

新入生授業に課題解決型研究を取り入れて —京都市広域避難場所割当マップの制作を通じた試み—

趙 亮

キーワード：実践研究，避難所割当，課題解決型研究 (PBR)，学部教育，学際研究

1. 背景

OR がさまざまな分野に応用できることは、本誌の読者にとっては言うまでもない。しかし専門外の人にはあまり知られていないのも現状のように思える。

例えば筆者は、情報学研究科数理工学専攻から現職に移ってから、さまざまな分野の大学院生の発表を聞いてきたが、特にいわゆる文系の研究は（理系である筆者からみれば）かなりいい加減な分析が多いと感じる。少しでも OR の手法を取り入れればもっと説得力のある研究ができたのに、といつも残念に思っている。

もちろん OR は奥深い学問であり、きちんと理解しようとするとなんかの数学力が必要（京都大学の学部なら、工学部情報学科数理工学コースにあたる）になってくるが、高性能な数値ソルバーが世に出ている以上、定式化さえできれば解決する問題もたくさんあり、データ分析やゲーム理論、グラフアルゴリズムなど、比較的入門しやすいものもあるので、ぜひ文系の研究にも取り入れてもらいたい。

そのためには文系の学生に理系のことを教える必要があるが、そのような授業は、実に多い [1]。今回は、そういった講義や課題解決型学習 (Project-Based Learning, PBL) のような学習タイプのものではなく、課題解決型研究 (Project-Based Research, PBR) を取り入れてみたい。具体的には、卒論研究テーマ相当の課題を入学したばかりの学部一年生に与え、卒論研究でやっているように、彼らの自主的な議論や提案を引き出しつつ、高度な数学やプログラミングについてはブラックボックス化して提供してあげることによって問題解決およびそのサイクル (図 1) を経験してもらう。

当然のことながら彼ら一人ではまだ卒論研究相当の

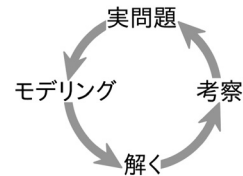


図 1 実践研究に必要な問題解決のサイクル

ことができるわけがない。したがって人数効果の出るようなテーマを選ぶ必要がある（後述のようにしっかりフォローしてあげる必要もある）。そこで今回、データの決め方や収集、モデルの考察、検討を分担してもらい、京都市広域避難場所割当マップの制作に取り込んだ。利用したのは、京都大学が平成 27 年度から導入した ILAS セミナーという新入生向けの授業である。平成 28 年度の前期にかけてやってみた結果、思ったより面白い成果を得られた。

なお研究の成果は、まだまだこれから改善していかねばならないところが多いが、<http://www.gsais.kyoto-u.ac.jp/staff/liang/maps/kyoto.html> で公開しているのので、試していただけたら幸いに思う。

2. モデリング

日本は、震災の多い国であるため、防災対策が比較的充実しているが、それでもさまざまな課題が残っている。例えば筆者らが住む京都市では、災害に備え次のように三種類の避難場所を指定しており、位置情報をネット上で公開している (<http://www.city.kyoto.lg.jp/gyozai/page/0000109137.html>)。

- ・避難所：災害時の一時的な避難生活を送る場所として、学校や集会場などを事前に指定しているもの。420 カ所が指定されている。
- ・広域避難場所：大地震の際に発生する大火災から逃れるための避難場所として、安全面積が概ね 1 ヘクタール以上の空地（公園、グラウンド、河川敷など）。69 カ所が指定されている。

- ・避難救助拠点：山間地域において、地震に伴う大
火災などの二次災害が発生した場合に、住民に対
して災害情報の伝達や収集、応急救護活動など
を行う場所。23カ所が指定されている。

しかし、災害が起きたときにどこへ行けばいいのかに
ついては明確な案内がない。市の担当部署にも確認し
たが、公開されているのは次の2文だけである。

- ・“最寄りの避難所” (出所: <http://www.city.kyoto.lg.jp/gyozai/page/0000132312.html>)
- ・“地域で定める災害時の集合場所” (同上)¹

すなわち、市では割当をせず、地域や個人に任せてい
る。これでは災害が起きたら混乱するのではないかと
すぐに疑問が湧く。最寄りの避難場所に行ったら実は
もういっぱいになっていた、じゃあどうする？

そこで今回京都市避難場所の割当マップを作ること
にした。避難人口の割合を調査し、割当コストを決め²、
数理計画法ソルバーに手動調整を足して割当を計算し、
結果を Google Maps を使って可視化する。定式化に
ついては、下表のとおりである。

