

学位論文内容の要旨

北海道科学大学大学院保健医療学研究科
保健医療学専攻
博士課程

堀田 蛍

低温環境における輸液の温度低下とその防止策に関する研究

ドクターヘリやドクターカーの普及により、プレホスピタル診療が増加している。ドクターヘリで搬送される患者様の半数以上は外傷患者様である。外傷患者様の死亡、いわゆる外傷死には3つのピークがある。第1のピークは受傷後直後に現場での死亡（即死）、第2のピークは受傷後数時間以内の呼吸・循環障害などによる死亡、第3のピークは数日から数週間後に脳死や多臓器不全、合併症などによる死亡である。特に、第2ピークには適切な外傷初期診療により救命できたと推定される症例が含まれており、これを「防ぎ得た（避けられた）外傷死：Preventable trauma death (PTD)」という。このPTDの多くは初期診療機能に依存しているため、プレホスピタルにおける初期治療は重要である。

外傷患者様は出血により循環血液量が減少することから、初期治療として輸液を行う。外傷患者様は低体温や代謝性アシドーシス、血液凝固障害に陥りやすい。これらは外傷患者様の致死性3徴といわれている。病院到着時の低体温の発症率と死亡率の関連についてはこれまで多く報告されており、プレホスピタルにおける低体温予防は重要である。外傷初期診療ガイドラインにて、初期輸液の際には事前に加温した輸液を使用することが推奨されている。しかし、救急現場の状況によっては屋外で輸液を行わなければならない事案もある。その一例として、道内におけるドクターヘリの活動中にて車内に閉じ込められた外傷患者様に対して、屋外で輸液を行ったところ、輸液回路内で輸液が凍結した事案も発生している。その日の最低気温は -12.8°C と非常に寒い日であった。北海道や東北などの寒冷地のみならず、冬季の気温は 10°C を下回ることから、屋外の救急現場などの低温環境において輸液の温度が容易に低下することが推測される。低温の輸液によって本来予防すべき低体温の助長が懸念される。病院内などの室温環境における輸液の温度低下に関する検討は行われてきているが、このような低温環境の想定や、外傷患者様に流入する実際の輸液の温度に関する詳細な研究は行われていないのが現状である。

本研究ではこれまで行われてこなかった低温環境における外傷患者様の低体温助長の予防のための輸液の温度管理に関する知見を初めて得ることを目的とした。具体的には、まず低温環境において輸液の温度がどの程度低下するのかを明らかにするため、患者に流入する直前（輸液回路の末端）の輸液の温度低下について初めて調査した。さらに輸液の温度低下の結果から、低温環境における輸液の温度低下防止策の検討を行った。外傷患者様の致死性3徴のひとつである低体温は 34°C 以下である。また、血液は 42°C の長時間加温により溶血する可能性がある。そのため、輸液を 34°C 以上 42°C 以下に維持することを目標とした。最終的に、屋外などの救急現場でも使用できる小型・軽量で可搬性に優れた輸液の温度低下防止のための装置を作製した。

本論文は第1章を序論とし、研究背景や実際の救急事案、本研究の目的、本論文の構成について述べた。第2章では、低温環境における輸液の温度低下について検討し、輸液の温度低下の傾向や温度低下に影響を与える因子について述べた。第3章では、輸液の温度低下防止策として保温の基礎検討を行い、保温による輸液の温度低下抑制の効果について述べた。第4章では、輸液の温度低下防止策として加温の基礎検討を行い、温度低下防止のための加温条件と様々な救急現場を想定した際の加温の効果について述べた。第5章では加温による性状変化について検討し、本研究で確立した加温による輸液の温度低下防止の安全性について述べた。第6章では、実際の屋外などの救急現場にて使用可能な加温装置を作製し、輸液の温度低下防止の効果や臨床応用について述べた。そして第7章では、本研究で得られた結果や考察を整理し、結論とした。

本論文において明らかになったことを以下に記す。

- ① 低温環境において輸液を行うと、輸液回路内にて冷却され、屋外気温に近づくように輸液の温度は低下することが明らかとなった。
- ② 輸液バッグや輸液回路の保温を行った結果、事前に加温した輸液バッグの温度のみを維持しても、患者様に投与される直前の回路末端の輸液温は容易に低下することから、輸液回路への対策が必要であることが分かった。輸液回路の保温では、輸液の温度低下抑制の効果はあったものの、低体温予防のための目標温度は維持できなかった。
- ③ 輸液回路の加温の基礎的検討より、回路末端 100 cm を約 55℃で加温することで、目標温度を維持できることを明らかにした。また、この加温条件による輸液性状変化はなかった。
- ④ 輸液回路の加温装置の作製を行い、屋外を想定した救急現場において輸液の温度低下を防止できることを示した。

以上のことから、低温環境における輸液の温度低下防止には、輸液回路の加温が有効であり、その具体的な加温条件についても明らかにした。さらに、屋外などの救急現場で使用可能な新たな輸液回路の加温装置を作製し、臨床応用の可能性を示した。今後の課題として、加温装置の加温温度をより安定させること、加温温度の制御機構を構築することで、プレホスピタルにおける搬送中などの環境にて安全に使用できる加温装置が実現可能となる。

本研究は、これまで検討されてこなかった低温環境のプレホスピタルにおいて、外傷患者様の低体温予防のひとつである加温輸液に関する重要な知見であると考えられる。本研究で明らかになった加温条件をもとに作製した新たな輸液回路の加温装置によって、輸液の温度低下防止が可能となり、低体温助長の予防につながると考えられた。また、本研究にて作製した輸液回路の加温装置は屋外への持ち出しができるため、災害医療などの制限のある環境においても使用可能である。このことから、救急医療のみならず災害医療への貢献も期待でき、より多くの外傷患者様の低体温予防にも有効であると考えられる。そして、PTDの減少や予後不良の改善などにつながると考える。

目次

1. 序論	1
1.1 プレホスピタル診療とドクターヘリ救命	1
1.1.1 プレホスピタル診療とは	1
1.1.2 北海道内におけるドクターヘリ基地病院	1
1.1.3 道央ドクターヘリの出動に関わる時間経過、出動件数、疾患別頻度	4
1.2 救急医療における外傷患者様の初期治療	10
1.2.1 外傷死と外傷初期診療ガイドライン	10
1.2.2 外傷患者様の低体温	12
1.2.3 冬季のドクターヘリ出動事例	13
1.3 本論文について	14
2. 低温環境における輸液の温度低下に関する基礎研究	15
2.1 序論	15
2.2 実験方法	15
2.2.1 輸液回路と計測センサ	15
2.2.2 実験環境	20
2.2.3 基本条件	21
2.2.4 実験手順	22
2.2.5 検討内容	23
2.3 実験結果	31
I 基本条件	31
II 屋外気温の変更	33
III 輸液流量の変更	36
IV 輸液回路の長さの変更	37
V 輸液の種類の変更	39
VI 風の発生	41
2.4 考察	43
2.4.1 低温環境における輸液の温度低下の程度	43
2.4.2 輸液回路内の熱損失	46
2.4.3 低体温助長の可能性	47
2.4.4 輸液の目標温度	48
3. 保温による輸液の温度低下防止策の基礎検討	49
3.1 序論	49
3.2 輸液バッグの保温と初期温度の上昇	50
3.2.1 実験目的	50
3.2.2 輸液バッグの保温	50
3.2.3 輸液バッグの初期温度の上昇	51
3.2.4 実験結果	52
3.2.5 考察	54
3.3 輸液回路の保温	55
3.3.1 実験目的	55
3.3.2 実験方法	55

3.3.3	保温方法	55
3.3.4	実験結果	59
3.3.5	考察	61
4.	輸液回路の加温による輸液の温度低下防止策の基礎検討	62
4.1	序論	62
4.2	予備実験	63
4.2.1	実験目的	63
4.2.2	実験方法	63
4.2.3	加温方法	63
4.2.4	実験結果	67
4.2.5	考察	68
4.3	輸液回路の加温範囲の検討	69
4.3.1	実験目的	69
4.3.2	実験方法	69
4.3.3	加温方法	69
4.3.4	検討内容	71
4.3.5	実験結果	75
4.3.6	考察	79
4.4	輸液回路の加温温度の検討	81
4.4.1	実験目的	81
4.4.2	実験方法	81
4.4.3	加温方法	81
4.4.4	検討内容	81
4.4.5	実験結果	83
4.4.6	考察	85
4.5	様々な低温環境における輸液回路の加温効果	86
4.5.1	実験目的	86
4.5.2	実験方法	87
4.5.3	様々な低温環境の想定	87
4.5.4	急速輸液の想定	87
4.5.5	実験結果	89
4.5.6	考察	98
5.	輸液回路の加温による輸液の性状変化	99
5.1	序論	99
5.2	実験方法	99
5.2.1	実験環境	99
5.2.2	輸液製剤	100
5.2.3	輸液の温度条件	100
5.2.4	測定項目と測定機器	101
5.3	実験結果	103
5.4	考察	106
5.4.1	酸塩基平衡の変動	106
5.4.2	粘度の変化	106

6. 救急現場で使用可能な輸液回路の加温装置の開発	108
6.1 序論	108
6.2 開発した加温装置	109
6.2.1 電熱線ヒータ	109
6.2.2 モバイルバッテリー	112
6.2.3 加温装置の構造	114
6.3 実験方法	117
6.4 実験結果	119
6.5 考察	124
7. 結論	126
参考文献	128
謝辞	132
研究業績	133

図の目次

1.1	ドクターヘリの運航範囲	3
1.2	ドクターヘリ出動までの流れ	5
1.3	救急現場における覚知から病院収容までの平均時間経過	7
1.4	救急現場出動における覚知から医師接触までの所要時間	7
1.5	出動件数	8
1.6	出動区分	9
1.7	疾患別頻度	9
2.1	輸液回路と計測センサ	17
2.2	熱電対の留置箇所	18
2.3	8ch 熱電対データロガー (Pico Technology TC-08)	19
2.4	恒温室	20
2.5	使用した輸液製剤	25
2.6	業務用扇風機	28
2.7	スマートプローブ熱線式風速計	29
2.8	風を発生させた実験の様子	30
2.9	基本条件における輸液温の測定結果 (n=5)	32
2.10	屋外気温 -5℃ と 0℃ における輸液の温度低下の比較 (n=5)	33
2.11	屋外気温 -10℃ の輸液温の低下	34
2.12	輸液回路内で凍結した輸液	35
2.13	輸液流量の変更による輸液温の比較 (n=5)	36
2.14	輸液流量の変更による輸液温の比較 (n=5)	38
2.15	輸液の種類の変更による輸液温の比較 (n=5)	40
2.16	風を発生させたときの輸液温の変化 (n=5)	42
3.1	保温バッグ	51
3.2	輸液バッグの保温 (n=5)	52
3.3	輸液バッグを加温する初期温度の上昇 (n=5)	53
3.4	耐熱パイプカバーと実験の様子	56
3.5	ガラス断熱テープと実験の様子	57
3.6	輸液回路の保温の結果 (n=5)	60
4.1	チューブカバーヒータ	64
4.2	予備実験の結果 (n=5)	67
4.3	交流電圧調整器	70
4.4	輸液回路の加温範囲 (I ~ III)	
I	加温範囲: 回路末端 100 cm	72
II	加温範囲: 回路末端 50 cm	73
III	加温範囲: 回路末端 100 cm から末端 10 cm を除く 90 cm	74
4.5	回路末端 100 cm を加温したときの輸液の温度低下防止の効果 (n=5)	76
4.6	加温範囲を変えたときの輸液温の比較 (n=5)	78
4.7	加温温度を変えたときの輸液温の比較 (n=5)	84
4.8	急速輸液で使用した輸液回路	88
4.9	屋外気温 -5℃ における輸液回路の加温の効果 (n=5)	90
4.10	屋外気温 -10℃ における輸液回路の加温の効果 (n=5)	91
4.11	急速輸液における輸液の温度変化 (n=3)	93

4.12	急速輸液における輸液回路の加温（55℃）の効果（n=3）	95
4.13	急速輸液における加温温度の違いによる加温効果（n=3）	97
5.1	血液ガス分析装置	101
5.2	粘度計	102
6.1	ヒータパッド	110
6.2	モバイルバッテリー	112
6.3	輸液加温器 F-CARE の Warming Profile	114
6.4	開発した加温装置の構造	115
6.5	加温温度と接触温度の測定箇所	118
6.6	開発した加温装置による輸液の温度低下防止の効果（n=3）	120
6.7	開発した加温装置と基礎検討の比較	122
6.8	開発した加温装置と基礎検討の比較②	123

表の目次

1.1	ドクターヘリの運航状況等について	2
2.1	使用した輸液製剤の特徴（添付文書参照）	27
3.1	各保温材の特徴	58
4.1	チューブカバーヒータの仕様	66
5.1	各輸液製剤の pH 変化（n=3）	104
5.2	各輸液製剤の粘性の変化	105
6.1	ヒータパッドの仕様	111
6.2	モバイルバッテリーの仕様（Anker ホームページより抜粋）	113

用語の定義

1. 輸液バッグ温：輸液バッグ内に留置した熱電対で測定した輸液の温度
2. 輸液温：輸液回路の末端に留置した熱電対で測定した輸液の温度
3. 加温温度：輸液回路加温の基礎検討にて加温したチューブカバーヒータや開発した加温装置のヒータパッドを熱電対で実測した温度
4. 加温前温度：輸液回路を加温した範囲の上流側の輸液回路内に留置した熱電対で測定した、加温される前の輸液の温度
5. 接触温度：開発した加温装置のヒータパッドと輸液回路の接触面に留置した熱電対で測定した加温温度

1. 序論

1.1 プレホスピタル診療とドクターヘリ救命

1.1.1 プレホスピタル診療とは

医師や看護師を救急現場へ派遣し、病院前すなわち救急現場や搬送中から、一刻も早く治療を行うことをプレホスピタル診療という。ドクターヘリやドクターカーなどの活動がこれにあたる。これまでは救急救命士による制限された中での医行為のみが行われてきたが、より高度な治療が可能となった。交通事故による重傷外傷患者や救出困難例、心肺停止などの重症例に対して出動し、医師による治療を早期に行うことで、救命率が向上している。例えば、ドクターヘリは救急車搬送と比較した場合、医師による治療開始時間が 22.2 分も短縮される¹⁻¹⁾。また、ドクターヘリの導入により救命率は 3 割以上向上し、完治して社会復帰できた人は 1.5 倍に達している¹⁻²⁾。

1.1.2 北海道内におけるドクターヘリ基地病院

北海道内では、2005 年 4 月 1 日より道央圏（基地病院：手稲溪仁会病院）に初めてドクターヘリが導入された。その後、2009 年 10 月より道北圏（基地病院：旭川赤十字病院）及び道東圏（基地病院：市立釧路総合病院）、2015 年 2 月より道南圏（基地病院：市立函館病院）に導入され、現在 4 機のドクターヘリが運航されている（表 1.1）。ドクターヘリの運航範囲は、基地病院から半径 100 km 圏内又は 1 時間以内とされている。平均飛行時間は 50 km で約 15 分、100 km で約 30 分、150 km で約 45 分である（図 1.1）。

表 1.1 ドクターヘリの運航状況等について¹⁻³⁾

区分	道央	道北	道東	道南
基地病院	手稲溪仁会病院	旭川赤十字病院	市立釧路総合病院	市立函館病院
運航会社	中日本航空(株)	朝日航洋(株)	中日本航空(株)	鹿児島国際空港(株)
運航開始年月	H17.4	H21.10 ※十勝圏 H27.11.20 から	H21.10 ※十勝圏 H27.11.20 から	
主な運航圏	道央圏 道北圏(富良野・留萌周辺) 31 消防本部 79 市町村	道北圏 道央圏(北空知) オホーツク圏 (遠紋) 十勝圏(北西部 5 町) 16 消防本部 60 市町村	釧路・根室圏 オホーツク圏 (北網) ※北網圏 H24.5 から 十勝圏 10 消防本部 37 市町村	道南圏 7 消防本部 18 市町
R1 年度 運航実績	329 (404)	381 (417)	272 (321)	381 (413)
	1363 (1555)			
R2 年度運航実績 (速報値)	308 (368)	265 (289)	211 (257)	359 (410)
	1143 (1324)			

※運航業績欄、() 内は離陸後キャンセルを含む

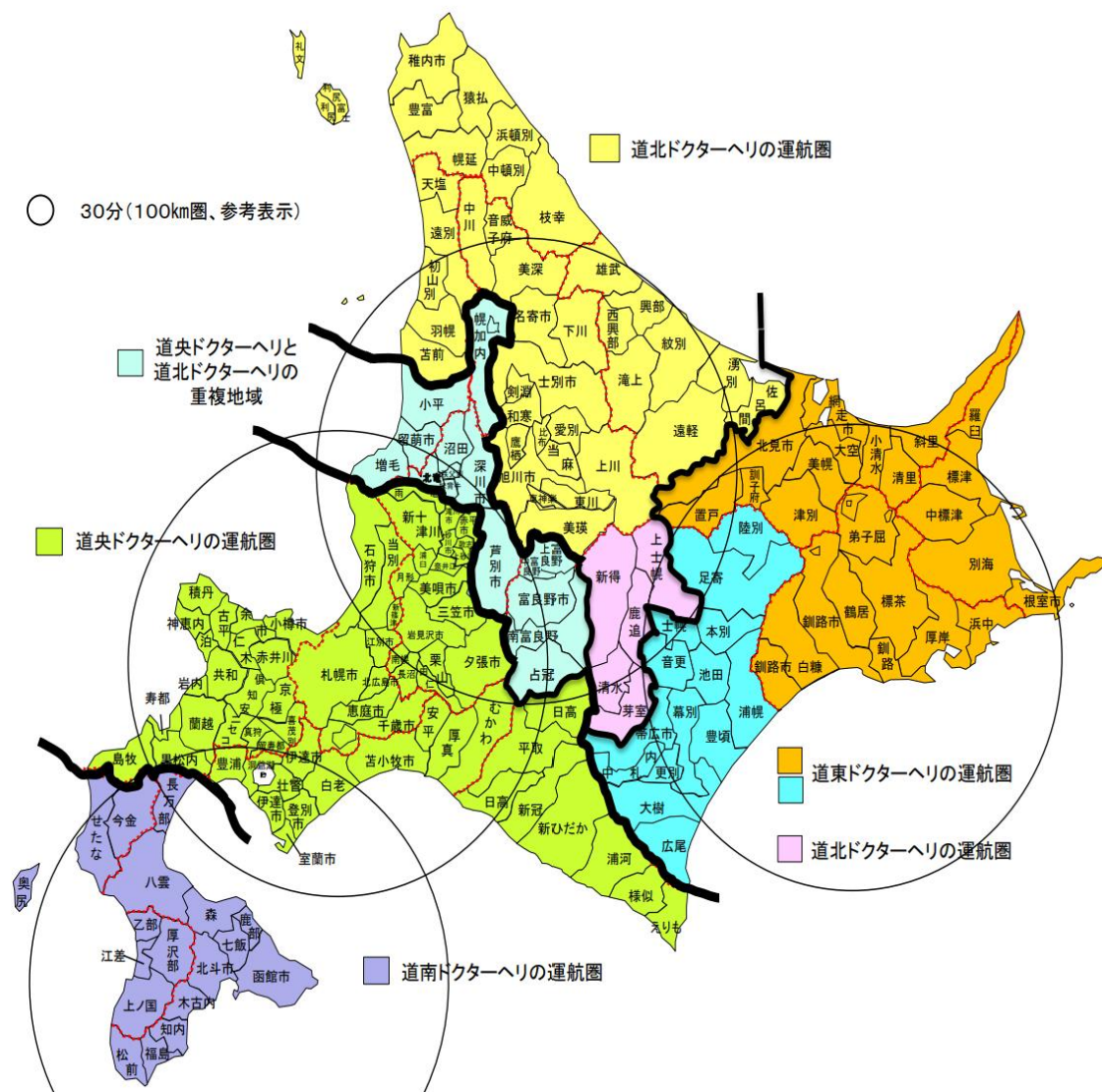


図 1.1 ドクターヘリの運航範囲¹⁻³⁾

1.1.3 道央ドクターヘリの出動に関わる時間経過、出動件数、疾患別頻度

(1) 救急現場への出動に関わる時間経過

119 番通報を受けた消防機関が、救急現場で医師による早期治療が必要と判断した場合にドクターヘリ運航管理センターへ要請が入り、ドクターヘリが出動する（図 1.2）。消防機関によるドクターヘリ出動要請基準¹⁻⁴⁾を以下に示す。

① 生命の危機が切迫しているか、その可能性が疑われる傷病者であって、ドクターヘリにより治療開始時間の短縮が期待できるもの。

② 重症傷病者又は特殊救急疾患（指肢切断・環境障害など）であって、ドクターヘリにより搬送時間の短縮が必要と考えられるもの。

③ 救急・災害現場（多数傷病者発生事故を含む）において、医師による診断や治療、メディカルコントロールなどを必要とする場合。

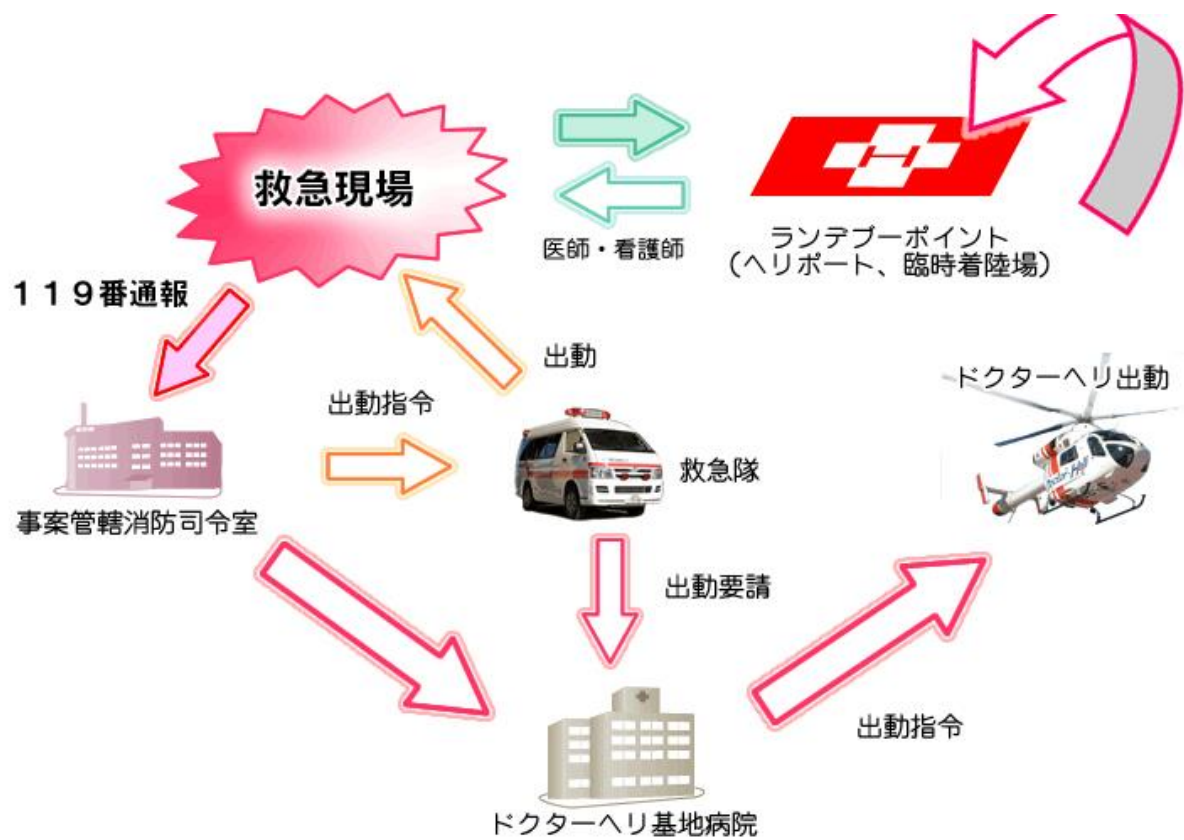


図 1.2 ドクターヘリ出動までの流れ ¹⁻⁵⁾

2021 年度（令和 3 年度）道央ドクターヘリ運航実績報告書¹⁻⁶⁾によると、救急現場出動における知覚からドクターヘリ要請までの平均所要時間は 11 分 43 秒、要請から離陸が 3 分 46 秒、離陸から救急現場到着が 16 分 15 秒、救急現場到着から離陸が 21 分 15 秒、離陸から病院収容が 13 分 46 秒である（図 1.3）。また、救急現場出動における知覚から医師が患者に接触するまでの所要時間は、146 件（救急現場出動事案のうち着陸から患者接触時刻までの経過が明確な事案）のうち 5 分未満が 119 件（81.5 %）、5 分以上が 27 件（18.5 %）と報告されている。

消防機関覚知から医療機関収容までの平均所要時間は、ドクターヘリを使用した場合 71 分 49 秒±16 分 06 秒に対し、ドクターヘリを使用しなかった場合の平均所要時間は 103 分 16 秒±41 分 33 秒と推定された。その時間差は 31 分 28 秒であることから、ドクターヘリ救命により、搬送時間が短縮できたと分析された。

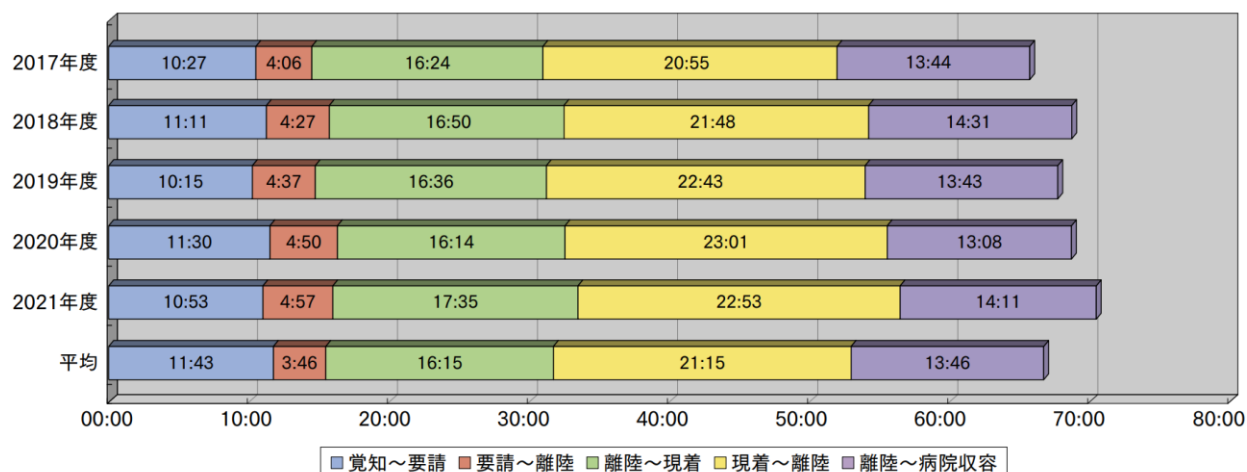


図 1.3 救急現場出動における覚知から病院収容までの平均時間経過

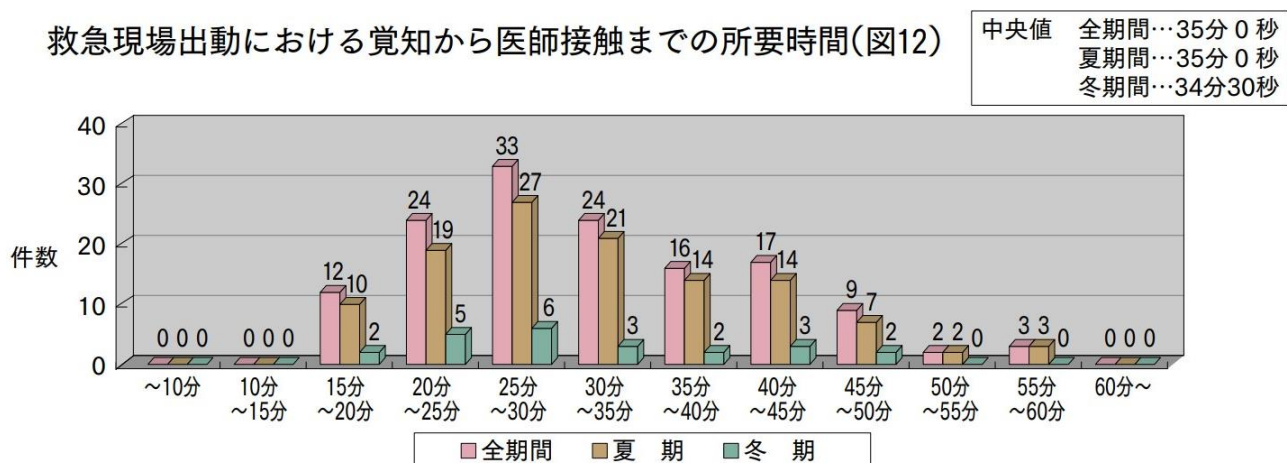


図 1.4 救急現場出動における覚知から医師接触までの所要時間

(2) 出動件数と疾患別頻度

2021 年度の道央ドクターヘリの要請件数は 638 件で、そのうち出動件数は 351 件、未出動は 287 件であった(図 1.5)。出動区分をみると救急現場出動が 234 件、緊急外来搬送が 24 件、施設間搬送が 20 件、キャンセルが 73 件であった(図 1.6)。

また、疾患別頻度について図 1.7 に示す。2021 年度の総患者数は 285 名(内、不搬送 10 名)であり、その内訳は脳血管疾患 44 名、心・大血管疾患 25 名、外傷 155 名、心肺停止 28 名、その他 23 名であった。2017 年度から共通して外傷患者の割合が最も多い。

