平成30年度職業訓練教材コンクール　特別賞（独立行政法人高齢・障害・求職者雇用支援機構理事長賞）受賞

負荷特性に応じた汎用インバータの取扱いに関する実習教材

香川職業能力開発促進センター　五十嵐智彦
子川　昌浩

1. はじめに

工場やビル設備等の技術の進展や省エネ意識の高まりとともに，インバータが広く普及しつつある。それに伴い，インバータに関する教育・訓練に対する需要も増加してきている。大学や高専をはじめとする学校や都市圏の職業能力開発施設では，すでに広くインバータに関する訓練が実施されている。しかし，学校や都市圏の職業能力開発施設（関東，関西，中部など）では，電気・電子回路設計をベースとした内容のカリキュラムとなる場合が多い。一方で，地方都市の能力開発施設ではそのような訓練ニーズはほとんどなく，汎用インバータの適用や運用に関する技能の習得を期待されていることが多い。そのため，学校や都市圏の職業能力開発施設で実施されているカリキュラムをそのまま地方で適用することはできない。

そこで，香川職業能力開発促進センターでは，特に香川県における実情に適合するように，回路設計ではなく，汎用インバータの取扱い方法を中心としたカリキュラムを適用し，その教材を整備することとした。しかも，単なる汎用インバータの取扱い方法の習得のみにとどまらず，負荷の種類に応じたパラメータ・運転方法の選択，負荷変動時の電動機やインバータの動作，設備の省エネ性能の評価と投資判断の方法までをも含めて，インバータ導入で必要となる実際的な知識・技能の習得を目指す教材を開発したのでご紹介したい。

また，地方の職業能力開発施設では，費用対効果を検討した場合に，高価な実習機器の導入が必要となる訓練の実施が実現困難である場合が多く見受けられる。そこで筆者らは，汎用インバータの実習に必要な機器の設計から組み立てまでのすべてを自ら行い，かつ，カリキュラムの変更や改組等で不要となった古い機械器具等を再活用することで，低コストかつ高性能な実習機器を導入することができた。

本稿では，今回作製した教材について，各種特性を評価し，教材としての妥当性を検証したので報告する。

2. パワーエレクトロニクス教育の状況

一般社団法人電気学会では，産業界からのパワーエレクトロニクス教育に関する要望の高まりを背景に，平成12年から調査協同研究員会を設置し，パワーエレクトロニクス教育に関する調査・研究を実施している[1]。この背景には，パワーエレクトロニクス分野の急速な技術革新がある。大学や高専においては，従前は電気機器学の一分野として電力変換機器が教授されていたが，半導体デバイスや制御技術の進展に伴い，教授すべき内容も大幅に増加し，その内容も大きく変容した。そこで現在では，パワーエレクトロニクスという独立した科目として開

講されている場合がほとんどである。一方で，そのカリキュラムの内容は，電気機器学の一分野として教授されていた時代の延長である場合が見受けられる。そこで，電気学会ではカリキュラムの再構築を図る必要があるとの認識から，若手技術者向けパワーエレクトロニクス教育に関する調査・研究が進められることとなった。このような背景から，同委員会では，主にメーカに勤務する若手技術者向けの講習や[1]-[6]，大学・高専におけるカリキュラムについて[7]-[11]が主たる議論の対象となっている。

また，職業能力開発総合大学校の山本[12]は，高度職業訓練（職業能力開発大学校）と学校教育における相違点に着目し，高度職業訓練におけるカリキュラムについて議論している。文献[12]中で，山本は，「大学・高専の標準カリキュラムに加えて，より，実践的な周辺回路／実装技術を授業に取り入れる必要がある」と指摘しており，具体的には，“系統連系（太陽光発電）”と“モータ制御”の訓練を実施することが適当であるとしている。

