平成28年度 職業訓練教材コンクール　厚生労働大臣賞（特選）受賞作品

高速化するディジタル回路における信号品質を理解するための実習教材の開発

近畿職業能力開発大学校　望月　隆生

1. はじめに

ディジタル回路基板上の無対策な配線では，反射と呼ばれる現象が発生して配線に流れる信号に乱れが生じる。信号の乱れは極短時間であるため，学校で作成するような回路では影響が無いが，高性能なディジタル機器やコンピュータに使用されているような高速ディジタル回路では，動作を狂わす原因となる。この信号の乱れの程度を信号品質と呼び，信号品質を低下させない技術は，今日のコンピュータやディジタル家電等の設計において必須である。

しかし，信号品質が動作に影響するほどの高速ディジタル回路は，学校の実習環境で実験を行うことが困難である。これは，高速ディジタル回路の信号帯域が高く，実験が容易でないためである。その結果，従来の実習では，部品や配線の変更によって回路内の信号波形に変化が認められてもディジタル回路としての動作（回路の出力）には影響が無く，信号品質に関する技術の必要性と対策の有効性が実感しにくいという問題があった。

この問題を踏まえ，信号品質を低下させる要因と対策技術の有効性の理解を目的として本教材を開発した。本教材は，信号品質の悪化による回路の誤動作と，対策技術による回路動作の正常化が学校の実習環境で確認することが可能である。本教材の実験回路は回路基板にケーブルを接続し，ケーブル端の反射を利用して信号品質を低下させる。さらに信号品質が低下すると通常と異なる信号を出力するように回路を設計してあるため，回路の正常動作と誤動作を明確に判別することができる。

2. 教材の概要

2.1　教材の構成

教材は実験回路，実習の手引き，実験回路図で構成される。それぞれの概要を以下に述べる。

（1）実験回路

教材で使用する実験回路を図1に示す。回路基板はサイズが50mm×70mmの片面基板であり，信号の流れがイメージしやすいように配線と主な部品が基板の表面になるようにしている。基板は基板加工機で製造しているが，エッチングや外注で製造しても問題はない。基板加工機で製造する場合，加工時間の長さが問題になるが，小型の片面基板であるため短時間で製造することが可能である。

実験回路の内部では，図2に示したように入力信

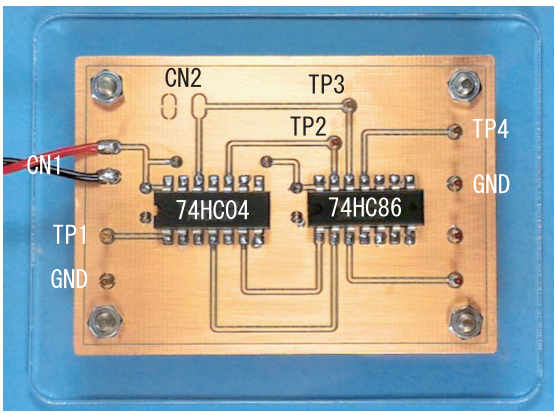


図1　実験回路基板

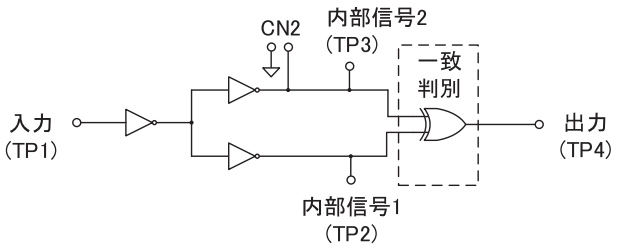


図2　実験回路

号を分岐させ，XOR素子を用いて分岐した2つの信号の一致判別を行う。判別結果は，信号に差異が無いと論理‘0’が，差異があると論理‘1’がそれぞれ出力される。ただし，実際の動作における信号の差異の発生は，短時間の現象であるため，不一致を示す判別結果はパルス状の信号となって現れる。

