

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 24 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26461821

研究課題名(和文) 確率共鳴を利用した脳梗塞部の検出と被ばく線量軽減 - ノイズは本当に有害因子なのか？

研究課題名(英文) Detection of early CT sign and dose reduction using stochastic resonance

研究代表者

今井 國治 (Imai, Kuniharu)

名古屋大学・医学系研究科(保健)・教授

研究者番号：20335053

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：本申請研究の主たる目的は、CT検査時における被ばく線量(重要臓器線量)を測定した上で、申請者がCT画像上で発現に成功させた確率共鳴現象を利用して、病変検出能の向上を図ると共に、CT検査時の被ばく線量軽減を行うことである。特に今回は脳梗塞部の検出(脳溝の狭小化や早期虚血性病変)に主眼を置き、どのような条件の時に効果的に確率共鳴が発現するかを検討し、最終的に臨床への応用を目指す。確率共鳴はノイズ強度が10HUの時に最も効率よく発現し、コントラスト分解能も鮮鋭度も大きく改善した。また、この改善効果はノイズの種類に依存し、高周波を多く含むノイズを付加した際に、その効果が大きくなることを定量的に示した。

研究成果の概要(英文)：Image noise in CT images is one of the major factors degrading the image quality. Thus, many studies of noise reduction techniques have been conducted. On the contrary, the phenomenon that disproves such traditional thought for noise has been discovered and is called "stochastic resonance". It is known that this phenomenon appears by adding white Gaussian noise to non-linear system and provides the improvement of the system response. Thus, this phenomenon can be applied for improving signal detectability in CT images. From these viewpoints, we have set out on the following two subjects of study; 1) CNR analysis of noise-added CT images 2) Entropy analysis of noise-added CT images.

This study showed that stochastic resonance and stochastic synchronization appeared in CT images when white Gaussian noise and band-limited noise in spatial frequency domain was added. Consequently, the contrast resolution and sharpness of CT images was improved.

研究分野：物性工学、情報工学

キーワード：確率共鳴 確率同期 画質 CT 情報量解析 コントラスト分解能

1. 研究開始当初の背景

診断用 X 線画像の画質を劣化させる要因の一つに画像ノイズがある。一般に、デジタル X 線画像のノイズは、量子ノイズ、構造ノイズ、電気ノイズと言った成分で構成されており、X 線線量（または、未処理画像における平均 pixel 値）との関係においては、二次関数の形で定式化できる。その一例を図 1 に示す。これは乳房 X 線撮影装置で得られたノイズ特性で、Noise SD の二乗 (pixel 値の分散) は、平均 pixel 値の二次関数となっており、理論上、定数項、一次項及び二次項は、それぞれ、電気ノイズ、量子ノイズ及び構造ノイズを表している。さらに、この特性から、図 2 に示すような各ノイズ成分の特性も容易に求めることができ、画質と被ばく線量との関係を議論する上で、有益な情報となる。このような物性を有する画像ノイズは、統計学的に正規分布でモデル化できことも広く知られている。この性質とモルフォロジー解析を組み合わせると、図 3 に示すようなノイズ強度の mapping も可能となり、画像ノイズによる画質の劣化程度が定量的に把握できる。

このように、画像ノイズに関する研究は、画質劣化に関するものが多数を占めており、画像ノイズそのものが、病変検出に対し、有害であるという視点に立って検討が進められている。ところが、このノイズに対する観念を覆す現象が、電子物性工学の分野で発見された。それが本申請研究の題目に挙げた「確率共鳴現象」である。この現象は、非線形システム内で起こる物理現象で、例えば、非線形電子回路を用いて微弱な信号を検出する際、その回路に white Gaussian noise を付加すると、信号とノイズが共鳴し、検出可能になると言う極めて特異的な現象である。つまり、これまで有害とされていたノイズも、場合によっては有効利用できることを示唆している。そこで、この現象を X 線画像診断システム内で発現できれば、病変検出を行う上で有益な手法になるのではないかと考えられる。しかし、確率共鳴に関する研究は、これまで医療分野では行われておらず、その存在自体も確認されていなかった。