しかしながら，離職者向けまたは（主に中小企業に在職している）在職者向けの普通職業訓練におけるパワーエレクトロニクス教育については，今まであまり議論されてこなかった。学校ならびに高度職業訓練と，普通職業訓練におけるパワーエレクトロニクス教育の違いは，前者が電気・電子回路の設計をベースとした設計・開発業務を対象として，回路の動作原理や計算，シミュレーションを主体として教育するものであるのに対して，後者は，工場等の生産設備やビル設備における保全業務を対象として，汎用インバータの適用，操作方法，省エネ・経済性の判断等がカリキュラムの主体となることである。そこで,筆者らは，これらの違いに注意しながら普通職業訓練における汎用インバータに関する訓練に適用できる教材について検討した。

3. 教材の開発コンセプトと教材の作製

生産設備等で汎用インバータが導入される目的は，大きく2つある。1つ目は，「回転数制御」であり，スピード調整を要する攪拌機や位置決めを要するコンベアなど自在に回転数を制御し，より高度な制御を達成する目的で導入される。2つ目は，「省エネ」であり，ポンプやファンなど「2乗低減トルク負荷」とよばれる機械負荷の省エネを達成する目的で導入される。

訓練で汎用インバータに関する実習を行う場合，これらの適用2事例の両方とも実習できた方が，より訓練効果が高まることが期待できる。よって，本訓練では，これら両方にそれぞれ対応する教材を作製することとした。基本的なインバータの操作法と定トルク負荷に対する特性の実習用として『定トルク負荷実習装置（図1)』，ポンプ負荷の特性実習用として『ポンプ負荷実習装置（図2)』を用意して，訓練ではこれらの組み合わせによって，汎用インバータの適用方法を一体的に学習できるようにすることとした。

本教材は，できるだけ低コストでの教材開発を第一とした。そのため，電動機容量は0.4kWのものを用いることとした。0.4kWの電動機であれば，トップランナー規制の対象外となり，比較的安価な電動機を入手することが可能である。インバータに関しては，本教材における主たる装置であることから費用を勘案しながら，可能な限り高性能で，様々な機能を有するものを選択することとし，三菱電機製のFR-A820-0.4K-Eを採用した。同形式のインバータは，V/f運転のみでなく，センサレスベクトル制御や，回路定数のオートチューニング機能までをも有し，ほとんどすべての用途に適用可能である。イーサネット通信機能を有するため，ネットワーク通信も可能である。ただし同形式は，受注生産であるため，納期に注意する必要がある。

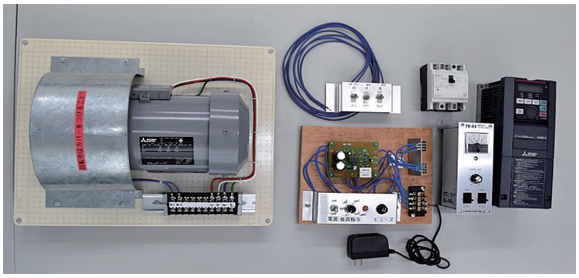

図1　定トルク負荷実習装置（一式）

図2　ポンプ負荷実習装置

3.1　定トルク負荷実習装置

定トルク負荷実習装置は，汎用インバータの基本操作と，定トルク負荷に対するインバータの特性を習得するための実習機器である。電動機と機械負荷の部分を図3に，その概略図を図4に示す。構造は三相誘導電動機（SF-JR 0.4kW 4P）にパウダブレーキ（ZX-0.6YN-24）を機械的に結合したものである。パウダブレーキに流す電流に比例してブレーキのトルクを発生するので，パウダブレーキによって定トルク負荷を模擬することができる。

パウダブレーキに使用する電源装置は市販のものもあるが，今回は教材作製に係る費用を削減する目的で，秋月電子通商製のシリーズレギュレータキット（実験室用　精密級/定電圧安定化電源）をもとに自作した（図5）。パウダブレーキは，厳密には電流源を用いなければトルクを制御できないが，電圧と電流がおおむね比例関係にあるため電圧源でも十分に代用できる。しかし，実習にあたっては安全のために必要以上のトルクを発生させないようにするため，かつ，電源投入時に流れる突入電流を制限するため，電流制限機能は必須となる。同キットは，可変抵抗を操作しても電流制限機能がうまく動作しない場合があることから，アマチュアの方が作成したHP記事[13]を参考にエミッタフォロアを追加した。

