

海洋温度差発電と海水淡水化複合プラントの シミュレーションモデル*

後藤聡^{*1}, 中村翔^{*1}, 杉剛直^{*1}, 池上康之^{*1}

Simulation Model of Integrated OTEC and Desalination Plant

Satoru Goto^{*2}, Syo Nakamura, Takenao Sugi, Yasuyuki Ikegami

^{*2}Saga University, 1 Honjomachi, Saga, 840-8502, Japan

Energy and water are indispensable for human life. Fossil fuels such as oil and coal are usually used for power generation, however, the environment impact of these thermal power generation is relatively large. Moreover, shortage of water caused by a population increase and global warming also become a serious problem. In order to solve these energy and water problems at the same time, an integrated plant of the ocean thermal energy conversion (OTEC) system and desalination system has been developed. In this research, a simulation model of the integrated OTEC and desalination plant was constructed.

Key Words : OTEC, Uehara Cycle, Desalination, Spray Flash Evaporation, Simulation Model

1. 緒 言

現在, 我々が社会生活を営むにあたって, エネルギーおよび水資源の安定供給は重要な課題である。これまでわが国は, エネルギーの多くを石油や石炭, 天然ガスといった化石エネルギーに依存してきた。これら化石燃料の燃焼による二酸化炭素および窒素酸化物排出量の増加によって, 地球温暖化や大気汚染等の深刻な問題を引き起こす結果となった⁽¹⁾⁽²⁾。化石燃料に比べて二酸化炭素や窒素酸化物等の排出なしにエネルギーを供給できる原子力も利用されているが, 原子力燃料の管理や放射性廃棄物の処理等の問題がある。そこで近年, 太陽光発電や, 風力発電, 地熱発電などの再生可能エネルギーが注目されつつある^{(3)~(5)}。

海洋温度差発電 (OTEC: Ocean Thermal Energy Conversion) とは, 温海水と冷海水の温度差から電気エネルギーを取り出す発電方法である^{(6)~(8)}。海洋温度差発電では自然エネルギーを利用しているため, 発電時に二酸化炭素の排出が無く, 環境にやさしい半永久的に利用可能なエネルギーとして期待されている。一方で, 海洋温度差発電では, 海水の自然エネルギーを用いているため, 季節や一日を通じた水温の変化への対応や, 火力発電などと比べ熱効率が低いという問題がある。

水資源に関しては, 急激な人口増加, 産業の発達, 生活水準の向上による水需要の増加とともに, 毎年のように起こる夏場の渇水が問題となっている。また, 南洋の島国においては, 電力と同様に飲料水も貴重な資源となっている。この水問題を解決するために, 海水の淡水化技術が重要となる⁽⁹⁾。海洋温度差発電は発電に海水を用いることから, その海水を利用した淡水化が可能である。海洋温度差発電と海水淡水化複合プラントは, 電力と淡水を同時に製造可能となるため, エネルギー問題と水問題を同時に解決する非常に有効なシステムである。

本研究では, 海洋温度差発電と海水淡水化複合プラントのシミュレーションモデルを構成する。提案する海洋温度差発電と海水淡水化の複合プラントのシミュレーションモデルを用いることによって, プラント設計において, 効率の良い出力を得るための条件設定や制御器の設計を行うことができるようになる。

2. 海洋温度差発電と海水淡水化複合プラント

2.1 海洋温度差発電と海水淡水化複合プラントの必要性 水とエネルギーはヒトの生活に不可欠であり, 佐賀大学海洋エネルギー研究センターにおいては, 離島等でも水やエネルギーを確保するために, 海洋温度差発電と淡水化システムの複合プラントを開発している。複合プラントは, 海洋温度差発電プラント単体や淡水化プラント単体と比較してより有効に海洋資源

