Grover 波動アルゴリズムによる空間コヒーレントな風力エネルギーの集中

Spatial coherent wind power concentration by using Grover wave algorithm

内田秀範・三重大工

小竹茂夫・三重大工

鈴木泰之・三重大工

Hidenori Uchida, Mie University

Shigeo Kotake, Mie University

Yasuyuki Suzuki, Mie University

Key Words: Wind Power Generation, Temporal Random Wind, Quantum Algorithm

1. 緒言

地球温暖化問題の防止から、化石燃料に頼らないエネルギー源として風力の利用が注目されている。一方、風力はエネルギー密度が低く、時間的変動も大きいため、大きな電力の発生は期待できない。できるだけ広い空間からエネルギーを取り出すために風車等の大型化が進んでいるが、剛構造の羽根を必要とするため大きさには限界が存在する。

一方、空間に広がった波動を効率よく局所的な空間に集める方法として Grover アルゴリズムが量子情報の分野で提案された [1]。コヒーレントな波動に現れるこのアルゴリズムは、古典的な波動現象にも適応可能であり、これを利用した光学 [2] や振動現象 [3] への応用が提案されている。

自然風は方向および大きさは、時間的にはランダムだが、空間的には広範囲に同じ傾向を持つコヒーレントな性質を有している。そこで本研究では、Grover 波動アルゴリズムを実現する多体振動系 [4] を用いることで、空間的にコヒーレンスを有する風力等のエネルギーを集中させることを試み、これを利用した風力発電の可能性を考察する。

2. Grover 波動アルゴリズムが成り立つ振動系

Grover 波動アルゴリズムを実現する系の例として、彼本人が提唱した多体振動系のモデルを Fig.1 に示す [1]。質量 m 、バネ定数 k の N 個の小振動子における振動が Grover 量子アルゴリズムにおける各量子状態に相当する。ここで他の小振動子と固有振動数が異なる質量 m' 、ばね定数 k' の特殊振動子を 1 個おき、ここに発電機を設置する。

Fig. 1 減衰と外力が働く場合の多体振動系

特殊振動子に掛かる発電時の反力は速度に比例する減衰力であり、風力は小振動子全体に掛かる外力とみなせる。

各小振動子に掛かる外力を $F_i(t)$ [N] とした場合、多体振動系の運動方程式は以下のように表される。

$$\begin{cases} M\ddot{X} + KX + k_1(X - x_1) + \sum_{i=2}^N k(X - x_i) = 0 \\ m\ddot{x}_i + k(x_i - X) = F_i(t_i) \\ m'\ddot{x}_1 + k'(x_1 - X) + c\dot{x}_1 = F_1(t_1) \end{cases} \quad (1)$$

ただし、 $i=2, 3, \dots, N$ である。 M と K は小振動子が繋がる大振動子の質量とバネ定数であり、Grover アルゴリズムが成り立つ条件

$$\begin{aligned} M &= \frac{16k(N-1)}{(2p+1)^2(4-\frac{m}{k})+4-\frac{16k}{m}} \\ K &= \frac{(2p+1)^2(N-1)m}{(2p+1)^2(4-\frac{m}{k})+4-\frac{16k}{m}} - k_1 \end{aligned} \quad (2)$$

を用いる。これらの条件は、自然数 p を増加させることにより、ロバスト性が生じ、 M を小さくできることから、ケーブル等の軟構造の振動子でも、実現可能となる。

3. シミュレーション結果および考察

3-1 計算方法

Fig.1 に示すモデルを用い 4 次の Runge-Kutta 法により数値計算を行った。特殊振動子は Grover のアルゴリズムが成り立つよう $m'=4$, $k'=1$ とした。また、その他の $N-1$ 個の小振動子は $m=1$, $k=1$ とした。初期条件については $\dot{X}=0$, $\dot{x}_i=1$, $\dot{x}_1=1$, $X=0$, $x_i=0$, $x_1=0$ としたが、外力を入れた場合、振動は初期条件には依らなかった。以下の計算においては、時間的にランダムな風を表現するため、外力の時間間隔および大きさはそれぞれ、 $0 \sim 10$ [s] (または [N]) の間の乱数を用いた。以下では、 $N=300$, $c=0.1$ における、 $t=500$ [s] 間の数値計算結果を示す。

3-2 外部入力とエネルギー集中との関係

入力する外力の方向がどの振動子も同じにして空間的なコヒーレントが存在した場合における大振動子(E), 特殊振動子(E1)および他の小振動子(E2~E5)を代表する 4 つのエネルギーの変化を Fig. 2 に示す。その結果、特殊振動子に対して他の小振動子のエネルギーは極端に小さくなっていた。振動子全体のエネルギーとの比をとったところ (Fig. 3) エネルギーのほとんどが特殊振動子に集中していた。特殊振動子に集中したエネルギーは発電によって使われるため、

振動子全体から特殊振動子にエネルギー流れが存在していることが分かった。

Fig. 2 コヒーレントな入力下での振動子のエネルギーの時間変化

Fig. 3 空間的にコヒーレントな入力下での特殊振動子へのエネルギー集中度

一方、各小振動子に対する風による外力が、時刻、方向、大きさ、全てについてランダムであった場合、Fig. 4, 5に示すように、集中度は最大でも約 0.008 であり、特殊振動子にはエネルギーは集中しなかった。

Fig. 4 空間的にランダムな入力下での振動子のエネルギーの時間変化

Fig. 5 空間的にランダムな入力下での特殊振動子へのエネルギー集中度

3-3 波動のコヒーレンスと Deutsche-Jozsa アルゴリズム

波動のコヒーレンスがエネルギーの集中に影響を及ぼす原因としては、以下に説明する Deutsche-Jozsa 波動アルゴリズム[5]と同じ機構が存在するものと考えられる。つまり入力が空間的にコヒーレントである場合は、各小振動子における振動の位相差は小さく保たれるため、これらが大振動子との間で交換するエネルギーは大きくなり、大振動子を介して特殊振動子にエネルギーが集中する。一方、外力の方向が空間的にランダムであった場合、各小振動子の振動の位相はバラバラになるため、大振動子との間でエネルギーの交換は極端に少なくなり、ここから特殊振動子に流れるエネルギーも小さくなる。

以上のように、空間的にコヒーレントを持つ風による外力は、Deutsche-Jozsa アルゴリズムの機構により、Grover アルゴリズムを実現する振動子全体に与えたエネルギーの大部分を特殊振動子に集中させることができ、これにより効率良く発電を行うことが可能であることが予測できた。

これらの機構は波動アルゴリズムとして、解析的にも説明可能であり、こうした振動現象に現れる特異な性質ばかりでなく、他の波動現象にも有効と考えられる。

参考文献

- [1] L.K. Grover and A.M.Sengupta, A Classical Analog of Quantum Search, quant-ph/0109123 (2001).
- [2] 小竹茂夫, 日本機械学会誌, 111,152-153 (2008).
- [3] 菊池弘一他, 日本機械学会東海支部総会講演会講演論文集, 2005(54),39-40 (2005).
- [4] A.D. Patel, Wave Algorithms : Optimal Database Search and Catalysis, quant-ph/0609042 (2006).
- [5] D. Deutsch and R. Jozsa, Proc. R. Soc. London, Ser. A, 439, 553 (1992).