

II. 分担研究報告

① 運用システム（運用方式）の研究
1) JSAS-R のデータ解析と数理モデル

研究分担者	鵜飼 孝盛	防衛大学校電気情報学群情報工学科	講師
	高嶋 隆太	東京理科大学理工学部経営工学科	教授
	北村 伸哉	君津中央病院救命救急センター	センター長
	土谷 飛鳥	国立病院機構水戸医療センター	副救命救急センター長
研究協力者	田中 健一	慶應義塾大学理工学部管理工学科	教授
	鳥海 重喜	中央大学理工学部情報工学科	准教授
	伊藤 真理	東京理科大学理工学部経営工学科	講師

研究要旨

【研究目的】 消防への通報後に救急隊等が傷病者へ接触する前に要請を行う覚知要請方式と、傷病者への接触後の救急隊により要請がなされる現場要請方式がドクターヘリの運用効率に与える影響を、重複要請の発生などの面から明らかにする。

【研究方法】 1) 各施設の運航状況: 2020年4月1日から12月31日までにJSAS-Rに登録された要請18,148例を対象とした。要請日時と救急隊接触日時から要請方式を推定し、施設ごとの運航可能時要請件数と応需件数・傷病者接触件数の関係、覚知要請割合と受諾要請中止割合の関係、運航可能時要請件数と重複要請発生件数・発生率の関係について線形回帰モデルを作成し、解析した。2) 数理モデルによるシミュレーション: 推定された要請方式別に基地病院から現場到着、現場滞在、現場離陸から基地病院帰投の所要時間分布を求める。さらに、中止率、自施設搬送率をパラメータとして、ヘリの状態推移を数理モデルとして記述し、年間の要請件数に対する重複要請の発生数を求めるシミュレーションを行った。

【研究結果】 1) 各施設の運航状況: 要請件数と応需件数、傷病者接触件数はそれぞれ相関係数が0.9947、0.9527となりほぼ比例していた。覚知要請割合と中止発生率の間には相関が認められた（相関係数0.5942）。要請件数と重複要請発生件数は相関が認められるが、散布図より線形の関係ではないと認められた。要請件数と重複要請発生率は相関係数が0.6736と相関が認められた。2) 数理モデルによるシミュレーション: 発生した重複は常に応需しないとの仮定の下でのシミュレーション結果は、現状の重複要請による応需発生率の上限となった。ヘリの基地病院への帰投を見越して帰投前に応需することにより重複要請による応需の発生を低減できることが判明した。

【結論】 覚知要請割合の増加は中止発生率を増大させること、帰投前に応需することにより重複要請による応需の発生を低減できること、などが明らかになった。

A. 研究目的

本研究の目的は、ドクターヘリの2つの代表的な要請方式、すなわち消防への通報による覚知時点での要請（以下、覚知要請方式）と患者接触後の救急隊による要請（以下、現場要請方式）がドクターヘリの運用効率に与える影響を明らかにすることにある。

上述の2つの要請方式を比較すると、覚知要請による出動においては、要請受諾からヘリの現場、ランデブーポイント到着までの間に当該の要請が取り消しとなる事象の生起が増加するものと考えられる。これは、要請受諾後に救急隊が現場へ到着したのちに傷病者について十分な情報が加わることで生じるものである。こうした要請取消の増加は要請頻度の増加に繋がり、ひいてはある事案に出動中に、他の事案の要請が生じる、いわゆる重複要請の頻発を引き起こす事になる。一方で、覚知要請による出動では、覚知から医療者の傷病者への接触までに要する時間の短縮が期待できる。本研究では、両要請方式

での受諾要請の取消や重複要請の発生について、レジストリに登録されたデータを解析する。さらに、数理モデルに基づくシミュレーションを通じて、発生の構造を明らかにし、条件を変えた際のドクヘリの運用効率を推定する。

（倫理面への配慮）

ドクターヘリレジストリの分析は、日本航空医療学会から提供され連結不可能・匿名化されたデータを用いた。本研究は特定の個人や動物等を対象とした研究ではなく、倫理的問題を生じる可能性は少ないと考えられたが、情報管理等や人権擁護等には細心の注意を払った。

B. 研究方法

2020年4月1日から12月31日までにJSAS-Rに登録された事例について、ドクターヘリの運用効率に関する指標として重複要請の発生に要請方式や運用ポリシーが及ぼす影響を検討する。