* 原稿受付 2009 年 2 月 23 日

^{*1} 佐賀大学 (〒 840-8502 佐賀市本庄町 1 番地)
goto@ee.saga-u.ac.jp

を利用できる。また、複合プラントは、二酸化炭素の温室効果ガスの排出が無く、半永久的に利用できるため、前に述べたエネルギー問題と水資源問題の解決手段として期待されている。

2.2 海洋温度差発電 海洋エネルギー研究センターの海洋温度差発電実験装置で採用されているウエハラサイクルについて説明する。ウエハラサイクルは、作動流体に単一流体ではなく、アンモニアと水の混合流体を用いることで発電効率をあげており、通常の発電ではタービンを1個用いているのに対して、タービンを2個用いてタービン1を出た蒸気を抽気することで凝縮器への負荷を減らしている⁽⁷⁾⁽⁸⁾。

ウエハラサイクルの概略を説明する。ウエハラサイクルで用いる主な構成機器は、Fig. 1 に示す凝縮器 (condenser)、加熱器 (heater)、蒸発器 (evaporator)、再生器 (regenerator)、タービン (turbine)、減圧弁 (diffuser) である。海洋温度差発電の発電原理は、作動流体を蒸発器に送り、温海水を使って温め蒸気に変える。蒸発器を通った作動流体は気液分離器に送られて蒸気と液体に分けられ、蒸気はタービン1へ、液体は再生器へと送られる。タービン1へと送られた蒸気は、タービン2を通過して2つのタービンの軸に直結された発電機を回転させることによって発電する。また、タービン1を通過して、液体に戻った作動流体は加熱器へと送られる。タービン2を出た作動流体は吸収器へと流され、ここで減圧弁から流れてくる作動流体と合流して凝縮器へと送られる。凝縮器へと送られた作動流体は、冷海水を使って冷やされ液体となる。凝縮器を出た作動流体はタンクに溜められ加熱器へと送られる。加熱器では凝縮器とタービン1から送られた作動流体を熱交換させる。そして、タービン1から送られた作動流体はタンク2へ流されて再生器へと送られるのに対し、凝縮器から送られた作動流体は再生器へ送られる。次に、再生器では加熱器と気液分離器から流れてきた作動流体とを熱交換させる。そして、加熱器から送られた作動流体は蒸発器へ、気液分離器から送られた作動流体は減圧弁へと送られる。減圧弁の役割は、高圧の気液分離機出口の作動流体と低圧の吸収器入口の作動流体との圧力差の調整である。

2.3 スプレーフラッシュ式海水淡水化 海水淡水化法として、大容量の淡水化装置に適した多段フラッシュ蒸発法や逆浸透膜法が実用化されている⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。しかし、多段フラッシュ蒸発法では海水を加熱する必要があるため、石油などによるエネルギーを大量に必要とし、また、逆浸透膜法では海水に10気圧以上の高い圧力をかけて浸透させるので電力消費が多く、小容