(2) 実習の手引き

実習の手引きは「指導案」と「実験の手順」で構成される。指導案には実習の流れと指導の要点を記載し，実験における機材や具体的な手順，計測される波形の例などは，実験の手順に記載した。指導案の中に全て記述することが本来の姿であるが，本教材では指導案と実習の手順を分けることで教材の汎用性が高まり，本教材の実験を他のカリキュラムや実習に適用しやすいと考えた。

(3) 実験回路図

実験回路の回路図であり，回路の動作を説明する際に用いる。

2.2　教材の適用

実習の手引きにある指導案に基づいて実習を進行し，その中で5つの実験を行う。各実験の前には，実習の手引きにある実験の手順に基づいた説明を実施する。各実験は小規模であるため比較的短時間で実施可能である。各実験で得られる結果は，実習の中で動機付けや提示される理論の確認となり，信号品質に関する説明を補助する。各実験の具体的な内容については次章で述べる。

2.3　学生用の実験手順書が無い理由

実験形式の実習では，学生は再実験とならないように実験手順書に従うことに専念し，その結果，実験を単なる作業としてこなしてしまう傾向が少なからず見受けられる。その結果，自身で実験を行ったにもかかわらず，実験の目的や内容をほとんど理解していないというケースも残念ながら存在する。また，実験手順書がある場合，早い学生は手順書に従って最後まで実験を進めることが可能であるため，進捗の個人差が大きくなることも問題であった。

こうした問題を踏まえて，本教材では学生用の実験手順書を用意していない。本教材は各実験の目的と手順がシンプルであるため，実験ごとに指導員が板書で説明することを想定している。さらに，実験ごとに指導員の説明をはさむ事で学生の進捗を揃える意図もある。

3. 教材による実験

3.1　実験1

実験1では，これまでに学んだディジタル回路技術の確認を行う。

図1に示した実験回路のCN1に電源（3.3V）を接続し，方形波（12MHz，3.3Vpp）をTP1に入力して，TP2，3，4の信号をオシロスコープで計測する。

信号の流れを図3に，計測される内部信号と出力

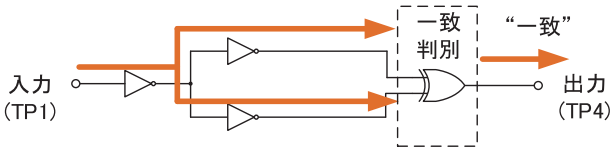


図3　実験1における信号の流れ

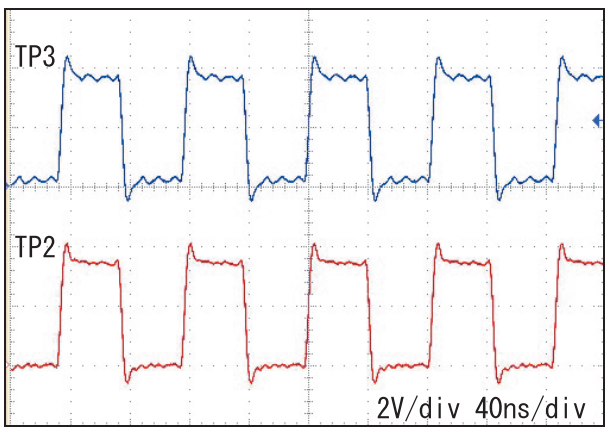


図4　実験1における内部信号波形

信号の波形を図4と図5にそれぞれ示す。当然のことながら2つの信号に差異は無いため一致を示す信号が出力される。

以上の回路動作は学生がこれまでに学んだディジタル回路技術により，すべて説明することができる。

3.2　実験2

実験2では，これまでに学んだディジタル回路技術だけでは，回路が正常に動作しない状況を経験させることで，新たな技術（信号品質）を学ぶための動機付けを行う。

実験2では，図6に示したように実験1の回路に1400mmのケーブル（3芯フラットケーブル）を接続する。接続は図7に示したように中央の線を信号線に，両側の線をGNDとし，ケーブルの先端は開放状態とする。