（研究対象）

JSAS-Rに登録された要請18,148例を対象とした。受諾された要請が14,332例、何らかの理由で受諾さ

れず不応需となった要請が3,816例であった。受諾された要請のうち、出動したヘリが現場などに着陸し、傷病者と接触したものが11,863例、何らかの理由で任務が中止となったものが2,469例であった。

不応需の理由としては、天候不良が1,850例と最も多く、次に前事案任務中が理由で不応需となったものが1,102例（不応需全体のうち28.88%）であった。受諾した任務の中止理由としては、要請元となる消防救急取消が2,093例（中止全体のうち84.77%）と大部分を占めた。

受諾され、現場等に着陸したヘリに搭乗した医師らが接触した傷病者の記録は 11,798 例、うちドクターヘリによって搬送されたものが 9,384例（傷病者記録のうち79.54%）、ドクターヘリ以外での搬送が2,240例（同18.99%）、不搬送となったものが 174 例（同1.475%）であった。また、活動中の重複要請がありと登録されたものが 1,524 例（同12.92%）であった。

これらの登録データのうち、機体不具合や天候不良等の運用方法以外の外的要因によって不応需となった要請を除いた要請件数を**運航可能時要請件数**（17,064件）を対象とする。また、要請時に重複がありと記録されたデータ1,921 件および要請時に重複なしと記録された不応需要請で不応需理由で前事案任務中を選択したもの 244 件を併せて**推定重複**（2,165件）とする。

なお施設ごとの分析には、運航可能要請件数が80以上800以下の施設のみを用いた。

1) 各施設の運航状況

対象データについて、要請日時と救急隊接触日時の前後関係より、覚知時要請か到着後要請を推定する。対象データを対応施設ごとに集計し、運航可能時要請件数と応需件数、傷病者接触件数を原点を通る直線で回帰分析を行う。次に、各施設の覚知要請割合（傷病者接触件数のうち覚知要請と推定される割合）と中止率（応需件数に対する中止件数の割合）を求め、直線による回帰を行う。さらに、施設ごとに運航可能時要請件数と重複発生件数をまとめ、関係を見る。

2) 数理モデルによるシミュレーション

推定された要請方式ごとに、基地病院から現場到着まで、現場滞在、現場離陸から基地病院帰投まで（搬送先種別（自施設または他施設））の所要時間分布を求める。さらに、中止率や自施設搬送率をパラメータとして、要請の到着・受諾から現場（傷病者接触地点）への移動、その途中の要請取消、現場滞在、傷病者搬送の各状態の推移を数理モデルとして記述し、年間の要請件数に対する重複要請の発生数を求めるシミュレーションを行う。

C. 研究結果

1) 各施設の運航状況

運航可能時要請件数と応需件数を施設ごとにプロットすると、図1ようになり、全要請に対して78.7%、運航可能時の要請（外れ値除去後）に対して91.4%の割合で応需している。傷病者接触件数は応需件数にほぼ比例し、傷病者への接触に至るものは応需したもののうち80.1%であった。運航可能時要請件数と傷

