

洋上浮体型振り子式波力発電装置の設計法

渡部 富治

Criterion of the Floating Pendolor Design

Tomiji Watabe

* Former Prof. of Muroran Institute of Technology JAPAN, Misono, Noboribetsu, 059-0036.

Floating Pendolor is a wave energy converter for offshore use combined with a mother floating object. The Pendolor generates electricity similarly with a fixed caisson as the coastal operation since the mother object can take a steady pose on the wavy water area applying with the active damping which cancels wave force on the mother object by encountering another wave of phase lag $=\pi$. The mother object prepares the water chamber for the Pendolor so that the chamber must be considered from the energy conversion and the active damping. It studied on the mother object and the Pendolor for the good wave energy conversion such as: safety operation against the storms, low cost electricity generation and mooring of the mother object. Referring the study results, the Criterion of the Floating Pendolor was constructed and shown here.

Keywords: Pendolor, design criterion, offshore, wave energy, floating device, active damping

1. はじめに

振り子式波力発電装置 (Pendolor) は、アンテナ原理を忠実に応用した高効率の機械式波力発電装置である。筆者は、発電単価低減を目的に洋上浮体型を提案・研究したので、さらに実用機設計法の検討を試みた。対象の装置には複数の特長がある。

- 1) 特殊な浮体と Pendolor を組み合わせ、高パワー密度に加え、設置上の制約が少ない沖合で発電する。
- 2) 柔軟性があり、必要に応じ装置の移動ができる。
- 3) 浮体を、波力発電以外にも兼用できる。例えば、洋上風力発電基地など。
- 4) 発電単価の低減が見込めるので、波力発電の普及促進が期待できる。開発途上国の電力供給用に適している。
- 5) 発電以外の目的にも利用しやすい。例えば、浮き防波堤など。

ここでは従来のケーソンに代わり特殊な浮体 (母船) を利用する。波力発電のプロセスにおいて、母船と Pendolor との相互関係が大切な役割をする。こうした状況を勘案しながら、洋上浮体型振り子式波力発電装置 (Floating Pendolor) の設計法を調査・検討し、整理の上まとめた。

2. Floating Pendolor の構造原理⁽¹⁾

図 1 に Floating Pendolor の構造と原理を示す。4 組の Pendolor を 1 台の母船に搭載する標準的実用機 (案) の例。2 基の風車を搭載し洋上風車発電基地を兼用する。定格出力：波力発電=600kW、風力発電=140kW である。母船静止のため、ヒープ、サージ、ピッチ 3 方向に対しアクティブダンピングを施す。図の左から右向きに波が入射、水室内の振り子が揺動し、その運動から高速回転運動をつくり、発電機を駆動して電力生産する。母船の右後ろには羽 (ダンパー)

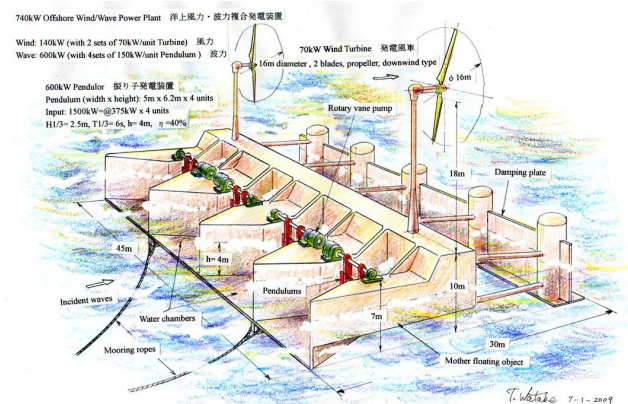


Fig. 1 Principle of the Floating Pendolor

が付いている。ダンパーに働く波力が、母船のサージ

とピッチの両モーションを打ち消す。

母船は船体前方下部2か所に結ばれたロープで、海底にゆるく係留されている。船体に働く波力の作用から、船体は入射波と向き合う位置で安定する。アクティブダンピング効果により、係留ロープに働く力は通常係留の場合よりも小さい。

