平成 28 年度 公立はこだて未来大学卒業論文

北海道学生野球連盟リーグにおけるスケジュール最適化

柳原　真人

複雑系知能学科　　1013103

指導教員　　永野清仁

提出日 2017 年 1 月 31 日

Scheduling Optimization of Hokkaido Universities Baseball League

by

Manato Yanagihara

BA Thesis at Future University Hakodate, 2017

Advisor: Kiyohito Nagano

Department of Complex and Intelligent Systems
Future University Hakodate

January 31, 2017

Abstract– The baseball club of Future University Hakodate is belonging to the Hokkaido Universities Baseball League. Baseball games of the league are held at Aibetsu stadium, which is far from Hakodate. However, in the current schedule of the league, the distances from the universities to the stadium are not taken into account, and unfairness has arisen among the universities. In order to solve this problem, we formulate the scheduling problem of the league as an integer programming problem, and we aim to obtain the optimum schedule. In this research, we deal with the scheduling optimization problem where the venue is the same as the present situation and the scheduling optimization problem with multiple ballparks in Hokkaido as candidate sites. For these problems, we gave formulations as integer programming problems, and conducted computational experiments using mathematical optimization solver GLPK. In case the venue is Aibetsu stadium, we proposed a scheduling optimization method considering the fatigues due to the distances to the stadium. For the case where multiple stadiums are to be chosen as candidate sites, we proposed a scheduling optimization method considering the fatigues and the distances to the stadiums.

Keywords: Optimization, Integer programming problem, Sports scheduling, Formulation, Hokkaido Universities Baseball League

概 要: 本学、公立はこだて未来大学の野球部が所属する北海道学生野球連盟リーグは、函館から距離が遠い愛別町にあるあいべつ球場で開催されている。しかし現状のスケジュールでは、各大学から球場への距離が考慮されておらず、大学間で不公平が生じている。この問題を解決するために、本研究では北海道学生野球連盟リーグのスケジュール問題を整数計画問題として定式化して最適なスケジュールを求めることを目的とする。本研究では、開催地が現状と同じあいべつ球場の場合のスケジュール最適化問題と、北海道内の複数球場を開催候補地とするスケジュール最適化する問題を扱っている。それぞれの問題について、整数計画問題として定式化を行い、数理最適化ソルバー GLPK を用いた計算機実験を行った。開催地があいべつ球場の場合に対しては、球場までの距離による移動の疲労を考慮したスケジュール最適化手法を提案した。複数の球場を開催候補地とする場合に対しては、移動の疲労を考慮すると同時に移動距離の不公平を少なくするスケジュール最適化手法を提案した。

キーワード: 最適化, 整数計画問題, スポーツスケジューリング, 定式化, 北海道学生野球連盟リーグ

目 次

第1章　序論

本章では、背景としてスポーツのスケジューリングを紹介し、北海道学生野球連盟リーグに関する本研究の目的について述べる。

1.1　背景

今日、プロ、アマチュアを問わず様々なスポーツが行われ、いくつかのチームやプレイヤーが試合を行い、その結果により順位を決定している。その結果を左右する要因の一つとして試合のスケジュールがある。

試合日程が過密で選手の疲労回復に影響を及ぼす場合、十分なパフォーマンスをすることができない可能性がある。開催地の選択により、移動コストに大きな差が生じてしまうと選手ごとの金銭的な負担に不公平が生じる。また、プロスポーツにおいては週末に本拠地で試合を行うと、観客動員による収入をより多く得ることができるため、週末に本拠地で試合を行う数に偏りがあると不公平であると考えることができる。このように、様々な観点でスケジュールはスポーツにおけるパフォーマンスや、選手間の公平さに関わっている。

これらのスポーツスケジュールの問題を改善する手段として、数理的なアプローチを用いた研究が行われている [2, 5, 6]。

1.2　目的

公立はこだて未来大学硬式野球部 (以下、本学野球部) は、北海道学生野球連盟 2 部に所属し、年に 2 度行われるリーグ戦に参加することを目的として活動している。北海道学生野球連盟リーグにおける本学野球部のスケジューリング問題は、移動距離の差や試合日程について不公平があると考えることができる。詳細については後述する。
本研究は、北海道学生野球連盟リーグにおけるチームごとの不公平を軽減することを目的とする。開催地までの移動距離に伴う疲労を考慮して対戦カードの順番を決めるスケジュールや、開催地を複数の球場の中から選ぶことで、チームごとの移動距離の差が少なくなるようなスケジュールをそれぞれ定式化することで最適解を導き、新たなスケジュールを提案する。

第2章　スケジュール問題と最適化

本章ではスポーツスケジューリングに関する先行研究についての紹介と混合整数計画問題について解説する。混合整数問題はナップサック問題の例を挙げ解説する。

2.1　スポーツスケジューリング問題

スポーツスケジューリング問題の一つにホーム＆アウェイで行われるスケジュールがある。ホーム＆アウェイとは、全てのチームがそれぞれ他の全てのチームと等しい数の試合を行う、いわゆる総当たり戦において、対戦するどちらかのホームグラウンドで必ず試合を行うことである。松井 [5] によると、2 日以上連続でホームまたは 2 日以上連続でアウェイ (以下、ブレーク) の回数が多いスケジュールは不公平であると考えられるため、ブレーク数を最小とすることで不公平ではないスケジュールを目指している。しかし、チーム数が偶数の場合はブレークがないスケジュールは存在せず、この場合のブレーク最小スケジュールはブレークがないチームとブレークがあるチームの両方が存在するものになるため、全チームのブレイク数が 1 回となるスケジュールを不公平ではないものと考える。このようなスケジュールがホーム＆アウェイにおいてチーム間の不公平が少ないスケジュールである。

また、スポーツスケジューリングには多様な問題と手法があるが、池辺 [2] の論文ではそれらの代表的なものを紹介している。問題の例として、対戦順序の均一度を計る「対戦順序均一タイムテーブル作成問題」、全チームの総移動距離またはブレーク数を最小とするスケジュールを作成する「会場割当問題」などがある。さらに、スポーツスケジューリング問題を解く主な手法は整数計画、制約計画、グラフであり、グラフを用いた例としてリスト辺彩色問題について解説している。

2.2　混合整数計画問題

本研究は、本学野球部のスケジュールを混合整数計画問題として定式化し最適化することを目的としている。定式化とは、最適化問題において変数を定めすべての制約式と目的関数を記述することである [4]。混合整数計画問題とは最適化問題のひとつである。最適化問題は一般に以下のように表される [1]。

$$
\begin{aligned}
&\text{目的関数：} f(\boldsymbol{x}) \rightarrow \text{最小 (または最大)} \\
&\text{制約条件：} \boldsymbol{x} \in S
\end{aligned}
$$

