

TCP のコネクション管理の仕組みを可視化する教育ツールの作成と評価

Developing and Evaluating of an Educational Tool to Visualize the Connection Management of TCP

金井 佑太[†] 成田 匡輝[†]
Yuuta Kanai Masaki Narita

1. はじめに

インターネット技術が進歩し、情報の専門教育の中で TCP/IP のプロトコルの教育が必要となっている。例えば、高等学校の情報科目における学習指導要領では、TCP/IP の基礎知識を習得することが記されている[1]。TCP/IP はデータをパケットの形で扱い、パケットの中にはプロトコルの情報が含まれる。しかし、ネットワークを流れるパケットは目には見えないものである。ゆえに、教科書のみでの学習では、パケットの流れを感じ取ることができず、TCP/IP の知識が乏しい初学者が、複雑な TCP/IP のプロトコルの仕組みを理解することは容易なことではない。

本研究では、初学者にパケットの動きやヘッダ情報の移り変わりといった、パケットの流れを感じ取ってもらうことで、TCP のコネクション管理の仕組みを容易に理解できる教材を作成する。

2. 関連研究

本節では、高橋らによる TCP/IP の可視化ツールの開発の研究[2]と Desai らによる Wireshark を用いた教育方法の提案[3]を関連研究として紹介し、関連研究の問題点と本研究における解決策について述べる。

2.1 TCP/IP の可視化ツールの開発

高橋らの研究[2]では、TCP の順序制御とトランスポート層におけるコネクション/コネクションレス型の違いの可視化ツールを提案している。

2.1.1 TCP の順序制御ツール

順序制御とは、通信の途中で仮にパケットの順番が入れ替わったとしても、受信側がパケットを順番通りに並べ替えてデータを元通り復元する制御である。TCP では、シーケンス番号と確認応答番号により、順序制御を実現している。シーケンス番号は送信するデータの順番を表し、送信するデータ 1byte ごとに番号が 1 ずつ増える。また、確認応答番号は送られたデータをどこまで受信したかを表す。高橋らの研究[2]では、通信の際に発生するパケットサイズ、シーケンス番号、確認応答番号、通信の向きを可視化するツールの作成を行っている。

2.1.2 コネクション/コネクションレス型の違いの可視化ツール

高橋らの研究[2]のコネクション/コネクションレス型の違いの可視化ツールは、コネクション型である TCP とコネクションレス型である UDP のデータ転送の違いを可視化図により示している。UDP における通信では、通信の方

向だけを表示しているが、TCP における通信では、通信の方向に加えて SYN や ACK といったフラグ表記を表示し、コネクション確立処理 (スリーウェイハンドシェイク) やコネクション切断処理を示している。

2.2 Wireshark を用いた教育方法

Wireshark[4]はパケット解析ツールである。取得してきたパケットをプロトコルやポート番号、IP アドレスなどの条件を組み合わせてフィルタリングすることが可能である。また、指定したルールにしたがって色分け表示することができる。Desai らの研究[3]では、トランスポート層のプロトコルについて Wireshark を用いた教育方法を提案している。電子メールのパケットデータが格納されたパケットキャプチャファイルに関して Wireshark を用いて解析し、スリーウェイハンドシェイクの仕組みについて理解を促している。Desai らの研究[3]はあくまで、Wireshark の使い方に重点を置いた研究である。

2.3 関連研究の問題点と解決策

高橋らの研究[2]の問題点として、我々は可視化図だけでは、パケットの流れを表現できないと考える。可視化図では、矢印により通信方向を示しているが、流れているパケットの動きを表現できていないからである。ゆえに、初学者がパケットの流れを実感できるよう、パケットの流れを目で追えるような教材が必要である。

Desai らの研究[3]の問題点として、我々は、Wireshark を用いた教育方法では、初学者にパケットの流れを感じ取ってもらうことができないと考える。Wireshark はパケット情報を文字や数字の羅列で表現しており、パケットの流れや特徴を掴むことが困難なためである。

本研究では、関連研究の問題点を解決するために、パケットの動きやヘッダ情報の移り変わりをアニメーションで表現することで、パケットの流れを示し、初学者が TCP のコネクション管理の仕組みを理解することを容易にする。