図2は、図1の Pendulor 1組の 1/25 スケールモデルで、2次元水槽で試験したもの。

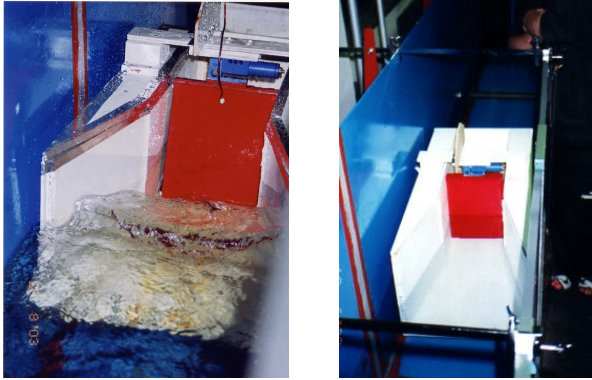


Fig. 2 Floating Pendulor Model in Test

3. Floating Pendulor の 設計方針

発電単価低減の基本は、少ない投資予算で大量電力を生み出すこと。その第一として船体の揺動防止を検討する。つぎ船体と Pendulor のコストダウンに注目する。

設置海面が決まると波浪データが与えられ、そのデータに対し適切な応答をする Pendulor の創造設計に注目する。さらに各主要構成要素の設計へ進展する。

これらの設計を進めるに当たっての方針を次に示す。

- 1) 安全な装置であること。
- 2) 環境に与えるインパクトができる限り少ないこと。
- 3) Pendulor に対し最適設計を施すこと。
- 4) 装置製造に対する生産性が十分に考慮されていること。
- 5) 使いやすい装置であること。

4. Floating Pendulor の設計法⁽²⁾⁽³⁾

嵐に対する安全対策として、入力制御を採用する。

- 1) アクティブダンピングの特性を利用して、嵐のときの異常入力をカットする。母船に対する波浪特性を適切に選択し、嵐のときに母船に働く波力が大きくなるようにする。
- 2) くさび形状水室を採用して、嵐のときの異常入力をカットする。

装置製作費のコストダウンを心がける。

- 1) アクティブダンピングと Pendulor との両面から最適母船形状を検討する。
- 2) 「出力／コスト」尺度から Pendulor の最適仕様を選定する。
- 3) 「耐久性・発電性能」両面から水室・振り子の仕様を選定する。

4. 1 Pendulor system 設計

対象海域の出現波浪は広範囲に分布している。その最大値〈30年に一度の出現〉を対象に耐久性設計をする。入力制御機能が働くので、母船にも Pendulor にも異常な波力が、そのままの大きさで作用する危険はない。したがって、正常発電を対象にして強度設計をする。出現率最大の波浪が対象になり、Pendulor system (発電装置) の設計を行う。この波浪が定格波浪 (有義波の波高、周期) とみなされる。

Pendulor 設計には、有義波ではなく、規則波 (有義波と同値の一定波高、一定周期をもつ) を採用する。有義波に含まれる波高および周期は分布しているので、それら個々に対応できなければ有義波が持つパワーを吸収することはできない。実用的尺度として有義波と同値の規則波を導入した。海域では、規則波に類似した一定の波が、ある有限時間継続するときがあり、この状況から判断した方法である。したがって、Pendulor の定格出力は、有義波から推定される平均出力の約2倍になる。

定格波浪が与えられたとき、そのパワー: W (単位幅当たり) は次式で与えられる。

$$W = 0.44 H_{1/3}^2 T_{1/3} \quad \cdots (1) \text{ 有義波の平均値}$$

ここで、 $H_{1/3}$: 有義波の波高
 $T_{1/3}$: 有義波の周期

$$W = \frac{1}{4} \left(\frac{H}{2} \right)^2 \rho g \frac{\omega}{k_0} \left(1 + \frac{2k_0 h}{\sinh 2k_0 h} \right) \cdot$$