このとき変数 $\boldsymbol{x} = (x_1, \ldots, x_n)^\top \in \mathbf{R}^n$ の取りうる範囲である S を実行可能領域という。目的関数 $f(\boldsymbol{x})$ と制約条件 $\boldsymbol{x} \in S$ が線形関数で記述されるものを線形計画問題と言う。また、目的関数 $f(\boldsymbol{x})$ の変数 $\boldsymbol{x}$ において、連続変数と離散変数が両方含まれるものを混合整数計画問題という。

以下に、混合整数計画問題の簡単な例を示す。

$$
\begin{aligned}
\text{目的関数：} \quad & 3x + 4y \quad \rightarrow \text{最大} \\
\text{制約条件：} \quad & x + y \leq 5 \\
& 2x + 4y \leq 13 \\
& x, y \geq 0 \\
& x : \text{整数} \\
& y : \text{実数}
\end{aligned}
$$

この混合整数計画問題を解くと目的関数の値は 16、最適解は $(x, y) = (3, 1.75)$ であり、図 2.1 のように表すことができる。

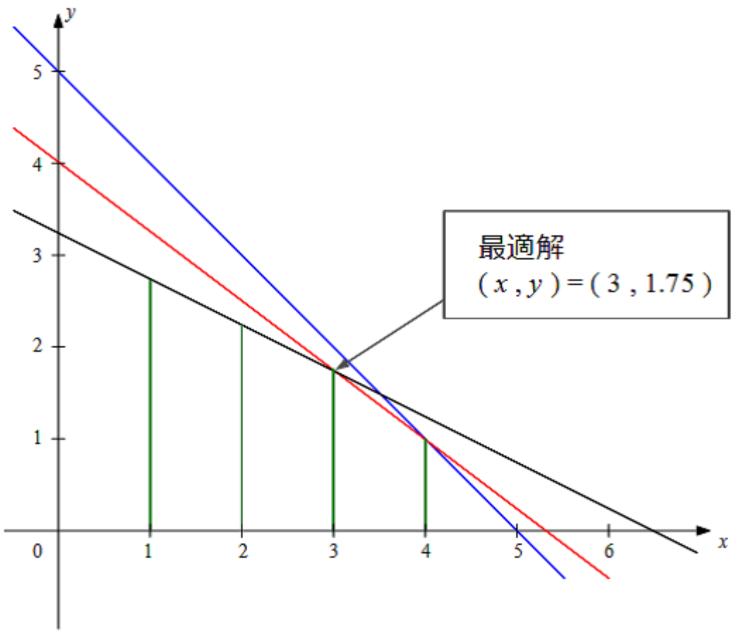

図 2.1: 混合整数計画問題の例

また、最適化問題において、変数 $\boldsymbol{x}$ がすべて整数であるものを整数最適化問題 (特に 0-1 変数の場合は 0-1 整数最適化問題) という。本研究では 0-1 整数最適化問題を扱う。0-1 整数最適化問題の一つにナップサック問題がある。ナップサック問題とは、一定の容量をもつナップサックに、価値と大きさが決まっている荷物を入れる状況において、価値が最大となる荷物を選び出す問題である。

例えば、表 2.1 のような 5 個の荷物を大きさ 300 のナップサックに入れるとき、価値が最大となる荷物を選ぶとする。

表 2.1: ナップサック問題の例

荷物	価値	大きさ
荷物 1	5	80
荷物 2	3	60
荷物 3	4	70
荷物 4	2	50
荷物 5	6	120

この問題を定式化するために、以下のような変数 x_i $(i = 1, \ldots, 5)$ を導入する。

$$x_i = \begin{cases} 1 & (\text{荷物 } i \text{ をナップサックに入れる}) \\ 0 & (\text{荷物 } i \text{ をナップサックに入れない}) \end{cases} \tag{2.1}$$

式 (2.1) の変数 x_i を用いてナップサック問題を定式化すると以下のようになる。

$$\begin{aligned} \text{目的関数：} \quad & 5x_1 + 3x_2 + 4x_3 + 2x_4 + 6x_5 \quad \to \text{最大} \\ \text{制約条件：} \quad & 80x_1 + 60x_2 + 70x_3 + 50x_4 + 120x_5 \leq 300 \\ & x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 \in \{0, 1\} \end{aligned}$$

このナップサック問題を解き、導かれた最適解は $x_1 = 1, x_2 = 0, x_3 = 1, x_4 = 0, x_5 = 1,$ である。また、このときの目的関数の値は 15 である。つまり、ナップサックに荷物 1、荷物 3、荷物 5 を入れると、価値が最大の 15 となる。

第3章　本学野球部のスケジュール問題

本章は、北海道学生野球連盟リーグのスケジュール問題についての解説と、新たなスケジュール作成のための定式化について解説する。定式化は開催地があいべつ球場の場合と、複数の球場を開催地の候補とする場合のそれぞれについて行う。

3.1　北海道学生野球連盟リーグのスケジュール

北海道学生野球連盟リーグとは、札幌近郊を除いた北海道内に所在する大学で構成される硬式野球のリーグ戦であり、1 部と 2 部に分かれている。本学野球部は 2 部に所属している。

北海道学生野球連盟リーグは、年に 2 度、春季と秋季にリーグ戦を行う。2 部リーグ戦は、全試合あいべつ球場で行われる。あいべつ球場は北海道上川地方の愛別町に所在している。また、2 部リーグ戦は各チームと 1 試合ずつ対戦する総当たり戦で行われる (1 部は各チームと 2 試合ずつ対戦する総当たり戦)。平成 28 年度春季リーグ戦の参加チームと所在市町村、各大学から開催地となるあいべつ球場までの距離を表 3.1 に、参加チームとあいべつ球場の場所を図 3.1 に示す。以下、表中における参加校の略称として、北海道教育大学旭川校は「旭」、本学は「未」、その他の大学は大学名の先頭の文字を用いる。さらに、同リーグ戦の日程は表 3.2 の通りである。

表 3.1: 参加チームとあいべつ球場までの距離

参加校	市町村	距離
北海道教育大学旭川校	旭川市	28km
拓殖大学北海道短期大学	深川市	57km
北見工業大学	北見市	146km
帯広畜産大学	帯広市	173km
室蘭工業大学	室蘭市	254km
公立はこだて未来大学	函館市	397km

図 3.1: 参加チームとあいべつ球場の所在地

表 3.2: 平成 28 年度北海道学生野球連盟 2 部リーグ日程表

日付	6/10(金)	6/11(土)	6/12(日)	6/18(土)	6/19/(日)
第 1 試合	旭一未	帯一室	旭一北	帯一未	拓一未
第 2 試合	帯一北	旭一拓	室一未	旭一室	旭一帯
第 3 試合	室一拓	北一未	帯一拓	北一拓	室一北

これらから、本学野球部のスケジュールにはいくつかの問題が生じていることがわかる。はじめに、各チームごとにあいべつ球場までの距離に大きく差があることである。本学はあいべつ球場から最も遠く、移動による時間とコストが大きくなることは明らかである。さらに、2 度の週末を使用した日程であるため、1 度の大会で開催地まで 2 往復する必要があり、移動距離の差がさらに大きくなる。

