

氏名	山崎 努
生年月日	
本籍	石川県
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	博乙第272号
学位授与の日付	平成15年9月30日
学位授与の要件	論文博士(学位規則第4条第2項)
学位授与の題目	ニューラルネットワークによるシール型鉛バッテリーの残存容量予測
論文審査委員(主査)	村本健一郎(工学部・教授)
論文審査委員(副査)	船田 哲男(工学部・教授) 中山 謙二(工学部・教授) 木村 春彦(工学部・教授) 松浦 弘毅(工学部・教授)

## 学位論文要旨

**Abstract** Since measuring the specific gravity of the electrolyte is impossible for sealed lead-acid batteries, estimating the remaining capacity becomes very difficult. In this research, neural networks were developed to perform this estimation and to assess the deterioration state of batteries using measurable electrical parameters. Assuming a varied pulse charge and discharge operation that simulates the use of an electric bicycle, experiments on battery characteristics were made over long time periods. A system using two independent neural networks was developed to estimate the remaining capacity and deterioration state of sealed lead-acid batteries.

### 1. 緒言

情報通信機器の普及によりバッテリーの需要はますます拡大している。特に充電することにより繰り返し使用できる二次電池の応用は地球環境問題に配慮したクリーンエネルギーとして注目をあびてきている。たとえば電源停電時のバックアップ電源、太陽電池や風力発電の電力貯蔵として、電気自動車のクリーン動力源として急速に普及してきている。しかし運用面においては、信頼性の向上が求められており、これには電気エネルギーの残存容量、劣化状態、不良の判定を知ることが重要である。シール型鉛バッテリーは構造上、状態推定に効果的な比重測定が不可能で、バッテリーの劣化状態、残存容量状況把握が容易ではない。これまでのシール型鉛バッテリーの残存容量推定方法は定電流連続放電におけるものであり、つねに変化している変動負荷における精度の高い残存容量予測の方法は確立されていなかった。このような状況下において、シール型鉛バッテリーの残存容量、劣化状況を短時間で容易かつ正確に判定する総合的なバッテリー状況判定可能なシステムの開発が望まれていた。本研究ではニューラルネットワークを用いて電池自転車のバッテリー残存容量予測、劣化特性予測をリアルタイムに予測することを目的とする。密閉構造のシール型鉛バッテリーにおいて予測に利用できる非破壊・短時間で測定可能なパラメータには、バッテリー電圧、

充放電電流、バッテリー内部インピーダンスおよび周囲温度がある。残存容量予測、劣化特性予測は、これらのパラメータの相関を利用して行うが、この相関関係は非常に複雑で数式化は困難である。そこで、本システムでは、このような相互に複雑に関係した情報を処理する機構として、関数の連続性を汎化する能力を持ったニューラルネットワークを採用し、変動負荷運用やさまざまな温度条件においても残存容量予測、劣化特性予測が可能なバッテリーチェックシステムを構築した。

## 2. バッテリー特性測定システム

本研究で開発した残存容量予測およびバッテリーチェックシステムの構成を図1に示す。バッテリーの劣化判定、残存容量予測システムの学習および評価を行うために、図2に示すバッテリー特性チェックシステムを構築した。パソコンから GP-IB インターフェイスを介してパイポラ電源を制御し、バッテリーの充放電を行った。マルチメータ、インピーダンスメータ、サーモメータで測定した値をパソコンに入力し記録する。測定項目はバッテリー電圧、放電電流、バッテリーの内部インピーダンス、バッテリー温度の4項目である。本研究では、電気自転車の動力用電源としての利用を想定した変動パルス負荷パターンによってバッテリーを放電させた(図3)。平地走行では、ペダルをこぐ力は比較的軽く、あまり電流は流れない。一方、上り坂道走行では、ペダルをこぐ力は強く加えなければいけないためモータへの供給電流は大きくなる。バッテリー特性チェックシステムから測定された放電特性の一例を(図4)に示す。図中の V, I, Z はそれぞれバッテリー電圧、放電電流、内部インピーダンスを示している。本研究では残量容量の低下に伴いバッテリー電圧が低下し、内部インピーダンスが上昇している変化に着目する。

