

多体振り子を用いたエネルギー集中機構の波力発電への応用の試み (波の周期とエネルギー受信振り子の周期の関係)

小竹 茂夫^{*1}

Application of Energy Concentration System with Multiple Pendulum for Wave Power Generation

(Relation between Periods of Wave and Energy-Received Pendulum)

Shigeo KOTAKE^{*1}

^{*1} Mie Univ. Dept. of Mechanical Engineering
Kurimamachiya-cho 1577, Tsu-shi, Mie, 514-8507 Japan

Energy transfers from a wave excited pendulum to an energy-received one in a multiple pendulums were observed in a wave generator waterway. When the natural period of the energy-received oscillator is half of the wave period, the efficiency of the energy transfer was maximized. The mechanism of this phenomena was explained from Grover algorithm in multiple oscillations or autoparametric excitation. Since power generation can be apart from the excited pendulum in the multiple oscillator, quality of frequency in power generation and the system endurance could be increased.

Key Words : Wave power generation, Energy transfer mechanism, Grover algorithm, Autoparametric excitation

1. 緒 言

自然エネルギーの利用において、一つの解決すべき大きな問題はそのエネルギー密度の薄さである。地球には膨大な太陽エネルギーが降り注いでいるものの、単位面積当たりの量は少なく、そのため火力発電や原子力発電等の大規模集中発電法と比べてコストの点で大きく引けを取るのが現状である。風力発電の大型化はその一つの解であり、直径 100mもの羽根を利用することで火力発電並のコストの低下が実現しつつある。しかしこれ以上の大規模化は、羽根の強度上の設計からも限界に近く、新たなアイデアが待ち望まれている。

海の波のエネルギーを利用した波力発電法は、波自体のエネルギーが水といった密度の高い媒体を通して得られることから効率が良く、1 m幅当たり 10kW~90 kWのエネルギーが得られることが知られている⁽¹⁾。一方で、波のエネルギーは波浪の状況によって大きく変化することから、波力発電の設計には嵐の際にも壊れない頑丈さを保障する必要がある⁽²⁾。そのため波力発電一基当たりの大型化は難しく、風力のような大規模化は進んでこなかった。

他方、波力は海上では上下方向に、また海岸線では水平方向に往復する運動であることから、振り子等の振動子を用いてエネルギーを取り出す工夫が試みられてきた^{(2), (3)}。ところが前述のような理由から、波力を受ける羽根を極端に大きくすることはできず、一つの発電機当たりのエネルギー密度を上げることはできないでいた。また大型な発電機を作ったとしても、そのコストは他の発電法に比べ割高なものとなっていた。さらに波は振動の周期が不規則であることから、一定の周期で運動する振り子を用いた場合、必ずしも波力から効率的にエネルギーを取り出すことはできないでいた。

これまで筆者らは、量子情報理論における量子アルゴリズムを古典的な波動現象に応用する試みを続けてきた⁽⁴⁾。例えば多数の振動子からなる多体振動系はその一つであり、多数の振動子間に生じる非線形現象の中には波

* 原稿受付 2014年07月08日

^{*1} 三重大学 (〒514-8507 三重県津市栗真町屋町 1577)

E-mail: kotake@mach.mie-u.ac.jp

動の作るアルゴリズムとして理解できるものがあることを明らかにしてきた。例えば Grover アルゴリズム^{(5),(6)}は、量子情報理論においては専ら情報検索アルゴリズムとして用いられてきたが、多体衝突振動系に応用した場合、振動子間のエネルギー移動を実現する⁽⁴⁾。これを波力発電に応用した場合、装置を適切に設計することで、波によって加振される多数の振動子の振動エネルギーを一か所に集中することができる可能性がある⁽⁷⁾⁽⁸⁾。また波を受ける振動子とは別の振動子にエネルギーを移動させることができることから、発電をより簡便に行える可能性がある。

これまで Grover アルゴリズムを用いた波力発電法は、概念上や数値計算上では検討されてきたが、実際の装置としてその機能を確認する実験は行われてこなかった。そこで今回は、Grover アルゴリズムが成り立つように設計された多体振り子を用いることで、波力を受ける振動子とは別な特殊振動子にエネルギーを移動させる実験を行った。今回は特に加振として働く波の周期と、エネルギーを集中させる特殊振動子の固有周期との関係について考察を行ったので報告する。

