

最短路問題を用いた津波避難時間の 計算とその考察

田中 彰浩

本稿では 2013 年度、茨城県の高등학교と筑波大学の高大連携プロジェクト「数理モデルで地域の問題を考える」で取り組んだ、津波避難時間の計算について紹介を行う。最短路問題を用いて最短の避難時間を求め、アンケート調査から地震発生後の避難開始時間についての考察を行った。

キーワード：高大連携、最適化モデリング、最短路問題

1. はじめに

本稿では 2013 年度、茨城県の高등학교と筑波大学システム情報系における研究グループ（大澤義明教授、山本芳嗣教授、吉瀬章子教授、繁野麻衣子准教授、八森正泰准教授）の高大連携プロジェクト「数理モデルで地域の問題を考える」で取り組んだテーマの一つである、津波避難時間の計算について紹介を行う。本プロジェクトには日立北高等学校、下妻第一高等学校および竜ヶ崎第一高等学校から 2 チームずつ、計 6 チームが参加した。各チームは高校生 5~7 名と大学院生のティーチングアシスタント（以下、TA）2~3 名で構成され、筆者は日立北高等学校の TA として参加した。

本プロジェクトでは、高校生自身が発見した問題を、最適化モデルとソルバーを利用して解決法を見つけ、またその解が妥当であるか否かの検討を行うという、問題解決の手順を体験してもらうことを目標としている。解決法の提案は、筑波大学学園祭の当日に行われる高大連携シンポジウムおよび、北茨城市で開催された茨城県北震災復興シンポジウムでの発表を通して行われた。

シンポジウムまでに以下のプロセスで取り組んでいる。まず、6 月に先生方が各高校に出張し、最適化モデルの説明を行い、8 月の合宿の前までにテーマを決定するよう依頼する。合宿は 3 日間行われ、初日にモデル化、2 日目にプログラミングおよび発表準備、最終日は午前中に発表の練習を行い、午後から発表を行う。合宿後は 10 月の高大連携シンポジウム、12 月の茨城県北震災復興シンポジウムでの発表に向けて、モデル化の再考察及びデータ収集を行う。この間、TA は指

導のため数回高校を訪問する。

本稿では、上記シンポジウムでの発表までの過程を、時系列に従って紹介する。

2. 合宿

2.1 合宿までの準備

取り組むテーマは、大学側で指定するのではなく、高校生に身近なテーマを探してもらうという形を例年とっている。合宿前に、高校生が取り組みたいと言っていたテーマは「地震が起こった際の安全な通学路」というものであり、震災時に通行可能な道路を調べたいというものであった。これについて筆者らが調べたところ、日立市のホームページに防災マップがあり [1]、震災時に安全に通行できるであろう日立北高等学校周辺の道路についての情報が掲載されていた。そのため、高校生にそのような情報が公開されていることを伝え、テーマを再考するよう促した結果、津波避難経路について取り組むことになった。今回参加した高校生は、震災時は中学生であったが、日立北高校では自宅が沿岸部のため帰宅困難となり、数日高校に泊まった生徒もいたとのことである。

上記のテーマについて、合宿までに TA 3 名でモデル化に取り組んだ。高校生からのメールでは、最適な避難経路を調べたいとのことなので、最短路問題として定式化することとした。

今回は日立市の中でも特に被害の大きかった日立港周辺を対象とした。浸水可能性のある地域から最も近い高台への避難経路および時間を計算するために、日立市のホームページに掲載されているハザードマップを調べた。ハザードマップから、最大クラスの津波で浸水が想定される地域（以下、想定浸水地域）および浸水の可能性のない高台の確認を行い、想定浸水地域

たなか あきひろ
筑波大学大学院システム情報工学研究科
〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1