2. 研究の目的

本申請研究の主たる目的は、CT 検査時の被ばく線量を測定した上で、申請者が CT 画像上で発現に成功させた確率共鳴現象を利用して、病変検出能の向上を図ると共に、被ばく線量軽減を行うことである。特に今回は、脳梗塞部の検出（脳溝の狭小化や皮髄境界の不明瞭化）に主眼を置き、どのような条件の時に、効果的に確率共鳴が発現するかを検討し、最終目的である臨床への応用を目指す。

3. 研究の方法

3.1 CT 画像における確率共鳴現象の検証

- 予備的検討 -

□) 解析対象画像

本検討では解析対象物として、コントラスト分解能測定用ファントムを使用し、これを

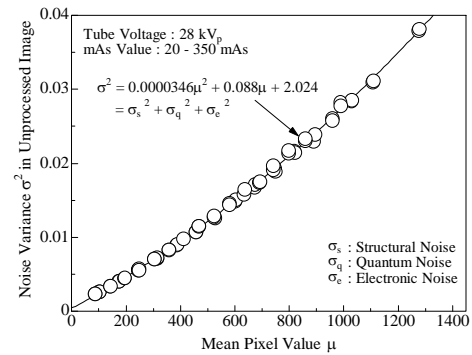


図 1 画像ノイズの物理特性

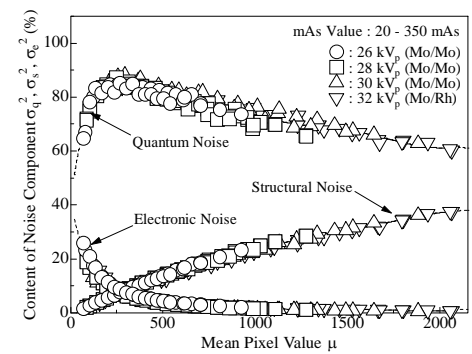
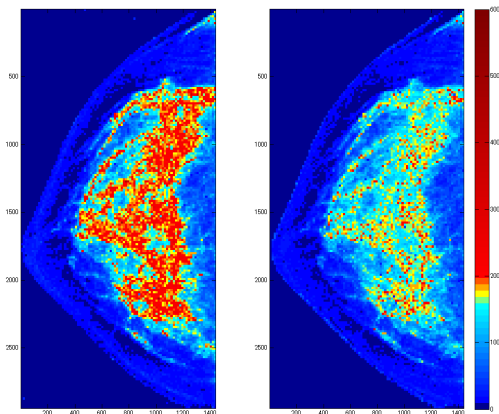


図 2 ノイズ成分含有率の pixel 値依存性



28kV, 70mAs 28kV, 160mAs

図 3 画像ノイズの強度分布図

64 列 Multi-Detector row CT 装置でスキャンした。その際、管電圧は 140 kV、管電流は 400 mA とし、Filtered Back Projection 法 (軟部用) を用いて原画像を取得した。

□) 確率共鳴発現方法

通常、モニター表示されている CT 画像は、ウィンドウ処理と呼ばれる閾値処理が施されているため、本質的に非線形画像である。このことから、CT 画像上で確率共鳴が発現する前提は満たしていると考えられる。これまでの報告で、確率共鳴は white Gaussian noise を付加した時に発現し易いと言われている。そこで、原画像に white Gaussian noise を付加し、確率共鳴が発現するかを検証した。その際、付加ノイズ強度は、CT 値の標準偏差 σ と定義し、その値を 50 ~ 1000 HU の範囲

で変化させた。また、ノイズを付加した画像の Window Level (WL)、Window Width (WW) はそれぞれ、100 HU 及び 40 HU に設定した。

3.2 確率共鳴を用いた画質改善

□) 脳溝狭小型脳梗塞ファントムの作成

研究目的で述べたように、本研究では脳梗塞部の検出に主眼を置いている。そこで、この目的を達成するため、脳溝狭小化型脳梗塞ファントムと称するファントムを作成し、これを画質評価における解析対象物とした。このファントムは、頭蓋骨と脳実質を模擬した領域で構成されている。頭蓋骨は人体と等価な CT 値をもつ石膏で解剖学的構造を模擬し、外被は人体軟部組織とほぼ同じ CT 値をもつポリウレタンを使用した。脳実質は、脳の灰白質に相当するものとし、その CT 値が 30 ~ 40 HU (平均: 36 HU) となるように、ポリウレタンにリン酸カルシウムを配合した。

