災害時救命率最大化のための深さ制限探索を用いた治療計画法の提案

Proposal of Treatment Planning to Maximize Patient Survival in Disasters by Depth-Limited Search

樫山 文香[†1] 内山 彰[†1†2] 東野 輝夫[†1†2]
Ayaka Kashiyama[†1] Akira Uchiyama[†1†2] Teruo Higashino[†1†2]

1. まえがき

地震やテロなどの大事故が起きた際に限られた医療資源でできる限り多くの傷病者を救命するため，トリアージ [1,2] と呼ばれる方式が導入されている．トリアージでは，脈拍などのバイタルサインを基に傷病者の治療優先順位を決定する．例えば，START(Simple Triage And Rapid Treatment) 法に基づくトリアージの場合は，治療優先度を緑，黄，赤，黒の 4 段階に分類する．分類結果は傷病者に紙製のタグなどを装着することで表示する．災害医療でトリアージの概念により救命率を向上させるためには，現場の医療従事者が傷病者の治療優先度を迅速かつ正確に決定し処置に当たる必要がある．

我々の研究グループでは無線ネットワークを用いた災害時の救命活動支援を目的とした電子トリアージシステム eTriage の設計開発を進めている [3,4]．eTriage では，傷病者の心拍数，呼吸数，血中酸素濃度などの生体情報を自動測定するため我々が開発した小型の電子タグを用いる．この電子タグは ZigBee による無線通信が可能であり，傷病者に装着することで無線センサネットワークが構築できる．自動測定した各傷病者の生体情報はネットワークを介してサーバに収集されるので，傷病者の急な容態変化を医療従事者に自動で通知できる．

また，傷病者の生存率を予測する方法が医療分野において提案されている．例えば TRISS 法 [5] では損傷の部位や程度，生体情報に基づいた生存率予測モデルを提案している．一方，データバンクの外傷データを基にした日本人向けの生存率予測モデルの構築を試みた研究 [6] も存在する．これらの生存率を予測する方法は，大量のデータを収集できる eTriage と組み合わせることで，高精度な結果を得られるようになると考えられる．その結果，将来リアルタイムに収集した生体情報に基づき一定時間後の生存率が高精度に予測可能になると期待される．

本研究では一定時間後の生存率が高精度に予測できると仮定し，災害現場と病院に着目して死亡人数を最小化するような傷病者の治療・搬送順序を決定する手法を提案する．このような最小化問題を治療計画問題と呼ぶ．本研究では，図 1 のように Emergo Train System(ETS) [7] を基に災害医療をモデル化する．ETS は災害時の対応訓練を行う目的で机上シミュレーションとして医療機関で広く使用されている．

本研究で対象とする災害医療には，災害現場トリアージエリア，災害現場救護エリア，搬送エリア，病院トリアージエリア，病院治療エリアの 5 つのエリアが存在し，傷病者は必要に応じて各エリアで治療を受けた後病院へ搬送される．必要な治療が事前に定められたデッドラインまでに行われていなければ傷病者は死亡する．傷病者の生存率が閾値以下となる時刻をその傷病者の死亡時刻（デッドライン）とみなす．本研究では，傷病者を各エリアで処置が行われる時間制約付きジョブとみなし，デッドラインまでに必要な全ての治療が完了できない傷病者数を最小化するスケジューリング問題として治療計画問題を定式化する．

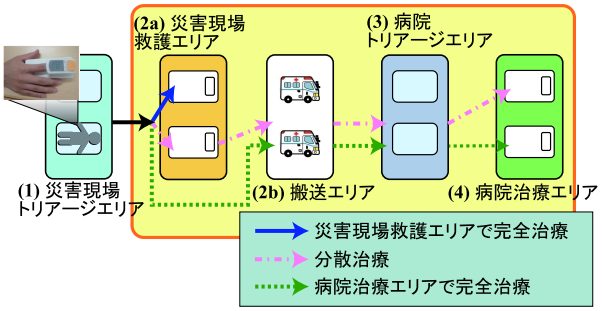

図 1 災害医療の流れの概要

その際，各処置を実行するエリアや処置台といった治療経路は自由に選択可能であるため，治療計画問題は処置順の決定に加えて，治療経路の選択も同時に行わなければならない．治療計画問題では災害現場と病院のいずれかで治療を行うが，傷病者は災害現場で一部の治療のみを受けることでデッドラインが延長される．デッドラインの延長が起きない治療計画問題は分岐付きジョブスケジューリング問題と等しく，分岐付きジョブスケジューリング問題は治療計画問題の部分問題である．分岐付きジョブスケジューリング問題は取り得る選択肢に応じてジョブごとの処置完了までの流れが複数あるスケジューリング問題であり，NP 困難であることが知られている [8]．したがって，治療計画問題も NP 困難であり，傷病者数が大きい場合には実用的な時間で解くことができない．このため本研究では災害現場から救助され処置・搬送を待っている多数の傷病者を対象に，深さ制限探索を用いて死亡傷病者数を近似的に最小化する処置順および治療経路を導出する手法を提案する．

