最大の移動時間を最小化する教室割当問題の定式化と求解

都 11-23　岡崎　俊介

平成 27 年 2 月 13 日

目 次

1 はじめに

人は，移動をする生き物である．移動をして，様々な目的地へ赴き，やりたいこと，またはしなければならないことをする．移動には，ピクニックのように移動そのものを楽しむ場合，すなわち移動そのものが目的である場合と，通勤や通学のように時間がもったいないが移動しなければならない場合，すなわち移動が別の目的のための手段となっている場合がある．

移動が別の目的のための手段となっている場合の 1 つに，大学内での教室移動がある．大学内での教室移動は，授業と授業の間の休み時間に行うため，休み時間を移動に費やすことになる．短い休み時間で休憩，及び授業の準備も行わなければならない学生にとっては，移動時間はできるだけ短いほうが望ましい．

通常，大学では授業によって開講される教室が異なっており，どの授業にどの教室を割り当てるかは手動で決めることが多い．実際，現在関西大学においても，授業に対する教室の割当は全て手動で行われている．また，関西大学では多くの学部が授業を開講するため，教室を割り当てる際に学生の移動時間まで考慮することは難しい．

この問題に似た問題として，大学における時間割作成の自動化が挙げられる．この問題についての研究は数多く存在している．[5,7]．そこで本研究では，一般的な割当問題 [8] の枠組みの下で授業に対する教室の割当を自動化する手法を考えることにする．このような問題を本研究では教室割当問題と呼ぶことにする．

教室割当の自動化については，例えば，マルチエージェントシミュレーションを行い，学生の移動時間を最小化した教室配置を行う研究がある [9]. これに対し本研究では，移動時間が最小になる教室の割り当て方を求める．具体的には教室割当問題を最適化問題として定式化し，最適化ソルバーを用いてそれを解くことを試みる．

実は [10] でも同じような研究が行われており，学生の移動時間の総和を最小化するような教室割当を求めることを目標とした最適化問題を解いている．この最適化問題は，授業・教室・履修者の基本的なデータがあれば計算を行うことができるため，大学毎の授業システムに影響されず，多くの大学で使用可能な汎用性の高い教室割当が可能になる．しかしながら，[10] の提案手法が大きな計算時間を要するものであり，最適解を求めることができないケースが多く見られた．

そこで本研究では，[10] とは目的を変更し，学生の移動時間の最大値を最小にするような教室割当を求めることを目指す．

2　準備

本章では，次章以降で必要となる事項について説明する．

2.1　数理計画問題

数理計画問題は以下のように表すことができる [2]：

$$\text{目的関数：} f(x) \quad \to \quad \text{最小（あるいは最大）}$$
$$\text{制約条件：} x \in S$$

ここで，x は n 次元実ベクトル，目的関数 f は R^n（n 次元実ベクトル空間）上で定義された実数値関数である．また制約条件を満たす x を実行可能解，その集合である $S \subseteq R^n$ を実行可能領域，実行可能解のなかで目的関数 $f(x)$ が最小（あるいは最大）となるものを最適解という．このような問題を総称して数理計画問題（最適化問題）という．

2.2　分枝限定法

分枝限定法とは組合せ最適化問題の解を見つける方法の 1 つである [2, 8]．組合せ最適化問題は有限個の要素からなる実行可能領域のなかで目的関数が最小となる解を見つける問題である．実行可能解は有限個であるから，それらすべてを列挙することにより，最適解を求めることができる．しかしながら，変数の数が多い場合，組合せの数が膨大になるため，すべての実行可能解を比較する方法では最適解を求めるのは難しい．

これに対し，分岐限定法は組み合わせ最適化問題の最適解を効率的に見つけるための方法のひとつである．分枝限定法において，実行可能解を列挙するために場合分けを行っていく過程で，最適解が得られる見込みのない不必要な場合分けをできるだけ省略して探索する範囲を絞り込み，計算時間の短縮を図る．分枝限定法の探索の方法を以下に記述する．ここで，下界値とは最適値以下であることがわかっている値であり，上界値とは最適値以上であることが分かっている値である．

分枝限定法

ステップ 1 適切な方法で初期実行可能解を求め，それを暫定解 x とする．暫定解 x の目的関数値を z とする．問題の集合 $\mathcal{N} = P_0$ とする（P_0 は原問題である）．

ステップ 2 $\mathcal{N} = 0$ ならば，暫定解 x を最適解として出力し終了．
そうでなければ，$\mathcal{N}$ から適当な子問題を選びそれを P' とし，$\mathcal{N}$ から P' を取り除く．

ステップ 3 P' の緩和問題を解き，得られた解を $\bar{x}'$，上界値を $\bar{z}'$ とする．緩和問題が許容解をもたないならばステップ 2 へ．

ステップ 4 $\bar{x}'$ が元問題 P_0 の実行可能解かつ $\bar{z}' > z$ の場合．
（原問題 P_0 の，より良い許容解が得られたので）$x := \bar{x}'$, $z := \bar{z}'$ と更新する．ステップ 2 へ．

ステップ 5 $\bar{z}' \leq z$ の場合．
（子問題 P' の最適解は x より目的関数値が大きくないので）ステップ 2 へ．

ステップ 6 （$\bar{x}'$ が元問題 P_0 の実行可能解でない，かつ $\bar{z}' > z$ の場合）
P' の実行可能領域を分割した子問題を生成し，それらを $\mathcal{N}$ に加え，ステップ 2 へ．

2.3 割当問題

まず，割当問題の説明を行う際に必要となるマッチング問題について説明する．マッチング問題とは，複数の仕事と複数の機械を 1 対 1 に対応させたり，何人かの人を 2 人ずつのグループに分けたりするように，対象物のペアを作る問題である．この問題は，無向グラフ上でモデル化できる．モデル化する際に，対象を頂点とし，ペアリング可能な頂点同士を無向枝で結ぶ．ここで，ペアを作る枝の集合をマッチングという．このようにして，要素数最大のマッチングか，各枝に与えられた費用の和が最小となる条件を満たすマッチングを求める問題をマッチング問題という．そして，マッチング問題の中でも，2 部グラフの最小費用マッチング問題を割当問題 [8] と呼ぶ．例えば，能力が異なる各社員にどの作業を割り当てると最もコストが少なくなる（もしくは最も利益を上げることができる）のかを求める問題を考える．その例を図 2.1 に示す．この図の点線はマッチング可能なペアを表しており，実線はマッチングを表している．すなわち，社員 a1 が仕事 b2, b3 に割り当てられ，社員 a2 が仕事 b4 に割り当てられ，社員 a3 が仕事 b1 に割り当てられている [8]．

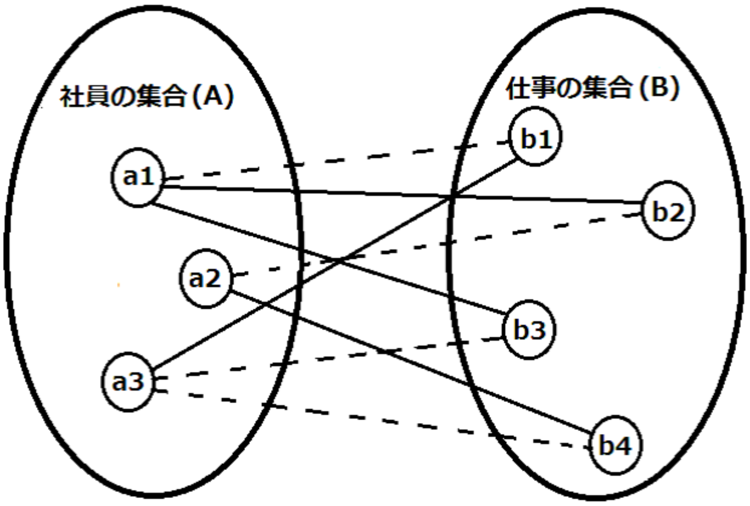


図 2.1: 割当問題の例

2.4　重み付き制約充足問題（WCSP）

制約充足問題 (Constraint Satisfaction Problem, CSP) とは，変数の集合，変数領域の集合，制約の集合によって構成され，すべての制約を満たすように各変数に変数領域から値を割り当てる問題である．このとき，すべての制約が満たされた解を実行可能解と呼ぶ．一方，WCSP (Weighted CSP) [3] では重要な制約条件をなるべく満足するためには値をどのように割り当てるとよいかを決定する問題であり，すべての制約を満たす必要はなく，制約条件の重要度を重みとして設定することができる．そのため，制約条件は大きく 2 種類に分類することができる．1 つが絶対制約で，これは必ず成立させなければならない制約条件である．よって，この制約が 1 つでも成り立っていない解は実行可能解とは言えない．もう 1 つが考慮制約で，これは成立させることが好ましい制約条件である．この制約が成り立っていない解も実行可能解と言える．このとき，各考慮制約毎に違反ポイントを設定し，その総和を目的関数として，それを最小化する．

2.5　最適化ソルバー

最適化ソルバーは，数理計画問題の最適解を得るためのプログラムである．これを利用するためにはまず，数理計画問題の定式化を行い，次に定式化した問題をモデリング言語で記述する．最適化ソルバーによって利用できるモデリング言語は異なる．そして，記述した問題を最適化ソルバーで読み込み，解を得る．ここで，本研究で用いる最適化ソルバー GLPK [6] と IBM ILOG CPLEX Optimizer [4] について説明する．

まず GLPK とは，GNU Linear Programming Kit の略で，GNU が無料配布しているソルバーである．GLPK は，モデリング言語として，最適化の分野で広く用いられているモデリング言語 AMPL (A Mathematical Programming Language) [1] のサブセット言語である

GMPL を採用している．このソルバーは最適化計算を行うだけではなく，GMPL 形式で書かれたモデルとデータを用いて，LP 形式のファイルを作成することができる．

また，IBM ILOG CPLEX Optimizer [4] とは，計算速度に定評のある最適化ソルバーの 1 つである．モデリング言語は OPL を採用している．そして，大規模な線形計画 (LP)，2 次計画 (QP)，整数計画 (IP)，混合整数計画 (MIP) を解くことができる．

本研究では，GLPK によって，GMPL 形式で書かれたモデルとデータを，LP 形式のファイルへ変換し，IBM ILOG CPLEX Optimizer を用いて計算を行っている．

3　先行研究の概要

本研究では，最大の移動時間を最小化する教室割当問題を行うが，これは先行研究 [10] を参考にしたものである．本章では，[10] の概要について説明する．

3.1　背景

現在，関西大学では手動で教室割当を行っている．関西大学には約 3 万人の学生が在籍しており，約 12000 の授業がある．このような多数の学生と授業を手動で処理し，移動時間を最小化する教室割当を行うことは非常に困難である．また，休み時間には多くの学生が同時に移動するため，学生の動きを考慮した教室割当を行わなければ移動時に混雑が発生することがある．さらに，現在の関西大学の休み時間は 10 分と短く，連続して授業を持つ学生や教員は，次の授業への移動と準備を時間内に行うことが困難なことがある．そこで，先行研究では次のことを目標としていた．

> 各授業の開講曜限が定められているとき，休み時間における全学生の
> 移動時間の総和が最小となるような，授業に対する教室の割当を求めよ．

すなわち，先行研究では本大学の教室割当を自動化するとともに，余裕を持って移動を行えるように各学生の移動時間の総和を最小化する最適化問題を定式化し，求解を行った．

先行研究では各時限間の教室移動時間を最適化対象としているが，1，2 限（午前）と 3，4，5 限（午後）の間には昼休みがあり，長い休みとなるので，移動時間を最小化する必要性はないと考えている．そこで，先行研究では一日を午前・午後に分けて最適化を行っている．さらに一週間は月曜から土曜の 6 日間，そして一年は春，秋の学期に分けられるので，最適化の対象は合計 24 通りとなる．

3.2　問題の定式化

先行研究では以下のように教室割当問題を定式化して最適化を行っている．

- 集合と添字・パラメータ・変数
  - 集合・添字

$p \in P$ ： 時限とその集合

$j \in J$ ： 授業とその集合

$j \in J1_p$ ： p 限目に開講される授業とその集合

$j \in L$ ： 特別連続授業とその集合

$(i, j) \in D$ ： 特定の教室を指定する特定の授業の組とその集合

$i \in I$ ： 教室とその集合

– パラメータ

b = 休み時間の長さ

m_i = 教室 i の定員数

n_j = 授業 j の受講者数

y = 混雑が起きる可能性が高まる移動時間

q_{i_1,i_2} = 授業 i_1 と授業 i_2 の双方を受講する学生数

r = 全ての移動で可能な限り守りたい移動時間

t_{i_1,i_2} = 教室 i_1 と教室 i_2 間での所要移動時間

z = 混雑が起きると予測される人数

$$d_{j_1,j_2} = \begin{cases} 1, & p \text{ 限目に授業 } j_1 \text{ を，} (p+1) \text{ 限目に授業 } j_2 \text{ を受講する学生が存在するとき} \\ 0, & \text{それ以外} \end{cases}$$

$$e_{p,j} = \begin{cases} 1, & \text{時限 } p \text{ 時に授業 } j \text{ が割り当てられているとき} \\ 0, & \text{それ以外} \end{cases}$$

$$f_{i_1,i_2} = \begin{cases} 1, & t_{i_1,i_2} \leq y \text{ であるとき} \\ 0, & \text{それ以外} \end{cases}$$

$$g_{i_1,i_2} = \begin{cases} 1, & t_{i_1,i_2} > r \text{ であるとき} \\ 0, & \text{それ以外} \end{cases}$$

$$h_j = \begin{cases} 1, & p \text{ 限目に授業を持たず，} (p+1) \text{ 限目に授業 } j \text{ を受講する学生が存在するとき} \\ 0, & \text{それ以外} \end{cases}$$

– 変数

$$
\begin{aligned}
v_{i_1,i_2} &= \begin{array}{l} \text{ある時限に教室 } i_1 \text{ で授業が開講され,} \\ \text{その次の時限に教室 } i_2 \text{ で授業が開講されているとき，その両方を受講している学生数} \end{array} \\
u_{i,j} &= \begin{cases} 1, & \text{教室 } i \text{ に授業 } j \text{ が割り当てられているとき} \\ 0, & \text{それ以外} \end{cases} \\
w_{p,i_1,i_2} &= \begin{cases} 1, & p \text{ 限目に教室 } i_1 \text{ で授業が開講され,} \\ & (p+1) \text{ 限目に教室 } i_2 \text{ で授業が開講されるとき} \\ 0, & \text{それ以外} \end{cases} \\
\alpha_{j_1,j_2} &= \begin{cases} 1, & \text{特別連続授業 } j_1, j_2 \text{ が異なる教室で開講されるとき} \\ 0, & \text{それ以外} \end{cases} \\
\beta_{j_1,j_2} &= \begin{cases} 1, & \text{授業 } j_1, j_2 \text{ 間での移動時間ができるだけ守りたい指定の時間を越えるとき} \\ 0, & \text{それ以外} \end{cases} \\
\delta_{i,j_1,j_2} &= \begin{cases} 1, & p \text{ 限目に授業 } j \text{ を受講していて，} (p+1) \text{ 限目に授業 } j_2 \text{ を受講せずに} \\ & \text{退室する学生集団と } p \text{ 限目に授業 } j_1 \text{ を受講していて,} \\ & (p+1) \text{ 限目に授業 } j_2 \text{ を受講するために入室してくる学生集団か,} \\ & p \text{ 限目に授業を持たず } (p+1) \text{ 限目に授業 } j_2 \text{ を受講するために入室する} \\ & \text{学生集団で出入りのタイミングが合い，混雑が起きる可能性が高いとき} \\ & \text{出入りのタイミングが合い, 混雑が起きる可能性が高いとき} \\ 0, & \text{それ以外} \end{cases}
\end{aligned}
$$

