 $\Delta n = n_e - n_o$ を持っているので、液晶の方向に対して45度の偏光をread側に入れると、異常光線と常光線の間に位相差 $\phi$ が生じる。 $\phi$ は光の波長 $\lambda$ 、液晶層の厚さ $d$ 、 $\Delta n$ によってきまる。入射光と垂直方向に偏光板を入れると、光強度 $I$ は

$$\phi = 2\pi \frac{\Delta n d}{\lambda}$$

$$I = \frac{I_0}{2}(1 - \cos \phi)$$

と表せる。但し、異常光の屈折率は液晶の傾き角 $\theta$ に依存して $n_e$ から $n_o$ まで変化する。LCLVの特性を調べるために、電圧 $V_0$ と書き込み光強度 $I^w$ を変えて $I$ を測定し(図2)、その結果から位相差の $V_0$ と $I^w$ の依存性を求めた(図3)。

電圧 $V_0$ が一定の元では、位相差 $\phi$ の書き込み光強度依存性 $F(I^w)$ は

$$F(I^w) = \frac{saI^w + b}{aI^w + 1}$$

という経験式で良くあらわせる。各電圧で $a, b, s$ の値を求め後に行うシミュレーションで使用した。

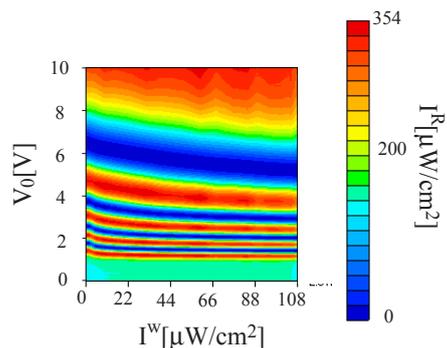


図2 LCLVの応答特性(観測結果)

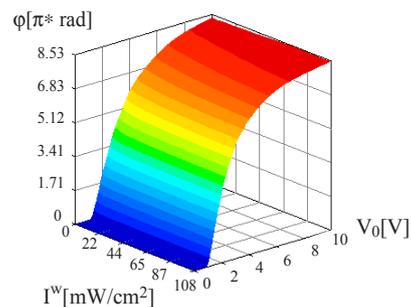


図3 LCLVの応答特性(解析結果)

(2) 信号を課す回路とソフトの作成

弱い正弦信号とノイズで LCLV の 1kHz の駆動電圧で振幅変調するために、オペアンプの加算機と乗算器を使った回路を作成した。また、ノイズは時間相関の無いホワイトガウスノイズと、相関がある Ornstein-Uhlenbeck (OU) ノイズをパソコンで計算し、これを任意波形発生装置に送って電気信号として出力した。これらのソフトの制作を行った。

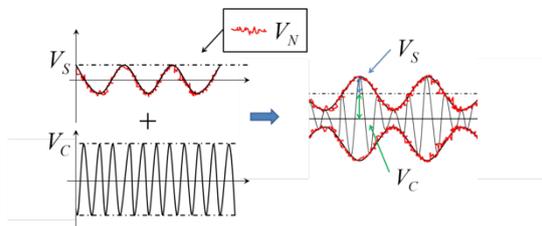


図4 LCLV を駆動する電圧波形

(3) 双安定領域の特定

LCLV に光フィードバックを課して図5に示す双安定状態が出現する実験系を構築した。確率共鳴の観測を行うためには、双安定領域の条件を特定する必要がある。この実験系では、書き込み光強度の一部をビームサンプラーで取りだし、500 ミクロンのスリットを抜けた光を光電子増倍管で検知する。この測定を自動的に行うプログラムを作成し、双安定領域を特定した。その後、適切な周期信号の強度を決めて確率共鳴の実験を行った。

