

# 筑波大学附属病院放射線腫瘍科における放射線治療患者のスケジューリングの定式化

経営工学主専攻 201111267 多名賀 寛

指導教員：吉瀬 章子 教授

## 1. 研究背景と目的

### 1.1. 筑波大学附属病院放射線腫瘍科の放射線治療

癌治療では主に外科療法、化学療法、放射線療法の3種類の治療法があり、これらの治療法を単一もしくは組み合わせで治療が行われる。この3種類の治療法の中で、放射線療法は臓器を取り除かず、形態と機能を維持しながら治療を行うことができるという利点を持ち、放射線治療患者の中には仕事を続けながらであったり、自宅で日常生活を送りながら治療を受ける患者も少なくない。筑波大学附属病院の放射線治療はX線、陽子線等の放射線を用いて治療が行われている。特に陽子線治療は2008年に先進医療に認定されて以降、保険適用外ではあるが、幅広い患者の治療を行うことができるようになった。そのため患者数は2008年以降年々増加し、2013年度の患者数は400人超に達している。筑波大学附属病院の放射線治療患者は大きく分けて入院患者と自宅等から病院へ通う外来患者に分かれ、各患者の1日の治療の流れは下図1\*1の通りである。この流れに基づいて患者の治療スケジュールが作成される。筑波大学附属病院の放射線治療患者のスケジュールにおいては、照射と診察の間の待ち時間が発生しやすいであったり、スケジュール作成者への負担が大きい等の問題点が挙げられる。

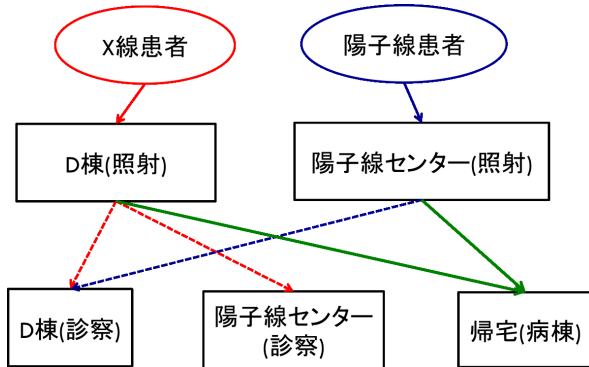


図1 陽子線・X線治療患者の1日の動き

### 1.2. 研究目的

本研究では放射線治療における医療サービスの向上に向けて、患者数の多いX線と陽子線患者を対象として、照射と診察のスケジューリングの定式化を行い、患者の都合や照射と診察との間の待ち時間を考慮した1週間の患者の照射と診察スケジュールリングシステムの作成を目指す。

\*1治療中の患者の診察は週に1, 2回のペースで行われる。

## 2. 定式化\*2

### 2.1. 記号の定義

- 基本データ
  - $W$ : 曜日(平日)の集合.
  - $T$ : 基本時間枠の集合(9時から17時).
  - $I$ : 通院中(平日毎日照射を受ける)患者の集合.
  - $J$ : その週に照射を開始する患者の集合.
  - $st_j$ : 患者  $j$  の照射開始曜日.
  - $K$ : その週に照射を終了する患者の集合.
  - $P$ : 患者の集合 ( $P = I \cup J \cup K$ ).
  - $pp_p \in \{0, 1\}$ : 患者  $p$  の属性(入院, 外来)を表す定数.
  - $\mathcal{W}_p$ : 患者  $p$  の照射予定曜日の集合.
- 照射に関するデータ
  - $demand_{p,w} \in T$ : 患者  $p$  の曜日  $w$  における希望照射時間枠.
  - $V$ : 治療種の集合 (= {“X線”, “陽子線”}).
  - $c_v$ : 治療種  $v$  の1つの時間枠あたりの照射可能人数.
  - $a_{p,v} \in \{0, 1\}$ : 患者  $p$  に対する治療種  $v$  の割り当てを表す定数.
  - $TS_w$ : 曜日  $w$  の残業を考慮に入れた時間枠の集合.
- 診察に関するデータ
  - $D$ : 医師の集合.
  - $B$ : 患者が診察を受診する棟の集合.
  - $br_b$ : 各棟の診察室数.
  - $c'$ : 1つの時間枠における医師の診察可能人数.
  - $SHIFT_{d,b,w,t} \in \{0, 1\}$ : 医師の診察シフトを表す定数.
  - $Sat_{p,d,b}$ : 患者  $p$  が医師  $d$  の診察を棟  $b$  で受診する時の満足度.
- 決定変数
  - $y_{p,w,t} \in \{0, 1\}$ : 照射割り当てを表す決定変数 ( $\forall p, \forall w, \forall t \in TS_w$ ).
  - $x_{p,d,w,t} \in \{0, 1\}$ : 診察割り当てを表す決定変数 ( $\forall p, \forall d, \forall w, \forall t$ ).