3. 本研究の達成目標

本研究では初学者が TCP コネクションの理解を容易にするための教材の達成目標を 3 つ定めた。

- ・達成目標 1 : パケットの流れを示す
- ・達成目標 2 : シーケンス番号と確認応答番号の対応関係を示す
- ・達成目標 3 : コントロールフラグの状態を示す

達成目標 1 のパケットの流れを示すでは、教科書では表せないパケットの流れを示すことを目標とする。本研究では、アニメーション教材を作成し、初学者にアニメーション

[†] 岩手県立大学ソフトウェア情報学研究科 Graduate School of Software and Information Science, Iwate Prefectural University

ンを閲覧してもらうことで、パケットの流れを感じ取ってもらう。

達成目標 2 のシーケンス番号と確認応答番号の対応関係を示すでは、シーケンス番号と確認応答番号の増分および 2 つの関係性を示すことを目標としている。シーケンス番号と確認応答番号はパケットごとの対応を示している。しかし、教科書のみにおける学習では、シーケンス番号と確認応答番号の増分およびこれらの関係の理解が難しいと考えられる。そこで、本研究では、シーケンス番号と確認応答番号を可視化することで、初学者にシーケンス番号と確認応答番号の対応関係を理解してもらうこととした。

達成目標 3 のコントロールフラグの状態を示すでは、通信中のコントロールフラグの値を示すことを目標としている。コントロールフラグの値はパケットの種類や通信状態を示す。例えば、コネクション要求パケットの場合では、通常 SYN フラグの値は 1 となり、他のフラグの値は 0 となる。教科書の図では、コネクション確立や通信中のときにどのフラグが立つかを記載している。しかし、フラグの値が TCP のフィールドのどこで設定されているのか、フラグの状態をどのように設定しているのかを読み取ることは容易ではない。そこで、本研究では、パケットごとにコントロールフラグの状態を可視化し、初学者にどのようにフラグが設定されているかを理解してもらう。

4. 提案手法

本研究で提案するアニメーション教材の目的は、初学者が TCP コネクション管理の仕組みの理解を容易にすることである。すなわち補助教材としての役目を果たすものとする。よって、初学者はネットワークの教科書等を読みながら、パケットの動きや処理の流れを確認したいとき、アニメーション教材を利用してもらう。

アニメーション教材の概要図を図 1 に示す。事前に TCP 通信をパケットキャプチャし、作成したパケットキャプチャファイルを基に教材を作成する。パケットキャプチャファイルのデータを取得し、取得したデータをもとにパケットモーション機能、ヘッダ情報表示機能、コネクション機能の 3 機能を実現する。初学者はアニメーション教材を操作することで、パケットや処理の流れを確認し、TCP コネクション管理の仕組みを学習する。

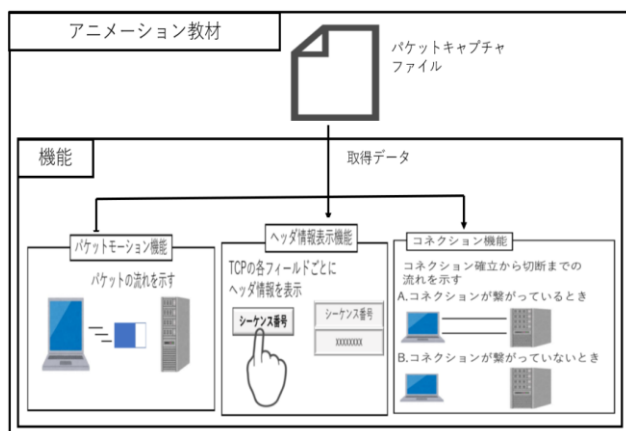


図 1 アニメーション教材の概要図

パケットモーション機能とはパケットの流れを示す機能であり、達成目標のうち達成目標 1 のパケットの流れを示すことを満たすためのものである。クライアントからサーバへの要求パケットとサーバからクライアントへの応答パケットの動きをアニメーションにより表現する。また、パケットが流れるアニメーションの速さは初学者が調節できるようにした。