病者接触件数の関係を示す図2のように、運航可能時の要請件数の75.3%となる。

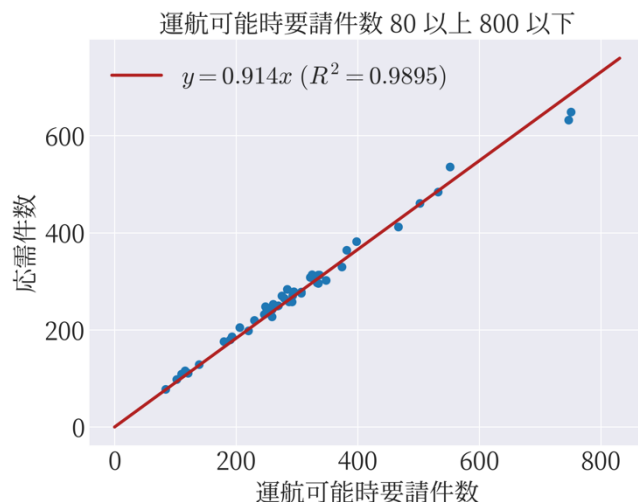


図 1 要請件数と応需件数

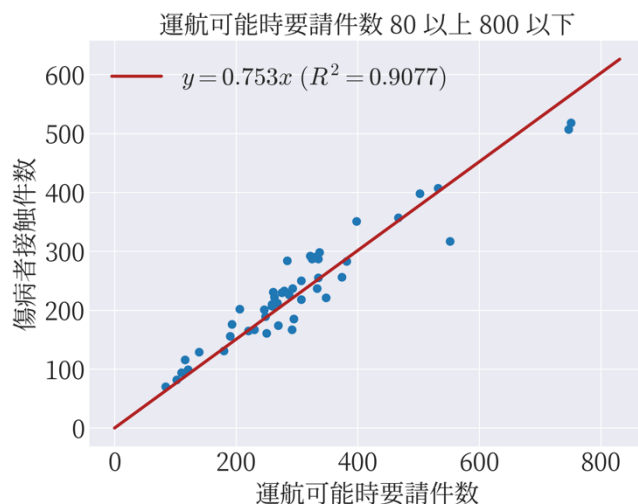


図 2 要請件数と傷病者接触件数

覚知要請割合と中止発生率の関係は図 3 のようになる。要請にしろ覚知要請の割合が高まると、受諾したものの中止となる割合が高まる傾向がある。

運航可能時要請件数と重複発生件数の関係は図 4、運航可能時要請件数と重複要請の発生率の関係が図 5 のようになる。重複要請の発生は、運航可能時の要請件数との間に強い相関が見られる。また、重複要請の発生率は運航可能時の要請件数との間で相関がある。

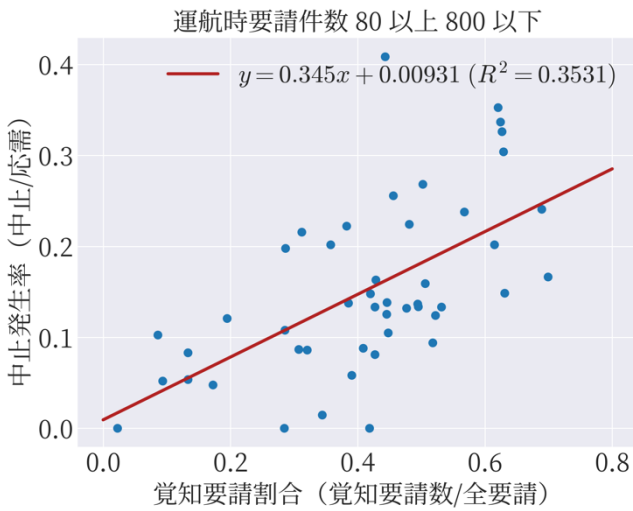


図 3 覚知要請割合と中止発生率

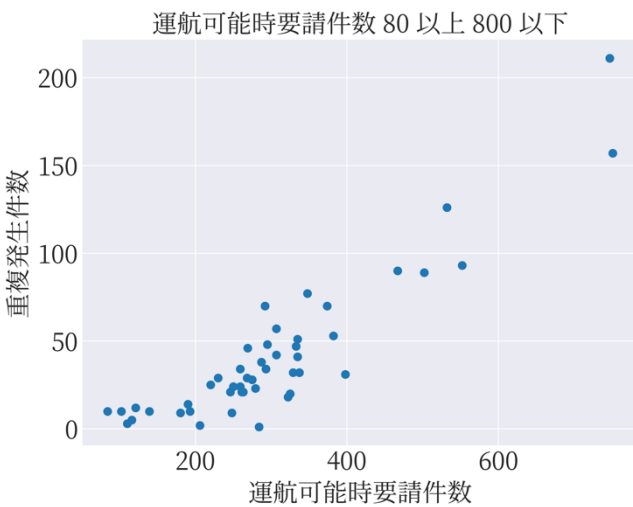


図 4 要請件数と重複発生件数

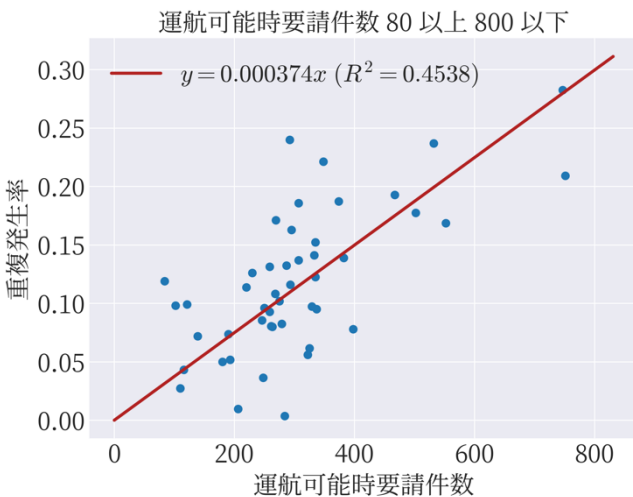


図 5 要請件数と重複発生率

2) 数理モデルによるシミュレーション

要請に対する所要時間の分布は図6のようになる。上述までの結果に基づき、ヘリの状態を「待機中」「現場前進中」「現場滞在中」「帰投中」に分け、要請の発生が運航可能時にランダムに到着するとの