- 制約条件
  - 変数を定義する制約条件
    * v_{i_1,i_2}

$$
(u_{i_1,j_1} + u_{i_2,j_2} - 1) \cdot q_{j_1,j_2} \leq v_{i_1,i_2} \tag{3.1}
$$
$$
(\forall p \in P,\ \forall i_1 \in I,\ \forall i_2 \in I,\ \forall j_1 \in J1_p,\ \forall j_2 \in J1_{p+1}, d_{j_1,j_2} = 1)
$$

    * w_{p,i_1,i_2}

$$
u_{i1,j1} + u_{i2,j2} - 1 \leq w_{p,i_1,i_2} \tag{3.2}
$$
$$
(\forall p \in P,\ \forall i_1 \in I,\ \forall i_2 \in I,\ \forall j_1 \in J1_p,\ \forall j_2 \in J1_{p+1},\ d_{j_1,j_2} = 1)
$$

  - 絶対制約
    * **[絶対制約 1]：1 つの曜限における各教室には 2 つ以上の授業を割り当てられない.**

同じ曜限において，各教室に2つ以上の授業が割り当てられないようにするため，教室 i について，次の制約を与える：

$$\sum_{j \in J} u_{i,j} \cdot e_{p,j} \leq 1 \qquad (\forall p \in P,\, \forall i \in I) \tag{3.3}$$

* **[絶対制約2]：各授業には必ず1つの教室を割り当てなければならない．**

  ある曜限に存在する1つの授業に対して2つ以上の教室を割り当てないようにするため，また，1つの授業に1つも教室が割り当てられないことを防ぐため，授業 j について,次の制約を与える：

$$\sum_{i \in I} u_{i,j} = 1 \quad (\forall j \in J) \tag{3.4}$$

* **[絶対制約3]：受講人数が教室の定員を超えて教室に授業を割り当ててはいけない．**

  受講人数が各教室の定員を越えないようにするため，次の制約を与える：

$$\sum_{i \in I} u_{i,j} \cdot m_i \geq n_j \quad (\forall j \in J) \tag{3.5}$$

* **[絶対制約4]：特定の授業は指定された教室で開講されなければならない．**

  本制約は，特定の設備を必要とする授業をその設備が整った指定されている教室に割り当てるための制約である．教室 i に授業 j が割り当てられなければならないとき，次の制約を与える：

$$u_{i,j} = 1 \quad (\forall (i,j) \in D) \tag{3.6}$$

– 考慮制約

* **[考慮制約1]：特別連続授業は同じ教室で開講されることが好ましい．**

  特別連続授業（授業内容が同一，または非常に関連性の高い2限連続で開講される2つの授業）は双方を受講している学生が多く，教室を移動する学生が少ないと考えられるため，そのまま同一の教室で開講されることが好ましい．

$$u_{i_1,j_1} + u_{i_2,j_2} - 1 \leq \alpha_{j_1,j_2} \quad ((j_1,j_2) \in L \subseteq J \times J,\, i_1 \neq i_2) \tag{3.7}$$

∗ [考慮制約 2]：移動時間は指定した時間以内であることが好ましい．

本制約は，休み時間をできるだけ授業の準備などに費やせるようにするための制約である．

$$w_{p,i_1,i_2} \cdot g_{i_1,i_2} \leq \beta_{j_1,j_2} \tag{3.8}$$
$$(\forall p \in P,\ \forall i_1 \in I,\ \forall i_2 \in I,\ \forall j_1 \in J1_p,\ \forall j_2 \in J1_{p+1})$$

∗ [考慮制約 3]：教室内の人が入れ替わる際の混雑ができるだけ発生しないほうが好ましい．

移動が行われる教室間の距離が短い場合，移動して教室に入ってくる学生と，授業が終わって教室から出て行く学生の間で混雑が起きる．このような混雑は移動時間の増加につながるためできるだけ避けたいことである．本制約は以上のような混雑による移動時間の増加をできるだけ避けるための制約である．

$$\begin{aligned}&((n_j - q_{j,j_2} \cdot d_{j,j_2}) + (q_{j_1,j_2} \cdot d_{j_1,j_2} \cdot f_{i_2,i_1})\\&+(n_{j_2} - q_{j_1,j_2}) \cdot h_{j_2}) \cdot (u_{i_1,j} + u_{i_1,j_2} + u_{i_2,j_1} - 2) \cdot d_{j_1,j_2} - z\\&\leq M \cdot \delta_{j,j_1,j_2}\\&(\forall p \in P,\ \forall i_1 \in I,\ \forall i_2 \in I,\ \forall j \in J1_p,\ \forall j_1 \in J1_p,\ \forall j_2 \in J1_{p+1},\\&\qquad i_1 \neq i_2,\ j \neq j_1, M = \text{十分大きな整数})\end{aligned} \tag{3.9}$$

先行研究では，混雑は授業終了直後に発生するものと考えている．従って，図 3.1 のように，混雑の原因となる人数は，該当教室から出て行く人，前の時限に授業がなく次に該当教室で受講している人，前の時限に近くの教室で授業を受けて次に該当教室で受講している人，の 3 つに限定している．

以下にこの制約式の左辺の項を示す．

– 項 $(n_j - q_{j,j_2} \cdot d_{j,j_2})$

この項は，授業 j を p 限に受講している人数から，$(p+1)$ 限に授業 j_2 を受講している学生の人数を減じることで，授業 j_2 を受講せずに退室している学生の人数を示している．

– 項 $(q_{j_1,j_2} \cdot d_{j_1,j_2} \cdot f_{i_2,i_1})$

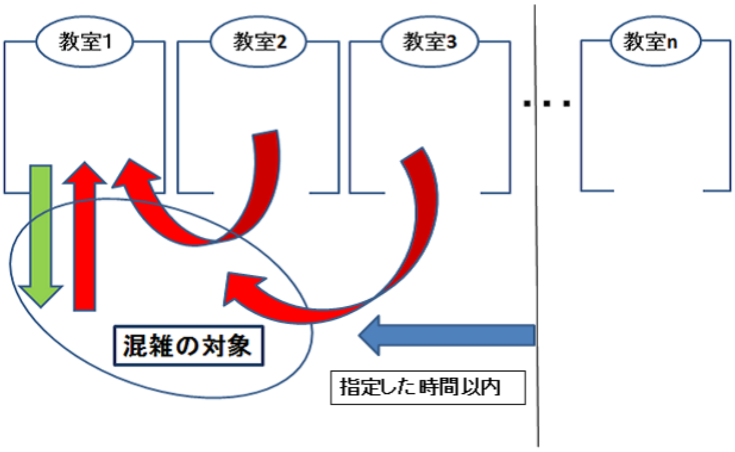


図 3.1: 混雑の対象

この項は，$(p+1)$ 限に教室 i_1 で開講される授業 j_2 を受講するために，p 限に授業 j_1 が開講されている教室 i_2 から移動する人がいる場合，その移動時間が混雑が起きうる移動時間を越えるなら，その移動人数は混雑の要因にならないということを示している．混雑が起きうる移動時間とは，教室 i_1 から出て行く人や，近くの教室からの移動してくる人とは移動のタイミングが重ならないと考えられる移動時間のことである．つまり，移動時間が一定以上かかる教室から移動してくる人は，混雑の要因とはならないと考えている．

– 項 $(n_{j_2} - q_{j_1,j_2}) \cdot h_{j_2}$

  この項は，$(p+1)$ 限目に教室 i_1 で開講される授業 j_2 を受講するために外から移動してくる学生数を示している．

– 項 $(u_{i_1,j} + u_{i_1,j_2} + u_{i_2,j_1} - 2) \cdot d_{j_1,j_2}$

  この項は，この制約に関連する授業が同教室で連続して開講されているかを示している．

- 違反点数

  考慮制約 1, 2, 3 が満たされていない場合に発生する違反点数 E_1, E_2, E_3 をそれぞれ (3.10)，(3.11)，(3.12) のように定めている：

$$E_1 = \sum_{j_1,j_2 \in J} \alpha_{j_1,j_2} \tag{3.10}$$

$$E_2 = \sum_{p \in P} \sum_{j_1 \in J1_p} \sum_{j_2 \in J1_{p+1}} \beta_{j_1,j_2} \tag{3.11}$$

$$E_3 = \sum_{p \in P} \sum_{j, j_1 \in J1_p} \sum_{j_2 \in J1_{p+1}} \delta_{j, j_1, j_2} \tag{3.12}$$

- 目的関数
  目的関数は，移動を行う全学生の移動時間の総和と，考慮制約を満たせていない場合に発生する違反点数 $E_i (i = 1, 2, 3)$ にそれぞれの重み係数 a と $c_i (i = 1, 2, 3)$ を乗じ，足し合わせた値を最小化するように定めている．

$$\text{minimize} \quad (a \cdot \sum_{i_1 \in I} \sum_{i_2 \in I} (t_{i_1, i_2} \cdot v_{i_1, i_2})) + \sum_{i=1}^{3} c_i \cdot E_i \tag{3.13}$$

3.3 使用教室と対象授業

先行研究では，以下のデータを用いて最適化を行っている．

- 使用教室
  第 4 学舎で使用されている一般教室である 39 教室を対象としている（表 3.1）．

表 3.1: 先行研究で扱っている教室

1 階	2 階	3 階	4 階	その他
4-101	4-201A	4-301	4-401	4-502
4-102	4-202	4-302	4-402	4-3101
4-103	4-203	4-303	4-403	4-3201
4-104	4-204	4-304	4-404	4-3202
4-105	4-205	4-305	4-405	4-4A
4-106	4-206	4-306	4-406	4-4B
4-107	4-207	4-307	4-407	
	4-208	4-308	4-408	
	4-209			
	4-210			

- 対象授業
  理工系学部の全授業を対象としている．しかし，OD 教室などの特殊教室で開講される授業は除いている．

3.4　計算環境

先行研究では，最適化ソルバー IBM ILOG CPLEX Optimizer の分枝限定法を用いて求解を行っている．また，表 3.2 は，先行研究で用いた計算環境を示している．

表 3.2: 先行研究での計算環境

OS	Microsoft Windows 7 Service Pack 1
CPU	Intel(R) Core(TM) i7-3930K CPU @ 3.20GHz
メモリ	32.0 GB
ソルバー 1	GLPK 4.47
ソルバー 2	IBM ILOG CPLEX 12.4.0.0

3.5　実験結果

先行研究では，まず，計算時間を制限することなく実験を行った．しかし，約 5 日間に渡って計算を行い，最適解を得ることができなかった．そのため，先行研究では，各データに対する計算時間の上限を 1 時間として実験を行っている．その際，特定の教室を指定する授業は設定せず，違反係数は移動時間の最小化を優先するために $c_1 = 1$, $c_2 = 2$, $c_3 = 3$ を与えている．

表 3.3 は，先行研究での実験の結果を示している．表 3.3 より，最適解を求めることができたのは 6 ケースしかないということがわかる．

表 3.3: 先行研究での実験結果

最適解	曜限	制約	変数 (0-1，整数)	nonzeros	計算時間 (秒)
F	春学期月曜午前	933306	4781(3320,1461)	3649805	3604.03
F	午後	1156836	5987(4506,1481)	4525582	3613.53
F	火曜午前	648062	4639(3164,1475)	2548567	3603.72
F	午後	731761	4799(3317,1482)	2853373	3605.06
F	水曜午前	595910	4292(2813,1479)	2327640	3601.08
F	午後	678082	4476(2994,1482)	2634793	3600.13
F	木曜午前	192757	2799(1405,1394)	744925	3602.25
F	午後	411239	3711(2231,1480)	1590013	3600.21
F	金曜午前	200266	3142(1773,1369)	772967	3604.11
F	午後	871766	4981(3500,1481)	3391847	3601.69
T	土曜午前	36822	2628(1362,1266)	133617	225.23
T	午後	48320	2703(1221,1482)	171653	1282.27
F	秋学期月曜午前	706638	4235(2753,1482)	2758070	3605.15
F	午後	1026116	5861(4379,1482)	4003702	3606.85
F	火曜午前	888258	4922(3479,1443)	3491939	3606.29
F	午後	926884	4835(3353,1482)	3606133	3601.60
F	水曜午前	469738	3756(2312,1444)	1832968	3603.42
F	午後	723830	4719(3244,1475)	2827852	3604.06
T	木曜午前	80847	3063(1581,1482)	306626	752.94
F	午後	815102	4724(3242,1482)	3164290	3602.20
T	金曜午前	77837	2861(1379,1482)	296246	157.84
F	午後	1089430	5587(4109,1478)	4247281	3601.06
T	土曜午前	17765	2647(1203,1444)	58019	17.58
T	午後	23920	2561(1079,1482)	72808	164.11

※最適解の列について：最適解が求められたものは「T」，
求められなかったものは「F」と表記している．

4　先行研究の問題点

本研究を始めるにあたり，先行研究の検証を行った．その結果，先行研究には以下のような問題点があることがわかった．

- 問題点 1：考慮制約 2「移動時間は指定した時間以内であることが好ましい」を表現する制約式に誤りがある．

  考慮制約 2 を表す式（3.8）においては，左辺に使われている添字が p, i_1, i_2 であるのに対し，右辺に使われてる添字は j_1, j_2 である．すなわち，左辺と右辺が関連性のない式になっており，この制約式は誤りである．

- 問題点 2：変数が多い．
  先行研究のモデルには，多くの変数が存在している．例えば，以下の変数 w_{p,i_1,i_2} である（再掲）：

$$w_{p,i_1,i_2} \quad = \quad \begin{cases} 1, & p\text{ 限目に教室 } i_1 \text{ で授業が開講され,} \\ & (p+1)\text{ 限目に教室 } i_2 \text{ で授業が開講されるとき} \\ 0, & \text{それ以外} \end{cases}$$

  この変数 w_{p,i_1,i_2} は 3 つの添字を持つ．すなわち，この変数 w_{p,i_1,i_2} は，直積集合 $P\times I\times I$ の上で展開されるため，変数の数が非常に多くなる．その結果，計算時間も非常に大きくなっているものと考えられる．

- 問題点 3：考慮制約 3「教室内の人が入れ替わる際の混雑ができるだけ発生しないほうが好ましい」を表現する制約式の構造が非常に複雑で，計算に時間がかかっていると思われる．また，この制約式には誤りもある．

  考慮制約 3 を表す式（3.9）は非常に複雑な構造になっていて，計算に非常に時間を要してしまうものと考えられる．

  さらに，この制約式には誤りがある．以下にその誤りを示す．

  - 項 $(n_j - q_{j,j_2} \cdot d_{j,j_2})$

    この項では，授業 j を p 限に受講している人数から，$(p+1)$ 限に授業 j_2 を受講している学生の人数を減じることで，授業 j_2 を受講せずに退室している学生の人

数を示そうとしている．しかし，この成分には教室を表す添字 i が含まれていない．従って，授業 j と j_2 が開講されている教室が同じ場合，この項の対象であるということが表現できていない．

– 項 $(q_{j_1,j_2} \cdot d_{j_1,j_2} \cdot f_{i_2,i_1})$

　この項では，$(p+1)$ 限に教室 i_1 で開講される授業 j_2 を受講するために，p 限に授業 j_1 が開講されている教室 i_2 から移動する人がいる場合，その移動時間が混雑の起きうる移動時間を超えるなら，その移動人数は混雑の要因にならないということを示そうとしている．先行研究では，指定した時間以内に移動できる全ての教室から移動する学生を混雑の対象として考えている．しかし，この項では特定の 1 つの教室しか対象にすることができないので，先行研究での意図とは一致していない．