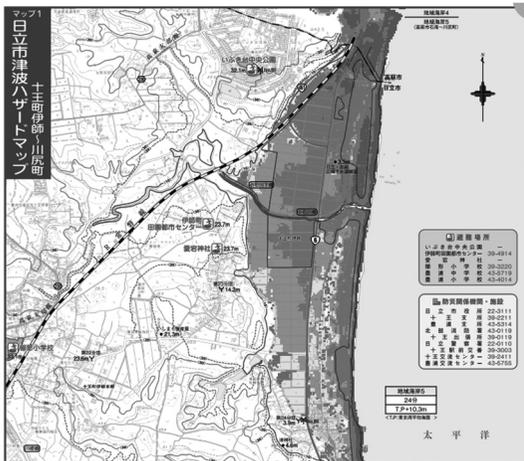


図1 日立市のハザードマップの一部

の各地点から、道路網を利用した高台までの最短路を避難経路として出力することとした。図1は、日立市のハザードマップの一部 [1] である。

想定浸水地域の各交差点および高台を頂点、道路を枝とした無向グラフ上の最短路問題として定式化した。各交差点からどの高台が最も近いのかを調べるために、複数の高台のいずれかにゴールするという制約を持つ最短路問題を、想定浸水地域の各交差点をスタートとして、交差点の数だけ繰り返し解くことにした。想定浸水地域の頂点の集合を $V = \{1, \dots, n\}$ とし、スタートとなる頂点を s とする。さらに高台の頂点の集合を $W = \{1, \dots, m\}$ とし、頂点 i, j 間の距離を d_{ij} とする。変数 x_{ij} を枝 $\{i, j\}$ を通るときに1をとる決定変数とすると、以下のように定式化される。

$$\begin{array}{ll}
 \min & \sum_{i \in V \cup W} \sum_{j \in V \cup W} d_{ij} x_{ij} \\
 \text{s.t.} & \sum_{i \in V \cup W} x_{si} = 1 \\
 & \sum_{i \in V} x_{ij} = \sum_{i \in V \cup W} x_{ji} \quad (\forall j \in V) \\
 & \sum_{i \in V} \sum_{j \in W} x_{ij} = 1 \\
 & x_{ij} \in \{0, 1\} \quad (\forall i, j \in V \cup W)
 \end{array}$$

2.2 合宿初日

3日間の合宿で定式化、プログラミングおよび発表を行うため、初日は定式化までの理解が最低条件である。高校生7人は数学が好きで得意な者もいれば、数式を見るだけで頭が痛くなると冗談を言う者もいる。初日の内容がわからないと、3日間すべてがつまらなくなってしまうため、全員が理解できるよう、初日は特に注意して指導に取り組んでいる。

合宿においては、上記の最短路問題を記述するうえで必要不可欠な、集合、 \sum 記号および最適化問題とは

何かについての説明から行う。集合は高校1年次に学習しており、最適化問題についても、2変数の線形計画問題を目的関数の等高線を用いることで解く解法を学習しているため、簡単な復習に留めている。 \sum は、高校の授業ではまだ学習していなかったため、少人数制の利点を活かし、全員が手を動かし理解するまで徹底的に行った。高校の先生も普段の授業感覚になるのか、筆者の説明が不十分な部分に対して、補足説明をしてくださった。

数学的な準備が終わると、ついに高校生の持ってきた問題の定式化に移る。まず初めに全員でハザードマップの確認を行ったが、高校生全員がハザードマップを初めて見たと言っていたことに驚いた。日立北高等学校は高台に位置しており、津波被害の心配はないが、日立市は海に面しているため、東日本大震災時には日立港を中心に大きな被害を受けた [2]。

高校生は、何を決定して何を最小化するか意識できていない様子のため、通る道を決定して距離を最小化することであることを全員で確認した。グラフの説明は図を用いたところすんなり理解してもらえたようである。