仮定の下で、シミュレーションを行った。要請の発生時にヘリが帰投中で、基地病院へ戻るまでの時間が τ 分以下であれば、要請を受諾し、基地病院へ帰投後に即座にその要請へ対応するものとしている。待機中を除き、それ以外の状態で生じた要請は重複としている。この設定の下で求めた、年間の要請数と重複発生率の関係を図7に示す。

図7の4本の曲線は、上述の帰投中の要請受諾を行う際の基地に帰還するまでの時間の閾値 τ が異なる。また、図には施設ごとの要請件数（年間に換算したもの）と重複発生率の散布図を重ねて示している。重複不応需は重複が理由となった不応需の発生利率を、推定重複は、前述の推定方法に従って重複が発生したと推定される例についての発生率を表す。

要請件数が多くなると、重複発生率は高くなるが、その増加の仕方は次第に緩やかになる。また、同じ要請件数であっても、閾値 τ が大きいほど重複発生率は低くなる。

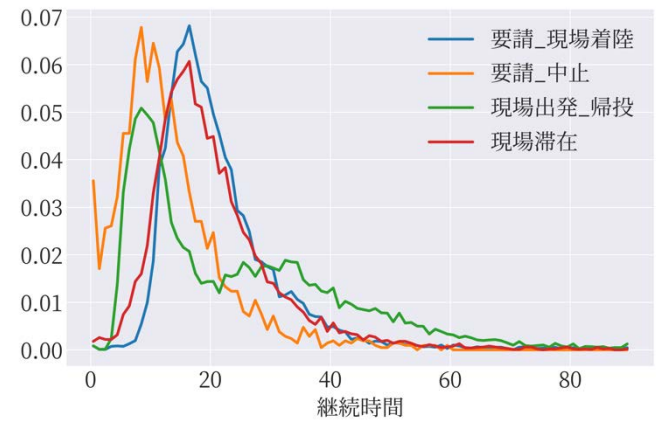


図 6 所要時間分布

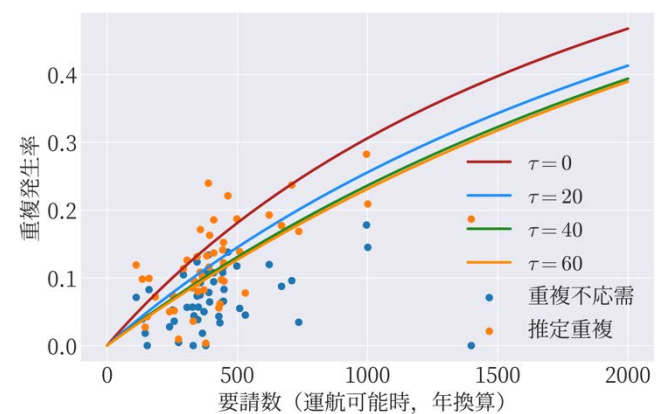


図 7 要請数と重複発生率

D. 考察

応需件数や傷病者接触件数は、要請件数にほぼ比例している (図1、図2)。特に、応需件数は極めて当てはまりがよく、考える要請件数の範囲では、要請の増加は応需率にあまり影響を与えないと考えられる。一方、傷病者接触件数については、ややばら

つきが見られる。これは、要請方式・覚知要請の影響によるものと考えられる。要請に占める覚知要請の割合が増加すると、応需したものの傷病者接触に至らない中止の発生率が増加する傾向がある(図3)。同じ要請件数であっても、要請方式の内訳で覚知要請の比率が高い場合には傷病者接触件数は少なく、覚知要請率が低い場合には傷病者接触件数が多くなる。このようにして、要請数に対する傷病者接触件数はばらつきが大きくなるものと考えられる。