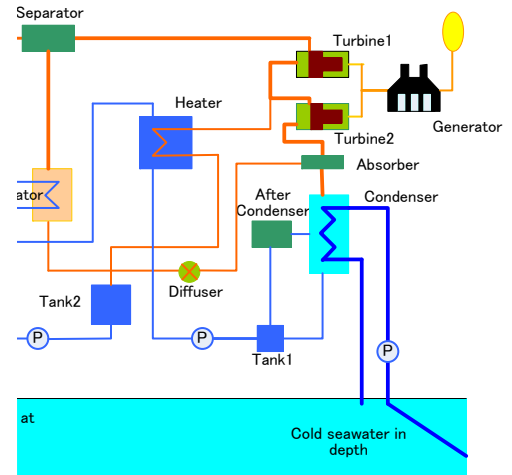


Fig. 1 OTEC system

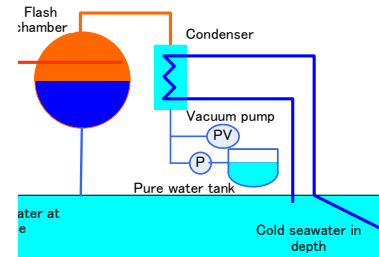


Fig. 2 Spray flash desalination system

量の場合に経済的ではない。そこで、小規模の場合でも海水を低温で、効率よく蒸発させる方法としてスプレーフラッシュ蒸発法が提案されている。スプレーフラッシュ蒸発法は、ある温度の海水をその温度における飽和圧力以下に減圧した容器内にノズルを通して放出し、蒸発させ、容器内で作られた蒸気を凝縮することで淡水を得る手法である⁽¹²⁾⁽¹³⁾。

スプレーフラッシュ式海水淡水化装置の淡水化の原理を説明する。スプレーフラッシュ式海水淡水化装置で使われている主な機器は、Fig. 2 に示すフラッシュ室 (flash chamber)、凝縮器 (condenser)、真空ポンプ (vacuum pump) である。温海水はフラッシュ室へと送られる。フラッシュ室へと流れてきた温海水はスプレーフラッシュ蒸発法を用いて蒸気へと変えられる。蒸発しなかった液体は、フラッシュ室の下部の出口から海へと戻される。蒸発した蒸気はフラッシュ室上部から出て行き凝縮器へと送られる。凝縮器では海洋温度差発電の凝縮器で使われた冷海水を利用して蒸気を凝縮させる。淡水化の凝縮器でできた淡水は淡水タンクに貯えられる。また、凝縮器で淡水にならなかった蒸気は真空ポンプから大気へと出される。

2.4 海洋温度差発電と海水淡水化の統合 海洋温度差発電と海水淡水化を統合することで、温海水と

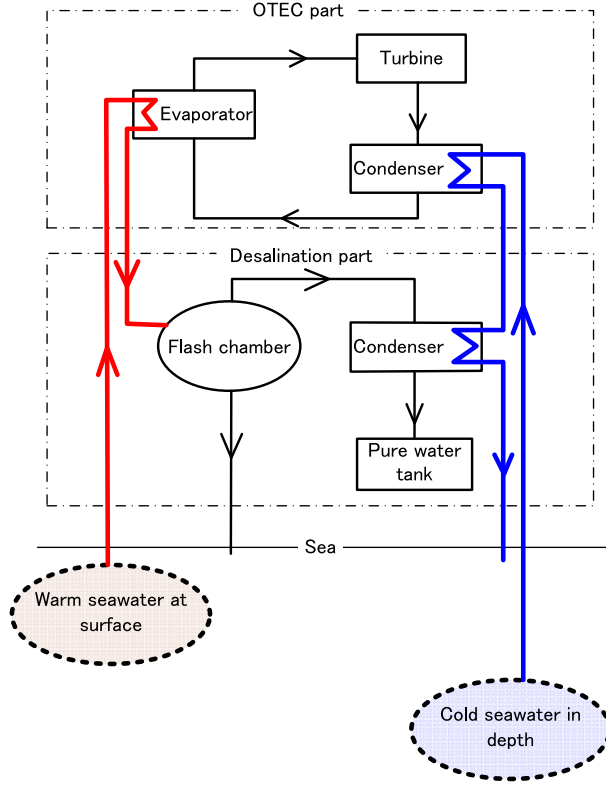


Fig. 3 Integrated hybrid OTEC and desalination system

冷海水との温度差で発電を行い、さらに海洋温度差発電で使った海水と発電した電力を使って淡水化を行う。Fig.3 に海洋温度差発電と海水淡水化システムを統合したプラントの構成を示す。Fig. 3 で示されるように、海水淡水化部に流入する温海水は海洋温度差発電部の蒸発器出口の温海水を利用し、淡水凝縮器に流入する冷海水は海洋温度差発電部の凝縮器出口の冷海水を利用することで、海洋温度差発電と海水淡水化を同時に行うことができる。