汎用インバータの操作を外部スイッチから行えるように市販品の操作箱（図6）を用意したが，これのみでは，高・中・低速指令を行うことができないため，別途，高・中・低速指令用スイッチを自作した（図7）。

パウダブレーキは，電動機から入力される機械負荷を熱として放出するため，長時間運転するとブレーキ自体が発熱する。そのため，実習中はブレーキ本体に触らないように指示するとともに，長時間の連続運転にならないよう，実習と座学を織り交ぜながら進めるよう配慮している。

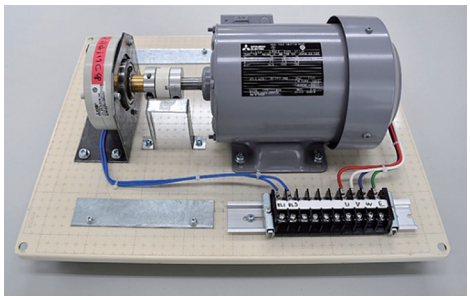

図3　定トルク負荷実習装置（電動機・機械負荷）

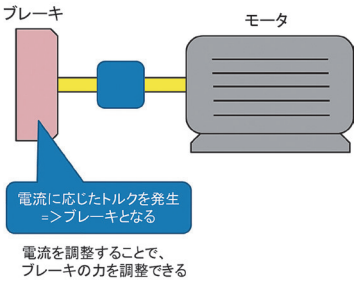

図4　定トルク負荷実習装置概略図

図5　パウダブレーキ用電源装置

図6　周波数計付操作箱（市販品）

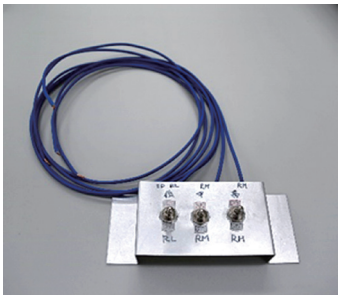

図7　高・中・低速指令スイッチ

3.2　ポンプ負荷実習装置

ポンプ負荷実習装置は，汎用インバータをポンプ負荷に適用した時の，操作の方法や経済性の判断の方法について習得するための実習機器である。一般に，2乗低減トルク負荷の特性を評価し，習得する教材としては，いくつか試みられているものがある。例えば，宇都宮大学の船渡らは，水流循環型の小型発電機の特性評価装置を開発した[14]。この装置では有効落差を水槽の出口側に設置されたポンプによる圧力水頭によって模擬し，マイクロ水力発電機の評価・検討を行っている。しかし，この機器は教育訓練を目的としたものではなく，研究を目的とした実験装置である。また，高度ポリテクセンター（千葉職業能力開発促進センター高度訓練センター）では，ファンと風洞を組み合わせた実習教材を使用して，在職者向け職業訓練（実習でわかる省エネ診断と工場における省エネルギー技術＜省エネルギー技術2＞）を実施している[15]。この教材は，省エネ技術の習得を目的としたものであり，2乗低減トルク負荷における省エネ診断手法を体系的に習得できる優れた教材である。

筆者らは，同装置では，風速を測定する計器類が比較的高価で，かつ，再現性のある測定が難しく離職者訓練の受講者では十分に対応できない可能性があること，また，離職者訓練で発生した廃品を流用できることも考慮し，ポンプを使用した水流循環式の実習機器を製作することとした。

概略図を図8に示す。ポンプ負荷実習装置は，ポンプ（図9）と水槽を配管で接続し，電動機（0.4kW）で駆動する渦巻ポンプを，500L程度の水槽に配管で接続し，水槽内の水を高さ1.5m程度まで汲み上げた後，再び水槽内に戻す，水流循環式の実習装置である。ポンプの入口側の配管には連成計（図10），出口側の配管には圧力計（図11）を接続し，それぞれの圧力水頭が計算できるようになっている。また，ポンプの出口側の配管には，流量調整弁（玉形弁）と流量計（図12）を接続し，バルブによって流量を調整できるようになっている。