貪欲法で治療経路を決定した場合との比較実験を行い，提案手法の性能を評価した．その結果，デッドラインが近いにもかかわらず治療時間が長いような危篤傷病者が 15%存在するシナリオでは，提案手法の救命人数は貪欲法と比べ約 2 倍になった．また，危篤傷病者が存在しないシナリオでも提案手法は貪欲法よりも約 30%救命人数の多い解が導出できることがわかった．さらに，提案手法ではこれらの解を数秒で導出できることを確認した．

2. 関連研究

2.1 分岐付きジョブスケジューリング問題に関する研究

NP 困難である分岐付きジョブスケジューリング問題へのアプローチは複数存在し，大きく分けて 2 つの手法がある．1 つはプロセスプランとスケジューリングを同時に決定する手法であり，遺伝的アルゴリズム [9–11]，粒子群最適化 [12–14]，焼きなまし法 [9] などの手法が存在する．これらの手法は時間をかけることで精度の高い最適解を得ることができるが，問題の

†1 大阪大学大学院情報科学研究科
Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University
†2 独立行政法人科学技術振興機構, CREST
Japan Science Technology and Agency, CREST

複雑さが増すほど収束時間が大きくなり短い時間では良い解が得られないという問題がある．そのため，リアルタイムで問題が変化する災害医療現場で使用することは難しい．また精度の良い解を得るには問題ごとに異なった適正なパラメータ値を設定する必要があるといった問題もある．

もう 1 つはプロセスプランを決定した後に，そのプロセスプランに対するスケジューリングをそれぞれ求める手法である [15]．プロセスプランの最適化手法には数学的手法 [16]，Tabu Search [17]，焼きなまし法 [18] などを用いる手法がある．この手法はプロセスプランを決定した後にスケジューリングを行うため，ステップ数が多く総当りに近い数のプロセスプランを試さなければいけないという問題がある．提案手法は後者に分類されるが，短時間で解を導出するためプロセスプランの探索範囲を制限することでステップ数を削減している．

2.2 傷病者の処置計画に関する研究

傷病者の救命率を最大化する搬送計画に関する手法も提案されている [19]．各傷病者に対する電子トリアージタグにより取得した最新の生体情報や医療統計から推定した生存率の時間変化，救急車による医療機関への搬送時間などから，傷病者の搬送完了時刻における平均予測生存率を最大化する傷病者の搬送順序や搬送先医療機関をヒューリスティックなアルゴリズムを用いて決定している．同様に救急車の搬送計画について，貪欲法, ドント方式, 焼きなまし法を比較している文献もある [20]．また，病院の救命救急センター内の医療従事者および傷病者をエージェントでモデル化し，傷病者の症例に応じて適切な技能を有した医療従事者に処置を割り当てるためのスケジューリングアルゴリズムを提案している研究もある [21]．しかし，これらの研究は搬送計画や病院内での処置計画のみの狭い範囲に着目しており，本研究で対象とする災害現場から初期治療までの広い範囲における傷病者の治療計画とは異なっている．

3. 治療計画問題

3.1 災害医療のモデル化

全ての傷病者は災害現場トリアージエリアで電子トリアージタグを装着し，無線ネットワークを通して生体情報をサーバに送信する．このサーバに収集された生体情報から傷病者の生存率の変化が予測されると仮定する．また，サーバは各エリアが保持する救命士・医師・看護師のような医療資源の情報を基に，各エリアで同時に扱える傷病者数を把握しているものとする．

図 1 は，災害医療の概要を示している．ここでは 1 つの病院を扱っているが，同様の方法で複数の病院の場合もモデル化できる．このモデルでは次に示す 5 つのエリアがあり，傷病者は必要に応じて各エリアで処置を受けて次のエリアへと搬送される．

- **1. 災害現場トリアージエリア**
  各傷病者はまずこのエリアに到着する．到着した順にトリアージポストで電子トリアージタグを装着し生体情報を収集する．さらに生体情報とあわせて重症度を判定し，トリアージを行う．
- **2a. 災害現場救護エリア**
  各傷病者に応じた治療を行う．
- **2b. 搬送エリア**
  災害現場救護エリアから病院トリアージエリアへの傷病者搬送を救急車で行う．
- **3. 病院トリアージエリア**
  再度傷病者の容態を確認してトリアージを行い，症状の重度により 3 種類の治療室へと搬送する．
- **4. 病院治療エリア**
  3 つの治療室から成り，傷病者は病院トリアージエリアで判断された重症度にあわせた治療室で治療を行う．一般的に，このエリアでは災害現場エリアよりも多くの医療資源が存在する．

傷病者はまず (1) 災害現場トリアージエリアに到着する．その後，傷病者の治療経路に応じて (2a) 災害現場救護エリア，または (2b) 搬送エリアへと送られる．傷病者は医療資源を用いて (2a) 災害現場救護エリア，または (4) 病院治療エリアで治療される．救急車で搬送後，傷病者は (3) 病院トリアージエリアで再度症状を確認され，(4) 病院治療エリアへと送られる．

