

信号品質を理解するための教材の開発

望月隆生*

信号品質は高速デジタル回路を正常に動作させるために考慮すべき要件のひとつであるが、信号品質が動作に影響するほどの高速デジタル回路は、その信号帯域の高さから実習教材とすることが難しかった。そこでケーブルを反射経路とすることで、実習環境でも信号品質の低下と回路の誤動作を確認できる教材を開発した。本教材は、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促す。とりわけ信号品質低下による回路の誤動作は、これまで講義のみで説明していたが、本教材を活用することで、実体験として理解することが可能となる。

Keywords : 信号品質, 反射, 終端技術, 教材.

1. はじめに

コンピュータを含めてデジタル回路は、多くの電子機器にとって欠かせない存在である。また電子機器の高性能化を目的に、常にデジタル回路は高速化が求められ、半導体メーカによってデバイスの高速化が行われてきた。しかしデジタル回路の高速化は、デバイスの高速化だけでは実現できない。

低速なデジタル回路では、素子間の配線は電氣的に導通していれば正しく信号を伝えることができるが、動作が高速化するにつれ、単に導通しているだけの配線では信号を正しく伝えることが難しくなる。こうした現象は信号品質と呼ばれる配線に流れるデジタル信号の品質が低下することによって発生し、信号品質の低下は、高速デジタル回路が誤動作する原因となる。

信号品質の低下は、配線のインピーダンス変化、配線と素子のインピーダンス不整合などを要因とし、適切な対策を施すことで信号品質の低下を抑えることができる。したがって、今日の高速デジタル回路を設計する上で信号品質を低下させない技術は必須となっている。

しかし学校の実習環境では、信号品質が動作に影響するほどの高速デジタル回路の実験を行うことが困難であった。これは、高速デ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難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. 実験回路の概要

実験回路図を図1に示す。回路は、NOT素子をバッファとしながら入力信号を分岐させ、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。