また、開催地へ移動した直後の 6 月 10 日と 6 月 18 日のいずれも本学野球部は第 1 試合であるが、平成 28 年度春季リーグ戦において第 1 試合の開始時刻は午前 8 時 30 分であり、これは試合会場への移動による疲労を考慮すると不公平であると考えられる。遠方からの参加校は移動をした直後の試合は十分に休息のとれない第 1 試合は避けるスケジュールに改善する余地がある。

そして、開催地があいべつ球場のみでしか行われていない点も問題である。北海道学生野球連盟 1 部では平成 24 年から平成 28 年の 5 年間で、あいべつ球場を含め 8 か所で試合が行われている。また、北海道には北海道学生野球連盟とは別に、札幌近郊の大学で構成される札幌学生野球連盟がある。札幌学生野球連盟では平成 24 年から平成 28 年の 5 年間で、北海道学生野球連盟で使用されている球場とは別に 8 か所で試合が行われている (大

学のグラウンドで行われた試合は除く)。この他にも、北海道には硬式野球の試合を行うことができる球場が多数あり、これらの球場を開催地の候補とすると、参加チームごとに開催地までの移動距離に大きく差が付くことを避けられる球場があると考えられる。これらの問題を定式化することで、新たなスケジュールを作成する。

3.2 あいべつ球場を開催地とする場合

本節では開催地があいべつ球場のみで行われ、移動による疲労を考慮したスケジュールの定式化を行う。この定式化では、参加チーム $T = \{A, B, C, D, E, F\}$ を開催地から近い順に、A、B、C、D、E、F と機械的に決定した。試合の日時は北海道学生野球連盟 2 部リーグにおける、平成 28 年度春季リーグ戦と同じものとする。さらに、試合を行う 2 チームの対戦カードの集合を $P = \{1, 2, \ldots, 15\}$ とする。さらに、チーム $t \in T$ が含まれる対戦カードの集合を P_t おく。

また、表 3.2 より試合数は 15 試合であり、対戦カードが入る枠 $W = \{1, 2, \ldots, 15\}$ を表 3.3 のように設定する。さらに、k 日目の枠の集合を W_k、第 l 試合の枠の集合を V_l とする。

表 3.3: 6 チーム総当たり戦の日程表

日付	6/10/(金)	6/11/(土)	6/12/(日)	6/18(土)	6/19(日)
第 1 試合	1	4	7	10	13
第 2 試合	2	5	8	11	14
第 3 試合	3	6	9	12	15

対戦カード $p \in P$、枠 $i \in W$ について、決定変数 x_{pi} を以下のように定める。

$$x_{pi} = \begin{cases} 1 & (\text{対戦カード } p \text{ が枠 } i \text{ で試合をする}) \\ 0 & (\text{対戦カード } p \text{ は枠 } i \text{ で試合をしない}) \end{cases}$$

あいべつ球場を開催地とする場合の 6 チームによるリーグ戦のスケジューリングの目的関数 $f(\boldsymbol{x})$ と制約条件 $\boldsymbol{x} \in S$ を定めるために、この決定変数 x_{pi} を用いて議論する。

制約条件として、各チームの対戦が 1 度ずつの総当たり戦として成立するものを以下に示す。

- 1 つの枠 i に対して 1 つの対戦カード p が入る。

$$\sum_{p \in P} x_{pi} = 1 \quad (i \in W)$$

- チーム t はそれぞれ 1 日に 1 試合のみ行う。

$$\sum_{p \in P_t} \sum_{i \in W_k} x_{pi} = 1 \quad (t \in T, k = 1, 2, \ldots, 5)$$

- 対戦カード p はそれぞれ 1 度だけ行われる。

$$\sum_{i \in W} x_{pi} = 1 \quad (p \in P)$$

さらに、チームごとに第 1 試合から第 3 試合の偏りが出ないような条件式を以下に示す。

- チーム t はそれぞれ第 1 試合から第 3 試合までを少なくとも 1 度ずつ行う。

$$\sum_{p \in P_t} \sum_{i \in V_l} x_{pi} \geq 1 \quad (t \in T, l = 1, 2, 3)$$

また、目的関数として、移動による負担の和を最小化する目的関数と最も大きい負担を最小化する目的関数の 2 つを考える。これらについて以下で説明する。

3.2.1 移動による負担の和を最小化する目的関数

本研究では開催地からの距離によって生じる不公平を軽減することを目的としているため、遠方からの参加チームに対して配慮がなされる目的関数を設定する。

遠いチームほど配慮がなされるべき枠は、開催地へ移動した直後の第 1 試合である枠 1 と枠 10、試合後に開催地から帰る必要がある枠 9 と枠 15 である。これらの枠について、各チームにかかる負担について考えていく。はじめに枠 1 に着目する。各チームが枠 1 で試合をする際にかかる負担が、チーム A は 2、チーム B は 4、チーム C は 6、チーム D は 8 、チーム E は 10、チーム F は 12 であるとすると、負担の値ができるだけ小さいチームが枠 1 で試合をすることで、遠方からの参加チームが枠 1 で試合をする可能性を低くすることができる。これは枠 10 についても同様のことが言える。

次に、枠 9 に着目する。枠 9 では、遠方からの参加チームを配慮する必要はあるものの、この配慮は枠 1 や枠 10 のように試合内容に関わるものではないため、枠 1 と枠 10 で設定した負担の値よりも半分で設定する。つまり、各チームの負担の値は、チーム A は 1、チーム B は 2、チーム C は 3、チーム D は 4、チーム E は 5、チーム F は 6 となり、枠 9 で試合をするチームの負担の値が小さくなるようにする。これは枠 15 についても同様のことが言える。

この定式化では、その他の枠についてはどの対戦カードが入っても負担の値は 0 とする。ここで、対戦カード p が枠 i に入るときの負担を定数 c_{pi} で表すものとする。全チームの負担の合計が最小となるように目的関数 $f(\boldsymbol{x})$ を設定すると以下のように表すことができる。

$$\sum_{p \in P} \sum_{i \in W} c_{pi} x_{pi} \quad \rightarrow \text{最小}$$

この目的関数と前述した制約条件を用いて定式化を行うと以下のようになる。

$$
\begin{aligned}
\text{目的関数：} \quad & \sum_{p\in P}\sum_{i\in W} c_{pi}x_{pi} \quad \rightarrow \text{最小} \\
\text{制約条件：} \quad & \sum_{p\in P} x_{pi} = 1 \quad (i \in W) \\
& \sum_{p\in P_t}\sum_{i\in W_k} x_{pi} = 1 \quad (t \in T, k = 1, 2, \ldots, 5) \\
& \sum_{i\in W} x_{pi} = 1 \quad (p \in P) \\
& \sum_{p\in P_t}\sum_{i\in W_l} x_{pi} \geq 1 \quad (t \in T, l = 1, 2, 3) \\
& x_{pi} \in \{0, 1\}
\end{aligned}
$$

