海洋エネルギーを利用した 海水中リチウム採取システムの開発 (第1報)

正員 湯川 和 浩* 正員 星野 邦 弘** 正員 齊藤 昌 勝***

Development of a Floating System to Extract Lithium Dissolved in Seawater
Using Ocean Energy (1st Report)

by Kazuhiro Yukawa, *Member* Kunihiro Hoshino, *Member*
Masakatsu Saito, *Member*

Summary

In recent years lithium has been used increasingly as a second battery, particularly in the field of electric information device, because of its high energy density and output voltage. However, we import the necessary amount of lithium from foreign countries since there is no available lithium mine in Japan. In order to secure constantly a sufficient amount of lithium in Japan, special attention has been paid to lithium ion dissolved in seawater. A recent estimation indicated that at least 200 billion tons of the lithium ion are dissolved in the whole seawater. We propose a floating system to extract lithium from seawater using such ocean energies as sea wave and sea current. For three years from 2000 to 2002, we performed several investigations to develop techniques for practical use of the floating system. In this paper, we report the results of our investigations, as the first step toward the practical use.

1. 緒 言

リチウムは様々な分野で用いられている物質であるが、特に近年では、その優れた特性からノート型パソコンを始めとする電子情報機器の二次電池としての需要が増えている。ところが、我国には採掘可能な陸上のリチウム資源が存在せず、全量を輸入に頼っているのが現状であ

り、資源の安定確保が重要な課題となっている。世界的に見ても、約1400万tonある経済的採取が可能な陸上のリチウム資源も年間消費量が今後大幅に伸びることを想定すれば、やがて枯渇に近づくと考えられる¹⁾。こうした状況の中で、海水中に含まれるリチウムイオンが資源として注目を集めている。現在、海水中に含まれるリチウムイオンは約2000億tonであると推定されており、これを採取する方法の一つに吸着剤を用いる方法がある。独立行政法人 産業技術総合研究所 四国センターでは平成10年度より高性能吸着剤の開発を進めており、現状で1gあたり約32mgのリチウムイオンを吸着できる粒状吸着剤が開発されている。吸着剤にとって理想的な状態は、高濃度のリチウム含有海水と吸着剤が常に均等に混合している流動床状態である。

* 海上技術安全研究所 海洋開発研究領域

** 海上技術安全研究所 環境・エネルギー研究領域

*** 海洋科学技術センター 深海地球ドリリング計画推進室

Fig.1 General view of the system

Table 1 Dimensions of the system

Area of float	20 m × 20 m
Diameter of column	2 m
Height of column	40 m
Displacement	400 ton
Quantity of adsorbent	300 ton
Amount of extraction	60 ton/year

以前、広島大学では船舶を利用した吸着船が検討された²⁾。その吸着船は、船側に設置した48台のポンプで船体内部に取り入れた海水をタンク底面のスリットから噴出させ、流動床を形成して吸着剤にリチウムを吸着させる方式である。ポンプを使用するため、安定した流動床を形成できるというメリットがある反面、48台のポンプを駆動させるために大量の化石燃料を消費することやポンプの信頼性、さらには荒天時において稼働できないなどの問題点がある。

そこで本研究では、波浪や海流などの自然エネルギーを利用した全天候型の浮体式リチウム採取システムを提案する。このシステムは、前述した粒状吸着剤を積層する流動床発生装置とそれを支持する係留浮体から構成され、実用化に向けた技術開発、試設計およびリチウム採取コスト算出による経済性評価を実施する。本研究の実施期間は平成12年度から14年度までの3年間であり、12年度および13年度は要素技術の開発、そして最終年度は各研究成果の統合、システムの試設計および経済性評価の期間としている。本論文では、提案するリチウム採取システムの骨子となる流動床発生装置に着目し、(1)流動床の発生状況と基本性能の把握、(2)吸着剤積層部の透過流速算定、の2点を目標として平成12年度から13年度初めまでに実施した研究の成果を報告する。