$\cdots (2) \text{ 規則波の平均値}$

ここで、 H : 規則波の波高、 ρ : 海水の密度、
 ω : 波の円周期、 k_0 : 波数、 h : 水深、
 g : 重力の加速度

式〈2〉で与えられるパワーを対象に Pendulor 設計を行うと、実用的にバランスした装置になる。

4. 2 船体設計

母船ヒープモーションの検討において、水室の静水面表面積: A_w は、浮力に対抗する成分の比例常数になり、母船の喫水面断面積: A_m は、浮力成分の比例常数になる。

$$A_w = A_m \quad (3)$$

として、2成分を相殺すれば、ヒープモーションが発

生しない。式(3)を船体設計に応用する。

この場合、水室の入口を広くとり、内部に向かってくさび状に幅を狭くすると、振り子設計に対し都合よく(後述)なるが、母船設計に対しても有利性が生まれ好ましい。したがって、この方式を採用する。式

(3)の条件下で水室を形成すると、同一幅水室を採用する場合に比較して母船幅が小さくなる。“ダンピング”および“ムアリング”も小型化できる。母船製作費の低減に貢献できる方式である。

水室内には振り子を取りつく。振り子が波力を受け止め、反作用として振り子軸中心にサージ力と、モーメントが働く。結果として母船はサージおよびピッチングモーションを行うことになる。これら両モーションを打ち消すために、母船後方のダンパーを用いて、サージおよびピッチに対するアクティブダンピングを行う。

母船には、振り子軸中心から1/2波長後方に、ダンピング用の垂直板および水平板が付いている。垂直板には、振り子軸に働くサージ力に対し180度位相遅れのサージ力が働き、この2組の力は常時打ち消し合うので、母船はサージモーションを行わない。同様にして水平板は、振り子軸に対するモーメントに対し180度位相遅れのモーメントが働き、この2組は常時打ち消し合うので、母船はピッチングモーションをしない。

ダンピング用垂直板、水平板の取り付け位置は、装置を設置する場所の海面波の波長に合わせるが、波長は一定ではない。波高が増すと波長も長くなるし、設置海面を移動し水深が浅くなれば短くなる。出現頻度の高い波長に合わせダンピングプレートの位置を固定する。

嵐の場合は極端に波長が長くなるので、ダンピングプレートと波長との位置関係が一致しなくなってしまう。結果としてアクティブダンピング効果がなくなり、母船はサージおよびピッチモーションを行うことになる。その結果は発電効率の極端な低下現象になる。波浪パワーは極端に増加しているが、母船や振り子に対する波浪の相対的運動は増加しないので、母船や振り子に働く波力は大きくなる。固定ケーソンを使用する場合との大きな違いである。このようにして、今回のダンピング方式には嵐に対して発電装置を安全に保護する機能が備わっている。

このユニークな特性に関する研究は、まだ初歩的な段階なので、これからの研究に期待するところが少なくない。

4. 3 水室設計

Pendulor はギターやバイオリンなどの弦楽器に似ている。Pendulor における水室および振り子は、ギタ

ーやバイオリンの共鳴体および弦に相当する。弦の振動が共鳴体内の空気と共鳴して増幅した音響を生み出すように、振り子の運動が水室内の水の定常波運動と共振する。水室内の水は、振り子と水との共振を司る“ばね”の役目も兼任し、そのばね定数は、入射波と振り子が丁度うまく共振するときの適値になる。こうした条件は自然に備わったものなので、むしろ人為的に手を加え壊してしまわぬよう注意すべきである。

水室の奥は壁で仕切られ、入射波はこの壁で反射し、水室内に定常波が形成される。振り子は壁から1/4波長(水室内水深の浅水波のもの)の距離、入口側へ戻ったところにつく。海洋波の波長は一定せずばらつくので、効率低下が起こる。これを軽減するのに、振り子の取り付け位置を約1/5波長にするとよい。