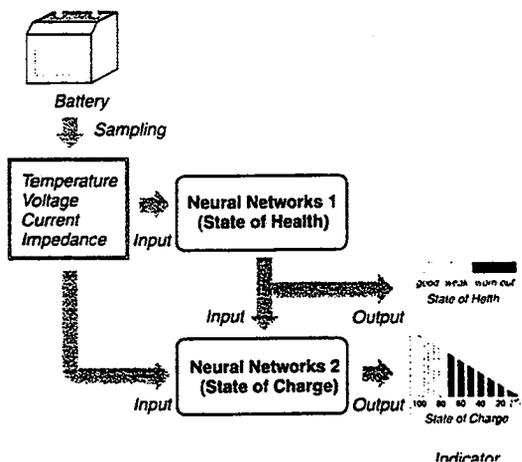


図1 バッテリーチェックシステム

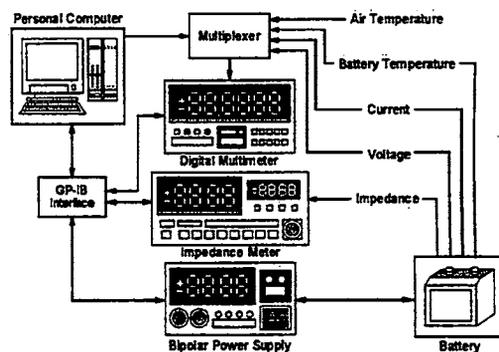


図2 バッテリー特性チェックシステム

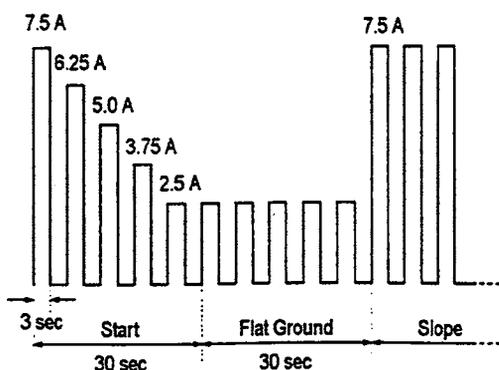


図3 電流波高値変動パターンの例

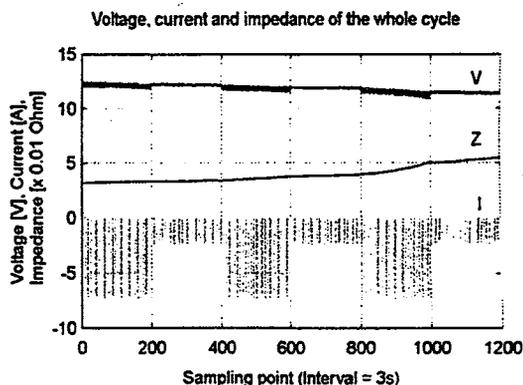


図4 測定波形データの例

### 3 バッテリーチェックとネットワーク概要

システム内では、まずバッテリーの劣化判定を行うためのニューラルネットワーク 1 (図 5) に特性値を入力し、バッテリーの劣化状態を判定する。さらに、この劣化判定の結果とバッテリー特性値をニューラルネットワーク 2 に入力しバッテリーの劣化を考慮した残存容量予測を行う。これらのニューラルネットワークは、入力層、中間層および出力層の 3 層からなる階層型を用い、あらかじめバッテリー特性の教師データにより入出力の相関を学習させた。周囲温度、バッテリー電圧、放電電流、および内部インピーダンスの 4 個のパラメータを正規化して、このニューラルネットワーク 1 に入力し判定を行った。現在の時点  $t$  のみのデータでなく複数個の過去のデータも用いた。ネットワークの出力には、出力層ユニットのうち最大出力のものを選択し、劣化状態の正常、注意、劣化の 3 状態を出力する。図 6 に残存容量予測に用いたニューラルネットワークを示す。残存容量予測に必要なパラメータはバッテリー劣化状態と測定データ 4 個のパラメータを正規化して、残存容量予測ニューラルネットワークに入力し判定を行った。ネットワークの出力には、出力層ユニットを残存容量 100% にたいして 10% ごとの 10 段階にわけ、10 ユニットとした。ニューラルネットワークは中間層ならびに出力層の応答関数にはシグモイド関数を用い、結合荷重およびオフセットの学習は逐次修正型バックプロパゲーション法で変動負荷運用やさまざまな劣化状態において残存容量予測を行った。