2. リチウム採取システムの概要

本研究で提案するリチウム採取システムは、流動床発生装置と係留浮体から構成される。使用する吸着剤は直径1mm程度の球形であり、吸着剤積層部の壁は細かいメッシュ構造(吸着剤の流出防止)とするため所要の透過速度を得ることが難しい。流動床発生装置は波浪エネルギーを利用して積層部に海水を送りこみ、吸着効率の高い流動床状態を作り出すための装置である。また、海流によって常に新しい海水が供給される沖合を設置海域とするため、維持管理や吸着剤の回収等の期間を除いて100%の稼働率を確保し、台風のような厳しい海象条件でも耐えられるような係留浮体が必要となる。Fig.1とTable 1にシステムのご概念図および諸元を示す。

流動床発生装置は波浪エネルギーを吸収するフロートと吸着剤積層部に海水を送り込む逆止弁付ピストンシリンダからなる。係留浮体は4本のコラムからなり、吸着剤積層部と流動床発生装置を支持する。また、波浪による浮体の動揺抑制と強流で流されないように、合成繊維ロープ等による係留を採用する。

3. 想定設置海域の海象条件

本システムの想定設置海域に関する海象データを収集した。海水温度が高い方が吸着効率が良いという吸着剤の性質や海水交換に必要な流速を考慮し、黒潮の中に設置することを想定した。具体的には紀伊水道南方沖約100kmと薩摩半島西方沖約100km近傍(半径200km程度以内)を想定設置海域とし、システムの稼働率推定、強度設計およびリチウム採取量推定に必要なデータを得るために、既存海象データの収集・整理を行った。海上における風と波に関するデータは、当所の公開成果“Database of Winds and Waves in the North Pacific”(http://www.nmri.go.jp/wavedb/wave2.html)³⁾に基づき推算した。すなわち1980年から1989年までの10年間の波浪追算を行うことで得られた年間出現頻度分布表を使用した。年最大値の推定には、極値統計における極値I型(Gumbel分布)を適用した。風速、有義波高および有義波周期に関する年平均値と年最大値の推定結果をTable 2, Table 3に示す。海流速度については、海上保安庁水路部がホームページ上で公開している海流推測図(http://www1.kaiho.mlit.go.jp)に基づいて推算した。1996年1月から2002年3月までの海流デー

Table 2 Estimated results of wind velocity

	mean	max.
Kii waterway	12.62 kt	55.81 kt
Satsuma peninsula	13.42 kt	55.85 kt

Table 3 Estimated results of wave height and wave period

	mean		standard dev.	max. wave height	max. wave period
Kii waterway	1.73 m	7.06 s	0.885	6.39 m	12.5 s
Satsuma peninsula	1.78 m	6.91 s	0.925	6.64 m	11.6 s

Table 4 Estimated results of current velocity

	mean	max.	min.
Kii waterway	2.99 kt	4.50 kt	1.50 kt
Satsuma peninsula	2.21 kt	3.50 kt	1.00 kt

Table 5 Dimensions of the model

Area of float	0.36 m × 0.5 m
Depth of float	0.05 m
Draft of float	0.02 m
Draft of model	0.38 m

Fig.2 Monthly transition of sea conditions

タ値から推算した結果を Table 4 に示す。また、リチウム採取量推定に必要なデータとして、月ごとの有義波高、有義波周期および平均水温の推移を求めた。ただし、水温については海上保安庁水路部が公開しているデータのうち、海流と同期間における月ごとの 100m 層水温水平分布図を用いた。その結果を Fig.2 に示す。

4. 流動床発生装置の開発

4.1 流動床発生装置の概要および流動床状態の計測

本研究で開発する流動床発生装置の流速発生機構には、Fig.1 に示すような大口径シリンダと逆止弁付平板ピストンを採用する。フロートが波力を受けて上下運動することで、ピストンは吸着剤積層部との間で係留浮体に対して相対運動を起こし透過流速が発生する。そこで、流動床発生装置の相対運動およびピストンによる誘起流速の周波数特性、さらに流動床の発生状況や流動床内部に供給される流体の流れを定性的に把握するために、当所の二次元水槽（長さ 36m、幅 1m、深さ 2m）において模型試験を行った。供試模型の諸元を Table 5 に示す。