学生がこれまでに学んだディジタル回路技術に照らし合わせると，このケーブルは回路動作に影響しない配線であることが予想される。しかし，実際の動作では図8に示したようにケーブルの端で反射と呼ばれる現象が発生する。反射により戻ってきた信号はケーブルの往復に要した時間だけ遅れが生じて

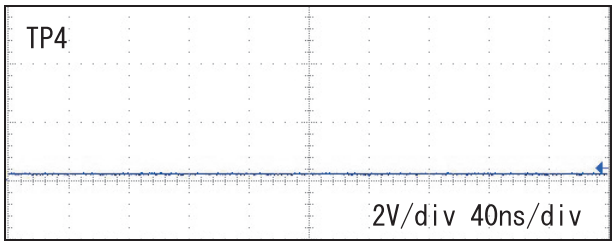


図5　実験1おける出力信号波形

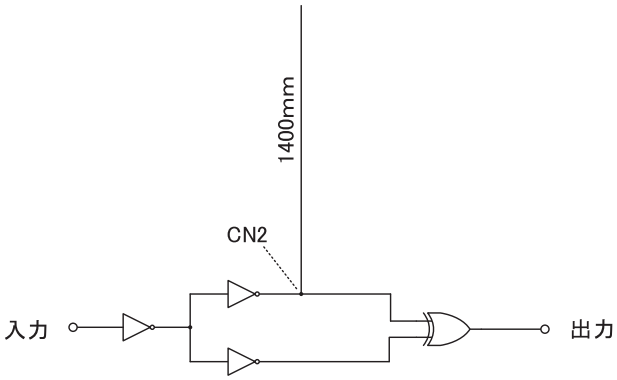


図6　実験2における実験回路

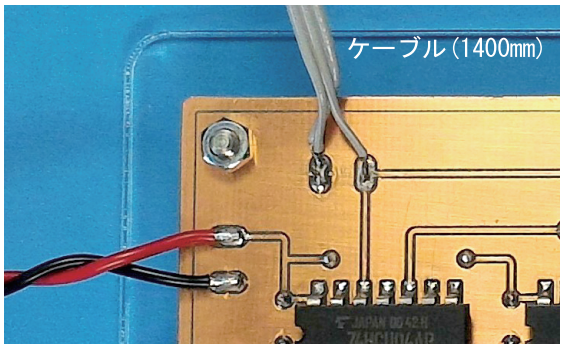


図7　ケーブルの取り付け

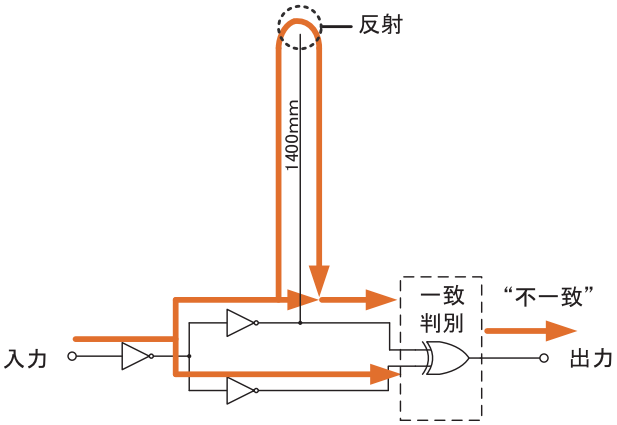


図8　実験2における信号の流れ

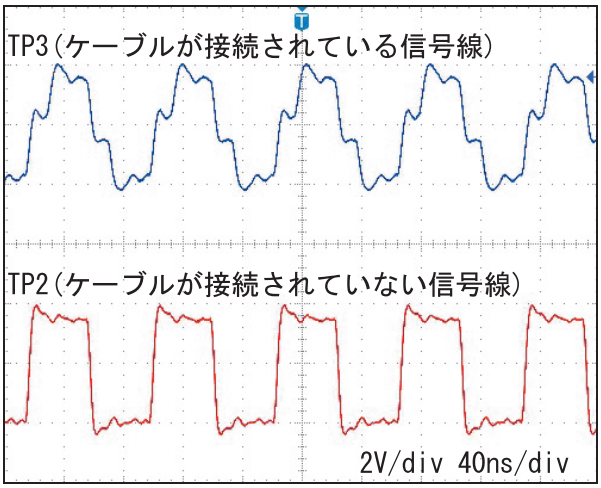


図9　実験2における内部信号波形

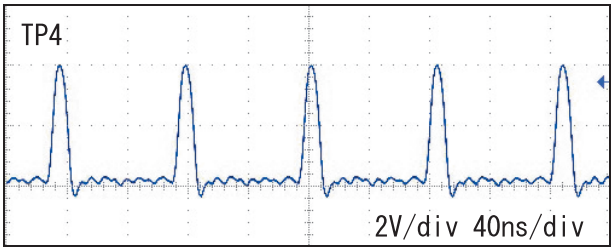


図10　実験2における出力信号波形