一般に、超急性期脳梗塞が発症すると皮髄境界の消失や脳溝の消失が起こると言われている。つまり、これらの病変(early CT sign)が的確に検出できれば、超急性期脳梗塞の診断に役立つと考えられる。そこで、このファントム内に CT 値差 2HU の皮髄境界(低コントラスト信号領域)を作製し、脳実質縁には、1(LP/cm) ~ 4(LP/cm)の模擬脳溝(高コントラスト信号領域)を配置した。このファントムの外観とその内部構造を図 4 に示す。

□) 解析対象画像

本検討では、頭部 CT 検査で使用されている撮像条件(管電圧 120 kV、管電流 350 mA)を用いてファントム画像(原画像)を取得し、これに Gaussian noise を付加した上で確率共鳴の発現を検討した。今回、付加ノイズとして、white Gaussian noise 及び空間周波数帯域を制限した Gaussian noise(帯域制限 Gaussian noise)を用いることにした。図 5 は、帯域制限 Gaussian noise の作成に使用したフィルタであり、白い領域の周波数成分のみがノイズとして寄与するように設計した。そこで、このフィルタと平均 CT 値 0 HU の white Gaussian noise を用いて、最高周波数 2.13 cycle/mm、帯域幅 0.0083 ~ 0.83 cycle/mm の帯域制限 Gaussian noise を作成した。また、付加ノイズ強度は、 $\sigma = 0 \sim 20$ HU の範囲とし、ノイズ付加画像の表示条件は WL = 50 HU、WW = 30 HU に設定した。

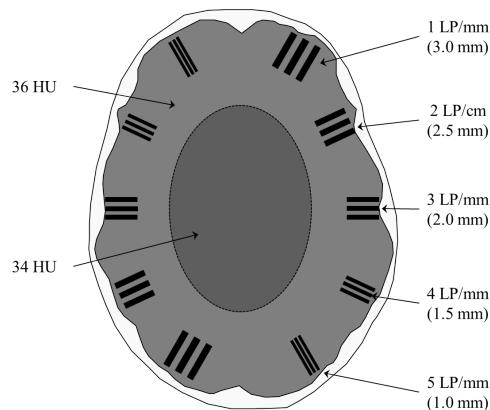
3.3 CT 画像における確率共鳴現象の検証

□) CNR によるコントラスト分解能評価

既述したように、非線形システム内で確率共鳴が発現すると、ノイズによって信号が復元し、信号検出能が改善されると言われている。つまり、CT 画像上で確率共鳴が発現した際、どれだけ信号検出能が改善されたかを何らかの物理指標で評価できれば、この現象の定量解析が可能となり、それと同時に、確率共鳴による画質改善効果も評価できる。通常、デジタル X 線画像の信号検出能を定量評価する場合、Contrast-to-Noise Ratio (CNR)を指標とするコントラスト分解能の定量解析が



(a) 外観



(b) 内部構造

図 4 頭部ファントム

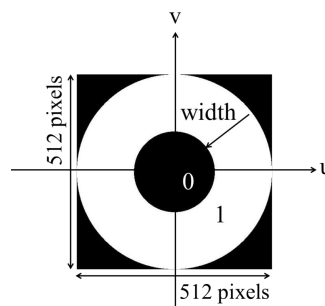


図 5 ノイズ作成用フィルター

頻繁に実施されている。そこで、本解析では(1)式により CNR を算出し、これによる信号検出能の定量評価を行った。

$$CNR = \frac{P_{signal} - P_{background}}{NoiseSD} \quad (1)$$

P_{signal} : 信号領域における平均 Pixel 値

$P_{background}$: 信号領域と信号領域の間の背景領域における平均 Pixel 値

$Noise SD$: 信号領域と信号領域の間の背景領域における Pixel 値の標準偏差

□) 情報利得によるエントロピー解析

CT 画像における皮髄境界の消失や脳溝の消失は、超急性期脳梗塞の診断を行う上で、有益な情報となる。一般に、鮮鋭度やコントラスト分解能が改善されれば、その画像から得られる情報は多くなる。このことから、これらの画質要因が改善することによって、どの程度、情報量に変化がもたらされるかを把握することは、臨床の上、非常に有用である。そこで、ノイズを付加した CT 画像の情

報量をテンプレート画像(図 6)の情報量に対する条件付きエントロピーで表現し、これを確率共鳴による確率共鳴効果(情報利得)と定義した上で、エントロピー解析を行った。