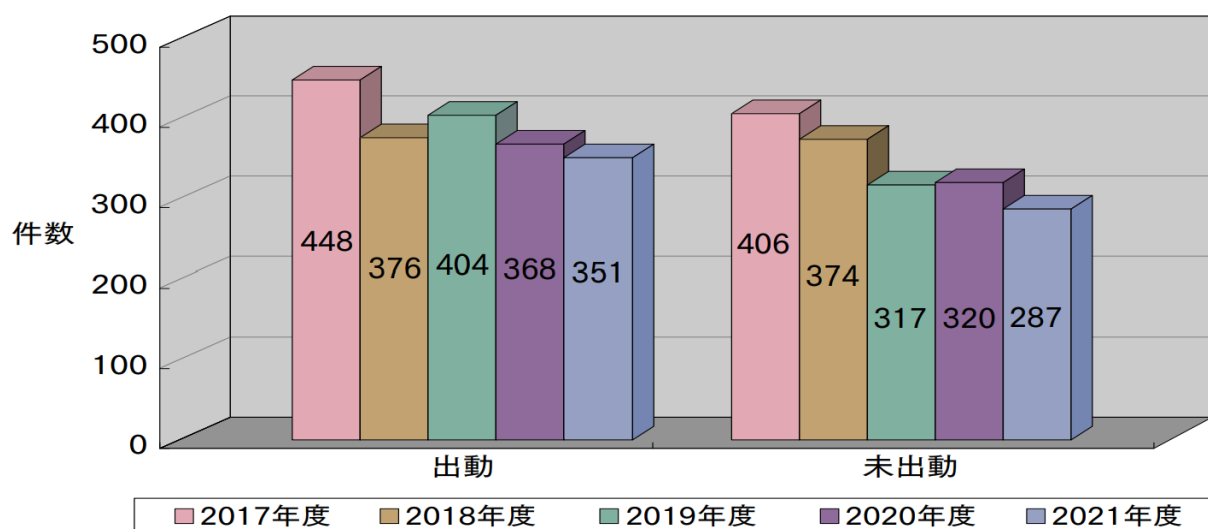


図 1.5 出動件数

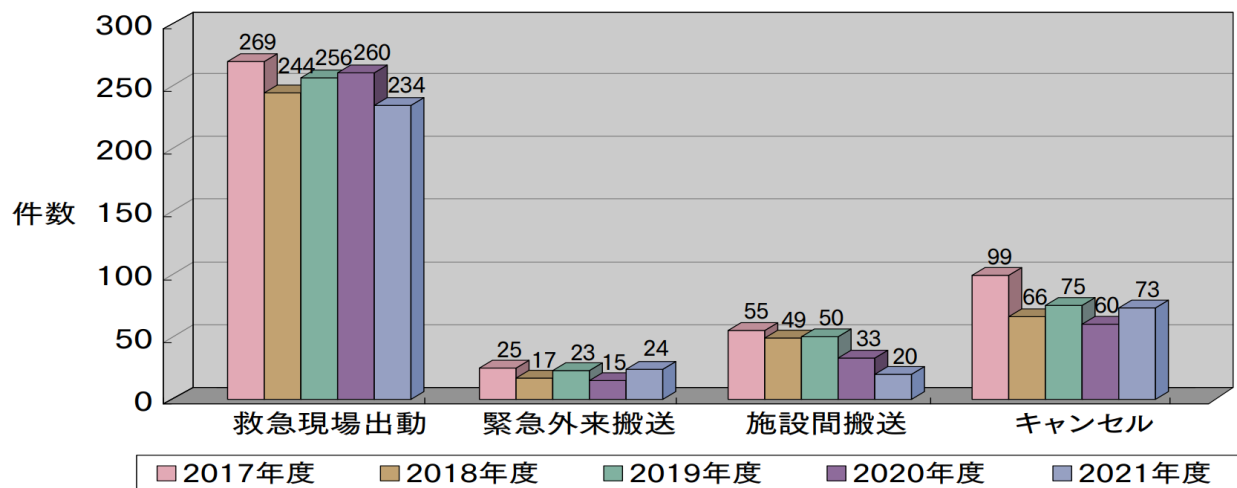


図 1.6 出動区分

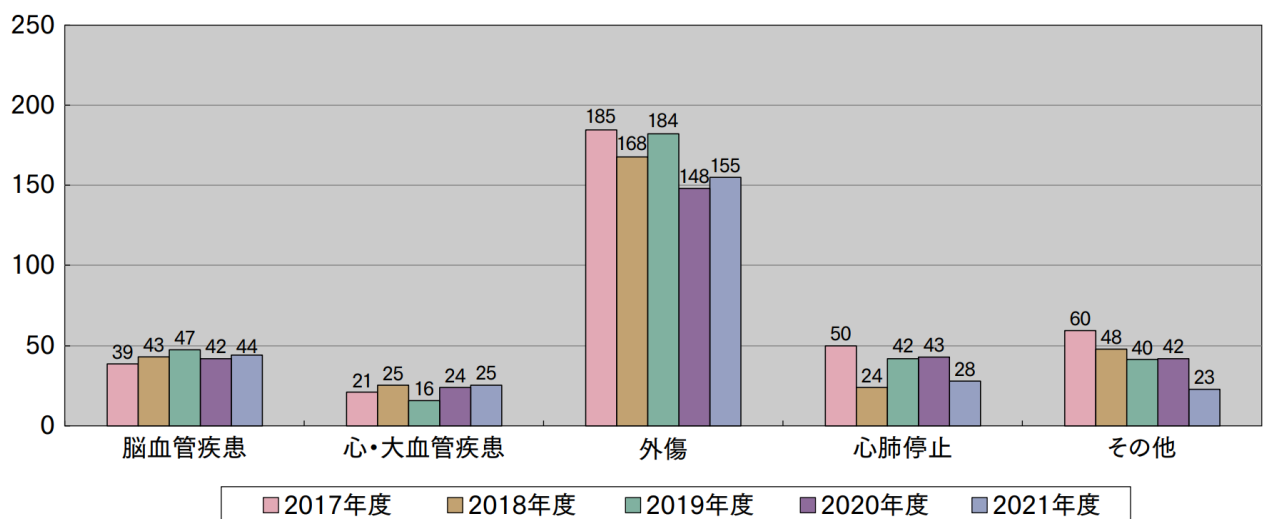


図 1.7 疾患別頻度

1.2 救急医療における外傷患者の初期治療

1.2.1 外傷死と外傷初期診療ガイドライン

ドクターヘリで搬送される患者の半数以上は外傷患者である。外傷患者の死亡、いわゆる外傷死には 3 つのピークがある。第 1 のピークは受傷後直後に現場での死亡（即死）、第 2 のピークは受傷後数時間以内の呼吸・循環障害などによる死亡、第 3 のピークは数日から数週間後に脳死や多臓器不全、合併症などによる死亡である。特に、第 2 ピークには適切な外傷初期診療により救命できたと推定される症例が含まれており、これを「防ぎ得た（避けられた）外傷死：Preventable trauma death（PTD）」という。2000 年頃の日本では、PTD が外傷死の総数の 38%¹⁻⁷⁾と非常に高い割合を占めていた。この PTD の多くは初期診療機能に依存しているため、救急医療における外傷診療システムの構築や病院前診療の充実に向けて、日本救急医学会および日本外傷学会では外傷診療のガイドライン作成に着手し、2004 年に外傷初期診療ガイドラインが作成された。ガイドラインの普及に加え、ドクターヘリの普及によるプレホスピタル診療の増加により、2010～2014 年においては PTD の割合が 18%¹⁻⁸⁾程度まで減少した。

外傷初期診療ガイドライン JATEC 第 6 版¹⁻⁹⁾では、受傷後 1 時間以内に手術が行われるか否かが外傷患者の生命予後を決定するとされている。そのため、迅速な搬送や初期治療が求められる。外傷患者の病院前救護にあたる救急隊員や救急救命士はまず、生命維持のための生理的機能を迅速に評価する ABCDE アプローチを行う。

A : Airway 気道評価

気道閉塞の有無を調べ、確実な気道確保を行う。

B : Breathing 呼吸評価

視診で呼吸数、呼吸補助筋の動き、奇異性呼吸の有無を観察する。また、

聴診によって肺全体の呼吸音や左右差を聴く。

C : Circulation 循環評価

出血の有無、心拍数、血圧、蒼白等を確認する。重症外傷患者においては出血性ショックに陥りやすいため、直ちに止血して 39 °C に加温した細胞外液を投与する。

D : Dysfunction of CNS 中枢神経障害の評価

意識レベル、瞳孔所見、片麻痺等を評価する。この際、呼吸機能や循環動態の安定化を図りながら行うのが原則である。

E : Exposure and Environmental control 脱衣と体温管理

上記の ABCD と並行して、全身の衣服を取り活動性出血や開放創の有無をみる。重症外傷患者の場合は輸液や脱衣によって急激に体温が下がる。低体温は出血傾向を助長し、代謝性アシドーシスや凝固障害を引き起こす。これらの低体温（深部体温 34 °C 以下）、血液凝固障害、代謝性アシドーシス（ $\text{pH} < 7.2$ ）は重症外傷患者の予後不良の原因であり、致死的 3 徴¹⁻¹⁰⁾と言われている。したがって、蘇生の妨げにならない方法で保温に努める必要がある。

1.2.2 外傷患者の低体温

外傷患者は出血により循環血液量が低下する。多発外傷は容易に低体温に陥りやすく、心機能障害をきたす。また低体温により血液凝固障害や出血が助長される。そして、抹消循環不全により乳酸値が上昇し、アシドーシスが進行することで代謝性アシドーシスに陥りやすくなる。代謝性アシドーシスにより、低体温や血液凝固障害はさらに加速する。これらの外傷患者における致死の3徴は互いの病態を助長し合い、制御不能な出血をきたすことで止血処置が困難となる¹⁻¹¹⁾。

病院到着時の低体温の発症率と死亡率の関連についてはこれまで多く報告されている^{1-12~16)}。このことから、プレホスピタル診療における低体温予防や低体温の期間を短縮することは死亡率の減少や予後の改善のために重要である。また、低体温を予防することは、代謝性アシドーシスや血液凝固障害を助長する悪循環に陥らないためにも重要である。

外傷患者がプレホスピタル診療において低体温に陥る主な要因は外傷の重症度である。それに加えて、周囲温度や患者の脱衣、輸液の温度などが要因として考えられている¹⁻¹⁷⁾。これらのことから、プレホスピタル診療における低体温予防として、体温測定と以下に述べる方法で保温・加温を行っている。

- ① 体表保温 (passive external rewarming) : 覆布、毛布などでの被覆。体表の血液・体液の清拭。濡れたガーゼ・シーツの交換など。
- ② 体表加温 (active external rewarming) : 温水還流ブランケット、温熱空気ブランケットや放射加温器の使用。室温を高くするなど。
- ③ 深部加温 (active core rewarming) : 加温輸液、加温輸血、加温加湿酸素の吸入、胃・膀胱の温水洗浄、胸腔・腹腔の温水洗浄など。

加温輸液に関して、成人に室温程度の輸液 1 L を投与すると、体温が 0.25 °C 低下する¹⁻¹⁸⁾ことから、ガイドラインでは 39 °C に加温した輸液の使用が推奨されている。現在、多くの施設で輸液バッグを事前に加温することで対策が行われており、プレホスピタル診療において輸液バッグを加温する方法について研究が行われてきた。39 °C の加温、またその温度を維持することは難しい課題とされているが、Cassidy らは 32 °C 以上の加温輸液により外傷患者の深部体温を適切に維持できると述べている¹⁻¹⁹⁾。

1.2.3 冬季のドクターヘリ出動事例

交通事故などが発生した場合、まず外傷患者の救出が最優先であり、その後ドクターヘリや救急車へ運び入れたのち、止血や輸液等の初期治療を行う。しかし、救急現場の状況や外傷患者の状況によっては、救出する前に屋外で初期治療を開始する場合がある。例えば、交通事故現場で患者が車の下敷きになっている、車内に閉じ込められている等の救助に時間を要する場合である。また、圧外傷（外傷患者が挟まれている場合）は、救助よりも先に輸液を行う。このような状況では屋外で初期治療を行わなければならない。その一例として、冬季の北海道内のドクターヘリ活動において、交通事故現場で車内に閉じ込められていた外傷患者に対して、屋外で輸液をした事例があった。事前に約 40 °C に加温した輸液を使用したにも関わらず、輸液回路内で輸液が凍結してしまった。凍結したときの気温は不明だが、その日の最低気温は -12.8 °C であり、非常に寒い日であった。

北海道や東北地方のような寒冷地はもちろんのこと、沖縄を除く日本全国の真冬の気温は 10 °C を下回る。そのため、低温の輸液による低体温の助長が懸念される。しかし、これまで輸液の温度低下に関する研究は室温環境を想定したものがほとんどであり、屋外などの低温環境における輸液の温度低下は明らかとなっていない。また、加温輸液についても輸液バッグの加温であり、輸液バッグから輸

液回路内を流れ患者に投与される実際の温度については明確になっていなかった。

1.3 本論文について

外傷患者の低体温は死亡率や予後不良に関連する危険因子である。プレホスピタル診療における低体温予防は非常に重要であり、加温輸液は予防策のひとつである。しかし、加温輸液の温度低下が新たな課題として考えられる。屋外などの救急現場を想定した輸液の温度低下に関する研究はほとんどないのが現状である。温度が低下した低温の輸液を患者に投与してしまうことは、本来予防すべき低体温を助長させる可能性があると考えられる。本論文では、これまで行われてこなかった低温環境における外傷患者の低体温助長の予防のための輸液の温度管理に関する知見を初めて得ることを目的とした。本論文の第2章では、低温環境における輸液の温度低下について検討し、輸液の温度低下の傾向や温度低下に影響を与える因子について述べる。第3章では、輸液の温度低下防止策として保温の基礎検討を行い、保温による輸液の温度低下抑制の効果について述べる。第4章では、輸液の温度低下防止策として加温の基礎検討を行い、温度低下防止のための加温条件と様々な救急現場を想定した際の加温の効果について述べる。第5章では加温による性状変化について検討し、本研究で確立した加温による輸液の温度低下防止の安全性について述べる。第6章では、実際の屋外などの救急現場にて使用可能な加温装置を作製し、輸液の温度低下防止の効果や臨床応用について述べる。そして第7章では、本研究で得られた結果や考察を整理し、結論とする。

2. 低温環境における輸液の温度低下に関する基礎研究

2.1 序論

外傷初期診療ガイドラインでは、外傷患者の低体温予防のための1つとして体温程度まで温められた輸液の投与が推奨されている。そのため、プレホスピタル診療においても輸液バッグを事前に加温するといった対策がとられている。しかし、現場の状況によっては屋外などの低温環境で輸液を行わなければならない場合もある。このような場合、加温した輸液の温度は容易に低下してしまうことが考えられた。また、低温な輸液を投与してしまうことで、本来予防すべき低体温を助長させる要因となる可能性が考えられた。これまで、室温環境における輸液の温度低下に関する研究は行われているが、屋外などの低温環境を想定した輸液の温度低下については調査されていない。本章では、冬季の屋外を想定した低温環境において輸液を行った際の輸液の温度変化を測定し、屋外気温と輸液の温度低下の実態を明らかにした。事前に加温した輸液バッグの温度低下のみならず、患者に投与される実際の輸液の温度についても明らかにし、低体温助長の可能性についても検討した。

2.2 実験方法

2.2.1 輸液回路と計測センサ

本実験では、救急現場で使用されている輸液回路を再現し（図 2.1）、基本の回路構成とした。救急現場では、搬送中の抜針予防や薬剤投与、病院搬送後の CT 検査へのスムーズな対応を可能にするため、一般的にエクステンションチューブで延長された輸液回路を使用する。そのため、長さ 200 cm の輸液チューブ（TERUMO ポンプ用定量輸液セット A TS-PM374L10, 内径 3.2 mm）と長さ 100 cm のエクステンションチューブ（トップ エクステンションチューブ

X3-FL100, 内径 3.3 mm) を三方活栓で接続し、合わせて 300 cm の輸液回路を使用した。また、実際の救急現場では、ローラクレンメの調節により手動で輸液流量を調整しているが、本実験では一定の流量を確保し、実験の再現性を得るために輸液ポンプ (TERUMO TE-172) を使用した。使用した輸液ポンプの使用環境条件は 10~40 °C、流量精度は周囲温度 25 °C で $\pm 5\%$ 以内である。低温環境での使用が想定されていないため、10 分間の輸液の重さを測定し、 $1\text{ g} \div 1\text{ mL}$ で計算して精度範囲内であることを確認した。

輸液の温度測定には、被覆 K 熱電対 (測定温度範囲: $-50\text{ }^{\circ}\text{C} \sim +200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、測定精度: 測定値の $\pm 0.2\%$ と $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ の合計) を使用した。事前に加温した輸液の温度変化と実際に患者に流入する直前の輸液の温度変化を測定するため、輸液バッグ内と輸液回路の末端に熱電対を留置した (図 2.2)。本実験では、輸液バッグ内の輸液の温度を輸液バッグ温、輸液回路の末端の輸液の温度を輸液温と定義する。

測定機器は 8ch 熱電対データロガー (Pico Technology TC-08、図 2.3) を用いた。このデータロガーはリアルタイムで 8 箇所と同時に温度測定が可能である。なお、サンプリング周波数は 10 Hz である。

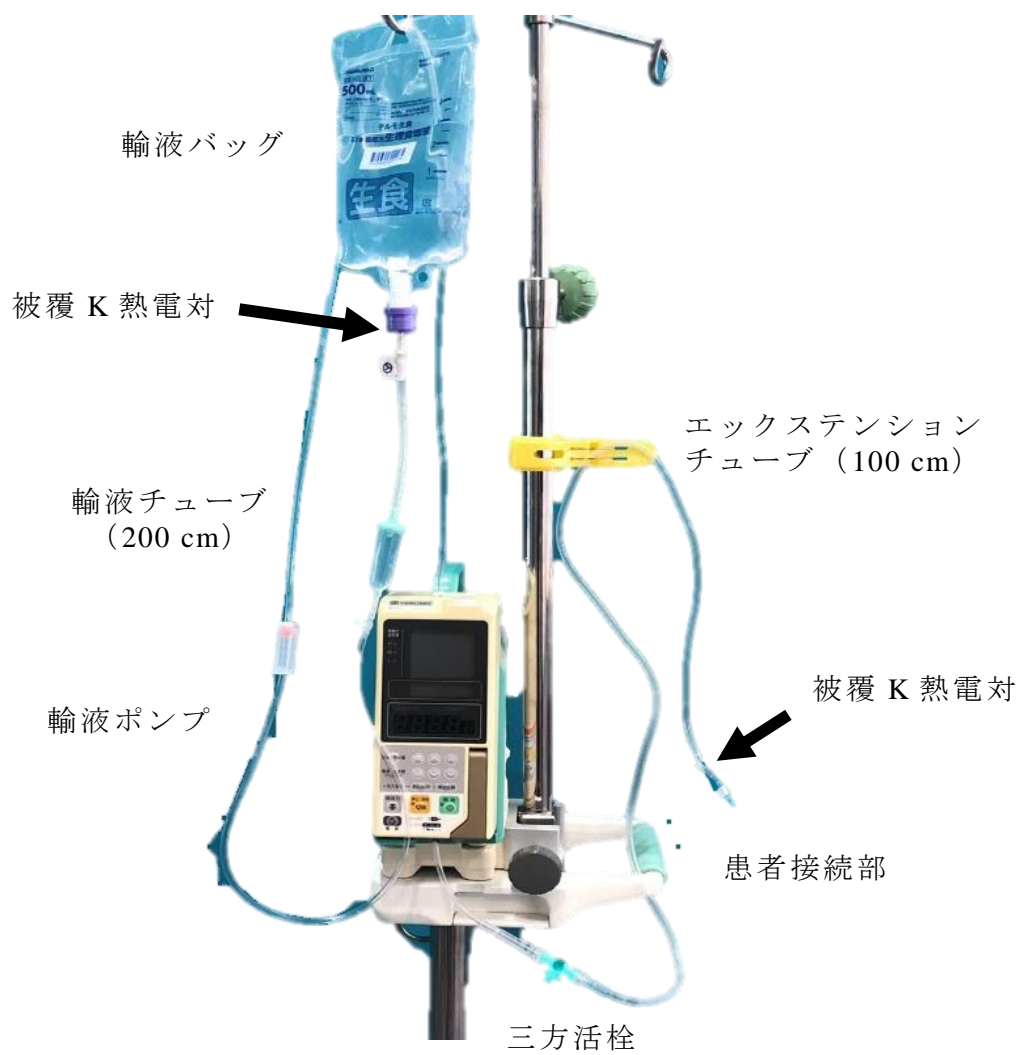
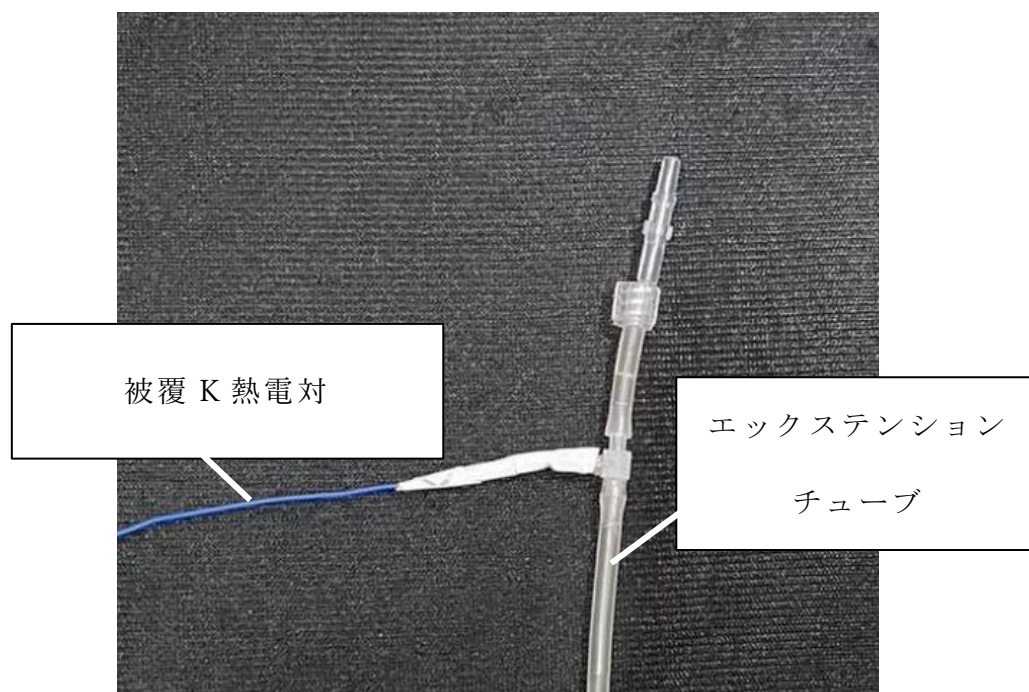


図 2.1 輸液回路と計測センサ



(a) 輸液バッグ内



(b) 輸液回路の末端

図 2.2 熱電対の留置箇所



図 2.3 8ch 熱電対データロガー (Pico Technology TC-08)

2.2.2 実験環境

本学が所有している恒温室で低温環境を再現した（図 2.4）。恒温室内の広さは約 27.3 m³である。A 室（図 2.4、左側）の温度制御範囲は－10 ℃～＋40 ℃、湿度制御範囲は 30～90 %、B 室（図 2.4、右側）の温度制御範囲は－30 ℃～＋40 ℃、湿度の制御機能は有していない。



図 2.4 恒温室

2.2.3 基本条件

屋外気温の設定は、水が凍結する一般的な温度である 0 °C を基本条件とした。恒温室内はほぼ無風である。外傷患者の初期輸液では、糖を含まない細胞外液補充液が輸液製剤として選択される。細胞外液補充液としては一般的に生理食塩液やリンゲル液などの等張電解質輸液が用いられるため、本実験では生理食塩液（500 mL）を使用した。なお、外傷初期診療ガイドラインで 39 °C に加温した輸液の使用が推奨されていることから、実際の救急現場では輸液バッグを 40 °C 程度に加温して使用している。本実験では、救急現場の使用条件と同様にするため、事前にウォーターバス内で輸液バッグを約 40 °C に温めた。輸液流量については、急速輸液が予後を悪化させる可能性がある²⁻¹⁾と考えられていることから、現在は推奨されていない。実際の救急現場では 1 秒 1 滴になるようローラクレンメを操作し、輸液流量 180 mL/h 程度の維持輸液に調整されている。本実験では、維持輸液を想定した 200 mL/h に輸液ポンプの流量を設定した。これらの条件と 2.2.1 項で述べた輸液回路の長さ 300 cm を基本条件とした。

なお、前述のようにドクターヘリの運航における現場到着から離陸までの時間が平均 20 分程度¹⁻⁶⁾であることから、屋外での輸液は平均 10 分程度であると推測した。そのため、本実験では輸液時間は 10 分間とした。輸液の温度は輸液開始直後（0 分）から 1 分毎に連続測定した。

2.2.4 実験手順

実験の準備から測定終了までの手順を以下に示す。

恒温室外（室温環境）

- ① 輸液ポンプを室温環境で保管して、輸液回路を組む。
- ② プライミングをして、熱電対の留置箇所から輸液の漏れがないことを確認する。輸液バッグ内の輸液の温度は、輸液開始時に 40℃であることが理想であるため、輸液開始までの時間を考慮して少し高めの 42～43℃程度に加熱しておく。
- ③ 熱電対の留置箇所からの輸液の漏れがなければ、新しく事前に加温しておいた輸液（42～43℃程度）を用意する。
- ④ 輸液回路、輸液ポンプを恒温室内（低温環境）へ運ぶ。

恒温室内（低温環境）

- ⑤ 輸液ポンプの設定を行い、データロガーに熱電対を接続する。
- ⑥ プライミングで満たした輸液が冷えてしまっている可能性があるため、クレンメを全開にして流す。回路末端に留置した熱電対で測定した輸液の温度が上がりきり、下がり始めたときに輸液を開始する。この開始直後を 0 分として、輸液バッグ温と輸液温の測定も開始する。また、10 分間の輸液の流量精度を確認するため、フラスコを用意して輸液を回収する。
- ⑦ 測定終了後、輸液回路や輸液ポンプを恒温室外へ運び、フラスコに回収した輸液量を計測し、流量精度を確認する。

2.2.5 検討内容

低温環境の救急現場を想定した基本条件における輸液の温度変化を測定した。また、より詳細な輸液の温度変化を明らかにするため、基本条件からそれぞれ屋外気温や輸液流量、輸液回路の長さ、輸液の種類を変えた条件についても検討した。使用した輸液製剤とその特徴については図 2.5、表 2.1 に示す。さらに、恒温室はほぼ無風であるため、風による影響はほぼ受けない。風が輸液の温度低下に与える影響を検討するため、恒温室内に業務用扇風機（図 2.6）を設置し、風を発生させた。風速はスマートプローブ熱線式風速計（Testo、図 2.7）を使用し、実測した。風を発生させたときの実験の様子を図 2.8 に示す。変更した条件を以下の I ～ VI に示す。なお、各条件において、同様の実験を 5 回ずつ行った。

I 基本条件

- ▶ 屋外気温 0 °C、輸液流量 200 mL/h、輸液回路の長さ 300 cm、輸液：生理食塩液、風速 0 m/s

II 屋外気温の変更

- ▶ 屋外気温 0 °C を基準として、-5 °C、-10 °C

屋外気温は水の凝固点 0 °C を基本条件とした。さらに低温な環境として、札幌の平均気温が最も低い 1 月が -4.4 °C（気象庁、2022 年）であるため、札幌の冬を想定した -5 °C、輸液の凍結事例と同様の極寒な環境を想定した -10 °C とした。

III 輸液流量の変更

- ▶ 200 mL/h を基準として、100 mL/h（1/2 倍）、400 mL/h（2 倍）

IV 輸液回路の長さの変更

- ▶ 300 cm を基準として、150 cm (1/2 倍)、450 cm (1.5 倍)

150 cm では、輸液チューブ 200 cm を半分の 100 cm、エックステンションチューブ 100 cm を半分の 50 cm にした。また、450 cm では輸液チューブ 200 cm に半分の 100 cm を繋ぎ、エックステンションチューブ 100 cm に半分の 50 cm を繋いだ。

V 輸液の種類の変更

- ▶ 細胞外液により近い組成で、臨床でも使用されているリンゲル液に変更

救急現場において外傷患者の初期輸液で一般的に使用される輸液は等張電解質輸液である。生理食塩液よりも細胞外液の組成に近い、酢酸リンゲル液と乳酸リンゲル液を使用した。使用した輸液製剤とその特徴を図 2.5、表 2.1 に示す。

VI 風の発生

- ▶ 基本条件は無風状態であり、風速 2 m/s と風速 5 m/s の風を発生

恒温室内はほぼ無風状態であるため、人が感知する最小の風である風速 2 m/s の風と札幌の平均風速が 4.4 m/s であることから、風速 5 m/s の風を発生させた。また、風の発生の実験では、輸液バッグ、輸液回路全体を風の当たる範囲に収める必要があるため、輸液ポンプを使用せず落差により流量 200 mL/h を調整した。輸液バッグの液面と輸液回路の末端の落差を 8 cm にして、さらにローラクレンメにて微調整をした。



(a) テルモ生食（生理食塩液）



(b) ソルアセト®F 輸液（酢酸リンゲル液）



(c) ソルラクト[®]輸液（乳酸リンゲル液）

図 2.5 使用した輸液製剤

表 2.1 使用した輸液製剤の特徴（添付文書参照）

	生理 食塩液	酢酸 リンゲル液	乳酸 リンゲル液
商品名	日本薬局方 生理食塩液 テルモ生食	酢酸リンゲル液 ソルアセト®F 輸液	日本薬局方 L-乳酸ナトリウム リンゲル液 ソルラクト®輸液
pH	4.5~8.0	6.5~7.5	6.0~7.5
浸透圧比	1	0.9 (生理食塩液に対する比)	
Na ⁺ (mEq)	77	65.5	65.5
Cl ⁻ (mEq)	77	54.5	55
Ca ²⁺ (mEq)	—	1.5	1.5
K ⁺ (mEq)	—	2	2
Acetate ⁻ (mEq)	—	14	—
L-Lactate ⁻ (mEq)	—	—	14
内容量 (mL)	500		