おり，反射前の信号との間で干渉が生じて信号波形に歪みが発生する。実測の波形を図9に示す。ケーブルを接続した信号に歪みが生じると，ケーブルを接続していない信号との間に差異が現れ，一致判定の結果，不一致を示す信号が出力される。実際の波形を図10に示す。差異の発生に応じてパルス状の信号が出力されていることがわかる。

実験2の結果は，信号品質の低下により回路が誤動作し，正常時と異なる信号が出力されたと解釈することができる。

3.3　実験3

信号品質に関する理解を深めるために，実験3では反射経路の長さと信号品質の関係を調べる。さらに，その結果から信号品質には対策が存在することを示し，対策技術を学ぶ動機付けを行う。

実験3では図11に示したように，ケーブルを順次短く切断しながら測定を行う。計測される内部信号と出力信号の波形を図12と図13にそれぞれ示す。ケーブルの往復に要する時間が短縮されることで，次第に内部信号の歪みが小さくなり，出力が，不一致を示す信号から一致を示す信号へと変化する様子

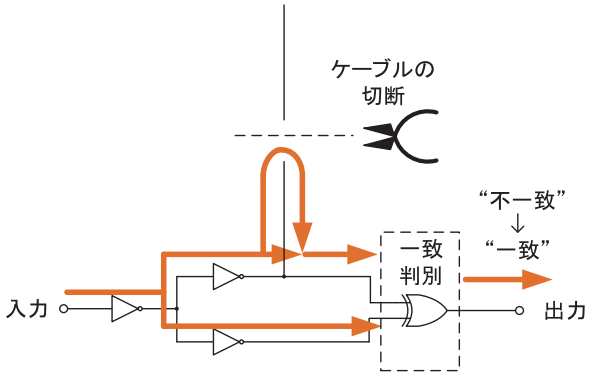
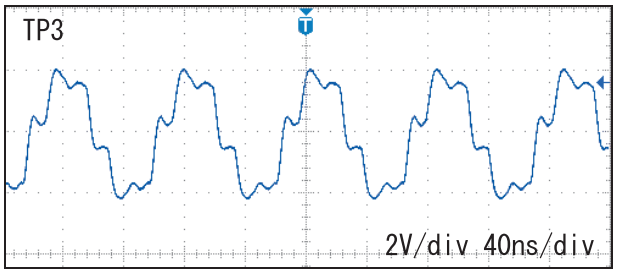
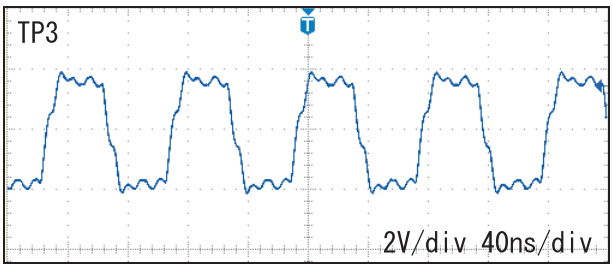