長波長の波(うねり)の海面が対象になると、この波と共鳴するための水室の長さが大きくなり、コスト増加が発生する。対策として、振り子運動を損なわぬ範囲で水室内の水深を浅くすることにより波長を短くする。水室幅を一定のまま水室長を短くすると“ばね定数”が大きくなり、振り子の共振性を損なう。このため、水室幅を広め、静水面面積値を正常な水準に保つ。振り子取り付け部の水室幅は一定で最も狭い。そこから奥に向かって逆向きくさび状に広げると、振り子に対する入力制御作用が得られる。

以上を総合した結果の一例として、図3の母船を示す。図3では水室内に振り子を取りつき、母船後部には、垂直および水平のダンピングプレートが設置されている。

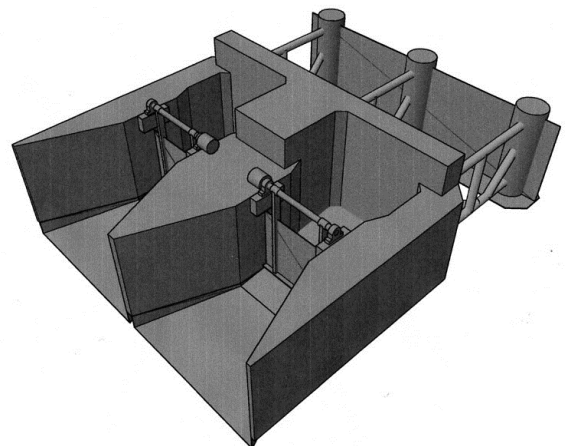


Fig. 3 Pendulor における水室形状の一例

4. 4 振り子設計

振り子は、波動エネルギーを振り子運動の機械エネルギーに変換する一機械要素である。図3の振り子を逆さにした、水底支点の倒立振り子の場合と比較し効率差はあまりない。水底支点方式は保守が大変なの

で実用性が低い。

図4に示すように、振り子は団扇状である。平板に2本の腕を付け、腕の上端を振り子軸に固定したものの。平板に働く波力により振り子運動を行い、その場合の軸回転から静油圧変速機を介して発電機運転をする。振り子軸とポンプ軸とを一体化したベーンポンプが発明された結果、嵐に対する耐久性向上、海上据え付け作業の安全性向上、信頼性向上などが達成された。平板の高さを制限し、平板と軸との間に隙間（図3～4参照）を設けると、嵐のときの入力制御効果が生まれる。

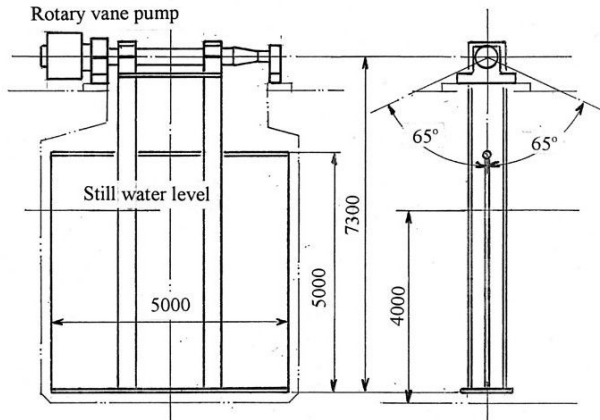


Fig. 4 A typical profile of the pendulum

振り子の運動奇跡は、水流の軌跡に似通っているから、振り子の存在による流れの乱れは少ないと思われる。また振り子と水室壁との隙間を通過する漏れ量は大きくない。

平板の腕を長くし、軸受け位置を静水面から遠ざけると、同一波高に対し、振り子の揺動角度は小さくなる。反対にポンプに働くトルクは増す。実用上からは、許される限り腕長さを短くするのが良い。