図 2.6 業務用扇風機



図 2.7 スマートプローブ熱線式風速計

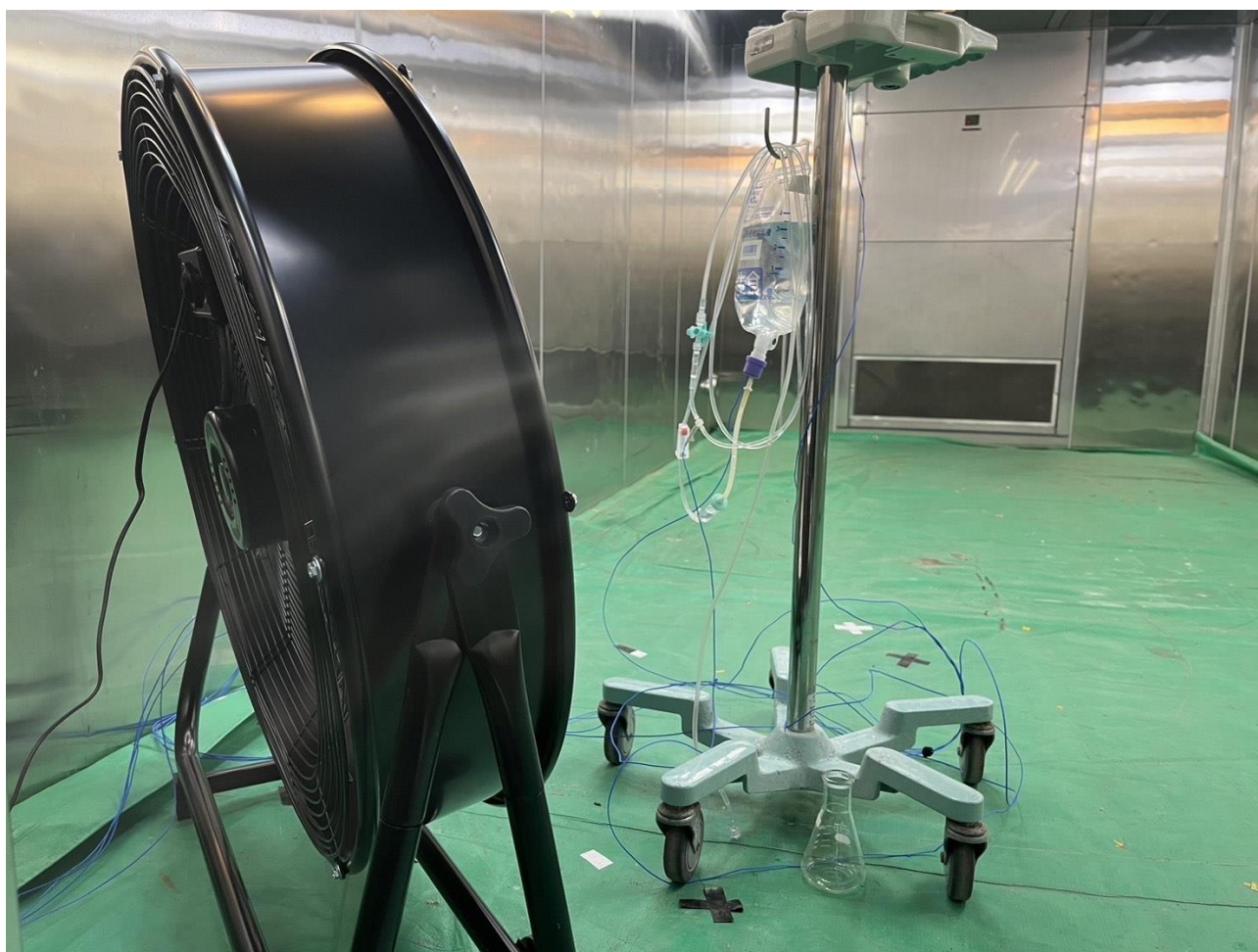


図 2.8 風を発生させた実験の様子

2.3 実験結果

I 基本条件

基本条件（屋外気温：0 °C、輸液流量：200 mL/h、輸液回路の長さ：300 cm、輸液：生理食塩液）にて輸液を行ったときの輸液の温度変化の結果を図 2.9 に示す。まず、輸液バッグ温は輸液開始直後（0 分）に 40.4 °C であり、10 分後には 31.1 °C まで低下した。輸液バッグ温は緩やかな温度低下であり、10 分間で 9 °C 程度温度が低下した。輸液回路の末端の輸液温は輸液開始直後（0 分）で既に 30.5 °C であり、10 分後には 1.5 °C まで低下した。輸液温は屋外気温の 0 °C に近づくように、指数関数的に温度が低下していた。

また、フラスコで回収した 10 分間の輸液量を測定すると、平均で 34.4 g（≒ 34.4 mL）であった。使用した輸液ポンプの流量精度は±5 % であり、輸液流量 200 mL/h で 10 分間輸液したときの流量精度範囲は 31.7 mL～35.0 mL である。本実験で回収した輸液量は流量精度範囲内であることから、輸液ポンプの動作に問題はなく、正確な流量で輸液が行えていることを確認した。

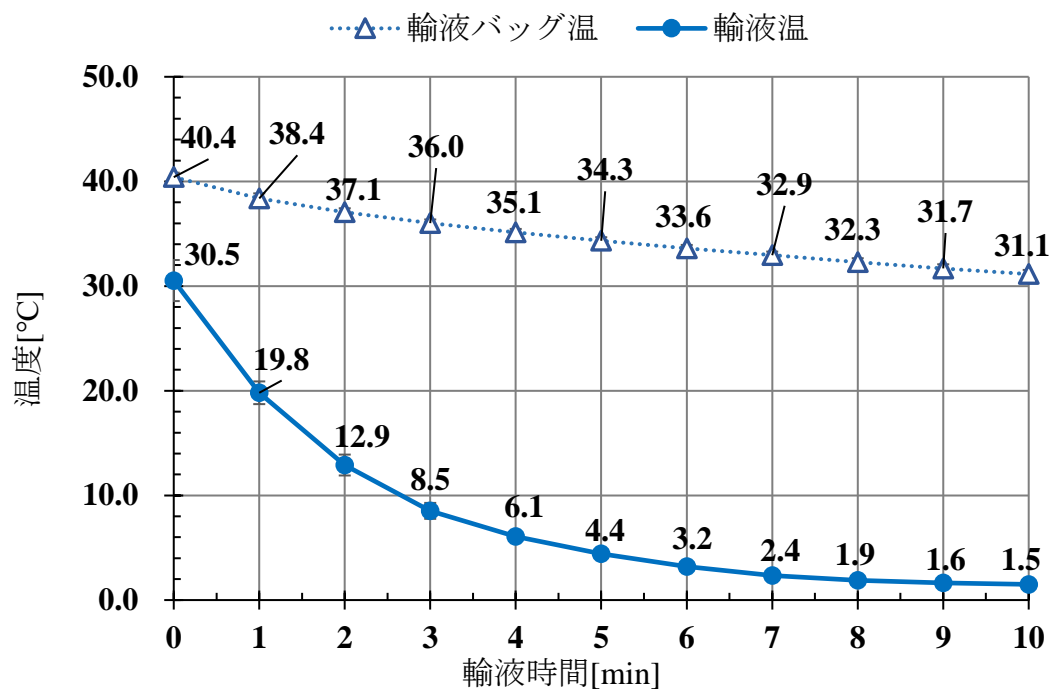


図 2.9 基本条件における輸液温の測定結果 (n=5)

Ⅱ 屋外気温の変更

屋外気温のみを基本条件の 0°C から、さらに低温の -5°C 、 -10°C に変更したときの輸液の温度低下を測定した。まず、冬季の札幌の平均気温を想定した屋外気温 -5°C の結果と気温条件の屋外気温 0°C の結果を図 2.10 に示し、比較する。屋外気温 -5°C では、輸液バッグ温が 10 分間で 9.9°C 低下した。屋外気温 0°C の結果と比較しても大きな違いは無かった。次いで輸液回路の末端で測定した輸液温は 10 分間で -3.3°C まで低下した。輸液温は屋外気温に近づくように低下することが分かった。

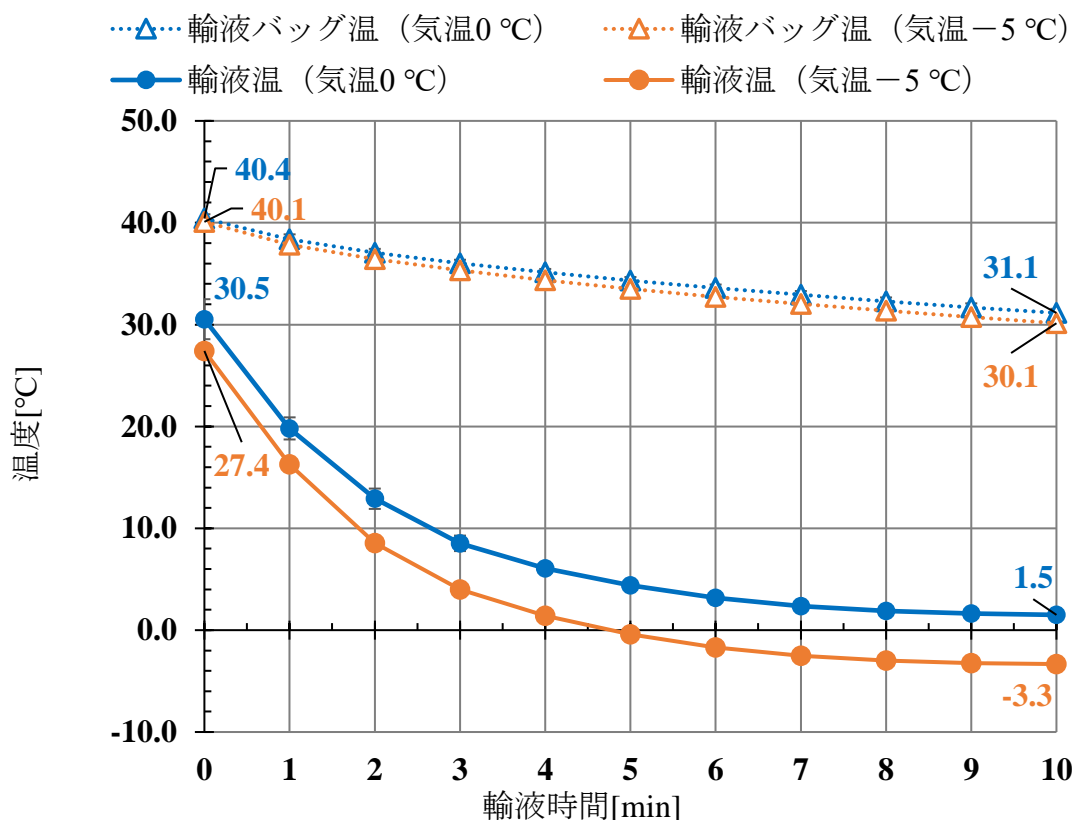


図 2.10 屋外気温 -5°C と 0°C における輸液の温度低下の比較 (n=5)

次に屋外気温 -10°C の結果の代表例を図 2.11 に示す。屋外気温 -10°C では、10 分間の輸液の途中で、輸液ポンプの閉塞アラームが作動した。輸液回路の末端からは輸液が流れておらず、輸液回路内が白く曇っていたことを目視で確認し（図 2.12）、輸液が凍結したと判断した。図 2.11 で示した代表例 2 例は、5 回の測定のうち凍結までの時間が最短であったもの（3 分 36 秒）と最長であったもの（4 分 6 秒）である。それぞれ凍結する直前の輸液温は 1.0°C 、 0.6°C であった。また、ほかの 3 回の測定においてはそれぞれ 3 分 46 秒（輸液温 0.8°C ）、3 分 58 秒（輸液温 0.8°C ）、4 分 6 秒（輸液温 0.7°C ）で輸液が凍結した。

屋外気温 0°C 、 -5°C と比較すると、輸液バッグ温の低下が速く、回路末端の輸液温もより急激な温度低下であった。

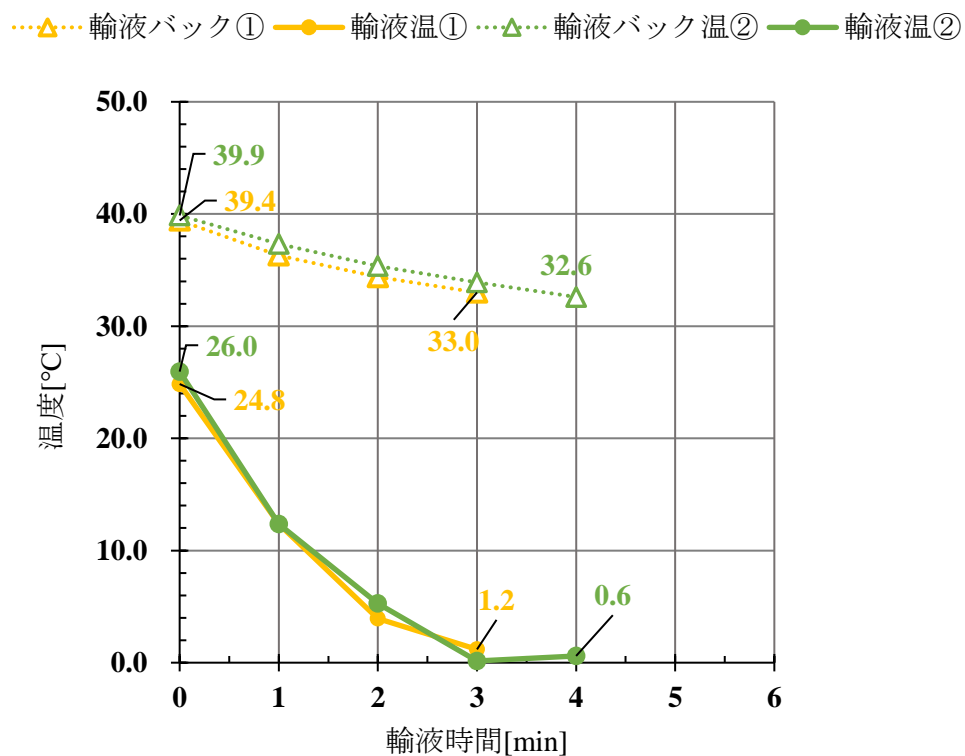


図 2.11 屋外気温 -10°C の輸液温の低下



(a) 三方活栓と輸液回路の接続部



(b) 三方活栓

図 2.12 輸液回路内で凍結した輸液

Ⅲ 輸液流量の変更

輸液流量のみを基本条件の 200 mL/h から、1/2 倍の 100 mL/h、2 倍の 400 mL/h に変更したときの輸液温の測定結果を図 2.13 に示す。輸液流量以外の条件は基本条件（屋外気温: 0 °C、輸液回路の長さ: 300 cm、輸液: 生理食塩液）とした。輸液バッグ温は、輸液流量を変えても温度低下に大きな違いは見られなかった。輸液開始直後（0 分）の回路末端の輸液温は、輸液流量 100 mL/h のとき 29.8 °C、200 mL/h のとき 30.5 °C、400 mL/h で 27.3 °C であった。10 分後の輸液温は、輸液流量 100 mL/h のとき 1.4 °C、200 mL/h のとき 1.5 °C、400 mL/h のとき 3.2 °C まで低下した。温度低下にはそれほど大きな違いは見られなかったが、最も輸液流量が少ない 100 mL/h と最も多い 400 mL/h とで比較すると、輸液流量の少ない 100 mL/h のほうが 1.8 °C 低い温度まで低下していた。

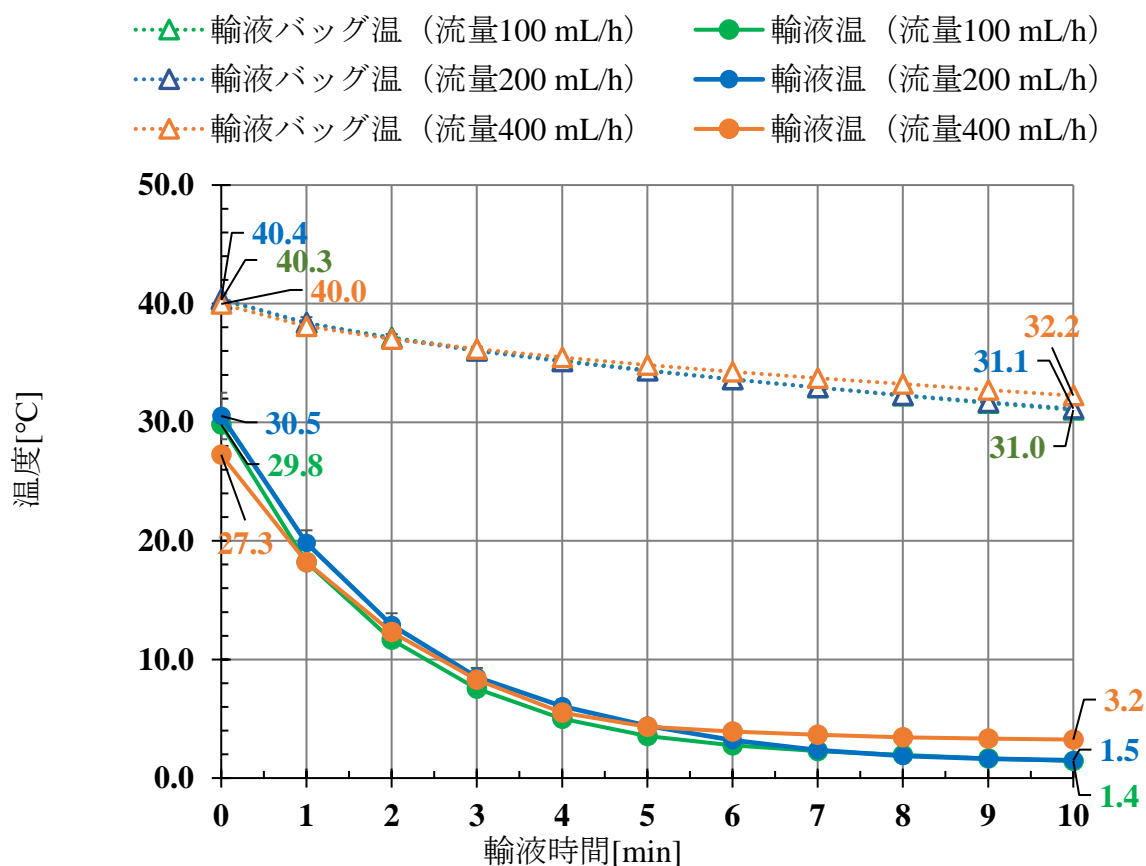


図 2.13 輸液流量の変更による輸液温の比較 (n=5)

IV 輸液回路の長さの変更

輸液回路の長さのみを基本条件の 300 cm から、1/2 倍の 150 cm、1.5 倍の 450 cm に変更したときの輸液温の測定結果を図 2.14 に示す。輸液回路の長さ以外の条件は基本条件（屋外気温: 0 °C、輸液流量: 200 mL/h、輸液：生理食塩液）とした。輸液バッグ温は、輸液回路の長さを変えても温度低下に大きな違いは見られなかった。輸液開始直後(0 分)の輸液温は、回路の長さ 150cm のとき 34.9 °C、300cm のとき 30.5 °C、450cm のとき 26.7 °Cであった。回路の長さが最も長い 450 cm と最も短い 150 cm とで比較すると、最も短い 150 cm のほうが 8.2 °Cも輸液温が低かった。その後、時間経過とともに温度差は小さくなった。10 分後の輸液温は回路の長さ 150 cm のとき 3.4 °C、300 cm のとき 1.5 °C、450 cm のとき 1.6 °Cまで低下した。10 分後の輸液温はそれほど大きな違いは見られなかったが、回路の長さが長い 450 cm と最も短い 150 cm とで比較すると、回路の長さが長い 450 cm の方が 1.9 °C低かった。

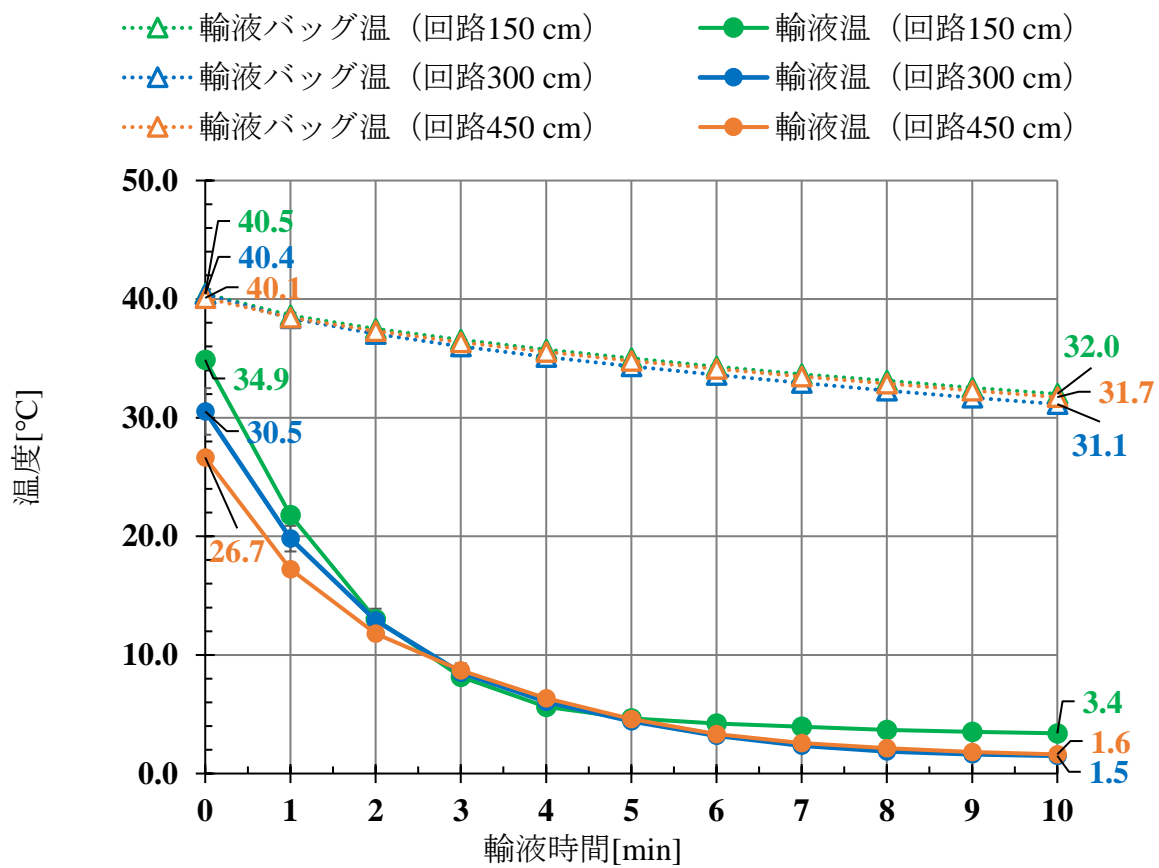


図 2.14 輸液流量の変更による輸液温の比較 (n=5)

V 輸液の種類の変更

輸液の種類を基本条件の生理食塩液から酢酸リンゲル液、乳酸リンゲル液に変えて、輸液温の測定を行った結果を図 2.15 に示す。生理食塩液の輸液温の結果も示し、比較する。輸液の種類以外の条件は基本条件（屋外気温：0 °C、輸液流量：200 mL/h、輸液回路の長さ：300 cm）とした。酢酸リンゲル液を使用したときの輸液バッグ温は、輸液開始直後（0 分）で 40.4 °C、10 分後には 31.4 °Cまで低下した。また、乳酸リンゲル液を使用したときの輸液バッグ温は、輸液開始直後（0 分）で 40.5 °C、10 分後には 31.9 °Cまで低下した。生理食塩液と同様、緩やかな温度低下であった。回路末端の輸液温は、酢酸リンゲル液を使用したとき輸液開始直後（0 分）で 31.4 °C、10 分後には 1.1 °Cまで低下した。乳酸リンゲル液を使用したときは輸液開始直後（0 分）で 30.5 °C、10 分後には 1.0 °Cまで低下した。回路末端の輸液温についても生理食塩液と同様に、屋外気温に近づくように急激な温度低下の傾向がみられた。

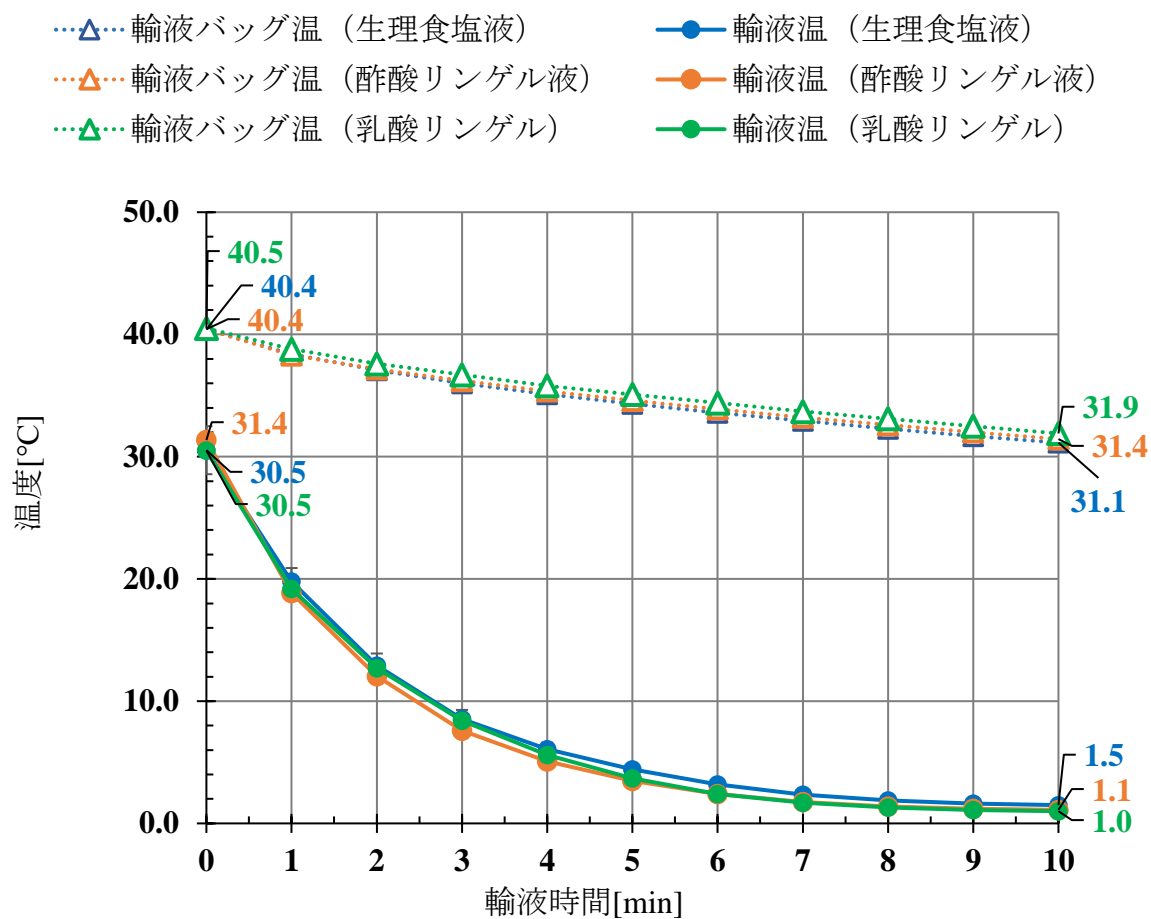


図 2.15 輸液の種類の変更による輸液温の比較 (n=5)

VI風の発生

風速 2 m/s と風速 5 m/s の風を発生させて輸液温の測定を行った結果と、比較のため風を発生させていない 0 m/s の結果を図 2.16 に示す。風速の実測した結果は 10 分間の平均で 1.9 m/s、4.3 m/s であった。輸液バッグ温は、風速 2 m/s のとき輸液開始直後（0 分）で 39.8 °Cであり、10 分後は 20.6 °Cであった。風速 5 m/s のときは輸液開始直後（0 分）で 40.4 °Cであり、10 分後は 20.0 °Cであった。風速 2 m/s と風速 5 m/s の変化では輸液バッグ温の温度低下に大きな違いは見られなかった。しかし、風速 0 m/s と比較すると温度低下の程度が大きく、10 分後の輸液バッグ温は約 10 °Cも低い温度まで低下していた。回路末端の輸液温は、風速 2 m/s のとき輸液開始直後（0 分）で 29.0 °Cであり、10 分後は 0.1 °Cであった。風速 5 m/s のときは輸液開始直後（0 分）で 28.0 °Cであり、10 分後は 0.7 °Cであった。輸液温についても風速の変化による温度低下の違いは見られなかった。温度低下の傾向は風速 0 m/s と同様であり、指数関数的に急激に温度が低下した。風を発生させた風速 2 m/s、風速 5 m/s の方が全体的に輸液温は低く、10 分後には屋外気温と等しい約 0 °Cまで低下した。風の発生により輸液バッグの温度低下の程度が大きく、輸液回路にも風が当たることから輸液温はより冷やされることが分かった。また、風速 2 m/s と風速 5 m/s の変化では、輸液温も輸液バッグ温同様、温度低下に大きな違いは見られなかった。

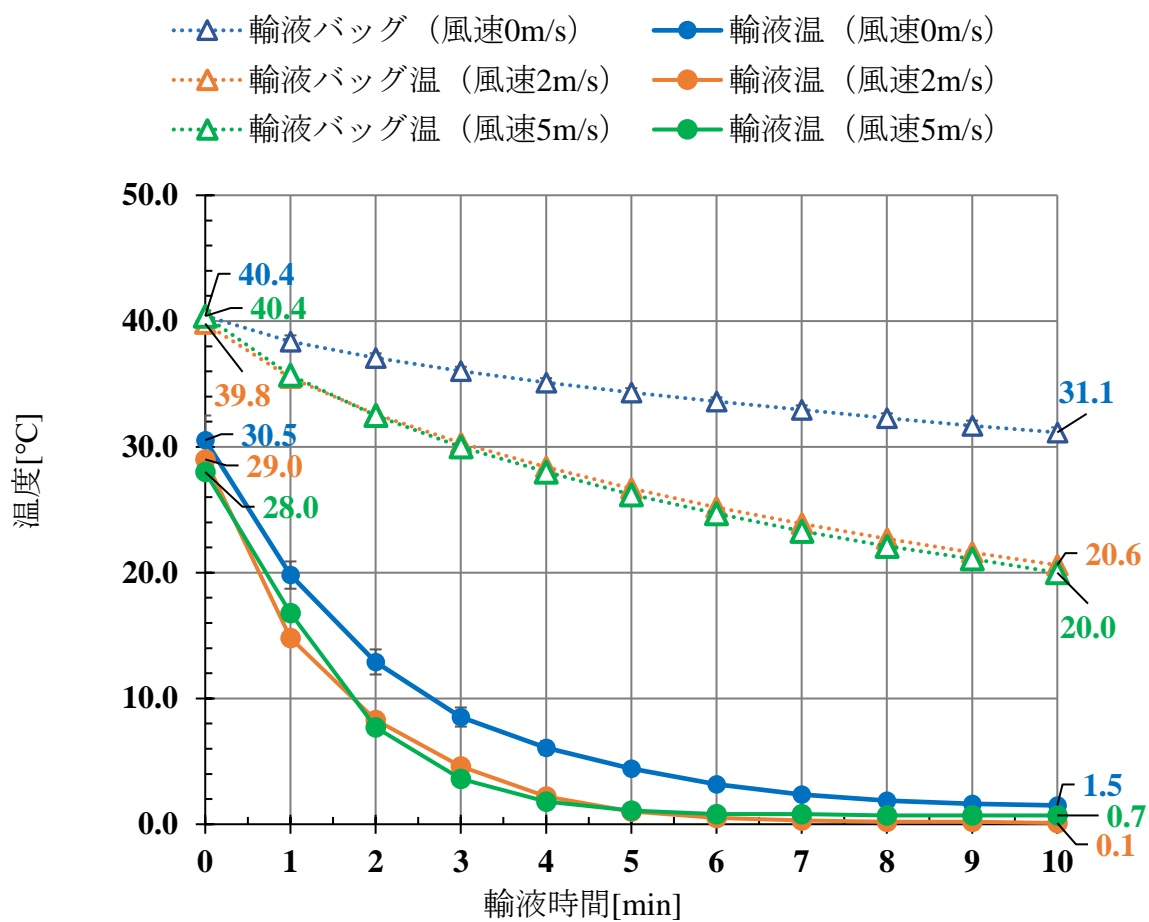


図 2.16 風を発生させたときの輸液温の変化 (n=5)

