

放射線科学

診断用 X 線画像におけるノイズの二面性—確率共鳴現象の発現

今井 國治

診断用 X 線画像の画質を劣化させる要因の一つとして、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、そして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。⁽¹⁾ 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、pixel 値の分散（標準偏差の二乗）、つまり、Noise SD の二乗は、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取得でき、被ばく線量との関係を検討する上で、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が広く知られている。この性質を利用すると、図 3 で示したように、解析対象に画像信号が含まれていてもノイズ評価が容易に行える。⁽²⁾（図 3 における直線の傾きの逆数が Noise SD）さらに、この統計学的性質とモルフォロジー解析を組み合わせると、図 4 に示すようなノイズ強度の mapping も可能となる。このように、画像ノイズの特性を理解することで、様々な解析が行え、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。（例えば、Contrast-to-Noise Ratio(CNR)による信号検出能の解析）

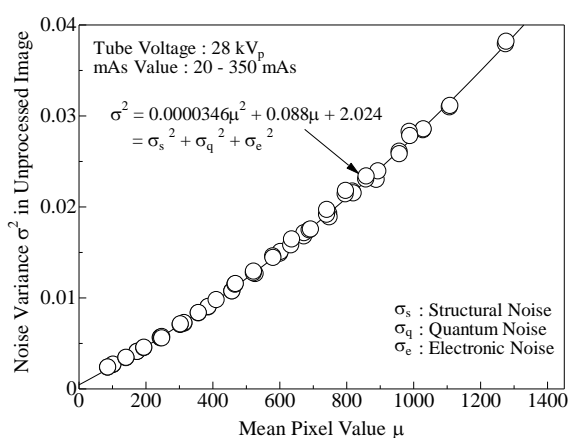


図 1 画像ノイズの物理特性

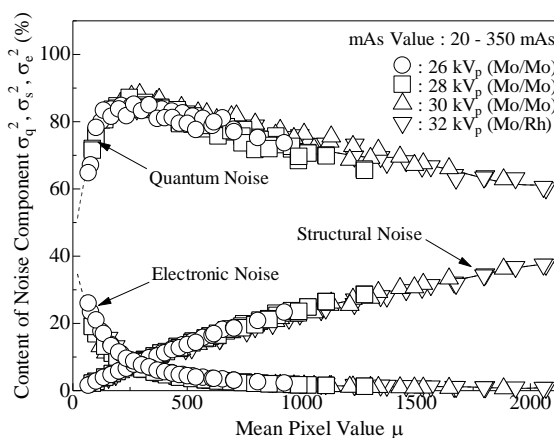


図 2 ノイズ成分含有率の pixel 値依存性

* 国内では、名古屋大学医学部附属病院の森らが、初めて図 1 の特性を明らかにした。

これまで、画像ノイズに関する研究は、上述したようなノイズによる画質劣化の検討やノイズ軽減機構の構築（最近では、逐次近似画像再構成法の開発）と言ったものが、大半を占めており、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きた。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。それが本稿の題目に挙げた「確率共鳴現象」である。⁽³⁾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、その回路に白色ノイズを付加すると、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。すなわち、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、医用量子科学の分野では行われておらず、その存在自体も確認

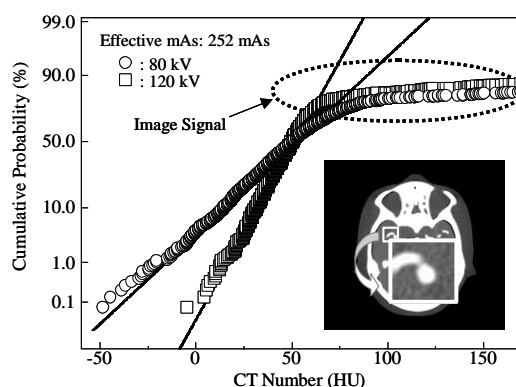
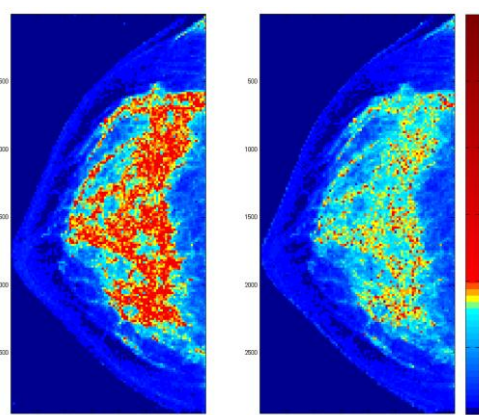