– 項 $(u_{i_1,j} + u_{i_1,j_2} + u_{i_2,j_1} - 2) \cdot d_{j_1,j_2}$

　この項では，この制約に関連する授業が，同じ教室で連続して開講されているかを示している．本来考慮制約 3 において対象としたい移動は，図 3.1 のように，指定した移動時間以内に移動できる教室を全てである．そのような教室を対象とする場合，指定した移動時間以内に移動できる教室の数だけ変数 $u_{i,j}$ を増やさなければならない．しかし，この項では，図 4.1 のように，特定の 1 つの教室に関してしか対応できていない．

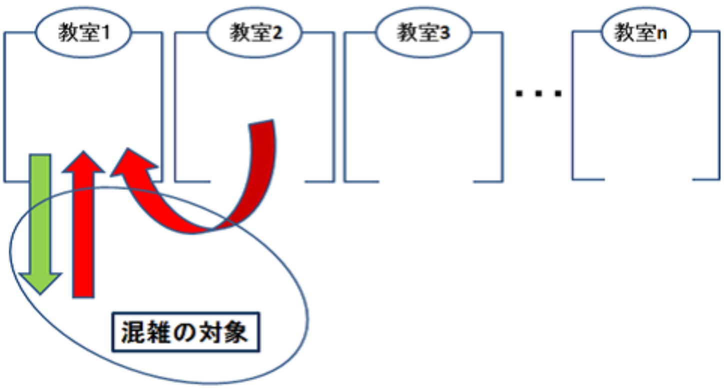


図 4.1: 混雑の対象

- 問題点 4：第 4 学舎の全ての教室には対応できていない．

　先行研究で用いているデータは，表 3.1 のように，第 4 学舎の一般教室である 39 教室に対応している．しかし，第 4 学舎の全ての教室には対応できていないため，デー

タによっては実行可能解を得ることができない可能性がある．また，OD 教室のような特殊教室で開講される授業を除いていることも問題である．

- 問題点 5：授業の扱い方に誤りがある．

  授業の中には，1 つの授業で複数曜限に渡って開講される授業がある．先行研究では，そのような授業も，1 曜限の授業として扱っているという誤りがあった（表 4.1）．また，授業の中には，複数の教員が複数の教室に分かれて開講しているものがある．先行研究では，そのような授業も 1 つの教室で開講しているように扱うという誤りもあった．そのため，使用教室数が実際よりも少なくなっている可能性がある．また，複数の教室に分かれるはずの学生が 1 つの教室に集まる扱いになるので，収容人数の多い教室に授業が集中してしまう可能性もある．さらに，特殊教室で開講される授業を計算対象から除いていることも問題である．

表 4.1: 授業の扱いの例

授業番号	本来の開講曜限	先行研究での開講曜限
60247	金曜 1，2 限	金曜 1 限
60272	火曜 1 限，金曜 1 限	火曜 1 限

- 問題点 6：厳密解が得られていない．

  先行研究では，前章で示したモデルを用いて最適化計算を行っているが，24 通りのデータのうち 6 通りに対してしか厳密解を得ることができていない（表 3.3）．なお，厳密解を得られた 6 通りのうち 4 通りは，授業数の少ない土曜日のデータでの解であった．

5　本研究における教室割当問題

5.1　先行研究からの改良点と本研究の目標

先行研究では，移動時間の最小値を求める際，目的関数に移動時間を含め，最小化することで解を求めようとしている．しかし，4章で述べたように，その方法では計算に時間を要し，最適解を求めることができないケースが多くあった．そこで本研究では，先行研究とは異なる考え方をすることでよい教室割当求めることができる方法がないかどうかを考察した．

先行研究では，全学生の移動時間の総和を最小化する教室割当を行っていた．これに対し，本研究では，全学生の最大の移動時間を最小化することにする．すなわち，本研究では教室割当問題を次のように定義し，これを定式化して，求解する．

各授業の開講曜限が定められているとき，各休み時間における学生の 最大の移動時間を最小化するような，授業に対する教室の割当を求めよ．

本研究では，この問題の最適解を求めるためのアプローチとして，最適化問題の中に移動時間の上限を定めるパラメータを用意する．そして，そのパラメータを調整しながら問題を解き，実行可能解が得られるパラメータの最小値を求める．これが，最大の移動時間の最小化となる．

なお，本研究では，最適化対象については先行研究と同様の考え方をしている．すなわち，1日を午前・午後に分け，1週間が月曜から土曜の6日，そして1年が春・秋の2学期に分けた，合計24通りの最適化を行っている．

5.2　問題の定式化

本研究では，以下のように教室割当問題を定式化して最適化を行っている．制約式には先行研究からの変更点も記す．

- 集合と添字・パラメータ・変数
  - 集合・添字

$p \in P$ ： 時限とその集合

$p' \in P'$ ：最終時限を除いた時限とその集合

$j \in J$ ： 授業とその集合

$j \in JN_p$ ： p 限目に開講される授業とその集合

$j \in NJ$ ：一般授業とその集合

$j \in SJ$ ：特殊教室を指定する授業とその集合

$i \in I$ ： 教室とその集合

$i \in SI$ ： 特殊教室とその集合

$(i, j) \in D$ ： 特定の教室を指定する授業の組とその集合

$j \in L$ ： 特別連続授業とその集合

$j' \in J'$ ：教室希望のある授業とその集合

$i' \in I'_{j'}$ ：授業 j' が開講を希望する教室とその集合

$pc \in PC$ ：考慮制約の番号とその集合

$pa \in PA$ ：考慮制約の重みとその集合

– パラメータ

$$
\begin{aligned}
m_i &= \text{教室 } i \text{ の定員数} \\
n_j &= \text{授業 } j \text{ の受講者数} \\
t_{i_1,i_2} &= \text{教室 } i_1 \text{ と教室 } i_2 \text{ 間での所要移動時間} \\
q_{i_1,i_2} &= \text{授業 } i_1 \text{ と授業 } i_2 \text{ の双方を受講する学生数} \\
r &= \text{全ての移動で守る移動時間} \\
z &= \text{混雑が起きると予測される人数} \\
d_{j_1,j_2} &= \begin{cases} 1, & p \text{ 限目に授業 } j_1 \text{ を，} (p+1) \text{ 限目に授業 } j_2 \text{ を受講する学生が存在するとき} \\ 0, & \text{それ以外} \end{cases}
\end{aligned}
$$

– 変数

$$
u_{i,j} = \begin{cases} 1, & \text{教室 } i \text{ に授業 } j \text{ が割り当てられているとき} \\ 0, & \text{それ以外} \end{cases}
$$

$$
\alpha_{j_1,j_2} = \begin{cases} 1, & p \text{ 限目に授業 } j_1 \text{ を受講していて，} (p+1) \text{ 限目に授業 } j_2 \text{ を受講せずに} \\ & \text{退室する学生集団と，} p \text{ 限目に授業 } j_1 \text{ を受講しておらず，かつ} \\ & (p+1) \text{ 限目に授業 } j_2 \text{ を受講するために入室する学生集団の} \\ & \text{合計人数が } z \text{ 人を超えて，混雑が起きる可能性が高いとき} \\ 0, & \text{それ以外} \end{cases}
$$

- 制約条件
  - 絶対制約
    - [絶対制約 1]：**1 つの曜限における各教室には 2 つ以上の授業を割り当てられない．**

      同じ曜限において，各教室に 2 つ以上の授業が割り当てられないようにするため，教室 i について，次の制約を与える：

$$\sum_{j \in JN_p} u_{i,j} \leq 1 \qquad (\forall p \in P,\ \forall i \in I) \tag{5.1}$$

      この制約は，先行研究の絶対制約 1「1 つの曜限における各教室には 2 つ以上の授業を割り当てられない」を改良した制約式である．先行研究では，時限 p 時に授業 j が割り当てられているときに 1 となるパラメータ $e_{p,j}$ を用意している．対して本研究では，授業 j に時限の要素も組み込んだ JN_p という集合を用いることで，同じ意味の制約としている [1]．

    - [絶対制約 2]：**各授業には必ず 1 つの教室を割り当てなければならない．**

      ある曜限に存在する 1 つの授業に対して 2 つ以上の教室を割り当てないようにするため，また，1 つの授業に 1 つも教室が割り当てられないことを防ぐため，授業 j について，次の制約を与える：

$$\sum_{i \in I} u_{i,j} = 1 \qquad (\forall p \in P,\ \forall j \in JN_p) \tag{5.2}$$

      この制約は先行研究と同じ制約式を用いている．

    - [絶対制約 3]：**受講人数が教室の定員を超えて教室に授業を割り当ててはいけない．**

      受講人数が各教室の定員を越えないようにするため，次の制約を与える：

$$\sum_{i \in I} u_{i,j} \cdot m_i \geq n_j \qquad (\forall p \in P,\ \forall j \in JN_p) \tag{5.3}$$

      この制約は先行研究と同じ制約式を用いている．

[1] 本研究の制約式では，授業は全て JN_p を用いている．これにより先行研究の j の集合は全て P, JN_P の集合となっている．

* **[絶対制約 4]：特定の授業は指定された教室で開講されなければならない．**

　本制約は，特定の設備を必要とする授業にその設備が整った指定されている教室を割り当てるための制約である．教室 i に授業 j が割り当てられなければならないとき，次の制約を与える：

$$u_{i,j} = 1 \qquad (\forall (i,j) \in D) \tag{5.4}$$

この制約は先行研究と同じ制約式を用いている．

* **[絶対制約 4_2]：指定された授業でないものは特殊教室で開講されてはいけない．**

　特殊教室で一般的な授業を行うことは好ましくない．本制約は，一般的な授業に特殊教室を割り当てることを避けるための制約である．特殊教室 i を一般的な授業 j に割り当ててはいけないとき，次の制約を与える：

$$u_{i,j} = 0 \qquad (\forall p \in P,\ \forall j \in JN_p \setminus SJ,\ \forall i \in SI) \tag{5.5}$$

この制約は，特殊教室，及び特殊授業を扱うために本研究において新しく追加した制約式である．

* **[絶対制約 5]：移動時間は指定した時間以内でなければならない．**

　関西大学の休み時間は 10 分と非常に短い．本制約は，休み時間を移動以外のことに費やせるように，移動時間を制限するための制約である．

$$u_{i_1,j_1} + u_{i_2,j_2} \leq 1 \tag{5.6}$$
$$(\forall p \in P,\ \forall i_1 \in I,\ \forall i_2 \in I,\ \forall j_1 \in JN_p,\ \forall j_2 \in JN_{p+1},\ t_{i1,i2} \geq r,\ d_{j1,j2} = 1)$$

この制約は，先行研究の考慮制約 2「移動時間は指定した時間以内であることが好ましい」を改良したものである．先行研究では，一定以上の休み時間を確保できない学生が存在する可能性がある．本研究では，この制約を絶対制約にすることで全学生の移動時間を一定以下に制限し，全学生に一定時間以上の休み時間を確保している．

　この改良により，前章の問題点 1『考慮制約 2「移動時間は指定した時間以内であることが好ましい」の制約式に誤りがある』を解消している．またこの制約式は，3 つの添字を持つ変数 w_{p,i_1,i_2} を用いず，他の制約式でも用いているパラメータ d_{j_1,j_2} を用いている．さらに，2 つの添字を持つ変数 β_{j_1,j_2} も用いていない．これらのことより，前章の問題点 2「変数が多い」も解消している．

* [絶対制約 6]：特別連続授業は同じ教室で開講されなければならない.

  特別連続授業（授業内容が同一，または非常に関連性の高い 2 限以上連続で開講される授業）は双方を受講している学生が多い．従って，特別連続授業同一の教室で開講されるべきである．本制約は，特別連続授業を同一教室で行うための制約である．

$$u_{i_1,j_1} = u_{i_2,j_2} \quad (i \in I,\ (j_1, j_2) \in L) \tag{5.7}$$

  この制約は，先行研究の考慮制約 1「特別連続授業は同じ教室で開講されることが好ましい」を改良したものである．本研究では，この制約を絶対制約にすることで，大勢の学生が移動する可能性を低くしている．また，この制約は，先行研究の考慮制約 1「特別連続授業は同じ教室で開講されることが好ましい」で用いられている変数 α_{j_1,j_2} を用いずに定式化している．従って，これは前章の問題点 2「変数が多い」を解消している．

– 考慮制約

* [考慮制約 1]：教室内の人が入れ替わる際の混雑ができるだけ発生しないほうが好ましい.

  昼休みを除く各時限間の教室では，移動して教室に入ってくる学生と，授業が終わって教室から出て行く学生によって混雑が起きる可能性がある．しかし，混雑は移動時間の増加につながるため，できるだけ避けたいことである．本制約は，授業間移動によって発生する混雑による移動時間の増加を，できるだけ避けるための制約である．

$$\begin{aligned} &(u_{i,j_1} + u_{i,j_2} - 1) \leq \alpha_{j_1,j_2} \\ &(\forall p' \in P',\ \forall j_1 \in JN_{p'},\ \forall j_2 \in JN_{p'+1}, \\ &\qquad\qquad (n_{j_1} - q_{j_1,j_2}) + (n_{j_2} - q_{j_1,j_2})) - z > 0,\ d_{j_1,j_2} = 1) \end{aligned} \tag{5.8}$$

$$k_1 = \sum_{p' \in P'} \sum_{j_1 \in JN_{p'}} \sum_{j_2 \_ \in JN_{p'}} \alpha_{j_1,j_2} \tag{5.9}$$

  この制約は，先行研究の考慮制約 3「教室内の人が入れ替わる際の混雑ができるだけ発生しないほうが好ましい」を改良した制約である．混雑のタイミングは，対象教室の授業が延長されたり，遠くの教室の授業が早く終了するなど，様々な要因があるため，予測することは非常に難しい．そのため，本研究では，図 5.1 のように，混雑の原因となる人数は，対象教室を出入りす

る全ての学生の合計としている．

（5.8）,（5.9）では，移動人数が混雑が発生すると考えられる人数である z 人を越えると，条件を違反した指標 α_{j_1,j_2} が 1 となり，その合計が違反点数 k_1 となる．

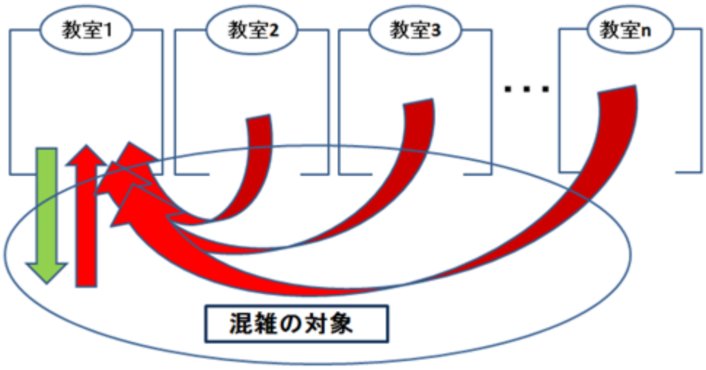


図 5.1: 本研究における混雑の対象

この考え方より，この制約は「対象教室で起こり得る最大の混雑を抑える」ということを示している．この改良によって，制約式の構造を簡素化することができ，前章の問題点 3『考慮制約 3「教室内の人が入れ替わる際の混雑ができるだけ発生しないほうが好ましい」の構造が非常に複雑で，計算に時間がかかっている．また，この制約式に誤りがある』を解消している．また，この制約式は 3 つの添字を持つ変数 $\delta_{j,\,j_1,\,j_2}$ から，2 つの添字を持つ変数 α_{j_1,j_2} に変更している．これにより，前章の問題点 2「変数が多い」を解消していることがわかる．この変更により，計算時間を短縮できることが期待できる．