本来，ポンプの注水口には，じょうご型の注水部（呼水じょうご）を取り付け，ポンプ内の空気を十分に押し出してから運転を開始するものであるが，本実習機は水槽の水位がポンプの位置よりも高く，水圧によってこの機能を代用することが可能であるため取り付けていない。そのため，水槽に水を入れてから最初に起動する際は，ポンプの注水部をわずかに開放し，水槽の水圧によって，ポンプ内の空気を押し出し，注水部から水がしみだしてきたら注水部を閉める，という操作が必要となる（図13）。

水槽の出口側には仕切弁（図14）を設け，実習時以外は全閉，運転時のみ全開にし，必要以上にポンプに圧力がかからないようにしている。排水時は，排水口にホースを接続し，排水口用仕切弁（図15）を全開にすることで排水が可能である。

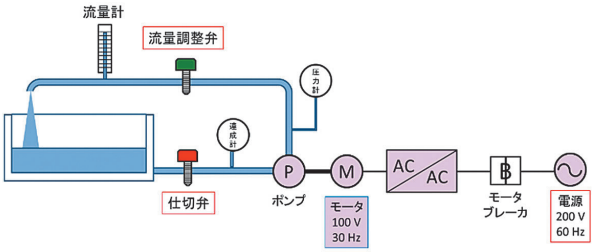

図8　ポンプ負荷実習装置概略図

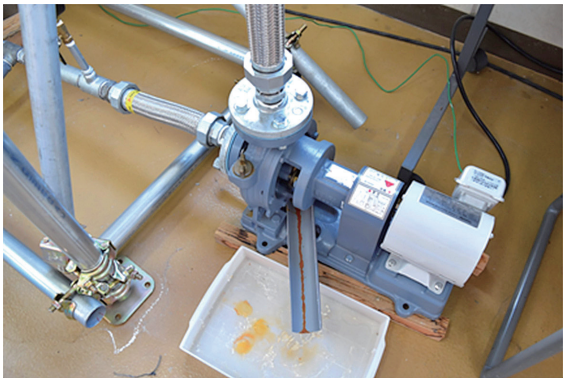

図9　ポンプと電動機

図10　連成計

図11　圧力計

図12　流量調整弁と流量計

図13　ポンプ内の空気抜き作業

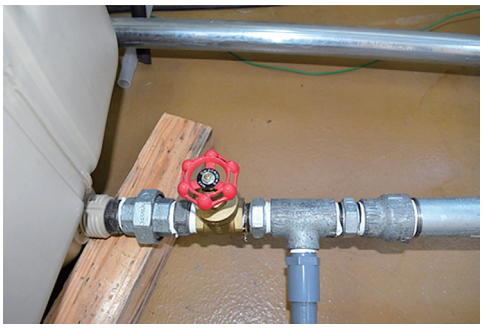

図14　仕切弁

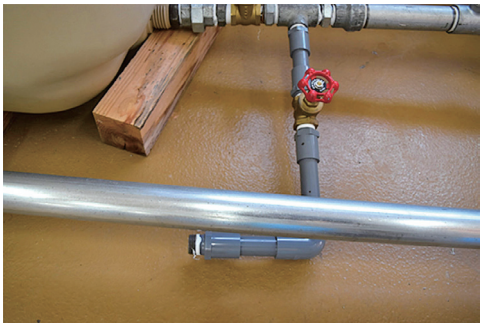

図15　排水用仕切弁

4. 実習機の特性評価

前節のそれぞれの教材について，理論通り正当な機能を有するかの評価を行うため，実習項目についての特性の評価を行った。

4.1　定トルク負荷実習装置

定トルク負荷実習装置の主たる実習は，*V/f* 制御に特性評価と，*V/f* 制御（フィードフォワード制御）とセンサレスベクトル制御（フィードバック制御）の比較を通して行う。