### 2.2. 制約式

- 照射に関する制約式

$$\sum_{t \in TS_w} y_{p,w,t} = 1, \forall p, \forall w \in \mathcal{W}_p \quad (1)$$

$$y_{j,st_j,t+1} = h_{j,st_j,t}, \forall j, t = 1, \dots, |TS_{st_j}| - 1 \quad (2)$$

\*2添え字は言及がない場合、その添え字の大文字の集合の要素として、省略する(ex. 「 $\forall p$ 」は「 $\forall p \in P$ 」を意味する).

$$\sum_{p \in P} a_{p,v} \cdot y_{p,w,t} + \sum_{j \in J} a_{j,v} \cdot h_{j,w,t} \leq c_v, \quad \forall w, \forall v, \forall t \in TS_w \quad (3)$$

式 (1) は患者の照射は 1 日 1 回の制約, (2) は初回照射に関する制約, (3) 照射可能人数に関する制約を表す。

● 診察の制約式

$$\sum_{d \in D} \sum_{t \in T} x_{p,d,w,t} \leq 1, \forall p, \forall w \in \mathcal{W}_p \quad (4)$$

$$1 \leq \sum_{d \in D} \sum_{w \in \mathcal{W}_p} \sum_{t \in T} x_{p,d,w,t} \leq 2, \forall p \quad (5)$$

$$\sum_{p \in P} \sum_{d \in D} x_{p,d,w,t} \cdot SHIFT_{d,b,w,t} \leq c' \cdot br_b, \forall b, \forall w, \forall t \quad (6)$$

$$\sum_{p \in P} x_{p,d,w,t} \leq c' \cdot \sum_{b \in B} SHIFT_{d,b,w,t}, \forall d, \forall w, \forall t \quad (7)$$

式 (4) は診察は 1 日 1 回までを表す制約, (5) は医師の診察は週に 1, 2 回, (6) は各棟の診察室数に関する制約, (7) は医師のシフト可否と診察可能人数に関する制約を表す。

● 照射と診察間の制約式

$$y_{p,w,t} \leq z'_{p,w,t}, \forall p, \forall w \in \mathcal{W}_p, \forall t \quad (8)$$

$$\sum_{t \in T} z_{p,w,t} = 1, \forall p, \forall w \in \mathcal{W}_p \quad (9)$$

$$x_{p,d,w,t} \leq z_{p,w,t}, \forall p, \forall d, \forall w \in \mathcal{W}_p, \forall t \quad (10)$$

$$h_{j,st_j,t} \leq z'_{j,st_j,t}, \forall j, \forall t \quad (11)$$

-  $\alpha$  : 診察と照射の間の許容待ち時間 ( $\alpha \in \mathbb{N}$ )

- 変数  $z'_{p,w,t}$  ( $\forall p, \forall w \in \mathcal{W}_p, \forall t$ ) は  $\beta_t := \min\{t + \alpha, |T|\}$ ,  $\gamma_t := \max\{t - \alpha, 1\}$  ( $\forall t$ ) と補助変数  $z_{p,w,t}$  ( $\forall p, \forall w, \forall t$ ) を用いて定義する。

$$z'_{p,w,t} = \begin{cases} \sum_{s=t+2}^{\beta_t} z_{p,w,s} (t=1, 2) \\ \sum_{s=\gamma_t}^{t-2} z_{p,w,s} + \sum_{s=t+2}^{\beta_t} z_{p,w,s} (t=3, \dots, |T|-2) \\ \sum_{s=\gamma_t}^{t-2} z_{p,w,s} (t=|T|-1, |T|). \end{cases}$$