運航可能時要請件数と重複発生件数については正の相関が見られる(図4)。しかし、その関係は比例関係のように直線的な関係ではない。運航可能時要請件数と重複発生率の関係を見ると、これらの間には相関が見られる(図5)。従って、考える範囲においては、重複要請の発生は要請数に対して2次関数的に増加すると見るべきである。ただし、重複発生率はその定義上1.0が上限であり、運航可能時要請件数との間の直線的な関係をそのまま延長できるものではない。重複発生率の増加は、運航可能時要請件数の増加に対して逡減していくものと考えられる。

要請件数の増加に対して重複発生率が単調に増加するものの、次第にその増加が頭打ちとなることはシミュレーションの結果からも確かめられる(図7)。シミュレーションにおける $\tau=0$ の結果は、ヘリが早期に帰還するか否かに関わらず、出動中に生じた要請は全て重複要請として応需しないことを表している。実際には、多くの基地病院ではヘリの帰投中であれば要請を受諾するとの調査結果もあり、このように考えると、 $\tau=0$ のシミュレーション結果は実運用における重複による応需の発生率の上限を表すこととなり、図中の各施設の重複応需の発生率はほぼこの曲線の値以下となっている。

現実の重複応需率がシミュレーション結果よりも低くなる要因としては、まず、ヘリが帰投するのを見越して要請を受諾することが挙げられる。これは、シミュレーションでは τ を大きくすることに相当する。図からも明らかのように、 τ を大きな値に設定すると、重複発生率は低下する。しかし、その重複発生率を低減させる効果は次第に弱まる。大きな τ を設定することでより多くの要請に対応することが可能となるが、図6からわかるように、基地病院へ帰還するまでの時間が40分を超えるような場合はそれほど多くない。そのため、閾値 τ を大きく設定してもその恩恵を享受する機会は少なく、ひいては重複発生率の低減効果が弱まることとなると考えられる。

次に、重複応需率を低下させる要因としては、要請に占める覚知要請の比率が挙げられる。前述の通り、覚知要請の比率が高まると応需した要請が途中で取り消され、中止となる割合が高まる。図6からわかるように、要請の受諾から中止となるまでの時間は平均して10分強である。そして、中止となって以後は新たに生じた要請に応需できるようになる。

そのため、中止となる割合が高まると、応需したとしても再び応需できるようになるまでの平均的な時間は短くなり、重複による応需の発生率を押し下げる。以上から、覚知要請割合の高い施設では、要請数から推定したよりも重複要請発生率が少ない。

視点を変えると、覚知要請では結果として不要な要請が加わるため、救急隊現場到着後要請より全要請数が増加すると同時に任務中止も増える。この時の全要請数増加は重複要請の増加要因となるが、中止になる任務の飛行時間が短いため、重複要請への影響は救急隊現場到着後要請の増加より少ない。

上述以外で、実際の重複による応需率の低下が生じる要因には、要請そのものの発生仕方が考えられる。シミュレーションでは要請はランダムに発生するものとしている。これは、現在のヘリの状態に関わらず、どのような場合においても等しい確率で要請が生じることを意味する。実際の現場においては、直前に出動要請がなされたなどにより、要請側がヘリの状態を推測して要請を行わないといったことも起こり得る。こうした推測によって要請を差し控えることは、見かけ上の重複による応需の発生を抑えることとなる。

最後に、シミュレーションの結果から、要請方式がヘリの運用に与える影響について考える。繰り返しとなるが、覚知要請の比率が高まると、応需した要請が途中で取り消しとなる確率は高まると考えられる。しかし、中止となる要請については、ヘリが任務中で、他の需要に対応できなくなる時間はそれほど長くない、これによる応需の発生も多くはないと考えられる。しかしながら、影響を全く受けないのではなく、もし出動中でなければ対応できているはずの要請が応需となる事象は生じる。こうしたリスクを抱えるという意味において、覚知要請は投機的な方式であり、これにより得られる便益との対比の上でその運用を考える必要がある。

E. 結論

- ・ドクターヘリの各施設における運航状況を調査のうへ、数理モデルによる運航のシミュレーションを行った。
- ・覚知要請割合の増加は中止発生率を増大させること、帰投前に応需することにより重複要請による応需の発生を低減できること、などが明らかになった。

F. 研究発表

1. 論文発表
なし
2. 学会発表
・鶴飼孝盛、鳥海重喜、土谷飛鳥、猪口貞樹、レジストリ登録データに基づく運用効率性の評価、第27回日本航空医療学会総会(2020年12月15日)日本航空医療学会誌 21巻3号 Page68(2020.12)

