

錆を介する金属接触部における抵抗特性を利用した デジタルの理解を促す教材と授業の開発

河野哲志*・湯地敏史**・小八重智史**・藤元嘉安**

Development of Teaching Materials and Classes to Promote Digital Understanding
Using Resistance Characteristics in Metal Contact Point with Rust

Tetsushi KAWANO*, Toshifumi YUJI**, Satoshi KOBAE** and
Yoshiyasu FUJIMOTO**

1. はじめに

情報通信に係る指導事項において、デジタルについては、理解を促すことが難しく、説明する自信を高めることや、他の指導事項と関連付けて説明させることが難しい指導事項であることが明らかにされている¹⁾。そこで、これまでのデジタルの授業で行っていたような、アナログ・デジタル変換の方法や離散値としてのデジタル特性について学ばせるのではなく、デジタル技術による恩恵を日常生活の中でよく目にする金属材料の錆と関連付けて学ばせることで、実際の生活と関連させながらデジタルについての理解をよりよく促していきたいと考えた。具体的には、コネクタやリレー等の生活の中にある金属接触部に流れる電気信号をシミュレートする教材を用いて、デジタル信号やアナログ信号の送受信を体験する場を設定し、デジタル信号の恩恵を認識させることで、デジタルの理解を促したいと考えた。

コネクタやリレー等の金属接触部の抵抗（以下、接触抵抗と呼ぶ）は、接触部の電気的性能を評価する重要な特性の1つとなっている。コネクタやリレー等の電気接点の接触部の表面に酸化物や硫化物等の錆が介在すると接触抵抗が増大する。しかし、接触部にかかる印加電圧や通電電流を増加させてゆくと、ある値で抵抗値が低下（電氣的破壊）して低接触抵抗が回復する現象がある。すなわち、接触抵抗は非可逆的な非線形抵抗を示す²⁾。また、厚さ数100Å以下の絶縁体や半導体の性質をもつ錆が電氣的接触部や接続部に介在すると、薄膜の導電機構によりショットキー電流やトンネル電流が流れるが、ある値を超えると、これらの電流の増加と共に接触抵抗が減少することが報告されている³⁾。さらに、清浄な表面を持つ接触部についても、Joule発熱による温度上昇が接触部（真実接触点）の硬度に影響する程度になると、接触抵抗（この場合は集中抵抗）が電流の増加に伴い減少することが明らかにされている⁴⁾。このように、接触抵抗は、錆が介在しても、あるいは清浄面の接触であっても、通電の電流値がある値を超えると電流の増加と共に減少する。つまり、金属接触部の抵抗は、非線形を示すため、

* 西都市立三納小中学校, ** 宮崎大学教育学部

錆が介在したコネクタやリレー等の金属接触部の電気信号は歪む。

そこで本研究では、金属表面に生成される錆の影響により電気信号が歪む現象を利用して、デジタルの理解を促す授業を構築したいと考えた。具体的には、授業で、錆が介在する金属接触部と錆がほとんど介在していない金属接触部に、Joule 発熱による温度上昇が接触部の硬度に影響しないレベルのアナログ信号やデジタル信号を送り、入出力の信号をオシロスコープで観察させると共に、音質の変化を実際に聴く場を設定し、デジタル信号が錆に強いことを実感させることで、デジタルの理解をよりよく促したいと考えた。また、デジタルの理解が促される教材や授業であるかを明らかにするために、授業の前後で学習者に、デジタルについて説明する自信の程度を自己評価させると共に、デジタルを含めた情報通信に関する指導事項を参考にした概念地図の作成を行わせ、それらの授業前後の変化を分析した。

2. 教材の作製

本研究では、Cu を用いて教材を作製することとした。理由は次の4点である⁵⁾。

- ① Cu は導電率、加工性、経済性等の優れた諸特性により導電材料として生活の中で広く用いられ、電気接触部においても基本的な材料として広く利用されている。
- ② Cu は大気中では錆が生成されにくいですが、熱を加えることで容易に酸化させることができる。
- ③ Cu の酸化皮膜は半導体特性をもち、電気信号を歪ませる。
- ④ Cu の酸化皮膜は圧力で破壊されるため、薄く錆が生成されても、表面に物理的な圧力を加えれば、錆が除去され、錆の影響を電気信号に与えない。

