



移動距離最小化とブレイク数最小化に基づくU12バスケットボールリーグ戦作成問題

沖本, 天太
平山, 勝敏

(Citation)

人工知能学会論文誌, 38(6):A-N31_1-A-N31_9

(Issue Date)

2023-11-01

(Resource Type)

journal article

(Version)

Version of Record

(Rights)

© 人工知能学会2023

© The Japanese Society for Artificial Intelligence 2023

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/0100492325>



移動距離最小化とブレイク数最小化に基づく U12バスケットボールリーグ戦作成問題

U12 Basketball League Scheduling Problem Based on Minimizing the Total Traveling Distance and the Number of Breaks

沖本 天太
Tenda Okimoto

神戸大学大学院海事科学研究科
Faculty of Maritime Sciences, Kobe University
tenda@maritime.kobe-u.ac.jp

平山 勝敏
Katsutoshi Hirayama

(同上)
hirayama@maritime.kobe-u.ac.jp

keywords: sports scheduling, combinatorial optimization, total traveling distance, number of breaks.

Summary

Sports scheduling is one of the widely investigated application problems in artificial intelligence and operations research. This problem can be represented as a combinatorial optimization problem, in which the date and the venue of each game must be determined, subject to a given set of constraints. In 2018, Japan Basketball Association (JBA) has started to implement the league games in the prefectures, and regarding U12 (under 12 years old), league games are currently being held in most prefectures. In this paper, the main focus is laid on the U12 Basketball League Scheduling Problem. First, a formal framework for the U12 Basketball League Scheduling based on minimizing the total traveling distance (U12-BLS^{dist}) is defined. A novel solution criterion called an egalitarian solution for U12-BLS^{dist} is also provided. Next, a formal framework for the U12 Basketball league scheduling problem based on minimizing the number of breaks (U12-BLS^{break}) is defined. Furthermore, the frameworks U12-BLS^{dist} and U12-BLS^{break} are formalized as 0-1 integer programming problems. In the experiments, we use the real data of U12 basketball league games played in Hyogo prefecture in 2018 and solve the U12-BLS^{dist} and U12-BLS^{break} problems. An optimal league scheduling and an egalitarian league scheduling for the U12-BLS^{dist}, and the minimal number of breaks for the U12-BLS^{break} are reported by comparing with the league scheduling actually used in 2018.

1. 序 論

スポーツ・スケジューリング [Rasmussen 08, Kendall 10, Ribeiro 12a, Bulck 20] とは、チーム、対戦日、開催場所等の集合に対して、与えられた制約条件を満たすように対戦表を作成する組合せ最適化問題である。スポーツ・スケジューリングは人工知能及びオペレーションズ・リサーチ分野における応用問題として広く研究されており、代表的なものに、バスケットボール [Voorhis 05, Westphal 14, Durán 19], サッカー [Goossens 09, Ribeiro 12b, Durán 17], プロ野球 [星野 18, Kim 19, Matsumura 22] 等のリーグ戦スケジューリングが挙げられる。スポーツ・スケジューリングには、各チームの移動距離の総和を最小化するような対戦表の作成を目的とした移動距離最小化問題 (Traveling Tournament Problem: TTP) [Easton 01, Miyashiro 12, Imahori 14, Durán 19] をはじめ、ホームまたはアウェイでの連続した試合数が最小となるように、各チームの開催場所を割当るブレイク数最小化問題

(Break Minimization Problem: BMP) [Jean-Charles 01, Post 06, Miyashiro 06, Rasmussen 07] や、ホームとアウェイの条件のみが先に固定された状況下で、対戦表の生成可能性を判定する Home-Away Table 許容性判定問題や、対戦相手による疲労度に関するチーム間の公平性を考慮した Carry-Over Effect 値最小化問題 [Trick 01, Miyashiro 03, Henz 04] 等の代表的なフレームワークが存在する。スポーツ・スケジューリングは、組合せ最適化、数理計画、グラフ理論、制約論理、デザイン理論等の多くの分野で研究されており、近年では国際競技会 [Bulck 23] 等も開催されている。スポーツ・スケジューリングにおいて、サッカーや野球等のプロスポーツのリーグ戦作成に関する既存研究は数多く存在するが、小中高校における地域スポーツ活動や部活動を対象とした研究は少なく、特に、U12 バスケットボールにおけるリーグ戦作成を対象とした研究は、著者らが知る限り、寡聞にして見当たらない。

日本バスケットボール協会 (JBA)*¹ は (i) 拮抗したゲー

*1 日本バスケットボール協会 (<http://www.japanbasketball.jp>)

ムを多くすることで選手及び指導者の成長を促し、(ii) JBA 登録チームに対して、一定公式試合数の確保を目的とし、都道府県内でのリーグ戦の実施を 2018 年度より開始した。兵庫県 U12 バasketボール連盟^{*2}は 2018 年度、県内の男女合わせて約 180 チームを対象に前後期リーグ戦を実施した。前期リーグでは、各チームは所属地区で実施された新人戦等の成績を基に A リーグ（上位）、B1, B2, B3 リーグ（中位）、C リーグ（下位）の 5 つのリーグに分けられ、5 月から 7 月の間に 10 試合の公式戦を行った。後期リーグでは、前期リーグの成績を基に A, B1-B3, C リーグのチームが再編成され、9 月から 12 月の間に各チーム 10 試合の公式戦を行った。本事業は、U15（中学生）においては 2019 年度まで、U12（小学生）及び U18（高校生）では 2020 年度までに完全実施を目標としていたが、2019 年度に U12 リーグ戦を JBA の規定通りに実施できたのは兵庫県のみであった。また、2020 年度以降は新型コロナウイルス感染拡大の影響により、ほとんどの地域で中止、または、実施期間や試合数を減らす等の制限された無観客試合形式で実施された。