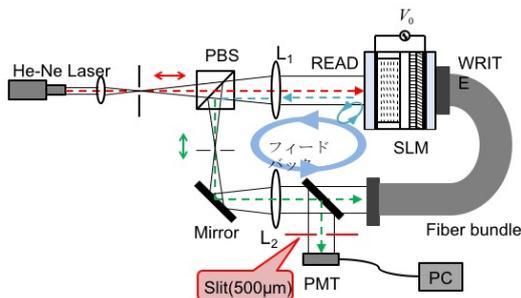


図5 光フィードバック光学系

4. 研究成果

(1) 双安定領域

図6に 275 $\mu$ W の書き込み光の場合に印加電圧を 1V から 6V まで上下させたときのグラフを示す。赤が電圧増加、青が減少に対応する。4つの双安定領域が観測された。この中で、 $V_0=3V$  付近の下から3番目の双安定領域が最も幅が広いので、この領域で確率共鳴の実験を試みた(図7)。この双安定状態は、液晶の傾き角が $\theta=46.8^\circ$  と  $53.2^\circ$  に対応することが別の解析でわかった。

(2) 確率共鳴の観測

3番目の双安定領域において、光電子増倍管で観測した信号を図8に示す。(a)はノイズが無いときの波形で有り、片方の安定状態で周期信号によってわずかに傾きが変わっている。(b)のノイズレベルになると、殆ど片方の安定状態にいるが、時々もう片方の安定状態

に移る。約 8s,12s の下向きの変化がこれに対応する。(c)のノイズレベルでは、周期信号に合わせて双安定状態を遷移している。これが確率共鳴の状態である。(d)のノイズレベルになると、ノイズが大きすぎて正弦信号とは無関係に遷移している。なお、OU ノイズの場合のみ確率共鳴が起きた。

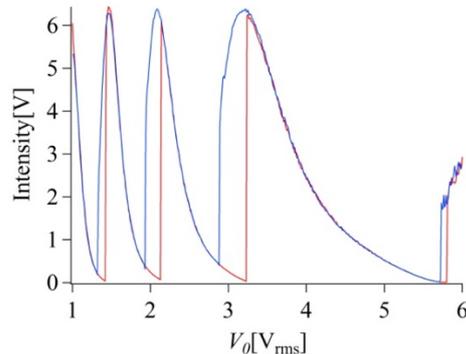


図6  $I$  の電圧変化 (双安定領域の特定)

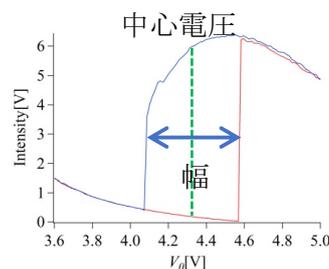


図7 3番目の双安定領域

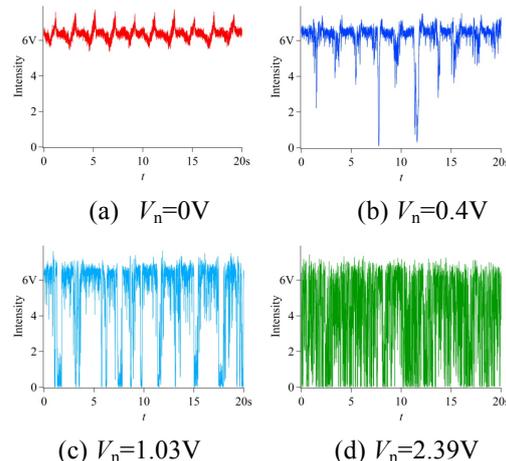


図8 観測した信号

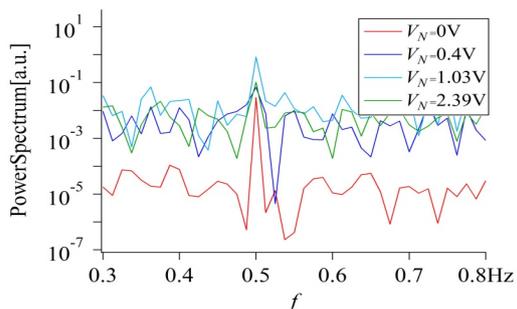


図9 信号のパワースペクトル

確率共鳴の共鳴局線を描くために、パワースペクトル (図 9) を計算し、SN 比を次式で求めた (図 10)。

$$SNR = 10 \log \frac{S_S}{S_N}$$

図 11 に共鳴曲線を示す。横軸は、双安定の電圧で規格化してある。ノイズの緩和時間が長いほど、共鳴の電圧が小さくなる特徴がある。図 11 が本研究で目指した液晶光バルブにおける確率共鳴の観測結果である。