3.2.2 最も大きい負担を最小化する目的関数

前節では、点数の和つまり全チームの負担の和を最小にする定式化であった。この場合は負担が極端に大きいと小さいチームが存在し得るため、最も負担の大きいチームの負担を最小化する定式化を行う。この定式化では前節で使用した変数 x_{pi}、定数 c_{pi}、条件式を用いる。

チームごとの点数の和は以下のように表すことができる。

$$
\sum_{p\in P_t}\sum_{i\in W} c_{pi}x_{pi} \quad (t \in T)
$$

この負担の和が最大となるチームの値を最小化する定式化をするために、新たに変数 z を導入する。最も大きい負担を最小化する定式化は以下のようになる。

$$
\begin{aligned}
\text{目的関数：} \quad & z \quad \rightarrow \text{最小} \\
\text{制約条件：} \quad & \sum_{p\in P} x_{pi} = 1 \quad (i \in W) \\
& \sum_{i\in W_k}\sum_{p\in P_t} x_{pi} = 1 \quad (t \in T, k = 1, 2, \ldots, 5) \\
& \sum_{i\in W} x_{pi} = 1 \quad (p \in P) \\
& \sum_{p\in P_t}\sum_{i\in W_l} x_{pi} \geq 1 \quad (t \in T, l = 1, 2, 3) \\
& \sum_{p\in P_t}\sum_{i\in W} c_{pi}x_{pi} \geq z \quad (t \in T) \\
& x_{pi} \in \{0, 1\}
\end{aligned}
$$

3.3 複数の球場を開催地とする場合

本節では、あいべつ球場だけではなく複数の球場を開催地の候補とした場合のスケジュールについて定式化を行う。この定式化では、参加チーム T、対戦カード P、枠 W について、前節で定義したものを用いる。また、参加チーム T は実際の北海道学生野球連盟の参加校と同じ条件にするために表 3.4 のように定義する。

表 3.4: 複数球場を候補とする定式化の参加チーム

T	チーム名
1	公立はこだて未来大学
2	室蘭工業大学
3	帯広畜産大学
4	北見工業大学
5	拓殖大学北海道短期大学
6	北海道教育大学旭川校

さらに、候補となる球場 $S = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7\}$ を表 3.5 のように定義する。また、各球場の所在地を図 3.2 で示す。

表 3.5: 球場候補

S	球場名	市町村
1	あいべつ球場	愛別町
2	江差町民球場	江差町
3	函館オーシャンスタジアム	函館市
4	とましんスタジアム	苫小牧市
5	網走呼人球場	網走市
6	札幌麻生球場	札幌市
7	栗山町民球場	栗山町

図 3.2: 球場の所在地

これらの球場候補は硬式野球で使用可能な球場の中でも、大学野球で使用されている球場から選択した。球場 1 から球場 5 については、北海道学生野球連盟 1 部で頻繁に使用されている球場である。球場 6 と球場 7 については札幌学生野球連盟で使用されたことのある球場であり、球場の所在地に偏りが出ないようにこの 7 球場を候補とした。

ここで、対戦カード $p \in P$、枠 $i \in W$、$s \in S$ について、決定変数 x_{pis} を以下のように定める。

$$x_{pis} = \begin{cases} 1 & (\text{対戦カード } p \text{ が球場 } s \text{ の枠 } i \text{ で試合をする}) \\ 0 & (\text{対戦カード } p \text{ は球場 } s \text{ の枠 } i \text{ で試合をしない}) \end{cases}$$

複数の球場を開催地の候補とした場合のスケジューリングについて、この決定変数 x_{pis} を用いて議論する。

前節と同様に、各対戦カードが 1 度ずつの総当たり戦として成立し、各チームが第 1 試合から第 3 試合を少なくとも 1 度ずつ行う制約条件を以下に示す。

- 1 つの枠 i に対して 1 つの対戦カード p が入る。

$$\sum_{p \in P} \sum_{s \in S} x_{pis} = 1 \quad (i \in W)$$

- チーム t はそれぞれ 1 日に 1 試合のみ行う。

$$\sum_{p \in P_t} \sum_{i \in W_k} \sum_{s \in S} x_{pis} = 1 \quad (t \in T, k = 1, 2, \dots, 5)$$

- 対戦カード p はそれぞれ 1 度だけ行われる。

$$\sum_{i \in W} \sum_{s \in S} x_{pis} = 1 \quad (p \in P)$$

- チーム t はそれぞれ第 1 試合から第 3 試合までを少なくとも 1 度ずつ行う。

$$\sum_{p\in P_t}\sum_{i\in V_l}\sum_{s\in S} x_{pis} \geq 1 \quad (t \in T, l = 1, 2, 3)$$

さらに、この定式化の場合、複数の球場候補の中から 1 回目の週末 (6 月 10 日から 6 月 12 日) と 2 回目の週末 (6 月 18 日から 6 月 19 日) でそれぞれ 1 か所の球場で行われる必要がある。ここで、j 回目の週末の球場 $s \in S$ について、変数 y_{js} を以下のように定める。

$$y_{js} = \begin{cases} 1 & (j \text{ 回目の週末が球場 } s \text{ で行われる}) \\ 0 & (j \text{ 回目の週末は球場 } s \text{ で行われない}) \end{cases}$$

この変数 y_{js} を用いて以下のような制約条件が成り立つ。

- 1 回目の週末で行われる 9 試合は同一球場である。

$$\sum_{p\in P}\sum_{i\in\{1,2,\ldots,9\}}\sum_{s\in S} x_{pis} = 9y_{1s}$$

- 2 回目の週末で行われる 6 試合は同一球場である。

$$\sum_{p\in P}\sum_{i\in\{10,11,\ldots,15\}}\sum_{s\in S} x_{pis} = 6y_{2s}$$

- j 回目の週末で使用する球場は 1 か所である。

$$\sum_{s\in S} y_{js} = 1 \quad (j \in \{1, 2\})$$

この定式化では各チームが球場までの移動距離における不公平を少なくすることが目的である。あいべつ球場のみを開催地とした定式化の際には、枠ごとに負担の重みを設定したが、複数球場を開催地の候補とする定式化の場合は、各チームの球場ごとの移動距離を考慮し球場を決めなければならない。ここで、チーム $t \in T$ が球場 $s \in S$ まで移動する距離を定数 d_{ts} で表すものとする。定数 d_{ts} の具体的な数値は表 3.6 の通りである。

表 3.6: 各チームの球場までの距離

日付	未	室	帯	北	拓	旭
あいべつ球場	396	255	173	136	57	25
江差町民球場	75	184	423	538	345	369
函館オーシャンスタジアム	8	190	429	544	351	375
とましんスタジアム	239	62	190	335	142	168
網走呼人球場	571	424	191	41	231	202
札幌麻生球場	248	130	208	297	104	129
栗山町民球場	280	118	173	282	86	114