U12 バasketボールにおけるリーグ戦作成では、前期 10 試合、後期 10 試合の計 20 試合を実施しなければならないとする総試合数に関する制約、前期リーグの全試合は 5 月から 7 月の間に、後期リーグの全試合は 9 月から 12 月の間に実施しなければならないとする実施期間に関する制約、同じチームと 2 試合以上対戦してはならないとする重複試合の禁止に関する制約、1 日の試合数は各チーム 2 試合までとする毎試合数に関する制約、会場毎の試合数に関する制約等の様々な制約条件が存在し、すべての制約条件を満たすような対戦表を作成するのは非常に困難な問題である。実際、2018 年度に兵庫県で実施された U12 バasketボール女子前期 A リーグでは重複試合が 2 件発生している。その原因として、U12 バasketボールでは競技運営をはじめ、各チームのコーチングや試合時の審判等はすべて保護者が担っているのが現状であり、リーグ戦作成に関しても、プロスポーツのように業者（専門家）に委託するのではなく、複数の保護者（人手）により数日かけて作成しているためであると考えられる。また、U12 バasketボールでは試合会場までの送迎は選手の保護者が行っているため、送迎による保護者の負担や、移動による選手の疲労を減らす必要がある。表 1 に 2018 年度の女子前期 A リーグにおける、2 チームの平均往復移動距離を示す。両チームの平均往復移動距離を見てみると、その差は約 75km あり、全試合における総移動距離の差は約 375km であった。このように、実際のリーグ戦ではチーム毎の総移動距離にばらつきがあり、現場からは不満の声が上がっている。

さらに、スポーツ・スケジューリングではブレイク数が最小となるような対戦表が望ましいとされている。ス

表 1 2018 年度前期リーグ（女子）での平均往復移動距離の実データ。

チーム名	平均移動距離
香櫨園	103.12km
北エンジェルス	179.68km

表 2 2018 年度前期リーグ（女子）でのブレイク数の実データ。

チーム名	浜脇	北エンジェルス
ブレイク数	0	3

スポーツ・スケジューリングにおいて、連続したホームまたはアウェイゲームのことをブレイクと呼び、あるチームにおける m 試合目と $m+1$ 試合目が、ホーム・ホームまたはアウェイ・アウェイで連続して行われる場合、ブレイク数は 1 となる。U12 バasketボールにおけるリーグ戦においても、連続したアウェイゲームは、送迎による保護者の負担や選手の疲労にもつながるため、ホーム・アウェイゲームを考慮した対戦表の作成が必要である。表 2 に 2018 年度の女子前期 A リーグにおける、2 チームの 10 試合中のブレイク数を示す。両チームのブレイク数に着目すると、その差は 3 であり、実際のリーグ戦ではブレイク数に関してもばらつきがあり、現場からは不満の声が上がっている。以上より、本研究の目的は、人手によるリーグ戦作成における負担の軽減、各チームの移動距離の総和の最小化及び移動距離に関するチーム間の平等化、ホーム・アウェイを考慮した対戦表の作成である。

本論文では U12 バasketボールにおける、各チームの総移動距離が最小となるような対戦場所を決定する U12 バasketボールリーグ戦作成 (U12 Basketball League Scheduling based on minimizing the total traveling distance: U12-BLS^{dist}) 問題のフレームワーク及び、ホームまたはアウェイでの連続した試合数の最小化を目的とし、ブレイク数最小化に基づく U12 バasketボールリーグ戦作成 (U12 Basketball league scheduling problem based on minimizing the number of breaks: U12-BLS^{break}) 問題のフレームワークをそれぞれ定義する。さらに、U12-BLS^{dist} 及び U12-BLS^{break} 問題を 0-1 整数計画問題として定式化する。実験では、2018 年度に兵庫県下で実施された U12 バasketボール後期女子 A リーグの実データを用いて、与えられた制約条件をすべて満たし、かつ、各チームの移動距離の総和が最小となるようなリーグ戦、移動距離の最大値を最小化するようなリーグ戦、各チームにおけるブレイク数の総和を最小化するようなリーグ戦をそれぞれ作成し、実際に用いられたリーグ戦と比較・評価する。

本論文は序論と結言を含めて全体を 5 章で構成している。次章では U12-BLS^{dist} 問題について、第 3 章では U12-BLS^{break} 問題について紹介する。第 4 章では、2018 年度に兵庫県下で実施された U12 バasketボール後期 A リーグ（女子ランク A の 16 チーム）の実データを用いて、U12-BLS^{dist} 及び U12-BLS^{break} 問題を求解する。最後に、本研究の結論と今後の課題について述べる。

^{*2} 兵庫県 U12 バasketボール連盟
(<http://u12.hyogobasketball.jp/>)

2. 移動距離最小化に基づく U12 バスケットボールリーグ戦作成問題

本章では、各チームの総移動距離が最小となるような対戦場所を決定する U12 バスケットボールリーグ戦作成 (U12 Basketball League Scheduling based on minimizing the total traveling distance: U12-BLS^{dist}) 問題のフレームワークを定義する。まず U12-BLS^{dist} に関する基本用語及び制約条件を与える。また U12-BLS^{dist} におけるチーム間の総移動距離に関する平等な解を定義する。次に U12-BLS^{dist} を 0-1 整数計画問題として定式化する。スポーツ・スケジューリングにおける古典的な Traveling Tournament Problem (TTP) [Easton 01, Miyashiro 12, Imahori 14, Durán 19] は、各チームの移動距離が最小となるような巡回路を決定する問題である。一方、U12-BLS^{dist} 問題は各対戦に対して試合会場を割り当てる問題であり、各チームの移動距離は、連続試合の対戦相手と関係なく、どの会場で試合を実施するかにより依存する。