表1 避難場所割当問題の定式化

- ・避難場所 P_1, P_2, \dots, P_m 。収容人数 b_1, b_2, \dots, b_m
- ・避難地域 U_1, U_2, \dots, U_n 。人数 a_1, a_2, \dots, a_n
- ・割当コスト c_{ij} : U_i を P_j に割当てた場合のコスト
- ・ x_{ij} : U_i が P_j に割当てられた場合1, それでなければ0

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_{i,j} c_{ij} x_{ij} \\ & \sum_i a_i x_{ij} \leq b_j, \quad 1 \leq j \leq m, \\ & \sum_j x_{ij} = 1, \quad 1 \leq i \leq n, \\ & x_{ij} \in \{0, 1\}, \quad 1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq m. \end{aligned}$$

ここで、等式の制約式は、すべての避難地域が必ず
どれかの避難場所に割当てられることを、不等式の制
約式は避難場所の容量を超えないことを意味している。
余談だが、この一番シンプルな定式化でも、文理学部の
学生に納得してもらうために30分以上かかった。し
かしみんな一生懸命理解しようとしてくれるので、説
明する側にとっても充実感があった。なお、この定式
化の妥当性について、後日大阪市立大学瀧澤先生より
指摘をいただいたので最終節で述べる。

NP 困難な問題なので、今回は比較的小規模の問題
にした。具体的には、広域避難場所 ($m = 69$) と国勢
調査区域の避難地域 ($n = 225$) を選んだ。これで変数
 x_{ij} の数が $m \times n = 15,525$ 、制約式の数³ (バイナリ

の15,525個を除いて) $m + n = 294$ となった。ソル
バーには、名古屋大学の柳浦先生の助言により Gurobi
の無償アカデミック版を用いることにした。

結果として、Gurobi がよく頑張ってくれたおかげで
数理計画問題の解決には時間はかからなかった。時間
がかかったのは、データ設定であった。収容人数 b_j は
京都市が公開している PDF [2] から作成した。また、
人数 a_i に関しては、国が公開しているデータベース [3]
から総人口を取得し、阪神大震災のときのデータを参
考に10%と20%、および参考のため100%の3通り
とした。以上は筆者が事前に準備したもので、一回目
の授業の前半で説明した。

厄介なのは、割当コストをどう決めるかの問題で、一
回目の授業の後半がこの議論に使われた。妥当性の検
討は筆者にとっても一番悩むところで、あえてはつき
り決めずに受講生と相談して決めることにした。

なるべく最寄りの広域避難場所が割当てられるよう
決めねばならないのは、 c_{ij} のほか、目的関数もある。
最大コストの最小化なども考えられるが、議論の結果、
簡単のため今回は総コストの最小化にした。

コスト c_{ij} については、直線距離や道路ネットワー
クを使う移動距離、移動時間、およびそれらに人数を
かけた重み付きコストなどが考えられる。そのなか
で、直線距離と移動時間は実態とかけ離れることが
多そうなので却下した。また、人数をかけた重み付
きコストの場合、人口の多い地域に住んでいる人に
とって有利になるので、それが法的に不公平ではない
か、という文系らしい指摘が出てきて、やはり却下さ
れた。

残っているのは、移動距離をどう求めるかというこ
とだが、幸いにして Google Maps を使って二点間の
移動 (歩行) 距離を計算できることが知られている。
したがって、各地域の集合場所と各広域避難場所の入
り口を調べ、Google Maps を使って c_{ij} を見つけるこ
とができる。広域避難場所の入り口に関しては、京都
市のデータ [2] が使える。地域の集合場所については
情報が公開されていないため、受講生に一人28カ所
 $\times 8$ 人 = 224カ所、筆者に1カ所のように分担を決め、
授業外の時間を使って調査してもらうことにした。

3. 解く

一回目の授業では、モデリングを行い、数理計画法の紹
介およびソルバー (ただしライセンスフリーの lp_solve)
の練習を行った。宿題として、各受講生に、割当てられ
た28カ所の地域集合場所を適当に決め、その場所から