はじめに，*V/f* 制御で運転した場合の特性の評価を行った。図16に周波数―電圧特性を示す。図に示す通り，周波数60Hzまでは周波数に比例して電圧が上昇していることがわかる。よって，*V/f* 制御が行われていることが確認できる。60Hzを超えると定出力制御に移行するため，周波数が上昇しても電圧一定となっている。インバータにトルクブーストを6%で設定しているため，グラフを0Hz側に延長しても，原点には至らない。220Vの6%に相当する13Vで縦軸と交わる様子も確認できる。

図17に，周波数―電流特性を示す。本来，*V/f* が一定であれば，電流は一定になるはずである。同図においても，30Hzから60Hzにおいては，おおむね一定である様子が確認できる。低速域で電流が増加しているのは，トルクブーストを設定している影響である。また，高速域で電流が増加しているのは，*V/f* 制御から定出力制御へ移行しているためである。

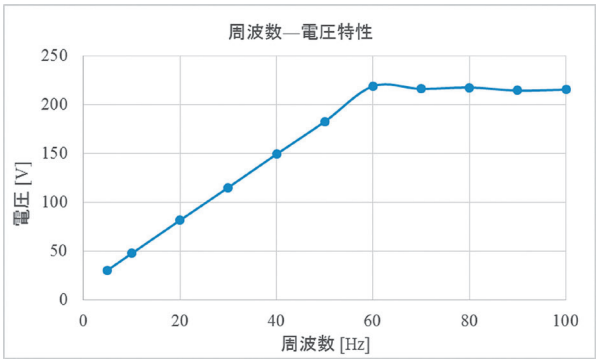

図16　*V/f* 制御における周波数―電圧特性

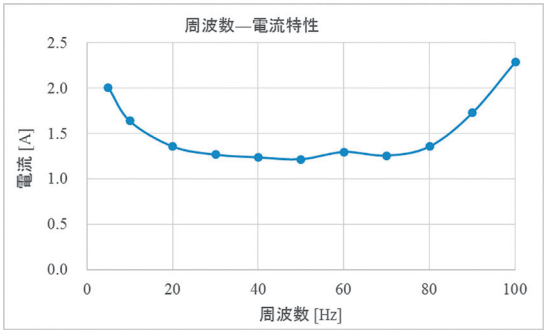

図17　V / f制御における周波数—電流特性

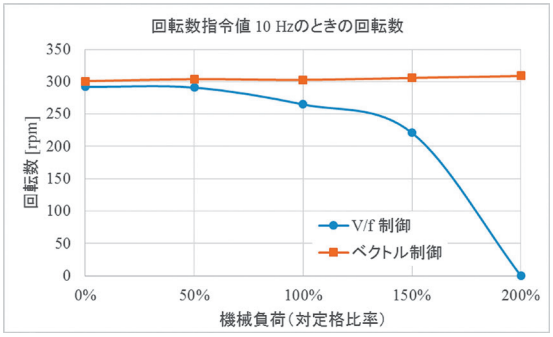

図18　回転数指令値10 Hzのときの回転数比

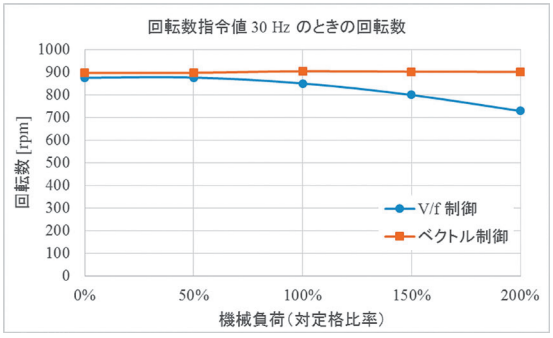

図19　回転数指令値30 Hzのときの回転数比較

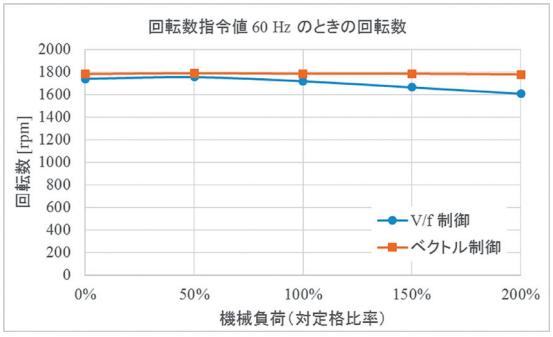

図20　回転数指令値60 Hzのときの回転数比較

図18，19，20には，10Hz，30Hz，60Hzを指令値とし，パウダブレーキによって機械負荷をかけた場合の*V/f*制御とセンサレスベクトル制御の回転数の変化を示す。各周波数において，*V/f*制御のときはいずれの場合においても，機械負荷をかけるほど回転数が低下していることがわかる。一方，センサレスベクトル制御のときは，機械負荷をかけても回転数が一定となっている様子が確認できる。これは，センサレスベクトル制御がフィードバック制御を採用しているためであり，機械負荷の変動に対して回転数が変化しない制御によるものである。

4.2　ポンプ負荷実習装置

ポンプ負荷実習装置で行う主たる実習は，電動機に接続したインバータの周波数を60Hzに固定し，流量調整弁を用いて流量を変化させた時（バルブ制御）と，流量調整弁を全開にしたうえで，インバータの周波数を変化させ流量を変化させた時（インバータ制御）の比較を通して行うこととした。バルブ制御とインバータ制御の比較を，流量と消費電力の特性，流量とポンプ揚程，流量とポンプ効率等について行う。