式 (8) から (11) は診察と照射は、1 つの時間枠を空けてかつ待ち時間を  $\alpha \times$  (刻み時間) 以内で行うという制約を表す。

● 目的関数

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_{p \in P} \sum_{w \in \mathcal{W}_p} f_{p,w} \cdot pp_p + \sum_{p \in P} \sum_{w \in \mathcal{W}_p} \sum_{t=|T|+1}^{|TS_w|} y_{p,w,t} \\ & - \sum_{p \in P} \sum_{d \in D} \sum_{b \in B} \sum_{w \in \mathcal{W}_p} \sum_{t \in T} Sat_{p,d,b} \cdot x_{p,d,w,t} \\ \text{s.t.} \quad & -f_{p,w} \leq \sum_{t \in TS_w} t \cdot y_{p,w,t} - demand_{p,w} \leq f_{p,w}, \\ & \forall p, \forall w \in \mathcal{W}_p \quad (12) \end{aligned}$$

第 1 項と式 (12) は外来患者の照射を割り当てる時間枠と希望との差を最小化, 第 2 項は 17 時以降で照射をできるだけ行わないようにするペナルティ関数, 第 3 項は患者の診察における満足度の最大化を表す。

### 3. 数値実験

FICO 社のソルバー Xpress を用いて定式化したモデルの実装を行い, 目的関数の第 1 項の外来患者の照射を割り当てる時間枠と希望との差を検証した結果を紹介する。使用データは病院へのヒアリングに基づいて作成した擬似データである。数値実験を 2 通り行い, 数値実験 1 での患者の希望照射時間枠は全ての時間枠について等確率で発生させた一様乱数を用いて定め, 数値実験 2 では希望照射時間枠を午前中

に偏らせたデータを使用した。今回は外来患者数 82 人, 総患者数 122 人での結果を図 2, 3 に掲載した。

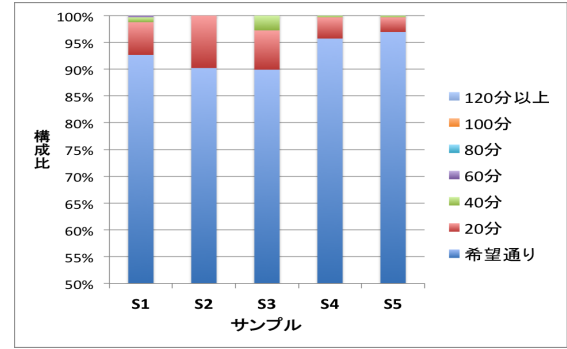


図 2 数値実験 1 の外来患者の希望満足

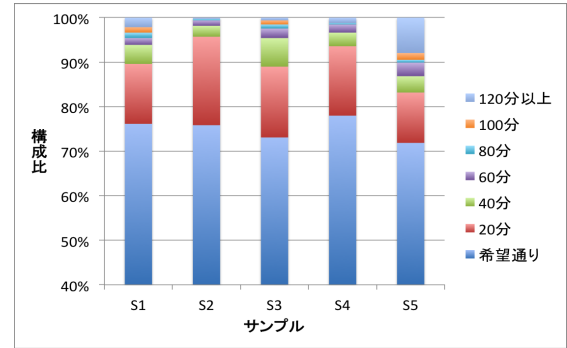


図 3 数値実験 2 の外来患者の希望満足

### ● 考察

数値実験 1 では外来患者数 80 人, 総患者数 120 人程度であれば外来患者の 1 週間の照射の 9 割以上を希望通りの時間枠に割り当てることができた。また, 数値実験 2 の希望時間枠に偏りを与えた場合, 数値実験 1 では見られなかった希望と 120 分以上の誤差がある割り当てが外来患者数 80 人, 総患者数 120 人以下でも発生し始めることが分かった。ただし, 前述の患者数であれば希望の時間枠にある程度偏りがあっても, 全外来患者の全ての照射の 9 割程度は 20 分程度の誤差で照射を割り当てることが可能であると考えられる。

### 参考文献

- [1] 筑波大学附属病院 陽子線医学利用研究センター  
URL : <http://www.pmr.c.tsukuba.ac.jp/index.html>  
(2015 年 1 月 15 日確認)
- [2] 藤澤克樹, 梅谷俊治 (2009). 『応用に役立つ 50 の最適化問題』 (応用最適化シリーズ 3), 朝倉書店。
- [3] D.Conforti, F.Gurriero, R.Guido (2008). Optimization models for radiotherapy patient scheduling. *4OR; A Quarterly Journal of Operations Research*, 6(3), 263-278.