基本用語

- $T = \{1, \dots, n\}$: チームの集合
- $D = \{1, \dots, m\}$: 対戦日 (休日・祝日) の集合
- $X = \{x_{ijk} \mid i, j \in T (i < j), k \in D\}$: 対戦相手と対戦日に関するバイナリ変数の集合。変数 x_{ijk} は、チーム i と j が k 日に対戦する場合 1、そうでない場合 0 の値をとる。
- $C = \{c_1, \dots, c_r\}$: 制約の集合
- $T_s = \{q_1, \dots, q_t\}$: 各チームの拠点校の集合
- $P = \{p_1, \dots, p_s\}$: 試合が行われる試合会場の集合
- $\alpha: T \rightarrow T_s$: 各チームの拠点校を返す写像
- $\beta: D \rightarrow P$: 対戦日から試合会場を返す写像
- $dis: T_s \times P \rightarrow \mathbb{R}$: 試合会場までの距離を返す関数

制約条件

- 制約 1 (総試合数に関する制限): 各チームの試合数は前期リーグ 10 試合、後期リーグ 10 試合とする。
- 制約 2 (対戦日の試合数に関する制限): 試合がある場合、各チームの試合数は 1 日に 2 試合までとする。
- 制約 3 (各会場の試合数に関する制限): 各試合会場では、その日の対戦可能な試合数が決められている。
- 制約 4 (重複試合の禁止): 同じ期間 (前期または後期) に同じ相手と 2 試合以上対戦してはならない。

以下、U12-BLS^{dist} 及び U12-BLS^{dist} 問題を定義する。
定義 1 (U12-BLS^{dist}). 移動距離最小化に基づく U12 バス

ケットボールリーグ戦作成 (U12-BLS^{dist}) は、 X を変数の集合、 D を対戦日の集合、 C を制約の集合、 T_s を拠点校の集合、 P を試合会場の集合、 α を各チームの拠点校を返す写像、 β を日付から試合会場を返す写像、 dis を拠点校から試合会場までの距離を返す関数とし、以下の組により定義される。

$$\text{U12-BLS}^{\text{dist}} = \langle X, D, C, T_s, P, \alpha, \beta, dis \rangle \quad (1)$$

定義 2 (U12-BLS^{dist} 問題).

入力: U12 バスケットボールリーグ戦作成 U12-BLS^{dist},
質問: 移動距離の総和が最小となる対戦表をみつけれよ。

以下、U12-BLS^{dist} 問題における平等な解を定義する。

定義 3 (平等性). 移動距離最小化に基づく U12 バスケットボールリーグ戦作成 (U12-BLS^{dist}) において、あるチーム $i \in T$ ($1 \leq i \leq n$) の総移動距離を d_i とし、すべてのチームの総移動距離を $\vec{d}$ -ベクトルと呼び、 $\vec{d} = (d_1, \dots, d_n)$ と記述する。また、2つの $\vec{d}$ -ベクトル $\vec{d}'$ と $\vec{d}''$ に関して、両者の各要素の総和が等しいとき、すなわち、 $\sum_i d'_i = \sum_i d''_i$ が成立するとき、 $\vec{d}'$ と $\vec{d}''$ は同等であるという。同等な $\vec{d}$ -ベクトルからなる集合を $\bar{D}$ と記述する。また $\bar{D}$ 上の前順序は $\preceq_{lex}$ により与えられるものとする。すなわち、 $\forall \vec{d}', \vec{d}'' \in \bar{D}$ に関して、 $\vec{d}'$ が辞書式順序において $\vec{d}''$ より先行している、またそのときに限り、 $\vec{d}' \preceq_{lex} \vec{d}''$ と定義する。ある $\vec{d}$ -ベクトル $\vec{d}'$ が平等であるとは、 $\vec{d}'' \preceq_{lex} \vec{d}'$ となるような $\vec{d}'$ と同等な $\vec{d}''$ が存在しないことを意味する。

0-1 整数計画法に基づく U12-BLS^{dist} 問題

兵庫県下で実施された U12 バスケットボール後期女子 A リーグの実データに基づく U12-BLS^{dist} 問題を 0-1 整数計画問題として定式化する。各チームの移動距離の総和を最小化するような目的関数は、 x_{ijk} をバイナリ変数、 d_{ijk} を拠点校から試合会場までの移動距離とし、以下で与えられる。式 (2) は変数 x_{ijk} 及び x_{jik} の両変数を含むため、全体を 1/2 倍している。また、 d_{ijk} はチーム i と j の拠点校から試合会場、すなわち、 $\beta(k)$ までの片道移動距離の合計を表し、関数 $dis: T_s \times P \rightarrow \mathbb{R}$ により計算されるものとする。

$$\min. \sum_{ijk} d_{ijk} \cdot x_{ijk} \quad (2)$$

変数 x_{ijk} はバイナリ変数を表し、チーム i と j が k 日に対戦する場合は 1、そうでない場合は 0 となる。ここでは、実データより $1 \leq i, j \leq 16, 1 \leq k \leq 15$ とする。

$$x_{ijk} \in \{0, 1\} \quad (3)$$

総試合数に関する制限 (制約 1)。ここで、 v は各チームの総試合数を表す。

$$\bigwedge_{i \in T} \sum_{j, k} x_{ijk} = v \quad (4)$$

対戦日の試合数に関する制限 (制約 2). ここでは, 試合がある場合は各チーム 2 試合行うので, 以下となる.

$$(\bigwedge_{i \in T} \bigwedge_{k \in D} \sum_j x_{ijk} = 2) \vee (\bigwedge_{i \in T} \bigwedge_{k \in D} \sum_j x_{ijk} = 0) \quad (5)$$

具体的には, 式 (7) を以下のように定式化した.

$$\bigwedge_{i \in T} \bigwedge_{k \in D} \sum_{j \in T} x_{ijk} \leq 2$$

$$\bigwedge_{i \in T} \bigwedge_{k \in D} (1 - x_{i1k}) + x_{i2k} + x_{i3k} + \dots + x_{ink} \geq 1$$

$$\bigwedge_{i \in T} \bigwedge_{k \in D} x_{i1k} + (1 - x_{i2k}) + x_{i3k} + \dots + x_{ink} \geq 1$$

$$\bigwedge_{i \in T} \bigwedge_{k \in D} x_{i1k} + x_{i2k} + (1 - x_{i3k}) + \dots + x_{ink} \geq 1$$

