

1/f ゆらぎの起源と多様性——振幅変調から

森 川 雅 博 〈お茶の水女子大学/理化学研究所 hiro@phys.ocha.ac.jp〉

中 道 晶 香 〈京都産業大学共通教育推進機構 nakamichi@cc.kyoto-su.ac.jp〉

あらゆる自然科学の領域や音楽、生体現象にわたる百年の謎がある。それは低周波領域において卓越する 1/f ゆらぎの起源である。自然界に遍在するこのゆらぎは、そのパワースpektral密度（周波数間隔ごとのパワー、PSD） $S(f)$ が、周波数 f にほぼ逆比例する： $S(f) \propto f^{-\alpha}$, $\alpha = -1 \pm 0.5$ 。1925 年に Johnson により真空管を流れる電流の中に初めて発見されて以来広範に観測されている。これは物理学会領域 1~13 のすべて、素粒子、原子核、宇宙、各実験領域、工学、化学、生物などの分野にわたる。

完全にランダムで時間相関を持たないホワイトノイズの PSD は平坦で、周波数 f の 0 乗に比例する。時間変動がこのホワイトノイズに駆動される変数は、その PSD が f の -2 乗に比例しレッドノイズと呼ばれる。1/f ゆらぎはそれらの中間なのでピンクノイズとも呼ばれる。冪が 0 でも -2 でもない半端な 1/f ゆらぎは、奇妙なのに遍在するので、今まで多くの謎と議論を巻き起こしてきた。1/f ゆらぎの起源として、自己組織化臨界理論をはじめ、2-レベルシステム理論、キャリア数ゆらぎ理論、カオス理論とストレンジアトラクター理論、マルチフラクタル理論など多くの理論が提案された。しかし統一的な理論は今までなかった。

先人の多くの研究を礎として、我々は 1/f ゆらぎの統一的な起源を提案する：それは「系統的に周波数が集積した多数の波が作るうなり」である。無限に接近する周波数を持つ多数の波は、任意の低周波信号を作り出せる。これを**振幅変調 (AM)** として理解することもできる。我々は、系統的に周波数が集積する AM 機構を、同期現象や共鳴現象あるいは赤外発散現象の中に見出した。そしてこの変調が復調されると、往々にして 1/f ゆらぎが現れる。振幅変調

(AM) と復調が組で存在することが我々の提案の核心である。この組を、1/f ゆらぎを示すさまざまな現象の中に見出し、提案を検証していきたい。

例えば、我々は地震や太陽フレアの時系列が 1/f にゆらぐことを見出した。過去 50 年の世界の地震（マグニチュード 5 以下）のエネルギー時系列に対する PSD は右欄の図のように指数 -0.83 を示す。大きな地震もすべて入れると PSD は平坦になる。一方、地震の起きたタイミングだけの時系列も同様に 1/f ゆらぎを示す。我々は、この起源は常時励起している**地球自由振動 (Earth's Free Oscillation)** の共鳴だと提案する。

同様に、平均エネルギー以下の 3 年ほどの太陽フレア (class A, B) の PSD は、右欄の図のように指数 -0.84 を示す。この起源は**太陽 5 分振動 (Solar Five-Minute Oscillations)** の共鳴だと考えられる。

音楽では、チャイコフスキー作曲弦楽セレナーデ音響データの 2 乗は、右欄の図のように指数 -0.97 の PSD を示す。この起源は、弦楽器などのユニゾンが作る同期現象であり、簡単な同期モデルで記述できる。

うなりだけから生成する 1/f ゆらぎは頑強なので、太陽黒点数、太陽風、高エネルギー陽子や磁場・宇宙線の増減、地球上の痕跡（例えば NO_3^- , ^{10}Be , ^{14}C ）、気候などに伝播するはずだ。実際、これらは 1/f にゆらぐ。さらに、**軟光子放出**の反作用から、半導体中の電子波束や電流にも 1/f ゆらぎが出現する。生体中のこの電流のゆらぎが神経発火を導き、生体によくみられる 1/f ゆらぎを説明するはずだ。この頑強な継承性も 1/f ゆらぎの大きな特徴である。

1/f ゆらぎの視点から、多岐にわたる分野が繋がっていく様は、実におもしろい。

用語解説

振幅変調 (AM) :

比較的高周波側で系統的に周波数が集積する機構があれば、波のうなりから、いくらかでも低周波側に信号を作ることができる。周波数集積の系統性により、この低周波信号が 1/f に比例したりする。つまり 1/f ゆらぎは、高周波側にエンコードされ振幅変調された信号である。

地球自由振動 :

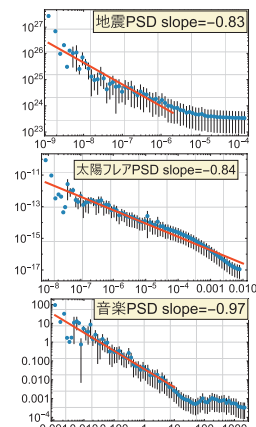
地震やその他の大規模な地球内部の動きによって引き起こされ、地球全体が自然に常時振動する現象である。数 mHz から数十 mHz の範囲に多くの固有振動がある。

太陽 5 分振動 :

太陽の表面や内部で観測される常時励起された振動現象である。3 mHz 前後の範囲に多くの固有振動がある。太陽の大きさ、密度、温度勾配、などによって決まる音波の特性や励起機構から、共鳴周波数がこの振動数の周りに集積する。地球の自由振動も同様である。

軟光子放出 :

量子電磁力学では、電子は固体中の不純物に衝突して、いくらかでも低周波の光子を放出する。光子には質量がないので、その放出確率は赤外発散する。



典型的な PSD。横軸と縦軸はそれぞれ周波数 (Hz) とパワー。