教材で使用する実験回路を図2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

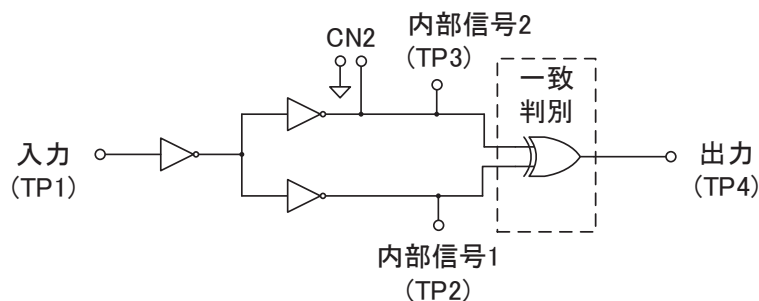


図1 実験回路図

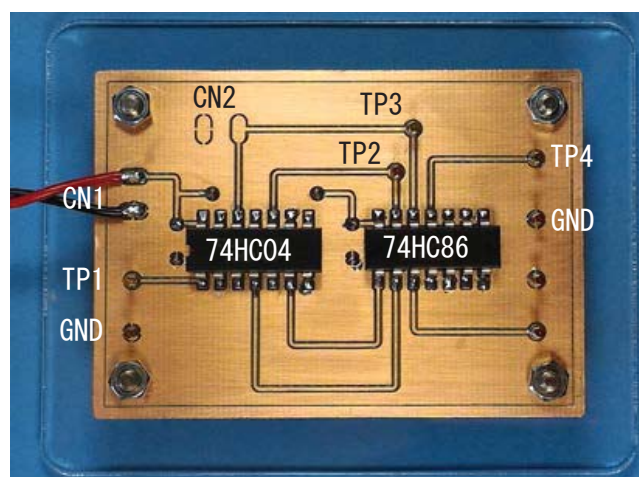


図2 実験回路基板

* 生産電子情報システム技術科

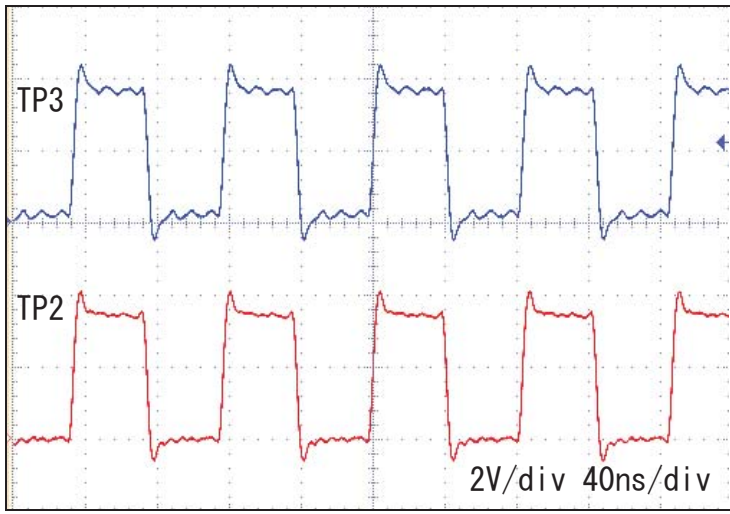


図3 内部信号波形

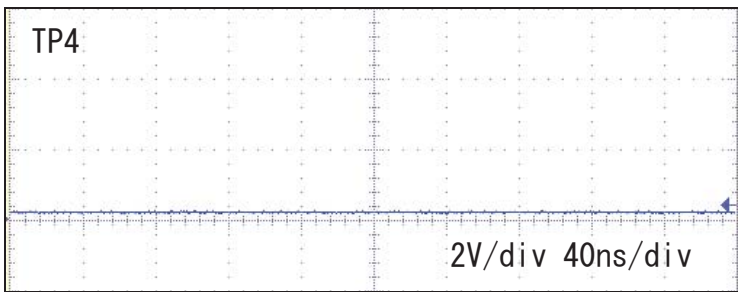


図4 出力信号波形

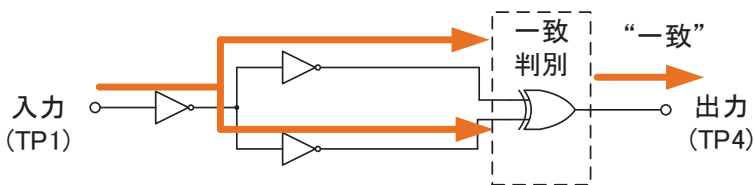


図5 実験回路内の信号の流れ

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。

実験回路に方形波（12MHz, 3.3Vpp）を入力した時の内部信号（TP2, TP3）と出力信号（TP4）を図3と図4にそれぞれ示す。図5に示したように回路内で分岐させた2つの信号は図3に示したように差異が無いため、一致を示す信号が出力される。図4に示した波形が出力されているとき、入出力の関係は学生が学んだ論理演算に従っており、回路が正常に動作している状態である。

3. 信号品質の低下と対策効果を確認する実験

3.1 信号品質の低下による回路の誤動作 実験回路のCN2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6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とする。この状態で方形波を入力し、内部信号波形と出力信号波形を計測する。

学生がこれまでに学んだデ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7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おり、反射前の