...

$$\bigwedge_{i \in T} \bigwedge_{k \in D} x_{i1k} + x_{i2k} + x_{i3k} + \dots + (1 - x_{ink}) \geq 1$$

各会場の試合数に関する制限 (制約 3). ここで, g_k は各試合会場で実施可能な総試合数を表す. また以下は変数 x_{ijk} 及び x_{jik} の両変数を含むため, $2 \cdot g_k$ となる.

$$\bigwedge_{k \in D} \sum_{i,j} x_{ijk} = 2 \cdot g_k \quad (6)$$

重複試合を禁止 (制約 4). チーム i は j と対戦する場合は 1 回のみで, 対戦しない場合は 0 となる.

$$\bigwedge_{i \in T} \bigwedge_{j \in T} \sum_k x_{ijk} \leq 1 \quad (7)$$

次に, 定義 3 で示した平等なリーグ戦の作成を目的とした U12-BLS^{dist} 問題の定式化を以下に与える. ここでは, 制約 1 から 4 に対応する式 (4) から式 (7) は上述したものと同一であるため省略する. まず, 全チームの移動距離の総和に関する最適値を保証し, かつ, 各チームの総移動距離の最大値を最小化するような目的関数を示す. 式 (8) は ϵ の値を最小化する目的関数を表す. 式 (9) は各チームの往復移動距離が ϵ 以下でなければならないとする制約条件を表す. ここで, d_{ijk} は各チームの拠点校から試合会場までの片道移動距離を示している. 式 (10) は上述の U12-BLS^{dist} 問題で得られた最適値を定数 d^* とし, 総移動距離の最適値を保証する制約条件である.

$$\min. \epsilon \quad (8)$$

$$\bigwedge_{i \in T} \sum_{j,k} d_{ijk} \cdot x_{ijk} \leq \epsilon \quad (9)$$

$$\frac{1}{2} \sum_{i,j,k} d_{ijk} \cdot x_{ijk} = d^* \quad (10)$$

3. ブレーク数最小化に基づく U12 バスケットボールリーグ戦作成問題

本章では, ブレーク数最小化に基づく U12 バスケットボールリーグ戦作成 (U12 Basketball league scheduling problem based on minimizing the number of breaks: U12-BLS^{break}) 問題のフレームワークを定義する. まず, スポーツ・スケジューリングにおけるブレーク数について概説する. また, U12-BLS^{break} に関する基本用語を与える. 但し, ここでは U12-BLS^{dist} 問題と同じ基本用語は省略する. 次に, U12-BLS^{dist} の時と同様に, U12-BLS^{break} を 0-1 整数計画問題として定式化する.

スポーツ・スケジューリングにおいて, 連続したホームまたはアウェイゲームのことをブレークと呼び, あるチームにおける m 試合目と $m+1$ 試合目が, ホーム・ホームまたはアウェイ・アウェイで連続して行われる場合, ブレーク数は 1 となる. 例えば, 表 3 のチーム A は, 1 試合目が home, 2 試合目が away, 3 試合目が home, 4 試合目が away であり, ホーム・ホームまたはアウェイ・アウェイのような連続した試合が存在しない. したがって, チーム A のブレーク数は 0 となる. 一方, チーム B では, 1 試合目と 2 試合目のゲームがホームで連続して行われているため, ブレーク数は 1 となる. 同様に, チーム C に関しては, 2 試合目と 3 試合目のゲームが連続したアウェイゲームであり, 3 試合目と 4 試合目も連続したアウェイゲームであるため, ブレーク数は 2 となる.

基本用語

- $A = \{a_1, \dots, a_7\}$: エリアの集合 (兵庫県には, 神戸地区, 阪神西地区, 阪神東地区, 丹有地区, 東西播地区, 但馬地区, 淡路地区の 7 地区が存在する.)
- $L = \{1, \dots, l\}$: 試合数の集合
- $Y = \{y_{ijal} \mid i, j \in T (i \neq j), a \in A, l \in L\}$: 変数の集合. 変数 y_{ijal} はバイナリ変数を表し, チーム i にとって l 試合目となる i と j の対戦がエリア a で行われる場合は 1, そうでない場合は 0 の値をとる.
- $H = \{H_l^i \mid i \in T, l \in L\}$: ホームゲームの集合
- $B = \{B_{l(l+1)}^i \mid i \in T, l \in L\}$: ブレーク数の集合

定義 4. ブレーク数最小化に基づく U12 バスケットボールリーグ戦作成 (U12 Basketball league scheduling problem based on minimizing the number of breaks: U12-BLS^{break}) は, Y を変数の集合, C を制約の集合, H をホームゲームの集合, B をブレーク数の集合, ψ をブレーク数を返す関数とし, 以下の組により定義される.

$$\text{U12-BLS}^{\text{break}} = \langle Y, C, H, B, \psi \rangle \quad (11)$$

定義 5 (U12-BLS^{break} 問題).

表 3 ブレイク数の例.

	1 試合目	2 試合目	3 試合目	4 試合目
チーム A	home	away	home	away
チーム B	home	home	away	home
チーム C	home	away	away	away

入力: U12 バスケットボールリーグ戦作成 U12-BLS^{break},

質問: ブレイク数の総和が最小となる対戦表をみつけよ.

0-1 整数計画法に基づく U12-BLS^{break} 問題

兵庫県で実施された U12 バスケットボール後期女子 A リーグの実データに基づく U12-BLS^{break} 問題を 0-1 整数計画問題として以下に定式化する. 各チームのブレイク数の総和を最小化するような目的関数は, $B_{l(l+1)}^i$ を変数とし,

$$\min. \sum_{i,l} B_{l(l+1)}^i \quad (12)$$

で与えられる. $B_{l(l+1)}^i \in \{0,1\}$ はバイナリ変数を表し, チーム i の l と $l+1$ 試合目がホーム・ホームまたはアウェイ・アウェイの場合は 1, そうでない場合は 0 となる.