計測項目は入射波高、フロート上下変位、吸着剤積層部の流速分布および流動床状態とした。また、ピストン

Photo 1 Generation of fluidized bed

による誘起流速に対する抵抗要素として吸着剤の量を考慮し、吸着剤積層部の容積に対する割合を 0%, 15%, 30% および 45% と変化させた。その際、定性的特性を把握するためコラムの運動は全て拘束した状態で計測を行った。入射波は波高 6cm の規則波とし、周波数を 0.5Hz~1.2Hz まで変化させた。

Photo 1 に流動床の発生状況を撮影した一例を示す。入射波の周波数は 0.6Hz、吸着剤の積層量は積層部容積の 40% であり、流動床が発達する様子が良くわかる。Fig.3 は、吸着剤積層部の無い状態について相対運動の周波数応答関数を示したものである。0.65Hz にピーク、0.8Hz に谷が見られる。ピークは相対運動が入射波に同調していることを表しており、この同調周波数を設置海域の最頻波周波数に合わせて設計する必要がある。また、Fig.4 は吸着剤の積層量を変化させた場合について、相対運動の周波数応答関数を示したものである。一般に流れに対する抵抗要素が大きくなると応答関数のピークは低くなだらかになり、付加質量が大きくなるとピークは低周波側にシフトする。図の結果では、吸着剤積層部が無い場合に比べてピークがなだらかになり、吸着剤を入れたことでピークが低周波側に若干シフトしているものと考えられる。ただし、吸着剤の量による影響はそれ程顕著には現れていない。

4.2 流動床状態の推定

流動床状態をシミュレーション計算で推定する場合、離散粒子モデルを用いると粒子の並進運動と回転運動は、

Fig.3 Frequency response amplitude operator

Fig.4 Frequency response amplitude operator

比較的容易に取り扱うことができる。

$$\text{並進運動: } \ddot{\vec{r}} = \frac{\vec{f}_F}{m} + \vec{g}, \quad \text{回転運動: } \ddot{\vec{\omega}} = \frac{\vec{T}}{I} \quad (1)$$

ただし、 $\vec{r}$ は位置ベクトル、 $\vec{\omega}$ は角速度、 m は質量、 $\vec{f}_F$ は流体力、 $\vec{g}$ は重力加速度、 $\vec{T}$ はトルク、 I は慣性モーメントを表す。ここで、流体力とトルクが未知数であり、それらを求めるには、粒子に働く流体抵抗に加えて粒子同士または粒子と壁との衝突・接触による力やモーメントといった相互作用の力も考える必要がある。

シミュレーション計算では計算領域を小さなセル (粒子半径以上) に分割し、着目粒子に働く流体抵抗と衝突・接触力を粒子数だけ繰り返し計算する。ここで、簡単のため粒子は流体抵抗を受けるが流体は粒子の運動の影響を受けないという仮定を設けると、個々の粒子に働く流体抵抗はセル内の透過流速と粒子の速度から計算できる。ただし、各セル内の透過流速は次式に示すボイド率 (流体の体積率) から求まる。

$$\varepsilon = 1 - \frac{V_P}{V_C} \quad (2)$$

V_P は粒子の体積、 V_C はセルの体積を表す。また、各粒子に働く流体抵抗は上式のボイド率を用いたエルガンの

式から次のように表すことができる。

$$F_D = \frac{\pi}{6} D \frac{\mu(1-\varepsilon)}{\varepsilon^2} \left\{ 150(1-\varepsilon) + 1.75R_e \right\} \left(\frac{u_0}{\varepsilon} - v \right) \quad (3)$$