2. 実験方法

2・1 多体振り子

波力を受ける振り子（加振振り子）から、エネルギーを集める振り子（受信振り子）に、振動エネルギーを移動させることを目的とした多体振り子の概略図を図1に示す。この装置の設計の基となる多体振動子によるエネルギー移動の理論については、他の文献に詳しい⁽⁹⁾。

波力を受ける加振振り子はサイズが 225×900mm の面積の3枚のベニア板でできており、面全体で波力を受ける。板面の1/3は水柱につかるため自由振動は生じず、振り子の揺れはほぼ波の周期と等しくなる。この振り子はすべり軸受けで SUS 製の 2000mm 長さのロッドに接続されており、このロッドは後述する大振動子となる接続振り子の一部となる。

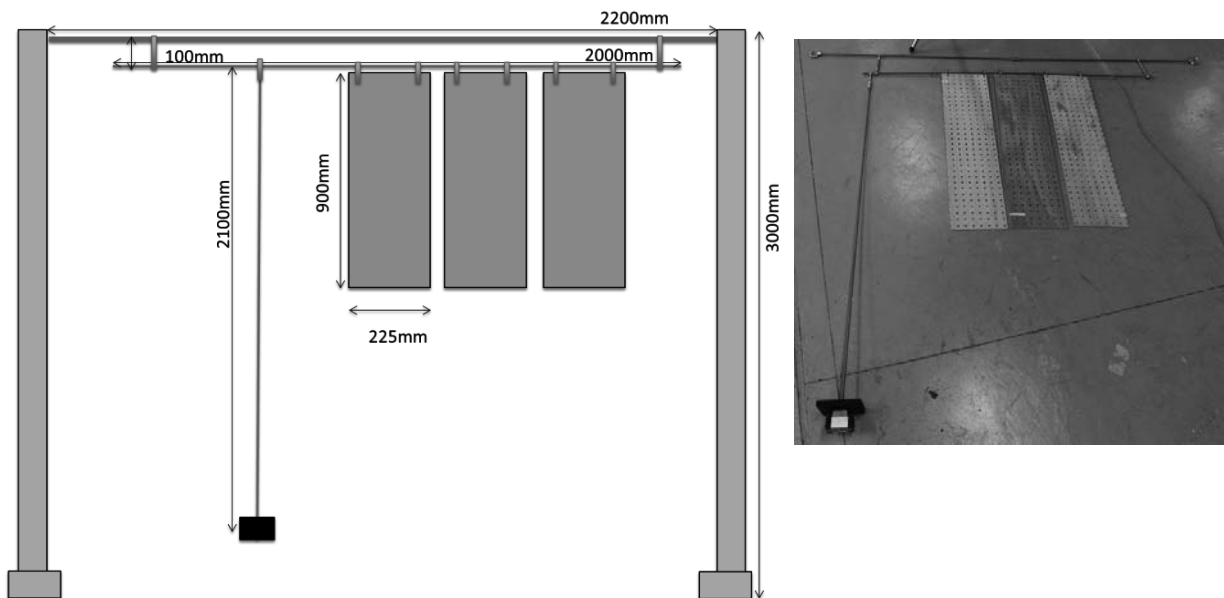


Fig.1 Schematic figure and photograph of the multiple pendulum with energy transfer mechanism

同様にこのロッドには、すべり軸受けを介して加振振り子からエネルギーを取り出す受信振り子を取り付けられている。この受信振り子は 2100mm の長さの柄から成り、先端には加速度センサーが取り付けられた錘がついている。今回は加速度が十分でなかったことから、このセンサーの値は使われていない。この受信振り子は、自由振動子であり、今回は発電機やダンパー等は取り付けられていないが、軸受け等でエネルギー減衰が発生しているものと考えられる。実測したところ、この受信振り子自身の固有周期は 2.5s であった。