一度処置を開始した傷病者は途中で治療を中断することはできず，同じエリアであればいずれの医療資源を用いても処理速度は等しい．また，同時に複数の傷病者を 1 つの医療資源で処置することはできないものとする．予測生存率が一定以下になる時刻（以降，デッドライン）までに，必要治療を災害現場救護エリアまたは病院治療エリアで完了することにより救命完了となる．

必要治療を行うには分散治療と完全治療との 2 種類が存在する．どちらの方法でも必要治療を完了することができ，それぞれの治療方法に必要な治療時間は電子トリアージタグで収集した生体情報ならびに医療者が災害現場トリアージエリアで入力した症例情報から分かるものとする．分散治療は必要治療の一部を応急治療として災害現場救護エリアで行い，残りを病院治療エリアで行う．応急治療を行うことで災害現場で一時的に傷病者の容態を安定させることができ，デッドラインを遅らせることができる．一方完全治療では必要治療を全て 1 つのエリアで行うため分散治療での応急治療と比較して時間がかかるが，災害現場救護エリアまたは病院治療エリアのいずれかのみの医療資源で傷病者の救命が可能である．このようにどこで必要治療を行うかという選択肢を治療経路と呼ぶ．治療経路は，分散治療，災害現場救護エリアでの完全治療，病院治療エリアでの完全治療の 3 種類がある．図 1 の 3 種類の矢印が治療経路を示しており，これらの治療経路は災害現場救護エリアで分岐している．死亡者数を減らすためには治療を現場と病院の 2 つの治療エリアで分散させるように治療経路を選択することが重要である．

3.2 デッドラインの設定

生存率を予測する方法としては，外傷の重症評価指標をあらわす TRISS 法 (Trauma and Injury Severity Score) [5] がある．TRISS 法は傷病者の生体情報から生理学的重症度 (RTS) と解剖学的重症度 (ISS) を計算することで，その段階で最適な治療を行った場合の救命可能性を予測する方法である．RTS は電子トリアージタグから収集される生体情報で判断可能であり，ISS は電子トリアージタグを装着する際に医療従事者が診断し送信する診断所見と見なすことができる．RTS は北米のデータを基に算出されているが，日本人の外傷データバンクのデータを基に TRISS 法のモデルを日本人向けに最適化する研究なども行われている [6]．

TRISS 法は今最適な治療を行った場合の生存率を予測する方法でしかなく，将来のいつ治療を行うと生存率がどうなるかを予測することは現状できない．しかし，時間経過に伴って生体情報の変化が収集できる電子トリアージタグが普及することで，生体情報の変化データが収集でき，生体情報の変化モデルが構築できると考えられる．将来の生体情報が予測できれば，時間経過に伴った生存率の変化も算出できるようになる．また，カーラーの救命曲線など将来の生存率を予測する方法も検討されており，このようにして生存率の変化データを多数収集することで，将来の生存率の推定が高精度にできるようになる可能性がある．

本研究では，電子トリアージタグにより傷病者 p に対して時刻 t に最適な治療を行った場合の生存率 $X_p(t)$ が高精度に予測できるとする．予測生存率が閾値 α を下回る時刻 $d(d|X_p(d)=\alpha)$ を傷病者 p のデッドラインとする．医療的な観点から考えると傷病者のデッドラインには余裕を持たせることが望ましく，閾値 α は適切に決定する必要がある．

3.3 分岐付きジョブスケジューリング問題との関係

IPPS 問題 (分岐付きジョブスケジューリング問題) は以下のような問題である [12].

「N 組の部品が与えられ，それらは複数の機械での処理を経て製造される．各処理は代替の製造資源で行うことのできるものも存在する．与えられた目的の達成と先行制約を満足するスケジュールを決定するために，適切な製造資源と処理の順序を求めよ.」

モデル化した災害医療においての傷病者を部品，必要治療を製造に必要な処理，各エリアで傷病者に処置を行う医療資源 (トリアージポスト，治療台，救急車）を製造資源とする．必要治療は災害現場救護エリアと病院治療エリアのどちらでも出来るので必要治療は複数の医療資源で代替が可能であることや，各エリアにある複数の医療資源はどれでも同じ処理ができることから，処理には代替製造資源が含まれていることが分かる．また，デッドラインを超える傷病者数を最小化することを目的関数，各処置の順序関係などを先行制約とする．

ここで治療計画問題のうち，治療経路によってデッドラインが変更されない問題を制限付き治療計画問題と定義する．IPPS 問題は NP 困難であるので [8]，上記の治療計画問題と IPPS 問題の対応付けにより，IPPS 問題は制限付き治療計画問題に帰着できる．したがって，IPPS 問題は NP 困難なので治療計画問題は NP 困難であり，次章では近似解を求める方法について提案する．