¹ 後聞だが、京都市は学区ごとの避難を考えているらしい。
学区は本研究で採用した国勢調査区域とほぼ一致する。

² これが一番手間のかかる作業であった。

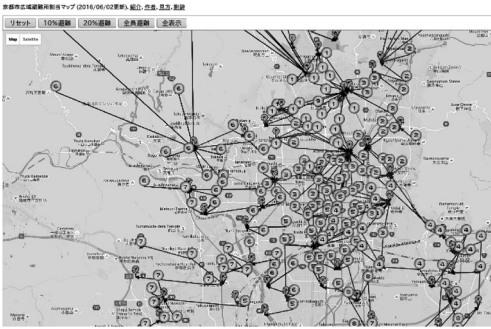


図2 最初の成果, Ver 1 のスクリーンショット

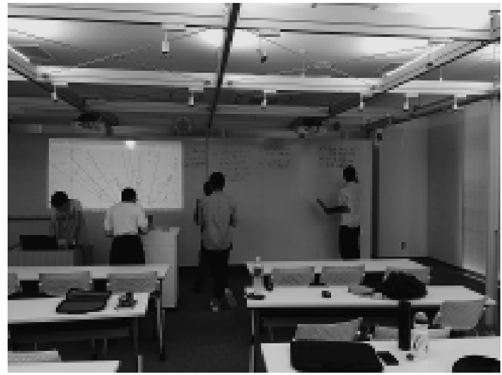


図3 考察とモデル修正の様子

広域避難場所への移動距離を Google Maps を使って調査する課題を出した。ただし、すべて (28×69 回) やろうとするとかなり時間がかかる (100 時間以上) ので最寄りの 3~5 カ所でもよいことにした。それでも 3~10 時間かかったと二回目の授業のときに報告された。また、作業ミスをして誤ったデータを集めてきた受講生もあり、授業中にみんなで分担して再調査した。

このように集めてきたデータをマージし、調査されていない移動距離を $M = 100 \text{ km}$ という十分大きいと思われる値で置き、Gurobi 用のファイル (800 KB 強) に落として計算させたところ、有意義な (= 距離 M の移動を含まない) 割当が得られなかった。時間の関係で深く調べられなかったが、これは、前節で懸念したように、最寄り 3~5 カ所の避難場所だけで考えると、収容能力の制約でうまく避難できない地域の存在を示したものと考えられる。

そこで (予定外であったが) 全組み合わせを調査することになった。前述のように、これを受講生にさせても無理があるので著者が Google Maps の API を利用して調査することにした。このためには大変勉強したが、なんとか三回目の授業までに完成した^{3,4}。

その結果を Google Maps で可視化し、最初の成果 (図 2, 以下 Ver 1 と呼ぶ) が得られた。

4. 考察, モデルの修正と問題解決のサイクル

三回目の授業では、Ver 1 の結果をみて受講生に考察してもらった (図 3)。まず、市の中心部は概ね問題ないことが確認できた。それから、大変離れた場所に行かねばならない地域の存在も確認できた。京都市北

部山の中にあると思われる複数の地域⁵では、近くに広域避難場所がなく、20 km, 30 km 以上離れた場所の割当になっている。また、驚くことに、JR 山科駅周辺の地域⁶も、近くに広域避難場所があるが、収容能力が少なく、避難人数が多い場合、京都と滋賀県境の山地を越えなければならない (例えば京都御所まで) こともわかった。これは現実的ではないと思われ、修正案をみんなで一緒に考えた。結果として、20%避難の設定で、割当コスト 5 km 以上を目安に、対象地域を近くの (広域ではない) 避難所への割当を手作業で行った。

そのほかの考察として、不要な広域避難場所の存在も確認できた。例えば 20%避難の場合、7 カ所が割当てられていない。こういった場所について、維持コストやバックアップの必要性など、今後 (京都市が) 検討する必要があると考えられる。さらに関連して、向日市等近隣地域から京都市指定の広域避難場所に来る可能性があるのも気になる場所であった。以上の二つについては、本研究では特に考慮していない。

三回目の授業のあとに、京都市担当部署に確認し、ありがたいことに避難所の CSV ファイルを提供してもらえた。それをもって目視で決めた割当を正確に見直して確定とした (図 4)。このように広域避難場所への割当が困難な地域に対して近くの避難所への割当をしたあとでも、高雄など、たとえ 20%の避難でも、複数の避難所へ割当てねばならない、防災上とくに要注意な地域の存在がわかった。

可視化を更新し、最終回である四回目の授業では、この確定版について再度考察とモデル修正をしてもらい、反映できるだけの時間がないうえ、今後の課題を含めてレポートに書いてもらうこととした。

³ Google Maps の利用は、一日に 2,500 要素、10 秒に 100 要素といった制限がある (現時点)。数日で調査を終わらせるために複数のアカウントを使う必要があった。それもあってプログラムがやや煩雑になっている。