3. 複合プラントのモデル構成

3.1 物理則の利用 過去に提案した海洋温度差発電モデル⁽¹⁴⁾と海水淡水化モデル⁽¹⁵⁾を統合することで、複合プラントのシミュレーションモデルを構築する。

これらの熱系プラントのシミュレーションモデルを構築するための物理則は、主に質量保存則とエネルギー保存則である。質量保存則は

$$\frac{dm}{dt} = \dot{m}_I - \dot{m}_O \quad (1)$$

で表され、エネルギー保存則は

$$\frac{d(\dot{m}_V h_{VO} + \dot{m}_L h_{LO})}{dt} = \dot{m}_I h_I - \dot{m}_{VO} h_{VO} - \dot{m}_{LO} h_{LO} \quad (2)$$

で表される。ここで $\dot{m}_I$ は対象とする熱交換器の入口質量流量、 $\dot{m}_O$ は出口質量流量、 $\dot{m}_{VO}$ は出口蒸気質量

流量、 $\dot{m}_{LO}$ は出口液体質量流量、 h_{VO} は出口蒸気比エンタルピー、 h_{LO} は出口液体比エンタルピー、 m_V は機器内の蒸気質量、 m_L は熱交換器内の液体質量を表す。

海洋温度差発電と海水淡水化ともにモデル化するにあたって、熱交換器における熱伝達が重要となる。本研究では、熱伝達のモデルとして、対数平均温度差を利用する。熱通過係数 U は

$$U = U_{SD} \left(\frac{\dot{m}}{\dot{m}_{SD}} \right)^{0.5} \quad (3)$$

で表される。ここで $\dot{m}_{SD}$ は基準となる流量、 U_{SD} は基準となる流量での熱通過係数、 $\dot{m}$ は流量を表す。これは、流量の流れが層流に近い場合に、熱通過係数が流量の 0.5 乗に比例するという関係に基づく。また対数平均温度差 ΔT は

$$\Delta T = \frac{(T_{XI} - T_{YO}) - (T_{XO} - T_{YI})}{\ln \frac{T_{XI} - T_{YO}}{T_{XO} - T_{YI}}} \quad (4)$$

で表され、熱交換器での熱交換量 Q は

$$Q = UA\Delta T \quad (5)$$

で表される。ここで、 T_{XI} は熱交換器の X 側流体の入口温度、 T_{XO} は X 側流体の出口温度、 T_{YI} は Y 側流体の入口温度、 T_{YO} は Y 側流体の出口温度、 A 熱交換器の伝熱面積を表す。

3.2 プロパスの利用 プロパスは物性値解析プログラム (A program package for thermophysical properties of fluid; PROPATH) であり、温度、圧力、組成比、エンタルピー、比容積、乾き度等を計算する関数群で構成される⁽¹⁶⁾。本研究では、海洋温度差発電の作動流体 (アンモニアと水の混合流体) の状態量と海水淡水化の水の状態量の計算にプロパスを用いる。

3.3 統合方法 海洋温度差発電部で使った温冷海水の流量を海水淡水化部に送ることで 2 つのモデルを統合する。海洋温度差発電部と海水淡水化部で必要とされる温海水量と冷海水量が異なるため、両装置の能力を最大限活かせるように、利用する温海水と冷海水の流量のバランスをとることが重要である。淡水化部で利用する温海水流量 $\dot{m}_I^{FL}$ は

$$\dot{m}_I^{FL} = x\dot{m}_O^{EV} \quad (6)$$

で表され、排水する温海水流量 $\dot{m}_{OS}$ は

$$\dot{m}_{OS} = (1-x)\dot{m}_O^{EV} \quad (7)$$

Table 1 Rotated values of OTEC part and desalination part

Name	Value
Power generation (kW)	30
Fresh water production (t/day)	10

Table 2 Initial values

Name	Value
Mass flow rates of warm seawater (kg/s)	194.17
Temperature of warm seawater (°C)	29.0
Mass flow rates of cold seawater (kg/s)	110.56
Temperature of cold seawater (°C)	8.02