この定数 d_{ts} を用いてチーム $t \in T$ が j 回目の週末で球場まで移動する距離を表すと以下のようになる。

$$\sum_{s \in S} d_{ts} y_{js} \quad (j \in \{1,2\}, t \in T)$$

前節の定式化では、対戦カード p が枠 i で試合をするスケジュールによる負担を定数 c_{pi} と表した。同様に対戦カード $p \in P$ が球場 $s \in S$ の枠 $i \in W$ で試合をするスケジュールによる負担を定数 c_{pis} と表すものとする。c_{pis} は、枠 1、9、10、15 では球場 s 対戦カードの両チームの移動距離の和とする。枠 2、8、11、14 はそれぞれ枠 1、9、10、15 と試合開始時間に 2 時間 30 分の差がありその分の負担にも差があると考えられる。ここでは 2 時間 30 分 (150 分) の負担を移動距離 150km の負担と同等とし、枠 1、9、10、15 より 1 チームにつき負担が 150 軽くなるものとする。つまり枠 2、8、11、14 の c_{pis} は枠 1、9、10、15 に比べ 300 少ない値となる。同様に枠 3、7、12、13 の c_{pis} は枠 2、8、11、14 と比べさらに 300 少ない値となる。ただし、定数 c_{pis} は 0 未満にはならないものとする。以下に定数 c_{pis} の例を示す。

例 1：対戦カード 1(未一室) が球場 1(あいべつ球場) の枠 1 で対戦する場合

公立はこだて未来大学のあいべつ球場までの距離：396km
室蘭工業大学のあいべつ球場までの距離：225km
$c_{111} = 225 + 396 = 621$

例 2：対戦カード 7(室一帯) が球場 2(江差町民球場) の枠 2 で対戦する場合

室蘭工業大学の江差町民球場までの距離：184km
帯広畜産大学の江差町民球場までの距離：423km
$c_{722} = 184 + 423 - 300 = 307$

例 3：対戦カード 3(未一帯) が球場 4(とましんスタジアム) の枠 3 で対戦する場合

公立はこだて未来大学のとましんスタジアムまでの距離：239km
帯広畜産大学のとましんスタジアムまでの距離：190km
$239 + 190 - 600 < 0$ より、$c_{334} = 0$

この c_{pis} を用いると、各チームのスケジュールによる負担の和を以下のように表すことができる。

$$\sum_{p \in P_t} \sum_{i \in W} \sum_{s \in S} c_{pis} x_{pis} \quad (t \in T)$$

また、目的関数としては、あいべつ球場のみを開催地とした定式化と同様に、移動による負担の和を最小化する目的関数と最も大きい負担を最小化する目的関数の 2 つを考える。これらについて以下で説明する。

3.3.1 移動による負担の和を最小化する目的関数

前節で述べた、変数 x_{pis}、変数 y_{js}、定数 c_{pis}、定数 d_{ts} を用いて、全チームの負担の和を表すと以下のようになる。

$$\sum_{p \in P} \sum_{i \in W} \sum_{s \in S} c_{pis} x_{pis} + \sum_{j \in \{1,2\}} \sum_{s \in S} d_{ts} y_{js} \tag{3.1}$$

この定式化では、全チームの移動による負担の和を最小化するため式 (3.1) の最小化が目的関数となる。この目的関数を用いて定式化すると以下のようになる。

$$
\begin{aligned}
\text{目的関数：}\quad & \sum_{p\in P}\sum_{i\in W}\sum_{s\in S} c_{pis}x_{pis} + \sum_{j\in\{1,2\}}\sum_{s\in S} d_{ts}y_{js} \quad \rightarrow \text{最小} \\
\text{制約条件：}\quad & \sum_{p\in P}\sum_{s\in S} x_{pis} = 1 \\
& \sum_{p\in P_t}\sum_{i\in W_k}\sum_{s\in S} x_{pis} = 1 \quad (t\in T, k=1,2,\ldots,5) \\
& \sum_{i\in W}\sum_{s\in S} x_{pis} = 1 \quad (p\in P) \\
& \sum_{p\in P_t}\sum_{i\in V_l}\sum_{s\in S} x_{pis} \geq 1 \quad (t\in T, l=1,2,3) \\
& \sum_{p\in P}\sum_{i\in\{1,2,\ldots,9\}}\sum_{s\in S} x_{pis} = 9y_{1s} \\
& \sum_{p\in P}\sum_{i\in\{10,11,\ldots,15\}}\sum_{s\in S} x_{pis} = 6y_{2s} \\
& \sum_{s\in S} y_{js} = 1 \quad (j\in\{1,2\}) \\
& x_{pis}\in\{0,1\} \quad (p\in P, i\in W, s\in S) \\
& y_{js}\in\{0,1\} \quad (j\in\{1,2\}, s\in S)
\end{aligned}
$$

3.3.2 最も大きい負担を最小化する目的関数

チーム $t\in T$ における、スケジュールによる負担は式 (3.2)、大会を通しての移動距離による負担は式 (3.3) のように表すことができる。

$$\sum_{p\in P_t}\sum_{i\in W}\sum_{s\in S} c_{pis}x_{pis} \quad (t\in T) \tag{3.2}$$

$$\sum_{j\in\{1,2\}}\sum_{s\in S} d_{ts} \quad (t\in T) \tag{3.3}$$

ここで新たに変数 z を導入する。変数 z は各チームの全負担の最大値を表すために用いる。これらを用いて最も大きい負担を最小化する定式化を行うと以下のようになる。

目的関数：　$z \quad \rightarrow$最小

制約条件：

$$\sum_{p \in P} \sum_{s \in S} x_{pis} = 1 \quad (i \in W)$$

$$\sum_{p \in P_t} \sum_{i \in W_k} \sum_{s \in S} x_{pis} = 1 \quad (t \in T, k = 1, 2, \ldots, 5)$$

$$\sum_{i \in W} \sum_{s \in S} x_{pis} = 1 \quad (p \in P)$$

$$\sum_{p \in P_t} \sum_{i \in V_l} \sum_{s \in S} x_{pis} \geq 1 \quad (t \in T, l = 1, 2, 3)$$

$$\sum_{p \in P} \sum_{i \in \{1,2,\ldots,9\}} \sum_{s \in S} x_{pis} = 9 y_{1s}$$

$$\sum_{p \in P} \sum_{i \in \{10,11,\ldots,15\}} \sum_{s \in S} x_{pis} = 6 y_{2s}$$

$$\sum_{s \in S} y_{js} = 1 \quad (j \in \{1, 2\})$$

$$\sum_{p \in P_t} \sum_{i \in W} \sum_{s \in S} c_{pis} x_{pis} + \sum_{j \in \{1,2\}} \sum_{s \in S} d_{ts} y_{js} \leq z \quad (t \in T)$$

$$x_{pis} \in \{0, 1\} \quad (p \in P, i \in W, s \in S)$$

$$y_{js} \in \{0, 1\} \quad (j \in \{1, 2\}, s \in S)$$

第4章　計算機実験

本章では、前述したように定式化された整数最適化問題を数理最適化ソルバー GLPK を用いて解いた結果とその考察を述べる。

3 章で定式化した整数最適化問題を数理最適化ソルバー GLPK を用いて解く。GLPK は、線形計画問題を解くフリーソフトウェアである [3]。線形計画問題は決定変数の数が少ないと解析的に解くことが可能であるが、決定変数の数が非常に多い場合は解析的に解くことが難しい。そのため、線形計画問題を解くときは GLPK などのソフトウェアを用いることが一般的である。