2.4 考察

2.4.1 低温環境における輸液の温度低下の程度

低温環境を想定した基本条件で、事前に加温した輸液バッグと患者に流入する直前である回路末端の輸液の温度低下を初めて測定した。その結果、輸液バッグ温と輸液温は共に温度が低下する結果が得られ、特に輸液温の低下が急激であることが分かった。輸液バッグの内容量が 500 mL であるのに対して、本実験で使用した 300 cm の輸液回路内に満たされる輸液の充填量は約 27.6 mL である。輸液バッグの内容量よりも充填量が小さいため輸液回路内では屋外気温の影響を受けやすく、輸液が容易に冷却されてしまうことが明らかとなった。このことから、屋外などの低温環境では、事前に加温した輸液バッグを使用しても輸液回路内を流れる際に温度が低下し、低温の輸液を患者に投与してしまう可能性があることを初めて明らかにした。

フラスコで回収した 10 分間の輸液の重さは平均で 34.4 g であり、輸液量にすると 34.4 mL であった。輸液流量 200 mL/h にて 10 分間輸液を行ったときの流量精度範囲 31.7～35.0 mL 内であるため、低温環境においても輸液ポンプの流量精度は担保されていた。なお、本研究ではすべての実験にて 10 分間の輸液量を測定し、流量精度範囲内であることを確認した。

屋外気温を変更した実験では、10 分間の輸液において屋外気温 0 °C のとき輸液温は 1.5 °C まで低下し、屋外気温 -5 °C では -3.3 °C まで低下した。回路末端の輸液温は、屋外気温に近づくように低下することが分かった。回路末端の輸液温が氷点下を下回る -3.3 °C まで低下したにも関わらず、輸液は凍結せず過冷却の状態であった。過冷却は静かな環境で時間をかけてゆっくりと冷やされることで発生する現象であり、本実験条件においてもその現象が起こったと考えられた。

屋外気温 -10 °C では 4 分前後で輸液が凍結する結果が得られた。三方活栓と

エクステンションチューブの接続部付近で凍結していることを目視で確認した。三方活栓内部や接続部は内径が輸液チューブの内径よりも細くなっているため、より冷却されやすいと考えられた。また、凍結時の回路末端の輸液温は約 1 °C であり、屋外気温 -5 °C の 10 分後の輸液温と比較すると高い。-3.3 °C で凍結しなかった屋外気温 -5 °C と、約 1 °C で凍結した屋外気温 -10 °C の温度低下の傾向から、輸液の凍結には冷却速度²⁻²⁾が関係していると考えられた。ここで、初期温度と最終到達温度との温度差の 63.2 % 変化するのに要する時間を表す定数である熱時定数を求めた。この熱時定数が大きければ温度が低下しづらく、値が小さいほど温度が低下しやすいと考えることができる。まず、基本条件の屋外気温 0 °C のでは、輸液開始直後 (0 分) で 30.5 °C、10 分後は 1.5 °C であるため温度変化は 29.0 °C である。温度変化の 63.2 % は 18.3 °C であるため、初期温度である 30.5 °C から 18.3 °C 温度が低下した、12.2 °C のときの時間が熱時定数となる。測定結果より、熱時定数は 128 s であった。同様に屋外気温 -5 °C の熱時定数を求めると 124 s であった。輸液が回路内で凍結した屋外気温 -10 °C の熱時定数は、凍結までの時間が最短のもので 74 s、最長のもので 76 s であった。屋外気温が低いほど熱時定数は小さく温度が低下しやすい、すなわち冷却速度がはやいことが分かる。したがって、屋外気温の違いによる熱時定数の大きさが示す冷却速度が輸液の凍結の有無に関連していると考えられた。

より詳細な輸液の温度変化を検討するため、輸液流量や回路の長さ、輸液の種類などの条件を変えて実験を行った。少しの違いではあるが、輸液流量が少なく、回路の長さは長いほど輸液温は低下しやすい傾向であることが分かった。輸液回路内で屋外気温の影響を受けやすいことから、輸液流量や輸液回路の長さの条件の変更による温度低下の抑制を期待していたが、大きな違いは見られなかった。また、使用する輸液を生理食塩液から酢酸リンゲル液、乳酸リンゲル液に変更し

ても、輸液の温度は等しく屋外気温近くまで低下する結果が得られた。外傷患者の初期輸液として一般的に選択される等張電解質輸液では、輸液の温度低下が同じ傾向であると考えられた。このように輸液の条件を変更するだけでは、輸液の温度低下を抑制、防止することが困難であることが分かった。

屋外における救急現場では気象条件も輸液の温度低下に考慮すべき条件である。本実験では、風を発生させたときの輸液の温度変化について検討した。風の発生によって輸液バッグ温の低下の程度は大きくなることが分かった。また、回路末端の輸液温の温度低下については、風がない条件と同じ傾向であったものの、より短時間で屋外気温まで到達することが分かった。風を発生させていない条件である風速 0 m/s のとき、輸液温の変化の熱時定数は 128 s であった。それに対して、人が感知する最小の風速である 2 m/s の風を発生させたときの熱時定数は 93 s、札幌の平均風速を想定した 5 m/s の風を発生させたときの熱時定数は 94 s であった。熱時定数からも、風の発生により輸液の温度が低下しやすいことが示された。これは風の発生によって輸液バッグ温の温度低下の程度が大きいことと、輸液回路にも風が当たり冷却されやすいためであると考えられる。また、風速を 2 m/s、5 m/s と条件を変更して検討したが、この程度の風速の違いでは輸液の温度低下に大きな違いは見られなかった。

以上のことから、輸液の温度低下に最も影響を与えるのは屋外気温であることを明らかにした。また、屋外気温により輸液が冷却されるのは、輸液バッグよりも輸液回路内であることも判明した。輸液流量や輸液回路の長さ、風などについては輸液の温度低下を促進させる要因となりうることが明らかとなった。

2.4.2 輸液回路内の熱損失

輸液回路内の熱損失を 10 分間の輸液量と熱量変化の公式 (2-1) より求める。
10 分間の輸液量を m 、輸液の比熱容量 + エクステンションチューブの比熱容量を c 、10 分間の温度変化 (10 分の輸液温 - 0 分の輸液温) を ΔT とすると、輸液回路内の熱損失 Q は、

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T \quad \dots (2-1)$$

基本条件における輸液の温度変化の結果より、10 分間の輸液量は 34.6 mL である。輸液に使用した生理食塩液の比熱容量は水と等しい 4.2 J/g・K、エクステンションチューブの材質は PVC であり比熱容量は 1.2~2.1 J/g・K、10 分間の温度変化は -29.0 °C である。基本条件の低温環境における輸液回路内の輸液の熱損失は -5387 ~ -6285 J であると考えられた。このことから、輸液回路内で失われる熱量が明らかとなり、輸液の温度低下防止のための目安となると考えられる。

2.4.3 低体温助長の可能性

Blumenberg は患者に投与する静脈内輸液の量と温度に応じた深部体温の変化を概算する数学的モデル (2-2)、(2-3) を作成した²⁻³⁾。人の体重を m_{Body} 、比熱容量を c_{Body} 、初期深部体温を $T_{Bodyinitial}$ とし、輸液の質量を $m_{Crystalloid}$ 、比熱容量を $c_{Crystalloid}$ 、投与温度を $T_{Crystalloid}$ とすると、輸液投与後の深部体温 T_{Final} は、

$$T_{Final} = \frac{m_{Body} \cdot c_{Body} \cdot T_{Bodyinitial} + m_{Crystalloid} \cdot c_{Crystalloid} \cdot T_{Crystalloidinitial}}{m_{Crystalloid} \cdot c_{Crystalloid} + m_{Body} \cdot c_{Body}} \quad \dots (2-2)$$

また、輸液の投与による深部体温の変化 ΔT は、

$$\Delta T = \frac{m_{Body} \cdot c_{Body} \cdot T_{Bodyinitial} + m_{Crystalloid} \cdot c_{Crystalloid} \cdot T_{Crystalloidinitial}}{m_{Crystalloid} \cdot c_{Crystalloid} + m_{Body} \cdot c_{Body}} - T_{Bodyinitial} \quad \dots (2-3)$$

この数式モデル (2) と本実験の結果から、屋外気温 0 °C の基本条件下で輸液を行った際の投与された輸液による深部体温の変化を求める。輸液流量 200 ml/h で 10 分間の輸液を行うと患者に投与される輸液量は 33.3 mL (\div 33.3 g) であり、輸液の温度は 10 分後の 1.5 °C とする。体重 50 kg の場合は約 0.02 °C、体重 70 kg の場合は約 0.03 °C 深部体温が低下すると計算される。しかし、あくまでもこの深部体温の変化は熱力学の原理を使用したものであり、外傷患者のような体

温調節機能に問題のある患者を想定したものではない。また、一定の室温を想定しているため、周囲温度の条件に関しても本研究で想定している低温環境とは異なる。Peng によると、人体からの熱損失は 65 kcal/h～75 kcal/h であり、外傷患者の場合の熱損失は 400 kcal/h に増加する²⁻⁴⁾。外傷患者の熱損失は約 6 倍も増加することから深部体温も低下しやすく、低体温に陥りやすいと考えられる。以上のことから、低温環境にて冷却された低温の輸液の投与により、外傷患者の深部体温は約 6 倍の 0.12 °C～0.18 °C 程度低下させると推測され、低体温助長の可能性が考えられた。また、外傷の重症度によってさらに深刻な問題となりうる。

2.4.4 輸液の目標温度

外傷患者の致死性の 3 徴のひとつである低体温は、日本救急医学会で 34 °C 以下と定められている。これを予防するためには、回路末端の輸液温を 34 °C 以上に保つことが理想であると考えられた。そのため、本研究では回路末端の輸液温を 34 °C 以上に維持することを目標とし、新たな輸液の温度低下防止策を検討していく必要があると考えた。

また、血液は 42 °C の長時間加温により溶血する可能性があり²⁻⁵⁾、赤血球は 47 °C で形態的・機能的異常を生じる²⁻⁶⁾。体内に投与された輸液は血管内にも分布し血液と接触するため、輸液が溶血などの原因とならないよう安全性を考慮する必要がある。そのため、本研究では輸液の目標温度の上限を 42 °C と定めた。

3. 保温による輸液の温度低下防止策の基礎検討

3.1 序論

実際の救急現場における現在の輸液の温度に関する対策は、輸液バッグを予め加温しておくことで、低体温予防を行っていた。しかし、第2章にて低温環境における輸液の温度低下の程度が明らかとなったことから、本章では、外傷患者の低体温助長を予防するための新たな輸液の温度低下防止策を検討した。取り入れやすい新たな輸液の温度低下防止策として、事前に加温した輸液バッグ自体の温度を低下させないこと、回路末端まで温かい輸液を維持することを検討する必要があると考えられた。このことから、本章では保温による検討を行った。まずは、輸液バッグの温度特性に着目し、輸液バッグを保温することで屋外気温の影響を最小限にし、輸液バッグ内の温度低下を抑制できると考えられた。また、保温ではなく温度低下を前提としたうえで事前に加温する輸液バッグの初期温度の上昇についても試みた。さらに、輸液の温度低下が著しい輸液回路を保温することで、輸液の温度低下防止の効果がどの程度得られるのかを検討した。

本研究では輸液の温度低下防止として回路末端の輸液温を 34 °C 以上に維持することを目標とした。

3.2 輸液バッグの保温と初期温度の上昇

3.2.1 実験目的

本研究で輸液の目標温度を 34 °C と設定したが、10 分間の輸液で事前に加温した輸液バッグ温が 34 °C を下回る温度まで低下してしまっていた。輸液バッグ温の低下が、少なからず回路末端の輸液温の低下にも影響を与えている可能性があると考えられた。そのため、まずは輸液バッグの温度特性に着目した。輸液バッグ温の温度低下を防止し、輸液バッグ内の輸液を温かく維持することで輸液温の低下を抑制できるのかを検討した。輸液バッグの温度維持には、輸液バッグの保温と加温する初期温度の上昇の 2 つの方法を実践した。

3.2.2 輸液バッグの保温

本実験は、2.2.1 項と同様の輸液回路を使用し、2.2.2 項の実験環境（本学保有の恒温室内で再現した低温環境）にて実験を行った。また、条件についても 2.2.3 項の基本条件（屋外気温: 0 °C、輸液流量: 200 mL/h、輸液回路の長さ: 300 cm、輸液: 生理食塩液）とした。

輸液バッグの保温には、市販されている保温バッグ（図 3.1）を使用した。使用した保温バッグの保温材はアルミ蒸着フィルムと発泡ポリエチレンであり、厚さは約 2 mm であった。保温バッグ自体の厚さでは非常に薄いため、同じ保温材のシートを 2 重に重ねて補強した（合わせて厚さ 6 mm の保温材）。保温バッグの上は閉じることで、低温環境の冷気が入りにくい状態とした。保温バッグの底部に切り込みを入れ、輸液バッグのゴム栓部分のみが出てくるように加工した。事前に約 40 °C に加温した輸液バッグを保温バッグ内に入れて輸液を行い、輸液バッグ温と回路末端の輸液温を測定した。



図 3.1 保温バッグ

3.2.3 輸液バッグの初期温度の上昇

本実験についても 2.2.1 項、2.2.2 項と同様の輸液回路、実験環境で実験を行った。実験条件は、輸液バッグ温が 10 分間で 9 °C 程度低下することを考慮し、事前に加温する初期温度を約 40 °C から約 50 °C に変更した。輸液バッグの初期温度以外の条件は、2.2.3 項の基本条件とした。

3.2.4 実験結果

まず、輸液バッグの保温の結果を図 3.2 に示す。輸液バッグの保温の効果を確認するため、輸液バッグを保温していない基本条件の結果と比較する。まず、輸液バッグ温は輸液開始直後（0 分）で 40.5 °C、10 分後では 36.6 °Cであった。輸液バッグを保温することで輸液バッグ温の低下は抑制され、10 分間の輸液において 34 °C以上を維持することが可能となった。しかし、回路末端の輸液温は 10 分後、1.6 °Cまで低下する結果となり、輸液バッグを保温していないときと同様の温度低下が認められた。

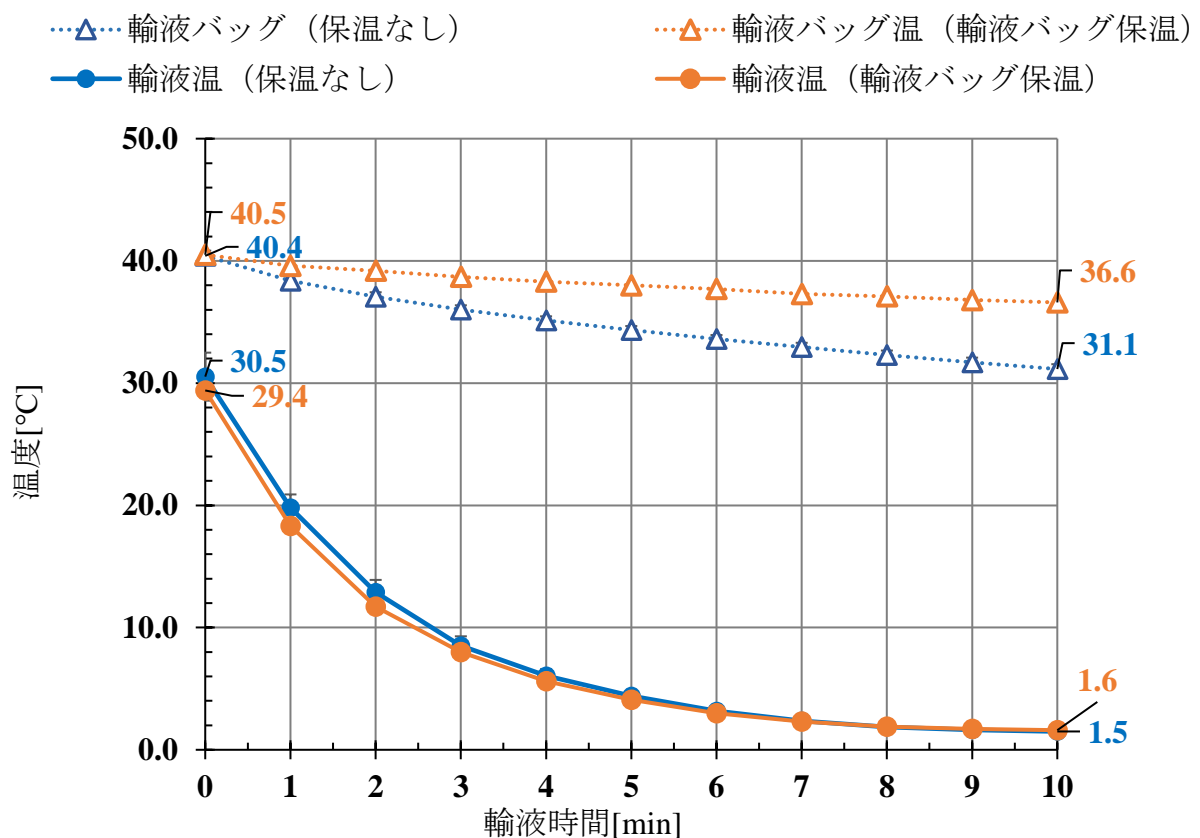


図 3.2 輸液バッグの保温（n=5）

つぎに、輸液バッグの初期温度を約 50 °Cにした結果を図 3.3 に示す。比較のため初期温度 40 °Cの結果も示している。輸液バッグ温は輸液開始直後（0 分）で 50.1 °C、10 分後は 38.1 °Cであった。初期温度を高くしたため 10 分後の温度も高く、10 分間の輸液において輸液バッグ温を 34 °C以上に維持する結果であった。回路末端の輸液温は輸液開始直後（0 分）で 35.4 °C、10 分後は 1.7 °Cであった。輸液バッグの初期温度を 10 °C高くしたにもかかわらず、輸液開始直後（0 分）の回路末端の輸液温は 5 °C程度の差であり、10 分後には屋外気温近くまで低下する同様の傾向がみられた。

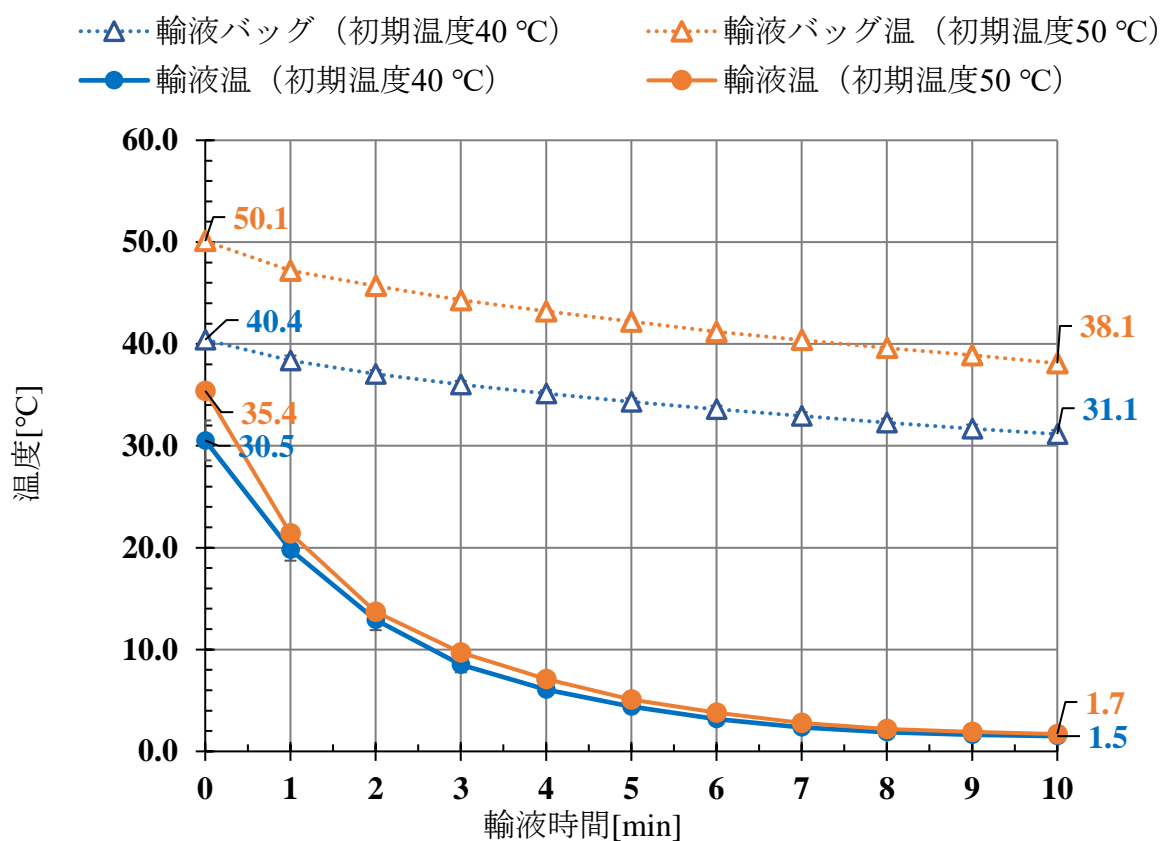


図 3.3 輸液バッグを加温する初期温度の上昇（n=5）

3.2.5 考察

輸液バッグの保温、初期温度の上昇によって輸液バッグ温は 34 °C を下回ることなく、10 分間輸液が行われた。その一方で、回路末端の輸液温は 10 分間で屋外気温近くまで低下した。やはり、輸液回路内での熱損失が大きいため、輸液回路内で輸液の温度は容易に低下すると考えられる。このことから、輸液バッグの温度維持による輸液の温度低下防止は輸液バッグ温のみに効果的であり、回路末端の輸液温の低下防止には効果がないことが明らかとなった。患者に投与される直前である回路末端の輸液温の低下を防止するためには、熱損失が大きい輸液回路に保温や加温などの工夫を施す必要があると考えられた。

3.3 輸液回路の保温

3.3.1 実験目的

3.2 節の実験より、輸液バッグ内の輸液の温度を温かく維持できても、輸液回路内で容易に冷却されてしまう結果が得られた。輸液バッグに着目した温度低下の防止策は、回路末端の輸液温の低下防止に効果がないことが明らかとなった。このことから、本実験では熱損失の大きい輸液回路の温度特性に着目した。事前に加温した輸液が輸液回路を流れる際に冷氣によって冷やされないよう、輸液回路を保温することで輸液温の温度低下を防止できるか検討した。

3.3.2 実験方法

本実験は、2.2.1 項と同様の輸液回路を使用し、2.2.2 項の実験環境にて実験を行った。また、条件についても 2.2.3 項で基本条件とした屋外気温 0 °C、輸液は事前に約 40 °C に加温した生理食塩液（500 mL）、輸液流量 200 mL/h、輸液回路の長さ 300 cm とした。輸液時間は 10 分間で輸液開始直後（0 分）から 1 分毎に輸液の温度を測定した。

3.3.3 保温方法

輸液回路の保温には、一般的に配管などの保温や断熱に使用されている耐熱パイプカバー（因幡電工、図 3.4）とガラス断熱テープ（esco、図 3.5）の 2 種類を使用した。異なる材質、形状の保温材を使用することで、輸液の温度低下防止により効果的な保温材を検討した。それぞれの保温材の特徴を表 3.1 に記載した。耐熱パイプカバーは円筒状であるため、内部に輸液回路を通して覆った。ガラス断熱テープは輸液回路に巻き付けた。いずれの保温材も輸液ポンプ装着部を除いた輸液回路全体の約 280 cm に装着した。

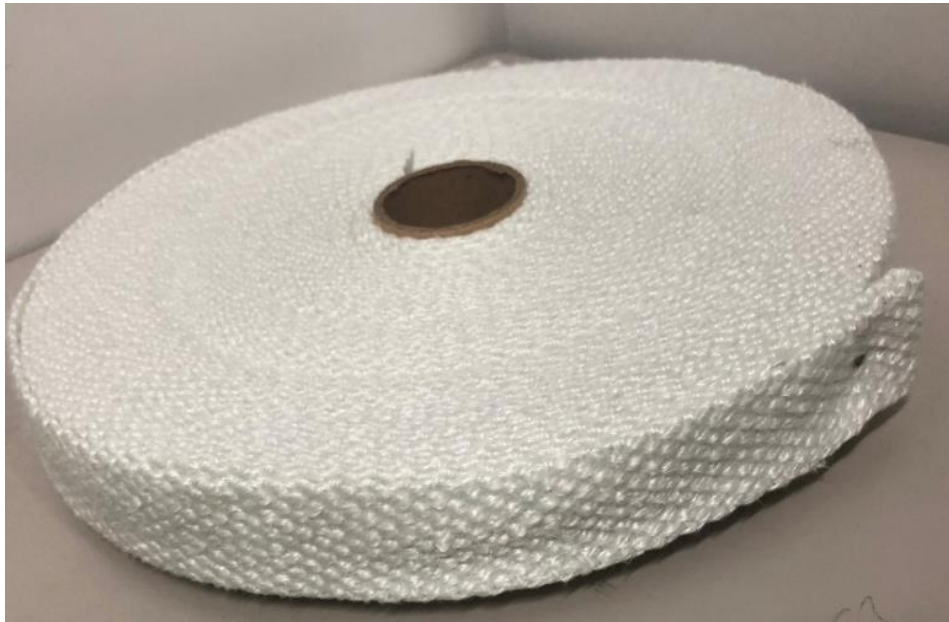


(a) 耐熱パイプカバー



(b) 輸液回路に装着した写真

図 3.4 耐熱パイプカバーと実験の様子



(a) ガラス断熱テープ



(b) 輸液回路に装着した写真

図 3.5 ガラス断熱テープと実験の様子

表 3.1 各保温材の特徴

	耐熱パイプカバー	ガラス断熱テープ
材質	<p>保温材：</p> <p>化学架橋 30 倍発砲</p> <p>ポリエチレン</p> <p>表面フィルム：</p> <p>ポリエチレン</p>	<p>E ガラス</p> <p>(グラスファイバー)</p>
保温材の厚さ (mm)	10	約 2
耐熱温度 (℃)	-40～120	<p>300℃ まで</p> <p>(使用環境による)</p>

3.3.4 実験結果

輸液回路を耐熱パイプカバーとガラス断熱テープで覆い、保温した結果を図 3.6 に示す。保温の効果を確認するため、保温していない基本条件の結果と比較する。まず、輸液バッグは保温などをしていないため、輸液バッグ温の温度低下に大きな違いは見られなかった。次いで耐熱パイプカバーで輸液回路を保温したときの回路末端の輸液温は、輸液開始直後（0 分）で 34.4 °C、10 分後は 10.4 °C であった。また、ガラス断熱テープで輸液回路を保温したときの輸液温は、輸液開始直後（0 分）で 31.9 °C、10 分後は 6.0 °C であった。輸液回路を保温した結果、保温していないときよりも温度低下が緩やかな変化であった。耐熱パイプカバーとガラス断熱テープを比較すると、耐熱パイプの方が 10 分後の輸液温が高いが、目標温度である 34 °C を下回る結果であった。

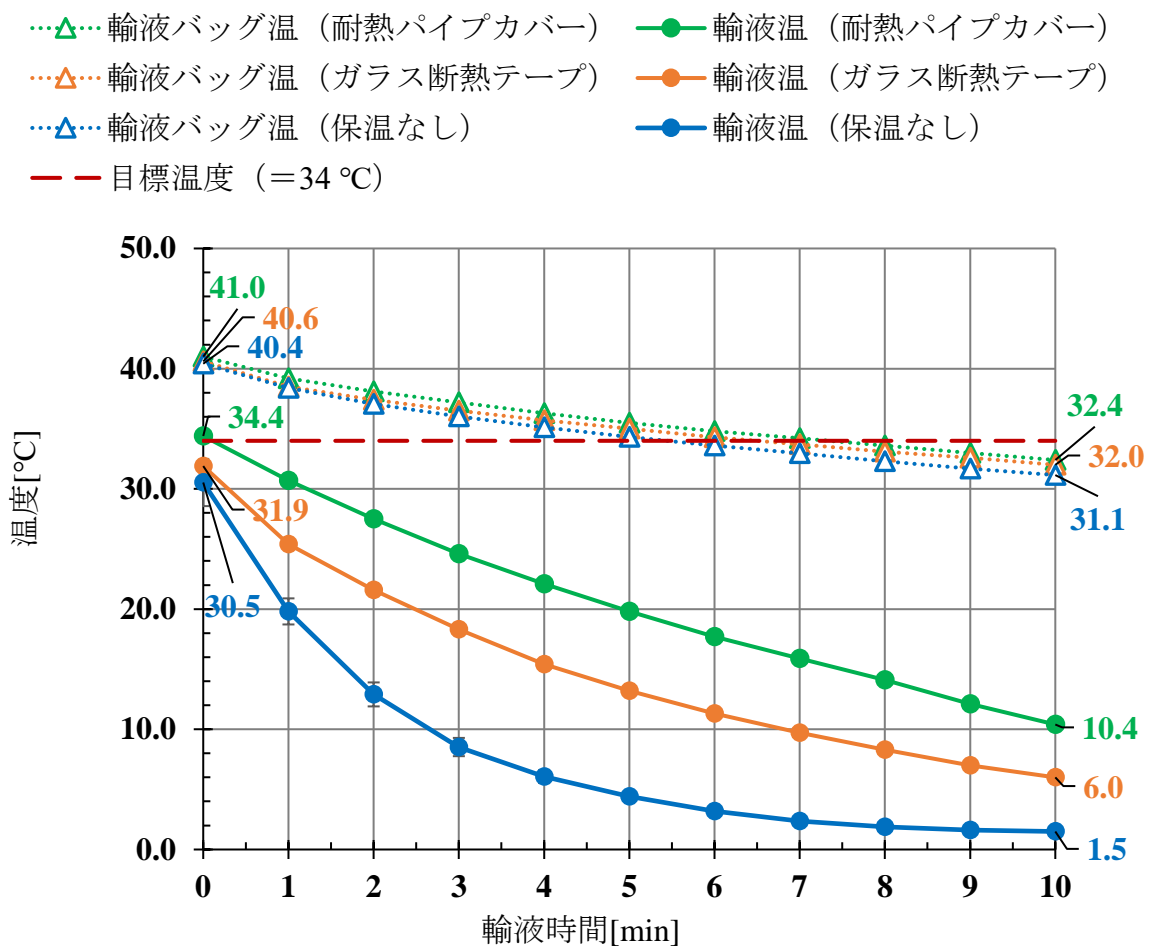


図 3.6 輸液回路の保温の結果 (n=5)