連続したホームゲームに対してブレイク数を加算する制約. 2 試合連続でホームゲームを行う場合, すなわち, H_l^i と $H_{l(l+1)}^i$ が共に 1 の値をとるとき, ブレイク数が加算される. $H_l^i \in \{0,1\}$ と $H_{l(l+1)}^i \in \{0,1\}$ は共にバイナリ変数を表し, チーム i の l 試合目 ($l+1$ 試合目) がホームゲームである場合は 1, そうでない場合は 0 となる.

$$\bigwedge_{i \in T} \bigwedge_{l \in L} \{(1 - H_l^i) + (1 - H_{l(l+1)}^i) + B_{l(l+1)}^i\} \geq 1 \quad (13)$$

連続したアウェイゲームに対してブレイク数を加算する制約. 2 試合連続でアウェイゲームを行う場合, すなわち, H_l^i と $H_{l(l+1)}^i$ が 0 のとき, ブレイク数が加算される.

$$\bigwedge_{i \in T} \bigwedge_{l \in L} \{(H_l^i + H_{l(l+1)}^i) + B_{l(l+1)}^i\} \geq 1 \quad (14)$$

試合会場エリアが自チームのホームエリアであるかを判定する制約. ここで, チーム i にとって l 試合目がホームでの試合なら $H_l^i = 1$, アウェイであれば $H_l^i = 0$ となる. ここで, 変数 y_{ija_l} は, チーム i にとって l 試合目となる i と j の対戦がエリア a_i で行われる場合は 1, そうでない場合は 0 の値をとる. また, a_i はチーム i のホームエリアを表す.

$$\bigwedge_{i \in T} \bigwedge_{l \in L} \frac{1}{2} \sum_j y_{ija_l} = H_l^i \quad (15)$$

式 (5) に対応する制約条件であり, 各チーム, l 試合目に同一エリア内で試合を行う場合は 2 試合行う. 式 (16)

は式 (5) と同様の方法で定式化した.

$$(\bigwedge_{i \in T} \bigwedge_{a \in A} \bigwedge_{l \in L} \sum_j y_{ija_l} = 2) \vee (\bigwedge_{i \in T} \bigwedge_{a \in A} \bigwedge_{l \in L} \sum_j y_{ija_l} = 0) \quad (16)$$

同一エリア内で 2 試合行う制約.

$$\bigwedge_{i \in T} \bigwedge_{l \in L} \sum_{j,a} y_{ija_l} = 2 \quad (17)$$

式 (6) に対応する制約条件であり, ここで, r_a は各エリア (試合会場) で実施可能な試合数を表す.

$$\bigwedge_{a \in A} \sum_{i,j,l} y_{ija_l} \leq 2 \cdot r_a \quad (18)$$

式 (7) に対応する制約条件.

$$\bigwedge_{i \in T} \bigwedge_{j \in T} \sum_{a,l} y_{ija_l} \leq 1 \quad (19)$$

もしチーム i と j が対戦する場合, 両チームは同じエリア (試合会場) で対戦しなければならないという制約.

$$\bigwedge_{i \in T} \bigwedge_{j \in T} \sum_{a,l} y_{ija_l} = \sum_l y_{jial} \quad (20)$$

4. 評価実験

本章では, 2018 年度に兵庫県で実施された U12 バスケットボール後期女子 A リーグの実データを用いて, 以下の問題を最適化ソルバー CPLEX を用いて求解した.

実験 1: U12-BLS^{dist} 問題

実験 2: U12-BLS^{break} 問題

実験 1 では, U12-BLS^{dist} 問題において, すべての制約条件を満たし, かつ, 各チームの移動距離の総和が最小となるような最適リーグ戦を求解する. また, 全チームの移動距離の総和に関する最適値を保証し, かつ, 各チームの総移動距離の最大値を最小化するような平等なリーグ戦を求解する. 実験 2 では, U12-BLS^{break} 問題において, すべての制約条件を満たし, かつ, 各チームのブレイク数の総和を最小化するようなリーグ戦を求解する. 一般に, U12 バスケットボールでは, プロバスケットボールのようなホームという明確な定義はない. そこで, 本実験では各チームのホームを以下のように設定した.

- 設定 1: チームの拠点校が属する地区をホームとする.
- 設定 2: 各チームの拠点校と各試合会場への片道移動距離が最短となるような試合会場をホームとする.

実験設定

以下, 実験 1 及び 2 における実験設定について説明する. 実験では 2018 年度に兵庫県で実施された U12 バスケットボール後期女子 A リーグの実データを用いた. 表

表 4 後期女子 A リーグにおける各チームの総移動距離.

チーム名	成徳	北エン	福田	香櫨園	塚口	武庫	浜脇	多田東
実データ	880km	633km	798km	1,018km	947km	853km	1024km	895km
提案手法	836km	608km	636km	888km	944km	876km	886km	816km
+Minimax	878km	800km	636km	820km	902km	776km	828km	850km
チーム名	西宮浜	宝塚 BR	川西	荻野	北淡	松陽	三田	氷上東
実データ	1,112km	766km	982km	953km	1,021km	728km	940km	656km
提案手法	842km	932km	854km	834km	596km	642km	524km	270km
+Minimax	878km	794km	854km	902km	596km	642km	558km	270km

表 5 後期女子 A リーグにおける, 実際のリーグ戦と提案手法で得られたリーグ戦の総移動距離, 作成時間, 分散値.