一般に、条件付きエントロピーは(2)式で定義されている。

$$H(x|y) = -\sum_{i,j} p(j)p(i|j) \log_2 p(i|j) \quad (2)$$

$H(x|y)$: 条件付きエントロピー(情報利得)

$p(i)$: j の生起確率

$p(i|j)$: j が生起するという条件のもとで i が起こる条件付き生起確率

今、ノイズ付加画像の pixel 値を解析対象データ x 、テンプレート画像の pixel 値を参照データ y とすると、条件付きエントロピー $H(x|y)$ は、テンプレート画像の信号情報を知った上で、どれだけ情報利得があったかを示す物理指標となり、この値が高い画像ほど、確率共鳴効果が高く、信号検出が容易な画像であることを意味している。また、(2)式の定義式からわかるように、このエントロピーを求める際、遷移確率を求める必要がある。一般に、時系列解析において遷移確率を求める場合、ヒストグラムによる方法が頻繁に用いられており、その最適な階級間隔は 10~15、逆に、ノイズの影響を最も強く受ける階級間隔は 1 であると言われている。そこで本解析では、ヒストグラムの階級間隔を 10 に設定し、この条件の下で遷移確率行列 $[p(i|j)]$ を求め、条件付きエントロピー $H(x|y)$ を算出した。

4. 研究成果

4.1 CT 画像における確率共鳴現象の検証

図 7 にコントラスト分解能測定用ファントムの原画像とこの画像に $\sigma = 300$ 及び 1000 HU の white Gaussian noise を付加した画像を示す。図 7(b)の 3 LP/cm の信号領域に注目すると、同図(a)の原画像に比べ、画像上の信号が明瞭に分離されている。つまり、原画像にノイズを付加することで信号検出能が向上したことを示している。一方、図 7(c)では信号がノイズに埋もれ、視認し難くなっている。このように、適切な強度のノイズを付加すると、画像信号が認知し易くなることから、CT 画像上で確率共鳴が発現したことが確認され、white Gaussian noise との共鳴により、潜在的な画像情報が現れたのだと考えられる。

4.2 確率共鳴を用いた画質改善

脳溝狭小化型脳梗塞ファントム画像の主観評価

図 8 は、脳溝狭小化型脳梗塞ファントム画像のノイズ付加画像であり、比較のため、原画像も同図に含めた。原画像の場合(同図(a))ノイズを付加していないこともあり、画像ノイズが目立っていない画像となっているが、脳溝部は一体化し、正確に画像表示できていない。これに対し、 $\sigma = 10$ HU のノイズを付加した場合(同図(b))、原画像よりも脳溝部が分離しており、特に 4 LP/cm の空間周波数領域で顕著であった。また、付加ノイズの種類

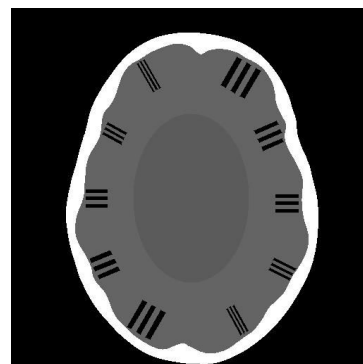
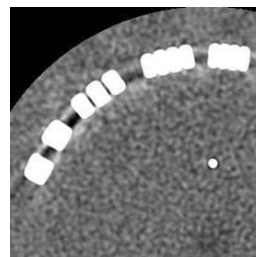
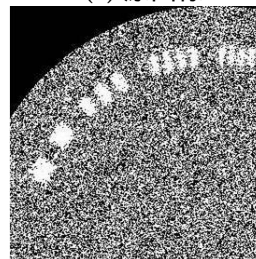


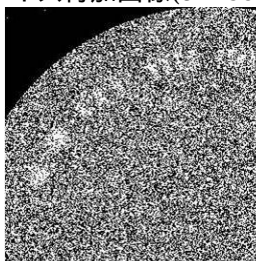
図 6 テンプレート画像



(a).原画像



(b).ノイズ付加画像($\sigma = 300$ HU)



(c).ノイズ付加画像($\sigma = 1000$ HU)