3.3.5 考察

輸液回路の保温により回路末端の輸液温の急激な温度低下は、緩やかな温度変化になった。輸液回路の保温には異なる 2 種類の保温材を使用した。耐熱パイプカバーによる保温では、第 2 章の熱量の公式 (2-1) より、10 分間の輸液の熱量変化は $-4886 \sim -5700 \text{ J}$ と計算された。保温効果は $501 \sim 585 \text{ J}$ であると考えられる。ガラス断熱テープの保温では、10 分間の輸液の熱量変化は $-5245 \sim -6119 \text{ J}$ と計算され、保温効果は $142 \sim 166 \text{ J}$ であると考えられた。以上のことから、輸液回路の保温には輸液の温度低下防止を抑制する一定の効果があることが分かった。また、使用する保温材によって保温効果は大きく異なることも明らかとなった。

本来、屋外などに持ち出すことを想定すると、保温する輸液回路の範囲をより狭くする必要がある。しかし、輸液回路全体を保温した本実験においても目標温度の $34 \text{ }^{\circ}\text{C}$ を下回っており、低温環境においては保温による輸液の温度低下防止は難しいことが分かった。このことから、輸液温の温度低下を防止するためには、輸液回路における新たな対策が必要であることが示された。

4. 輸液回路の加温による輸液の温度低下防止策の基礎検討

4.1 序論

第3章の輸液回路の保温により、輸液の温度低下を抑制することができた。しかし、目標温度としている34℃以上に維持することはできなかった。そのため、保温よりも効果が期待できる輸液回路の加温によって輸液の温度低下を防止できると考えられた。まずは、低温環境における急激な温度低下を防止するためにはどのような方法・条件で加温する必要があるのかが不明であり、これらを明らかにする必要がある。そして、輸液回路の保温では事前に加温された輸液バッグの温度（約40℃）よりも高温になることは無かったが、輸液回路の加温では加温する温度によって輸液の温度が高温になる可能性がある。血液は42℃の長時間加温により溶血する可能性があり²⁻⁵⁾、赤血球は47℃で形態的・機能的異常を生じる²⁻⁵⁾。これらのことから、輸液回路の加温では輸液の温度上限を42℃とし、過剰な加温の危険性のない条件であることも考慮する必要がある。低温環境における輸液の温度低下防止のための理想的な加温条件は、回路末端の輸液温を34℃以上、42℃以下に加温できる条件とした。

本章では、低温環境における輸液の温度低下を防止するための輸液回路の加温の基礎検討を行った。まずは、輸液回路のどの部分を、どの程度の温度で加温する必要があるのかを検討し、具体的な加温条件を初めて明らかにした。また、屋外気温の基本条件とした0℃よりも低い環境下や急速輸液など、救急現場で想定される条件における輸液回路の加温の効果についても検討した。

4.2 予備実験

4.2.1 実験目的

本研究において初めての加温実験であるため、商用交流電源に接続して使用する加温装置を用いて、輸液回路の加温を試みた。加温装置で安定した加温を行うことができるか、そしておおよその加温温度の見当をつけるため予備実験を行った。

4.2.2 実験方法

本実験は、2.2.1 項と同様の輸液回路を使用し、2.2.2 項の実験環境にて実験を行った。また、条件についても 2.2.3 項で基本条件とした屋外気温 0 °C、輸液は事前に約 40 °C に加温した生理食塩液（500 mL）、輸液流量 200 mL/h、輸液回路の長さ 300 cm とした。

輸液時間は 10 分間で輸液開始直後（0 分）から 1 分毎に輸液の温度を測定した。

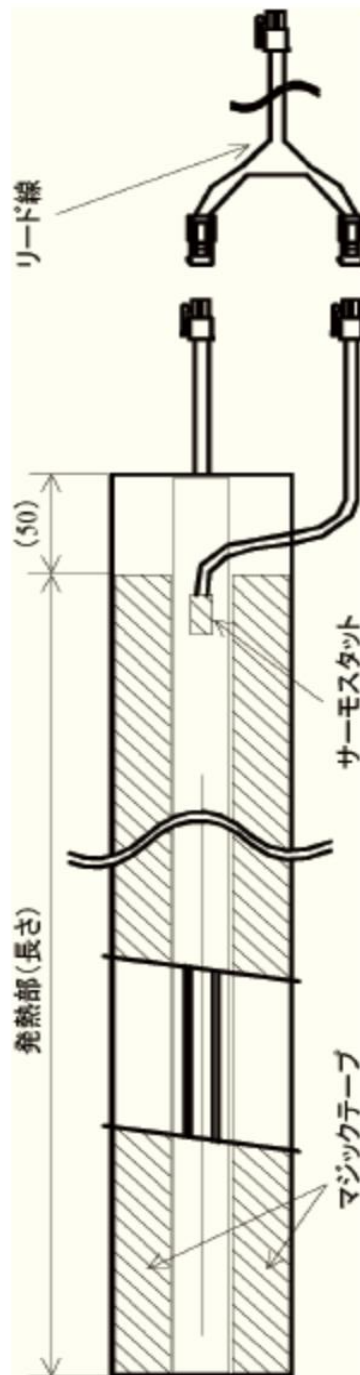
本実験では、のちに述べる加温装置の温度を熱電対で実測し、加温温度と定義した。さらに加温の効果を確認するため、加温した回路末端 150 cm の上流を流れる輸液の温度についても追加で測定し、加温前温度と定義した。

4.2.3 加温方法

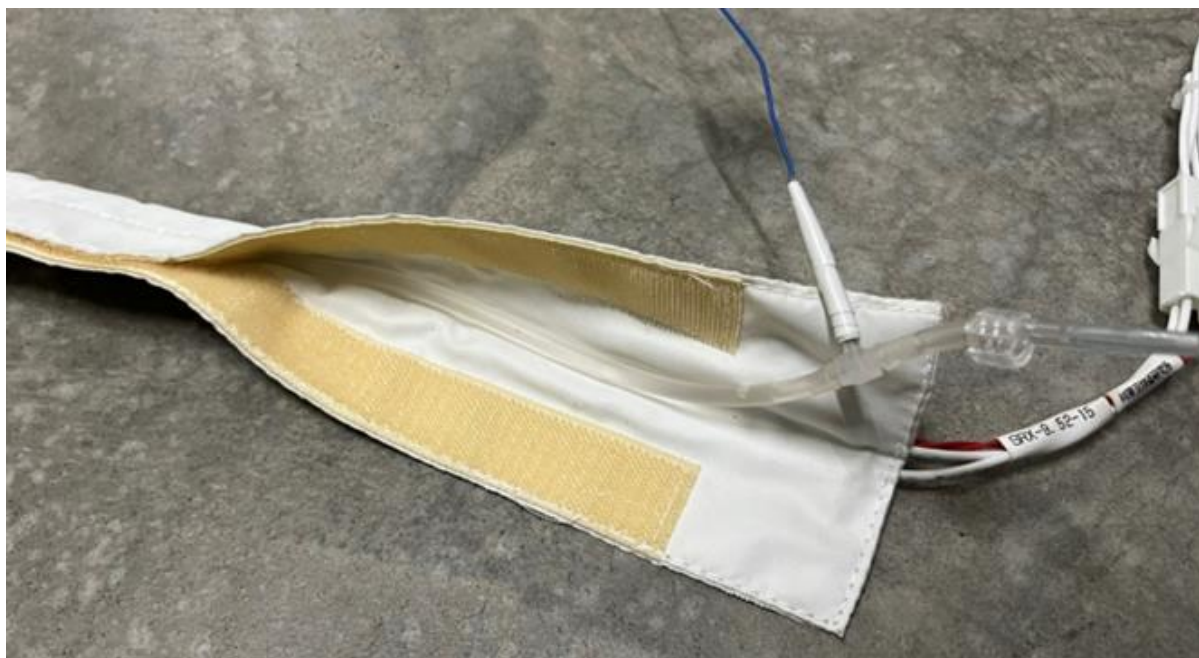
本実験は基礎検討であるため、輸液回路の加温には商用交流電源 100 V に接続するチューブカバーヒータ（東京技術研究所、図 4.1）を使用した。チューブカバーヒータは一般的に配管の凍結防止などに使用されるものである。チューブカバーヒータの内部に 2 本の電熱線が通っており、耐熱のマジックテープで止めることで、配管のような円筒状のものを覆うことができる。このチューブカバーヒータで輸液回路の任意の範囲を覆い、加温した。チューブカバーヒータの詳細を表 4.1 にまとめた。

輸液回路の末端から 150 cm にチューブカバーヒータを装着して、ON/OFF の

切り替えのできるスイッチ付きコンセントに接続し、加温温度を調節した。輸液温を約 40 °C 程度に加温するため、予備実験では実測したチューブカバーヒータの加温温度を 10 °C 高い約 50 °C になるようにスイッチの切り替えを実施した。



(a) 構造図



(b) 輸液回路に装着した写真

図 4.1 チューブカバーヒータ

表 4.1 チューブカバーヒータの仕様

材質	PTFE コーティングクロス
電源 (V)	100
電気容量 (W)	170
耐熱温度 (°C)	200
発熱部の長さ (mm)	1500
発熱部の厚み (mm)	2
過昇温防止機能	サーモスタット 200 °C OFF 付
固定具	耐熱マジックテープ

4.2.4 実験結果

輸液回路の加温の予備実験の結果を図 4.2 に示す。輸液回路の加温の基礎検討のため、チューブカバーヒータを使用して、輸液回路の末端から 150 cm を加温した結果、3 分経過以降、目標温度範囲内に輸液温が加温された。実測したチューブカバーヒータの加温温度は 10 分間の平均で 54.2 °C であった。スイッチの切り替えによる加温温度の調整はばらつきが大きかった。

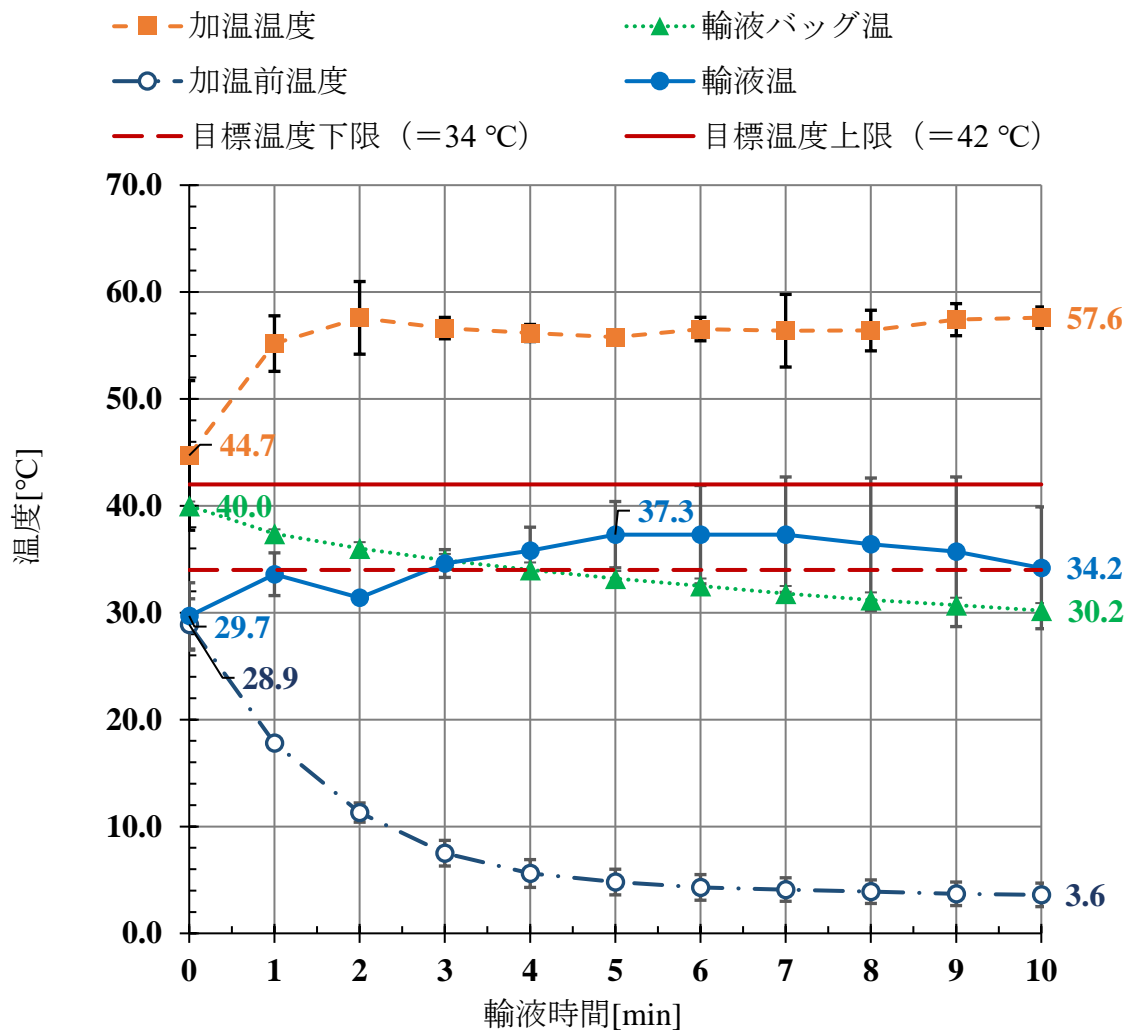


図 4.2 予備実験の結果 (n=5)

4.2.5 考察

予備実験にて、チューブカバーヒータで輸液回路の末端 150 cm を加温した結果、輸液回路の加温により目標温度範囲内である 34 °C 以上 42 °C 以下程度に輸液の温度を維持することができると考えられた。また、加温温度は 55 °C 前後とする見当をつけた。予備実験では、スイッチの ON/OFF の切り替えにより加温温度を調節していたが、実験結果のばらつきが大きかったことから、加温温度をより一定に保つために変圧器などで調節する必要があると考えられた。さらに、予備実験ではチューブカバーヒータ全体の 150 cm で加温したが、これは本実験で使用している輸液回路 300 cm の半分を覆うことになり、加温範囲は広範囲であった。また、輸液回路の構成からみても輸液回路とエクステンションチューブを接続している三方活栓が覆われてしまったため、加温範囲は三方活栓よりも下流側のエクステンションチューブ 100 cm 以内が理想であると考えられた。

4.3 輸液回路の加温範囲の検討

4.3.1 実験目的

輸液回路の加温範囲の検討では、目標温度の 34 °C 以上まで加温できる加温範囲を検討した。輸液が加温されることが最重要であるが、加温範囲をより狭くすることも小型・軽量化を目指すためには重要である。予備実験では、輸液回路の 150 cm を加温した。輸液回路の構成としては、200 cm の輸液回路と 100 cm のエクステンションチューブを三方活栓で接続している。三方活栓では必要に応じて薬剤などの投与を行うことから、加温範囲は三方活栓よりも下流側の 100 cm の範囲内におさめ、より狭い加温範囲の検討が必要であると考えた。

4.3.2 実験方法

本実験は、2.2.1 項と同様の輸液回路を使用し、2.2.2 項の実験環境にて実験を行った。また、条件についても 2.2.3 項で基本条件とした屋外気温 0 °C、輸液は事前に約 40 °C に加温した生理食塩液（500 mL）、輸液流量 200 mL/h、輸液回路の長さ 300 cm とした。輸液時間は 10 分間で輸液開始直後（0 分）から 1 分毎に輸液の温度を測定した。また、本実験においても加温温度と加温前温度を熱電対にて測定した。

4.3.3 加温方法

本実験では、4.2 節の予備実験で使用したチューブカバーヒータ（東京技術研究所、図 4.1）を用いて輸液回路を加温した。予備実験では、輸液回路の末端 150 cm にチューブカバーヒータを装着して、ON/OFF の切り替えのできるスイッチ付きコンセントに接続し、加温温度を調節したが、加温温度が安定しなかった。そのため、本実験では交流電圧調整器（図 4.3）を使用し、チューブカバーヒータ内に留置した熱電対にて実測した加温温度をモニタリングしながら一定の温度になるよう調節した。



図 4.3 交流電圧調整器

4.3.4 検討内容

4.2 節の予備実験では、150 cm のチューブカバーヒータで回路末端を覆い加温したが、屋外などの救急現場で加温することを想定すると加温範囲はより狭いほうが理想的である。本検討では、三方活栓下流にてより狭い範囲で加温の効果が得られる輸液回路の加温範囲の検討を行った。

本実験では、以下に示すⅠ～Ⅲの加温範囲で輸液回路を加温し、輸液の温度低下防止の効果を検討した。各加温範囲を図 4.4 に示す。

Ⅰ． 回路末端 100 cm

（加温前温度の測定箇所：三方活栓上流の輸液回路内）

Ⅱ． 回路末端 50 cm

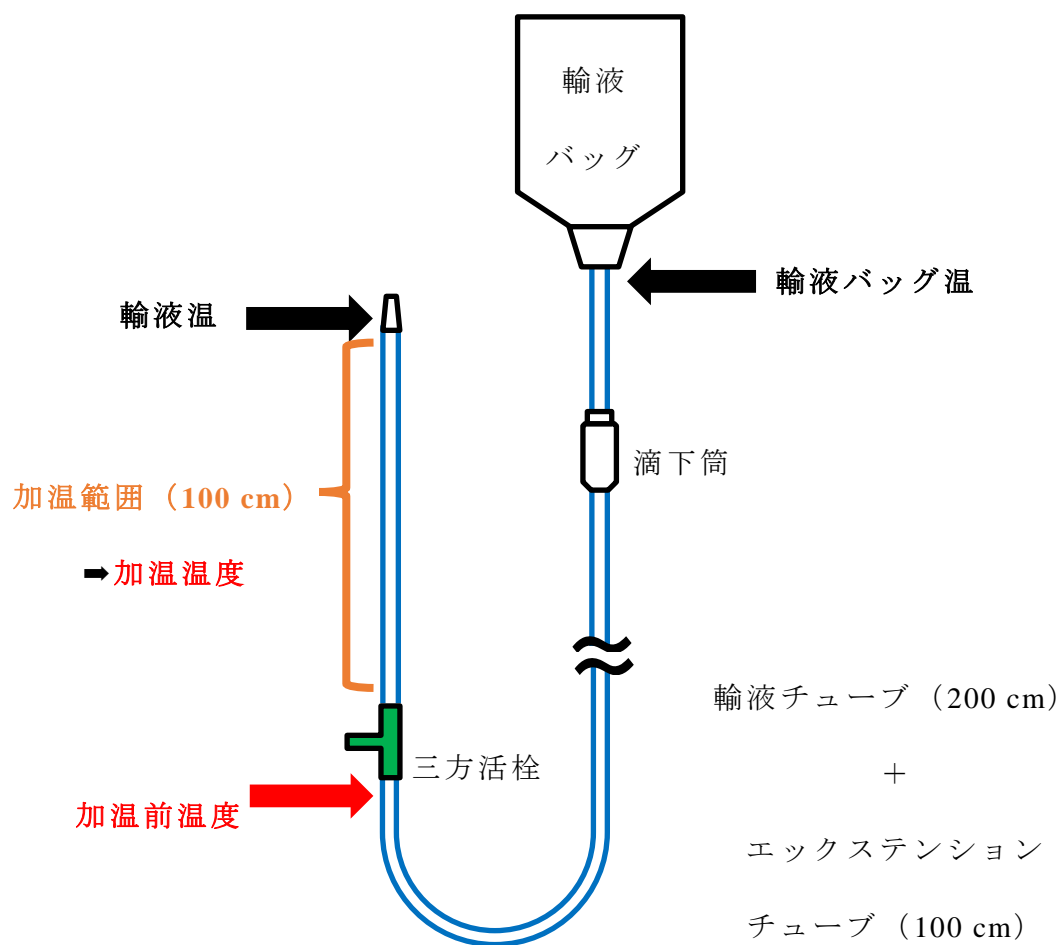
（加温前温度の測定箇所：回路末端から約 51 cm の輸液回路内）

Ⅲ． 回路末端 100 cm から末端の 10 cm を除く 90 cm

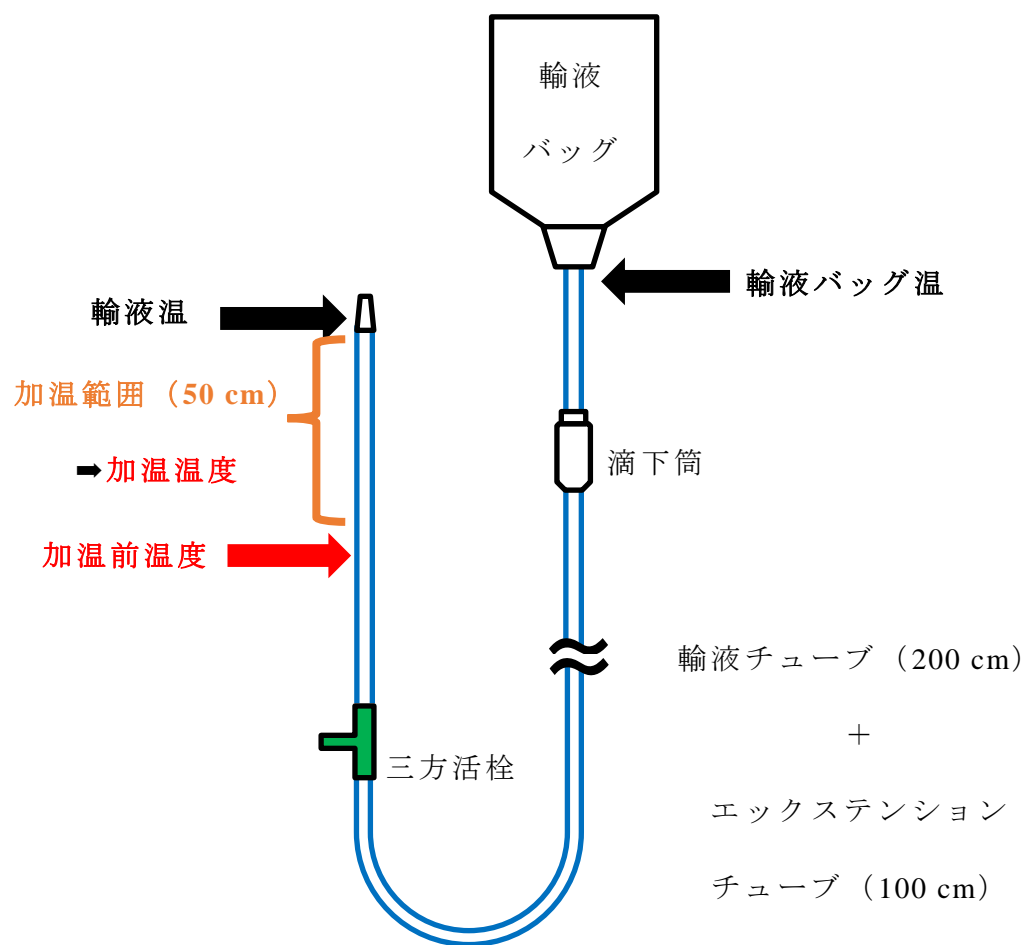
（加温前温度の測定箇所：三方活栓上流の輸液回路内）

Ⅰ、Ⅱでは、加温範囲の長さによる加温効果を検討した。また、実際に輸液をする際には、患者の腕にループを作り輸液回路を固定している。患者接続部付近の回路末端を加温範囲から除外することで、扱いやすくなると考えられたため、Ⅲでは回路末端の 10 cm を除外した条件を検討した。

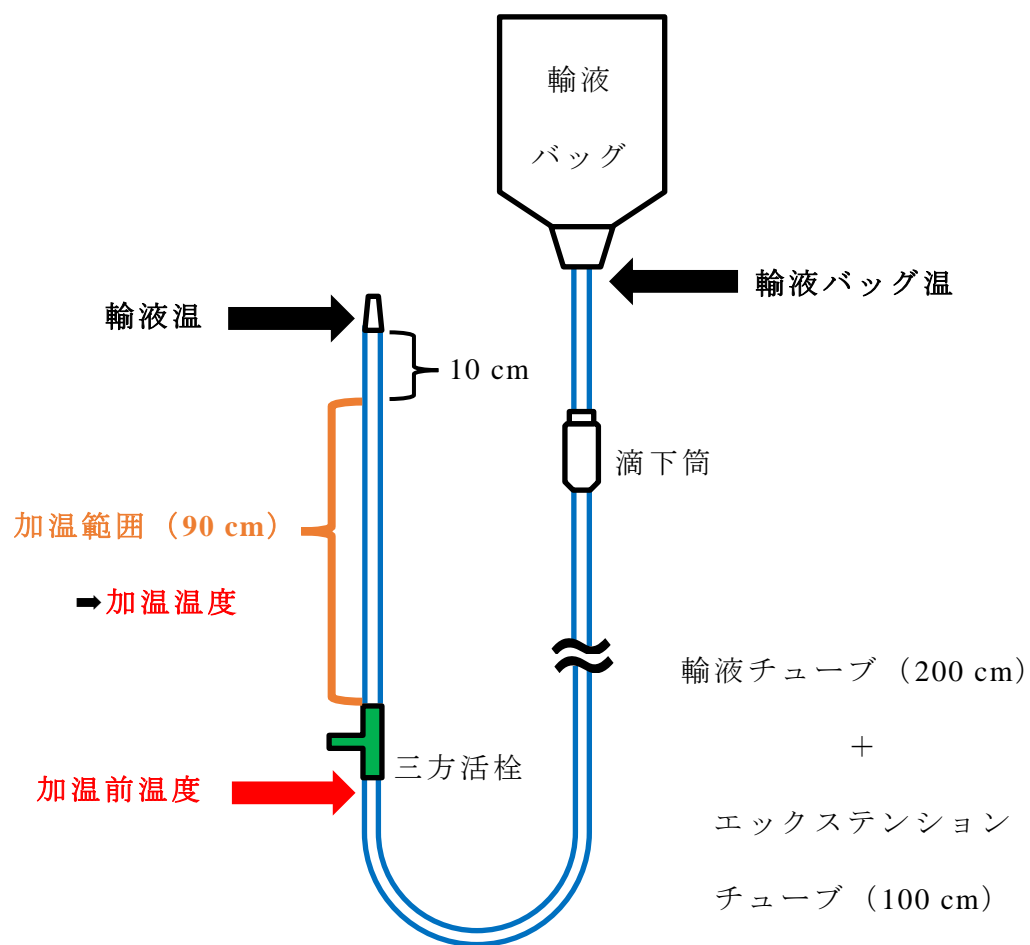
なお、加温温度は予備実験で見当をつけた 55 °C とした。



I. 加温範囲：回路末端 100 cm



II. 加温範囲：回路末端 50 cm



Ⅲ. 加熱範囲：回路末端 100 cm から末端 10 cm を除く 90 cm

図 4.4 輸液回路の加熱範囲（Ⅰ～Ⅲ）

4.3.5 実験結果

加温温度は約 55 °C で一定で、加温範囲を I～III のように変えたうち、加温範囲の最も広い条件である回路末端 100 cm の結果を図 4.5 に示す。加温温度は、10 分間約 55 °C で安定していたため、チューブカバーヒータにより一定の温度で輸液回路を加温することができていた。本実験で加温したのは輸液回路のみであるため、輸液バッグ温については時間経過とともに低下していた。加温範囲 100 cm の上流で測定した加温前温度は、輸液開始直後（0 分）で 31.9 °C であり、10 分後には 3.1 °C まで低下した。それに対して、加温範囲 100 cm の輸液回路内を通過した回路末端の輸液温は、輸液開始直後（0 分）で 31.7 °C、4 分経過時に最高温度の 40.0 °C まで加温された。2 分～8 分で目標温度範囲の 34 °C 以上、42 °C 以下を維持しており、10 分後は 33.1 °C であった。