U12-BLS ^{dist}	実データ	提案手法	+Minimax
総移動距離	14,206km	11,984km	11,984km
作成時間	人手で作成	4 秒	173 秒
分散値	18.2	32.0	27.0

A.1 に後期女子 A リーグの 16 チームのチーム名及び, その拠点校と拠点エリア (ホーム) を示す. 例えば, 宝塚 BR は阪神西地区に所属するチームであり, その拠点校は宝塚市立売布小学校である. 次に, 表 A.2 に後期女子 A リーグで使用された試合会場, エリア, 試合可能数の詳細を示す. 例えば, 丹有地区には 4 つの試合会場があり, この地区では 41 試合の対戦が可能であることが分かる.

実験 1 : U12-BLS^{dist} 問題

実験 1 では, すべての制約条件 (制約 1 から 4) を満たし, かつ, 各チームの移動距離の総和が最小となるような最適ナリーグ戦が得られた. 表 4 に後期女子 A リーグ戦における実データ, 提案手法, +Minimax によって得られた各チームの総移動距離の詳細を示す. ここで, +Minimax は提案手法により得られた全チームの総移動距離の最適値を保証し, かつ, 各チームの総移動距離の最大値を最小化するような平等なリーグ戦を求解する. 表 4 より, 提案手法による武庫と宝塚 BR の総移動距離, すなわち, 876km と 932km は実データの 853km と 766km と比べ増加していたが, 残りの 14 チームの総移動距離は実際の総移動距離と比べ減少していた. 特に, 北淡の実際の総移動距離は 1,021km であったが, 提案手法では 596km となり, 大きく減少した. 表 5 に後期女子 A リーグ戦における全 16 チームの実際の総移動距離, 提案手法及び +Minimax における総移動距離の最適値をそれぞれ示す. +Minimax は, 定義 3 で示した同等な最適値の中から平等な解を求める手法であるため, 総移動距離の値は提案手法と同じになる. 表 5 より, 実際に使用された全 16 チームの総移動距離は 14,206km であった. これに対し, 提案手法及び +Minimax では, 総移動距離の総和は 11,984km であり, その差は 2,222km であった. また, 実際のリーグ戦は人手により数日かけて作成されていたの

に対し, 提案手法では最適ナリーグ戦が 4 秒, +Minimax では最適かつ, 移動距離の最大値が最小となるような, 各チームにとって平等なリーグ戦が 173 秒で求解できた. その他にも, 提案手法と +Minimax における分散値を求めた. +Minimax における分散値は 27.0 であり, 提案手法における分散値 32.0 よりも小さかった. このことは, +Minimax ではチーム間の総移動距離のばらつきをミニマックス値を用いて小さくしているためである.

実験 2 : U12-BLS^{break} 問題

実験 2 では, すべての制約条件 (制約 1 から 4) を満たし, かつ, 各チームのブレイク数の総和が最小となるような最適ナリーグ戦が得られた. 表 6 に後期女子 A リーグにおける各チームの設定 1 及び 2 におけるブレイク数と総移動距離の詳細を示す. ここで, 設定 1 は各チームの拠点校が属する地区をホームとした場合, 設定 2 は各チームの拠点校と各試合会場への片道移動距離が最短となるような試合会場をホームとした場合の結果を示す. 表 6 より, いくつかのチームにおいてブレイク数が減少しているのが分かる. 例えば, 実データにおける, 北淡, 松陽, 三田, 氷上東のブレイク数はそれぞれ 3, 1, 1, 3 であったが, 設定 1 ではすべて 0, 設定 2 ではすべて 2 に減少していた. また, 各チームの総移動距離に関しても, 設定 1 では 16 チーム中 10 チームが, 設定 2 では 16 チーム中 7 チームが実際の総移動距離に対して減少していた. 表 7 に後期女子 A リーグ戦における, 実データと提案手法 (設定 1 及び 2) で得られたブレイク数, 総移動距離, 分散値を示す. 表 7 より, 実際に使用されたリーグ戦における全 16 チームのブレイク数の総和は 56 であった. これに対し, 提案手法では, 全 16 チームのブレイク数の総和は設定 1 で 48, 設定 2 で 42 であった. さらに, 提案手法における各チームの移動距離の総和は設定 1 で 13,066km, 設定 2 で 14,182km であり, 実データの 14,206km よりも減少していた. 以上の結果から, 提案手法ではブレイク数及び各チームの移動距離の総和を共に減少させるリーグ戦の作成に成功した. ブレイク数に関しては設定 2 が, 総移動距離に関しては設定 1 がよく, 分散値に関しては設定 2 より設定 1 の方が小さかった. また, 実行時間は両設定共に 324 秒であった.

表 6 後期女子 A リーグにおける各チームの設定 1 及び 2 におけるブレイク数と総移動距離.

	チーム名	成徳	北エン	福田	香櫨園	塚口	武庫	浜脇	多田東
ブレイク数	実データ	4	4	4	4	4	4	4	4
	設定 1	4	4	4	4	4	4	4	4
	設定 2	4	2	2	2	2	4	2	2
総移動距離	実データ	880km	633km	798km	1,018km	947km	853km	1024km	895km
	設定 1	722km	674km	834km	965km	993km	841km	959km	974km
	設定 2	899km	643km	817km	929km	992km	1,077km	1,016km	1,055km
	チーム名	西宮浜	宝塚 BR	川西	荻野	北淡	松陽	三田	氷上東
ブレイク数	実データ	4	4	4	4	3	1	1	3
	設定 1	4	4	4	4	0	0	0	0
	設定 2	4	2	4	4	2	2	2	2
総移動距離	実データ	1,112km	766km	982km	953km	1,021km	728km	940km	656km
	設定 1	913km	915km	846km	762km	851km	512km	704km	603km
	設定 2	899km	864km	911km	953km	1,119km	677km	840km	501km

表 7 後期女子 A リーグにおける, 実際のリーグ戦と提案手法で得られたリーグ戦のブレイク数, 総移動距離, 分散値.

U12-BLS ^{break}	実データ	設定 1	設定 2
ブレイク数	56	48	42
総移動距離	14,206km	13,066km	14,182km
分散値	18.2	19.0	25.8

表 8 後期女子 A リーグにおける, 実際のリーグ戦と提案手法で得られたリーグ戦のブレイク数, 総移動距離, 分散値.