ここで、 μ は流体粘度、 R_e はレイノルズ数、 u_0 は流体の速度、 v は粒子の速度を表す。

粒子と壁との衝突・接触により働く相互作用の力は、壁面と衝突・接触している粒子の判定を行い、壁面に対して対象な位置に仮想粒子を置くことで仮想粒子との衝突・接触問題に置き換えることができる。一方、粒子同士の衝突による粒子の変形は、粒子同士のオーバーラップ幅に置き換えて考える。また、粒子同士の接触に関しては、ばね・ダッシュポットに基づく接触力の考え方を採用する。従って、接触点における相対速度の法線方向および接線方向成分を計算し、ばね・ダッシュポットによる接触力の法線方向と接線方向成分を求める。そして、接触力の接線方向成分が動摩擦係数を超えたら接触面で滑りが生じたと判定し、滑りによる接線方向成分を滑りによる摩擦力に置き換え、接線方向の変位に累積する。

以上のように、接触面における相対速度の接線方向成分から新しい接線方向変位量を計算し、粒子同士が滑るか否かの判定を行うことで、着目した粒子に衝突・接触する粒子との接線方向変位と次式に示す接触力 (法線方向成分および接線方向成分) の計算が可能となる。

$$\text{法線方向: } f_{Cn} = (-k_n \delta_n - \eta_n v_{rn}) \quad (4)$$

$$\text{接線方向: } f_{Ct} = (-k_t \delta_t - \eta_t v_{rt}) \quad (\text{滑りなし}) \quad (5)$$

$$f_{Ct} = -\mu_f |f_{Cn}| \quad (\text{滑りあり}) \quad (6)$$

$$\text{トルク: } M_{Cz} = f_{Ct} R \quad (7)$$

ただし、 k はばね定数、 δ はオーバーラップ幅、 η は粘性減衰係数、 μ_f は動摩擦係数、 v_r は相対速度、 R は粒子半径であり、添え字の n, t は法線方向と接線方向の成分を表す。従って、上式から流体抵抗、接触力およびトルクを計算し、それらの結果を用いて (1) 式の運動方程式を解くことで、個々の粒子の運動が求まる。

Fig.5 に計算結果の一例を示す。Photo 1 と同様に下からの流れにより吸着剤粒子がまき上がり、流動床状態となる様子がわかる。今後は粒子の運動と周りの流体との相互作用を考慮に入れ、透過流速やボイド率などの計測結果と定量的な比較を行うことで推定精度の向上を目指す必要がある。

5. 係留浮体の開発

5.1 係留浮体の概要

係留浮体は流動床発生装置を海水中で支持するものであり、以下の2点を満足させる。

(1) 流動床発生装置の動作に伴う反力を支えるため、大きな質量が必要

(2) 流動床発生装置との相対運動を確保するため、浮体の動揺を極力小さくする

以上の条件を満たすため、4本コラムの浮体を合成繊維ロープで係留するシステムを採用する。コラム式の浮体は水線面積が小さいため波浪外力と上下変位の復原力が小さい。吃水を大きく設定してバラスト水を用いることで流動床発生装置の動作反力を支えるのに必要な質量が確保できる。さらに、浮体の上下変位同調周波数よりも低周波側にシフトさせて波浪中動揺を小さく抑え、横揺れ・縦揺れに対する復原力を確保することができる。

5.2 係留索の概要

合成繊維を用いた深海係留の場合、伸びが変動力を吸収するため、水深が深くなるにつれて変動反力よりも定常反力の寄与が相対的に増加する。Fig.6は、ランプマス法によって係留反力を計算した結果である。水深990m、索長1580m、アンカー点・係留点水平距離990mの条件で海流表面流速を変えて、直径100mmの合成繊維係留索の係留反力を計算した。流れはアンカー点から係留点方向に流れているものとし、深さ方向の流速はFig.7に示すように今脇らによって報告されている四国沖の黒潮の速度分布⁴⁾を簡略化して用いた。

5.3 波浪中動揺試験

流動床発生に及ぼす係留浮体の動揺影響を調べるために、リチウム採取システムの1/40スケールモデルを製作し、当所の海洋構造物試験水槽で波浪中動揺試験を行った。供試模型の概観をPhoto 2に示す。計測項目は入射波高、フロート上下変位、係留浮体の動揺運動、吸着剤積層部の透過流速、流動床の発生状況、逆支弁の挙動および係留反力である。吸着剤積層量は積層部容積に対す