で表される。ここで、 $\dot{m}_O^{EV}$ は海洋温度差発電で使用する温海水の質量流量、 x は淡水化装置で利用する温海水の割合である。

淡水化部で利用する冷海水質量流量 $\dot{m}_I^{DCD}$ は

$$\dot{m}_I^{DCD} = y\dot{m}_O^{CN} \quad (8)$$

で表され、排水する冷海水流量 $\dot{m}_{OD}$ は

$$\dot{m}_{OD} = (1 - y)\dot{m}_O^{CN} \quad (9)$$

で表される。ここで $\dot{m}_O^{CN}$ は海洋温度差発電で使用する冷海水の質量流量、 y は淡水化装置で利用する冷海水の割合である。

4. シミュレーション結果

4.1 シミュレーション条件 海洋温度差発電装置と海水淡水化装置は、Table 1 の仕様で設計されている。Table 2 の初期値を用いて、ステップ応答、ランプ応答と正弦波応答のシミュレーションを行った。

4.2 ステップ応答のシミュレーション結果 ステップ応答の結果を Fig. 4~5 に示す。この結果から、一定の入力値 (温海水、冷海水) に対して安定した出力 (発電量、淡水製造量) が得られていることがわかる。

4.3 ランプ変化応答のシミュレーション結果 30 ~ 170 秒の間、温海水流量を 0.1 秒ごとに 0.05kg ずつランプ変化させた。ランプ応答の結果を Fig. 6~7 に示す。この結果から、入力値 (温海水流量のみ) を増加していったとき、出力 (発電量、淡水製造量) も入力の増加に伴って増加していることがわかる。

4.4 正弦波応答のシミュレーション結果 20 秒の地点から、温海水流量を振幅 50kg の正弦波でシミュレーションを行った。正弦波応答の結果を Fig. 8~9 に示す。この結果から、入力値 (温海水流量のみ) を増減を繰り返したときに、出力 (発電量、淡水製造量) も入力の特性に合わせて変化していることがわかる。

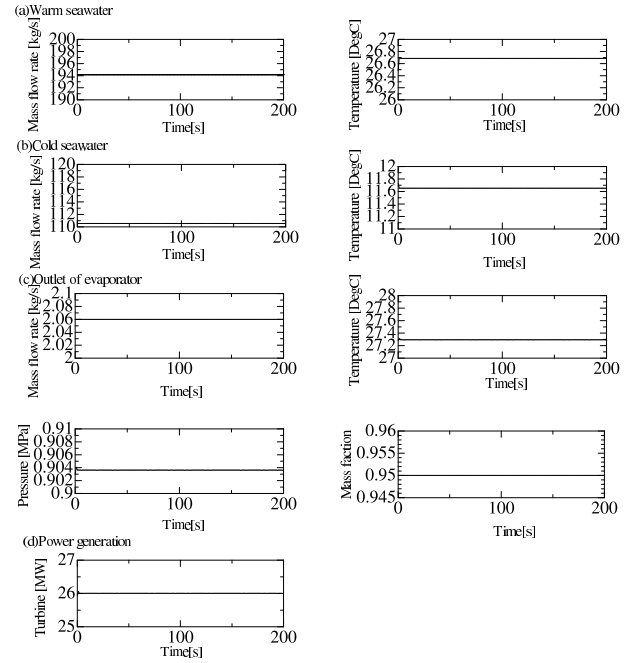


Fig. 4 Step response result (OTEC part)