はじめに，流量*Q*と消費電力P_eの特性を評価した。図21にその結果を示す。このグラフから，バルブ制御のときには，流量を減少させても，消費電力はわずかしか減少しないが，インバータ制御においては，大きな電力削減効果が得られることがわかる。理論的には，インバータ制御における消費電力は流量の3乗に比例することが知られている。そこで，同図の8㎥/hのときと4㎥/hのときを比較してみる。8㎥/hのとき消費電力は0.229kWであり，4㎥/hのとき消費電力は0.049kWであることから，その比は21.4%であった。理論的には，流量が1/2になると消費電力はその3乗の1/8（12.5%）になるはずであるから，理論値ほどの電力削減効果は得られていない。これは，ポンプの回転速度の低下により，ポンプ効率が低下しているためである。

次に，流量*Q*とポンプ揚程*H*の特性を計算する。ポンプ揚程*H*は次の手順で計算できる。ポンプの揚程Hは，吐出し揚程H_pと吸出し揚程H_vから求められる。吐出し揚程H_pは次式で求められる。

$$H_p[\mathrm{m}]=P_p[\mathrm{MPa}]\times 10.33\mathrm{mH_2O}\times 0.1013\mathrm{MPa/atm}$$

・・・式（1）

ただし，　P_p：圧力計の読み

また，吸出し揚程は次式で求められる。

H_p[m]=P_v[MPa]×10.33mH_2O×0.1013MPa/atm

・・・式（2）

ただし，　P_v：連成計の読み

よって，ポンプの揚程Hは次式で求められる。

H[m]=H_p[m]−H_v[m]+h_p[m]−h_v[m]

・・・式（3）

ただし，　h_p：圧力計の位置水頭

h_v：連成計の位置水頭

本教材では，（実測の結果から）圧力計の位置水頭は0.57m，連成計の位置水頭は0mとして計算した。結果を図22に示す。図のとおり，バルブ制御の場合，流量を下げると揚程が増加している。逆に，インバータ制御の場合，流量を下げると揚程が減少している。バルブ制御の場合は，バルブを操作することで流路抵抗が増加し，結果的に大きな揚程が必要となるため，揚程は増加する結果となった。インバータ制御の場合は，バルブを操作しないため，流路抵抗は変わらず，結果として流量とともに揚程も減少している。よって，ともにおおむね理論通りの結果を得ることができた。