ヘッダ情報表示機能はパケットのヘッダ情報について、フィールドごとに表示する機能である。この機能は達成目標のうち、達成目標 2 のシーケンス番号と確認応答番号の対応を示すことと、達成目標 3 のコントロールフラグの状態を示すことを満たすためのものである。フィールドごとにヘッダ情報を表示する理由としては、初学者が一度に学習する情報を減少させるためである。TCP のヘッダ構造は複雑であるため、TCP/IP の知識が乏しい初学者にとっては、一度に多くのフィールド情報を学習するのは容易なものではない。ゆえに、フィールドごとに表示し、初学者が学習する負担を軽減する。また、フィールドごとに表示することにより、フィールドごとでどのような処理が行われているか確認することが可能である。教材上のシーケンス番号ボタンをクリックすると、現在流れているパケットのシーケンス番号（数字）が表示される。コントロールフラグのボタンを押したときは、各フラグの状態を示す。

コネクション機能はコネクション確立から切断までの流れを示す機能であり、達成目標 3 のコントロールフラグの状態を示すことを満たすものである。スリーウェイハンドシェイクの処理が終わり、コネクションが確立されるとクライアントとサーバの間にコネクションが繋がっていることを示す線が表示される。スリーウェイハンドシェイクの処理途中やコネクションが切断されている場合はこの表示は消失する。コネクションがどのような流れで確立・切断されるかコントロールフラグの状態を見ながら確認することで、コネクション管理について理解を深めてもらう。

5. 実装

図 2 はアニメーション教材の実行画面のスクリーンショットである。実線で囲まれた①の部分はパケットモーション機能、点線で囲まれた②の部分はヘッダ情報表示機能、破線で囲まれた③の部分はコネクション機能、④はパケットを示す。以下に機能ごとの実装について述べる。

①のパケットモーション機能では、クライアントであるホスト A とサーバであるホスト B 間を流れるパケットの動きを示した。④のパケットはホスト A からホスト B への要求パケットを示している。パケットは表示される位置によって区別している。上の破線部分を流れるときは要求パケット、下の破線部分を流れるときは応答パケットである。パケットの中には、コントロールフラグの内容が表示される。図 2 では PSH フラグと ACK フラグが立っていることから PSH/ACK と表示される。パケットの動作は左下のボタンで行う。スタートボタンを押すとアニメーションが開始されパケットが流れ出す。停止ボタンを押すとパケットの動きを停止する。巻き戻しボタンを押すとパケットの流れを巻き戻しての確認が可能である。また、スピード UP・スピード down ボタンにより、パケットが流れるアニメーションの速さを調節することができる。



図2 アニメーション教材の実行画面

②のヘッダ情報表示機能では、パケットのヘッダ情報をフィールドごとに表示することができる。左側のTCPヘッダフォーマットのボタンの配置は、マスタリングTCP/IPのTCPヘッダフォーマット図[5]を参考に作成した。各フィールドのボタンを押すと押したフィールドに対する情報がログのように表示され、蓄積される。初学者はログを見比べてヘッダ情報の移り変わりを確認することが可能である。パケットの到着番号は現在表示されているヘッダ情報が何番目に流れてきたものかを示している。図2では送信ポート番号、シーケンス番号、確認応答番号、コントロールフラグのフィールドに対して6番目のパケットの情報が表示されている。コントロールフラグの情報を示すときは、各フラグの状態が表示される。値が1ならばフラグが立っていることを意味し、値が0ならばフラグが立っていないことを意味する。右側の削除を押すと該当するヘッダ情報が削除される。

③のコネクション機能では、コネクション確立から切断までの流れを示した。スリーウェイハンドシェイクの処理が行われコネクションが確立すると図2のように黒い太線が表示される。コネクションが切断されると黒い太線は消失する。

6. 評価実験

本節では本研究で提案したアニメーション教材の評価実験について述べる。本評価実験の目的は第3節で述べた達成目標が達成できたかを確認することそしてアニメーション教材そのものの評価である。本学部2年生20名に対し、令和4年12月に本提案教材を用いた演習を実施し、評価を行った。