∗ **[考慮制約 2]：希望教室があれば，その教室で授業を開講したい．**

学生や教員には，何らかの理由（研究室が近いなど）で授業を開講してほしい教室があると思われる．本制約は，できるだけ希望した教室で授業を開講するための制約である．

$$k_2 = \sum_{j' \in J'} \sum_{i' \in I'_{j'}} u_{i',j'} \tag{5.10}$$

この制約は，希望教室で授業を開講するために，本研究で新しく追加した制約である．本制約では，ひとつの授業で複数の教室を希望することができる．しかし，同じ曜限で同じ教室を希望する授業が複数あった場合や，ひとつの授業で複数の希望教室がある場合，または教室希望を叶えると他の教室の割

当が不可能になってしまう場合，絶対制約を満たすことができず，解を求められない．本制約はそのような場合に対応するため，考慮制約となっている．

- 目的関数
  目的関数は，考慮制約 1 を満たせていない場合に発生する違反指標の合計 k_1 と，考慮制約 2 を満たせた場合の指標の合計 k_2 に，それぞれ重み pa_1，pa_2 を乗じたものの合計値を最小化するように定める．ただし，k_2 については制約を満たした場合に指標が発生するので，重み pa_2 は必ず負の値でなければならない．

$$\text{minimize} \quad \sum_{pc \in PC} (pa_{pc} \cdot k_{pc}) \tag{5.11}$$

  本問題では，全学生の移動時間に上限を設けている．そのため，各学生の移動時間の総和を最小化する事は行わない．その結果，本問題では目的関数に v_{i_1,i_2} を含んでいない．これにより，前章の問題点 2「変数が多い」を解消している．

この問題を解くことは，学生全員が r 秒以下で移動できるような教室割当問題を解くということと同意である．r を変化させることで，学生の最大の移動時間が変化する．従って，r を小さくしていくことで，学生の最大の移動時間の最小値を求めることができる．本研究では，この解を求めることが，教室割当問題の解を求めることであると考えている．

5.3 使用教室と対象授業

本研究では以下のデータを使って最適化を行っている．

- 使用教室
  本研究では，第 4 学舎の一般教室である 44 教室（表 5.1）と，OD 教室などの特殊教室である 23 教室（表 A.1）の合計 67 教室を計算対象としている．これより，前章の問題点 4「第 4 学舎の全ての教室に対応できていない」を解消し，第 4 学舎で開講される全ての授業に対応することができている．
  なお，本研究で扱っている特殊教室を付録 A.2 の表 A.1 に示す．また，教室間の移動時間であるパラメータ t_{i_1,i_2} は，表 A.2 のように定めている．

- 対象授業
  理工系学部で開講される全授業を授業番号によって扱っている．また，本研究では，特殊教室で行われる授業も同様に扱っている．

  授業の中には，1 つの授業であるにも関わらず，複数の曜限で開講しているものがある．本研究では，各授業の授業番号に学期・曜限の情報を付加させ，授業を分割する

表 5.1: 本研究で扱っている一般教室

1 階	2 階	3 階	4 階	その他
4-101	4-201A	4-301	4-401	*4-501
4-102	*4-201B	4-302	4-402	4-502
4-103	4-202	4-303	4-403	4-3101
4-104	4-203	4-304	4-404	4-3201
4-105	4-204	4-305	4-405	4-3202
4-106	4-205	4-306	4-406	*4-3401
4-107	4-206	4-307	4-407	*4-3402
	4-207	4-308	4-408	*4-3403
	4-208			4-4A
	4-209			4-4B
	4-210			

*：本研究で追加した教室

ことで，このような授業に対応している．さらに，複数の教員が複数の教室を使用して開講している授業が存在している．しかし，この授業は，絶対制約 1「1 つの曜限における各教室には 2 つ以上の授業を割り当てられない」を守ることができない．そこで，本研究では，**「複数の教員が担当し，かつ複数の教室を扱っているとき，教員と教室の少ない方の数だけ授業を分割する」**ということを行っている．これにより，本研究では，ひとつの授業を「授業番号_学期・曜限_分割番号」と表示している．それぞれの要素は，表 5.2 のように構成される．

表 5.2: 授業の扱い方

授業番号	授業に割り当てられている番号
学期	o：春学期に開講 x：秋学期に開講
曜日	月曜から土曜までそれぞれ「Mo,Tu,We,Th,Fr,Sa」
時限	開講される時限
分割番号	授業を分割した時，分割したことを示すための番号

分割番号は，分割した分だけ数値が示している．例えば，3 つに分割されてる授業は，分割番号が 1, 2, 3 となっている授業がそれぞれ存在しているということである．その際，履修人数，及び移動人数は分割した数だけ等分されている．以下に授業の例を示す．

- 授業番号 00561（春学期の月曜 2 限に開講，担当教員 1 人，使用教室 1 つ）
  これは，最も一般的な授業の形式である.「**00561_oMo2_1**」と示す.
- 授業番号 65392（春学期の月曜 3, 4, 5 限に開講，担当教員 1 人，使用教室 1 つ）
  この授業は連続授業である．3, 4, 5 限にそれぞれ対応すると,「**65392_oMo3_1, 65392_oMo4_1, 65392_oMo5_1**」となる.
- 授業番号 65180（春学期の月曜 2 限に開講，担当教員 2 人，使用教室 2 つ）
  この授業は複数の教員が担当し，複数の教室を使って開講している．この授業の場合，教員と教室の数が共に 2 つなので，授業は 2 つに分割される．よって，この授業は,「**65180_oMo2_1, 65180_oMo2_2**」となる.
- 授業番号 60273（春学期の火曜 1 限，金曜 1 限に開講，担当教員 1 人，使用教室 1 つ）
  この授業は，複数の曜限で開講されている．それぞれの曜限に対応すると，「**60273_oTu1_1, 60273_oFr1_1**」となる.
- 授業番号 65186（春学期の月曜 3 限，金曜 2 限に開講，担当教員 3 人，使用教室 3 つ）
  まず，この授業は複数の教員と複数の教室がある．この授業の場合，教員と教室の数が共に 3 つなので，授業は 3 つに分割される．また，複数の曜限で開講されているので，それぞれに対応すると,「**62227_oMo3_1, 62227_oMo3_2, 62227_oMo3_3, 62227_oFr2_1, 62227_oFr2_2, 62227_oFr2_3**」となる.

この処理により，前章の問題点 5「授業の取り扱いに誤りがある」を解消している.

表 5.3 に，本研究で扱う各曜限の授業数を示す.

表 5.3: 各学期曜限の授業数

	春学期午前		春学期午後			秋学期午前		秋学期午後		
曜日	1 限	2 限	3 限	4 限	5 限	1 限	2 限	3 限	4 限	5 限
月曜	21	36	45	32	25	24	30	38	33	18
火曜	35	39	33	34	24	25	37	35	31	20
水曜	22	34	34	26	14	24	32	36	28	13
木曜	20	23	21	25	24	17	34	36	29	24
金曜	25	35	39	38	21	18	35	44	33	21
土曜	11	18	16	11	5	12	19	16	13	4

6　数値実験

本章では，本研究で作成した数理計画モデルと，実際に使用している関西大学の理工系全学部の時間割を用いて，様々な教室割当を行った実験内容と結果について述べる．

本研究では，以下の実験を行った．

- 予備実験 1： サンプルデータを用いた，各制約式が正しく機能するかを確かめる実験
- 予備実験 2：春学期火曜午前のデータを用いた，移動時間の制限を 300 秒とする確認実験
- 本実験 1：移動時間の制限を小さくしていき，最大移動時間の最小値を求める実験
- 本実験 2 : 本実験 1 において最大移動時間が大きいデータから原因の授業を取り除いた実験
- 本実験 3：考慮制約 2 の希望教室を設定した春学期火曜午前のデータを用いた実験

なお，本研究では，全ての実験においてパラメータ $pa_1 = 1$，$pa_2 = -1$，$z = 100$ を与えている．

6.1　計算環境

本研究では，先行研究と同様に，最適化ソルバー IBM ILOG CPLEX の分枝限定法を用いて求解を行っている．表 6.1 は，本研究で用いた計算環境を示している．

表 6.1: 計算環境

OS	Microsoft Windows 7 Home Premium Service Pack 1
CPU	Intel(R) Core(TM) i5-2520M CPU @ 2.50GHz
メモリ	8.0 GB
ソルバー 1	GLPK 4.47
ソルバー 2	IBM ILOG CPLEX 12.5.0.0

6.2　予備実験

6.2.1　予備実験 1：各制約式が正しいく機能するかを確かめる実験

予備実験 1 は，ごく小さな規模のサンプルデータを用いた数値計算である．予備実験 1 の目的は，モデルファイルが意図した形で展開され，制約を満たす解が得られるかどうかを確かめることである．

表 6.2〜表 6.6 は，使用したサンプルデータの内容を示している．

表 6.2: サンプルデータ：教室毎の定員

教室	101	102	103	104	105	106	107
定員	150	150	180	100	180	180	100

表 6.3: サンプルデータ：授業と受講者数

開講時限	1				2					
授業	1001	1002	1003	1004	1005	1006	1007	1008	1009	1010
受講者	150	40	80	120	150	150	80	120	100	80

表 6.4: サンプルデータ：パラメータ q_{i_1,i_2}

移動前の授業	移動先の授業	移動する人数
1001	1005	20
	1006	10
	1007	30
1002	1005	10
	1006	10
	1007	20
1003	1005	30
	1006	30
1004	1008	120

※値が 0 であるものは省略している

表 6.5: サンプルデータ：教室間の移動時間（秒）

教室	101	102	103	104	105	106	107
101	0	15	30	45	75	90	105
102	15	0	15	30	60	75	90
103	30	15	0	15	45	60	75
104	45	30	15	0	30	45	60
105	75	60	45	30	0	15	30
106	90	75	60	45	15	0	15
107	105	90	75	60	30	15	0

表 6.6: サンプルデータ：その他の設定

教室指定	(101,1001),(101,1005),(107,1010)
特別連続授業	(1004,1008)
希望教室	(101,1002),(102,1002)
	(105,1003),(106,1003)

ここでは，以下の 2 つの実験を行った．

- 予備実験 1-1
  教室 103 を特殊教室に指定して実験を行った．この実験では，教室 103 に授業は割り当てられない設定になっている．

- 予備実験 1-2
  教室 107 を特殊教室に指定して実験を行った．この実験では，教室 103 にも授業が割り当てられる設定になっている．

予備実験 1 では，移動時間の上限 r を 70 秒から 5 秒ごとに小さくしながら実験を行った．表 6.7，表 6.8 に，予備実験 1 の結果を示す．

表 6.7: 予備実験 1-1 の結果

移動時間		1 限				2 限					
70	授業	1001	1002	1003	1004	1005	1006	1007	1009	1008	1010
	教室	101	102	105	106	101	102	104	105	106	107
65	授業	1001	1002	1003	1004	1005	1006	1007	1009	1008	1010
	教室	101	102	105	106	101	102	104	105	106	107
60	授業	1001	1003	1002	1004	1005	1006	1007	1009	1008	1010
	教室	101	102	104	106	101	102	104	105	106	107
55	授業	1001	1003	1002	1004	1005	1006	1007	1009	1008	1010
	教室	101	102	104	106	101	102	104	105	106	107
50	授業	1001	1003	1002	1004	1005	1006	1007	1009	1008	1010
	教室	101	102	104	106	101	102	104	105	106	107
45〜	最適解求解不可										

表 6.8: 予備実験 1-2 の結果

移動時間		1 限				2 限					
70	授業	1001	1002	1004	1003	1005	1006	1007	1008	1009	1010
	教室	101	102	105	106	101	103	104	105	106	107
65	授業	1001	1002	1004	1003	1005	1006	1007	1008	1009	1010
	教室	101	102	105	106	101	103	104	105	106	107
60	授業	1001	1002	1003	1004	1005	1009	1006	1007	1008	1010
	教室	101	102	105	106	101	102	103	104	106	107
55	授業	1001	1002	1003	1004	1005	1009	1006	1007	1008	1010
	教室	101	102	105	106	101	102	103	104	106	107
50	授業	1001	1002	1003	1004	1005	1009	1006	1007	1008	1010
	教室	101	102	105	106	101	102	103	104	106	107
45〜	最適解求解不可										

表 6.7，表 6.8 より，教室 103 を特殊教室としている予備実験 1-1 では教室 103 に授業を割り当てず，教室 103 を一般教室とした予備実験 1-2 では，教室 103 に授業を割り当てていることがわかる．また，どちらの実験も移動時間の制限が 45 秒のとき，実行可能解を得られなくなった．従って，どちらの実験も移動時間 50 秒が最小の最大移動時間であることがわ

かる．これらより，どちらの実験も全ての制約が満たされていて，意図した動きをしていることがわかる．

6.2.2　予備実験 2：実データに対する求解時間の確認実験

予備実験 2 は，春学期火曜午前のデータを用いた数値実験である．予備実験 2 の目的は，以下の 3 つである．

- データファイル変換のプログラムが意図した形で動いているか確かめる
- 大規模の問題を解く際に本モデルでバグが発生しないかどうかを確かめる
- 最適解を求める際，具体的にどれほどの時間を要するのかを確かめる

以上のことを調べるために，本研究では 2 つの実験を行った．

- 予備実験 2-1
  全ての制約を考慮に入れた状態で数値実験を行った．なお，3 つの授業に，希望教室として同じ 2 教室を指定している．
- 予備実験 2-2
  希望教室の指定の有無で，求解に要する時間の差を調べるため，希望教室をのぞいて数値実験を行った．

なお，春学期月曜午前のデータには，特殊教室で行わなければならない授業，及び教室指定を行う授業が存在していなかったため，予備実験 2 では春学期火曜午前のデータを用いて実験を行っている．また，予備実験 2 ではどちらも移動時間の制限を 300 秒として実験を行っている．

予備実験 2 を行った結果，どちらの実験でも全ての制約を満たしていることがわかった．また，計算時間は，予備実験 2-1 が 0.20 秒，予備実験 2-2 が 0.16 秒と，実データを用いても短い計算時間で求解できることがわかった．そのため，午前よりもデータ量の大きい午後のデータを用いても，膨大な計算時間にはならないと考えられる．また，希望教室の設定によって，計算時間が長くなることはない，ということが確認できた．