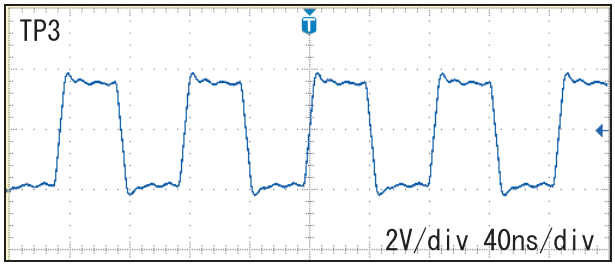
図11　実験3における信号の流れ



(a) ケーブル長1400mm

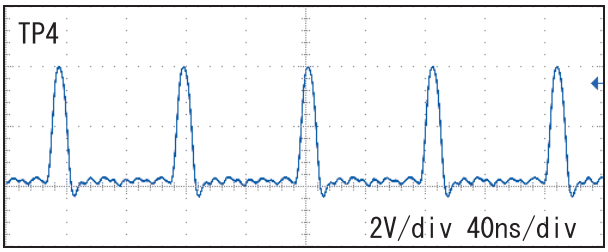


(b) ケーブル長800mm

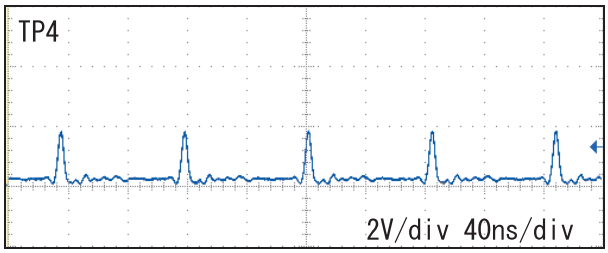


(c) ケーブル長400mm

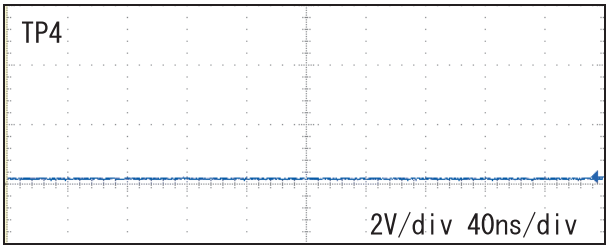
図12　実験3における内部信号波形



(a) ケーブル長1400mm



(b) ケーブル長800mm



(c) ケーブル長400mm

図13　実験3における出力信号波形

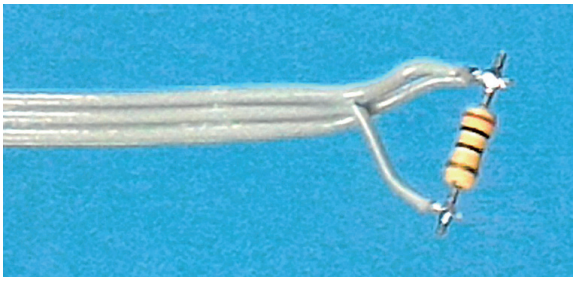


図14　終端抵抗の取り付け

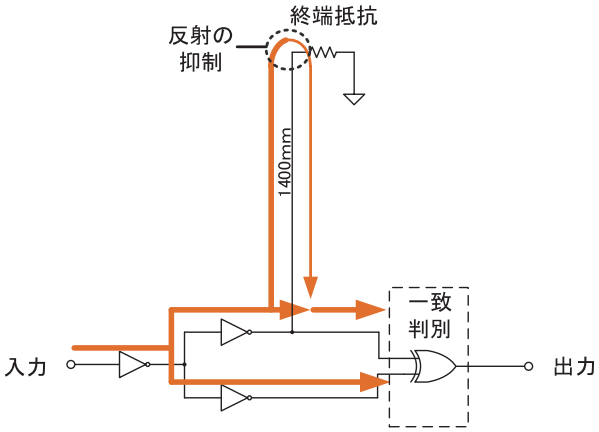


図15　実験4における信号の流れ

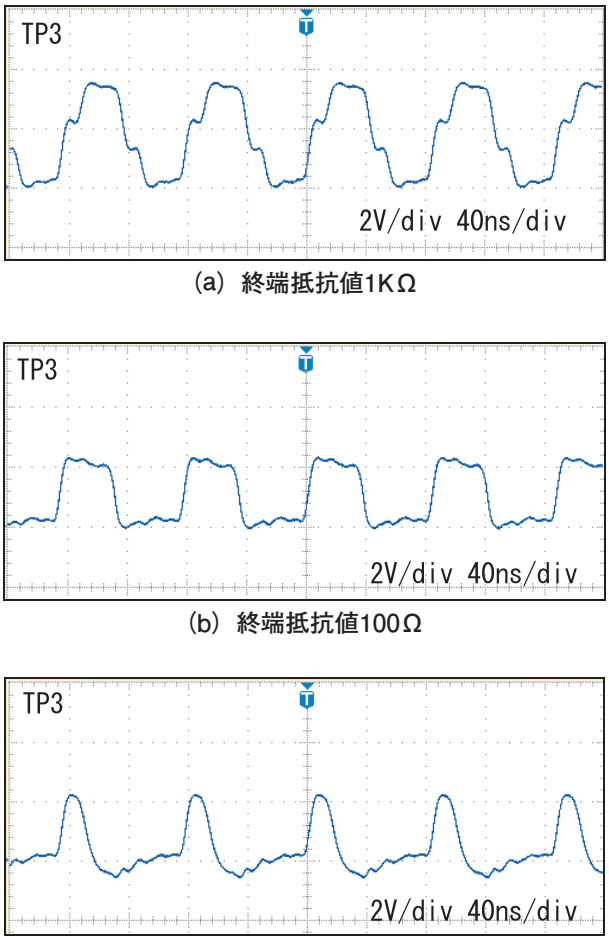
が確認できる。この状態は，反射経路を短くすることで配線の信号品質が向上し，回路の動作が正常化したと言い換えることができる。また，実験結果を踏まえて回路動作が正常化する反射経路の長さは，回路の動作速度に依存し，動作速度が高速であるほど反射経路の長さに注意が必要であることが説明できる。