作製した教材を表したのが図1である。これらの教材にアナログ信号の音やデジタル信号の音を通電させ、通電前後の音の状態を比較させたいと考えた。

図1(a)は錆sが介在する金属接触面を表すものであるが、これは錆が生成した金属Aの表面と錆がほとんど除去された金属Bの表面を接触させたものであり、錆sが金属接触面で挟まれた状態になっている。図1(b)は錆が介在していない金属接触面を想定したものであり、錆がほとんど生成されていない2つの金属Bの表面を接触させたものである。



(a) 錆が金属接触面間にはさまれた教材

(b) 錆がほとんどない金属接触面の教材

図1 Cu を用いた教材

錆が生成された金属A並びに錆がほとんど除去された金属Bは、共に純度99.9%の銅板(10mm × 10mm × 0.8mm)を用いた。金属Aについては、表面を電気炉(300℃)で加熱し酸化物

皮膜を生成した。加熱時間については、皮膜を通しての酸素や金属イオンの拡散を考慮して、Arrhenius の関係を用いた次式から求めた⁶⁾。

$$d^n = i \cdot t \cdot \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right)$$

ここで、 d は被膜の厚さ (Å), n と i は定数, Q は活性化エネルギー (cal/mol), R は気体定数 (1.98719cal/K·mol), T は温度 (K), t は酸化時間 (sec) である。

金属 A はショットキー電流の特性³⁾が十分に生じるように、非常に厚い錆を生成したいと考え、 $d=1000$ (Å) とし、酸化時間を約 200sec とした。次に、電気炉で燃焼した銅板は全面が錆で覆われた状態になっているので、電気炉の中で上を向いていた面の錆を傷つけないように注意しながら、反対の面をポリッシュすることにより片面だけに錆を生成させた金属 A を完成させた。また、金属 B は、銅板の両面をポリッシュして鏡面仕上げとし、できる限り錆を除去した。

図 2 は、錆がある金属 A、錆がない金属 B の接触面である。この 2 つの金属接触面を組み合わせて図 1 の教材を作製した。図 1 の教材を利用した実験回路を表したのが図 3 である。また、図 1 の教材を利用してオシロスコープで電気信号 (正弦波: 6500Hz) の様子を観察したのが図 4 である。その結果、図 1(a) の教材を利用した場合には信号が歪み、図 1(b) の教材を利用した場合には、信号が歪まないことが確認できたので、これらの教材を用いて授業を展開することとした。

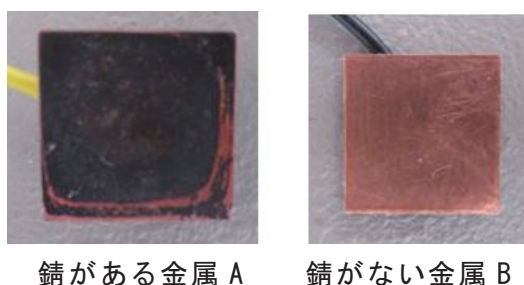


図 2 錆がある金属 A と錆がない金属 B の接触面の様子

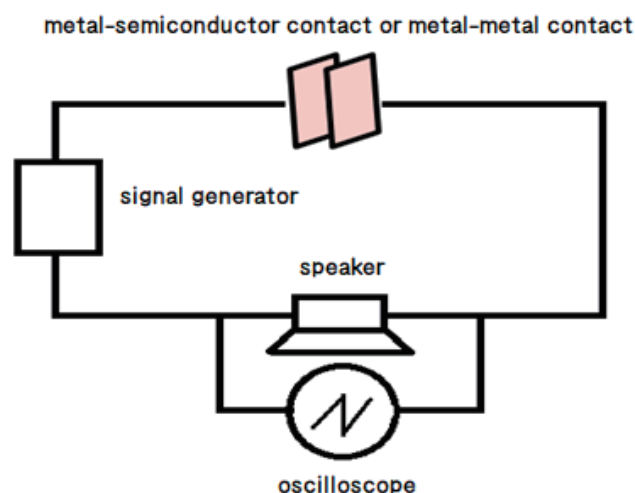
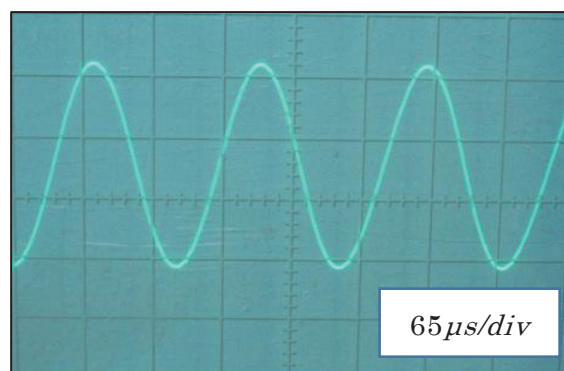
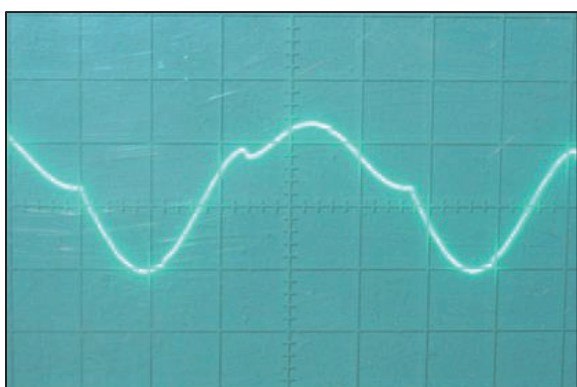