本研究では，この結果を受け，次節に本実験においても時間を制限することなく計算を行うことにした．また，本実験においては，希望教室を用意せずに最適化を行っている．

6.3　本実験

本節では，前節で行った予備実験の結果を基に行った数値実験について説明する．

6.3.1 本実験 1：最大移動時間の最小値を求める実験

本実験 1 は，全実データ（24 種類に分かれたデータ）を用いて，各データにおける最大の移動時間の最小値を求める実験である．本実験 1 の実験順序を説明する．

（1）各データにおける移動時間を制限するパラメータ r を 300 秒から 0 秒まで，10 秒ごとに小さくして最適化を行う．

（2）(1) において，最適解を得たケースのうち，最もパラメータ r の小さい値から，さらに 1 秒ごとに小さくして最適化を行う．

これにより，各データにおける最大の移動時間の最小値を求めることができる．

表 6.9: 本実験 1 の結果

曜限	最大（秒）	平均（秒）	制約	変数	nonzeros	*計算時間（秒）
春学期月曜午前	96	58.3	2569	1854	26538	4.34
午後	251	53.6	3383	2929	19953	0.44
火曜午前	76	39.4	1753	2150	28679	1.04
午後	141	53.8	2321	2420	21858	0.65
水曜午前	58	28.4	1301	1422	19247	2.25
午後	52	18.0	2303	1843	45593	19.41
木曜午前	34	14.1	1054	930	16759	1.53
午後	251	37.3	1239	1520	8582	0.17
金曜午前	103	47.5	2059	1524	18978	0.89
午後	74	20.9	1991	2174	26723	2.01
土曜午前	33	12.6	515	1131	9352	0.27
午後	27	7.3	474	898	11303	1.40
秋学期月曜午前	50	22.4	2614	1844	45661	80.62
午後	67	27.3	1327	1877	18494	3.29
火曜午前	68	32.9	1945	1600	24354	1.42
午後	49	12.5	2005	1822	32710	42.46
水曜午前	57	30.2	2571	1623	33821	2.12
午後	123	43.1	1904	2234	17342	0.56
木曜午前	58	39.4	2236	1402	28246	20.69
午後	60	21.7	2548	2099	44146	60.58
金曜午前	89	45.9	1003	1396	12369	0.56
午後	80	28.4	2571	2396	29883	2.96
土曜午前	34	19.7	168	668	1672	0.30
午後	74	52.7	481	1199	11385	0.13

※本定式化において，変数は全て 0_1 変数である

*：最大の移動時間の最小値を移動時間の上限としている時の計算時間

表 6.9 は，本実験 1 での実験結果である．表 6.9 より，本実験 1 では，全ての曜限において，比較的短い計算時間で最大の移動時間の最小値を求めることができた．また，先行研究の結果（表 3.3）と比べて，制約数は遥かに小さくなっていることがわかる．さらに，変数についても，全ての曜限において，最低でも半分以下になっている．これらの要因によって，本実験 1 では，短い計算時間で解を得ることができたと考えられる．

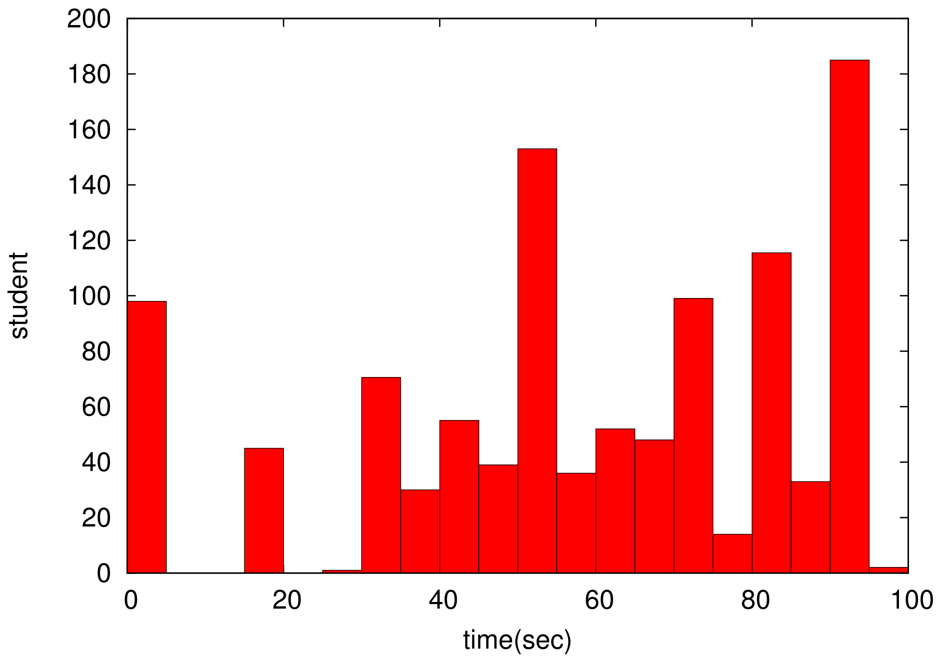


図 6.1: 移動時間ごとの学生数（春学期月曜午前）

図 6.1 は，春学期月曜午前における，移動時間（5 秒ごと）制の学生数を表している．これより，学生の一部は移動時間が大きいが，全体的にはある程度移動時間が短くなるような教室割当が求められていることがわかる．これらのことより，本実験 1 では，期待した実験結果を得ることができたといえる．

6.3.2 本実験 2：移動時間の最小値が大きい授業を取り除いた実験

表 6.9 より，春学期月曜午後，及び春学期木曜午後の最大移動時間の最小値が，他よりもかなり大きいことがわかる．この原因を調べたところ，ある特定の授業の移動時間が大きい，ということがわかった．そこで，本実験 2 として，その授業を除外し，結果がどのように変わるかを調べる実験を行った．

表 6.10: 本実験 2 の結果

曜限	最大（秒）	平均（秒）	制約数	変数の数	nonzeros	計算時間（秒）
春学期月曜午後	68	37.9	2530	2290	30761	13.54
木曜午後	51	15.4	792	910	10088	1.84

表 6.10 は，本実験 2 の実験結果である．表 6.10 より，いずれの曜限における移動時間の最大値とも，本実験 1 におけるその他の曜限の結果に近い値になっており，特定の授業だけが移動に時間を要していたということが確認できた．また，図 6.2 は，春学期月曜午後における本実験 1 と本実験 2 の，移動時間（5 秒ごと）制の学生数のを比較した図である．図 6.2

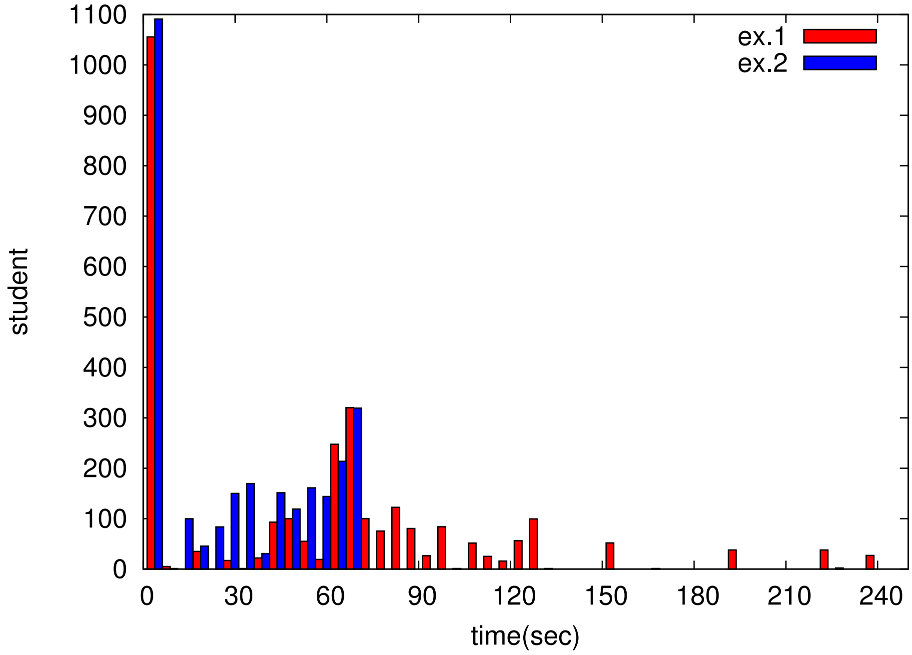


図 6.2: 春学期月曜午後における本実験 1 と本実験 2 の移動時間ごとの学生数の比較

より，特定の授業を除外することで，その他の授業間の移動時間を大幅に短くできていることがわかる．この結果より，移動時間が大きくなりそうな授業の教室割当をあらかじめ決めておき，その後に提案手法により残りの授業の教室割当を決めれば，よい割当が求められることがわかる．

6.3.3 本実験 3：希望教室を設定した実験

本実験 3 は，春学期火曜午前のデータに考慮制約 2 の希望教室を設定して行った実験である．3 つの授業 60190_oTu1_1, 60272_oTu1_1, 60273_oTu1_1 にそれぞれ 2 つの教室 4-101, 4-102 を希望教室として設定している．すなわち，3 つ全ての授業の希望が叶うことはない状況を設定している．

表 6.11: 春学期火曜午前における本実験 1 と本実験 3 の結果の比較

実験	最大（秒）	平均（秒）	制約数	変数の数	nonzeros	計算時間（秒）
本実験 1	76	39.4	1753	2150	28679	1.04
本実験 3	76	47.9	1753	2150	28679	1.73

表 6.11 は，本実験 3 の実験結果である．表 6.11 より，最大の移動時間の最小値は本実験 1 と同じ値であるが，平均移動時間については本実験 1 の結果より 8.5 秒大きくなっていることがわかる．これは，希望教室を叶えることで，最大の移動時間の最小値には影響しないが，移動が発生してしまったと考えられる．図 6.3 は，春学期火曜午前における本実験 1 と

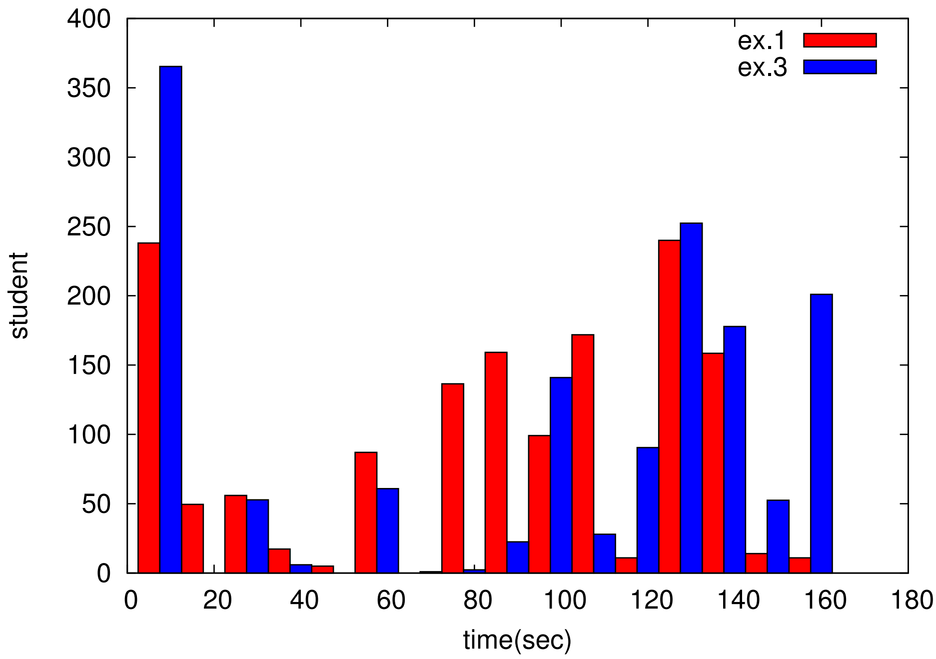


図 6.3: 春学期火曜午前における本実験 1 と本実験 3 の移動時間ごとの学生数の比較

本実験 3 の，移動時間（5 秒ごと）制の学生数のを比較した図である．図 6.3 より，移動時間が 0 秒の学生数も増加しているが，同時に移動時間が大きくなってしまう学生数も増加していることがわかる．また，目的関数の値を確認すると，希望教室を最大限叶えることができていることがわかった．この結果より，事前に希望を調べておき，それをできるだけ叶えるような教室割当が求められることがわかった．

7　おわりに

本研究では，先行研究 [10] の定式化の誤りを正し，また異なる視点から教室割当問題を定式化しそれを最適化ソルバーで解くことで，関西大学の理工系学部で開講されている授業に対する，最大の移動時間を最小化するような教室割当を求めることができた．また，希望教室を設定することで，学生や教員にとって都合のよい教室割当を実現することができることを確認した．さらに，本研究での教室割当問題の定式化は，関西大学理工系に限らず，様々な大学，学部で使用することができるように作成されている．

付録 A の図 A.1～図 A.28 に，全実験における移動時間ごとの学生数を示している．これらを見ると，最大の移動時間を最小化することで全体の移動時間もある程度小さくなっているものの，移動時間ごとの学生数はまばらになっていることがわかる．従って，今後の課題として，最大の移動時間を最小化した上で，移動時間の総和の最小化をすることができるのではないかと考えられる．また，本研究における教室割当においては，本研究で提案した定式化に沿ったデータファイルを作成しなければならない．従って，本研究における教室割当を求める際に用いることのできるインターフェイスを開発することも必要となるだろう．

謝辞

本研究を進めるに当たり，ご指導頂いた檀寛成助教に深く感謝致します．

また，日常の議論を通じて多くの知識や示唆を頂いたシステムモデリング研究室の皆様へ心から感謝の気持ちと御礼を申し上げて，謝辞にかえさせていただきます．

平成 27 年 2 月 13 日

参考文献

[1] R. Fourer, D. M. Gay，B. W. Kernighan, AMPL A Modeling Language for Mathmatical Programming Second Edition, Thomson Learning (2003).

[2] 福島雅夫，数理計画入門，朝倉書店 (1996).

[3] 茨木俊秀，メタヒューリスティクスによる汎用問題解決システムの構築，
平成 13 年度〜平成 15 年度 科学研究費補助金 基盤研究 (B)(2)・研究成果報告書 (2004).

[4] IBM ILOG CPLEX Optimizer,
http://www-01.ibm.com/software/integration/optimization/cplex-optimizer/
（2015 年 2 月 9 日確認）.

[5] 井筒朗，大学における時間割作成問題の汎用ソルバーを用いた求解可能性，関西大学工学部平成 19 年度卒業論文 (2008).

[6] GLPK -GNU Project- Free Software Foundation (FSF),
http://www.gnu.org/software/glpk/ （2015 年 2 月 4 日確認）.

[7] 濱田佑，授業再編を考慮した時間割作成ソフトウェアの開発，関西大学環境都市工学部平成 25 年度卒業論文 (2013).

[8] 久保幹雄，田村明久，松井知己 編集，応用数理計画ハンドブック，朝倉書店 (2002).

[9] 前川廣太郎，澤勢一史，延原肇，教室移動時間最適化のための群集団移動と多重解像ダイクストラ法を取り入れたマルチエージェントシステムと遺伝的アルゴリズムの開発，筑波大学大学院システム情報工学研究科知能機能システム専攻 (2012).

[10] 鈴木健太，移動時間を最小化する教室割当問題の定式化と求解，関西大学環境都市工学部平成 26 年度卒業論文 (2014).