IPPS 問題は代替の製造資源が存在するため，プロセスプランニング（どの製造資源を用いて製造を行うか）とスケジューリング（どの部品から製造を行うか）の 2 つを決定する必要がある．治療計画問題においては，どの傷病者から処置するかがスケジューリングにあたる．また，プロセスプランニングは 2 種類に分類でき，1 つはあるエリアに存在する複数の医療資源のうちどれを使用して処置を行うかの決定である．もう 1 つは，分散治療と完全治療のどちらを行うか，また完全治療の場合は災害現場救護エリアの資源を用いて治療を行うか，病院治療エリアの医療資源を用いて治療を行うかの 3 通りの中のいずれを選ぶか決定することである．前者のプロセスプランニングは，医療資源ごとに治療速度の違いがある場合どの医療資源を使うかもプロセスプランに含める必要があるが，本研究のモデルでは同じ治療であれば各処置台での治療速度に違いが無いとしているので医療資源を空けず，空いた医療資源から順に使用するものとする．一方，後者のプロセスプランニングは各エリアの混雑度に直結する問題であることからデッドラインを考慮しつつバランス良く振り分ける必要がある．

表 1 IPPS 問題の数式化に使用する記号

記号	意味
P	傷病者集合
M	医療資源集合
R	治療経路集合
c_h^r	治療経路 r での h 番目の処置
$\|r\|$	治療経路 r での処置数
$t_i[c_h^r, m]$	傷病者 i の処置 c_h^r を処置台 m で行った場合の実行時間
$T_i[c_h^r, m]$	傷病者 i の処置 c_h^r を処置台 m で行った場合の終了時刻
$d_i[c_h^r, m]$	傷病者 i の処置 c_h^r を処置台 m で行った時のデッドライン
X_i^r	$\begin{cases} 1, \text{ if 傷病者 } i \text{ において治療経路 } r \text{ が選択される} \\ 0, \text{ otherwise} \end{cases}$
$Y_m[i, j, c_h^r, c_g^s]$	$\begin{cases} 1, \text{ if 医療資源 } m \text{ において傷病者 } i \text{ の処置 } c_h^r \text{ が} \\ \quad \text{傷病者 } j \text{ の処置 } c_g^s \text{ より先に実行される} \\ 0, \text{ otherwise} \end{cases}$
$Z_i[c_h^r, m]$	$\begin{cases} 1, \text{ if 傷病者 } i \text{ の処置 } c_h^r \text{ に医療資源 } m \text{ が使用される} \\ 0, \text{ otherwise} \end{cases}$

3.4 治療計画問題の定式化

IPPS 問題を数式化した文献 [22] に基づき，治療計画問題を定式化する．まず，表 1 のように記号を定義する．

次に，制約条件として (i) 経路選択制約，(ii) 処置実行順制約，(iii) 割り込み禁止制約の 3 つがある．経路選択制約は，全ての傷病者は過不足無く 1 つの治療経路を選択しなくてはならないことを表す．この制約を表したものが式 1 である．

$$\sum_{r=1}^{R} X_i^r = 1 \qquad \forall i \in P \tag{1}$$

処置実行順制約は，同一傷病者における同一経路の複数の処置は実行順を入れ替えることができず，処置が完了してからでなければ次の処置が実行できないことを意味し，式 2 で表される．

$$\begin{aligned} X_i^r \times (&Z_i[c_h^r, m_1] \times T_i[c_h^r, m_1] \\ &- Z_i[c_{h-1}^r, m_2] \times T_i[c_{h-1}^r, m_2]) \\ &\geq X_i^r \times t_i[c_h^r, m_1] \times Z_i[c_h^r, m_1] \\ \forall i \in P, \quad &\forall r \in R, \quad \forall m_1, m_2 \in M, \quad \forall h \in [2, |r|] \end{aligned} \tag{2}$$

同じ処置台では同時に 1 つの処置のみ行い，途中で中断して他の傷病者が処置を開始することはできない．これが割り込み禁止制約であり式 3 で表される．

$$\begin{aligned} Y_m[i, j, c_h^r, c_g^s] \times (&T_j[c_g^s, m] - T_i[c_h^r, m]) \\ &\geq Y_m[i, j, c_h^r, c_g^s] \times t_i[c_h^r, m] \\ \forall i, j \in P, \quad &\forall r, s \in R, \quad \forall h \in [1, |r|], \\ &\forall g \in [1, |s|], \quad \forall m \in M \end{aligned} \tag{3}$$

これらの制約を満たした上で，式 4 のように死亡傷病者数を最小化することが目的となる．

$$\text{minimize} \sum_{i=1}^{N} D_i^r \times X_i^r \qquad \forall r \in R \tag{4}$$

ここで D_i^r は傷病者 i が経路 r を用いた時に死亡するかどうかを表し，式 5 で定義される．

$$D_i^r = \begin{cases} 1, \text{ if } Z_i[c_h^r, m] \times (d_i[c_h^r, m] - T_i[c_h^r, m]) < 0 \\ \qquad \forall h \in [1, |r|], \quad \forall m \in M \\ 0, \text{ otherwise} \end{cases} \tag{5}$$

以上をまとめると治療計画問題は以下のように表される．

Given:

$N, M, R, c_h^r, t_i[c_h^r, m], d_i[c_h^r, m]$

$$\forall r \in R, \quad \forall i \in P, \quad \forall h \in [1, |r|], \quad \forall m \in M$$

Determine:

$X_i^r, Y_m[i, j, c_h^r, c_g^s], Z_m[c_h^r, m]$

$$\forall r, s \in R, \quad \forall i, j \in P, \quad \forall m \in M, \quad \forall h \in [1, |r|], \quad \forall g \in [1, |s|]$$

Objective:

$$\text{minimize} \quad \sum_{i=1}^{N} D_i^r \times X_i^r \qquad \forall r \in R \tag{6}$$

Subject to: (1), (2), (3)

4. 提案手法

4.1 概　　要

治療計画問題では全傷病者の治療経路 X_i^r と処置順 $Y_m[i, j, c_h^r, c_g^s]$ の決定が必要である．治療経路は災害現場救護エリアで分岐するため，災害現場救護エリアのみで決定する．それに対して，処置順は全てのエリアで決定しなくてはならない．

一般的にデッドラインが近い傷病者は処置の優先度が高いと考えられることから，各エリアの処置順はデッドライン順 (FDFS:First Deadline First Served) で行うべきである．しかし，単純なデッドライン順ではデッドラインが短いが治療時間の長い傷病者を治療した結果，多くの傷病者が死亡してしまう場合がある．そこで治療経路を決定する際に治療を諦めることでより多くの傷病者が助かるようになる場合を考慮することと，災害現場治療エリアと病院治療エリアの両方の医療資源を活用し傷病者処置の分散を図ることで，救命人数を増やす可能性を探る．そこで，各傷病者の治療経路について (i) 災害現場救護エリアで完全治療を行う，(ii) 分散治療を行う，(iii) 病院治療エリアで完全治療を行う，(iv) 治療を諦めるの 4 種類の経路からいずれが適切かを決定する．

4.2 深さ制限探索

全ての傷病者に対して全治療経路の組み合わせを探索することは，組み合わせの数が傷病者数に対して指数的に増加するため実用的な時間で解を求められない．したがって提案手法では治療経路を探索する傷病者を制限する方法を取る．一般に重症者の治療経路を詳細に探索することで結果が向上すると考えられるため，災害現場救護エリアでの待機傷病者をデッドライン順にソートし，先頭から k 人の治療経路についてのみ全探索を行い，最も救命率が高い治療経路の組を先頭 k 人の治療経路として決定する．このようなデッドライン順における先頭 k 人を以降では傷病者集合 P の部分集合 P_k と表記する．

P_k の治療経路が与えられるので，それ以外の傷病者 $P - P_k$ の治療経路を割り当てる必要がある．提案手法では，貪欲法を用いて災害現場救護エリアまたは病院治療エリアの完全治療のいずれかに割り当てる．計算時間を削減するため，$P - P_k$ の傷病者に関しては分散治療や治療を諦めるといった選択肢は考慮しない．まず，傷病者集合 P はデッドライン順にソートされる．そして P_k は治療経路を全探索し，P_k を P から除き同様のことを P の治療経路が全て決定するまで繰り返す．

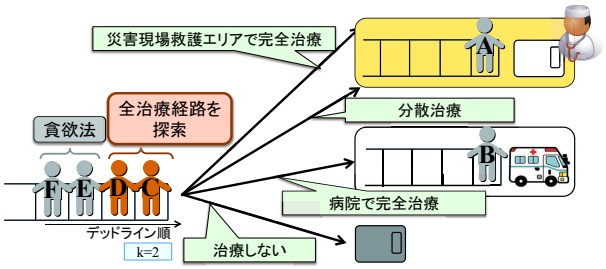

図 2　治療経路決定の例

$k = 2$ の場合の深さ制限探索の例を図 2 に示す．ここで，A,B,...,F の傷病者はデッドライン順に並んでいるものとする．傷病者 A は災害現場救護エリアで完全治療をする，傷病者 B は病院治療エリアで完全治療をする，という治療経路が既に決定しているとする．次の P_k は傷病者 C と D である．そこで，傷病者 E と F の治療経路は貪欲法を用いて決定し，C と D の治療経路は全探索を行う．

また，複数の治療経路組で救命率が等しくなる場合には，後から来る傷病者に医療資源を空けておくため，なるべく災害現場救護エリアの医療資源を使用しない治療経路を選択する．つまり，提案手法では救命率が等しい場合は，治療を諦める選択肢を選んだ傷病者数，病院治療エリアで完全治療を選んだ傷病者数，分散治療を選んだ傷病者数が順に多い治療経路組候補を治療経路組として決定する．例えば，救命率が最大となる治療経路組候補 c_1 と c_2 があった場合，治療を諦める選択肢を選んだ傷病者数が c_2 よりも c_1 の方が多い場合，c_1 を治療経路組として決定する．もし，治療を諦める選択肢を選んだ傷病者数が等しければ，病院治療エリアで完全治療を選んだ傷病者数が多い方を治療経路組に採用する．