その後、変数、目的関数、制約の順で説明を進めたのだが、0-1変数という考え方に初めて触れたため、混乱した高校生もいた。そこで、小さなグラフにルートを描き、そのときの変数の値を確認することで、変数の意味の理解を促した。制約に関しては、導入の説明のみで、残りは自力で導いていた。とは言っても、数学があまり得意ではない高校生には、一度聞いただけでは理解できないことがあったので、わかった友達に説明を指示した。教えている高校生も、他人に説明する中で疑問が起り質問をしてくるなど、双方の理解に役立っていたように思う。比較的やさしい（高校生には十分難しいのだが）問題のため、夜までには全員が理解できたようである。

2.3 合宿2日目

2日目の午前中は、FICO™ Xpress Optimization Suite ソルバーのプログラミングを学ぶ。高校生は Microsoft® Word®, Excel®, PowerPoint® を少し使用したことがある程度で、コピーアンドペーストでさえ知らない場合も多い。練習のために、紙に印刷されたプログラムのコードを入力するだけでも多くの時間を必要とするが、みるみるうちに早くなっているのはさすが高校生である。また、初日の定式化ではあまり積極的ではなかった高校生が、プログラミングに興味を持ち、自分で少しずつ書き替えていく様子が見られた。

見られた。このように、今まで知らなかった自分の興味に気がつくチャンスがあるのも、このプロジェクトの魅力である。その一方で、パソコンが1台しかないため、他人がキーボードを打っている間に暇を持て余してしまう高校生もいる。この点に関しては、人が打っているプログラムの内容を説明したり、前日の疑問点に対して回答するなどして対応したが、今後さらなる工夫が必要であると考えられる。

午後からは、前日に作成した問題のプログラミングを行った。午前中に学んだプログラミングに関する知識だけでは不十分であるため、適宜 TA が補助するが、悪戦苦闘しながらも最後まで高校生がプログラムを書き上げた。最後のエラーを取り除き正しい解が得られると、高校生からは必ず歓声があがる。なお時間の都合上、距離行列は簡易的なものを利用した。

その後は合宿最終日の発表に向け、スライドの作成を行う。例年のことなのだが、高校生は文字の色や背景の画像、スライドショーをいじることばかりに集中してしまい、放っておくと表紙だけで1時間はかかりそうな勢いである。本人たちは一生懸命取り組んでいるため、あまり強くは言いづらいのだが、時間が限られているため先に大枠を作るよう指導を行った。

まだ実際のデータで実験を行っていないため、定式化の説明中心の10枚程度のスライドではあるが、初めて発表を行う高校生には悩むことが多く、部屋に戻った後も作業を続け、夜遅くまで取り組んでいたようである。

2.4 合宿最終日

最終日は、高校生たちが前日の夜遅くまで頑張った作ったスライドを、TA たちが修正点等を指導した。高校生たちの力作のため、指導する TA も気合が入ってしまい、発表練習の指導に十分な時間を割くことができなかった。そのため、スライドはほかの高校と比較しても引けを取らない出来栄であったが、発表で言葉が出てこず、本人たちも不甲斐ない出来に悔しい思いをしたようである。以降は、TA が日立北高等学校を訪問して指導を行うため、初回訪問時までにしておくべきことについての確認を行い、合宿は終了となる。

3. 最終発表会および県北震災復興シンポジウムでの発表

3.1 最終発表会まで

最終発表で説得力のある発表を行うためには、実データの収集を行い、ソルバーを用いて得られた解の検討

が必要不可欠である。高校生7人で分担して、想定する規模の津波襲来時に、浸水の可能性がある地域のすべての交差点と道路およびその距離を調べ上げ、実験を行った。

非現実的な解が得られ、データをすべて確認することとなり弱音を吐くこともあったが、何とか解を得た。得られた高台までの避難経路から避難時間を求めるため、移動手段を決定し、移動速度を定める必要がある。日立港周辺は高齢者が多いため、避難は徒歩によるものとし、歩行速度を4km毎時とした。その結果、高台から最も遠い地点からの避難時間は16分であることがわかった。日立港への最短の津波到達時間26分であるが[1, 3]によると、東日本大震災の地震発生後避難開始までの平均時間は22分であり、計算上は高台への避難が間に合わない。