A 付録

A.1 実験に使用したモデルファイル

このモデルファイルは本研究で作成したモデルファイルであり，GLPK を用いて LP 形式に変換するため，GMPL 形式で書いている．そのソースコードを以下に記述する．

```
###############################
#以下,パラメータ・変数の定義#
###############################

set P; #曜限p の集合 P を定義
set P_; #曜限p の集合 P を定義
set J; #授業j の集合 J を定義
set JN{P}; #P 限目の授業
set SJ;
set NJ;
set I; #教室i の集合 I を定義
set SI;
set D dimen 2; #特定の教室を指定する特定の授業の集合D を定義
set L dimen 2; #特別連続授業の集合L を定義
set J_ ; #教室希望を出している授業の集合
set I_{J_}; #授業j_の希望教室の集合

param m {I}; #教室i の定員
param n {J}; #講義j の受講者数
param t {I,I}; #教室i1 から教室 i2 の所要移動時間
param r; #移動時間の限界値
param d {J,J} binary; #p 限目に授業 j1 を,(p+1)限目に授業
   j2 を受講する学生の存在を示すパラメータ d_j1,j2 の定義
param q {J,J}; #p 限目に授業 j1 を,(p+1)限目に授業j2 を受講する学生数
param z; #混雑が起きると予想される人数

var u {I,J} binary; #授業j に教室 i を割り当てる
var alpha {J,J} binary; #考慮制約 1の違反の指標


set PC; #考慮制約の番号
var K {PC}; #各考慮制約の違反指標の合計

#各考慮制約の重みを示すパラメータpa_pc を定義
param pa {PC};


##########################
## 以下,制約条件の定義 ##
##########################

#絶対制約 1(各曜限の各教室に授業はひとつ)

subject to C1{p in P, i in I}:

       sum{j in JN[p]} u[i,j] <= 1;
```

```
#絶対制約2(各授業には教室をひとつ)
 subject to C2{p in P, j in JN[p]}:
        sum{i in I} u[i,j] == 1;
#絶対制約3(教室の定員を守る)
subject to C3{p in P, j in JN[p]}:
        sum{i in I} u[i,j] * m[i] >= n[j];
#絶対制約4(特定の授業は指定した教室で行う)
subject to C4{(i, j) in D}:
        u[i,j] == 1;
#絶対制約4_2(特殊教室で一般授業を行わない)
subject to C4_2{p in P, j in JN[p], i in SI: j not in SJ }:
        u[i,j] == 0;
#絶対制約5(移動時間は指定した時間以内)
subject to C5{p_ in P_, i1 in I,i2 in I,j1 in JN[p_],j2 in JN[p_+1]:t[i1, i2
   ] >= r && d[j1,j2] == 1}:
        u[i1,j1] + u[i2,j2] <= 1;
#絶対制約6(特別連続授業は同じ教室で受講)
subject to C6{i in I,(j1,j2) in L}:
        u[i,j1] == u[i,j2];
#考慮制約1(教室内の人が入れ替わる際の混雑)
subject to C7{p_ in P_,i in I,j1 in JN[p_],j2 in JN[p_+1]: ((n[j1]-q[j1,j2
   ]) + (n[j2]-q[j1,j2])) - z > 0 && d[j1,j2]==1}:
        (u[i,j1] + u[i,j2]-1) <= alpha[j1,j2];
subject to S1 :
       K[1] = sum{p_ in P_,j1 in JN[p_],j2 in JN[p_+1]} alpha[j1,j2];
#考慮制約2(希望教室)
subject to S2 :
        K[2] = sum{j_ in J_,i_ in I_[j_]} u[i_,j_];
#目的関数の定義
minimize func : sum{pc in PC} (pa[pc] * K[pc]);
```

A.2　実験に使用したパラメータ

表 A.1，表 A.2 は，本研究で用いているパラメータである．

表 A.1: 本研究で扱っている特殊教室

特殊教室名	モデル変換名
4-オープンデザイン１教室	4-od1
4-オープンデザイン２教室	4-od2
4-第４学舎情報処理室	4-0001
4-デザインルーム１	4-0002
4-デザインルーム２	4-0003
4-第二製図室	4-0004
4-実験室３（1 号教１Ｆ）	4-0005
4-化学物質実験場（第４実１Ｆ）	4-0006
4-先端実験場（第４実１Ｆ）	4-0007
4-生物工学実験室２（第４実ＢＦ）	4-0008
4-生物工学実験室１（第４実３Ｆ）	4-0009
4-電気工学実験場（第１実３Ｆ）	4-0010
4-物理学実験場（２号実２Ｆ）	4-0011
4-物理共同演習室（２号実ＢＦ）	4-0012
4-共同化学実験場（第２実２Ｆ）	4-0013
4-共同化学実験場（第２実３Ｆ）	4-0014
4-化学工学科実験場（第４実ＢＦ）	4-0015
4-機械共同実験室（第５実１Ｆ）	4-0016
4-電子工学実験室（第５実３Ｆ）	4-0017
4-物理学生実験場（第５実ＢＦ）	4-0018
4-建築実験室（コ・土第６実１Ｆ）	4-0019
4-都市実験実習場（第６実３Ｆ）	4-0020
4-機械実習工場（第６実３Ｆ）	4-0021

表 A.2: 教室間の移動時間（t_{i_1,i_2}）

	101	102	103	104	105	106	107	201A	202	203	204	205	206	207	208	209	210
102	16																
103	18	2															
104	51	35	33														
105	66	50	48	15													
106	78	62	60	27	11												
107	81	65	63	30	14	3											
201A	46	62	64	97	112	123	126										
202	48	64	66	83	73	84	87	39									
203	57	73	68	74	64	75	78	48	9								
204	66	61	59	65	55	66	69	57	18	9							
205	74	53	51	57	47	58	61	65	26	17	8						
206	83	44	42	48	38	49	52	74	35	26	17	9					
207	100	55	53	59	49	60	63	91	52	43	34	25	16				
208	116	71	69	75	65	67	64	107	68	59	50	41	32	16			
209	127	82	80	86	76	56	53	118	79	70	61	52	43	27	11		
210	130	85	83	89	79	53	50	121	82	73	64	55	46	30	14	3	
301	62	78	80	108	98	109	112	52	44	53	62	77	68	84	101	112	115
302	74	90	90	96	86	97	100	64	56	65	74	65	56	72	89	100	103
303	87	79	77	83	73	84	87	77	69	69	60	52	43	59	76	87	90
304	99	67	65	71	61	72	75	89	81	57	48	40	31	47	64	75	78
305	120	76	74	80	70	81	84	110	102	66	57	49	40	56	73	84	87
306	136	92	90	96	86	96	93	126	118	82	73	65	56	72	89	78	75
307	161	117	115	121	111	71	68	151	143	107	98	90	81	97	64	53	50
308	165	121	119	125	115	67	64	155	147	111	102	94	85	101	60	49	46
401	85	101	103	125	115	126	129	75	67	76	102	94	84	101	118	129	132
402	97	109	107	113	103	114	117	87	79	88	90	82	72	89	106	117	120
403	109	97	95	101	91	102	105	99	91	87	78	70	60	77	94	105	108
404	120	86	84	90	80	91	94	110	102	76	67	59	49	66	83	94	97
405	141	94	92	98	88	99	102	131	123	84	75	67	57	74	91	97	95
406	156	109	107	113	103	100	97	146	138	99	90	82	72	89	93	82	79
407	168	121	119	125	115	88	85	158	150	111	102	94	84	101	81	70	67
408	171	124	122	128	118	85	82	161	153	114	105	97	87	104	78	67	64
501	95	111	113	146	161	172	175	93	85	94	103	111	120	136	152	163	166
3101	111	95	93	60	45	34	30	157	118	109	100	91	82	93	141	83	80
3201	140	124	122	89	74	63	59	186	147	138	129	120	111	122	170	112	109
3202	144	128	126	93	78	67	63	190	151	142	133	124	115	126	174	116	113
4A	229	245	247	280	295	306	309	275	277	286	295	303	312	329	345	356	336
4B	215	231	233	266	281	292	295	261	263	272	281	289	298	315	331	342	322
502	130	114	122	128	143	155	158	162	123	114	105	97	88	99	115	126	129
201B	46	62	64	97	112	123	126	2	39	48	57	65	74	91	107	118	121
3401	174	158	166	123	108	97	93	210	181	172	163	154	145	156	204	146	143
3402	179	163	171	128	113	102	98	215	186	177	169	159	150	161	209	151	148
3403	184	188	176	133	118	117	113	220	191	182	173	164	155	166	214	156	153
od1	212	196	194	161	145	134	124	184	145	136	127	119	110	93	76	65	60
od2	130	114	122	128	143	155	158	162	123	114	105	97	88	99	115	126	129
0001	56	72	74	107	122	133	136	15	49	58	67	75	84	101	117	128	131
0002	154	158	146	103	88	87	83	190	161	152	143	134	125	136	184	126	123
0003	152	156	144	101	86	85	81	188	159	150	141	132	123	134	182	124	121
0004	125	109	117	123	138	150	153	157	118	109	100	92	83	94	110	121	124
0005	126	142	144	177	192	203	206	82	119	128	137	145	154	171	187	198	201
0006	185	201	203	236	251	262	265	231	233	242	251	259	298	185	301	312	192
0007	195	211	213	246	261	272	275	241	243	252	261	269	308	195	311	322	202
0008	190	206	208	241	255	267	270	236	238	247	256	264	303	190	306	317	197
0009	195	211	213	246	261	272	275	241	243	252	261	269	308	195	311	322	202
0010	200	216	218	251	266	278	281	246	248	257	266	274	283	300	316	327	330
0011	141	157	159	192	207	219	222	227	189	198	207	215	224	241	257	268	271
0012	100	106	108	151	166	178	181	146	148	157	166	174	183	200	216	227	230
0013	212	228	240	263	278	280	293	258	260	269	278	286	295	312	328	339	342
0014	233	249	261	284	299	301	314	279	281	290	299	307	316	333	349	360	363
0015	205	221	223	256	270	292	285	251	253	262	271	279	318	205	321	332	212
0016	245	261	253	296	311	322	325	291	293	302	311	319	358	245	361	372	252
0017	277	293	285	228	343	354	357	343	345	334	343	352	390	277	393	405	284
0018	265	278	270	213	328	349	342	328	330	329	328	337	375	262	378	390	269
0019	321	337	339	372	387	399	402	367	369	378	387	395	404	421	437	448	451
0020	336	352	354	387	402	414	417	382	384	393	402	410	419	436	452	463	466
0021	326	342	344	377	392	404	407	372	374	383	392	400	409	426	442	453	456

	301	302	303	304	305	306	307	308	401	402	403	404	405	406	407	408	501
302	12																
303	25	13															
304	37	25	12														
305	58	46	33	21													
306	74	62	49	37	16												
307	99	87	74	62	41	25											
308	103	91	78	66	45	29	4										
401	37	49	78	66	75	91	116	120									
402	49	61	66	54	63	79	104	108	12								
403	61	67	54	42	51	67	92	96	24	12							
404	68	56	43	31	40	56	81	85	35	23	11						
405	76	64	51	39	48	64	83	79	56	44	32	21					
406	91	79	66	54	63	79	68	64	71	59	47	36	15				
407	103	91	78	66	75	91	56	52	83	71	59	48	27	12			
408	106	94	81	69	78	94	53	49	86	74	62	51	30	15	3		
501	55	67	80	84	105	121	146	150	32	44	56	67	88	103	115	118	
3101	168	156	143	131	140	156	98	94	170	173	161	150	158	173	115	108	205
3201	197	185	172	160	169	185	127	123	199	202	190	179	187	202	144	137	234
3202	201	189	176	164	173	189	131	127	203	206	194	183	191	206	148	141	238
4A	292	304	324	312	321	337	362	366	299	327	342	331	339	354	366	369	324
4B	278	290	310	298	307	323	348	352	285	313	328	317	325	340	352	355	310
502	106	94	81	69	78	94	119	123	86	74	62	51	30	48	57	60	118
201B	52	64	77	89	110	126	151	155	75	87	99	110	131	146	158	161	93
3401	231	219	206	194	203	219	161	157	233	236	224	213	221	236	178	171	268
3402	236	224	211	199	208	224	166	162	238	241	229	218	226	241	183	176	273
3403	241	229	216	104	213	229	171	167	243	246	234	223	231	246	188	181	278
od1	152	140	127	115	94	77	60	49	112	100	88	76	56	40	31	20	144
od2	106	94	81	69	78	94	119	123	86	74	62	51	30	48	57	60	118
0001	62	74	87	99	120	136	161	165	85	97	109	120	141	156	168	171	103
0002	211	199	186	64	183	199	141	137	213	216	204	193	201	216	158	151	248
0003	209	197	184	62	181	197	139	135	211	214	202	191	199	214	156	149	246
0004	101	89	76	64	73	89	114	118	81	69	57	46	25	43	52	55	113
0005	132	144	157	169	190	806	231	235	255	167	179	190	211	226	238	241	173
0006	248	260	180	268	277	293	318	322	255	283	298	287	295	310	322	325	280
0007	258	250	190	288	287	303	328	332	265	293	308	297	305	320	332	335	290
0008	253	245	185	283	282	298	323	327	260	288	303	292	300	315	327	330	285
0009	258	250	190	288	287	303	328	332	265	293	308	297	305	320	332	335	290
0010	262	274	287	299	320	336	361	365	285	297	309	320	341	356	368	371	295
0011	203	215	228	140	261	277	302	306	226	238	250	261	282	297	309	312	236
0012	162	174	187	199	220	236	261	265	185	197	209	220	241	256	268	271	195
0013	272	286	299	311	332	348	373	377	297	309	321	332	353	368	380	383	307
0014	293	307	320	332	353	369	394	398	318	330	342	353	374	389	401	404	328
0015	268	260	200	298	297	313	338	342	275	303	318	307	315	330	342	345	300
0016	308	320	240	328	337	353	378	382	375	343	358	357	355	370	382	385	340
0017	340	352	262	360	369	384	410	414	407	375	390	389	387	402	414	417	372
0018	315	337	247	345	354	369	395	399	392	360	375	374	372	397	399	402	357
0019	383	395	408	420	441	457	482	486	406	418	430	441	462	477	489	492	416
0020	398	410	423	435	456	472	497	501	421	423	445	456	477	492	504	507	431
0021	388	400	413	425	446	462	487	491	411	413	435	446	467	482	494	497	421

	3101	3201	3202	4A	4B	502	201B	3401	3402	3403	od1	od2	0001	0002	0003	0004	0005
3201	29																
3202	33	4															
4A	340	369	373														
4B	326	355	359	14													
502	188	217	221	369	355												
201B	157	186	190	275	261	123											
3401	63	34	30	403	389	247	220										
3402	68	39	35	408	394	252	225	5									
3403	73	44	40	413	399	257	230	10	5								
od1	214	215	250	395	381	17	145	245	250	255							
od2	188	217	221	369	355	3	123	247	252	257	7						
0001	167	196	200	285	271	133	10	230	235	240	155	133					
0002	43	24	20	383	369	227	210	20	25	15	225	227	200				
0003	41	22	18	381	367	225	208	18	23	13	223	225	198	2			
0004	183	212	216	364	350	6	118	242	247	252	12	8	128	222	220		
0005	237	266	270	149	133	203	80	300	305	310	225	203	90	290	288	195	
0006	296	325	329	44	30	325	231	359	364	369	351	325	241	339	337	320	103
0007	306	335	339	54	40	335	241	369	374	379	361	335	251	349	347	330	113
0008	301	330	334	49	35	330	236	364	369	374	356	330	246	344	342	325	108
0009	306	335	339	24	20	335	241	369	374	379	361	335	251	349	347	330	113
0010	311	340	344	129	115	33	246	374	379	384	412	330	256	354	352	325	326
0011	252	261	285	190	176	271	187	315	320	315	353	271	197	295	293	266	187
0012	211	240	244	29	215	230	146	274	279	284	212	230	156	254	252	225	226
0013	323	352	356	141	127	342	258	386	391	396	424	342	268	366	364	337	338
0014	344	373	377	162	148	363	279	407	412	417	445	363	289	387	385	358	359
0015	316	345	349	64	50	345	251	379	384	389	371	345	261	369	357	340	123
0016	356	385	389	104	90	385	291	419	424	429	411	385	301	399	397	380	163
0017	388	417	421	136	122	417	323	452	456	461	443	417	333	431	439	412	195
0018	373	402	406	121	107	402	308	437	441	446	428	402	318	416	424	397	180
0019	432	461	465	250	236	451	367	495	500	505	533	451	477	475	473	446	447
0020	447	476	480	265	251	466	382	510	515	520	548	466	492	490	488	461	462
0021	437	466	470	255	241	456	372	500	505	510	538	456	482	480	478	451	452