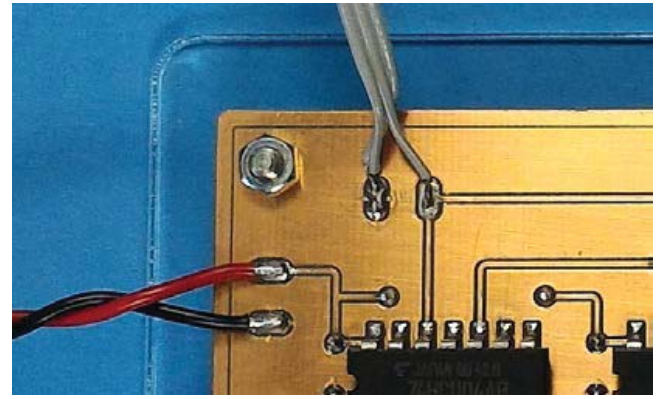


図6 ケーブルの取り付け

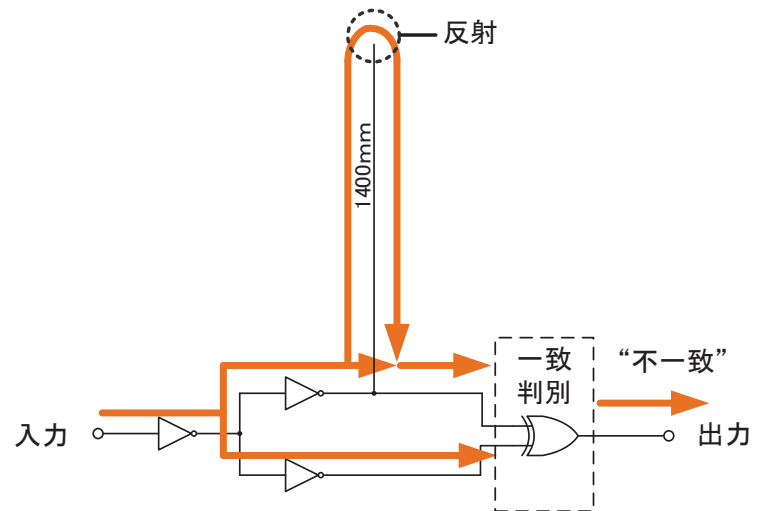


図7 反射が発生した場合の信号の流れ

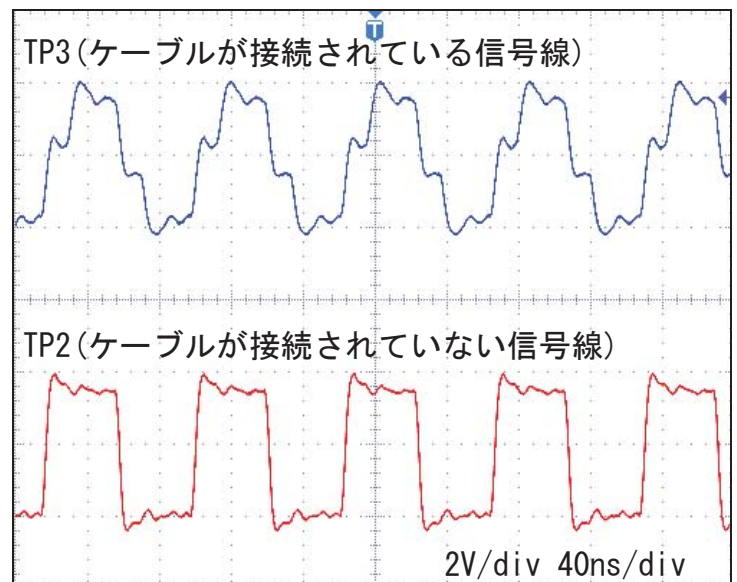


図8 ケーブルを接続したときの内部信号波形

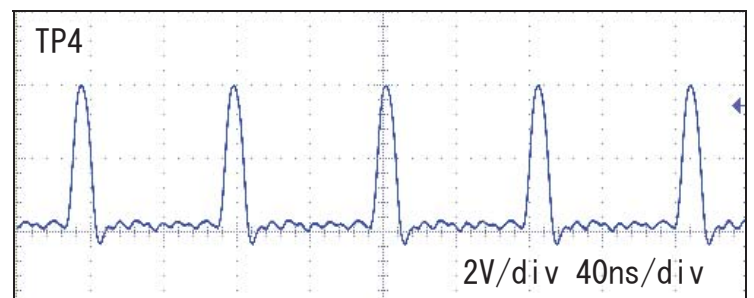


図9 ケーブルを接続したときの出力信号波形

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8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9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。

以上の実験結果は、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。この実験により、学生はこれまでに学んだデ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し、信号品質を学ぶための動機付けを図る。

3.2 反射経路の短縮による信号品質の向上 この実験では図 10 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 11 と図 12 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が確認できる。この状