本学部の2年生は2年前期の情報ネットワーク論の講義においてTCP/IPに関する基礎知識を学習してはいるが、ネットワークに対しての学習が浅く、知識が乏しいことから評価対象としている。評価実験の内容としてまず、被験者20名全員に対し、TCPコネクション管理に関する事前テストを15分で行った。次に本研究で提案したアニメーション教材とマスタリングTCP/IPの教科書を用いる被験者

(10名)と教科書のみで勉強する被験者(10名)に分かれて30分間学習をしてもらい、再度15分間で事後テストを行った。事後テスト後評価アンケートへの回答を実施した。

6.1 事前・事後テスト結果

事前・事後テストはマスタリングTCP/IPの第6章TCPとUDPの範囲より我々が作成したオリジナルの問題を3問出題している。問1は6点満点で、トランスポート層やTCPに関する基礎知識について、TCPのコネクション管理を学習する上で必要な基礎知識の確認を行うために出題している。問2は3点満点で、シーケンス番号と確認応答番号の対応関係を問う問題であり、達成目標2のシーケンス番号と確認応答番号の対応関係を示すことが達成されたかを確認する問題である。記されているシーケンス番号、確認応答番号、データ長をもとに穴埋めを行う。問3は7点満点で、コントロールフラグの状態変化を問う問題であり、達成目標3のコントロールフラグの状態を示すことが達成できたかを確認する問題である。コネクション確立からデータ送受信までのSYNフラグとACKフラグの状態について、フラグが立っているのであれば1、フラグが立っていないければ0で解答をしてもらう。

表1 事前・事後テスト結果

	事前問1	事後問1	事前問2	事後問2	事前問3	事後問3
教材あり 平均(分散)	1.6(0.71)	4.5(1.61)	0(0)	0.5(0.94)	4(2.88)	6.5(1.61)
教材なし 平均(分散)	2.3(1.34)	4.7(0.67)	0.1(0.1)	1.5(2.05)	3.1(2.76)	5.2(1.73)

事前・事後テストの結果は表1に示す通りとなった。問1は教材ありと教材なしではほとんど点数に変化は現れなかった。問2に関しては、教材なしの事後テストの平均点が1.5点、教材ありが0.5点と教材なしの方が教材ありよりも点数が高い傾向が見られた。問3に関しては、事後テストの教材ありの平均点が6.5点、教材なしの方が5.2点と教材ありの方が教材なしよりも点数が高い傾向が見られた。

6.2 評価アンケート結果

アンケートは段階形式のものと自由記述形式のものを実施した。段階形式のアンケート結果を表 2 に示す。アンケート項目は 5 つあり、どの項目も 5 段階評価 (1 が最低で 5 が最高) で評価をしている。項目 3 以降に関しては、アニメーション教材に対するアンケート項目となっているため、教材を使用した被験者のみアンケートに回答をしている。アンケート項目の平均点に対してどの項目も 3 以上と高い結果となっているが、特に項目 3 の平均点は 4.4 点と高い評価を得ることができた。

表 2 段階形式のアンケート結果

項目	平均(教材あり)	平均(教材なし)
1 問題のレベルはどうか (1 簡単～5 難しい)	3.2	3.5
2 演習時間はどうか (1 短い～5 長い)	3.3	3.6
3 パケットの流れはわかりやすかったか (1 分かりにくい～5 分かりやすい)	4.4	
4 シーケンス番号・確認応答番号の対応が確認しやすかったか (1 確認しづらい～5 確認しやすい)	3.5	
5 教材ツールは使いやすかったか (1 使いづらい～5 使いやすい)	3.8	

自由記述形式では、アニメーション教材の追加機能や修正点に関する項目と本評価実験の感想を自由記述で回答してもらった。アニメーション教材の追加機能や修正点に関する項目では、シーケンス番号と確認応答番号を自動的に出してほしいという意見やヘッダ情報表示機能で表示されているログに関して全消去できるようにしてもらいたいといった意見があげられた。本評価実験によせられた感想としては、パケットの動きやコントロールフラグの映り変わりが分かりやすかったという意見や授業の内容を復習する良い機会となったといった意見があげられた。