	0006	0007	0008	0009	0010	0011	0012	0013	0014	0015	0016	0017	0018	0019	0020
0007	10														
0008	15	10													
0009	20	24	45												
0010	115	125	120	125											
0011	176	186	181	186	145										
0012	215	225	220	225	165	183									
0013	127	137	132	137	77	152	144								
0014	148	158	153	158	98	183	165	30							
0015	30	25	15	60	135	196	235	147	168						
0016	60	70	75	80	175	296	275	187	208	90					
0017	92	102	107	112	207	208	302	219	240	122	32				
0018	77	87	92	97	192	193	287	204	225	107	17	15			
0019	236	246	241	246	185	280	263	132	153	256	296	328	313		
0020	251	261	256	261	200	295	278	147	148	271	311	343	328	60	
0021	241	251	246	251	190	285	268	137	128	261	301	333	318	50	10

A.3　移動時間ごとの学生数

図 A.1～図 A.29 は，各本実験における最適解での移動時間ごとの学生数の推移を示している．

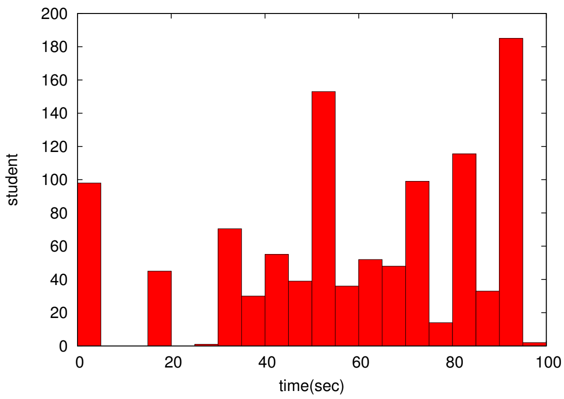


図 A.1: 本実験 1：春学期月曜午前

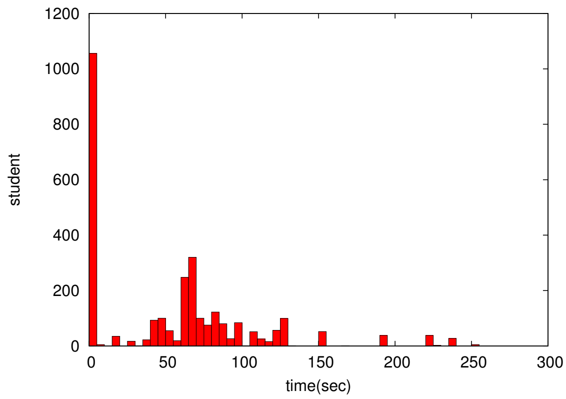


図 A.2: 本実験 1：春学期月曜午後

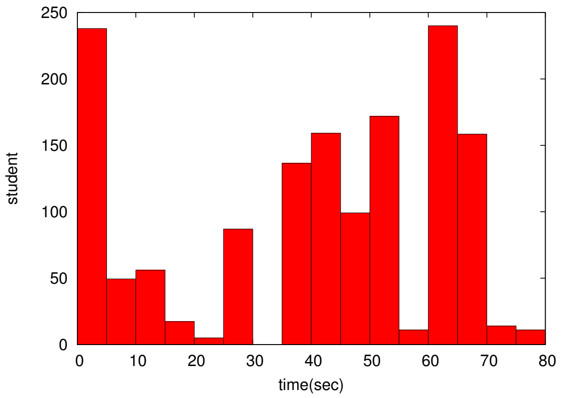


図 A.3: 本実験 1：春学期火曜午前

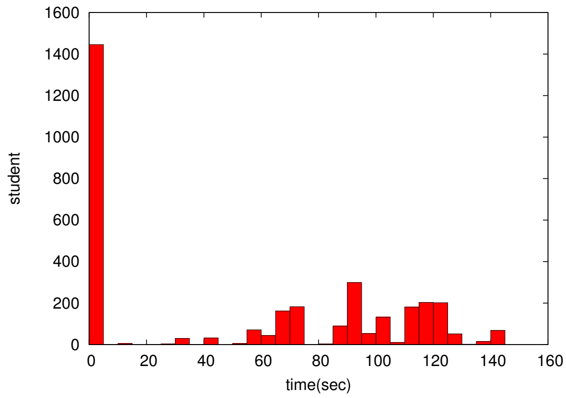


図 A.4: 本実験 1：春学期火曜午後

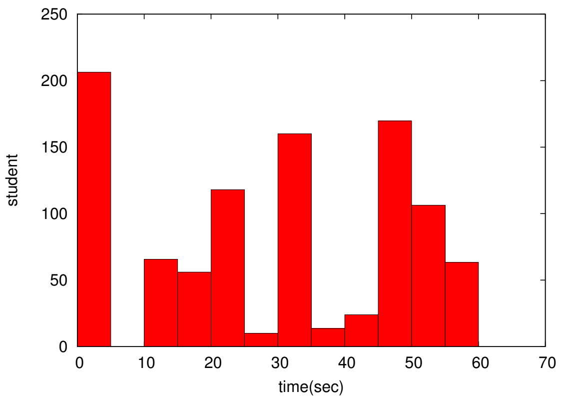


図 A.5: 本実験 1：春学期水曜午前

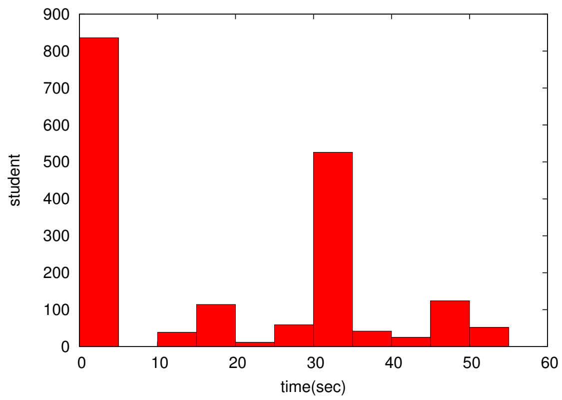


図 A.6: 本実験 1：春学期水曜午後

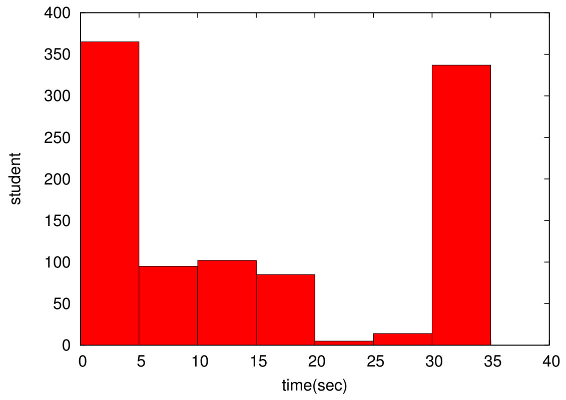


図 A.7: 本実験 1：春学期木曜午前

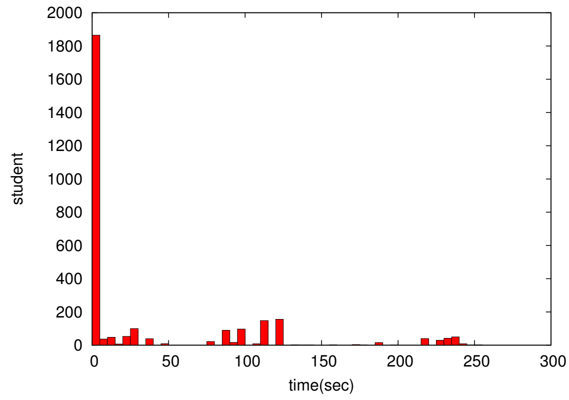


図 A.8: 本実験 1：春学期木曜午後

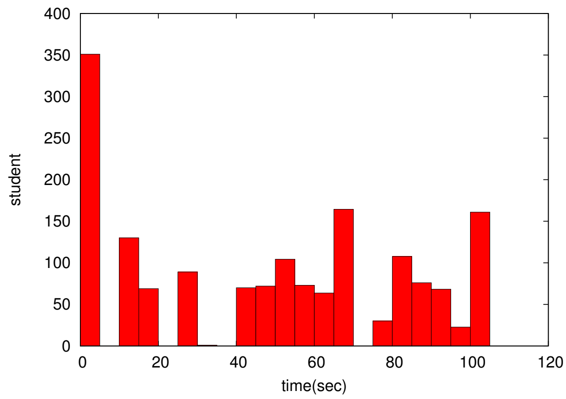


図 A.9: 本実験 1：春学期金曜午前

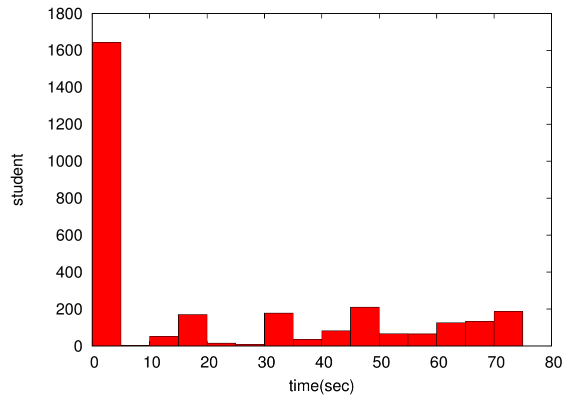


図 A.10: 本実験 1：春学期金曜午後

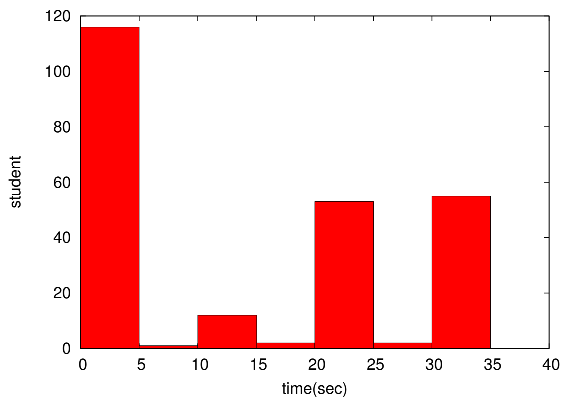


図 A.11: 本実験 1：春学期土曜午前

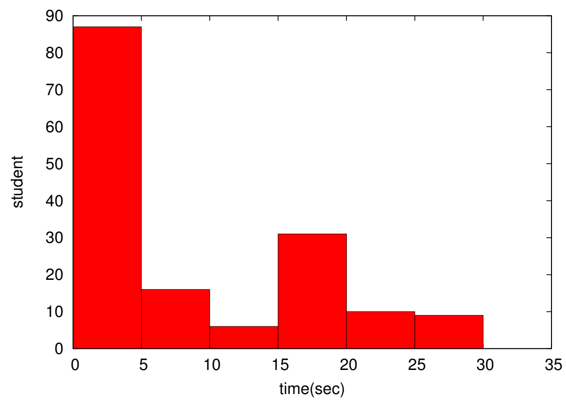


図 A.12: 本実験 1：春学期土曜午後

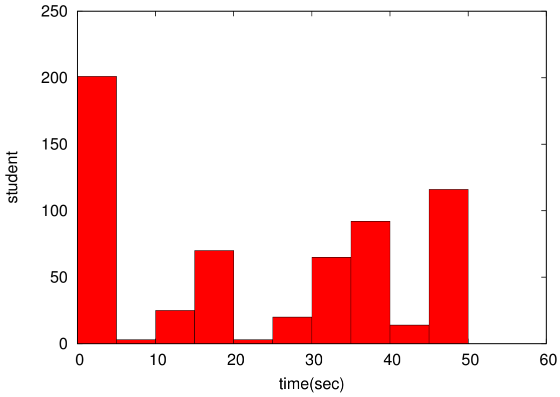


図 A.13: 本実験 1：秋学期月曜午前

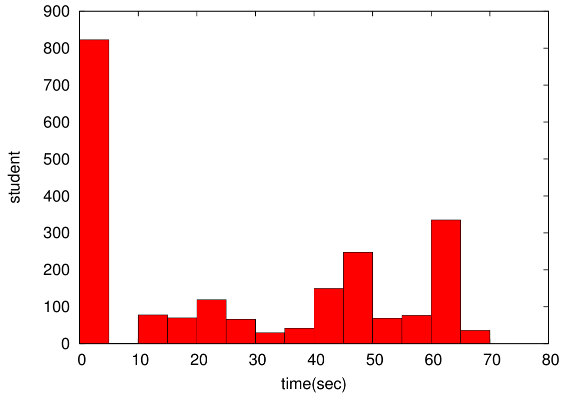


図 A.14: 本実験 1：秋学期月曜午後

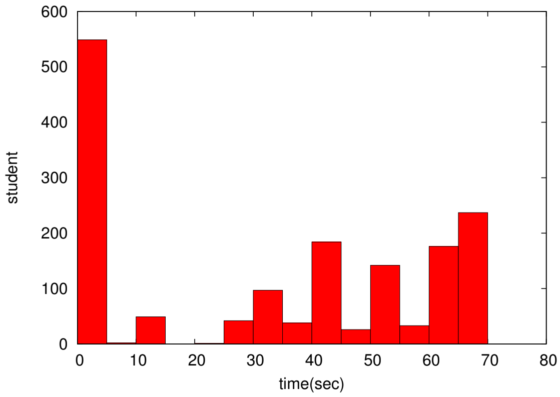


図 A.15: 本実験 1：秋学期火曜午前

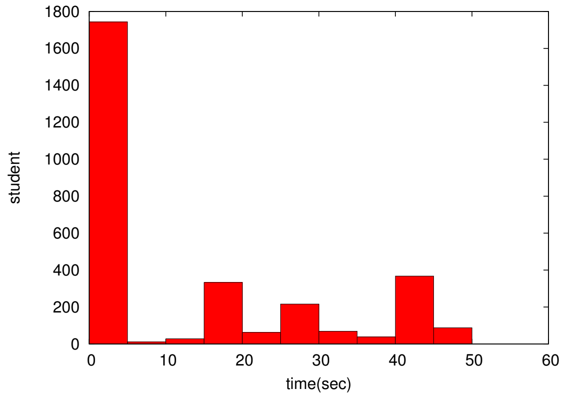


図 A.16: 本実験 1：秋学期火曜午後

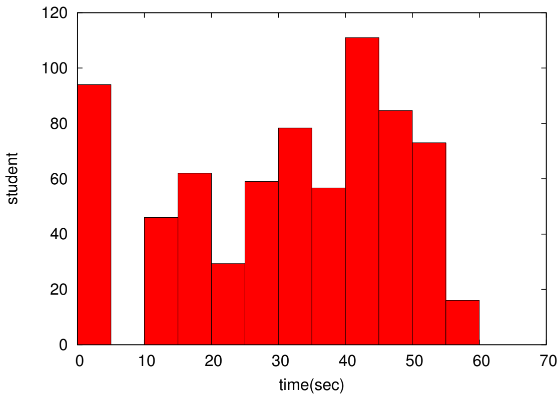


図 A.17: 本実験 1：秋学期水曜午前

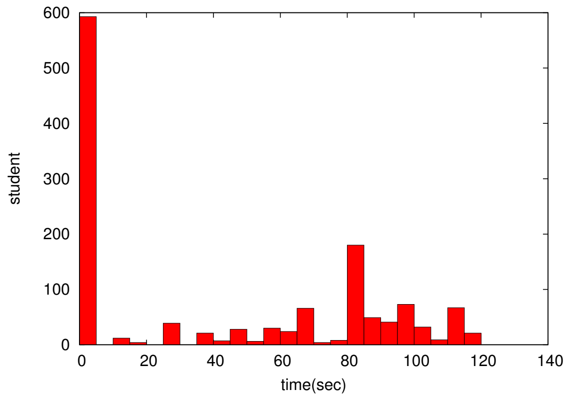


図 A.18: 本実験 1：秋学期水曜午後

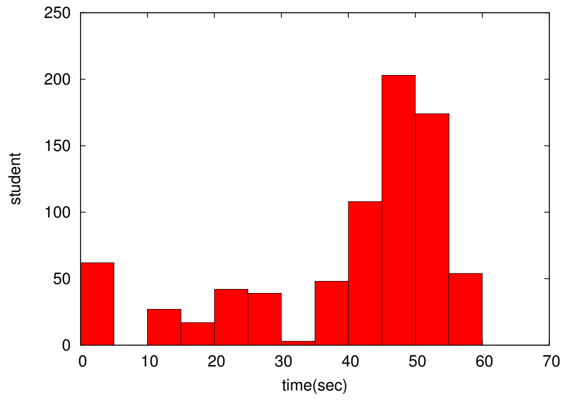


図 A.19: 本実験 1：秋学期木曜午前

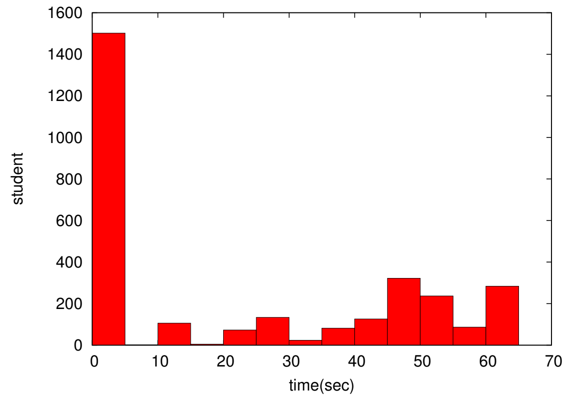


図 A.20: 本実験 1：秋学期木曜午後

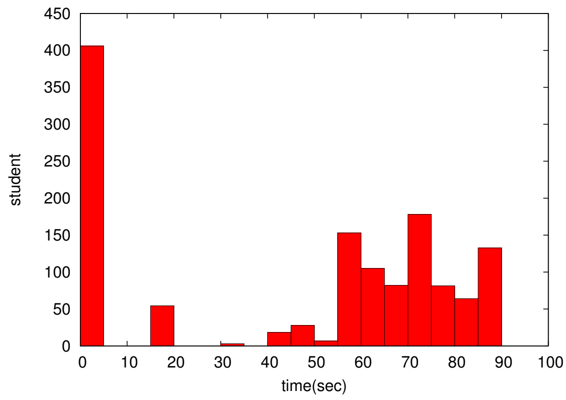


図 A.21: 本実験 1：秋学期金曜午前

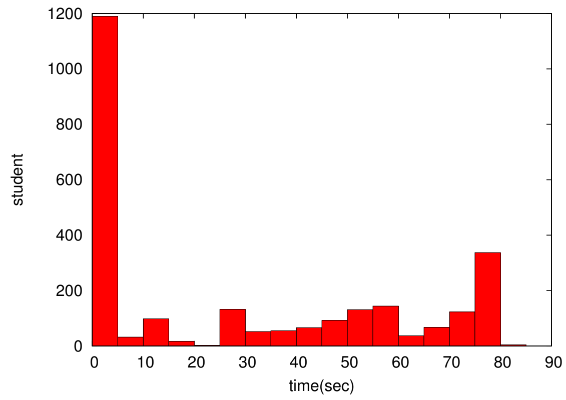


図 A.22: 本実験 1：秋学期金曜午後

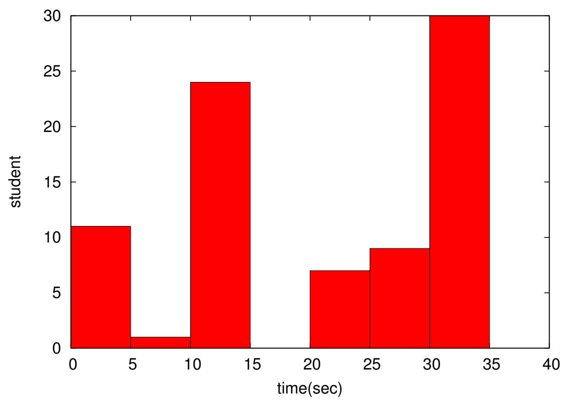


図 A.23: 本実験 1：秋学期土曜午前

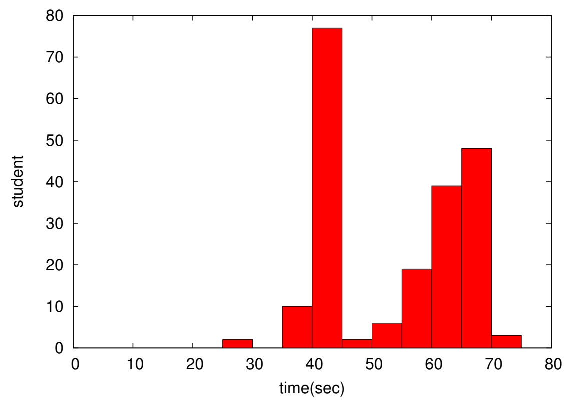


図 A.24: 本実験 1：秋学期土曜午後

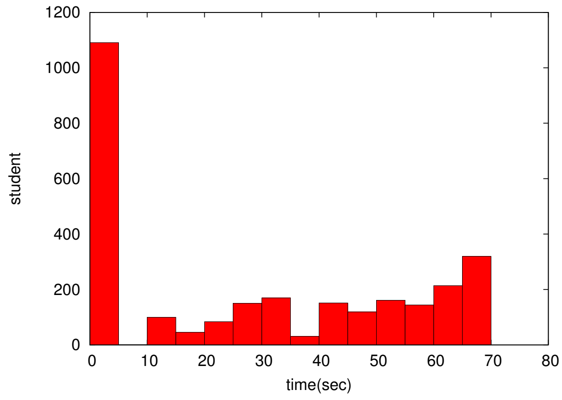


図 A.25: 本実験 2：春学期月曜午後

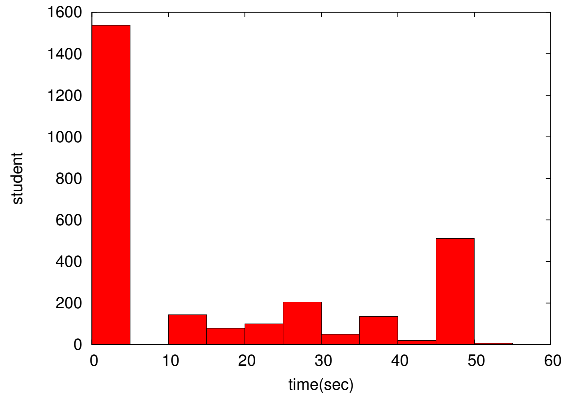
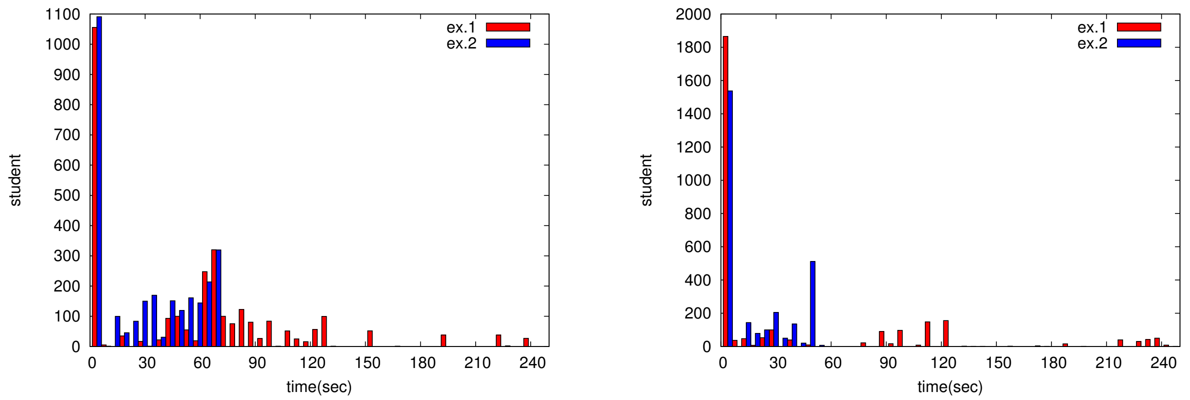


図 A.26: 本実験 2：春学期木曜午後



春学期月曜午後

春学期木曜午後

図 A.27: 本実験 1 と本実験 2 の比較

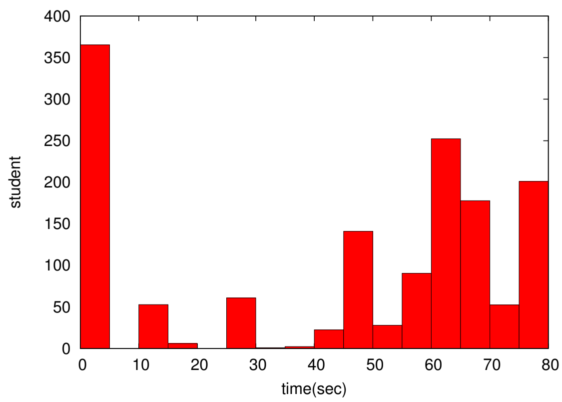


図 A.28: 本実験 3：春学期火曜午前

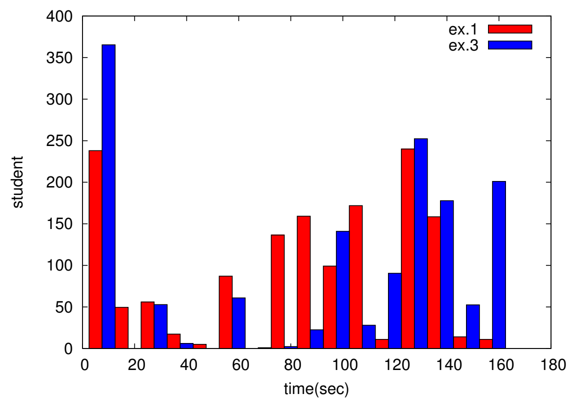


図 A.29: 本実験 1 と本実験 3 の比較

A.4　本実験 1 と本実験 3 の教室割当の比較