図 7. ノイズ付加による画質変化

別に脳溝の分離状態を比較してみると、ノイズの周波数帯域幅が狭くなるに従って、分離が明瞭となり、さらに、同じ付加ノイズ強度であるにも関わらず、画像ノイズは際立っていない。このことから、確率共鳴現象を効率よく発現させるには、高周波成分を多く含むノイズを付加すればよいことも示された。

一方、低コントラスト信号である皮髄境界に着目すると、コントラストは原画像に比べ低下しているものの、皮髄境界が視認し易い印象を受ける。これは確率共鳴の一種である確率同期により、信号辺縁の鮮鋭度が改善したためだと考えられる。また、高周波成分を多く含むノイズ付加画像は、画像ノイズの立ちも少なく、信号検出が容易になった。

ノイズによるコントラスト分解能評価

図 9 は、4 (LP/cm)の脳溝部を対象とした

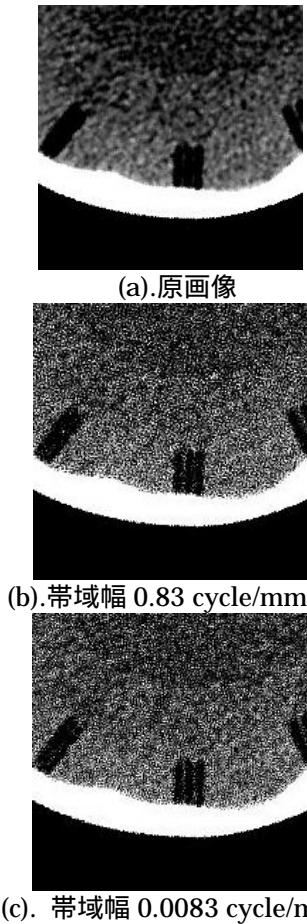


図 8 . 帯域制限ガウスノイズ付加画像

CNR 特性である。CNR は付加ノイズ強度の増加と共に放物線状に変化している。この結果は、確率共鳴の発現を示す典型的な特性であり、定量的にもこの現象が確認できた。また、この特性を病変検出と言う視点から考察すると、コントラスト分解能を最大にする付加ノイズ強度が存在し(約 10 HU) その強度を査定することで、病変検出能の改善が見込めることも示唆された。

情報利得によるエントロピー解析

図 10 は、階級間隔 10 の場合の付加ノイズ強度と情報利得との関係を示したものである。情報利得は付加するガウスノイズの周波数帯域には依存せず、10 HU 付近で最大値をとる特性を示した。これは CNR の特性と類似しており、効果的に確率共鳴が発現すれば、情報利得が増大することを示している。この結果は、WW = 30 HU 以下に設定して観察した方が、WW = 80 HU に設定した表示条件とよりも読影精度が向上すると言う Lev らの報告を裏付ける結果となった。しかし、(2)式に示したエントロピーの計算原理を考慮に入れると、付加ノイズが増加すれば、この情報利得も増大する可能性を秘めている。そこで、この結果がノイズの増加に伴う変化であるかを検討するため、階級間隔 1 における情報利得を算出した。その結果を図 11 に示す。情報利得は、付加ノイズ強度に対して単調に減少する特性を示した。これは付加ノイズ強

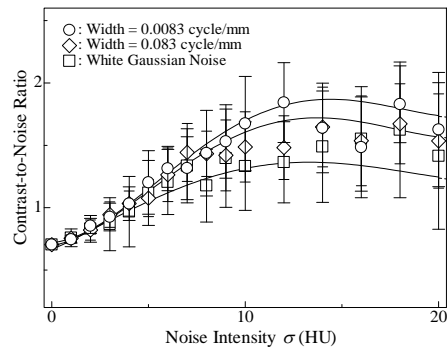


図 9 付加ノイズ強度と CNR との関係

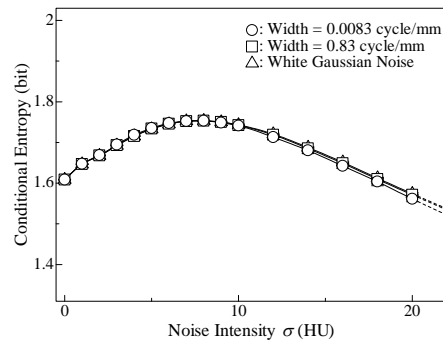


図 10 付加ノイズ強度と情報利得の関係

(bin=10)