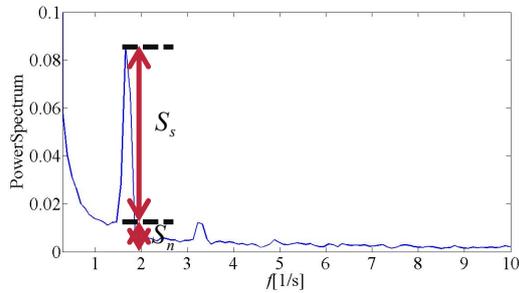


図 10 SN 比の計算方法

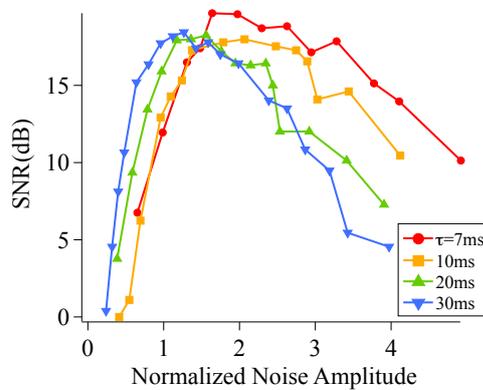


図 11 共鳴曲線

### (3) 線形安定性解析

LCLV の特性を得たので、線形安定性解析を行って双安定領域での液晶の傾き角を特定した。図 12 に安定な位相をもとめる様子を示す。また、位相のポテンシャルを数値的に求めた結果を図 13 に示す。なお、この位相は液晶の傾き角に 1:1 対応する。

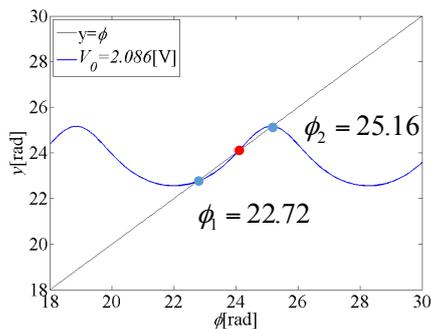


図 12 線形安定性解析による双安定位相

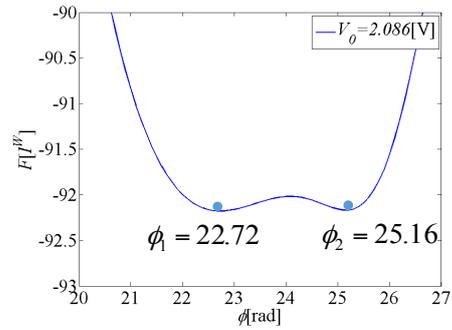


図 13 位相のポテンシャル

### (4) 確率共鳴の数値シミュレーション

最後に現象論モデルに基づく数値シミュレーションの結果を示す。運動方程式として

$$\tau \frac{d\phi(t)}{dt} = -\phi(t) + p - p \frac{sal^W + b}{al^W + 1}$$

ここで、 $p$  は最大の位相差である。シミュレーションでも確率共鳴が確認できた。OU ノイズを課した場合の共鳴曲線を図 14 に示す。定性的に実験結果を再現することができた。