4.3 処置開始時刻の決定

治療経路組の全探索を行った後治療経路組を決定する際に，P_k の各エリアにおける医療資源の利用時間を予約済としておく．そして，各エリアでの傷病者の処置開始時刻は，それら予約済の医療資源利用予定を妨げない範囲でデッドライン順に決定する．例えば，図 3 は傷病者 C の処置開始時刻の決定を行なっている図である．既に傷病者 A と B の治療経路は決定しているので，このエリアにおける 2 人の医療資源の利用時間は予約されている．しかし，その前のエリアで傷病者 B の処置時間が長かったため，傷病者 C が B よりも先に次のエリアに到着してしまう．傷病者 A の処置が終わればすぐに傷病者 C の処置を行いたいが，その処置時間は傷病者 B ば将来行う予定の処置時間に重なってしまう．そのため傷病者 B の到着を待ち，その処置が終了した後に傷病者 C は処置を行うものとする．ただし，傷病者 C の処置時間が短く，傷病者 A の処置終了後，傷病者 B が到着するまでに処置を終えることができるならば，傷病者 C の処置が傷病者 B よりも先に行われる．

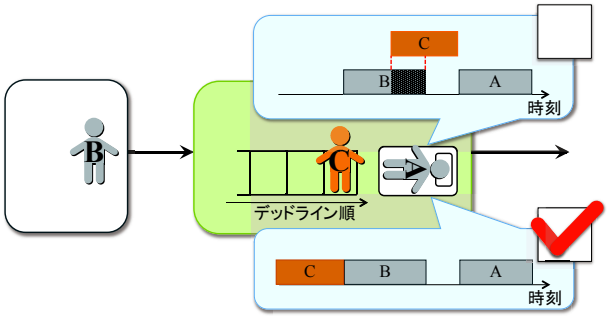

図 3　処置開始時刻の決定例

表 2　評価に用いた傷病者の治療時間とデッドライン

	重症傷病者	中程度の傷病者	軽症傷病者	危篤傷病者
治療時間 c_1	[300,450]	[120,400]	[100,300]	[4000,5000]
治療時間 c_2	[300,450]	[200,400]	[300,500]	-
デッドライン d_1	[780,1680]	[1700,3300]	[3300,6300]	[100,900]
延長時間 d_2	[1000,1500]	[1000,2000]	[1000,2000]	-

5. 性能評価

5.1 評価環境

性能評価で用いるシナリオでは，各傷病者の治療時間とデッドラインはカテゴリごとに表 2 に示す範囲からランダムに選択する．デッドラインが近いにも関わらず処置時間が長い傷病者を危篤傷病者と分類する．死亡傷病者数を減らすためには，この危篤傷病者の治療を避けることが望ましい．

傷病者には 2 種類の必要治療が定められており，治療経路が分散治療の場合は必要治療 c_1 を災害現場救護エリアで，必要治療 c_2 を病院治療エリアでそれぞれ行う．必要治療 c_2 が完了するとデッドラインが $d_1 + d_2$ に延長される．完全治療の場合は必要治療 2 つの治療時間を足し合わせた時間 $c_1 + c_2$ がかかる．また，医療資源の数は表 3 の通りであり，総傷病者数に応じて設定した．性能評価では以上の設定でランダムに 100 回生成したシナリオを，IntelXeon 2.66GHz，メモリ 23.6GB のマシンを用いて計測した平均値で行う．

また，5.3 節で比較する貪欲法ではスケジューリングをデッドライン順で行い，経路は災害現場救護エリアまたは病院治療エリアでの完全治療を選択する．具体的には，災害現場救護エリアの治療台のみが空いていれば災害現場救護エリアで完全治療を行い，搬送救急車のみが空いている場合は病院へと搬送し病院治療エリアで完全治療を行う．同時に複数の資源が空いた場合は 2 種類のポリシが存在し，優先的に災害現場救護エリアで完全治療を選択する方法を先詰め FDFS，優先的に病院治療エリアでの完全治療を選択する方法を後詰め FDFS と表記する．評価シナリオは危篤傷病者有り・無しの場合の 2 種類を用いた．危篤傷病者有りの場合ではカテゴリごとの傷病者数内訳は，総傷病者数に対して危篤傷病者 15%，重症傷病者 40%，中程度の傷病者 35%，軽症傷病者 10%とする．また危篤傷病者無しの場合は，総傷病者数に対して重症傷病者 45%，中程度の傷病者 35%，軽症傷病者 20%とした．

5.2 探索深さ k の影響

探索の深さ k を変化させ，解の導出に必要な時間とデッドラインを超える傷病者数のトレードオフを調査するため，100 人の傷病者シナリオに対して治療計画を決定し，深さ k の値と死亡傷病者数の関係性を評価した．

表 3　評価に用いた傷病者数と医療資源数

総傷病者数	災害治療処置台数	救急車数	病院前トリアージポスト台数	病院処置台数
20	2	2	1	1
40	2	2	3	3
60	4	3	4	3
80	5	4	6	4
100	6	5	7	5