⁴ このセミナーは教員 3 人で分担しているため、3 週間おきに授業を担当していた。それが助かった。

⁵ 雲ヶ畑, 小野郷, 中川, 久多, 広河原, 花脊, 大原。

⁶ 百々, 陵ヶ岡, 鏡山, 大宅, 山階南。

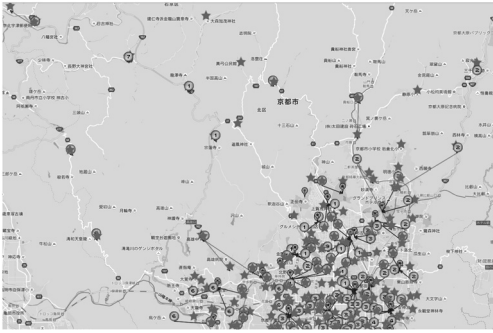


図4 確定版 (H28 年度 8 月現在) のスクリーンショット

なお、どの地域がどこに割当てられたといった成果の詳細は、紙面の関係で詳しく述べられないので、ご興味のある方は、URL <http://www.gsais.kyoto-u.ac.jp/staff/liang/maps/kyoto.html> を参照されたい。

5. まとめと今後の課題

本稿は、京都市広域避難場所割当マップの制作というテーマで、学部一年生と一緒に PBR を行った報告である。まず、教育の面で、全四回の授業の様子やレポートをみると、受講生の関心と OR への興味を引き出すことができたように思われる（熊本地震の直後に開講したことも影響したのかもしれない）。モデルを理解できたときに法学部 N さんが嬉しそうに「あ～やっとその数式の意味がわかった」と言ってくれて、筆者の励みにもなった。彼らが研究というものはかなり理解できたのではないと思う。

研究の面においても面白いものができたのではないと思う。筆者が調べた範囲では、いままでに [4, 5] の研究があったが、大阪市住吉区、地域 104 個、避難所 36 (38) カ所という問題設定が今回とまったく異なる。また手法もまったく異なる。今回の PBR では、シンプルな定式化を用いたので学術的な貢献はないが、データの検討や収集、モデルの改善、結果の可視化など、実践研究として新規性や有用性のあるものとする。

今後は、まず避難所の割当を考えたい。広域避難場所の 6 倍もあるので、計算に工夫する必要があるかもしれない。それから、人数の多い区域の分割を考えたい。今回扱った国勢調査区域のなかには 1 万人以上の

区域もあり、分割したほうがより合理的な避難計画になるかと思われる。その際、我々が今回適当に決めた地域集会所の妥当性をもう一度考え直す必要があり、京都市と連携して行いたい。

さらに受講生からは、京都市に多い観光客を取り入れるシミュレーションが必要だという指摘があった。特に日本語のわからない外国人観光客への案内は整備する必要があると思われる。また、大阪市立大学の瀧澤先生より、避難経路の交差は避けるべきだという指摘を頂いた。最後に京都大学大学院教育学研究科高田先生から、指定されていない学校に避難してくる人への対応なども指摘された。来年以降の授業に取り込み、少しずつ割当マップを改善していきたい所存である。

謝辞 真剣に取り込んでくれた受講生、文学部橋谷徹也さん、法学部竹下友佳子さん、速水陸さん、二宮由紀子さん、医学部梅垣建伍さん、工学部東大地さん、宮本涼太さん、井谷友海さんに感謝したい。また、ILAS セミナー代表の京都大学池田裕一教授、避難所データを提供して下さった京都市行財政局防災危機管理室、Google Maps の API 利用を提供して下さった Google 社、Gurobi ソルバーを提供して下さった Gurobi 社、有益なディスカッションをして下さった名古屋大学柳浦陸憲先生、大阪市立大学瀧澤重志先生、京都大学高田満彦先生に感謝を申し上げる。

参考文献

- [1] 慶應義塾大学日吉キャンパス特色 GP, 「文系学生を対象とする自然科学教育に関するアンケート」, 2007 年 1 月 31 日. <http://www.sci.keio.ac.jp/gp/AF7B4884/0341A617.pdf> (2016 年 8 月 17 日閲覧)
- [2] 京都市避難所・広域避難場所・避難救助拠点マップ, <http://www.city.kyoto.lg.jp/gvozai/page/0000109137.html> (2016 年 8 月 17 日閲覧)
- [3] e-Stat, 平成 22 年国勢調査 (小地域) 男女別人口総数及び世帯総数, <http://e-stat.go.jp/SG2/eStatGIS/page/download.html> (2016 年 8 月 17 日閲覧)
- [4] 中野浩太郎, 齋藤寿樹, 加藤直樹, 瀧澤重志, “都市における避難所割当てパターンの列挙と評価,” 情報処理学会第 76 回全国大会, 4-771-4-772, 2014.
- [5] 瀧澤重志, “ZDD を用いた小地域単位の避難所割当案の高速列挙・抽出手法,” 地理情報システム学会 (GISA), 第 23 回 GISA 学術研究発表大会, C-5-3, 2014.