図3 Normal Plot によるノイズ評価



28kV, 70mAs 28kV, 160mAs

図4 画像ノイズの強度分布図

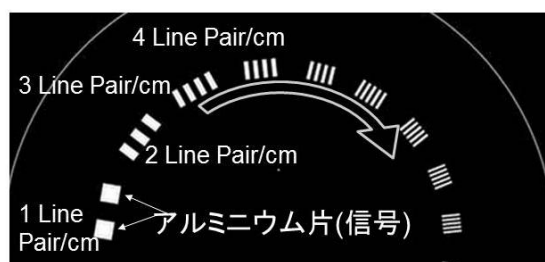


図5 解析対象ファントム

されていない。本稿では、現在、筆者の研究室で実施している確率共鳴の研究について紹介し、CT 画像上でこの現象の発現に成功したことを中心に述べる。

これまで当研究室では、CT 画像を対象に画像ノイズの有害性に関する研究を行ってきた。(例えば、CT 特有の画像ノイズであるストリークアーチファクトを評価する方法として、極値統計に基づく評価法を考案。⁽⁴⁾金属アーチファクトの評価にも適用できることが近畿大学医学部附属堺病院の研究グループによって実証された。)そこで、確率共鳴の発現についても、これまでと同様、CT 画像を用いて検討することにした。今回、初の試みだけに様々な点に留意した。