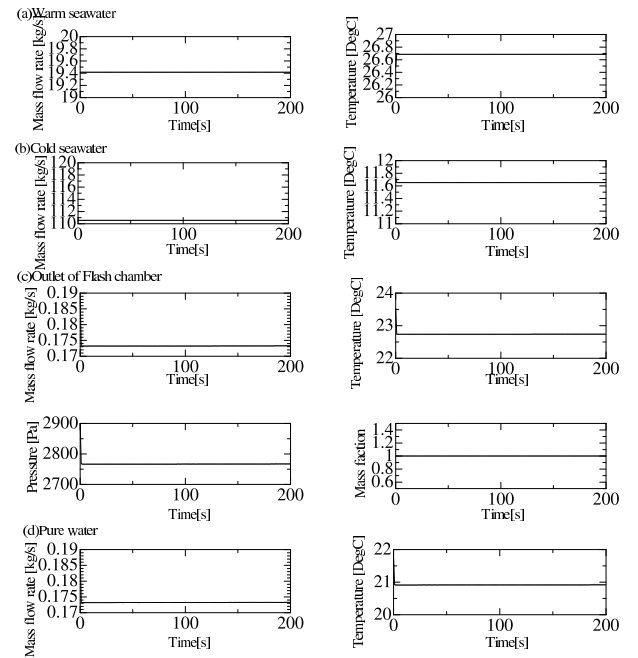


Fig. 5 Step response result (Desalination part)

5. 考 察

5.1 シミュレーション結果について ステップ応答からは、一定の操作量から安定した出力を得られている。またランプ変化と正弦波応答からは、温海水流量の影響を受けるべき箇所は温海水の変化にあわせて変化している。これらの結果から操作量の変化にも対応したシミュレーションモデルが構築できたことがわかる。作成した複合プラントモデルのシミュレーショ

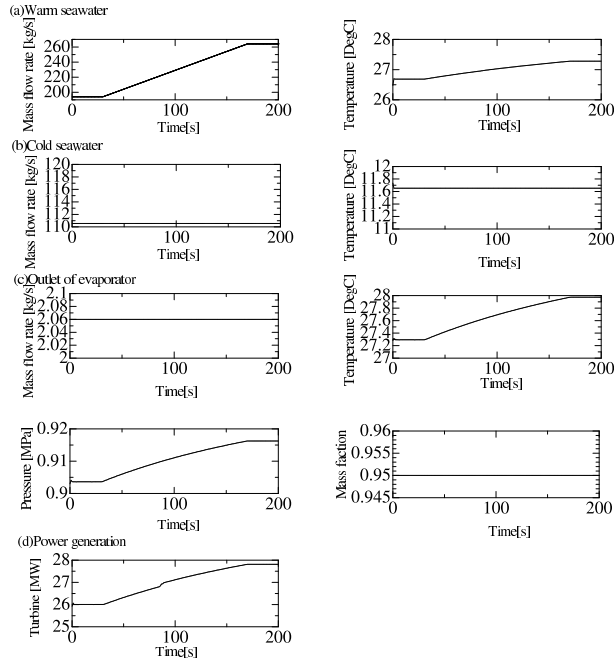


Fig. 6 Ramp response result (OTEC part)

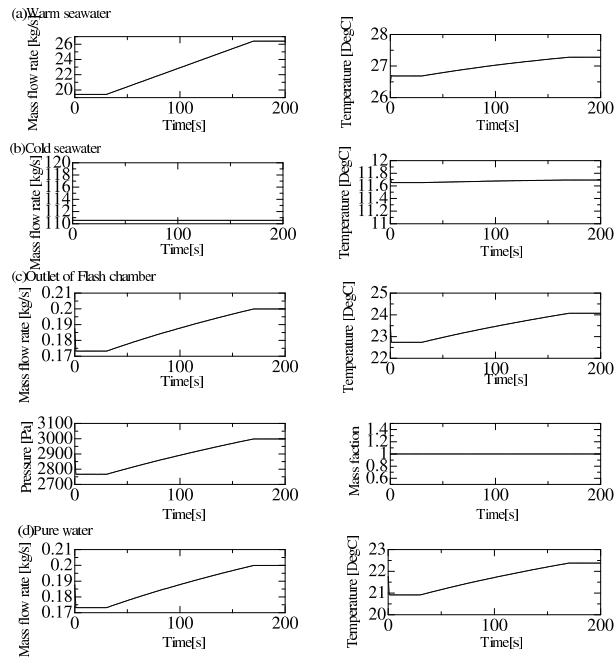


Fig. 7 Ramp response result (Desalination part)