図 3 実験回路



(a) 錆のある教材を利用した場合の電気信号 (b) 錆のない教材を利用した場合の電気信号

図 4 電気信号の様子

3. 授業の実際

表1は、2.で作製した教材を利用した授業の流れである。表1の授業については、1時間（50分）で行うことを想定した。授業の目標は「アナログ技術とデジタル技術について知ろう」とし、デジタル技術とアナログ技術の違いやデジタル技術の恩恵、錆が介在する接触部の対処等について説明できるようにすることを目指した。そのために、授業では、まず、作製した教材を利用して、金属表面に生成された錆等の汚染物によって電気信号が歪んでしまうことに実験を通して気づかせるようにした。次に、身の回りの電気機器にはコネクタ、コンセント、電池等の金属と金属による接触部があることに気づかせた。また、そのような接触部に電気信号が通過した場合、どのような状況が生じるか、アナログ信号とデジタル信号の両方について考える場を設定し、アナログ信号は錆に弱く、デジタル信号は錆に強いことを理解できるようにした。次に、電気信号をうまく伝えるためには、金属表面の汚染物を取り除く必要があり、そのために、ねじを強く締め付けたり、表面の汚れを除去したりする必要性があることに気づかせるようにした。

表1 授業の流れ

生徒と学習活動	教師の支援
1 本時の目標をワークシートに記述する。	○ 目標をしっかりと確認できるように、音読する場を設定する。
アナログ技術とデジタル技術について説明できるようになる。	
2 音叉による実験を通して、理科の授業で学習した音の特性について発表する。	○ 理科の授業で学習した音の特性についてしっかりと想起できるように、音叉とオシロスコープを使って実験する場を設定する。
3 信号発生器（6500Hz）の正弦波信号をオシロスコープで観察する。	○ 音をオシロスコープで観察できるように、信号発生器（6500Hz、正弦波）にスピーカを取り付けて音を発生させる。
4 金属の接触面を通してどのようにスピーカから音が出力されるか観察する。	○ 2種類の金属の接触面を通してどのようにスピーカから音が出力されるか観察できるようにする。
5 出力された音の違いがどこからくるのかCuの表面を観察しながら考えて発表する。	○ 音が歪んで出力された金属の表面が錆びていることに気づくことができるように、Cuの表面を実際に観察して考える場を設定する。また、銅の表面を実物投影機で拡大して確認する場を設定する。
6 Cu表面の状態と出力された音の状態から、電気信号は、錆びている金属等があると形が崩れてしまうことに気づき発表する。	○ 表面が錆びたCuを用いた実験では、出力された音の波形が大きく崩れてしまっていることに気づくことができるようにする。加えて、電気信号は、錆びている金属等があると形が崩れてしまうことに気づくことができるようする。
7 身の回りにある電気製品の金属接触部を見つけて発表する。ほとんどの電気製品には、コンセント、コネクタ等のむき出しの金属が接触している部分があることを発表する。	○ ほとんどの電気製品には、コンセント、コネクタ等のむき出しの金属が接触している部分があることに気づくことができるようにする。また、生活の中で電気が流れている金属の接触部がどこにあるか発表する場を設定する。