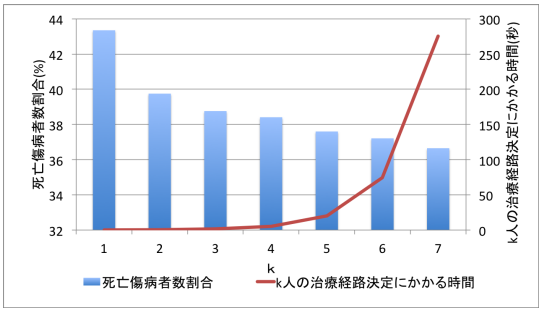

図 4　深さ k に対する死亡傷病者数割合と実行時間

表 4　貪欲法との死亡傷病者数割合比較 (危篤傷病者有り)

総傷病者数 (人)	先詰め FDFS(%)	後詰め FDFS(%)	提案手法 (%)
20	64.50	42.45	13.90
40	76.50	78.83	28.00
60	81.23	81.25	34.48
80	82.10	82.24	36.09
100	82.30	83.19	38.41

治療計画問題を解く実行時間と死亡傷病者数のグラフを図 4 に示す．k の値が大きくなると死亡傷病者数は減少するが，実行時間は k に依存して指数的に増加する．提案手法は探索する経路組数が経路数の k 乗であることから，k の値を大きくすると経路割り当ての決定にかかる時間は大きくなる．また，予約済の医療資源利用時刻を妨げないように処置開始時刻を決定するので，その探索を行うために $O(k^2)$ の時間がかかってしまう．しかし，k の値を増加させることで多くの可能性を調べることができ死亡傷病者数を小さくできることから，計算時間と死亡傷病者数はトレードオフの関係にあることがわかる．一方で，ある時刻に医療資源を利用する傷病者を決定するためには傷病者全員の治療計画を決定する必要は無く，先頭 k 人の治療経路決定を実用時間で決定できることが重要となる．$k = 4$ の場合の実行時間は 5 秒程度であるが，20 秒程度かかる $k = 5$ の場合と遜色のない死亡傷病者数結果を得られているため以降では $k = 4$ と定めて評価を行う．

5.3 貪欲法との比較

先詰め FDFS，後詰め FDFS，提案手法の 3 種類を用いて，傷病者数を 20,40,60,80,100 人としたときの死亡傷病数の割合を比較した結果を表 4 に示す．評価シナリオには危篤傷病者が含まれており，貪欲法ではそのような危篤傷病者を治療することで医療資源が占有されてしまい他の傷病者が救えなかったと考えられる．一方，提案手法では治療を諦めることでより多くの傷病者が助かる治療経路を探索するので，危篤傷病者の治療を諦めることで多くの傷病者を救命することができている．総傷病者数が増えると貪欲法と提案手法での差は小さくはなる

表 5 貪欲法との死亡傷病者数割合比較 (危篤傷病者無し)

総傷病者数 (人)	先詰め FDFS(%)	後詰め FDFS(%)	提案手法 (%)
20	8.50	8.95	2.45
40	25.75	25.48	16.53
60	30.63	30.83	22.00
80	32.79	32.50	24.04
100	34.18	34.11	25.07

が，いずれの総傷病者数の場合も貪欲法と比べて提案手法は死亡傷病者数を半分以下に抑えられることが分かる．また先詰め FDFS と後詰め FDFS の 2 つの方法では大きな差は出ていない．危篤傷病者が含まれる場合，危篤傷病者を処置することが全体に与える影響が大きいことが原因の 1 つであると考えられる．また，同時に複数の資源が空く場面が少なかったことも要因と考えられる．

次に危篤傷病者が存在しないシナリオでの評価結果を表 5 に示す．提案手法の死亡傷病者数は貪欲法の約 70%になっており，危篤傷病者が存在する場合と比べて差は小さくなっているが，貪欲法よりも死亡傷病者数の少ない解が導出できている．このことから，提案手法では危篤傷病者の処置を諦める以外でも，災害現場での治療と病院での治療や分散治療を適宜選択して，貪欲法よりも良い結果を得られることが分かった．

6. あとがき

本稿では災害現場から初期治療までの災害医療をモデル化し，死亡傷病者数を近似的に最小化する処置順および治療経路を導出する手法を提案した．深さ制限探索を用いて治療経路を導出することで，短時間で貪欲法と比べて死亡傷病者数の少ない治療経路を導出することができた．性能評価は傷病者が増えないシナリオのみに対して行ったが，本手法は新しい傷病者が追加されても再度治療計画問題を解くことで，その時の状況に応じた解を導出できる．一方，傷病者が追加されるシナリオにおいては，段階的にポリシーを変化させることでより良い解を得られる可能性がある．例えば序盤は傷病者が今後現れる可能性が高いため処置台に余裕を持たせて治療経路を決定するべきであるが，中盤では傷病者が続々と増えるので処置台に余裕をもたせず稼働させるべきである．このような場合を考慮するため，今後は傷病者が追加されるシナリオに対して，ポリシーを時間によって変化させる治療計画導出法を考案する予定である．