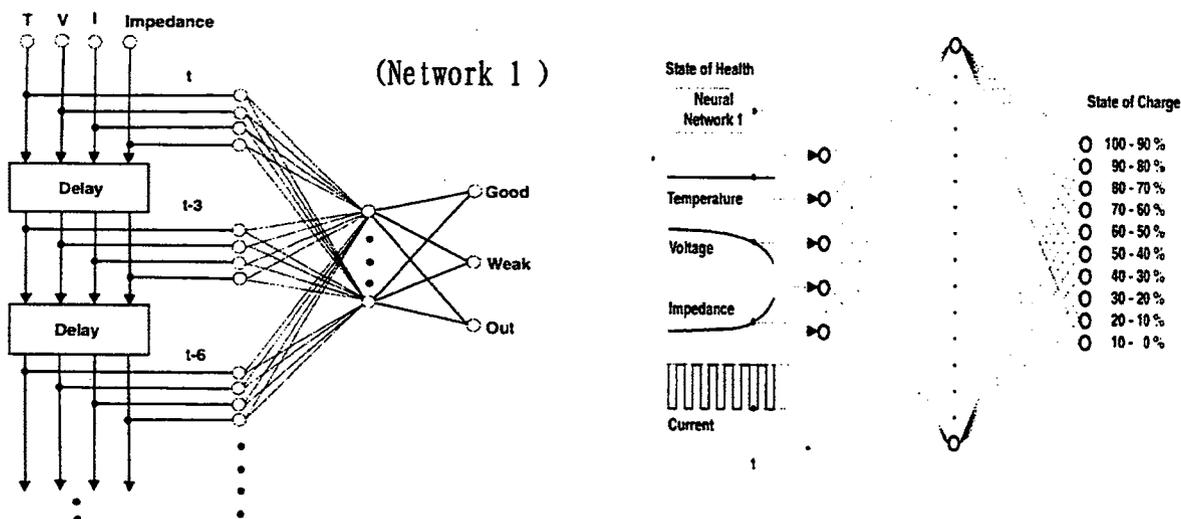


図 5 劣化判定用ニューラルネットワーク 1 図 6 残存容量予測用ニューラルネットワーク

### 4 劣化判定

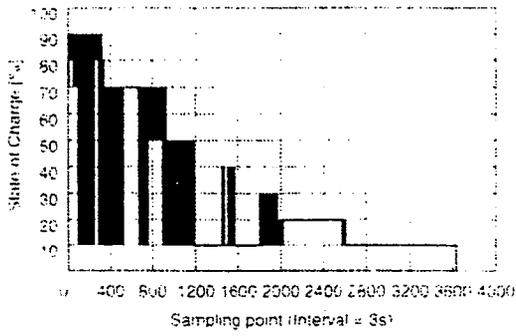
劣化判定の基準として、バッテリーを劣化の進行度合いを正常、注意、劣化の 3 段階に分類した。満充電から放電終止電圧まで 5A (1C) 放電させたとき、放電した電気量が初期実効容量の 100~80% であれば正常、80~60% を注意、60% 以下を劣化とした。劣化状態があらかじめわかっているバッテリーの放電特性データをニューラルネットワークの学習のための教師パターンとして用いた。判定した時点のみ、その時点を含め過去 15 秒間、30 秒間の放電特性データを用いて劣化判定を行った。つまり、30 秒間のデータを用いる場合では時刻  $t$  秒での劣化判定には 3 秒間隔でサンプリングされた  $t \sim (t-27)$  秒の 10 組のデータを利用した。

## 5 ネットワークの学習条件

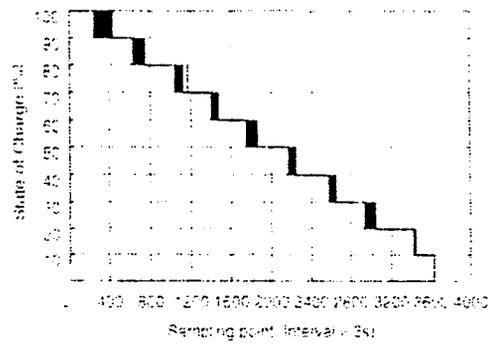
ネットワークの学習パターンは、得られた測定結果より、スタート、平地走行および坂道走行の各モード（図3）を種々に設定温度の全サイクルにわたって抽出（計2,240点）し、作成した。ネットワークの理想出力となる教師信号については図6のパルス放電を新品のバッテリーで行うと25℃では約1,500サンプルで放電終止電圧に達するので、その間を100%に対して10%ごとの10段階にわけ教師信号とした。出力層平均絶対誤差および誤判定パターン数は中間層ユニットの増加に伴い減少するが、中間層ユニット数を求めるにあたり50ユニット近くで一定に収束することが得られたので、ネットワークの最適中間層ユニットの数を50ユニットとしてネットワークを構築・検証した。ニューラルネットワーク1の学習には、劣化状態が「正常」、「注意」、「劣化」の3種類のバッテリーの放電特性データから求めた理想残存容量を教師パターンとして用いた。