	実際	U12-BLS ^{dist}	U12-BLS ^{break}
総移動距離	14,206km	11,984km	13,066km (14,182km)
ブレイク数	56	61	48 (42)

最後に, 表 8 に U12-BLS^{dist} 及び U12-BLS^{break} 問題の実験結果をまとめる. U12-BLS^{break} における設定 2 の結果は括弧内に示す. 総移動距離に関しては U12-BLS^{dist} 問題では 11,984km であった. また U12-BLS^{break} 問題でも 13,066km (14,182km) であり, 実データの 14,206km よりも小さかった. ブレイク数に関しては, U12-BLS^{break} 問題では 48 (42) であり, 実データの 56 よりも小さかった. 但し, U12-BLS^{dist} 問題におけるブレイク数は 61 であった. 以上の結果から, 本研究では, 各チームの移動距離の総和が最小となるようなリーグ戦, 総移動距離の最適値を保証し, かつ, 移動距離に関するチーム間の平等性を考慮したリーグ戦及び, 各チームのブレイク数の総和を最小化するようなリーグ戦の作成に成功した.

5. お わ り に

スポーツ・スケジューリングとは, チーム, 対戦日, 開催場所等の集合に対して, 与えられた制約条件を満たす

ように対戦表を作成する組合せ最適化問題である. 日本バスケットボール協会 (JBA) は (i) 拮抗したゲームを多くすることで選手及び指導者の成長を促し, (ii) JBA 登録チームに対して, 一定公式試合数の確保を目的とし, 都道府県内でのリーグ戦の実施を 2018 年度より開始した. 本論文では, 各チームの総移動距離が最小となるような対戦場所を決定する U12 バスケットボールリーグ戦作成 (U12 Basketball League Scheduling based on minimizing the total traveling distance: U12-BLS^{dist}) 問題のフレームワーク及び, ブレイク数最小化に基づく U12 バスケットボールリーグ戦作成 (U12 Basketball league scheduling problem based on minimizing the number of breaks: U12-BLS^{break}) 問題のフレームワークをそれぞれ定義した. さらに, U12-BLS^{dist} 及び U12-BLS^{break} 問題を 0-1 整数計画問題として定式化した. 実験では, 2018 年度に兵庫県下で実施された U12 バスケットボール後期女子 A リーグの実データを用いて, 与えられた制約条件をすべて満たし, かつ, 各チームの移動距離の総和を最小化するようなリーグ戦, 移動距離に関するチーム間の平等性を考慮したリーグ戦, 各チームのブレイク数の総和を最小化するようなリーグ戦の作成に成功した. 今後の課題として, 専門家ではなく, 保護者でも利用可能なシステムの開発が挙げられる. 次に, U15 や U18 バスケットボール等の部活動におけるリーグ戦作成が挙げられる. その他にも, 移動距離の最小化とブレイク数の最小化は等価な問題であることが指摘されているが [Miyashiro 05], U12-BLS^{dist} と U12-BLS^{break} を同時に考慮した 2 目的最適化問題への拡張が挙げられる.

◇ 参 考 文 献 ◇

- [Bulck 20] Bulck, D. V., Goossens, D., Schönberger, J., and Guajardo, M.: RobinX: A three-field classification and unified data format for round-robin sports timetabling, *European Journal of Operational Research*, Vol. 280, No. 2, pp. 568–580 (2020)

- [Bulck 23] Bulck, D. V. and Goossens, D.: The international timetabling competition on sports timetabling (ITC2021), *European Journal of Operational Research*, Vol. 308, No. 3, pp. 1249–1267 (2023)
- [Durán 17] Durán, G., Guajardo, M., and Sauré, D.: Scheduling the South American Qualifiers to the 2018 FIFA World Cup by integer programming, *European Journal of Operational Research*, Vol. 262, No. 3, pp. 1109–1115 (2017)
- [Durán 19] Durán, G., Durán, S., Marenco, J., Mascialino, F., and Rey, P.: Scheduling Argentina's professional basketball leagues: A variation on the Travelling Tournament Problem, *European Journal of Operational Research*, Vol. 275, No. 3, pp. 1126–1138 (2019)
- [Easton 01] Easton, K., Nemhauser, G., and Trick, M.: The Traveling Tournament Problem Description and Benchmarks, *Principles and Practice of Constraint Programming — CP 2001*, pp. 580–584 (2001)
- [Goossens 09] Goossens, D. and Spieksma, F.: Scheduling the Belgian Soccer League, *Interfaces*, Vol. 39, pp. 109–118 (2009)
- [Henz 04] Henz, M., Müller, T., and Thiel, S.: Global constraints for round robin tournament scheduling, *European Journal of Operational Research*, Vol. 153, No. 1, pp. 92–101 (2004)
- [Imahori 14] Imahori, S., Matsui, T., and Miyashiro, R.: A 2.75-approximation algorithm for the unconstrained traveling tournament problem, *Annals of Operations Research*, Vol. 218, No. 1, pp. 237–247 (2014)
- [Jean-Charles 01] Jean-Charles, R.: Minimization of the number of breaks in sports scheduling problems using constraint programming, *DIMACS Series in Discrete Mathematics and Theoretical Computer Science*, Vol. 57, pp. 115–130 (2001)
- [Kendall 10] Kendall, G., Knust, S., Ribeiro, C., and Urrutia, S.: Scheduling in sports: An annotated bibliography, *Computers & Operations Research*, Vol. 37, No. 1, pp. 1–19 (2010)
- [Kim 19] Kim, T.: Optimal approach to game scheduling of multiple round-robin tournament: Korea professional baseball league in focus, *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 136, pp. 95–105 (2019)
- [Matsumura 22] Matsumura, M. and Hasuike, T.: Sports Scheduling of Professional Baseball Games for the Purpose of Increasing Audiences, *International Journal of Japan Association for Management Systems*, Vol. 14, No. 1, pp. 55–62 (2022)
- [Miyashiro 03] Miyashiro, R., Iwasaki, H., and Matsui, T.: Characterizing Feasible Pattern Sets with a Minimum Number of Breaks, in *Practice and Theory of Automated Timetabling IV*, pp. 78–99 (2003)
- [Miyashiro 05] Miyashiro, R. and Matsui, T.: A polynomial-time algorithm to find an equitable home-away assignment, *Operations Research Letters*, Vol. 33, pp. 235–241 (2005)
- [Miyashiro 06] Miyashiro, R. and Matsui, T.: Semidefinite programming based approaches to the break minimization problem, *Computers & Operations Research*, Vol. 33, No. 7, pp. 1975–1982 (2006)
- [Miyashiro 12] Miyashiro, R., Matsui, T., and Imahori, S.: An approximation algorithm for the traveling tournament problem, *Annals of Operations Research*, Vol. 194, No. 1, pp. 317–324 (2012)
- [Post 06] Post, G. and Woeginger, G.: Sports tournaments, home-away assignments, and the break minimization problem, *Discrete Optimization*, Vol. 3, No. 2, pp. 165–173 (2006)
- [Rasmussen 07] Rasmussen, R. and Trick, M.: A Benders approach for the constrained minimum break problem, *European Journal of Operational Research*, Vol. 177, No. 1, pp. 198–213 (2007)
- [Rasmussen 08] Rasmussen, R. and Trick, M.: Round robin scheduling - a survey, *European Journal of Operational Research*, Vol. 188, No. 3, pp. 617–636 (2008)
- [Ribeiro 12a] Ribeiro, C.: Sports scheduling: Problems and applications, *International Transactions in Operational Research*, Vol. 19, No. 1-2, pp. 201–226 (2012)
- [Ribeiro 12b] Ribeiro, C. and Urrutia, S.: Scheduling the Brazilian Soccer Tournament: Solution Approach and Practice, *Interfaces*, Vol. 42, No. 3, pp. 260–272 (2012)
- [Trick 01] Trick, M.: A Schedule-Then-Break Approach to Sports Timetabling, in *Practice and Theory of Automated Timetabling III*, pp. 242–253 (2001)
- [Voorhis 05] Voorhis, T. V.: College basketball scheduling with travel swings, *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 48, No. 2, pp.