一方、前述の 2000mm 長さのロッドと 2200mm 長さの別のロッドは、すべり軸受けを介して 100mm 長さの取り付け金具で接続されており、大振り子となる接続振り子として働く。接続振り子自身の固有周期は実測したところ、0.5s であり、加振振り子や受信振り子よりも十分に振動数が高い。Grover アルゴリズムによって設計された多体振動系の場合、接続振り子の固有周期は特定の条件式により定められるが⁽⁴⁾、加振振り子よりも振動数が高い場合、近似的にこの条件は満たされることから、今回は特に考慮しない。以下では、この接続振り子を介して、どのような多体振り子の設計条件で、加振振り子から受信振り子へとエネルギーが流れるかについて考察を進める。

2・2 実験設備および実験条件

今回用いた造波装置は佐賀大学海洋エネルギー研究センター内にある三井造船製、二次元造波水路である。この装置は、図 2 に示すような 800mm 幅、1000mm 深さ、10m 長さ流路において、異なる周期での造波が可能である。この流路をまたぐ形で 3m 高さの固定台 2 本を設置し、その間に多体振り子を吊りした (図 2)。波力を受けるペニア板は水中に 300mm 入る位置に設置したが、木材であったため板は浮き上がり 30° の傾きを持った。今回の実験では、造波の加振力は上下方向に働くが、斜めの板により振り子の振動が発生した。

実験条件として、造波する波高 50mm の波の周期を 0.9~3.0s まで、0.1s ずつ変化させた。各波の実験時間は 30s し、定常状態における各波の振幅は一定とした。多体振り子の振動は、側面の固定カメラで撮影し、定常状態達成後の様子から受信振り子の振幅を測定した。

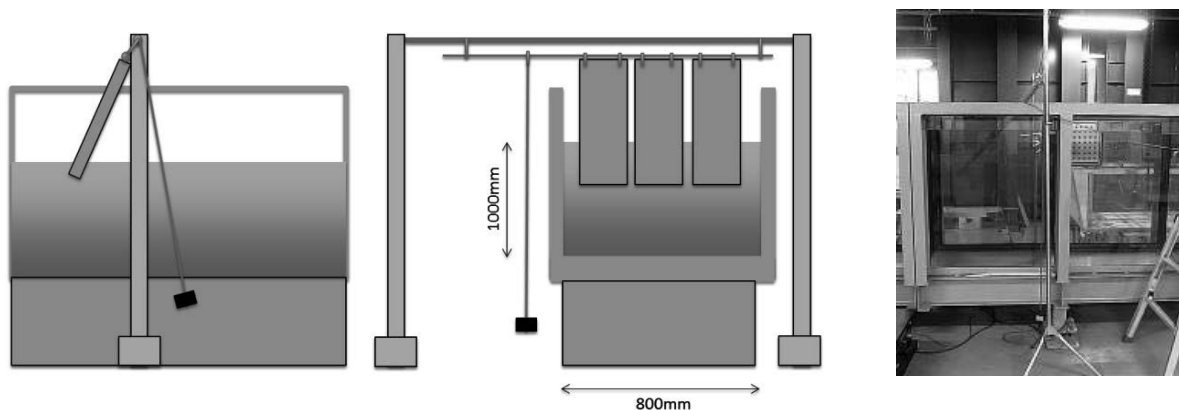


Fig.2 Schematic figure and photograph of the multiple pendulum with the wave generator waterway

3. 実験結果および考察

3・1 エネルギー移動量の周期依存性

設計により多体振り子に内在させたエネルギー移動機構が働いた場合、波力によって加振された加振振り子の振動エネルギーは、受信振り子へと移動し、定常状態での受信振り子の振幅は増加することが予想される。一般に振動エネルギーは最大振幅の二乗に比例することから、これはエネルギー移動量を表すものと考えられる。そこで加振により定常状態に宣した後の受信振り子の振幅と、造波された波の周期との関係について調べてみた (図 3)。

図 3 に示すように、受信振り子の振幅は、波の周期が 1.3s の場合と 2.3s の場合において最大値を示した。受信振り子の固有周期は 2.5s であることから、後者は共振周波数であると考えられるが、前者の条件はその半分であり、別な機構が働いていることが予想された。共振周波数と加振周波数がずれた原因は、多体振り子の連成振動による影響であると考えられる。