最後に，ポンプ効率特性を確認する。ポンプ効率η[%]は，次式で計算できる。

η=P[kW]÷P_{in}[kW]×100　　・・・式（4）

ただし，　P：水動力

P_{in}：軸動力

上式において，水動力Pは次のように求める。

P[kW]=0.163×Q_{min}[㎥/min]×H[m]・・・式（5）

ただし，　Q_{min}：毎分流量

H：ポンプ揚程

軸動力P_{in}は，消費電力P_eを伝達係数で割ったものであるが，伝達係数を正確に求めることはできないため，今回は1.1として計算した。図23および図24にバルブ制御とインバータ制御のそれぞれにおけるポンプ効率を示す。バルブ制御の場合は，6㎥/hのとき最も効率が良くなる特性となっており，理論とも一致している。インバータ制御では，8㎥/hをピークに流量が小さくなるにつれて効率が大幅に減少している。

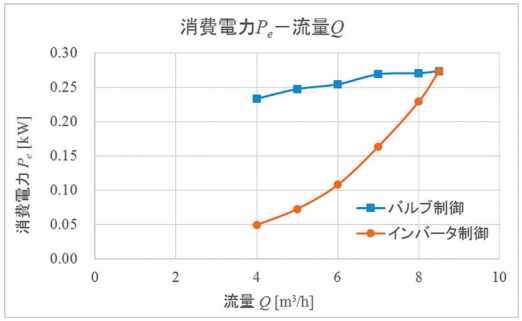

図21　ポンプの軸入力と流量の特性

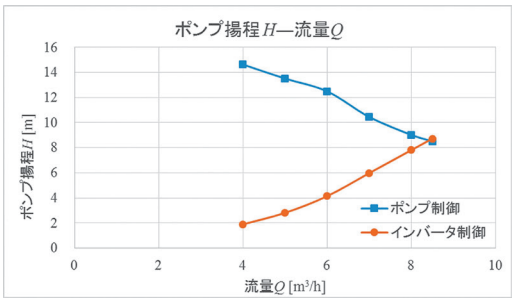

図22　ポンプ揚程と流量の特性

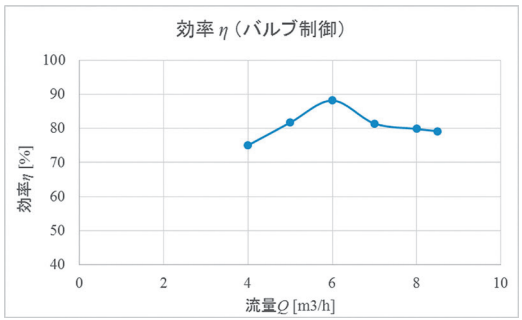

図23　ポンプ揚程と流量の特性

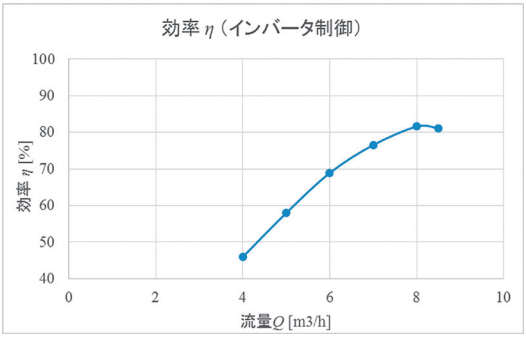

図24　ポンプ揚程と流量の特性

このように，ポンプ特性についてそれぞれ評価を行ったが，おおむね理論通りの特性を示した。よって，本機器は，教材として活用できることが確認できた。

5. まとめ

本稿では，『定トルク負荷実習装置』と，『ポンプ実習装置』をそれぞれ作製し，その特性を評価して教材としての妥当性を検証した。定トルク負荷実習装置』については，*V/f*制御における電動機の特性を確認した。また，『ポンプ実習装置』においては，流量と消費電力・ポンプ揚程・ポンプ効率等の特性を確認した。いずれもおおむね理論通りの特性を示したことから，職業訓練の教材としては妥当であることが確認できた。