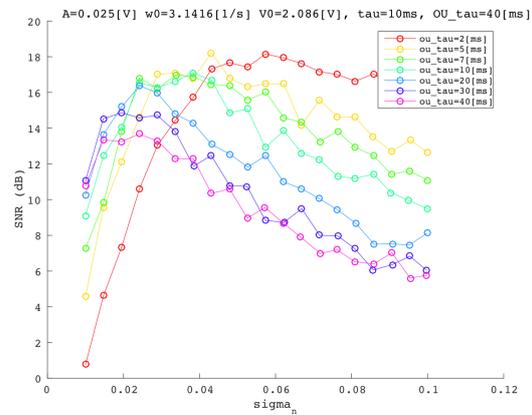


図 14 シミュレーションによる共鳴曲線

### (5) まとめ

目的としていた液晶光バルブで確率共鳴の観測に成功した。この系では、ホワイトノイズの場合には確率共鳴が起こらないことが特徴である。また、ノイズの緩和時間の依存性もこの系の特徴である。実験結果は現象論モデルによるシミュレーションで再現することができた。

### 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 3 件)

① Tomoyuki Nagaya, Yuki. Satou, Yoshitomo Goto, Yoshiki Hidaka, and Hiroshi Orihara, Viscosity of Liquid Crystal Mixtures in the Presence of Electro-Convection, J. Phys. Soc. Jpn.,

85 (2016) to be published. 査読有り

② Takayuki Narumi, Junichi Yoshitani, Masaru Suzuki, Yoshiki Hidaka, Fahrudin Nugroho, Tomoyuki Nagaya, and Shoichi Kail, Memory function of turbulent fluctuations in soft-mode turbulence, Physical Review E, 87(2013) 012505-1-012505-10. 査読有り

③ Tomoyuki Nagaya, Mikiyasu Niu, Shigetoshi Nara, Yang Ho Na, and Hiroshi Orihara, Apparent viscosity of p-methoxybenzylidene-p'-n-butylaniline in the presence of electrohydrodynamic convection, Physical Review E, 87(2013) 012501-1-012501-10. 査読有り

[学会発表] (計 19 件)

① Yoshitomo Goto, Shugo Nukita, Stefania Residori, Hiroshi Orihara and Tomoyuki Nagaya, Observation of Stochastic Resonance in a Liquid Crystal Light Valve with Optical Feedback, 平成 28 年 10 月 26-28 日, NICE OPTICS 2016, The Negresco hotel, (フランス, ニース), 発表決定

② Yoshitomo Goto, Shugo Nukita, Stefania Residori, Tomoyuki Nagaya, Stochastic Resonance in a Liquid Crystal Light Valve with Optical Feedback, 26th International Liquid Crystal Conference, 平成 28 年 8 月 1-5 日 Kent State University, USA, 発表決定 (米国オハイオ州ケント)

③ 後藤善友, 貫田周吾, 折原宏, 長屋智之, 光フィードバック下の液晶光バルブにおける確率共鳴現象の観測, 西日本非線形研究会 2016 平成 28 年 6 月 25 日発表決定九州大学伊都キャンパス (福岡県福岡市)

④ Yoshitomo Goto, Shugo Nukita, Stefania Residori, Tomoyuki Nagaya, Hiroshi Orihara, Stochastic Resonance in a Liquid Crystal Light Valve with Optical Feedback, 新学術領域 ゆらぎと構造の協奏 第 3 回領域研究会 平成 28 年 6 月 17 日発表決定九州大学伊都キャンパス (福岡県福岡市)

⑤ 貫田周吾, 後藤善友, 折原宏, 長屋智之, 光フィードバック下の液晶光バルブにおける確率共鳴 2, 物理学会第 71 回年次大会, 平成 28 年 3 月 22 日, 東北学院大学 (宮城県仙台市)

⑥ 貫田周吾, 後藤善友, 長屋智之, 光フィードバック下の液晶空間光変調器における確率共鳴 2, 第 121 回日本物理学会九州支部例会, 平成 27 年 12 月 5 日, 九州工業大学 戸畑キャンパス (福岡県北九州市)

⑦ Shugo Nukita, Yoshitomo Goto, Tomoyuki Nagaya, Hiroshi Orihara, Stochastic Resonance in a Liquid Crystal Light Valve with Optical Feedback, International Symposium on

Fluctuation and Structure out of Equilibrium 2015, 平成 27 年 8 月 21 日, 京都大学紫蘭会館 (京都府京都市)