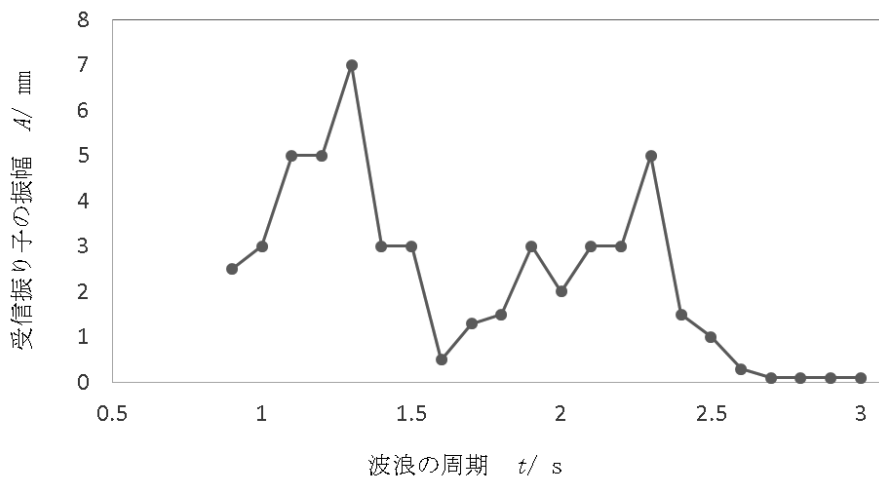


Fig.3 Relation between wave period and amplitude of energy-received pendulum

3・2 Grover アルゴリズムによるエネルギー移動機構

前節で示された振り子間のエネルギー移動の現象を Grover アルゴリズムによるエネルギー移動機構として説明を試みる⁽⁷⁾⁽⁹⁾。いま、以下に示すような多体振り子からなる振動系を考える。振り子の振幅は十分に小さいものとし、線形近似が成り立つものとする。この系においては、一つの大振り子が壁から吊るされており、これに二つの小振り子がつながっているものとする。大振り子の質量を M 、柄の長さを L とし、一つ目の小振り子の質量を m_1 、柄の長さを l_1 、二つ目の小振り子の質量を m_2 、柄の長さを l_2 とする。いま m_1 が m_2 よりも十分に大きい場合、小振り子の全体の重心は一つ目の小振り子に大きく依存し、二つ目の小振り子の変化に対してあまり影響を受けない。そのため、一つ目の小振り子の角振動数 ω_1 を考慮することで、小振り子の全体の重心と大振り子とからなる二体振動系の連成角振動数である ω_+ と ω_- の近似値が定義できる。いま大振り子を以下の式のように設計することで、連成角振動数はそれぞれ、 $\omega_+ = (p+1/2)\omega_1$ 、 $\omega_- = \omega_1/2$ となる。ここで p は整数であることから、この多体振動系全体には内部共振が生じる。

いま、一つ目の小振り子と比べて質量が小さな二つ目の小振り子の角振動数 ω' を、連成振動の固有周期である $\omega_- = \omega_1/2$ に近づけるものとする。すると一つの大振り子と一つ目の小振り子からなる連成振動のうちの低い周波数のエネルギーが、二つ目の小振り子の角振動数と共振して、二つ目の小振り子へとエネルギーが流れていくことが予想される。また一つ目の小振り子が外部から加振された場合、そのエネルギーの一部は先ほどの連成振動へと流れ込む。よって、二つ目の小振り子の角振動数を $\omega_- = \omega_1/2$ に近づけた場合、外部からの加振エネルギーが二つ目の小振り子へと流れ込むことが分かる。

今回の場合、質量の大きな一つ目の小振り子は加振振り子であり、波から加振を受ける。一方、質量の小さな二つ目の小振り子は受信振り子であり、角振動数を加振振り子の半分に近づけることで、エネルギー移動が発生したことが分かる。一般にこうした固有振動が半分となる振動子へのエネルギー移動の現象は、オートパラメトリック共振⁽¹⁰⁾として知られるが、これは Grover アルゴリズムによるエネルギー移動機構としても説明できることが分かる。