今後は，離職者訓練および在職者訓練等での活用実績を積むことで，利用者の声をフィードバックし，より使いやすいように改良していきたい。

なお，香川職業能力開発促進センター（ポリテクセンター香川）では，在職者の方向けに，本教材を利用した能力開発セミナー（2日間）を実施しています。日程や内容等の詳細は，ホームページ等をご覧いただくか，お電話にてお問い合わせいただきますようお願いいたします。また，オーダーメイドのセミナーも実施いたしますので，同センターまでお気軽にご連絡いただけましたら幸いです。

＜参考文献＞

［1］和田圭二：「企業技術者を対象としたおアワーエレクトロニクス教育　―総論―　」平成27年電気学会全国大会，4-S24-1（2015）

［2］船渡寛人，綾野秀樹，石橋正基，佐藤宣夫:「社会人向けパワーエレクトロニクス公開講座事例」平成27年電気学会全国大会，4-S24-2（2015）

［3］小山正人，秋山登，岩堀道雄，永野史弥，川上和人：「企業から大学・高専への期待」平成27年電気学会全国大会，4-S24-3（2015）

［4］服部文哉，石飛学，山本真義，西田保幸：「パワーエレクトロニクス教育に関する新しい取り組み」平成27年電気学会全国大会，4-S24-4（2015）

［5］和田圭二，星伸一，山本秀和，佐藤之彦：「企業技術者を対象としたパワーエレクトロニクス入門講座」平成27年電気学会全国大会，4-S24-5（2015）

［6］石橋正基，佐藤宣夫：「パワーエレクトロニクス入門講座受講者アンケート結果」平成27年電気学会全国大会，4-S24-6（2015）

［7］船渡寛人：「基盤化技術に対応したパワーエレクトロニクス教育の現状と課題」平成23年電気学会全国大会, 1-S5-1（2015）

［8］和田圭二，北野達也，山本吉朗：「大学・高専におけるパワーエレクトロニクス関連科目の現状と課題」，平成23年電気学会産業応用部門大会，1-S5-2,（2015）

［9］伊東洋一，岩堀道雄，黒澤良一，秋山登:「企業におけるパワーエレクトロニクス教育の現状と課題」，平成23年電気学会産業応用部門大会，1-S5-3,（2015）

［10］木村紀之，森實俊充：「パワーエレクトロニクス技術を含めた学生実験の提案」,平成23年電気学会産業応用部門大会，1-S5-4,（2015）

［11］星伸一，金東海，船渡寛人，赤津観：「パワーエレクトロニクス教科書の現状」，平成23年電気学会産業応用部門大会，1-S5-5,（2015）

［12］山本修，田中晃，平原英明:「高度職業訓練におけるパワーエレクトロニクス分野の学習体系に関する考察」，職業大フォーラム2015　第23 回職業能力開発研究発表講演会，2015

［13］頑固じじいの反則技：「【改造】秋月 実験室用精密級 定電圧安定化電源キットの電流制限機能を使いやすくする」，https://1a1zzz.at.webry.info/201204/article_2.html，（平成31年1月19日閲覧）

［14］船渡寛人，桜井知之，小笠原悟司：「マイクロ水力発電システム試験装置の開発」，電学論D，Vol.130，No.12,pp.1288-1289，2010

［15］高度ポリテクセンター編：「職業能力開発セミナーコースガイド2018　高度ポリテクセンター」，pp96（2018）

［16］電気書院編集部：「汎用インバータ活用ガイドブック」，電気書院，昭和60

［17］水口雄二朗:「楽勝！ポンプ設備の省エネ技術」, 省エネルギーセンター，2010

［18］水口雄二朗：「楽勝！現場で使うインバータ」，省エネルギーセンター，2015