図3の水室形状を使用すると、縮小幅の振り子を使用できる。同じ波高では、標準幅振り子使用に比較し、振り子運動の振幅のみが増加し、振り子軸トルクは減少する。この結果、ポンプに対して小型化・軽量化が可能になる。図3の水室形状を使用するメリットは少なくない。

振り子に作用する波高 H_p と振り子の振れ角（中心からの角変位） θ との関係は式（4）で示される。式（4）は、最適発電負荷が働いている場合の値。無負荷のときは、振れ角が式（4）の2倍になる。

$$\theta = \frac{k_0 X_0 H_p}{4 Y_0 \sinh k_0 h} \quad (4)$$

ここで、

$$X_0 = \sinh(k_0 h) \cosh(k_0 h) + k_0 h \quad (5)$$

$$Y_0 = k_0 l \sinh(k_0 h) + \cosh(k_0 h) - 1 \quad (6)$$

$$H_p = H \sqrt{B/B_0} \quad (7)$$

B : 水室入口の幅

B_0 : 振り子取り付け部の水室幅

4. 5 Rotary vane pump 設計

図5は対象のポンプである。外形寸法に比べ大きな押しのけ容積であることが特徴である。Pendulorが必要とするポンプトルクは、市販ポンプの領域を遥かに超える大きさなので、図5のポンプはこの目的に対し最も有利な方式として、今回のケースに採用された。2枚の固定ベーンを持つ円筒内に、2枚のベーンを持つロータが、揺動可能状態で挿入されている。合計4枚のベーンは、円筒内の空間を図示の4部屋に仕切る。ロータの揺動は4部屋の広さを変えるので、これらの部屋を管路で外部に接続すれば、部屋に向けての流入・流出が起こる。この作用をポンプに利用するもの。

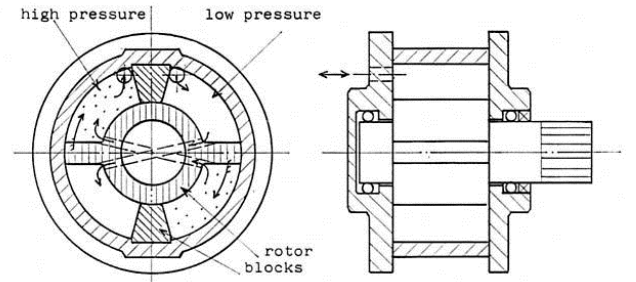


Fig. 5 Principle of the rotary vane pump

注意事項を検討し整理する。

- 1) 実用上、最低20MPa程度の耐圧性が必要。ベーン強度を保持するため、ベーン一体構造ロータを検討すること。軸受け荷重が平衡すること。静圧平衡型金属シールを採用すること。ポンプ回転速度が低いので、わずかの漏れ損失であっても発電効率低下の主要原因になる。極めて機密性の高いシールを開発する必要がある。
- 2) ポンプ軸を振り子軸で兼用すること。この場合に伴う問題点をあらかじめ解消しておくこと。

ポンプ軸トルク T_p は式（8）で示される。

$$T_p = \frac{D_p (p_m + \Delta p)}{2\pi\eta_t} \quad (8)$$

$$D_p = \frac{\pi}{2} (d_1^2 - d_2^2) b_p \quad (9)$$

ここで、 D_p : ポンプの押しのけ容積、 p_m : ポンプ圧力、 Δp : 管路損失圧力、 η_t : ポンプトルク効率、 d_1 : ロー

タペーン外側直径、 d_2 ：ロータペーン付け根部直径

幅 B_p の振り子に波高 H_p の波が働くとき、振り子に作用するモーメント M_0 は、式(10)で示される。発電効率最大条件は、 M_0 の50%が造波ダンピングに、残り50%がポンプに吸収される場合である。