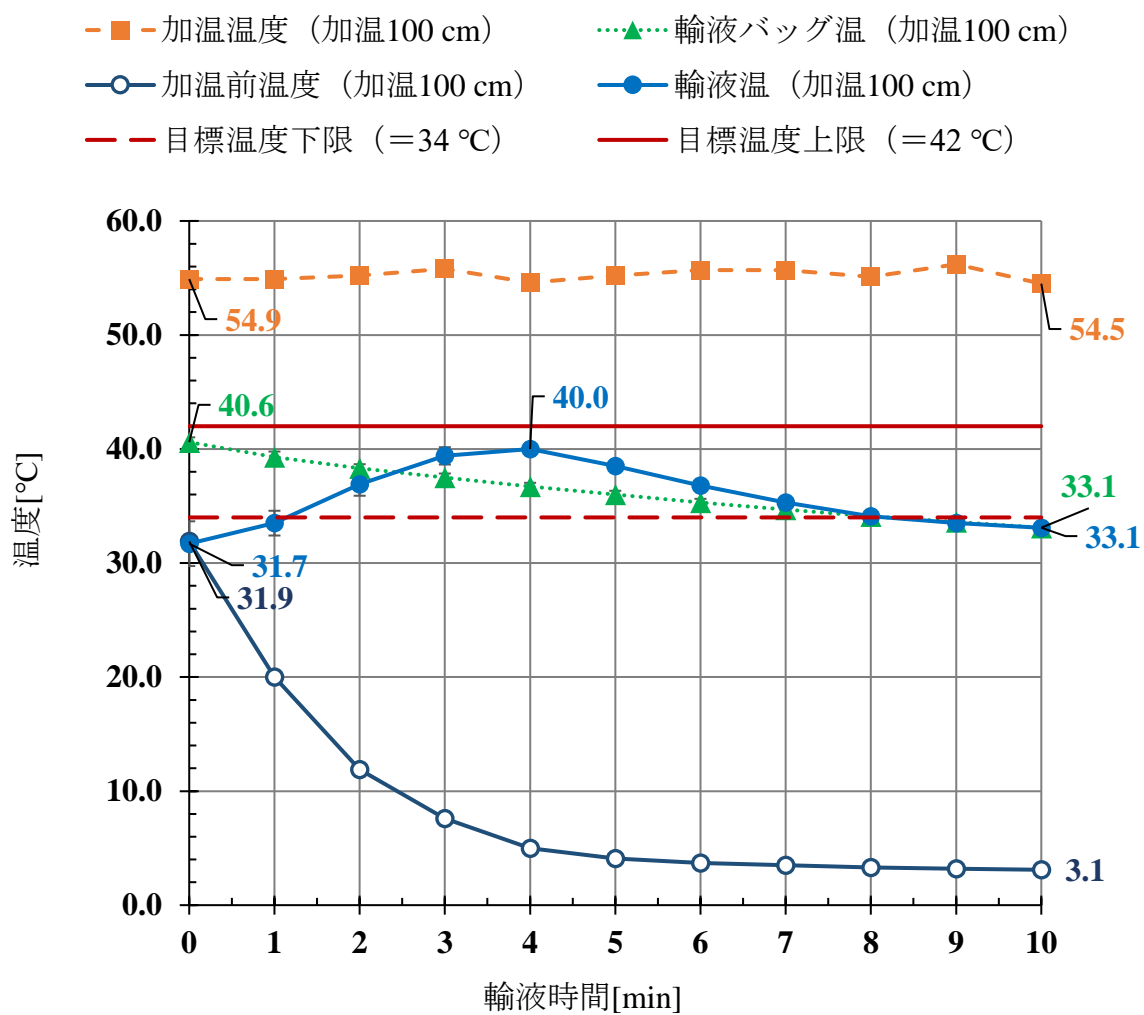


図 4.5 回路末端 100 cm を加温したときの輸液の温度低下防止の効果 (n=5)

次いで、加温範囲を半分の 50 cm に狭くした条件（Ⅱ）と 100 cm から末端の 10 cm を除き 90 cm とした条件（Ⅲ）の輸液の温度低下防止の効果について、回路末端の輸液温の結果のみを図 4.6 に示し、比較する。まず加温範囲 50 cm のとき、輸液開始直後（0 分）で 31.1 °C、2 分経過時に最高温度の 31.4 °C まで加温された。しかし、目標温度の 34 °C まで加温されることはなく、10 分後には 18.0 °C まで低下した。回路末端 100 cm と比較すると加温範囲が半分になったため、十分な加温の効果が得られなかった。一方、回路末端 100 cm から末端 10 cm を除き、90 cm を加温したとき、輸液開始直後（0 分）で 33.8 °C であり、その 1 分後に 28.6 °C まで一時的に温度が低下した。その後輸液温は上昇し 3 分経過時に最高温度の 31.6 °C まで加温された。この場合も目標温度の 34 °C まで加温されることはなく、10 分後には 23.4 °C まで低下した。回路末端 100 cm と比較すると、加温範囲はわずか 10 cm 短くしただけであるが、加温された輸液の温度は回路末端まで維持されず、低下する結果が得られた。

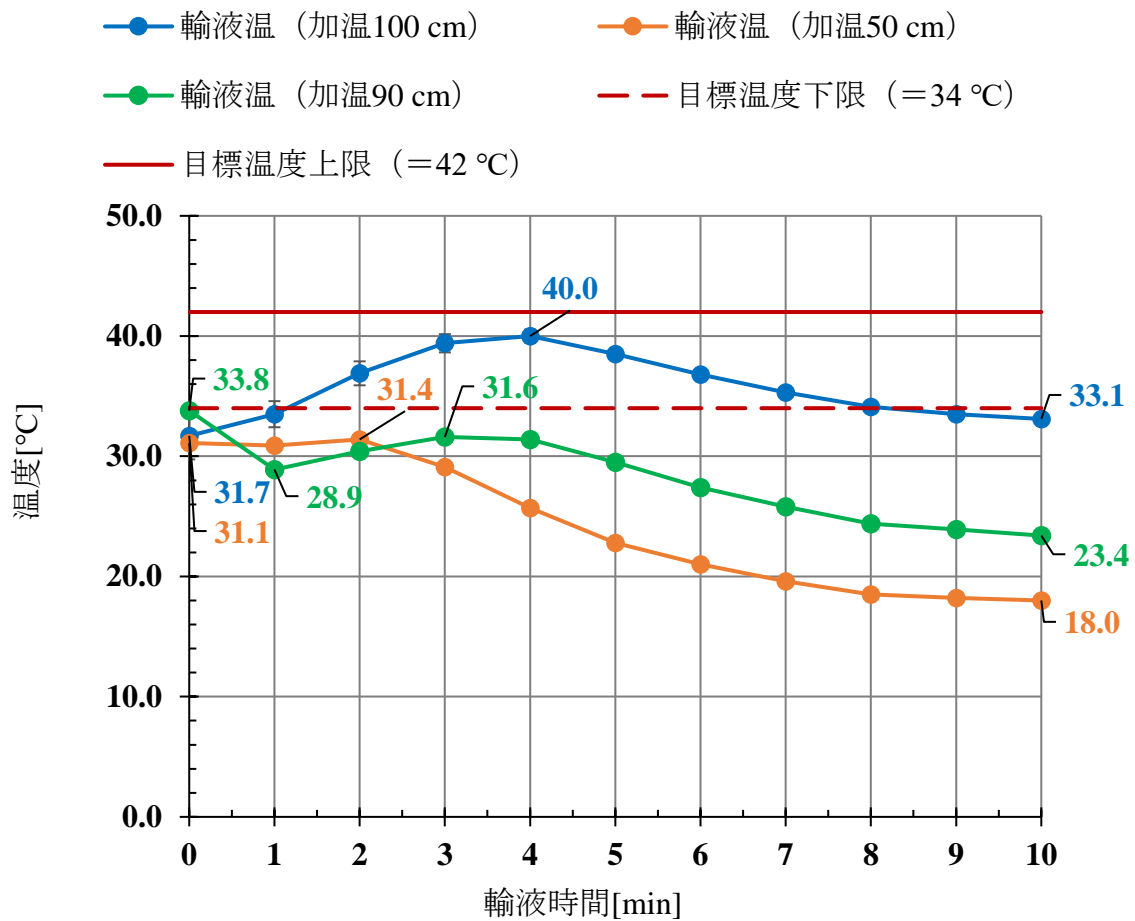


図 4.6 加温範囲を変えたときの輸液温の比較 (n=5)

4.3.6 考察

図 4.5 の結果より、本実験では加温温度は約 55 °C で一定であった。一方で回路末端の輸液温は一時的に上昇したのち、徐々に低下した。輸液回路の加温による輸液温の変化について考える。最も加温効果の得られた回路末端 100 cm では、加温範囲はエクステンションチューブ全体で、加温範囲内の輸液の充填量は 8.6 mL である。輸液流量は 200 mL/h であるため、1 分あたり 3.3 mL 流れる。加温範囲 100 cm を輸液が流れるのにおよそ 2 分 30 秒かかることになる。実験では加温前温度と輸液温は同時に測定されているが、加温前温度が加温範囲内で加温されて輸液温として測定されるのは約 2 分 30 秒後である。例えば、輸液開始直後 (0 分) 時点の加温前温度は約 2 分 30 後の輸液温の結果として表れる。つまり、輸液開始から約 2 分 30 秒までの輸液温はすでに加温範囲内に充填された輸液であり、屋外気温の影響をほとんど受けずに加温されるため、輸液温は上昇傾向を示した。しかし、加温範囲外の輸液回路 200 cm では屋外気温の影響を受けて冷やされるため、加温前温度は時間経過とともに低下する。したがって、低温の輸液を加温しなければならないため、回路末端の輸液温も低下傾向になった。このように、加温範囲を輸液回路の一部に限定したため、加温温度が一定であっても、輸液温は変動する結果となった。加温温度、輸液温ともに温度が安定していることが理想ではあるが、加温範囲はより狭い方が救急現場などで使用する方法として応用しやすい。そのため、最小の加温範囲で最大の加温効果が得られる回路末端 100 cm が望ましいと考えられた。

加温範囲の狭さや加温する箇所により、加温効果に違いが現れた。2.4.2 項の熱量の公式 (2-1) より、回路末端 100 cm の加温範囲では 10 分間の熱量変化は 261~304 J と計算された。屋外気温 0 °C で輸液を行うことで失われる熱量は -5387~-6285 J であることから、加温により 5648~6589 J の熱量を得たと考

えられる。回路末端 50 cm の加温範囲では、10 分間の熱量変化は $-2625 \sim -3062$ J と計算され、輸液温が低下してしまった。加温していない場合に失われる熱量と比べると、加温により $2762 \sim 3223$ J の熱量が得られているものの、加温範囲 100 cm の約半分の熱量であった。加温範囲 90 cm で末端 10 cm を除外した条件では、10 分間の熱量変化は $-2072 \sim -2418$ J と計算され、こちらも輸液温が低下する結果であった。回路末端 100 cm を加温した条件と比較すると、加温した後の輸液がわずか 10 cm 屋外気温の冷氣に曝されただけで $2333 \sim 2722$ J の熱量が奪われてしまうことが分かった。そのため、患者に投与される直前まで屋外気温に曝されずに加温することが重要であると考えられた。

また、保温の基礎検討は、輸液の温度を低下させないための検討であったため、事前に加温した輸液バッグの温度である約 40°C を超えることは無かった。一方で、加温の基礎検討では輸液回路を加温していることから、輸液の温度が約 40°C を超える可能性が考えられる。前述したように、輸液の温度上限を 42°C とし、過剰な加温の危険性がない条件であることも考慮する必要がある。本実験で検討した加温範囲において、温度上限を超える条件は無かった。

4.4 輸液回路の加温温度の検討

4.4.1 実験目的

輸液回路の加温の予備実験では、約 55 °C で輸液の温度低下防止の効果が得られると見当をつけたため、4.3 項の輸液回路の加温範囲の検討では加温温度を一定の条件の約 55 °C としていた。加温範囲は回路末端 100 cm が最も加温効果の得られる条件であり、ここで改めて加温範囲を一定の回路末端 100 cm としたときの加温温度の検討を行った。

4.4.2 実験方法

本実験は、2.2.1 項と同様の輸液回路を使用し、2.2.2 項の実験環境にて実験を行った。また、条件についても 2.2.3 項で基本条件とした屋外気温 0 °C、輸液は事前に約 40 °C に加温した生理食塩液（500 mL）、輸液流量 200 mL/h、輸液回路の長さ 300 cm とした。輸液時間は 10 分間で輸液開始直後（0 分）から 1 分毎に輸液の温度を測定した。また、本実験においても加温温度、加温前温度を測定した。

4.4.3 加温方法

本実験は 4.2 節の予備実験にて使用したチューブカバーヒータ（図 4.1）で輸液回路を加温し、交流電圧調整器（図 4.3）で温度を調整した。加温範囲については 4.3 節の加温範囲の検討の結果より、回路末端 100 cm とした。

4.4.4 検討内容

本実験では、以下に示す I～III の加温温度で輸液回路を加温し、輸液の温度低下防止の効果を検討した。

- I. 加温温度 50 °C
- II. 加温温度 55 °C
- III. 加温温度 60 °C

4.3 節では、予備実験で見当をつけた加温温度 55 °C で固定し、加温範囲を検討した結果、回路末端 100 cm を加温することで加温の効果を得られることが明らかになった。加温温度については、可能な限り低い温度の方が安全性は高い。そのため、改めて加温温度を 5 °C 低くした 50 °C で加温効果を検討した。また、55 °C よりも 5 °C 高くした 60 °C の条件で目標温度の 34 °C 以上をより長く維持できるのかについても検討した。

4.4.5 実験結果

加温温度をI～IIIの条件に変えたときの回路末端の輸液温の比較を図 4.7 に示す。まず加温温度 50 °C のとき、輸液開始直後（0 分）で 31.8 °C、3 分経過時に最高温度の 35.5 °C まで加温された。目標温度の 34 °C まで加温されたのは 2 分経過以降から 4 分経過後までであり、10 分後には 29.1 °C まで低下した。一時的に目標温度まで加温されたが、加温温度 55 °C よりも早く温度が低下してしまう傾向であった。一方、加温温度 60 °C のとき、輸液開始直後（0 分）で 33.5 °C であり、輸液開始直後（0 分）以降からほぼ 10 分間、目標温度の 34 °C 以上に加温されていた。しかし、最高温度は 4 分経過時の 45.2 °C であり、患者へ投与した場合、溶血などの危険性のある温度まで加温された。

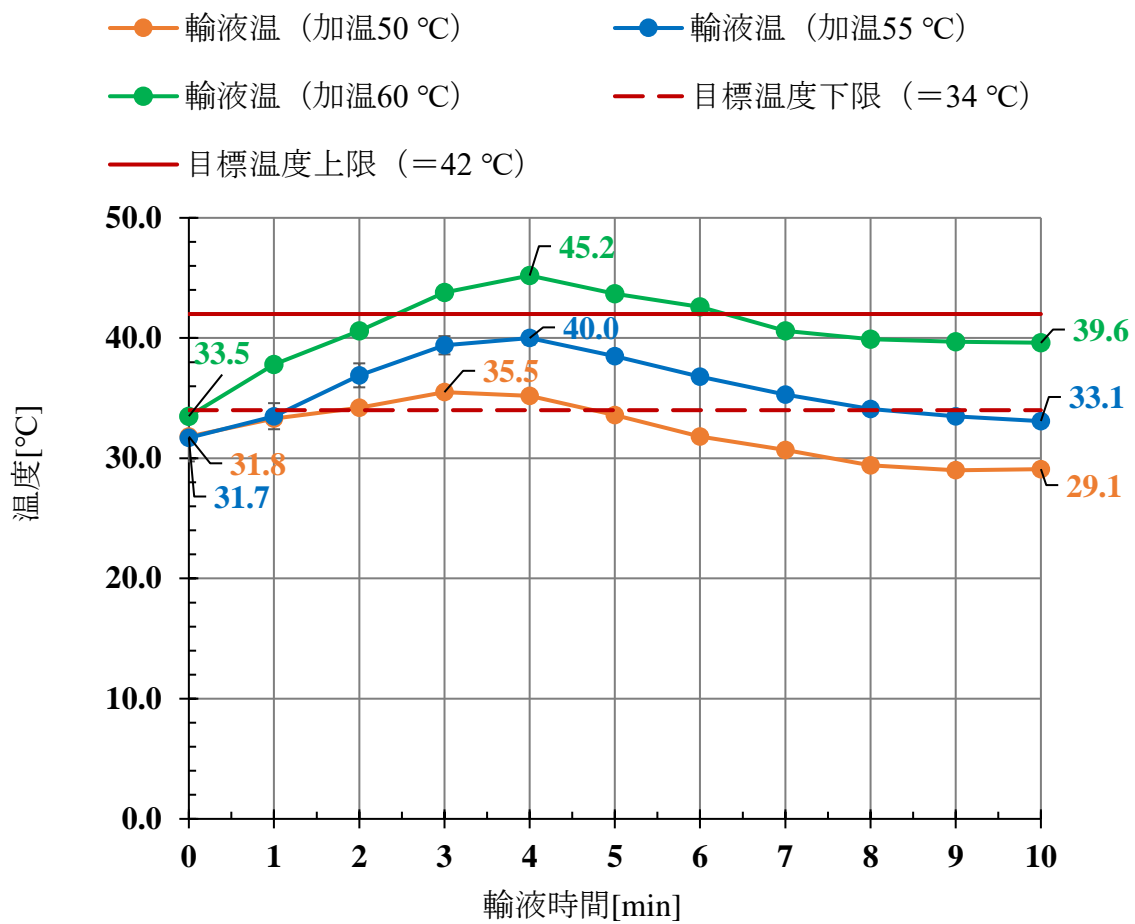


図 4.7 加温温度を変えたときの輸液温の比較 (n=5)

4.4.6 考察

加温温度 50 °C、60 °Cの結果より、10 分間の熱量変化は-503 J~-587 J、1104~1287 J と計算された。そのため、加温によって輸液が得られる熱量はそれぞれ 4884~5698 J、6491~7572 J であった。加温温度が高いほど、当然ながら大きな熱量を与えることができた。加温温度 50 °Cでは加温温度 55 °Cよりも熱量が小さく、輸液が 34 °C以上に加温されたのは一時的であった。加温温度 60 °Cでは、低温環境においても大きな熱量を与えられることが分かった。しかし、加温範囲を限定したことから、輸液温は 10 分間で変動した。3~4 分経過時に最も高い温度まで一時的に加温される。この最高温度が 42 °Cを超えると血液の溶血などを引き起こす危険性があるため、42 °C以下である必要がある。加温温度 60 °Cでは 4 分経過時に 45.2 °Cまで加温されており、本実験にて定めた加温上限 42 °Cを超えた温度まで加温された。そのため、加温温度 55 °Cが目標温度である 34 °C以上の輸液温を長く維持することができ、最高温度が 42 °Cを超えない加温温度であると考えられた。

4.5 様々な条件における輸液回路の加温効果

4.5.1 実験目的

4.3 項、4.4 項にて、基本条件の屋外気温 0 °C で維持輸液を行ったとき、目標温度 34 °C 以上を維持する加温条件は回路末端の 100 cm、加温温度 55 °C であることを実験により明らかにした。凍結事例がきっかけであったことから、水の凝固点である 0 °C を基本条件としてきた。寒冷地である北海道の札幌で最も平均気温の低い 1 月は平均気温 -4.4 °C であり、日にちや地域によっては輸液が凍結するほど寒い日もある。このことから、屋外気温 -5 °C、-10 °C のようなより低温な環境における輸液回路の加温の効果について検討する。

また、プレホスピタル診療における外傷患者への輸液は維持輸液を行う傾向にあるが、循環血液量減少性ショック (hypovolemic shock) に対しては例外である。出血量の増加により循環血液量減少性ショックに陥った外傷患者には、循環動態を安定させるため急速輸液を行う必要がある⁴⁻¹⁾。急速輸液とは、輸液回路のローラクレンメを全開にし、落差により最大流量を投与する輸液である。外傷患者の病態がプレホスピタル診療において急変した場合、維持輸液から急速輸液へ切り替える可能性も考えられる。これまで検討してきた輸液回路の加温の基礎検討は、維持輸液を想定した際の急激な温度低下に対する加温条件である。輸液流量の大きく異なる維持輸液と急速輸液では、まず低温環境における輸液の温度低下の程度に違いが生じ、急速輸液は輸液流量が多いことから維持輸液ほど温度が低下しないと推測される。維持輸液と同様の加温条件において輸液回路の加温をしたとき、輸液が過剰に加温されてしまう可能性が考えられた。一方で、流速が速く、輸液が加温範囲 100 cm を通過する時間も短いことから加温効果が得られにくいことも考えられる。以上のことから、急速輸液における輸液回路の加温の効果についても検討した。

4.5.2 実験方法

本実験は、2.2.1 項と同様の輸液回路を使用し、2.2.2 項の実験環境にて実験を行った。輸液は事前に約 40 °C に加温した生理食塩液（500 mL）を使用し、輸液回路の長さは基本条件の 300 cm とした。輸液時間は 10 分間で輸液開始直後（0 分）から 1 分毎に輸液の温度と加温温度、加温前温度を測定した。輸液回路の加温には 4.2 節と同様のチューブカバーヒータ（図 4.1）を使用し、交流電圧調整器（図 4.3）で温度を調整した。加温範囲については 4.3 節の結果より回路末端 100 cm、加温温度については 4.4 節の結果より 55 °C とした。

4.5.3 様々な低温環境の想定

これまで、基本条件とした屋外気温 0 °C において加温条件の検討を行ってきた。本実験では、屋外気温 -5 °C、-10 °C に変更し、より低温な環境における輸液回路の加温効果を検討した。なお、屋外気温の違いによる加温効果を確認するため、輸液流量は基本条件の 200 mL/h とし、維持輸液を想定した。

4.5.4 急速輸液の想定

急速輸液では輸液ポンプを使用せず、輸液バッグ液面から回路末端の落差を 120 cm とし、ローラクレンメを全開にした（図 4.8）。屋外気温は基本条件の 0 °C とした。まずは、加温はせずに低温環境を想定した屋外気温 0 °C における輸液の温度変化を測定した。さらに回路末端 100 cm を 55 °C で加温し、急速輸液における輸液回路の加温効果を検討した。

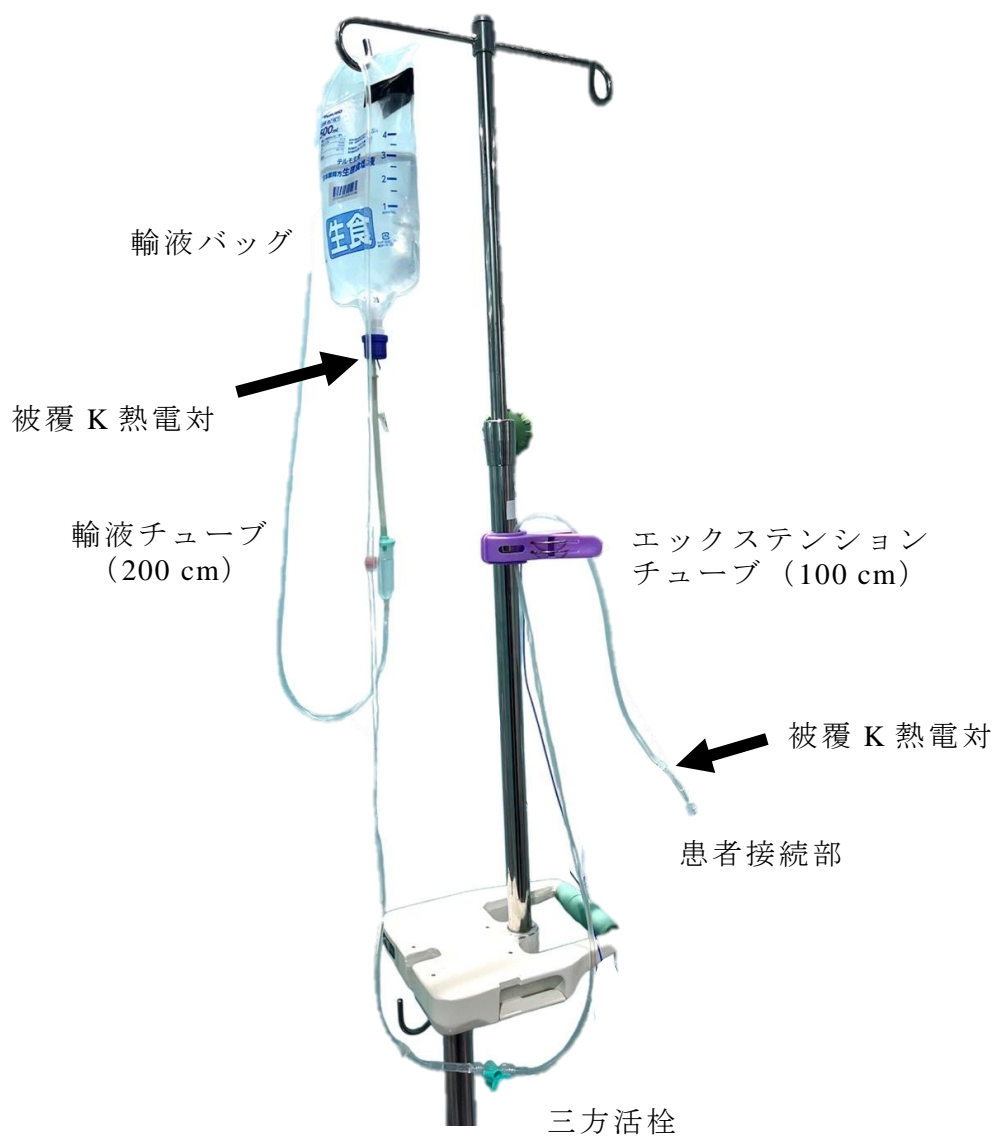


図 4.8 急速輸液で使用した輸液回路

4.5.5 実験結果

より低温な環境における輸液回路の加温効果

まず、屋外気温 -5°C における輸液回路の加温の効果を図 4.9 に示す。加温温度は 10 分間約 55°C で維持されており、一定の温度で加温されていることが分かる。本実験においても加温したのは輸液回路のみであるため、輸液バッグ温は時間経過とともに低下した。加温前温度は、輸液開始直後から急激に温度低下し、10 分後には -0.9°C まで低下した。それに対して、 55°C で加温された回路末端 100 cm を通過した輸液温は、輸液開始直後（0 分）で 30.4°C であり、4 分経過時に最高温度の 37.5°C まで加温された。2 分～5 分で目標温度の 34°C 以上を維持していたが、10 分後には 29.1°C まで低下した。

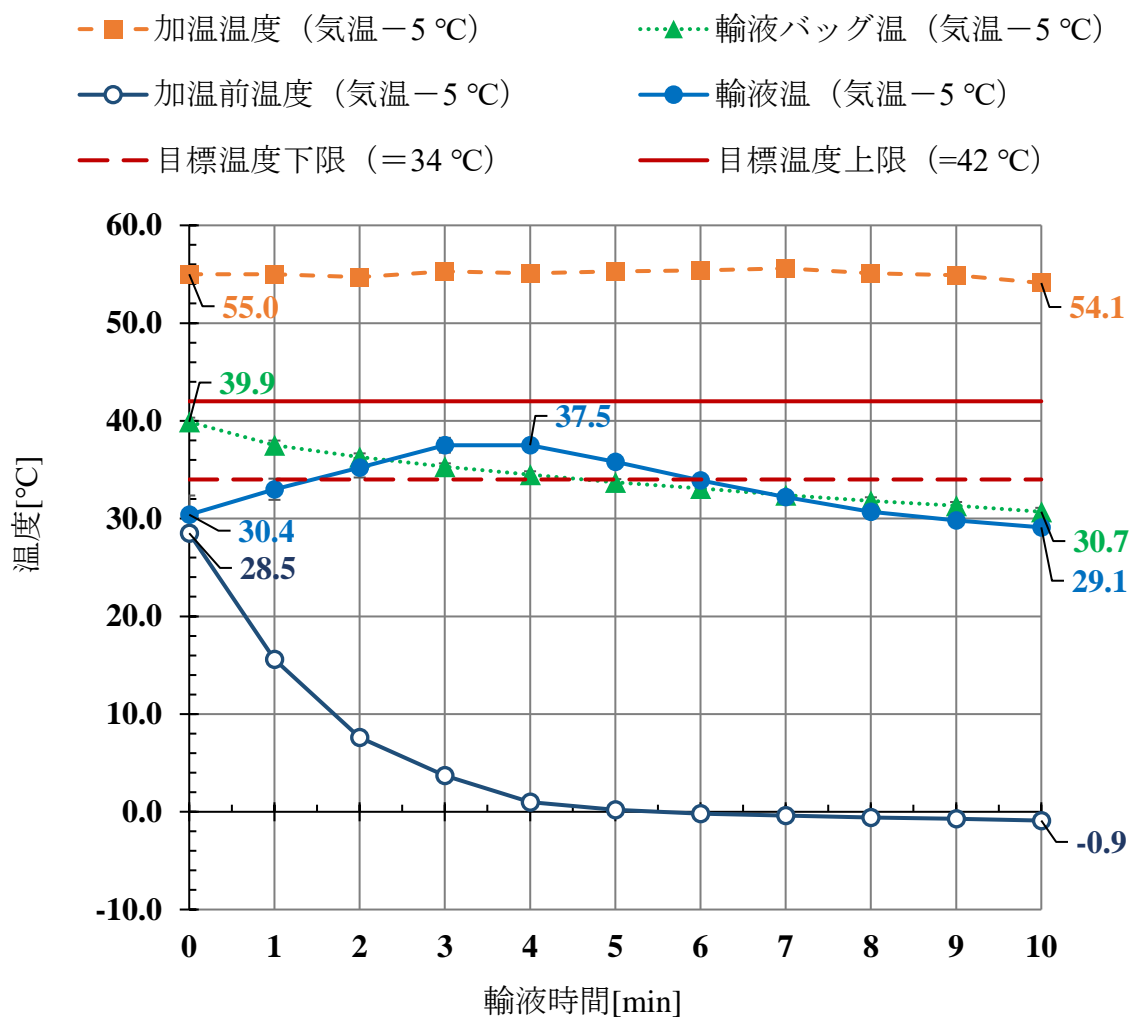


図 4.9 屋外気温 - 5°C における輸液回路の加温の効果 (n=5)

次いで、屋外気温 -10°C の結果を図 4.10 に示す。結果として、回路末端 100 cm を 55°C で加温したものの、5 回すべての測定で 4 分経過後には輸液が凍結してしまった。回路末端の輸液温は、輸液開始直後 (0 分) で 30.2°C 、凍結前の 4 分経過時で 34.8°C であった。凍結までの時間は 5 回の測定のうち最短で 4 分 10 秒、最長で 4 分 40 秒という結果であった。輸液回路の加温により、回路末端の輸液温は緩やかに上昇していた。しかし、屋外気温 -10°C に曝された加温範囲外の加温前温度は、急激に温度が低下してしまい、輸液が凍結した。

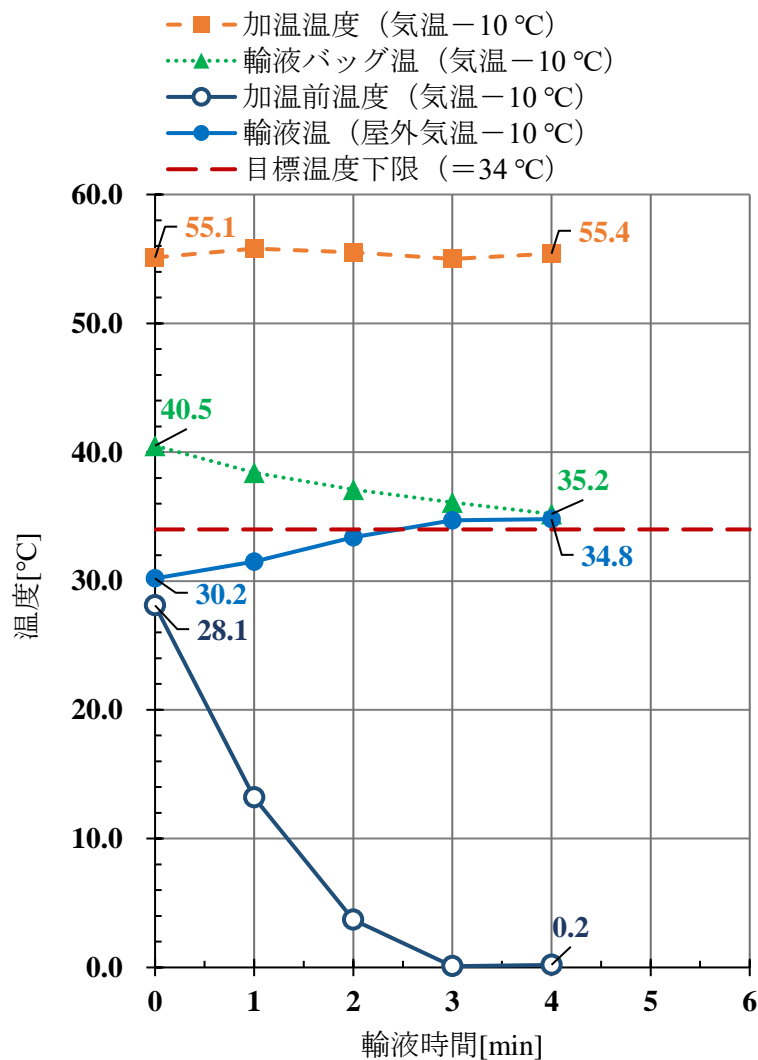


図 4.10 屋外気温 -10°C における輸液回路の加温効果 (n=5)