3.4　実験4

終端回路を対策技術として説明した上で，実験4では，終端回路のひとつである並列終端について終端抵抗の値と信号品質の関係を調べる。

実験4では，図14に示したようにケーブルの先端に様々な抵抗値の終端抵抗を接続して内部信号の波形を測定する。

終端抵抗は図15に示したように反射を抑制するが，図16に示したように終端抵抗は小さすぎても大きすぎても効果が低下し，ある特定の値の時，最も効果が発揮されることが確認できる。



(a) 終端抵抗値1KΩ

(b) 終端抵抗値100Ω

(c) 終端抵抗値10Ω

図16　実験4における内部信号波形

3.5　実験5

実験5では，最適な終端抵抗を接続した時の有効性を確認する。

実験4で最も歪みを小さくすることが出来た終端抵抗を改めてケーブルの先端に接続して出力信号を計測する。終端抵抗の値が最適であるとき図17に示したように無反射の状態となり，1400mmのケーブルが接続されているにも関わらず一致を示す信号の出力を確認できる。つまり，適切な終端抵抗を接続することで信号品質が向上し，回路の動作が正常化したといえる。計測される波形を図18に示す。

実習では実験結果を踏まえて，反射係数の計算式を示しながら接続されている終端抵抗の値はケーブルの特性インピーダンスと等しいことを説明し，さらに特性インピーダンスの説明へと展開する。