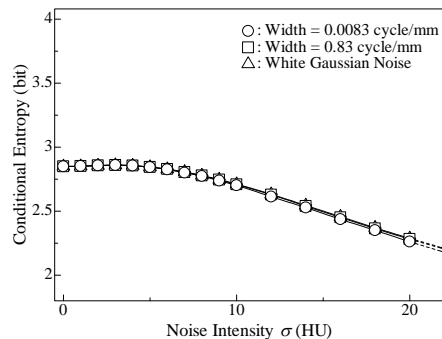


図 11 付加ノイズ強度と情報利得の関係

(bin=1)

度が高くなれば、情報利得が低下することを示しており、図 10 の特性は確率共鳴発現に起因する情報利得であることが実証できた。

臨床応用の可能性

以上の結果は、脳溝狭小化型脳梗塞ファントム画像上で捉えたものである。そのため、この現象の臨床応用を考えた際、ファントム画像ではなく、臨床画像でも確率共鳴が発現するかどうかを確認する必要がある。しかし、本研究で開発及び使用した頭部ファントムは、皮髄境界や脳溝を模擬していることを考慮に入れると、本研究の成果は臨床画像で得られる結果に近いものであると考えられ、臨床応用が可能であることを示唆している。

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)

北口聖茂、極値統計を用いたCT画像における金属アーチファクトの定量解析、日本放射線技術学会雑誌、査読有り、72巻、2016年、p402-409

ENCHI Yukihiro, Arterial contour detectability in head CT angiography, International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery, 査読有り、Vol.10, 2015, p1-p10

今井國治、診断用X線画像におけるノイズの二重面性-確率共鳴現象の発現、健康文化振興財団紀要、執筆依頼 49巻、2014,p96-p100

〔学会発表〕(計 12件)

五十嵐健悟、CT画像における信号強度と確率共鳴によるコントラスト改善の関係、2016年電子情報通信学会ソサイエティ大会、2016年9月7日、札幌

五十嵐健悟、CT画像における確率共鳴と付加ノイズの周波数帯域との関係、2016年電子情報通信学会総合大会、2016年3月16日、福岡

Kengo Igarashi, Stochastic Resonance in CT images Using Non-white Gaussian Noise, International Workshop on Image Media Quality and its Application, 2016年3月10日、名古屋

五十嵐健悟、逐次近似画像におけるノイズ付加効果、第43回日本放射線技術学会秋季学術大会、2015年10月8日、金沢
森政樹、見かけのNoise SDを用いたCT画像のノイズ評価、第14回情報科学技術フォーラム、2015年9月16日、松山

山元勇輝、確率共鳴画像における信号形状の定量評価、2015年電子情報通信学会ソサイエティ大会、2015年9月10日、仙台

五十嵐健悟、類似度を用いた確率共鳴現象の定量評価、電子情報通信学会イメージメディアクオリティ研究会、2015年9月4日、鹿児島

山元勇輝、空間周波数帯域制限型ガウスノイズを用いたCT画像における確率共鳴現象、2015年電子情報通信学会総合大会、2015年3月10日、草津

山元勇輝、確率共鳴を利用したCT画像の鮮鋭度の改善、電子情報通信学会イメージメディアクオリティ研究会、2014年12月20日、名古屋

五十嵐健悟、非白色ノイズを用いた確率共鳴現象、日本生体医工学会東海支部学術集会、2014年10月16日、名古屋

山元 勇輝、確率共鳴によるCT画像のコントラスト増幅、第42回日本放射線技術学会秋季学術大会、2014年10月9日、札幌

山元勇輝、CT画像における確率共鳴の発

現とその応用、第13回情報科学技術フォーラム、2014年9月3日、筑波

〔図書〕(計 1件)

MOOK メディカル&イメージング、オプトロニクス社、
〔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

今井 國治 (KUNIHARU IMAI)
名古屋大学・医学部・教授
研究者番号：203335053

(2)研究分担者

池田 充 (IKEDA MITSURU)
名古屋大学・医学部・教授
研究者番号：50184437

(3)連携研究者

川浦 稚代 (KAWAURA CHIYO)
名古屋大学・医学部・講師
研究者番号：60324422

(4)連携研究者

藤井 啓輔 (FUJII KEISUKE)
名古屋大学・医学部・助教
研究者番号：40469937

(4)研究協力者 なし

()