急速輸液における輸液回路の加温効果

急速輸液を想定したときの屋外気温 0 °Cにおける輸液の温度変化の結果と、比較のため維持輸液の結果を図 4.11 に示す。落差 120 cm で急速輸液を行い、10 分間の輸液量は平均で 314 mL であった。輸液流量は 1884 mL/h であり、およそ維持輸液の基本条件である 200 mL/h の 10 倍であった。まず、輸液バッグ温は輸液開始直後（0 分）で 40.4 °Cであり、10 分後には 35.0 °Cであった。維持輸液よりも輸液バッグ温の低下の程度は小さかった。回路末端の輸液温は輸液開始直後（0 分）で 29.0 °Cであり、温度低下は時間に比例するように低下した。10 分後には 13.8 °Cまで低下した。維持輸液は指数関数的に温度が低下したのに対して、急速輸液は時間に比例するように、緩やかな温度低下であった。輸液流量が大きく異なる急速輸液では、やはりそれほど急激な温度低下ではなかったが、屋外気温によって輸液は冷やされることが分かった。

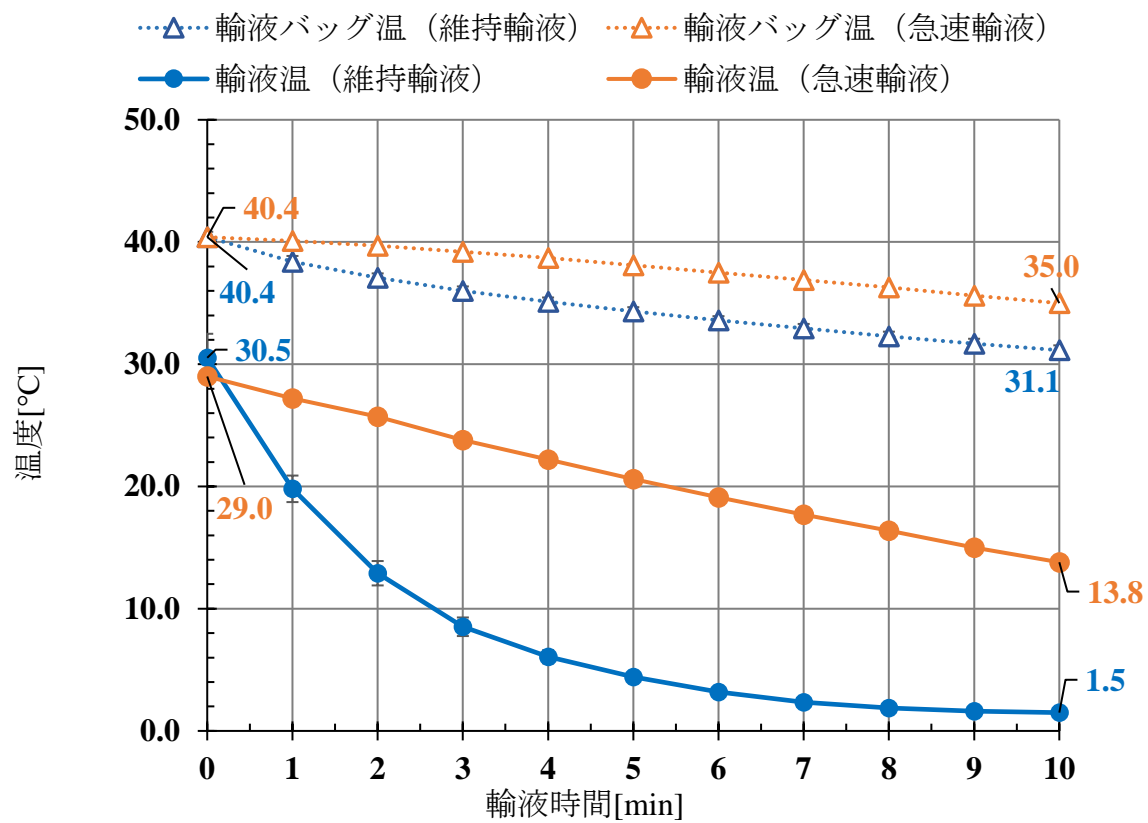


図 4.11 急速輸液における輸液の温度変化 (n=3)

次いで、急速輸液において回路末端 100 cm を 55 °C で加温した結果を図 4.12 に示す。輸液回路のみを加温したため、輸液バッグ温の低下に違いはなかった。回路末端の輸液温は輸液開始直後（0 分）で 31.2 °C であり、10 分後には 21.2 °C であった。輸液回路の加温によって、輸液温が一時的でも上昇傾向になることを予想していたが、輸液開始直後の輸液温よりも加温されることはなく、時間経過とともに温度が低下した。そのため、目標温度の 34 °C を維持することはできなかった。加温前温度と温度低下の傾向が似ており加温の効果が分かりにくいですが、10 分間の輸液温の低下は 10.0 °C であり、図 4.11 の加温していないときでは 15.2 °C であることから、輸液回路の加温により温度低下が抑制されていることが分かった。

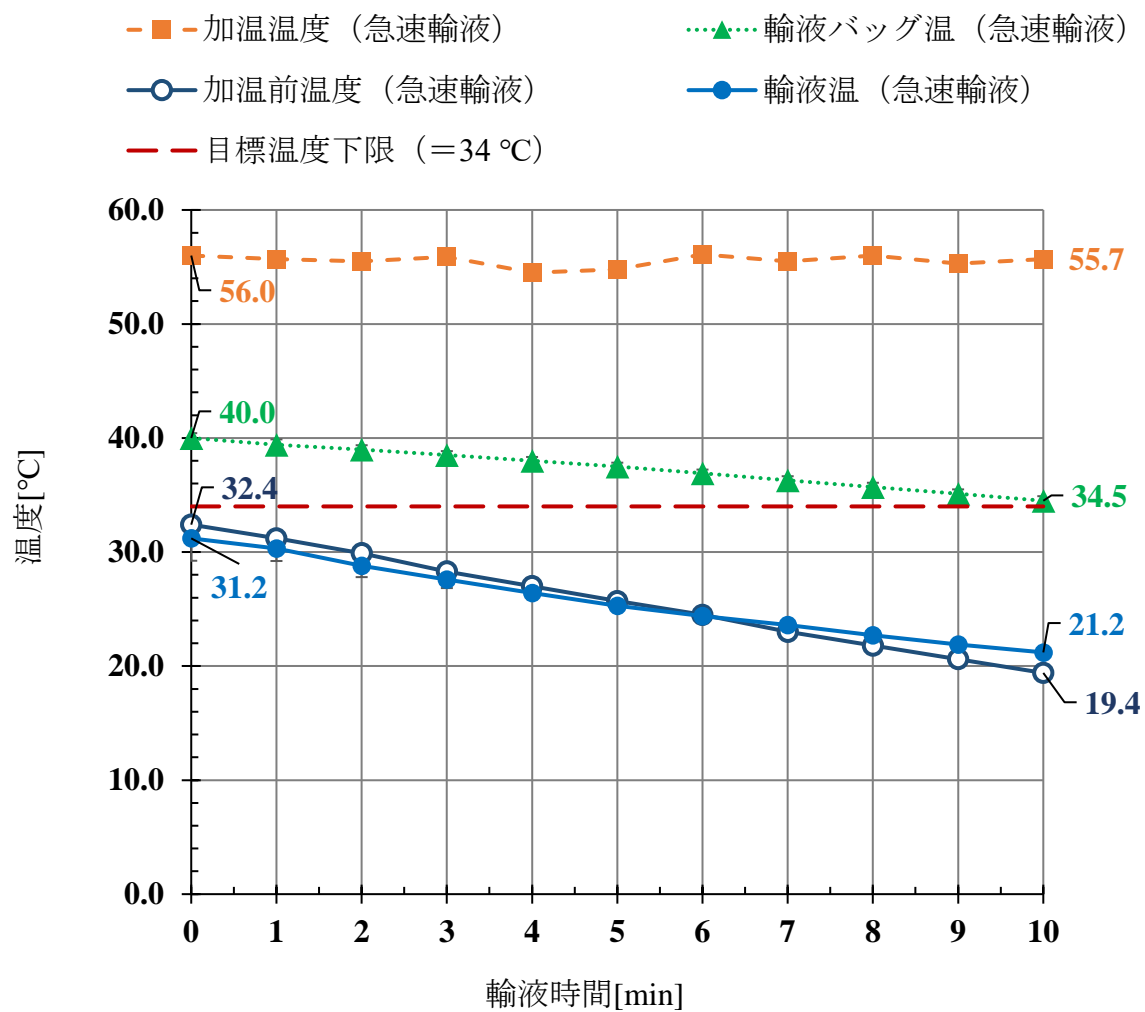


図 4.12 急速輸液における輸液回路の加温 (55 °C) の効果 (n=3)

55 °Cで輸液回路を加熱した結果、急速輸液では流速が速く、輸液が加熱範囲100 cmを通過する時間も短いことから加熱効果が得られにくいことが分かった。この結果から、維持輸液では輸液が42 °C以上まで加熱されてしまった加熱温度60 °Cに変更し、目標温度34 °Cに近い温度まで加熱されるのかを追加で検討した。急速輸液における加熱温度60 °Cと55 °C、加熱していないときの輸液温の結果を図4.13に示し、比較する。加熱温度を5 °C高くした60 °Cでは、輸液開始直後（0分）で輸液温は30.1 °Cであり、10分後では23.1 °Cであった。10分間の温度低下は7.0 °Cであり、加熱温度55 °Cよりも温度低下の程度を3.0 °C小さくすることができた。それでも、目標温度の34 °Cまで加熱することはできなかった。

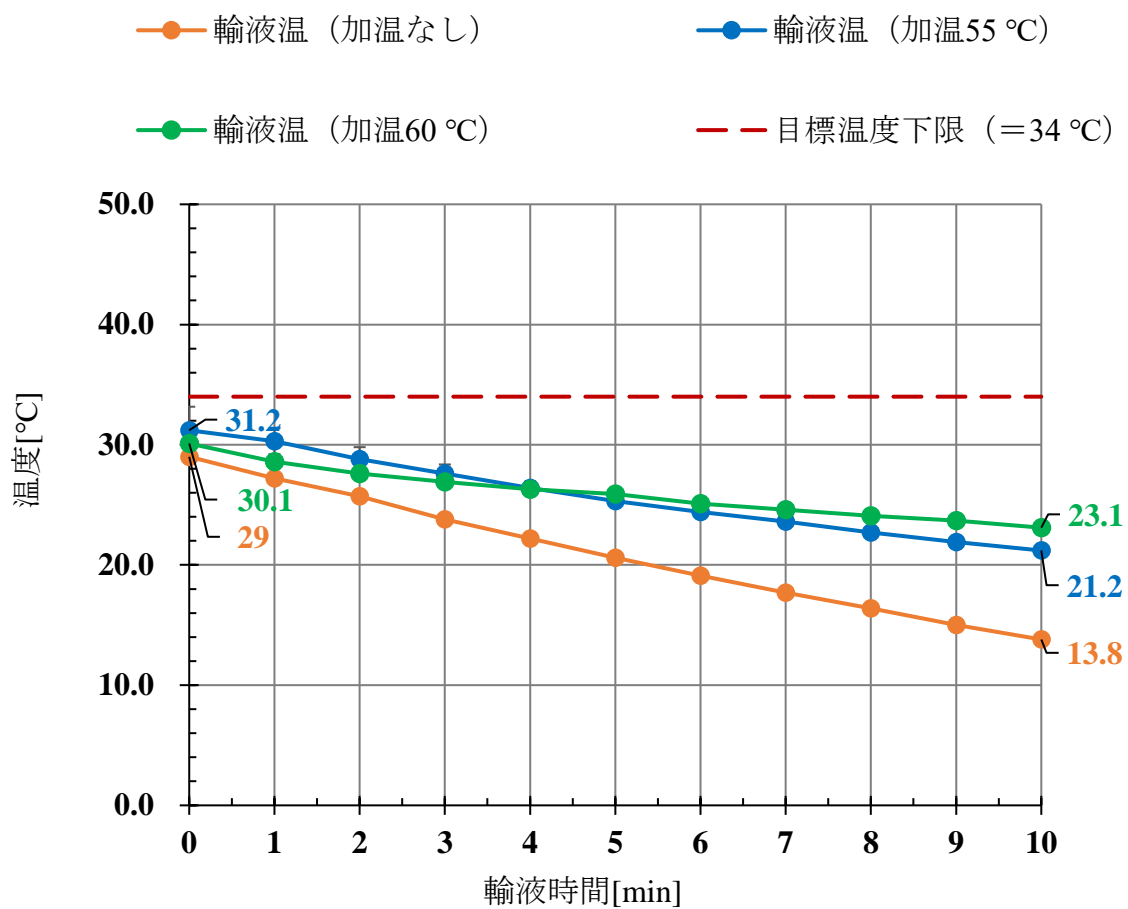


図 4.13 急速輸液における加温温度の違いによる加温効果 (n=3)

4.5.6 考察

基本条件の屋外気温 0°C よりも低温な環境を想定した屋外気温 -5°C において、10 分間の輸液における熱量変化は $-251 \sim -292 \text{ J}$ と計算された。加温していないときの屋外気温 -5°C における 10 分間の輸液の熱量変化は、第 2 章の図 2.10 の結果より $-6117 \sim -7137 \text{ J}$ であることから、回路末端 100 cm を 55°C で加温したことで、輸液は $5866 \sim 6845 \text{ J}$ の熱量を与えられたと考えられる。屋外気温 0°C における加温の基礎検討と同じ熱量を得たが、屋外気温が低く温度の低下の程度も大きいため、輸液温が 34°C 以上を維持したのは 4 分間程度であった。屋外気温 -10°C では、加温していないときとほぼ同じ 4 分程度で輸液が凍結する結果となった。回路末端の輸液温は上昇傾向であり、加温範囲内では輸液は温かかったが、加範囲外では急激に温度が低下してしまった。屋外気温 -10°C のような極端な低温環境においては、加温されない範囲にて凍結のリスクがあることが示された。凍結防止のためには、加温範囲の延長が必要であると考えられる。さらに、屋外の救命活動の時間を短縮することをより意識することが重要である。

急速輸液における輸液バッグ温の低下は、維持輸液よりも緩やかな温度低下であった。急速輸液は維持輸液よりも輸液流量が多いため、輸液バッグの残量は少なくなる。そのため、輸液バッグ内の輸液が冷やされる表面積が小さくなり、屋外気温により冷やされにくくなると考えられる。回路末端の輸液温の低下は、輸液回路内を流れる輸液流量が多いため緩やかであった。輸液回路の加温により温度低下を抑制することができたが、目標温度まで加温することはできなかった。 55°C 、 60°C の加温により過剰に輸液温が上昇してしまう危険性と、流速が速いため加温効果が得られにくいことが考えられていたが、本実験の結果より流量が速いことから加温効率が悪くなることが示された。

5. 輸液回路の加温による輸液の性状変化

5.1 序論

低温環境を想定した輸液の温度低下防止のための加温温度は、現在病院内（室温環境）で使用されている加温装置よりも高い温度が必要であると示された。また、加温範囲を回路末端の 100 cm に限定しているため、事前に約 40 °C に加温された輸液は、加温前で屋外気温まで低下し、回路末端で再加温されることになる。このように、輸液回路内においても大幅な温度変化が生じてしまう。第 4 章で述べた加温温度や加温範囲などの検討結果をもとに、加温された輸液の性状変化の有無を確認し、輸液回路の安全性を調査する。プレホスピタル診療における輸液製剤の保温による成分変化に関する先行研究⁵⁻¹⁾や輸液製剤の配合変化に関する研究^{5-2,3)}において、pH の変化が共通して性状変化の指標とされていた。これらの先行研究より、本実験においても pH を指標のひとつとした。さらに、温度によって粘性も変動することから輸液流量に影響を与えと考えられた。そのため、輸液の温度変化による粘性の変動についても本実験にて調査した。

5.2 実験方法

5.2.1 実験環境

本学の恒温室にて低温環境を再現し、10 分間輸液を行ったときの任意の温度における輸液を採取し、性状変化を確認するのが理想的であった。しかし、性状変化の測定に使用する一部の測定機器が恒温室から離れた場所にあり、移動の間に温度が変化してしまう問題点があった。このことから、輸液採取から測定までの温度変化が最小限となるよう、測定機器のある実験室から近い研究室にて実験を行った。

5.2.2 輸液製剤

一般的に外傷患者の輸液で使用されるのは細胞外液の生理食塩液やリンゲル液である。本実験では、外傷患者への初期輸液で一般的に使用されることの多い生理食塩液、酢酸リンゲル液、乳酸リンゲル液の 3 種類を使用した。

5.2.3 輸液の温度条件

性状変化を調べる輸液の温度条件は、以下に記す屋外気温 0 °C の環境で輸液を行った際に想定される輸液バッグ、輸液回路内の輸液の温度条件とした。

- ・ 輸液バッグ、室温
 - ▶ 室温保管（対照）
- ・ 輸液バッグ、40 °C
 - ▶ 事前に加温された輸液バッグ
- ・ 輸液回路内、0 °C
 - ▶ 屋外気温近くまで冷やされた加温前の輸液の温度
- ・ 輸液回路内、40 °C
 - ▶ 回路末端 100 cm を 55 °C で加温したときの、回路末端の輸液温の最高温度

実際に恒温室内で 10 分間輸液を行い、任意の温度で輸液の採取を試みたが、輸液回路内の輸液の温度分布が一樣でないため、本来性状を調べたい温度のみの輸液をピンポイントで採取することが困難であった。5.2.1 項で述べた問題点もあったことから、室温の実験室内（約 25 °C）で輸液を満たしたエクステンションチューブを冷蔵庫内（約 0 °C）で冷やす、チューブカバーヒータ（約 55 °C）で加温することで、任意の輸液の温度条件を再現した。

5.2.4 測定項目と測定機器

本実験では輸液の性状変化を調べるため、生化学的検査項目として pH の測定を行った。pH 測定には、Siemens Healthineers 社の血液ガス分析装置（ラピッドラボ 348EX，図 5.1）を使用した。pH 測定では、各温度条件の輸液バッグ、輸液回路内から約 5 mL の輸液を採取し、分析装置にかけた。3 種類の輸液製剤において各温度条件の pH 測定を 3 回ずつ行った。また、物理化学的検査項目として粘性の変化も測定した。粘性の測定には、柴田科学の粘度計（粘度計 キャノン・フェンスケ SO No.25 026110-0002，図 5.2）を使用した。



図 5.1 血液ガス分析装置



図 5.2 粘度計

5.3 実験結果

pH の変化

各輸液製剤の pH 測定の平均値を表 5.1 に示す。まず、生理食塩液の pH 測定結果について、室温（25 °C）で保管された温度条件（対照）の輸液バッグ内の輸液の pH は 6.35 であった。事前に加温した輸液バッグを想定した温度条件 40 °C の pH は 6.33 であり、対照の室温保管の温度条件と比較しても pH の大きな変化は見られなかった。輸液回路内の輸液について、屋外気温近くまで冷やされる加温前の輸液の温度を想定した温度条件 0 °C の pH は 6.47 であった。輸液回路を 55 °C で加温した際、回路末端の輸液温の最高温度を想定した温度条件 40 °C の温度条件の pH は 6.47 であった。輸液回路内においては、温度条件 0 °C、40 °C でほぼ等しい値となった。

続いて、酢酸リンゲル液の輸液バッグ内の輸液について、室温（25 °C）では pH が 6.75、温度条件 40 °C では 6.76 という結果であり、ほぼ変化しなかった。輸液回路内の 0 °C、40 °C の温度条件においても pH は 6.76、6.78 と変わらなかった。乳酸リンゲル液に関しても、輸液バッグ内の輸液の pH は、室温（25 °C）と 40 °C で一定の 6.51 であり、輸液回路内の 0 °C、40 °C の温度条件では 6.50、6.56 とほとんど変わらない結果となった。

表 5.1 各輸液製剤の pH 変化 (n=3)

場所	温度条件	pH 測定値 (平均値)		
		生理食塩液 4.5～8.0	酢酸リンゲル液 6.5～7.5	乳酸リンゲル液 6.0～7.5
輸液 バッグ内	室温 25 °C	6.35	6.75	6.51
	40 °C	6.33	6.76	6.51
輸液 回路内	0 °C	6.47	6.76	6.50
	40 °C	6.47	6.78	6.56

粘性の変化

各輸液製剤の粘性の変化を表 5.2 に示す。生理食塩液では、室温（25℃）で保管された温度条件（対照）の輸液バッグ内の輸液の粘性は 0.86 cSt であった。事前に加温した輸液バッグを想定した温度条件 40℃の粘度は 0.86 cSt であり、粘性の変化は見られなかった。輸液回路内の温度条件 40℃においても粘度は 0.85 cSt であった。輸液回路内 0℃の温度条件では、粘性はもっとも高い 0.97 cSt であった。また、酢酸リンゲル液や乳酸リンゲル液も、同様に輸液回路内の温度条件 0℃において最も高い粘度に変化した。

表 5.2 輸液製剤の粘性の変化

場所	温度条件	粘度[cSt]			
		生理食塩液	酢酸 リンゲル液	乳酸 リンゲル液	水（参考）
輸液 バッグ内	室温 25℃	0.86	0.85	0.86	0.89
	40℃	0.86	0.84	0.86	0.66
輸液 回路内	0℃	0.97	0.96	0.98	1.79
	40℃	0.85	0.85	0.85	0.66

5.4 考察

5.4.1 酸塩基平衡の変動

使用した生理食塩液 500 mL は、加速試験（40 °C，相対湿度 75 %，6 カ月）の結果、通常の市場流通下において 3 年間安定であると記載がある。本実験でも、室内保管の輸液バッグ内の輸液と 40 °C に加温した際の輸液バッグ内の輸液の pH を測定し、pH に大きな変化がないことを改めて確認した。

輸液回路の加温条件では加温範囲を 100 cm に限定し、加温温度は 55 °C と高温である。輸液回路内の輸液は約 0 °C から 40 °C の温度変化が生じる。このような温度変化を想定して pH を測定した結果、0 °C と 40 °C とともに pH の変化はほとんどなかった。回路末端 100 cm を 55 °C で加温しても pH は安定していることが分かった。すべての条件において使用した輸液製剤の pH 範囲（表 2.1）を逸脱していないことを確認した。このことから、低温環境によって冷やされた輸液を 55 °C で加温しても、酸塩基平衡は保たれると考えられる。

5.4.2 粘度の変化

液体の粘度は温度によって変化する。輸液ポンプの流量精度に関する文献では、粘度の高い輸液製剤を短時間、低流量で輸液したときに流量精度を逸脱する割合が高くなる⁵⁻⁴⁾と示されている。一般的に、液体（輸液製剤）の温度が高いと粘度は低く、温度が低いと粘度は高くなる。本実験では、25 °C の室温環境で保管した輸液バッグ内の輸液と 40 °C に加温された輸液、輸液回路を 55 °C で加温した際の輸液回路内の輸液の最高温度を想定した 40 °C の輸液にて粘性の大きな変化は見られなかった。輸液回路内で冷やされる 0 °C の輸液に関しては、ほかの温度条件と比較すると粘度は 0.96～0.98 cSt と高かった。参考とした水よりも温度による粘性の変化は大きくないが、輸液製剤においても温度が高いと粘度は若干高くなり、温度が低いと粘度は高くなった。濃度が高いほど粘度も高くなるブドウ糖

溶液と比較すると、室温 26 °Cにおけるブドウ糖溶液濃度 0 %の粘度は 0.87 cSt、5 %は 0.99 cSt、10 %は 1.13 cSt、20 %は 1.49 cSt であることから⁵⁻⁵⁾、等張液の 5 %ブドウ糖溶液とほぼ同じ程度であり、高濃度のブドウ糖溶液よりも粘度は低いことが分かった。このため、本研究における輸液回路の加温による粘性の変化や流量精度への影響はほとんどないと考えられた。さらに、温度が低下したときの方が粘性の変化がやや大きく表れ、粘度が高くなったことから、輸液回路の加温により輸液の温度低下を防止することで、より安定した流量を確保できると考えられる。

6. 救急現場で使用可能な輸液回路の加温装置の開発

6.1 序論

ここまで、低温環境における輸液の温度低下防止の基礎検討として、輸液回路の加温の検討について述べてきた。本研究にて初めて、屋外などの低温の救急現場を想定した際の輸液の温度低下防止に必要な加温条件を具体的に明らかにした。輸液の温度低下に対する加温の効果を検討するため、ここまで 100V の商用交流電源に接続して使用するチューブカバーヒータを用い、加温温度が一定になるように交流電圧調整器で調整していた。しかし、実際の救急現場は商用交流電源からの電力供給が難しい場面が多く、加温方法は制限される。また、屋外などの救急現場で加温することを想定すると、輸液の温度を目標温度に維持することだけではなく、加温する装置の重量も重要である。ドクターヘリ救命で医師、看護師が救急現場へ向かう際に持参する救急バッグの重さは約 7 kg であり、中には初期治療に必要な器具や薬剤などが入っている。このような非常に重い救急バッグを持ち、救急現場の患者のもとへいち早く駆けつけなければならない。救急医療における持ち出し用の救急バッグや物品に関する重量の規定はないが、輸液回路を加温するための道具や装置は小型・軽量であり、可搬性に優れていることが望ましい。現存する室内用の小型輸液加温装置アニメックの重量が 800 g であるため、加温するための方法または装置として 800 g よりも軽量なものを目指すこととした。

本章では、ここまでの基礎検討にて明らかにした加温条件を実際の臨床現場で利用できる輸液回路の加温装置の開発を試みた。

6.2 開発した加温装置

6.2.1 電熱線ヒータ

加温装置の熱源には電熱線ヒータを使用した。事前の予備実験では、電気を使用せずに化学反応で熱を発生させる方法についても検討した。例えば、カイロなどで知られている鉄と酸素の反応や、災害時に食料などを加温するために利用されている生石灰と水の反応などが考えられた。このような化学反応による熱源は身近で入手しやすく、温めるための操作も容易であると考えられた。そこで、屋外気温 0 °C における発熱効果を確認したところ、加温温度が安定せず、制御も困難であった。さらに生石灰においては熱の発生に水が必要であるため、軽量化が難しい可能性が考えられた。

以上の予備実験を踏まえて、熱源は USB 給電が可能な電熱線ヒータを使用した。加工のしやすさや軽さなどを考慮し、ヒータパッド (Yosoo、図 6.1) を選定した。ヒータパッドの仕様を表 6.1 に示す。一般的には冬の通学や通勤、アウトドアの際に体の一部を温めるなどの用途で使用する。ヒータパッドは 5 枚に分かれており、熱源である繊維状のカーボンファイバーがポリエステル素材の柔らかな布に縫い付けられている。1 枚の大きさは 8 cm×12 cm で、熱源のカーボンファイバーは約 5 cm×10 cm の範囲内にあった。加温装置として使用する際には、余分なポリエステル部分を切り取った。加温範囲は回路末端の 100 cm であるため、ヒータパッドを 2 つ (合計 10 枚) つなぎ合わせて使用した。加温温度は、約 31 °C～55 °C 内で 3 段階の温度調節が可能であり、本加温装置では最も高い温度設定の約 55 °C で使用した。



図 6.1 ヒータパッド

表 6.1 ヒータパッドの仕様

電熱線	カーボンファイバー
パッドの材質	ポリエステル
寸法 (cm)	8 × 12
重量 (kg)	0.05
電力量 (W)	8
入力	5V=2A 以上
温度調節	3 段階
加温温度 (°C)	約 31～55

6.2.2 モバイルバッテリー

ヒータパッドは USB 給電が可能であるため、電源としてモバイルバッテリー（PowerCore Essential 20000, ANKER、図 6.2）を使用した。ヒータパッドを 2 つ使用するため、出力用の USB ポートが 2 つあるものを選んだ。

航空法第八十六条には、“爆発性又は易燃性を有する物件その他人に危害を与え、又は他の物件を損傷するおそれのある物件で国土交通省令で定めるものは、航空機で輸送してはならない。”とある。リチウムイオン電池内臓のモバイルバッテリーについても航空機への持ち込みに関する制限があり、ワット時定格量 100 Wh 以下のものは個数制限なし、100 Wh 以上 160 Wh 以下のものは 2 個まで、160 Wh 以上のものは持ち込み不可⁶⁻¹⁾である。本実験で使用したモバイルバッテリーはワット時定格量が 72 Wh であり、ドクターヘリ内への持ち込みが可能なものとした。 その他、モバイルバッテリーの商品仕様については表 6.2 に記載した。



図 6.2 モバイルバッテリー

表 6.2 モバイルバッテリーの仕様（Anker ホームページより抜粋）

サイズ（mm）	約 158 × 74 × 19
重さ（g）	約 343
入力	5 V =2 A
出力	5 V=3 A (各ポート最大 2.4 A)
バッテリー容量（mAh）	20000
動作温度（℃）	約 0～40