G. 知的財産権の出願・登録状況

1. 特許取得
なし
2. 実用新案登録
なし
3. その他
なし

付録1 シミュレーションで用いた数理モデル

シミュレーションで使用した数理モデルの概略を記述する。

本研究で用いた数理モデル（図8）は、マルコフ連鎖モデルである。このモデルは、システムが有限個の状態をとり、状態から（元の状態を含む）状態へと遷移する確率（状態遷移確率）を定めることで構成される。このとき、状態遷移確率は、遷移の元となる状態にのみ依存するものとする。

本研究でのモデルでは、状態は大きく分けて「待機中」「現場前進中」「現場滞在中」「帰投中」に大別される。現場前進中、現場滞在中、帰投中についてはその状態が終了するまでの残り時間に対応した細分化された状態を定義する。さらに、現場前身中については取消の発生、帰投中については帰投前の要請受諾に対応した状態を設ける。また、時間間隔を1分とし、状態遷移確率をJSAS-Rの登録データより定める。

待機中にあるへりは、要請の発生により現場前進中へと遷移する。この時の状態遷移確率は、年間の要請件数から求めた1分あたりの要請発生確率とした。年間要請件数を n 、1分あたりの要請発生確率を p 、1年360日、1日8時間運航、運航率80%として、

$$\lambda = n / (0.8 \times 360 \times 8)$$

$$p = 1 - \exp(-\lambda/60)$$

により求められる。これは、待機中からの状態遷移確率であり、細分化された各状態への状態遷移確率を合計したものである。現場前進中の状態は、実際に現場へと着陸する「傷病者接触」と途中で取消しとなる「中途取消」に分けられる。これは傷病者接触率により按分される。さらに、これら2つの状態は、状態がどれだけ続くかにより細分化される。これは要請から現場着陸まで、要請から中止決定までの所要時間分布に応じて定まる。傷病者接触率を α 、要請

から現場着陸までの所要時間が t 分である確率を $f_{\alpha}(t)$ 、要請から中止決定までの時間が t 分である確率を $f_{\bar{\alpha}}(t)$ とする。上記をまとめ、待機中から現場着陸まで t 分という状態へ遷移する確率を

$$p\alpha f_{\alpha}(t)$$

待機中から中止決定まで t 分という状態へ遷移する確率を

$$p(1 - \alpha)f_{\bar{\alpha}}(t)$$

と定める。

次に、現場前進中からの遷移確率について述べる。状態終了までの残り時間 t が1分よりも大きい場合には、確率1で残り時間が $t-1$ 分の状態へと遷移する。傷病者接触で残り時間1分のとき、現場滞在へ確率1で遷移する。このとき、現場滞在はその継続時間によって状態が細分され。そのいずれへと遷移するかは現場滞在時間の分布によって定まり、現場滞在時間が t 分である確率

$$f_s(t)$$

が、現場滞在状態が終了するまで t 分の状態への状態遷移確率である。また、中止決定まで残り時間が1分のとき、確率1で帰投中へと遷移する。帰投が完了するまで t 分の状態へと遷移する確率は、

$$f_{\beta}(t)$$

で、要請から中止決定までの時間が t である確率と等しい。

現場滞在中についても同様に、現場滞在中終了までの残り時間 t が1より大きい場合には、確率1で残り時間が $t-1$ の状態へと遷移する。残り時間が1の場合、確率1で帰投中へと遷移する。現場出発から帰投までの所要時間分布に基づき、帰投中の残り時間が t である状態への遷移確率は、現場出発から帰投までの時間が t 分である確率

$$f_{\beta}(t)$$

で与えられる。

最後に、帰投中について記す。本研究では、帰投までの残り時間が一定の閾値以下であれば、生じた要請を受け入れるものとしている。そのため、新たな要請を受諾していない状態と、新たな要請を受諾