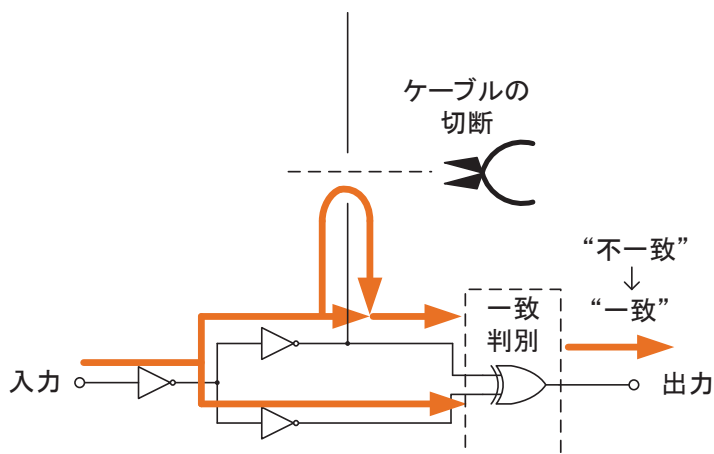


図 10 反射経路を短くする実験

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。

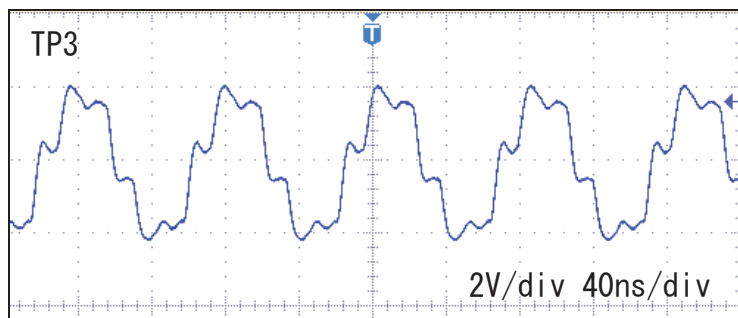
実習では、実験結果を踏まえて回路の誤動作で発生するパルスの振幅が素子の動作速度と関係していることを説明し、動作速度が高速であるほど反射経路の長さには注意が必要であることの理解を促す。

3.3 終端技術による反射の抑制 終端抵抗の接続は図 13 に示したよう反射を抑制する終端技術のひとつである。この実験では、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。

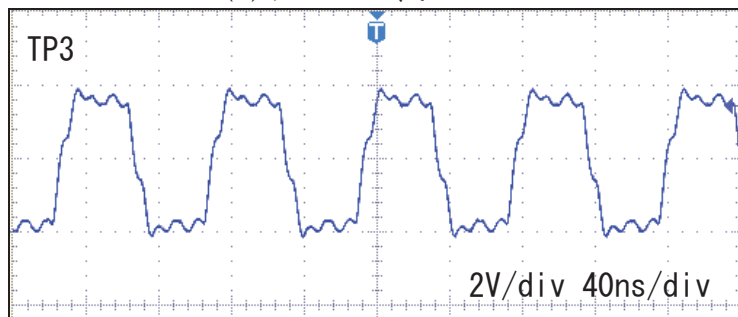
実験結果を図 15 に示す。測定された波形から終端抵抗は小さすぎても大きすぎても効果が低下し、ある特定の値の時、最も効果が発揮されることが確認できる。

さらに最も内部信号の歪みを小さくすることが出来たとき、1400mm のケーブルが接続されているにも関わらず図 16 に示したように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。

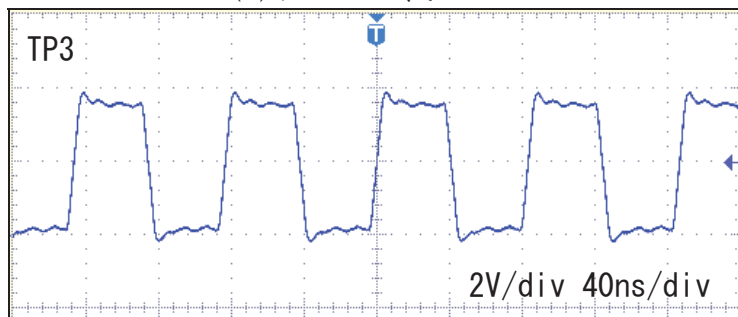
実習では以上の実験結果を踏まえて、終端抵抗の効果が最大化しているとき、終端抵抗の値と配線の特性インピーダンスが等しくなっていることと、終端抵抗の役割は配線と素子のインピーダンス整合であることを説明することができる。