4.1　実験結果

開催地をあいべつ球場とした場合の定式化において、移動による負担の和を最小化する目的関数で定式化された問題の計算結果を表 4.1 に示す。

表 4.1: あいべつ球場で移動による負担の和を最小化するスケジュール

日付	6/10(金)	6/11(土)	6/12(日)	6/18(土)	6/19(日)
第 1 試合	A—B	B—F	B—E	A—C	D—E
第 2 試合	C—E	A—E	C—F	B—D	A—F
第 3 試合	D—F	C—D	A—D	E—F	B—C

表 4.1 のスケジュールの結果、チーム A,、B、C、D、E、F の負担はそれぞれ 5、6、3、12、0、0 となり、最も大きい負担はチーム D の 12 となった。また、負担の和は 26 となった。

続いて最も大きい負担のチームの値を最小化する目的関数で定式化された問題の計算結果を表 4.2 で示す。

表 4.2: あいべつ球場で最も大きい負担を最小化するスケジュール

日付	6/10(金)	6/11(土)	6/12(日)	6/18(土)	6/19(日)
第 1 試合	A—D	B—F	C—E	B—C	A—C
第 2 試合	C—F	A—E	D—F	D—E	B—D
第 3 試合	B—E	C—D	A—B	A—F	E—F

表 4.2 のスケジュールの結果、チーム A、B、C、D、E、F の負担はそれぞれ 3、6、6、8、5、6 となり、最も大きい負担はチーム D の 8 となった。また負担の和は 34 となった。

さらに、複数球場を開催地の候補とする定式化において、負担の和を最小化するスケジュールの計算結果を表 4.3 で示す。

表 4.3: 複数の球場候補から負担の和を最小化するスケジュール

日付	6/10(金)	6/11(土)	6/12(日)	6/18(土)	6/19(日)
第 1 試合	拓ー旭	北ー拓	未ー帯	室ー旭	室ー北
第 2 試合	帯ー北	未ー旭	室ー拓	帯ー拓	帯ー旭
第 3 試合	未ー室	室ー帯	北ー旭	未ー北	未ー拓
球場	あいべつ球場			とましんスタジアム	

表 4.3 のスケジュールの結果、各チームの負担は、本学は 1066、室蘭工業大学は 484、帯広畜産大学は 466、北見工業大学は 677、拓殖大学北海道短期大学は 398、北海道教育大学旭川校は 429 となり、最も大きい負担は本学の 1066 となった。また負担の和は 3520 となった。

続いて、最も大きい負担のチームの値を最小化するスケジュールの計算結果を表 4.4 で示す。

表 4.4: 複数の球場候補から最も大きい負担を最小化するスケジュール

日付	6/10(金)	6/11(土)	6/12(日)	6/18(土)	6/19(日)
第 1 試合	拓ー旭	未ー室	未ー北	室ー帯	帯ー北
第 2 試合	室ー北	帯ー拓	帯ー旭	未ー旭	室ー旭
第 3 試合	未ー帯	北ー旭	室ー拓	北ー拓	未ー拓
球場	栗山町民球場			とましんスタジアム	

表 4.4 のスケジュールの結果、各チームの負担は、本学は 847、室蘭工業大学は 360、帯広畜産大学は 576、北見工業大学は 819、拓殖大学北海道短期大学は 542、北海道教育大学旭川校は 432 となり、最も大きい負担は本学の 847 となった。また負担の和は 3576 となった。

4.2 考察

はじめに、あいべつ球場を開催地とする場合のスケジュールについて考察する。表 4.1 と表 4.2 は日程と制約条件は同じで、目的関数のみを変えているが、計算結果は違いがみられた。最も距離が遠いチーム F に着目すると、どちらの計算結果においても、枠 1，9，10，15 全てに入らなかった。同様にチーム E もこれらの枠には入らなかった。そのため、遠方から参加しているチームに対してはどちらの計算結果も配慮できていると考えることができる。表 4.1 の最大負担はチーム C の 12 で、負担の和は 26 であり、4.2 は最大負担がチーム D の 8 で、負担の和は 33 であった。このことからもわかるように、チーム間の不公平が少ない表 4.2 のほうが優れたスケジュールであると言える。

次に、複数球場を開催地とする場合のスケジュールについて考察する。表 4.3 は全チームの負担の和を最小化しており、負担の和は 3520、最も大きい負担は本学の 1066 である。表 4.4 は最も大きい負担の最小化をしており、負担の和は 3576、最も大きい負担は本学の 847 である。ここで、表 3.2 の平成 28 年度北海道学生野球連盟春季リーグ戦についても本研究の定式化で用いた負担の計算をしてみると、本学は 1926、室蘭工業大学は 975、帯広畜産大学は 738、北見工業大学は 408、拓殖大学北海道短期大学は 171、北海道教育大学旭川校は 75 となり、最も大きい負担は本学の 1926 となった。また負担の和は 4293 となった。この結果と、表 4.3 ならびに表 4.4 の結果を比較すると、本研究で作成したスケジュールのほうが負担の和、最も大きい負担のどちらについても小さくなっている。よって平成 28 年度北海道学生野球連盟春季リーグ戦のスケジュールより本研究で作成したスケジュールのほうが優れていると言える。さらに、チーム間の不公平を少なくする点において考える。最も大きい負担のチームと最も小さい負担のチームの差について注目すると、表 4.3 は本学と拓殖大学北海道短期大学の 668 である。表 4.4 は本学と室蘭工業大学の 487 である。このことから、本研究の目的であるチーム間の不公平をより軽減しているスケジュールは、表 4.4 のスケジュールであると言える。

第5章　おわりに

本章では、まとめとして本研究の目的に対しての計算結果について結論を述べ、さらに今後の展望について述べる。

5.1　まとめ

本研究は北海道学生野球連盟リーグのスケジュールを整数最適化問題を用いて改善した。北海道学生野球連盟平成 28 年度春季リーグ戦のスケジュールは、本学野球部が極端に遠いあいべつ球場が開催地であるために移動距離による不公平が生じていた。また、移動距離による負担があるにもかかわらず疲労が考慮されず、移動の翌日は第 1 試合であった。このことから、移動距離に着目し、整数最適化問題として定式化した。定式化はあいべつ球場で開催される場合と、北海道内にある 7 か所の球場を開催地の候補とする場合のそれぞれにおいて、全チームの負担の和を最小化する目的関数と最も大きい負担を最小化する目的関数で行った。計算機実験の結果から、1 度目の週末を栗山町民球場、2 度目の週末をとましんスタジアムで行う表 4.4 のスケジュールは不公平を少なくするスケジュールであった。