## 6 残存容量予測結果

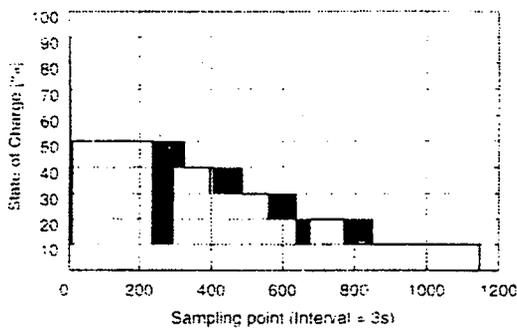
学習後の容量予測システムにより、未学習データに対する残存容量予測を全放電区間に渡って行った結果を図7に残存容量予測結果（劣化状態入力なし）また、図8に残存容量予測結果（劣化状態入力あり）として示す。グラフの横軸はサンプル点の番号、縦軸は初期の実効容量に対する百分率で表した残存容量予測である。網掛部分は実際の残存容量予測（システムの理想出力）を表し、実線がシステムの残存容量予測結果である。劣化状態入力のない残存容量予測結果（図7）の(a)正常バッテリーでは、サンプル点が200～1200の間で予測結果と理想出力との間に誤差が生じ、特にサンプル点200～600付近では出力も安定していない。劣化状態入力のある残存容量予測結果（図8）の(a)正常バッテリーでは、全ての範囲で出力は安定しほぼ実用的な精度で予測できている。注意バッテリー(b)、劣化バッテリー(c)においても劣化状態を入力することにより、同様に予測結果が改善されている。関数の連続性を汎化する能力を持ったニューラルネットワークにより、劣化状態を考慮に入れた容量予測が可能であることを確認した。



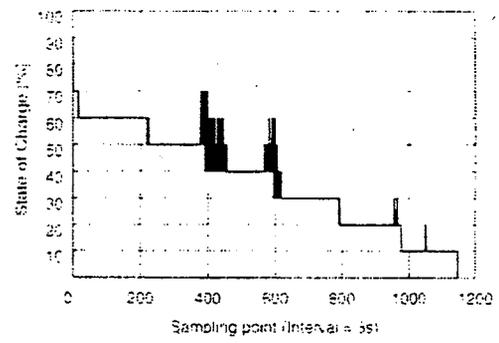
(a) 正常バッテリー



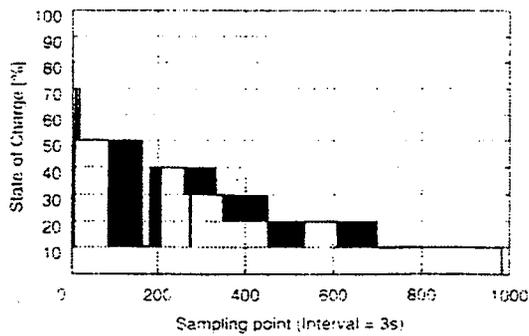
(a) 正常バッテリー



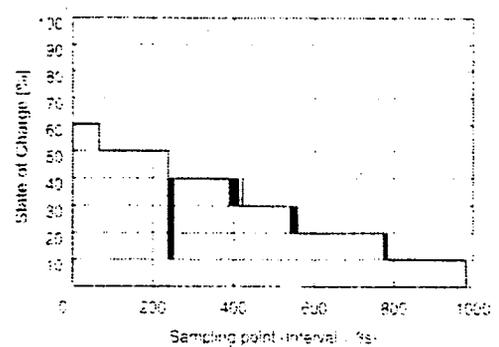
(b) 注意バッテリー



(b) 注意バッテリー



(c) 劣化バッテリー



(c) 劣化バッテリー

図7 残存容量予測結果 (劣化状態入力なし)

図8 残存容量予測結果 (劣化状態入力あり)

## 学位論文審査結果の要旨

平成 15 年 7 月 31 日の第 1 回学位論文審査委員会、および同 8 月 7 日の口頭発表と第 2 回学位論文審査委員会において審査した結果、以下の通り判定した。

近年の情報通信機器、電気自動車や電気自転車等の普及により、バッテリーの需要は拡大してきている。特に、電解液管理の不要なシール形鉛バッテリーが開発され、用途は益々拡大している。このバッテリーの残存容量と劣化判定を予測するシステムの開発が切望されているが、その構造上から、通常の電解液測定による方法が採用できないために、これらの予測が極めて困難であった。

本論文では、短時間で容易かつ正確に残存容量等を予測できるシステムの開発を目的とした。まず、外部から測定可能なバッテリーの電気的特性を自動的に測定し、記録できるシステムを構築し、負荷変動に対する特性を測定した。これらの測定値と残存容量との相関は極めて複雑であるので、数式化は困難であった。そこで、これらの測定値をパラメータとする階層型ニューラルネットワークを構成し、劣化判定と残存容量の予測実験を行ったところ、実用上十分な精度で劣化判定と予測を行うことができた。

以上の研究成果は、バッテリーの残存容量等を予測する新しい手法を提案しており、その実用化の可能性も高く、本論文は博士（工学）論文に値するものと判定する。