しかし、東日本大震災後の現在は人々の意識が変化しており、避難開始までの時間が短くなっているのではないかとの仮説を立て、アンケートを行った。アンケートは、ハザードマップから浸水可能性のある地域の家を判定し、実際に高校生が訪問して配布、回収を行った。図2は実際に高校生がアンケート調査を行っている様子である。その結果を、最終発表に向けて高校生がスライドにしたものが図3である。

東日本大震災時の避難行動の有無と、万が一、次に大震災が起こった際に避難を行うか否かを聞いた回答結果が上段の表である。また下段の、東日本大震災時の避難開始までの時間と、現在の避難意識のとの比較から、津波避難に対する意識の変化を見て取れる。

これらの結果をまとめ、最終発表に向けたスライド作成を行った。2度目であるため、TA から色々口出しすることはやめ、ほとんどすべて高校生だけで作ってもらったが、スライドの順番や内容について相談しながら試行錯誤し取り組んでいた。高校の先生方も、普段あまりスライド作成を行わないためか、わかりやす



図2 高校生がアンケート調査を行う様子

避難の意識変化

震災時の避難の有無

	避難する (%)	避難しない (%)
東日本大震災	74(55人)	26(19人)
次震災が来た時	95(70人)	5 (4人)

避難開始時間の変化

	平均 (分)
東日本大震災	24
次震災が来た時	13

図3 アンケート結果

い発表について一緒に悩んでいたようにある。一部 TA が修正したが、ほとんどすべて高校生が作り上げた。

3.2 発表

最終発表会は、会場が大きいため少し緊張しており、練習時と比較するといくらか言葉に詰まる場面も見られたが、非常に素晴らしい発表を行った。

さらに、茨城県北震災復興シンポジウムに向けてスライドの洗練および発表の練習を行った。シンポジウムでは発表のみでなく、質疑の時間が設けられたが、立派に受け答えしていた。この点に関しては、高校生が考え抜いてスライドを作成していたため、質問にも即座に返答できたのではないかと考えられる。

4. おわりに

繰り返しになるが、発表は高校生の作成したものとは思えないほどの、水準の高いものになっている。こ

のように水準の高い発表ができた背景には、高校生の興味関心や、よりわかりやすい発表を行いたいと思う気持ちに加え、高校の先生方の多大なご尽力があった。

実際に高校訪問の際は、作業に熱中し下校時刻を過ぎることもあったが、担当の先生が残ってください、特別に作業を継続させていただいた。高校の先生方と TA の間に良好な関係を築くことができたからこそ、高校生への指導が円滑に行われ、高校生が素晴らしい発表をできたと考えている。謹んでお礼を申し上げます。

発表終了後、高校生から寄せ書きをもらった。そこには、「難しい内容だったけれど、丁寧に教えていただいたおかげでよくわかりました。」などの TA としてありがたいコメントとともに、「数学が現実で役に立つことがわかって楽しかったです。」という感想があった。文系選択の高校生も参加しているため、大学進学後や就職後に、今回学んだ数理解最適化が直接的には役に立たない学生が多いのではないかと思う。しかし数学の面白さや、その現実問題への応用を少しでも知り、これから前向きな気持ちで数学を学んでもらえたら、TA としてこれ以上うれしいことはない。

参考文献

- [1] 日立市, 「日立市防災」, <http://www.city.hitachi.lg.jp/moshimo/002/index.html> (2014年3月3日確認)。
- [2] 国土交通省関東地方整備局, 「茨城港日立港における東日本大震災の復旧・復興方針」, <http://www.pa.ktr.mlit.go.jp/kyoku/03info/07saigai/housin/hitachi.pdf> (2014年3月3日確認)。
- [3] 国土交通省都市局, 「津波避難を想定した避難路, 避難施設の配置および避難誘導について」, <http://www.mlit.go.jp/common/000233464.pdf> (2014年3月3日確認)。