$$M_0 = -\frac{\rho B_p Y_0 \omega^2 H_p}{k_0^3 \sinh k_0 h} \quad (10)$$

$$T_p = M_0 / 2 \quad (11)$$

式(11)は損失=0の場合の理論値である。実際には損失が存在するから、設計に用いるポンプトルク値は、式(11)の70~80%程度になる。

図6は、教育目的に設計したロータリペーンポンプの構造図である。室蘭工大が海域実験のため試作したポンプ構造[特許2573905]がベースになっている。室蘭工大が基本設計図を製作し、室蘭地区の中小企業が製作・組立を行い、産学協同で試験を実施した。小集団ながら困難な技術に挑戦した貴重な例である。参考資料として掲載した。

4. 6 油圧モータ設計⁽⁴⁾

標準的Pendulorは、図7のような油圧回路を使用する。1台の誘導発電機を、2台の可変容量型油圧モータで一定速駆動するものである。海象変化に合わせて油圧モータの押しのけ容積を調整し、高い発電効率が維持されるように自動制御している。このためにアナログ式制御弁が組み込まれ、そのアナログ信号で図8に示す油圧モータが制御される。

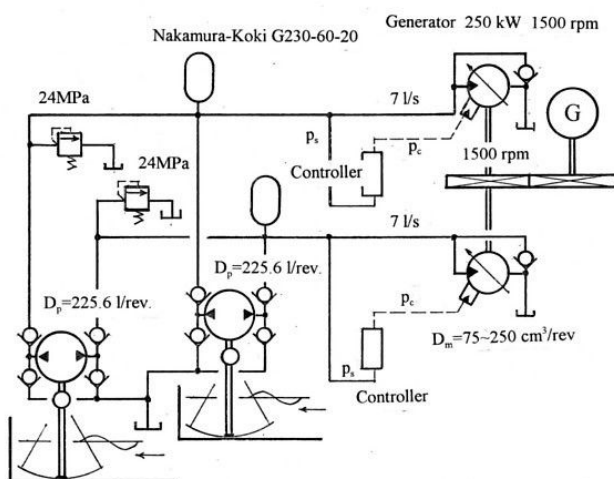


Fig. 7 Hydraulic Circuit of a typical Pendulor, T. Watabe

図8は高速ピストンモータで、部分負荷運転から全負荷運転までの広範囲にわたり優れた効率を示すので、波力発電用に適している。低価格の誘導発電機駆

動に採用すれば、初期投資の節約になり、それなりの発電量が確保できる。

油圧モータの設計・製作は高い専門性が求められる。図8の製品は、世界でRexroth社(ドイツ)のみが製造・販売している現状なので、市販品に合わせて発電システム設計をする以外に方法はない。この場合、油圧モータ仕様がPendulor出力上限を規制することになる。図7の例は、図8のA6VMモータ2台を使用し、発電出力(定格)250kWになっている。

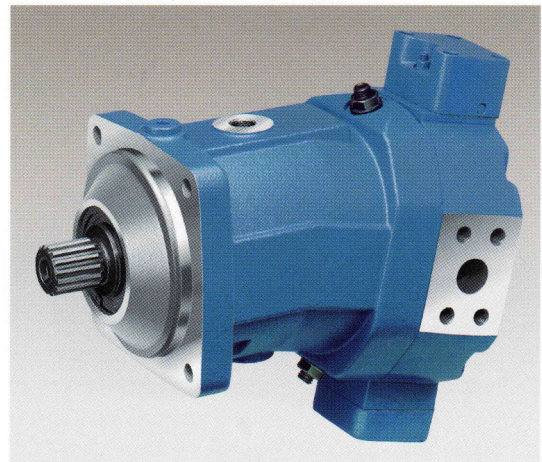


Fig. 8 A6VM Axial Piston Motor, Rexroth Germany

4. 7 制御機器設計

Pendulorは、ポンプ回路圧力から間接的に海象データを読み取り、最適発電運転のため油圧モータの押しのけ容積を連続調整している。図8の油圧モータが装備する制御アクチュエータは、アナログ油圧信号で動く構造なので、このモータに合わせ図9の制御弁が準備された。この弁は、ポンプ回路圧力を入力とし、その時間平均値を求めて波浪海象を判断する。その上で最適押しのけ容積値を指令する信号が油圧モータに向け発信される。図に見られるように、海水がかかっても問題ないローバスト構造である。