5.2　今後の展望

今後の展望としては、移動距離以外にも着目したスケジュールにすることや現実的なスケジュールにすることがあげられる。

「不公平」であることについて、本研究は移動距離に重点を置いたが、移動距離以外の条件にも着目することでよりよいスケジュールとなる。平成 28 年度春季リーグ戦では、前回大会の順位が考慮され、前回 1 位の北海道教育大学旭川校と前回 2 位の帯広畜産大学が最終日に対戦するスケジュールとなっている。そのため、最終日までに優勝チームが決まる可能性が低く、選手のモチベーションが下がらないようになっている。また、移動の負担について、距離だけではなく金銭的負担を考慮し、日帰りをすることができるチームと宿泊する必要があるチームに関して制約を課すスケジュールも考えられる。また、球場を選ぶ際に、現実に使用可能かを判断する必要がある。本研究では北海道学生野球連盟 1 部や札幌学生野球連盟で使用されている球場を候補としているため、実際には同時期に使用されている可能性がある。またこれらの球場は大学野球だけではなく、他のアマチュア野球に用いられることもあるため、使用可能かを判断する制約があるとより現実的になる。

さらに、参加チームについて、平成 28 年度のリーグ戦ならびに入替戦の結果から、北海道教育大学旭川校が 1 部昇格、釧路公立大学が 2 部降格をしている。そのため、次回大会では本研究で扱ったチームとは異なる。本研究の定式化を次回大会に応用するには、新

たなチームに条件を変更させる必要がある。

参考文献

[1] 穴井宏和, 斉藤努. 今日から使える！組合せ最適化離散問題ガイドブック. 講談社. 2015.

[2] 池辺淑子. スポーツのスケジューリング. 日本オペレーションズリサーチ学会. 2006.

[3] 大木英司. 通信ネットワークのための数理計画法. コロナ社. 2012.

[4] 藤江哲也. 整数計画法による定式化入門. オペレーションズリサーチ. 2012.

[5] 松井知己. スポーツのスケジューリング. システム制御情報学会研究発表講演会講演論文集. 1999.

[6] 宮代隆平, 松井知己. スポーツスケジューリング—未解決問題を中心に—. オペレーションズリサーチ. 2005.

謝辞

本研究および本稿の執筆にあたり、指導教員の永野清仁先生にご指導していただきました。丁寧にご指導いただき、深く感謝申し上げます。永野研究室の皆様にも多くのアドバイスをいただきました。ありがとうございました。