参 考 文 献

1) Advanced Life Support Group，小栗顕二，杉本寿，吉岡敏治 (訳)：大事故災害への医療対応　現場活動と医療支援-イギリス発，世界標準-，永井書店 (2005).
2) 東京救急協会：救急・災害現場のトリアージ，荘道社 (2001).
3) 木山昇，楠田純子，藤井彩恵，内山彰，廣森聡仁，梅津高朗，中村嘉隆，大出靖将，田中裕，山口弘純，東野輝夫：災害時救急救命支援に向けた電子トリアージシステムの設計開発，情報処理学会論文誌，Vol.51, No.9, pp. 1916–1929 (2010).
4) Higashino, T., Uchiyama, A. and Yasumoto, K.: eTriage: A Wireless Communication Service Platform for Advanced Rescue Operations, *Proceedings of ACM Workshop on Internet of Things and Service Patforms(IoTSP 2011)* (2011).
5) 日本救急医学会日本外傷学会：改訂第 3 版 外傷初期医療ガイドライン JATECTM，へるす出版 (2009).
6) 藤木直子，阪本雄一郎，本村陽一，西田佳史，野口昭治：ベイジアンネットワークを用いた生存率予測モデルの統計的学習と評価，人工知能学会全国大会 2009 論文集，Vol.23 (2009).
7) : Emergo Train System. http://www.emergotrain.com/.
8) Khoshnevis, B. and Chen, Q.: Integration of Process Planning and Scheduling Funtcions, *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol.2, No.3, pp.165–176 (1991).
9) Weintraub, A., Cormier, D., Hodgson, T., King, R., Wilson, J. and Jr, A.Z.: Hybrid Genetic Algorithm and Simulated Annealing Approach for the Optimisation of Process Plans for Prismatic Parts, *International Journal of Production Research*, Vol.40, No.8, pp.1899–1922 (2002).
10) Choi, H. and Park, B.: Integration of Process Planning and Job Shop Scheduling Using Genetic Algorithm, *Proceedings of the 6th WSEAS International Conference on Simulation, Modelling and Optimization*, pp. 13–18 (2006).
11) Kim, Y., Park, K. and Ko, J.: A Symbiotic Evolutionary Algorithm for the Integration of Process Planning and Job Shop Scheduling, *Computers & Operations Research*, Vol.30, No.8, pp.1151–1171 (2003).
12) Guo, Y., Li, W., Mileham, A., Maropoulos, P. and Owen, G.: Applications of Particle Swarm Optimisation in Integrated Process Planning and Scheduling, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol.25, No.2, pp.280–288 (2009).
13) Guo, Y., Li, W., Mileham, A. and Owen, G.: Optimisation of Integrated Process Planning and Scheduling Using a Particle Swarm Optimisation Approach, *International Journal of Production Research*, Vol.47, No.14, pp.3775–3796 (2009).
14) Guo, Y., Mileham, A., Owen, G., Maropoulos, P. and Li, W.: Operation Sequencing Optimization for Five-Axis Prismatic Parts Using a Particle Swarm Optimization Approach, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, Vol.223, No.5, pp.485–497 (2009).
15) Brandimarte, P. and Calderini, M.: A Hierarchical Bicriterion Approach to Integrated Process Plan Selection and Job Shop Scheduling, *International Journal of Production Research*, Vol.33, No.1, pp.161–181 (1995).
16) Kim, K. and Egbelu, P.: Scheduling in a Production Environment with Multiple Process Plans per Job, *International Journal of Production Research*, Vol.37, No.12, pp.2725–2753 (1999).
17) Weintraub, A., Cormier, D., Hodgson, T., King, R., Wilson, J. and Jr, A. Z.: Scheduling with Alternatives: A Link between Process Planning and Scheduling, *Institute of Industrial Engineers (IIE) Transaction*, Vol.31, No.11, pp.1093–1102 (1999).
18) Palmer, G.: A Simulated Annealing Approach to Integrated Production Scheduling, *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol.7, No.3, pp.163–176 (1996).
19) 水本旭洋，孫為華，安本慶一，伊藤実：多数傷病者事故での救命率向上を目指した電子トリアージタグに基づく傷病者搬送計画手法，マルチメディア通信と分散処理ワークショップ，pp.43–48 (2010).
20) Guttinger, D., Godehardt, E. and Zinnen, A.: Online Strategies for Optimizing Medical Supply in Disaster Scenarios, *2011 IEEE International Conference on Ser-*

vice Operations, Logistics, and Informatics (SOLI), pp. 38–44 (2011).

21) Amani, D., Hayfa, Z., Slim, H. and Herve, H.: A Dynamic Patient Scheduling at the Emergency Department in Hospitals, *2010 IEEE Workshop on Health Care Management WHCM*, pp.1–6 (2010).

22) Xinyu, L., Chaoyong, Z., Liang, G., Weidong, L. and Xinyu, S.: An Agent-based Approach for Integrated Process Planning and Scheduling, *Expert Systems with Applications*, Vol.37, No.2, pp.1256–1264 (2010).