<p>8 どのようなことに気を付けて電気接触部を取り扱えばよいか考えて発表する。</p>	<p>○ どのようなことに気を付けて電気接触部を取り扱えばよいか気づくことができるように、表面に錆やほこり等がなければ音は歪まないことを説明する。</p>
<p>9 音をデジタル信号に直すとどうなるのかをワークシートにまとめ、音をデジタル信号に変えて送ったらどうなるかを考えて発表する。</p>	<p>○ デジタル信号に変えて送ったらどうなるかを考えることができるように、アナログ信号をどのようにデジタル信号に変換するか説明する。</p>
<p>10 教師から送信されたデジタル化した音を受信し、アナログ信号の音と比べて何が違うか発表する。</p>	<p>○ デジタル信号で伝送された音の信号は崩れていないことに気づくことができるように、LANケーブルの一部を切り取って錆びた銅を接続した状態でデジタル化した音を生徒のパソコンで送信する場を設定する。データの送信には、Tiny File Transmitterを利用し、音信号の再生には、SWAVEを利用するよう説明する。また、送信前に電子黒板で音の波形（3で利用した音の信号）を確認し、実際に音を聞く場を設定する。また、音を聞くための手順を電子黒板でわかりやすく説明する。</p>
<p>11 波の大きさ、形等波のすべてに情報を大切にしたアナログ信号よりも、デジタル信号で情報通信をする方が情報を確実に送信できることをワークシートにまとめる。</p>	<p>○ デジタル信号の良さに気づくことができるように、デジタル信号は波の大きさ、形等波を2値に変換にしていることをおさえる。</p>
<p>12 デジタル技術とアナログ技術の違いについてワークシートにまとめる。</p>	<p>○ デジタル技術とアナログ技術の違いをまとめることができるように、電気信号の波の高さ、形、幅等のすべてを利用する技術がアナログ技術であり、それらを1と0に変換したデジタル信号を利用する技術をデジタル技術であることを説明する。また、デジタル技術は伝送に強いことをまとめる。</p>
<p>13 デジタル化した音以外のデジタル化した情報のよいところをワークシートにまとめる。</p>	<p>○ 音以外のデジタル化した情報のよいところをまとめることができるように、「スマートフォンや自動車で見える動画がデジタル化により崩れない」、「テレビのデジタル放送」等の音以外のデジタルのよさを説明する。</p>
<p>14 2人組で本時の学習内容を説明しあう。</p>	<p>○ 本時の学習内容の定着を図ることができるように、アナログ技術とデジタル技術についてわかったことを2人組で説明し合う場を設定する。</p>

4. 授業の検証

4.1 評価の方法

授業を受ける前後で、デジタルについて説明する自信がどの程度あるかについて質問し、“しっかり説明できる(4点)”, “だいたい説明できる(3点)”, “あまり説明できない(2点)”, “全く説明できない(1点)”の4件法により自己評価させた。次に、情報通信の学習事項(以下、

表 2 題材及び生徒の概要

題材名	情報通信の技術
題材計画 (3時間で実施)	1時間目 SNSを利用するとき気を付けるべきことを説明できるようになろう。 2時間目 暗号化の技術について説明できるようになろう。 3時間目 デジタル技術とアナログ技術について説明できるようになろう。 (本研究内容)
対象とした生徒	中学校3年生
生徒の学習経験	情報通信について小学校や中学校の授業で学習した経験がない。情報通信に関するデジタル、情報モラル、暗号化等の言葉をこれまでに聞いたこの生徒が多い。しかし、それらの言葉を説明する自信がないと答える生徒が多い。

4.2 デジタルについて説明する自信の変化

デジタルについて、授業前後の生徒の説明する自信の程度の平均値を比較した。t検定の結果、授業前の平均値よりも授業後の平均値の方が高くなっていくことが明らかとなった。この結果をまとめたのが表3であり、デジタルについて理解が促されたと言える。

表 3 授業前後のデジタルを説明する自信の程度の平均値差における t 検定の結果

	授業前		授業後		t値	有意確率 (両側)	結果
	平均	分散	平均	分散			
デジタル	2.03	0.62	3.08	0.69	1.98	0.00	1%水準で有意

4.3 概念地図の変化

すべての生徒が描いた概念地図について、デジタルに引かれた線の本数をカウントし評価した。ただし、線が引かれていても、その上に書かれた理由が間違っているものや理由がないものはカウントの対象外とした。表4は、デジタルに引かれた線の数について、授業前後の平均値や分散等である。t検定の結果、授業前後の平均値の差が有意であった。