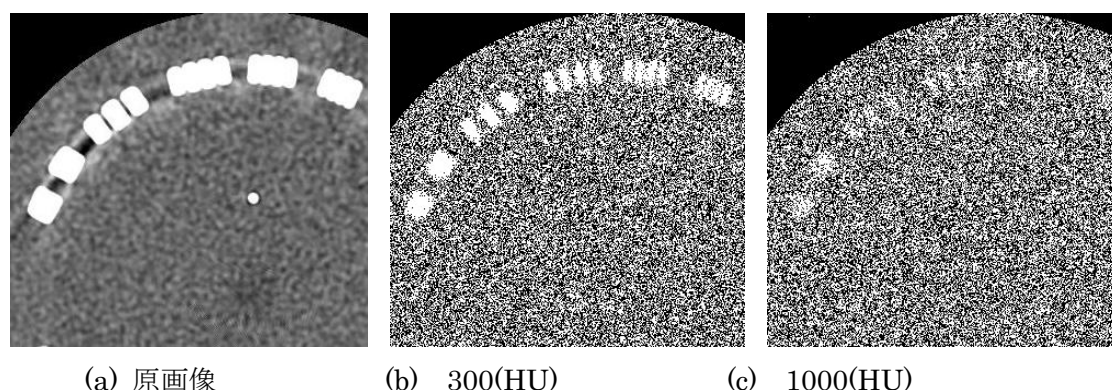


図6 解析対象画像及び確率共鳴画像

(1) 確率共鳴の発現が一目でわかる。(2) コントラストの増幅がわかり易い。これらの点を考慮し、研究当初は、解析対象物として、高コントラスト分解能測定用ファントム (Catphan 528 ファントム、図5) を用いることにした。撮像方法についても、CT 画像自体のノイズをできるだけ少なくするため、高電圧・高電流撮像法 (管電圧: 140kV、管電流 400mA) を採用した。このような条件下で撮像した画像が図6(a)である。(ウインドレベル: 100 (HU)、ウインド幅 40 (HU)、再構成関数: 軟組織用) この図の 3 (LP/cm) 以上の空間周波数領域では、画像信号の分離は起こっておらず、加えて、信号間でダークバンドアーチファクトも確認できる。これまでの報告で、非線形システムに白色ノイズ (White Gaussian Noise) を付加すると、確率共鳴が発現し易くなると言われている。そこでこのCT 画像に対し、平均値 0 (HU)、標準偏差 50~1000 (HU) (以降、付加ノイズ強度と呼ぶ。) の白色ノイズを付加し、確率共鳴が発現するかを検証した。図6 (b) 及び(c)は、付加ノイズ強度 300 (HU) 及び 1000 (HU) を付加した時の結果である。これらの図の 3(LP/cm) の信号領域に着目すると、付加ノイズ強度 300 (HU) の場合、原画像では認められなかった信号分離が生じている。さらに、信号間に現れていたダークバンドアーチファクトも消失している。つまり、白色ノイズを付加することにより、信号検出能が向上したことを示唆している。これに対し、付加ノイズ強度を 1000 (HU) まで上昇させると、確かに信号分離やダークバンドアーチファクトの消失は起こっているが、信号自体が画像ノイズに埋もれ、視認しにくくなっている。このように、適度な強度の白色ノイズを付加することにより、画像信号が視認し易くなったことから、この現象は確率共鳴であると言え、白色ノイズとの共鳴によって、潜在的な画像情報が顕在化したのだと思われる。

しかし、これはあくまでも主観的なものであり、その科学的根拠に乏しい。そこで、この現象の発現を客観化する必要がある。従来、確率共鳴現象の有無

は、信号対雑音比、通称 S/N 比を用いて議論されてきた。この研究においても、この判定指標、つまり、(1)式で定義される CNR をもとに確率共鳴現象の有無を検証することにした。その際、

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

P_{signal} : 画像信号の平均 pixel 値、

$P_{background}$: 信号間の平均 pixel 値

$NoiseSD$: 信号間における pixel 値の標準偏差

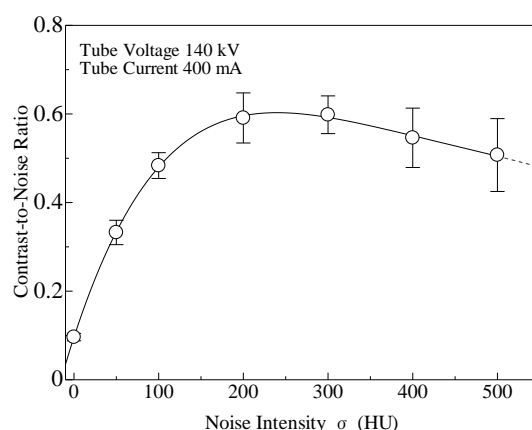


図7 確率共鳴曲線

DICOM データに対し、モニター表示と同じ 256 階調のウインドウ処理を施し、閾値系（非線形）となった pixel 値を用いて判定した。図7は、3 (LP/cm) の信号領域を対象とした CNR の特性である。画像信号の 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観点から考察すると、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、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になる。

以上の結果から、CT 画像上でも確率共鳴の発現が確認でき、この現象を巧みに利用すれば、病変検出能の改善に役立つことも示唆された。現在、当研究室では、確率共鳴現象の更なる基礎検討を行っている。今回、その全てを紹介することができなかったが、白色非ガウスノイズや周波数処理したノイズによる確率共鳴の発現についても検討しており、既に新たな知見を得ている。これに加え、臨床応用を目指した研究も推し進めており、具体的には、超急性期脳梗塞の検出について検討を行っている。これについては今後の成果を待ちたい。

最後にこのような執筆機会を与えて下さった名古屋大学名誉教授佐久間貞行先生に心より感謝いたします。なお、この研究の一部は、日本学術振興会科学研究費補助金（基盤研究(C)、課題番号：26461821）の助成を受けて行われた。

(1) M. Mori, K. Imai, et al. Electr Commun in Jpn, 2013; 96:32-41

(2) K. Imai, M. Ikda, et al. Eur J Med Phys, 2010; 26:157-165

(3) 例えば、太田隆夫著、非平衡系の物理、裳華房

(4) K. Imai, M. Ikda, et al. Med Phys, 2009; 36:492-499

(名古屋大学大学院医学研究科医療技術学専攻 教授)