る50%とした。また、供試模型の重心高さに合わせた係留点から緊張係留を行った。入射波は波高5cmの規則波とし、周波数を0.4Hz~1.2Hzまで変化させた。さらに、吸着剤積層部の底面にスリットを設けた模型も制作し、スリットの有無による特性の違いも調べた。これは、スリットによって吸着剤積層部への流れに攪乱を与え、流動床状態を効率良く形成させることを目的としている。Fig.8に相対運動の周波数応答関数を示す。スリットなしでは、Fig.4に示すコラムの運動を全て拘束した場合と同様な特性があり、係留浮体の動揺による影響は小さいことがわかった。また、実機スケールで比較すると、想定設置海域における最頻波周波数に比べて低周波側にピークが現れている。先に述べたように吸着剤の積載量を変化させても周波数応答関数に顕著な違いは現れなかったため、コラムの吃水を大きくしたり、ピストンシリンダの容積を小さくして付加質量を減らすことで、ピークを高周波側にずらす設計を行う必要がある。Fig.9は吸着剤積層部の透過流速を計測した結果である。積層部の下から上へ透過する流速の最大値を平均したもので、積層部底面にスリットを設けた方が透過流速が大きいことがわかる。相対運動の周波数応答関数に比べてピークが高周波側にずれているのは、波周波数によって

Fig.6 Calculated result of tension

Fig.7 Vertical distribution of current velocity

Fig.5 Calculated results of fluidized bed

Photo 2 General view of the model

逆支弁の挙動（開度）が異なり、ピストンシリンダ内に取り込まれる流量に差が生じているためと思われる。透過流速はリチウム吸着量と密接に関わる重要な設計パラメータであるため、ピストンの挙動、逆支弁の挙動および透過流速の相互関係を十分に把握する必要がある。

6. 結 言

本論文では波浪や海流などの自然エネルギーを利用した全天候型の浮体式リチウム採取システムを提案し、想定設置海域の海象データおよびリチウム採取システムを構成する流動床発生装置と係留浮体に関する要素技術の研究結果を報告した。流動床発生装置については、模型試験によって流動床の発生状況と基本的な性能を把握し、シミュレーション計算で定性的にその傾向を捉えることができた。定量的な比較に関しては、例えば吸着剤積層部におけるボイド率や海水交換率を計測して比較する必要があると思われるが、これらは第2報で報告させていただきたい。シミュレーション計算の精度を向上させたい。吸着剤積層部の透過流速からリチウム吸着量を推定することが今後の課題となる。また、係留浮体については係留反力の計算を行い、さらに波浪中動揺試験によってピストンと係留浮体の相対運動に関する周波数応答関数を求めた。想定設置海域の最頻波周波数に比べて応答関数のピークが低周波側にあるため、実機を設計する場合には設置海域に合わせてコラムの吃水やピストンシリンダのサイズに変更を加え、ピークを高周波側にシフトさせる必要がある。今後は各研究成果を統合し、システムの試設計および採取コスト算出による経済性評価を行う予定である。

謝 辞

本研究は新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の平成12年度産業技術研究助成事業助成金によって行わ

Fig.8 Frequency response amplitude operator

Fig.9 Measured penetration velocity

れたものであり、関係各位に謝意を表するものである。

参 考 文 献

- 1) 西山 孝：鉱物資源の現状，アルム出版社 (1989)。
- 2) 信川 寿，北村 充，周 国強，小田 薫，大井健太：海水中に溶存するリチウム採取システムについて，日本造船学会論文集，第183号 (1998)，pp.309-313。
- 3) 渡辺 巖，富田 宏，谷澤克治：北太平洋の波と風 (1974~1988)，船舶技術研究所報告，別冊第14号 (1992)。
- 4) 今脇資郎，内田 裕，市川 洋，深澤理郎，馬谷紳一郎，ASUKA グループ：四国沖で得られた黒潮の流量の時系列，海洋気象学会論文集，第74巻 第2号 (1998)，pp.79-86。