ン結果は、同一の条件下における海洋温度差発電プラント単体のシミュレーション結果および海水淡水化単体のシミュレーション結果と一致することから、統合したシミュレーションモデルは正常に動作していると考えられる。

5.2 複合プラントモデルの用途 提案した複合プラントのシミュレーションモデルを用いることでシミュレーションに基づく制御器の設計や、複合プラン

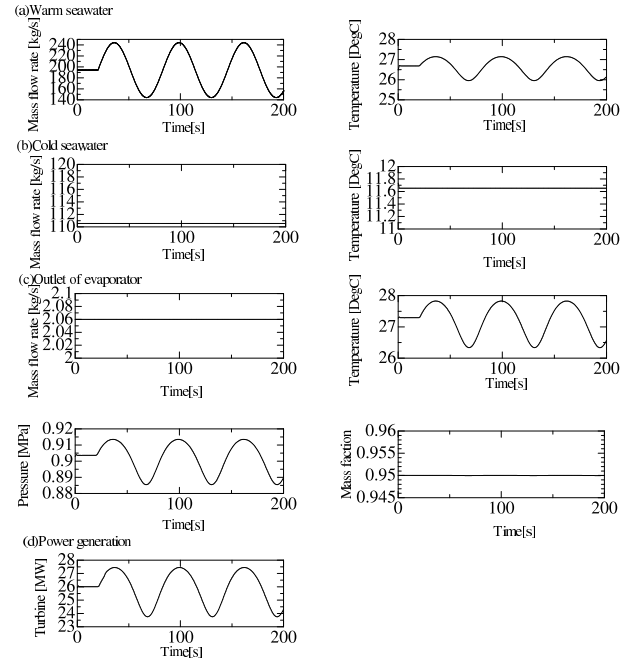


Fig. 8 Sine wave response result (OTEC part)

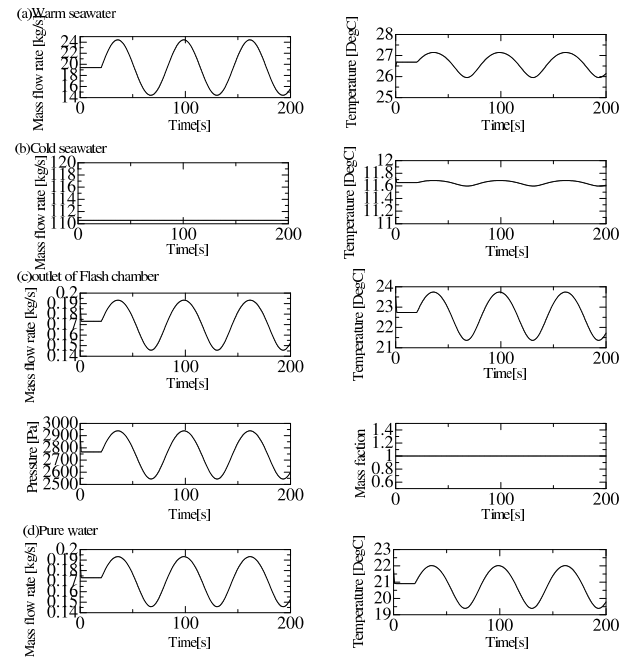


Fig. 9 Sine wave response result (Desalination part)

ト自身の設計等が可能となる。また、各々単体のシミュレーション結果と、複合プラントのシミュレーション結果を比較することにより、複合プラントの有効性を示すことができる。