(a) ケーブル長 1400mm

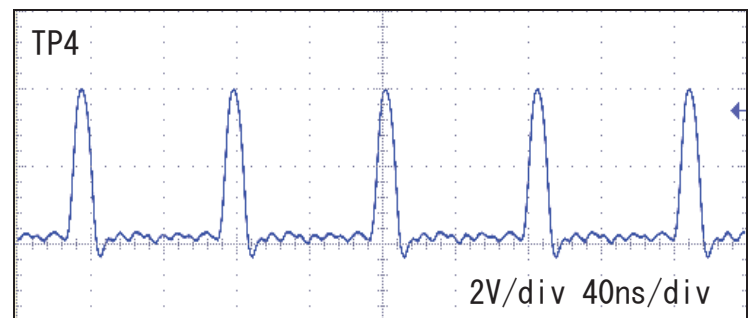


(b) ケーブル長 800mm

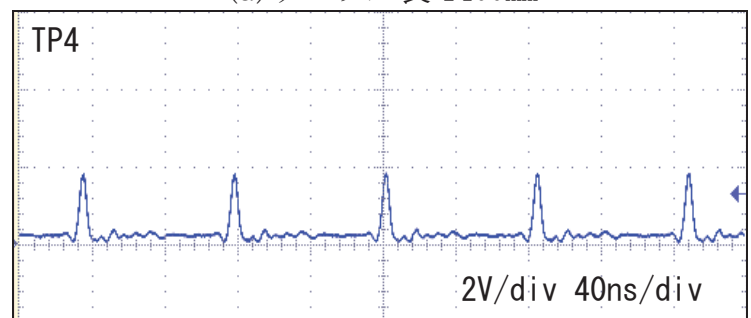


(c) ケーブル長 400mm

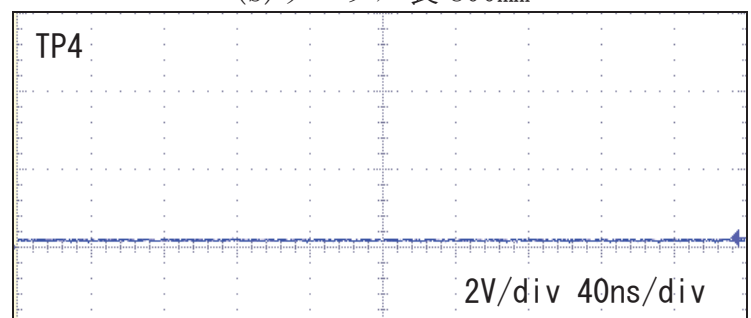
図 11 反射経路の長さの違いによる内部信号波形



(a) ケーブル長 1400mm



(b) ケーブル長 800mm



(c) ケーブル長 400mm

図 12 反射経路の長さの違いによる出力信号波形

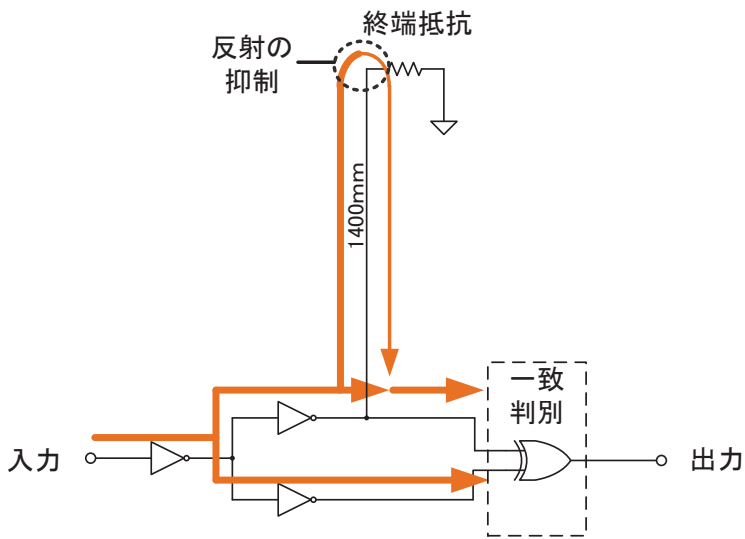
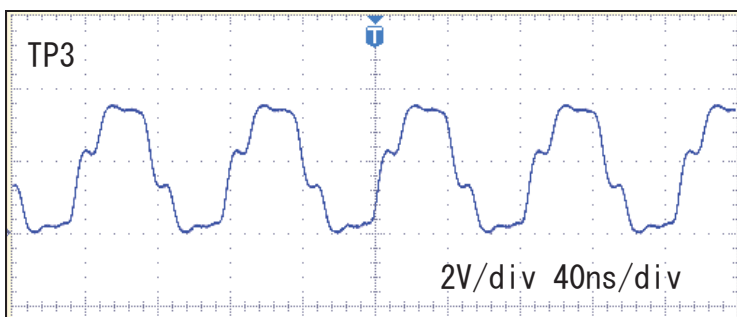


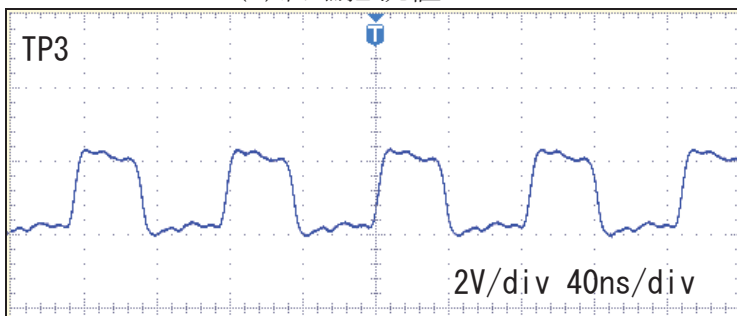
図 13 終端抵抗を接続したときの信号の流れ



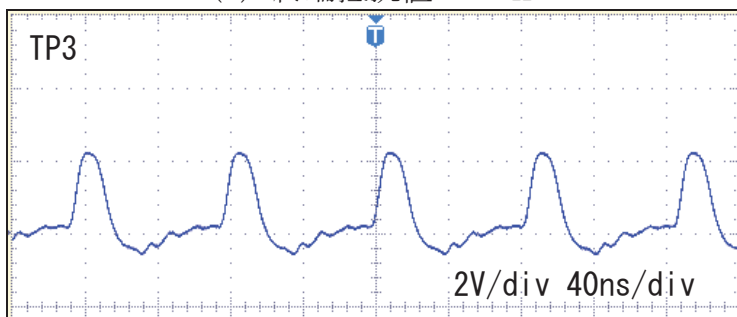
図 14 終端抵抗の取り付け



(a) 終端抵抗値 1K Ω



(b) 終端抵抗値 100 Ω



(c) 終端抵抗値 10 Ω

図 15 終端抵抗の違いによる内部信号波形

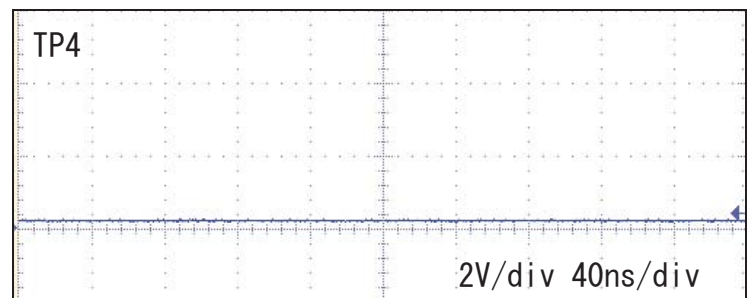


図 16 適切な終端抵抗を接続したときの出力信号波形

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

などの事柄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要性、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

実習において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するが、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、教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」などへの展開を行っている。

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」についても実習の中で触れている。

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。今後も、高度な技術でも解りやすく習得できるような実習を目指して工夫を重ねたい。

(2017年 06月 29日提出)