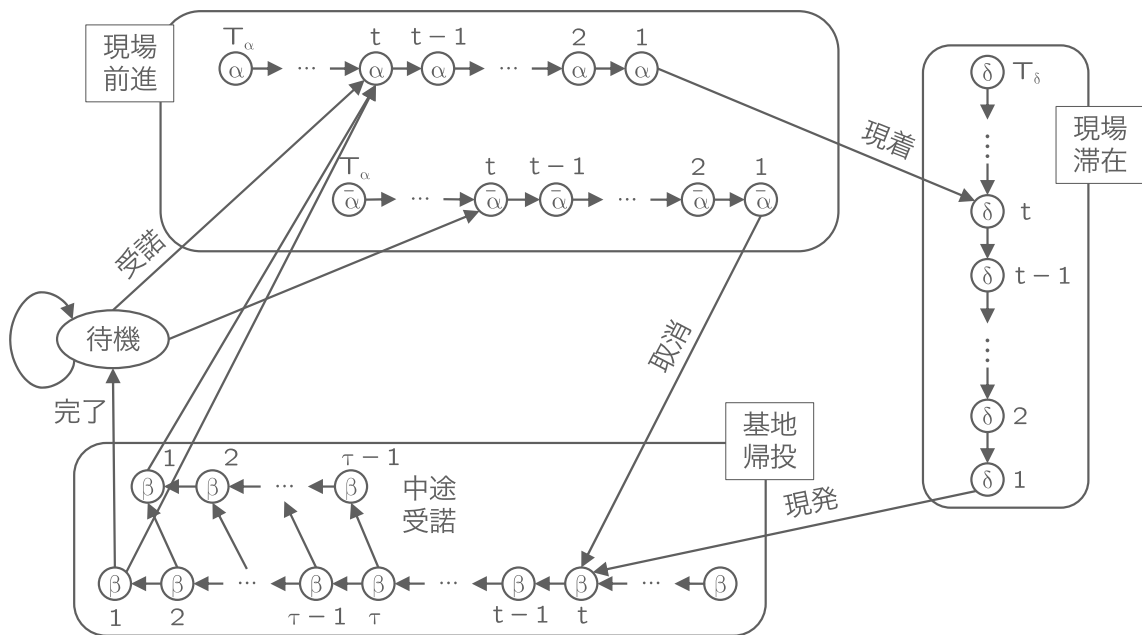


図 8 数理モデルの状態遷移図

している状態とに、帰投中の状態を分割する。帰投するまでの時間が要請受諾の閾値よりも大きい場合には、新たな要請を受諾している状態は存在しない。したがって、帰投するまで t 分である状態は確率 1 で 帰投まで $t-1$ 分の状態へと遷移する。帰投するまでの時間が要請受諾の閾値以下であれば、要請を受諾する。要請受諾の閾値を τ とし、1分あたりの要請発生確率 p を用いると、帰投するまで $t(\leq \tau)$ 分である状態から、要請を受諾して帰投まで $t-1$ 分の状態（要請受諾済）へと遷移する確率は p 、要請が発生せず帰投まで $t-1$ 分の状態（要請未受諾）へと遷移する確率は $1-p$ となる。さらに、要請未受諾で帰投まで 1 分の状態からは確率 $1-p$ で待機状態へと遷移する。加えて、要請が発生し、現場着陸まで t 分の状態へ

$pf_{\alpha}(t)$
 の確率で遷移する。また、要請受諾済で帰投まで 1 分の状態からは、現場着陸まで t 分の状態へ $f_{\alpha}(t)$
 の確率で遷移する。

付録2 集計時点の異なる中止発生率同士の関係

覚知要請についての中止発生率を a 、現場要請についての中止発生率を b とする。また、要請時点の覚知要請割合を p 、現場進出し患者接触に至った要

請中の覚知要請割合を q とする。ある1件の要請が発生したとき、その要請が覚知要請であり患者接触に至る率は $p(1-a)$ 、要請が現場要請であり患者接触に至る率は $(1-p)(1-b)$ と表される。これより、患者接触時点の覚知要請割合 q は

$$q = p(1-a)/(p(1-a) + (1-p)(1-b))$$

と表すことができる。

上の式を p で微分すると、

$$\frac{dq}{(dp)} = (1-a)(1-b)/\{p(1-a) + (1-p)(1-b)\}^2$$

が得られる。ここで、 a, b, p はいずれも 0 以上 1 以下であることから、 $\frac{dq}{dp} \geq 0$ であることがわかる。

したがって、 $0 \leq p \leq 1$ の範囲で患者接触時点の覚知要請割合 q は要請時点の覚知要請割合 p の増加関数である。このとき、逆関数が存在し、やはり増加関数となる。これより、患者接触時点の覚知要請割合が大きくなると、要請時点の覚知要請割合も大きくなることが言える。