シミュレーションモデルを利用した海洋温度差発電と海水淡水化複合プラントの設計法について述べる。

1. 生産したい発電量と淡水製造量を決定する。
2. 要求される発電量と淡水製造量から海洋温度差発

- 電と海水淡水化各々の装置の仕様を決定する。
3. 各々の仕様からシミュレーションモデルを作成する。
 4. シミュレーションを実施し、発電量と淡水製造量を満足するかを確認する。
 5. 実プラント設計に作成したモデルを反映させる。

6. 結 語

本論文では、海洋温度差発電と海水淡水化複合プラントのシミュレーションモデルの構成およびシミュレーション結果を示した。これらのシミュレーション結果が、同一条件化でのプラント単体のシミュレーション結果と一致することから、構成したシミュレーションモデルは適切に複合プラントをモデル化していると考えられる。本モデルは、物理則に基づいてモデル化しているため、このモデルを使って制御器の設計や最適な発電・淡水化のための入力の設定を行うことができる。さらに、本シミュレーションモデルを利用することによって、海洋温度差発電と海水淡水化ともに装置の能力を最大限に活かせるプラントを設計することが可能となる。

本研究の一部は佐賀大学海洋エネルギー研究センター共同利用研究（08020A）として行われた。

文 献

- (1) 矢尾由佳, 地球温暖化とエネルギー問題, 経済政策研究, No. 2 (2006-3), pp. 207-228.
- (2) 武石礼司, アジア地域の大气汚染とその対策, *Economic Review* (2002-1), pp. 126-127.
- (3) 大特集 エネルギー供給と環境, 電気学会誌, Vol. 126, No. 4 (2006-4), pp. 189-234
- (4) 深川雅幸, 他, 自然エネルギーの有効活用技術, 三菱重工技報, Vol. 42, No. 4 (2005-11), pp. 164-166.
- (5) 一ノ瀬利光, 他, 三菱重工の自然エネルギー利用技術, 三菱重工技報, Vol. 39, No. 5 (2002-9), pp. 290-293.
- (6) Avery, W.H. and Wu, C., *Renewable Energy from the Ocean, A Guide to OTEC*, Oxford University Press (1994).
- (7) 池上康之, 他, ウエハラサイクルを用いた海洋温度差発電システムの性能試験, 日本海水学会誌 Vol. 60, No. 1 (2006), pp. 32-38.
- (8) 上原春男, 他, 吸収と抽気作用を伴うサイクルを用いた海洋温度差発電システムの性能解析, 日本機械学会論文誌 (B 編), Vol. 64, No. 624 (1998-12), pp. 2750-2755.
- (9) 日本原子力産業協会, 海水淡水化の現状と原子力利用の課題-世界的な水不足の解消をめざして-, 海水の淡水化に関する検討会 (2006-7).
- (10) Silver, R.S., Technological and Environmental Aspects of Desalination, *Desalination*, Vol. 42 (1982), pp. 1-9.
- (11) Kershman, S.A., 25 Years of Experience in Operating Thermal Desalination Plants, *Desalination*, Vol. 136 (2001), pp. 141-145.
- (12) 宮武修, 他, スプレーフラッシュ蒸発に関する実験的研究, 日本機械学会論文集 B 編 1, Vol. 45-B, No. 400 (1979-12), pp. 1883-1891.
- (13) Uehara, H. et al., Experimental Study of a Spray Flash Desalination, *Bulletin of the Society Sea Water Science*, Vol. 45, No. 1 (1997), pp.34-42.
- (14) Goto, S. et al., Construction of Simulation Model for OTEC Plant Using Uehara Cycle, *IEEE Trans. PE*, Vol. 129, No. 2 (2009).
- (15) Goto, S. et al., Construction of Simulation Model for Spray Flash Desalination System, *IEEE Trans. PE*, Vol. 128, No. 8 (2008), pp.993-999.
- (16) プロパスグループ, PROPATH 流体熱物性値プログラムパッケージ, 第 7.1 版 コロナ社 (1991).