7. 考察

評価実験の結果をもとに第 3 節で述べた達成目標に対する考察を述べる。

達成目標 1 のパケットの流れを示すことは、達成することができたと考える。段階形式のアンケート結果より、項目 3 のパケットの流れは分かりやすかったかという評価項目に対して、平均点が 4.4 点(最大 5.0 点)と高い評価を得た。また、評価アンケートでパケットの流れが分かりやすかったと答えた人が多かったためである。したがって、アニメーションを用いることにより、教科書では表現できないパケットの動きを表すことにより、初学者がパケットの流れを感じ取ることができたのではないかと考える。

達成目標 2 のシーケンス番号と確認応答番号の対応関係を示すことは、達成することができなかつたと考える。問 2 の事後テストの結果より、教材なしのグループの方が教材ありのグループよりも事後テストの得点が高い傾向となった。よって、達成目標 2 のシーケンス番号と確認応答番号の対応関係を示すことを達成できなかつたと考えられる。本提案教材では、シーケンス番号と確認応答番号の情報はヘッダ情報表示機能でログとして表示されるが、シーケンス番号・確認応答番号・データ長の 3 つの情報を同時に見ることができなかつたと対応関係を確認することができない。また、シーケンス番号と確認応答についての説明は教科書を読むことを前提としていたため、教科書を読み込まないと、初学者はただフィールドごとにヘッダ情報を見ていくだけとなる。したがって、初学者にシーケンス番号と確認

応答番号の対応関係を理解してもらうためにはさらなる工夫が必要である。工夫例としては、アニメーション教材の追加機能と修正点に関する自由記述のアンケートの回答にもとづき、シーケンス番号と確認応答番号の自動化やアニメーション教材に各フィールドの説明を追加することがあげられる。

達成目標 3 のコントロールフラグの状態を示すことは、達成できたと考える。問 3 の事後テストの結果より、教材ありのグループの方が教材なしのグループよりも問 3 の事後テストの得点が高い傾向となった。よって、達成目標 3 のコントロールフラグの状態を示すことを達成できた。本提案教材では、コントロールフラグの情報はヘッダ情報表示機能でコントロールフラグの各フラグの状態をログとして表示することでパケットごとのコントロールフラグの状態が分かりやすく可視化された。また、コネクション機能により、いつコネクションが確立して切断されるのか確認することを可能とした。初学者はコントロールフラグの状態とともにコネクションが確立されて切断される様子を学習することで、コネクションが確立される際のコントロールフラグの状態はどのようなものであるかを容易に理解することができたのではないかと考える。

8. おわりに

本研究では、TCP のコネクション管理の仕組みの理解を容易にする教材の作成と評価を行った。本研究で提案したアニメーション教材はパケットの動きと向きを示す機能、TCP の各フィールドに情報を表示する機能、コネクション確立から切断までの流れを示す機能を持つ。本提案教材を実装し評価を行った。その結果パケットの流れやコントロールフラグの状態について初学者に理解してもらうことができた。しかし、シーケンス番号と確認応答番号の対応関係については理解してもらうことができなかった。

今後の課題としては、シーケンス番号と確認応答番号の対応関係を容易にする工夫やヘッダ情報表示機能のログを全消去する機能の追加などアニメーション教材の修正を行う。また、再送制御など本研究では対象外だった TCP の制御や他のプロトコルの仕組みを容易に理解する教材の作成を行いたい。

本研究は一部科研費(基盤研究(C)23K11337)及び電気通信普及財団の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] 文部科学省, “高等学校学習指導要領 (平成 30 年告示) 解説情報編”, 2018 年 7 月
- [2] 高橋祥吾, 荒井正之, “TCP/IP の可視化ツールの開発-TCP の順序制御とトランスポート層におけるコネクション/コネクションレス型の違いの可視化ツール”, 情報処理学会第 73 回全国大会, pp. 457-458(2011)
- [3] Desai, P., Vijayalakshmi, M and Raikarr, M. M., “Encourage research thinking in network domain using traffic analysis tool”, *Journal of Engineering Education Transformations*, Vol. 30, No3, pp. 123-129(2017)
- [4] Wireshark・Go Deep
<https://www.wireshark.org/> 参照日 2023 年 2 月 16 日
- [5] 井上直也, 松山公保, 竹下隆史, 荒井透, 荻田幸雄, “マスタリング TCP/IP 入門編第 6 版”, オーム社, (2019)