表 A.3 は，本実験 1 と本実験 3 の教室割当の結果を比較した表である．ただし，特殊教室 4-0002〜4-0021 については，授業が割り当てられていないので，省略している．

表 A.3: 本実験 1 と本実験 3 の教室割当の比較

本実験 1：春学期火曜午前の教室割当

room	1	2
4-101	65333_oTu1_1	65143_oTu2_1
4-102	65332_oTu1_1	64426_oTu2_1
4-103	65336_oTu1_1	64426_oTu2_2
4-104	65335_oTu1_1	64426_oTu2_3
4-105	64362_oTu1_2	60153_oTu2_1
4-106	62243_oTu1_1	64105_oTu2_1
4-107	64107_oTu1_1	64420_oTu2_1
4-201A	65331_oTu1_1	
4-202	60272_oTu1_1	62120_oTu2_2
4-203	65337_oTu1_1	65145_oTu2_1
4-204	60275_oTu1_1	62745_oTu2_1
4-205	60274_oTu1_1	64459_oTu2_1
4-206	64362_oTu1_1	64316_oTu2_1
4-207	62177_oTu1_1	60197_oTu2_1
4-208	62271_oTu1_1	65183_oTu2_1
4-209	62741_oTu1_1	62120_oTu2_4
4-210		64409_oTu2_1
4-301	60273_oTu1_1	65144_oTu2_1
4-302	65338_oTu1_1	62341_oTu2_1
4-303	62384_oTu1_1	65255_oTu2_1
4-304	62522_oTu1_1	62523_oTu2_1
4-305	62272_oTu1_1	62595_oTu2_1
4-306	62537_oTu1_1	62120_oTu2_3
4-307		62581_oTu2_1
4-308		62505_oTu2_1
4-401	62384_oTu1_2	65182_oTu2_1
4-402		
4-403	64307_oTu1_1	60157_oTu2_1
4-404	60190_oTu1_1	62351_oTu2_1
4-405	62273_oTu1_1	62120_oTu2_1
4-406		62173_oTu2_1
4-407	64166_oTu1_1	
4-408	64167_oTu1_1	60815_oTu2_1
4-501	65279_oTu1_1	65120_oTu2_1
4-3101		
4-3201		60091_oTu2_1
4-3202		
4-4A	62278_oTu1_1	62278_oTu2_1
4-4B	64081_oTu1_1	64081_oTu2_1
4-502	62222_oTu1_1	60145_oTu2_1
4-201B	65334_oTu1_1	
4-3401		65408_oTu2_1
4-3402	65415_oTu1_1	65142_oTu2_1
4-3403		
4-od1		
4-od2	62167_oTu1_1	64168_oTu2_1
4-0001		60452_oTu2_1

本実験 3：春学期火曜午前の教室割当

room	1	2
4-101	60273_oTu1_1	65144_oTu2_1
4-102	60272_oTu1_1	62581_oTu2_1
4-103	65333_oTu1_1	65143_oTu2_1
4-104	62278_oTu1_1	62278_oTu2_1
4-105	62537_oTu1_1	62523_oTu2_1
4-106	62177_oTu1_1	62120_oTu2_1
4-107	62522_oTu1_1	65120_oTu2_1
4-201A	65336_oTu1_1	
4-202	60275_oTu1_1	64409_oTu2_1
4-203	65332_oTu1_1	62120_oTu2_2
4-204	65331_oTu1_1	62120_oTu2_3
4-205	60274_oTu1_1	65145_oTu2_1
4-206	62384_oTu1_2	62120_oTu2_4
4-207	62384_oTu1_1	60157_oTu2_1
4-208	65279_oTu1_1	60153_oTu2_1
4-209		62341_oTu2_1
4-210		62595_oTu2_1
4-301	65337_oTu1_1	64426_oTu2_3
4-302	65338_oTu1_1	64105_oTu2_1
4-303	64362_oTu1_2	
4-304	64107_oTu1_1	64459_oTu2_1
4-305	62243_oTu1_1	60197_oTu2_1
4-306		62351_oTu2_1
4-307	62272_oTu1_1	
4-308		65183_oTu2_1
4-401	64362_oTu1_1	64426_oTu2_1
4-402		64426_oTu2_2
4-403	62273_oTu1_1	62173_oTu2_1
4-404	64307_oTu1_1	60815_oTu2_1
4-405	62271_oTu1_1	65142_oTu2_1
4-406	64167_oTu1_1	64420_oTu2_1
4-407	60190_oTu1_1	60091_oTu2_1
4-408	64081_oTu1_1	64081_oTu2_1
4-501	62222_oTu1_1	64316_oTu2_1
4-3101		62505_oTu2_1
4-3201		
4-3202		
4-4A	65415_oTu1_1	
4-4B		65408_oTu2_1
4-502		60145_oTu2_1
4-201B	65334_oTu1_1	
4-3401	64166_oTu1_1	65255_oTu2_1
4-3402	62741_oTu1_1	62745_oTu2_1
4-3403	65335_oTu1_1	65182_oTu2_1
4-od1		
4-od2	62167_oTu1_1	64168_oTu2_1
4-0001		60452_oTu2_1