表 4 授業前後のデジタルに引かれた線の本数の平均値差における t 検定の結果

	授業前		授業後		t値	有意確率 (両側)	結果
	平均	分散	平均	分散			
デジタルに引かれた線の本数	1.11	0.95	1.85	0.95	1.98	0.00	1%水準で有意

さらに、リンクの組み合わせからデジタルに引かれた線の本数を評価した。8つの参考ラベルについて、デジタルとリンクされ得るラベルの組み合わせは、「デジタル」-「コンピュータ」、「デジタル」-「情報通信」等全部で7通りである。この7通りについて、参考ラベルの組み合わせ毎に授業前後のリンクした人数を示したのが表5である。すべての組み合わせについて授業後の人数が増加したことが分かる。サイン検定の結果、人数が増えた組み合わせが有意に多いと言える (5%水準で有意, 両側検定: $p < .002$, $N=7$)。これらのことから、授業前の

概念地図に比較して、授業後の概念地図の方がデジタルと他の参考ラベルとの結びつきが多くなっていることが分かった。つまり、表4及び表5の結果から、デジタルについて理解が促される授業であったと言える。

表5 ラベルの組み合わせにおける授業前後でリンクした生徒数の変化

ラベルの組み合わせ	前	後	サイン	ラベルの組み合わせ	前	後	サイン
「デジタル」-「情報通信」	39	80	+	「デジタル」-「ネットワーク」	13	16	+
「デジタル」-「コンピュータ」	38	65	+	「デジタル」-「セキュリティ」	7	13	+
「デジタル」-「データ」	36	58	+	「デジタル」-「情報モラル」	2	5	+
「デジタル」-「暗号化」	21	22	+				

5. まとめ

本研究では、デジタルの理解を促すために、金属の錆を介する金属接触部における抵抗特性に着目し、その特性を利用した教材と授業を開発した。具体的には、錆を介した金属接触部と錆がない金属接触部の教材を利用して、デジタル信号とアナログ信号の送受信を体験させ、デジタル技術とアナログ技術の違いや、デジタル技術の恩恵及び生活の中にある金属の錆が介在する接触部の対処方法等に気付かせる授業を展開した。その結果、本研究で開発した教材や授業は、デジタルを説明する自信についての自己評価及び概念地図の分析から、デジタルの理解をよりよく促せることが明らかとなった。

なお、文字や画像等のデジタル変換やデジタルの離散化等の授業については、本研究に係る題材が終了した後に行った。しかし、中学校技術・家庭科（技術分野）の授業時数の関係から、今後、デジタルに関わる授業については、本研究で開発した教材や授業の内容と、これまで行ってきたデジタル変換やデジタルの離散化等の授業内容を組み合わせて、1時間（50分）で取り扱えるように設計し直したいと考える。

参考文献

- 1) 河野哲志, 新地辰朗: “D 情報に関する技術” に係わる学習指導改善に向けた中学生の情報通信概念の評価, 日本産業技術教育学会誌, 第53巻, 第1号, 25-32(2011)
- 2) 玉井輝雄: 接触境界部に介在する汚染皮膜の電気的破壊による低接触抵抗の回復とそのメカニズム, 電子情報通信学会技術研究報告, EMD, 機構デバイス 103(554), 1-8(2004)
- 3) 河野哲志, 玉井輝雄: 皮膜の介在する接触部における接触抵抗と電流の関係 - 薄膜の導電機構とその抵抗の電流依存性 -, 電子情報通信学会技術研究報告, EMC91-97, OME91-58, 7-22(1992)
- 4) T.Tamai: Influence of the passage of current on electrical static contact characteristics, Trans. I.E.E. of Japan, Vol.108, No.9, 147-152(1988)
- 5) 河野哲志: 金属表面に形成した金属化合物薄膜の導電機構に関する研究, 兵庫教育大学大学院修士論文, 7-11(1992)
- 6) 玉井輝雄: 電気接点表面と接触のメカニズム, 表面技術, Vol.55, No.12, 102-107(2004)

Abstract

Teaching materials and lessons using the resistance characteristics of metal contacts due to metal rust were developed in order to promote the students' digital understanding. Specifically, using teaching materials of rusted metal contacts and rust-free metal contacts, students experienced the transmission and reception of digital and analog signals. This allowed students to learn the difference between digital and analog technology, the benefits of digital technology, and how to handle rusty metal contacts in daily life. The results of analysis of self-assessment and concept maps concerning students' self-confidence in explaining digital technology showed that the teaching materials and lessons developed in this study could promote better digital understanding of students.

(2022年5月9日受理)