⑧ 長屋智之, 貫田周吾, 後藤善友, 折原宏, 光アドレス型液晶空間光変調器における確率共鳴, 新学術領域「ゆらぎと構造」第 2 回公開シンポジウム, 平成 27 年 5 月 1 日, 東京大学小柴ホール (東京都文京区)

⑨ 貫田周吾, 後藤善友, 折原宏, 長屋智之, 光フィードバック下の液晶光バルブにおける確率共鳴, 日本物理学会第 70 回年次大会, 平成 27 年 3 月 23 日, 早稲田大学 (東京都新宿区)

⑩ Yoshitomo Goto, Shugo Nukita and Tomoyuki Nagaya, Numerical Study of Stochastic Resonance in a Liquid Crystal Light Valve with Optical Feedback, The 2nd Asian Conference on Liquid Crystals, 平成 27 年 1 月 19 日, 海雲台グランドホテル (韓国釜山特別市)

⑪ 貫田周吾, 長屋智之, 後藤善友, 光フィードバック下の液晶空間光変調器における確率共鳴, 第 120 回日本物理学会九州支部例会, 平成 26 年 12 月 6 日, 崇城大学 (熊本県熊本市)

⑫ 後藤善友, 土手良介, 長屋智之, 奈良重俊, 自己電気光学効果素子の非線形振動と同期特性, 日本物理学会 2014 年秋季大会, 平成 26 年 9 月 9 日, 中部大学 (愛知県春日井市)

⑬ 佐藤裕樹, 後藤善友, 長屋智之, 折原宏, Rheology of Electro-Hydrodynamic Convection in a Liquid Crystal Mixture, International Union of Materials Research Societies, International Conference in Asia 2014, 平成 26 年 8 月 25 日, 福岡大学 (福岡県福岡市)

⑭ 長屋智之, 折原宏, 液晶電気対流のレオロジー, 新学術領域 ゆらぎと構造の協奏 第一回領域研究会 平成 25 年 12 月 26 日, KKR 熱海 (静岡県熱海市)

⑮ 三上洋輔, 日高芳樹, 鳴海孝之, 鈴木将, 長屋智之, 原一広, 液晶電気対流における欠陥乱流の時空揺動 II, 平成 25 年 9 月 25 日, 徳島大学常三島キャンパス (徳島県徳島市)

⑯ 後藤善友, 土手良介, 長屋智之, 奈良重俊, 自己電気光学効果素子結合系におけるトポロジカル欠陥の時間発展, 日本物理学会 2013 年秋季大会, 平成 25 年 9 月 25 日, 徳島大学常三島キャンパス (徳島県徳島市)

⑰ 九鬼広之, 長屋智之, 折原宏, 電氣的応力が液晶電気対流下の粘性に及ぼす効果, 第 2 回ソフトマター研究会, 平成 24 年 9 月 25 日, 九州大学西新プラザ (福岡県福岡市)

⑱ 三上洋輔, 日高芳樹, 吉谷淳一, 鈴木将, 鳴海孝之, 長屋智之, 甲斐昌一, 液晶電気対流における欠陥乱流の時空揺動 日本物理学会 2012 年秋季大会, 平成 24 年 9 月 18 日 横浜国立大学常盤台キャンパス (神

奈川県横浜市)

⑩ 長屋智之, 九鬼広之, 奈良重俊, 折原宏,  
MBBA-EBCA混合系における電気流体力学的対  
流下の粘性, 日本物理学会2012年秋季大会, 平  
成24年9月18日, 横浜国立大学常盤台キャン  
パス (神奈川県横浜市)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

長屋 智之 (Nagaya Tomoyuki)

大分大学・工学部・教授

研究者番号: 00228058

### (2) 研究分担者

折原 宏 (Orihara Hiroshi)

北海道大学・工学研究科・教授

研究者番号: 30177307

### (3) 連携研究者

奈良 重俊 (Nara Shigetoshi)

岡山大学・自然科学研究科・特任教授

研究者番号: 60231495

日高 芳樹 (Hidaka Yoshiki)

九州大学・工学研究院・助教

研究者番号: 70274511