付録

4 章の計算機実験では数理最適化ソルバー GLPK の gusek を使用した。本研究の実験では、モデルファイルとデータファイルに分けたが以下は表 4.4 の出力に用いたモデルファイルである。データファイルについては割愛する。

```
param team_number integer >0;
param pair_number integer >0;
param waku_number integer >0;
param stadium_number integer >0;
param days1 integer >0;
param days2 integer >0;
param days3 integer >0;
param days4 integer >0;
param days5 integer >0;

set T := 1..team_number;
set P := 1..pair_number;
set W := 1..waku_number;
set S := 1..stadium_number;
set Wd1 := 1..days1;
set Wd2 := (days1+1)..days2;
set Wd3 := (days2+1)..days3;
set Wd4 := (days3+1)..days4;
set Wd5 := (days4+1)..days5;
set Wd1toWd3 := 1..days3;
set Wd4toWd5 := (days3+1)..waku_number;
set Pa := {1,2,3,4,5};
set Pb := {1,6,7,8,9};
set Pc := {2,6,10,11,12};
set Pd := {3,7,10,13,14};
set Pe := {4,8,11,13,15};
set Pf := {5,9,12,14,15};
set V1 := {1,4,7,10,13};
set V2 := {2,5,8,11,14};
set V3 := {3,6,9,12,15};
```

```
set PWS within {P,W,S};
set TS within {T,S};

param cost{PWS};
param distance{TS};

var x{PWS} binary;
var y1{S} binary;
var y2{S} binary;
var z integer;

minimize TEAM_COST: z;

/* st1 */
s.t. st1{i in W}:
     sum{p in P}(sum{s in S}(x[p,i,s])) = 1;

/* st2 Day1 */
s.t. st2_Wd1_Pa:
     sum{s in S}(sum{i in Wd1}(sum{p in Pa}(x[p,i,s]))) = 1;
s.t. st2_Wd1_Pb:
     sum{s in S}(sum{i in Wd1}(sum{p in Pb}(x[p,i,s]))) = 1;
s.t. st2_Wd1_Pc:
     sum{s in S}(sum{i in Wd1}(sum{p in Pc}(x[p,i,s]))) = 1;
s.t. st2_Wd1_Pd:
     sum{s in S}(sum{i in Wd1}(sum{p in Pd}(x[p,i,s]))) = 1;
s.t. st2_Wd1_Pe:
     sum{s in S}(sum{i in Wd1}(sum{p in Pe}(x[p,i,s]))) = 1;
s.t. st2_Wd1_Pf:
     sum{s in S}(sum{i in Wd1}(sum{p in Pf}(x[p,i,s]))) = 1;

/* st2 Day2*/
s.t. st2_Wd2_Pa:
     sum{s in S}(sum{i in Wd2}(sum{p in Pa}(x[p,i,s]))) = 1;
s.t. st2_Wd2_Pb:
     sum{s in S}(sum{i in Wd2}(sum{p in Pb}(x[p,i,s]))) = 1;
s.t. st2_Wd2_Pc:
     sum{s in S}(sum{i in Wd2}(sum{p in Pc}(x[p,i,s]))) = 1;
s.t. st2_Wd2_Pd:
     sum{s in S}(sum{i in Wd2}(sum{p in Pd}(x[p,i,s]))) = 1;
s.t. st2_Wd2_Pe:
```

```
     sum{s in S}(sum{i in Wd2}(sum{p in Pe}(x[p,i,s]))) = 1;
s.t. st2_Wd2_Pf:
     sum{s in S}(sum{i in Wd2}(sum{p in Pf}(x[p,i,s]))) = 1;

/* st2 Day3 */
s.t. st2_Wd3_Pa:
     sum{s in S}(sum{i in Wd3}(sum{p in Pa}(x[p,i,s]))) = 1;
s.t. st2_Wd3_Pb:
     sum{s in S}(sum{i in Wd3}(sum{p in Pb}(x[p,i,s]))) = 1;
s.t. st2_Wd3_Pc:
     sum{s in S}(sum{i in Wd3}(sum{p in Pc}(x[p,i,s]))) = 1;
s.t. st2_Wd3_Pd:
     sum{s in S}(sum{i in Wd3}(sum{p in Pd}(x[p,i,s]))) = 1;
s.t. st2_Wd3_Pe:
     sum{s in S}(sum{i in Wd3}(sum{p in Pe}(x[p,i,s]))) = 1;
s.t. st2_Wd3_Pf:
     sum{s in S}(sum{i in Wd3}(sum{p in Pf}(x[p,i,s]))) = 1;

/* st2 Day4 */
s.t. st2_Wd4_Pa:
     sum{s in S}(sum{i in Wd4}(sum{p in Pa}(x[p,i,s]))) = 1;
s.t. st2_Wd4_Pb:
     sum{s in S}(sum{i in Wd4}(sum{p in Pb}(x[p,i,s]))) = 1;
s.t. st2_Wd4_Pc:
     sum{s in S}(sum{i in Wd4}(sum{p in Pc}(x[p,i,s]))) = 1;
s.t. st2_Wd4_Pd:
     sum{s in S}(sum{i in Wd4}(sum{p in Pd}(x[p,i,s]))) = 1;
s.t. st2_Wd4_Pe:
     sum{s in S}(sum{i in Wd4}(sum{p in Pe}(x[p,i,s]))) = 1;
s.t. st2_Wd4_Pf:
     sum{s in S}(sum{i in Wd4}(sum{p in Pf}(x[p,i,s]))) = 1;

/* st2 Day5 */
s.t. st2_Wd5_Pa:
     sum{s in S}(sum{i in Wd5}(sum{p in Pa}(x[p,i,s]))) = 1;
s.t. st2_Wd5_Pb:
     sum{s in S}(sum{i in Wd5}(sum{p in Pb}(x[p,i,s]))) = 1;
s.t. st2_Wd5_Pc:
     sum{s in S}(sum{i in Wd5}(sum{p in Pc}(x[p,i,s]))) = 1;
s.t. st2_Wd5_Pd:
     sum{s in S}(sum{i in Wd5}(sum{p in Pd}(x[p,i,s]))) = 1;
```

```
s.t. st2_Wd5_Pe:
     sum{s in S}(sum{i in Wd5}(sum{p in Pe}(x[p,i,s]))) = 1;
s.t. st2_Wd5_Pf:
     sum{s in S}(sum{i in Wd5}(sum{p in Pf}(x[p,i,s]))) = 1;

/* st3 */
s.t. st3{p in P}:
     sum{s in S}(sum{i in W} (x[p,i,s])) = 1;

/*st4 */
s.t. st4_Wd1toWd3{s in S}:
     sum{p in P}(sum{i in Wd1toWd3}x[p,i,s]) = 9 * y1[s];

s.t. st4_Wd4toWd5{s in S}:
     sum{p in P}(sum{i in Wd4toWd5}x[p,i,s]) = 6 * y2[s];

/* st5 */
s.t. st5_Wd1toWd3:
     sum{s in S}y1[s] = 1;
s.t. st5_Wd4toWd5:
     sum{s in S}y2[s] = 1;

/* st6 Game1 */
s.t. st6_V1_Pa:
     sum{s in S}(sum{p in Pa}(sum{i in V1}(x[p,i,s]))) >= 1;
s.t. st6_V1_Pb:
     sum{s in S}(sum{p in Pb}(sum{i in V1}(x[p,i,s]))) >= 1;
s.t. st6_V1_Pc:
     sum{s in S}(sum{p in Pc}(sum{i in V1}(x[p,i,s]))) >= 1;
s.t. st6_V1_Pd:
     sum{s in S}(sum{p in Pd}(sum{i in V1}(x[p,i,s]))) >= 1;
s.t. st6_V1_Pe:
     sum{s in S}(sum{p in Pe}(sum{i in V1}(x[p,i,s]))) >= 1;
s.t. st6_V1_Pf:
     sum{s in S}(sum{p in Pf}(sum{i in V1}(x[p,i,s]))) >= 1;

/* st4 Game2 */
s.t. st6_V2_Pa:
     sum{s in S}(sum{p in Pa}(sum{i in V2}(x[p,i,s]))) >= 1;
s.t. st6_V2_Pb:
     sum{s in S}(sum{p in Pb}(sum{i in V2}(x[p,i,s]))) >= 1;
```

```
s.t. st6_V2_Pc:
     sum{s in S}(sum{p in Pc}(sum{i in V2}(x[p,i,s]))) >= 1;
s.t. st6_V2_Pd:
     sum{s in S}(sum{p in Pd}(sum{i in V2}(x[p,i,s]))) >= 1;
s.t. st6_V2_Pe:
     sum{s in S}(sum{p in Pe}(sum{i in V2}(x[p,i,s]))) >= 1;
s.t. st6_V2_Pf:
     sum{s in S}(sum{p in Pf}(sum{i in V2}(x[p,i,s]))) >= 1;

/* st4 Game3*/
s.t. st6_V3_Pa:
     sum{s in S}(sum{p in Pa}(sum{i in V3}(x[p,i,s]))) >= 1;
s.t. st6_V3_Pb:
     sum{s in S}(sum{p in Pb}(sum{i in V3}(x[p,i,s]))) >= 1;
s.t. st6_V3_Pc:
     sum{s in S}(sum{p in Pc}(sum{i in V3}(x[p,i,s]))) >= 1;
s.t. st6_V3_Pd:
     sum{s in S}(sum{p in Pd}(sum{i in V3}(x[p,i,s]))) >= 1;
s.t. st6_V3_Pe:
     sum{s in S}(sum{p in Pe}(sum{i in V3}(x[p,i,s]))) >= 1;
s.t. st6_V3_Pf:
     sum{s in S}(sum{p in Pf}(sum{i in V3}(x[p,i,s]))) >= 1;

/* st7 */
s.t. st7_Pa:
     sum{s in S}(sum{p in Pa}(sum{i in W}(cost[p,i,s]*x[p,i,s])))
     + sum{s in S}(distance[1,s]*(y1[s] + y2[s])) <= z;
s.t. st7_Pb:
     sum{s in S}(sum{p in Pb}(sum{i in W}(cost[p,i,s]*x[p,i,s])))
     + sum{s in S}(distance[2,s]*(y1[s] + y2[s])) <= z;
s.t. st7_Pc:
     sum{s in S}(sum{p in Pc}(sum{i in W}(cost[p,i,s]*x[p,i,s])))
     + sum{s in S}(distance[3,s]*(y1[s] + y2[s])) <= z;
s.t. st7_Pd:
     sum{s in S}(sum{p in Pd}(sum{i in W}(cost[p,i,s]*x[p,i,s])))
     + sum{s in S}(distance[4,s]*(y1[s] + y2[s])) <= z;
s.t. st7_Pe:
     sum{s in S}(sum{p in Pe}(sum{i in W}(cost[p,i,s]*x[p,i,s])))
     + sum{s in S}(distance[5,s]*(y1[s] + y2[s])) <= z;
s.t. st7_Pf:
     sum{s in S}(sum{p in Pf}(sum{i in W}(cost[p,i,s]*x[p,i,s])))
```

```
    + sum{s in S}(distance[6,s]*(y1[s] + y2[s])) <= z;

end;
```

図 目 次

表 目 次