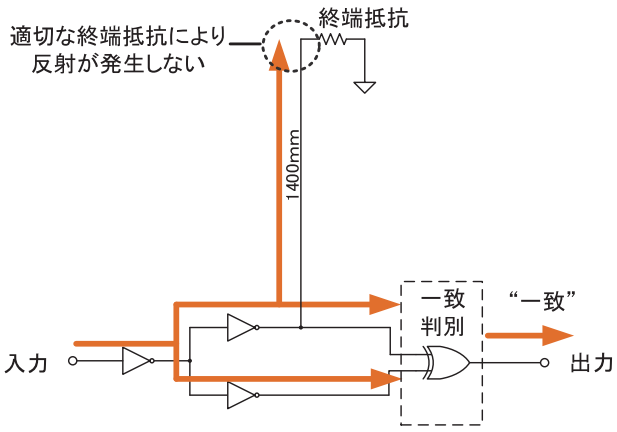


図17　実験5における信号の流れ

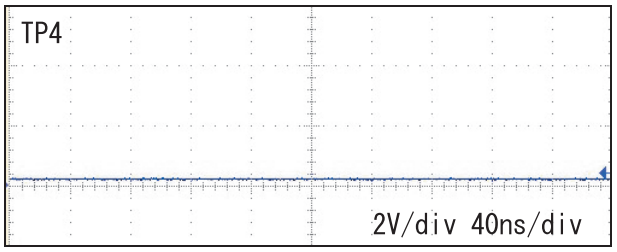


図18　実験5における出力信号波形

4. 教材活用の効果

4.1　経験に基づいた理解

これまでの実習では，

・信号品質が低下すると回路は正常に動作しない

・信号品質を考慮して適切に設計を行えば回路は正常に動作する

などの事象を知識として説明するに留まっていたが，これを本教材では，実験的に確認することができる。その結果，信号品質が低下する原因と設計時に信号品質を考慮する必用性，信号品質に関する対策技術とその有効性などについて，経験に基づいて理解することが可能である。

4.2　実習の円滑な実施

高性能な計測機器を必要とした場合，機器の整備台数が少ないことから使用する順番を待つ時間が発生し，実習を円滑に実施することが困難であるが，本教材の実験回路は比較的低い帯域で現象を確認できるため，整備台数の多い普及モデルの計測機器で実験可能である。その結果，計測機器を並んで使用する必要がなくなり，円滑に実習を実施することができる。

4.3　実習の低コスト化

実験回路は部品点数が少なく特殊な部品を使用していない事と，回路基板は小型の片面基板であるため1枚のワーク基板からの取り数を多く設定できる事から，部材費を安価に抑えることが可能である。

4.4　他の指導項目への展開

実際の設計において，信号品質の検討は伝送線路シミュレータと呼ばれるソフトウェアを使用し，本教材を使用する実習の中でも，伝送線路シミュレータの使い方や演習に多くの時間を割いている。本教材はこの伝送線路シミュレータの題材とすることも想定しているため，「教材の実験回路基板を題材としたシミュレータの習得」，「シミュレータを活用した設計」などの展開が可能である。

また，信号品質を低下させる原理はTDR（Time Domain Reflectometry）であるため，「TDRによる特性インピーダンス測定」を教材に含めることも可能である。

5. おわりに

信号品質に関する学生の理解と技術習得の助けとするために本教材を開発した。本教材により，学校の実習環境では実験の難しかった現象を“見える化”することができた。

また本教材は，職業能力開発大学校の生産電子情報システム技術科で実施される「EMC応用実習」の一部として使用することを想定しているが，どのようなカリキュラムにおいても信号品質を教える科目であれば適用は可能であると思われる。

第4章で述べたように本教材の実験回路はまだ多くの展開の余地があることから，教材の拡充が今後の課題である。引き続き，高度な技術でも解りやすく習得できるように工夫と努力を重ねたい。