5. 結言

- 1) Pendulorはアンテナ原理を応用した機械的発電装置である。
- 2) Floating Pendulorでは浮体の静止が重視され、ヒープ、サージ、ピッチ3方向に対しアクティブダンピングにより波力作用を打ち消す。この設計手法を示した。
- 3) 水室と振り子は相互に作用する一体のもの。それぞれの作用から発電装置の要素として好ましい構造とその設計法を示した。
- 4) 主要要素に働く波力の関係を明示し、要素設計法を示した。

- 1) 渡部富治、特願 2003-338775, 浮体型波力発電装置、2003-8.
- 2) 渡部富治、近藤叔郎、波力発電、パワー社、2005-8.
- 3) T. Watabe, Utilization of the ocean wave energy,

T-Wave, 2008-2.

- 4) Rexroth, Axial piston pump/motor Catalogue, 2000-11.

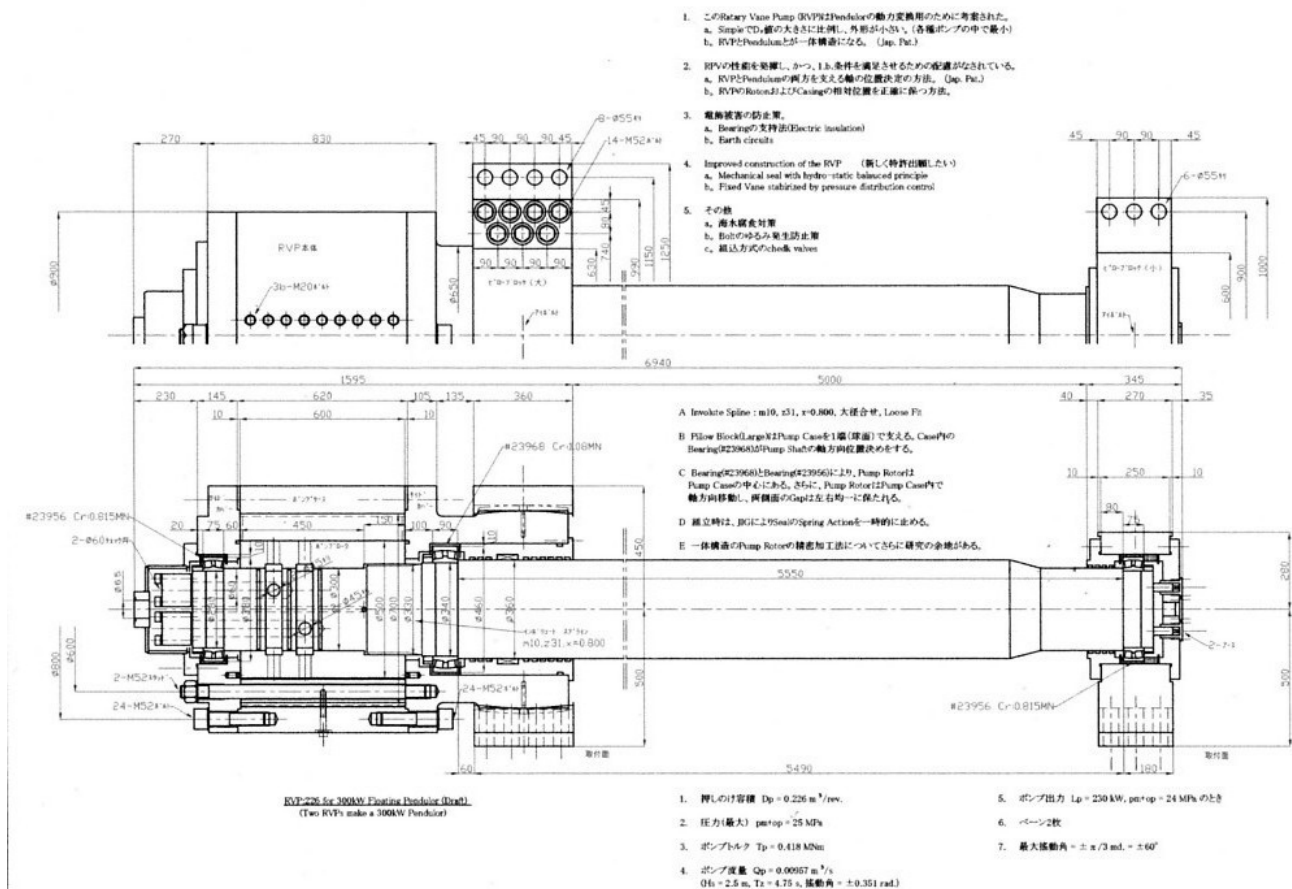


Fig. 6 Rotary Bane Pump designed for an educational purpose, T. Watabe

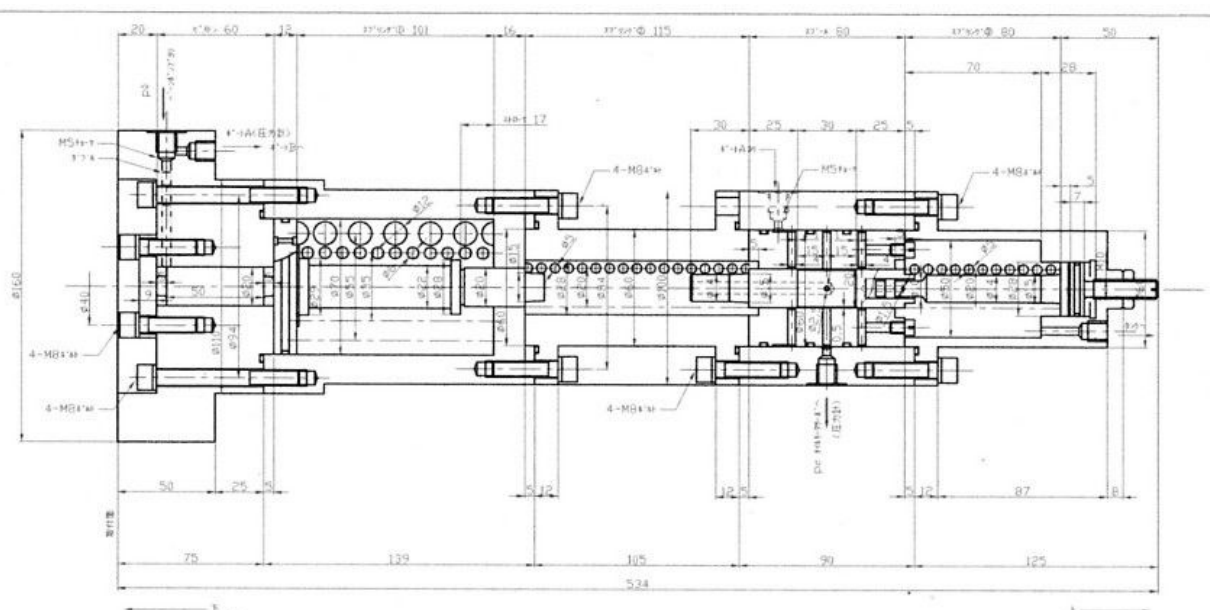


Fig. 9 Control Valve designed for an educational purpose, T. Watabe