163–172 (2005)

[Westphal 14] Westphal, S.: Scheduling the German Basketball League, *Interfaces*, Vol. 44, No. 5, pp. 498–508 (2014)

[星野 18] 星野 怜旺, 椎名 孝之, 森戸 晋, 今泉 淳: プロ野球の試合において雨天中止の可能性を考慮したスケジュールの作成-2017年セ・リーグ公式戦の日程の場合-, 日本知能情報ファジィ学会誌, Vol. 30, No. 4, pp. 652–657 (2018)

〔担当委員: 小林 靖明〕

2023 年 3 月 23 日 受理

◇ 付 録 ◇

表 A.1 後期女子 A リーグのチーム名及び、その拠点校とエリア。

チーム名	拠点校	エリア
成徳	神戸市立成徳小学校	神戸
北エンジェルス	神戸市立桂木小学校	神戸
福田	神戸市立福田小学校	神戸
香櫨園	西宮市立香櫨園小学校	阪神西
塚口	尼崎市立塚口小学校	阪神東
武庫	尼崎市立武庫小学校	阪神東
浜脇	西宮市立浜脇小学校	阪神西
多田東	川西市立多田東小学校	阪神東
西宮浜	西宮市立西宮浜小学校	阪神西
宝塚 BR	宝塚市立売布小学校	阪神西
川西	川西市立川西小学校	阪神東
荻野	伊丹市立荻野小学校	阪神東
北淡	淡路市立北淡小学校	淡路
松陽	高砂市立伊保南小学校	東西播
三田	三田市立三田小学校	丹有
氷上東	丹波市立東小学校	丹有

表 A.2 後期女子 A リーグの試合会場名, エリア, 試合可能数。

試合会場名	エリア	試合可能数
高砂市立伊保南小学校	東西播	4
青垣住民センター体育館	丹有	27
春日体育センター	丹有	4
柏原住民センター体育館	丹有	4
三塚ふれあいセンター愛育館	丹有	6
和田山体育センター	但馬	13
養父市立八鹿総合体育館	但馬	8
南あわじ市文化体育館	淡路	11
富島体育センター	淡路	3

著 者 紹 介

**沖本 天太(正会員)**

2008 年 フライブルグ大学（ドイツ）より Diplom 授与 (Diplom Informatiker). 2012 年 九州大学大学院システム情報科学府より博士（情報科学）の学位を授与. 2012 年 国立情報科学研究所にて新領域融合研究センター (TRIC) の特任助教. 2014 年 4 月より, 神戸大学大学院海事科学研究科の准教授. 2018 年 FIT2018 船井ベストペーパー賞受賞. マルチエージェントシステム, 分散制約最適化, 協力ゲーム理論, スケジューリング, 災害研究に従事.

**平山 勝敏(正会員)**

1995 年 大阪大学大学院基礎工学研究科博士後期課程修了. 工学博士. 1995 年 神戸商船大学助手. 1997 年 同講師. 2001 年 同助教授. 2003 年 神戸大学海事科学部助教授 (神戸大学と神戸商船大学の統合による). 2013 年 神戸大学大学院海事科学研究科教授. 1999 年-2000 年 カーネギーメロン大学ロボティクス研究所客員研究員 (文部省在外研究員). マルチエージェントシステム, 制約充足/SAT, 組合せ最適化に関する研究に従事. 2010 年 IFAAMAS Influential Paper Award 受賞. 2015 年 日本ソフトウェア科学会 2014 年度基礎研究賞受賞. 電子情報通信学会, 情報処理学会, 日本オペレーションズリサーチ学会, 日本ソフトウェア科学会 各会員.