3・3 受信振り子を用いた発電

以上のように受信振り子の固有周期を加振振り子の倍とし、接続振り子の固有周期を加振振り子よりも十分に小さくすることで、加振振り子から受信振り子へとエネルギー移動ができる多体振動系が設計できることが分かる。一般に波力を受ける受信振り子は、天候によりエネルギー差の大きな加振を受け、また振動数が一定ではないことから、これに直接発電機を取るつけることは、機器の故障や発電する電気の質を低下させることに繋がる。一方、発電機を受信振り子に接続させることで、一定のエネルギーを波力から移動させながら、周波数を大きく変化させることのない電力を発電できる可能性があることが分かる。

今回の実験では、造波機の波の運動が主として上下方向であったことから、振り子に大きなエネルギーを与えることは難しく、大きな発電を観測することはできなかった。この多体振り子装置を海岸線の水平方向の波の動きに適応すれば、さらに得られるエネルギーは大きくなるものと予想されるが、今回はその可能性を示すことで結論としたい。また今回提案した多体振動系は、接続振り子に多数の加振振り子をつなぐことで、より広範囲の波力エネルギーを一か所の受信振り子に集中させることができるものと期待されるが、機械的なシステムであるため、波浪の状況によっては強度が保てないなどの問題があり、さらなるアイデアを必要とするものと考えられた。

4. 結 語

多体振り子における振動子間のエネルギー移動機構を用いることで、波力を受ける加振振り子から、自由に振動する受信振動子へ、振動エネルギーが流れることを実験によって確かめた。その結果、波の周期の倍の固有周期を持つ受信振り子を設計することで、より効率的にエネルギー流れが生じる様子を確認した。

謝 辞

本研究を実施するにあたり、佐賀大学海洋エネルギー研究センター、海洋流体エネルギー分野の永田修一教授、今井康貴准教授、松永技官には大変ご尽力をいただきました。記して感謝いたします。

文 献

- (1) 渡部富治, 実用に向かう波力発電, パワー社 (2009).
- (2) 渡部富治, “波浪エネルギーの利用”, 精密機械, Vol. 50, No. 7 (1984), pp. 1166-1172.
- (3) Imai, Y., Nagata, S., Toyota, K., Murakami, T. and Setoguchi, T., “Conversion Efficiency of Floating Pendulum Wave Energy Converter in 2D Regular Waves”, International Symposium on Marine and Offshore Renewable Energy (2013).
- (4) 高田宗一郎, 小竹茂夫, 鈴木泰之, “一振動子に結合された内部共振衝突振動系に現れる周期的な完全概周期振動の波動アルゴリズムによる解析”, 日本機械学会論文集C編, Vol. 77, No. 773 (2011), pp. 14-27.
- (5) Grover, L. K., “Quantum Computers Can Search Arbitrarily Large Databases by a Single Query”, Physical Review Letter Vol.79, No.23 (1997), pp. 4709-4712.
- (6) Patel, A. D.: Wave Algorithm: Optimal Database Search: Wave and Catalysis, International Journal of Quantum Information Vol.4, (2006), pp. 815-825.
- (7) 内田秀範, 小竹茂夫, 鈴木泰之, “Grover アルゴリズムによる空間コヒーレントな波動エネルギーの集中”, 日本機械学会論文集B編, Vol.76, No.761 (2010), pp.85-94.
- (8) Shigeo Kotake, Hidenori Uchida and Yasuyuki Suzuki, “Mechanism and Efficiency of Power Generation from Accumulating Spread-Coherent Energy -Application of Wave Algorithm-”, Proceedings of International Conference on Power Engineering (ICOPE-09), (2009).
- (9) Kotake, S., Yagi, K. and Takata, S., “Optimal Sampled-Data Vibration Manipulation Function for One Mass-Spring System Obtained from Three Vibro-Impact Oscillators under Grover Algorithm”, Proceeding of the 12th International Conference on Motion and Vibration Control (2014) in press.
- (10) Tondl, A., Rujigrok, T., Verhulst, F. and Nabergoj, R., Autoparametric Resonance in Mechanical Systems, Cambridge University Press (2000).