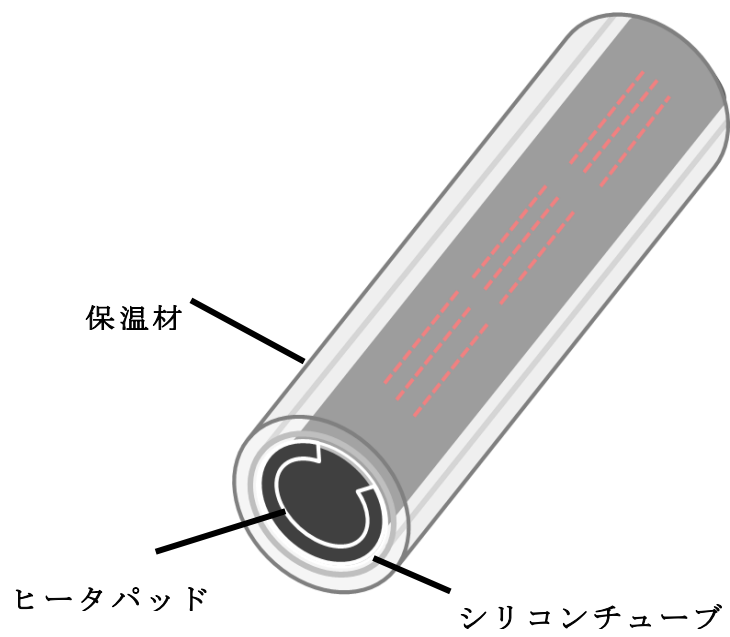
6.2.3 加温装置の構造

加温装置の構造は、小動物用の輸液加温器「F-CARE」(以下 F-CARE、図 6.3)を参考とした。F-CARE は、電熱ヒータを内蔵した Warming Profile を採用している。この Warming Profile にはシリコン素材が使用されており、程良いしなやかさが確保されつつ、輸液チューブの折れやキンク予防も考慮されている。

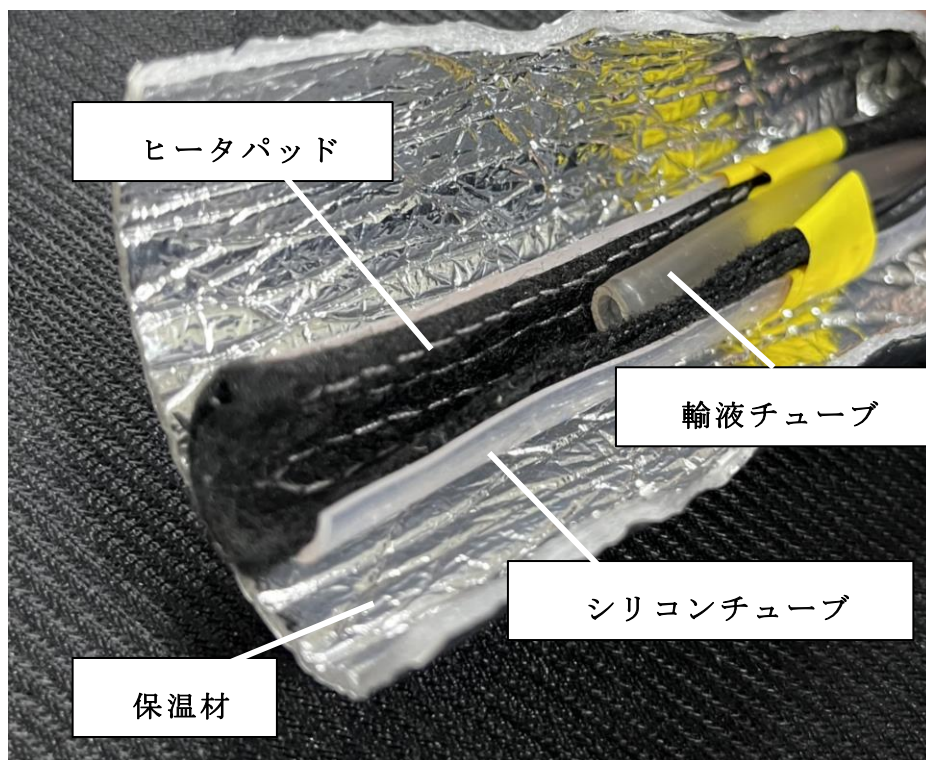
本研究で開発した加温装置を図 6.4 に示す。F-CARE を参考に、加温装置の熱源となるヒータパッドはシリコンチューブの内部に沿わせて、輸液チューブを包み込む構造とした。しかし、ヒータパッドとシリコンチューブの 2 層構造の加温装置を屋外気温 0 °C の低温環境で使用したところ、ヒータパッドは 55 °C まで加温されなかった。そのため、2 層目のシリコンチューブをさらに保温シート（アルミ蒸着フィルムと発泡ポリエチレン）で覆い、低温環境における使用を想定した際のヒータパッドの熱損失を最小限にした。開発した加温装置の重量は、50 g のヒータパッド 2 つ、シリコンチューブ 100 cm、保温シート 100 cm を合わせて約 130 g となり、軽量化を達成した。



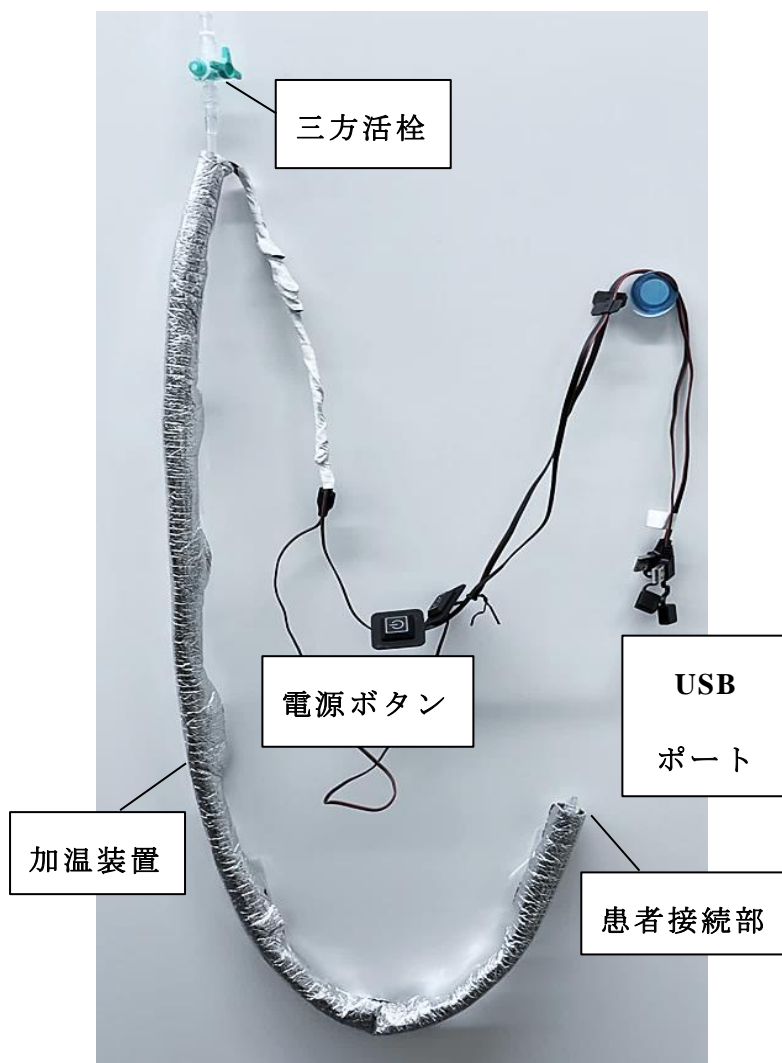
図 6.3 輸液加温器 F-CARE の Warming Profile



(a) 構造図



(b) 内部の実際の写真



(c) 輸液回路に装着した写真

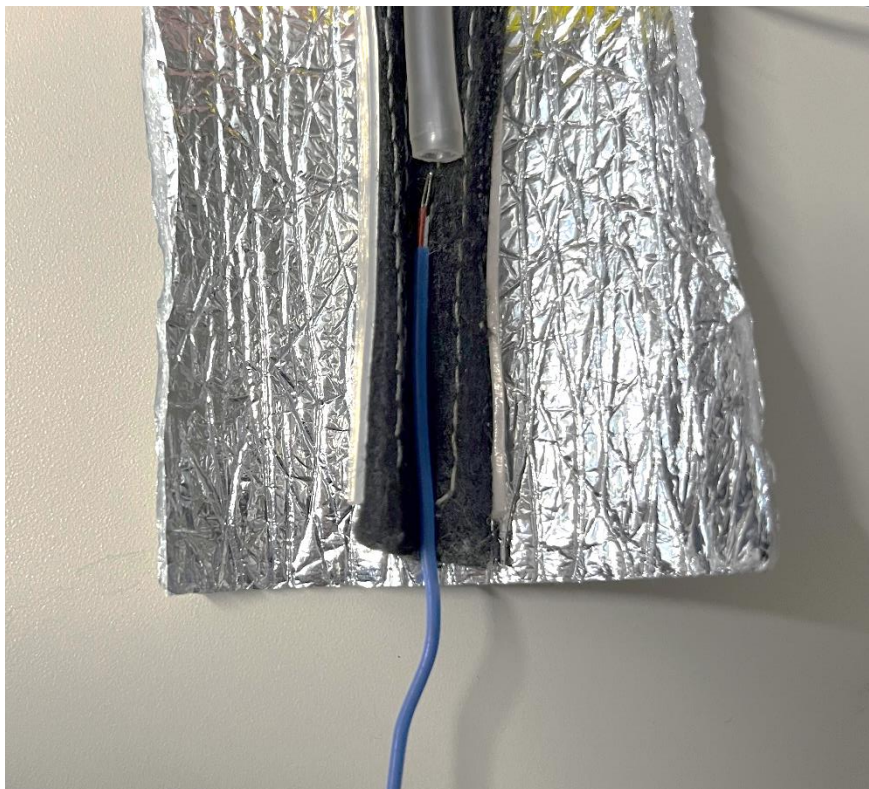
図 6.4 開発した加温装置

6.3 実験方法

本実験では 4.5.4 項と同様の輸液回路を使用し、実際の救急現場に近づけるため輸液ポンプは使用しなかった。輸液流量は落差により調整し、ローラクレンメの操作により微調整した。実験環境は 2.2.2 項の恒温室にて実験を行った。実験条件は、2.2.3 項で述べた基本条件とし、屋外気温は基本条件の 0 °C、輸液は事前に約 40 °C に加温した生理食塩液 (500 mL)、輸液流量 200 mL/h (落差約 8 cm)、輸液回路の長さ 300 cm とした。輸液時間は 10 分間で輸液開始直後 (0 分) から 1 分毎に輸液の温度を測定した。また、開発した加温装置は回路末端の 100 cm に装着したため、加温前温度は三方活栓上流側で測定した。加温温度はヒータパッド内部に熱電対を留置して測定し、さらに輸液回路のチューブとヒータパッドの接触面にも熱電対を留置することで、接触温度を追加で測定した (図 6.5)。



(a) 加温温度の測定：ヒータパッド内部に留置した熱電対



(b) 接触温度の測定：ヒータパッドと輸液回路の接触面に留置した熱電対

図 6.5 加温温度と接触温度の測定箇所

6.4 実験結果

開発した加温装置を使用し、輸液回路を加温した結果を図 6.6 に示す。また、加温温度と接触温度、輸液温については加温能力と加温効果を確認するため、4.3 項、4.4 項の加温範囲が回路末端 100 cm、加温温度 55 °C の基礎検討の結果と比較する（図 6.7）。

図 6.6 より、開発した加温装置の加温温度は輸液開始直後（0 分）で 54.5 °C であり加温条件を満たしているが、時間経過とともに低下し、10 分後には 46.9 °C まで低下していた。本実験から測定箇所として追加した接触温度については輸液開始直後（0 分）で 46.0 °C であり、加温温度同様 10 分後には 37.1 °C まで低下した。加温された輸液温は、輸液開始直後（0 分）で 34.4 °C であり、3 分経過時に最高温度の 36.2 °C まで加温されたが、10 分後には 27.1 °C まで低下した。目標温度の 34 °C 以上を維持したのは 4 分間程度であった。

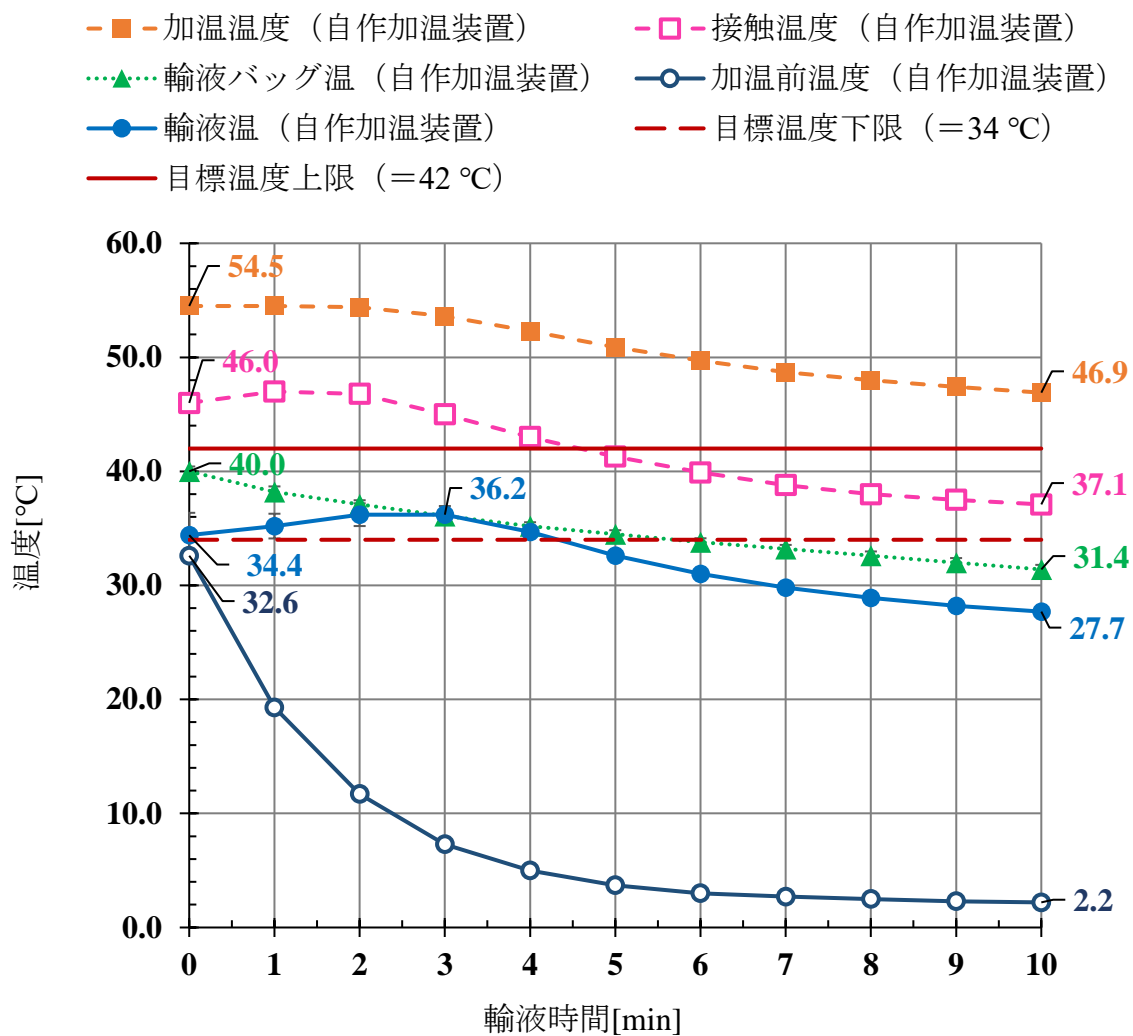


図 6.6 開発した加温装置による輸液の温度低下防止の効果（n=3）

図 6.7 にて輸液回路の加温の基礎検討で得られた結果と比較する。開発した加温装置の加温温度は 10 分後、基礎検討よりも 8.6 °C 低下していた。加温温度が低下したため、回路末端の輸液温も温まりにくく、最高温度は 3.8 °C、10 分後の温度は 5.4 °C 低い結果となった。10 分間で加温温度が低下したことと、接触温度が輸液開始直後（0 分）ですでに 46.0 °C であったことから、想定していた加温能力よりも低かった。低温な屋外気温環境であることと輸液回路内の輸液の温度低下などが要因として挙げられたが、モバイルバッテリーからの電力供給も加温能力に影響していると考えられた。出力のポート合わせて 5 V=3 A の出力が得られるモバイルバッテリーを使用することで、電流値はそれぞれ 1.5 A ずつしか流れていない可能性がある。そこで、各ヒータパッドに 5 V=2 A 以上の出力ポートに繋ぐため、2 台のモバイルバッテリーを使用して追加実験を行った。

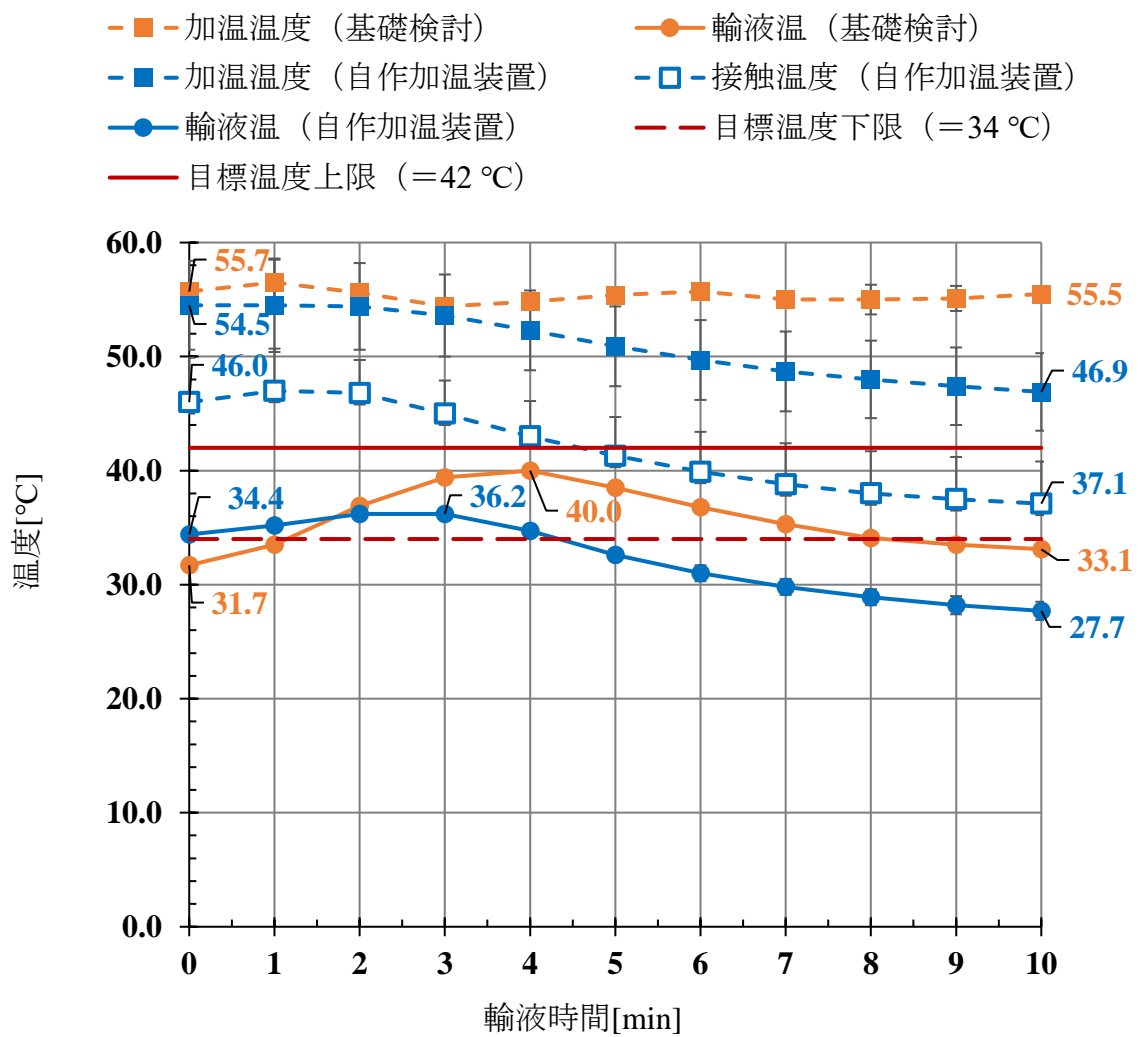


図 6.7 開発した加温装置と基礎検討の比較

追加実験の結果を図 6.8 に示す。各ヒータパッドを出力 $5V=2.4A$ のモバイルバッテリーに接続して輸液回路を加熱した結果、接触温度が輸液開始直後（0 分）で $52.6^{\circ}C$ となった。加熱能力は十分確保されていたため、回路末端の輸液温は輸液開始直後（0 分）で $34.5^{\circ}C$ 、3 分経過時に最高温度の $40.9^{\circ}C$ まで加熱され、10 分後には $31.3^{\circ}C$ まで低下した。0 分から 7 分経過時まで目標とした $34^{\circ}C$ 以上を維持し、開発した加熱装置においても基礎検討と同様の加熱効果が得られた。

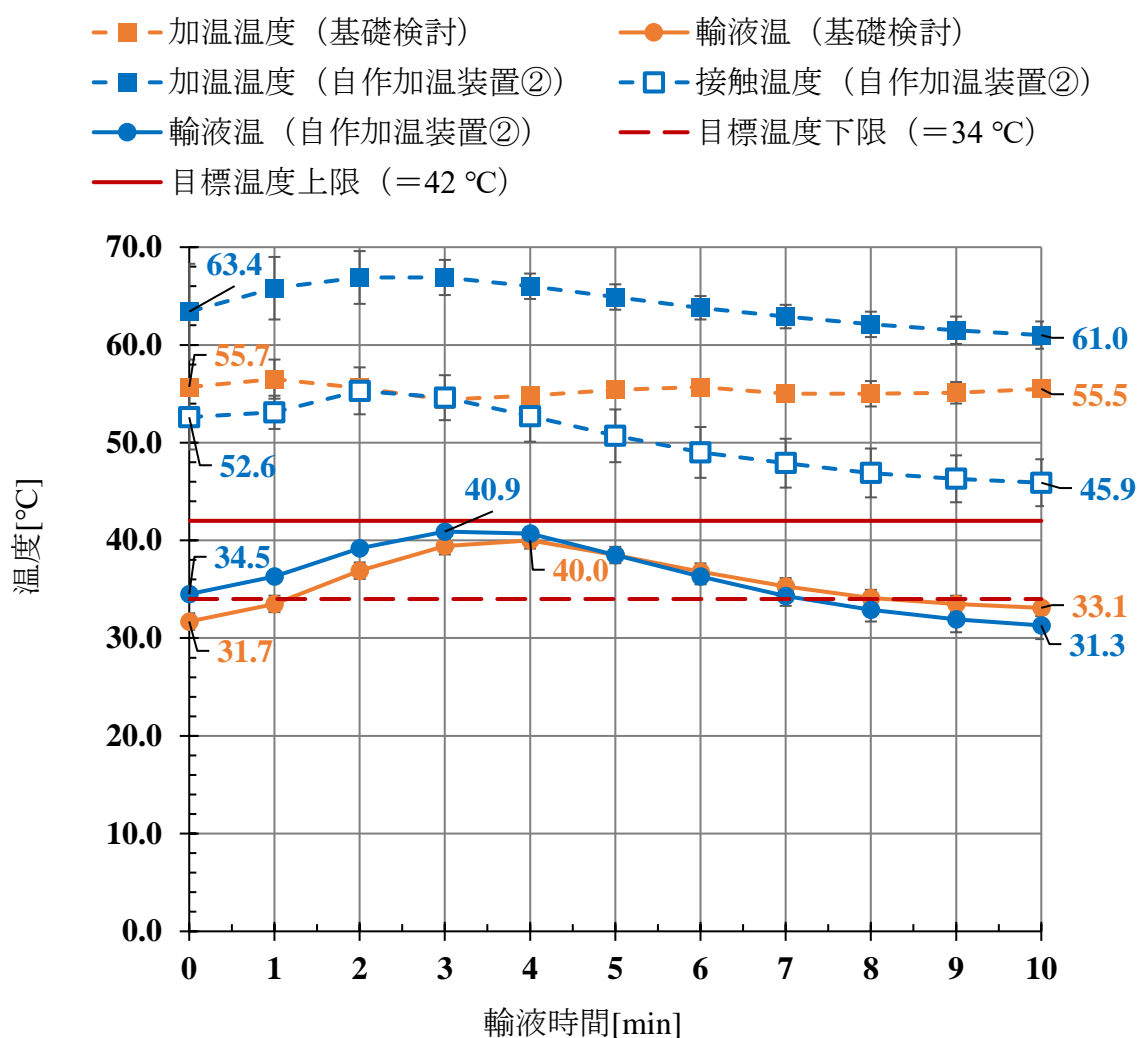


図 6.8 開発した加熱装置と基礎実験の比較②

6.5 考察

開発した加温装置において加温温度が低下したため、輸液温も十分な加温効果が得られなかった。これは、加温前温度の急激な温度低下によるものであると考えられる。輸液開始直後（0分）では、30℃以上の輸液が加温範囲内を流れているが、時間が経過するにつれて屋外気温によって冷やされた輸液を加温しなければならない。加温前温度の低下により輸液回路も冷やされてしまい、さらに接触温度が低下している結果から、輸液回路と接しているヒータパッドの熱が奪われてしまっていると考えられた。

そもそも、接触温度が輸液開始直後（0分）で46.0℃であることから、ヒータパッドが十分に温まっていない可能性も考えられた。本実験では2つのUSBポートを有するモバイルバッテリーを使用した。同時使用時の出力は5V=3Aであり、各ポートからの電力供給は、1つのポートのみを使用したときよりも少ない。このことから、2つのヒータパッドが5V=2A以上の電力供給を得られるよう、別のモバイルバッテリーに接続することで、ヒータパッドが本来の加温能力を発揮すると考えられた。そのため、追加実験として各ヒータパッドをそれぞれモバイルバッテリーに接続した条件で輸液回路を加温した。追加で使用したモバイルバッテリーは、出力5V=2.4Aであった。その結果、輸液回路が実際に接している接触温度が加温条件の55℃に近い52.6℃まで加温され、回路末端の輸液温についてもより長い時間、目標温度34℃以上かつ42℃以下に加温された。

加温装置の総重量は、加温装置本体と2台のモバイルバッテリーを含めて約656gであった。当初、1台のみの使用を想定していたため、やや重さがあっても出力ポートが2つあり、バッテリー容量の高いものとして図6.2を選択した。使用するモバイルバッテリーを軽いものに変えることで軽量化は容易である。例えば、追加実験で使用したモバイルバッテリーを2台使用しても、総重量が

496 g まで軽量になった。また、2 つの出力ポートを有しており、同時使用時の出力がそれぞれ $5\text{ V}=2\text{ A}$ 以上のモバイルバッテリーを選択することで、さらなる軽量化が期待できる。このことから、本実験にて、現存する小型の輸液加温装置よりもはるかに軽く、屋外でも使用可能な新たな加温装置が実現した。

ただし、接触温度は時間経過とともに低下する傾向にあり、輸液温も低下する傾向がみられた。作製した加温装置の接触温度を $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ に維持することが今後の課題であると考えられる。

また、屋外で輸液を行う可能性として、災害医療などが考えられる。例えば、地震が発生した際、倒壊した家屋や運転中の車内に閉じ込められてしまった場合、救助に時間を要する。そして交通事故と比べて負傷者が多数発生することや、土砂崩れなどにより搬送方法も制限されることから、すぐに搬送されないことが考えられる。そのような場合は屋外でやむを得ず初期治療として輸液を開始することが考えられる。救急現場同様、冬季においては低温環境が想定され、電源供給なども難しい状況が想定される。このような災害医療においても、開発した加温装置の使用は可能であり、災害現場における外傷患者の低体温助長の予防にも有効な手段のひとつであると考えられた。

7. 結論

本研究では、これまで検討されることがない低温環境における輸液の温度低下の防止策を検討するため、まず患者に流入する直前（輸液回路の末端）の輸液の温度低下を初めて解明した。次に輸液の温度低下により低体温助長の可能性が考えられたため、輸液の温度低下防止策の検討を行った。低温環境における輸液の温度防止のための加温条件を初めて明らかにした。また、救急現場で使用可能な加温装置の開発を行い、臨床応用の可能性を検討した。

以下に得られた結果を総括し、結論を述べる。

- ① 低温環境において輸液を行うと、輸液回路内にて冷却され、屋外気温に近づくように輸液の温度は低下することが明らかとなった。
- ② 輸液バッグや輸液回路の保温を行った結果、事前に加温した輸液バッグの温度のみを維持しても、患者に投与される直前の回路末端の輸液温は容易に低下することから、輸液回路への対策が必要であることが分かった。輸液回路の保温では、輸液の温度低下抑制の効果はあったものの、低体温予防のための目標温度 34 °C 以上は維持できなかった。
- ③ 輸液回路の加温の基礎的検討より、回路末端 100 cm を 55 °C で加温することで、目標温度を維持できることを明らかにした。また、この加温条件による輸液性状変化はなかった。
- ④ 輸液回路の加温装置を開発し、屋外を想定した救急現場において輸液の温度低下を防止できることを示した。

本研究で、低温環境における輸液の温度低下を詳細に解明し、得られた知見より輸液の温度低下防止のための加温条件を明らかにした。これらは外傷患者の低

体温予防のための適切な輸液の温度管理のための重要な知見であると考えられる。また、本研究にて開発した加温装置は、プレホスピタル診療における外傷患者の低体温助長の予防に有効なひとつの方法であると考えられる。今後、接触温度の安定化や実際の救急現場で使用する際の安全性などの評価を行い、実用化に向けた検討を進めていく必要がある。

本研究は、プレホスピタル診療においてより多くの外傷患者を救うことにつながる知見であるとともに、災害医療などの制限のある環境において、外傷患者の低体温の予防にも貢献できると考えられる。

参考文献

- 1-1) 益子邦洋, 平成 17 年度厚生労働科学研究・分担研究「ドクターヘリの実態と評価に関する研究」,
<https://mhlwgrants.niph.go.jp/system/files/2003/000270/200301005A/200301005A0006.pdf> (2023 年 11 月 30 日閲覧)
- 1-2) 小林國男, “好きになる救急医学 第 3 版”, 株式会社講談社, 2016 年 3 月発行
- 1-3) 地域医療推進局地域医療課 救急医療専門委員会: ドクターヘリの運航状況等について, [【資料 6】R2 ドクヘリ運航実績\(修正後\).pdf \(hokkaido.lg.jp\)](#) (2023 年 11 月 30 日閲覧)
- 1-4) 猪口貞樹, “厚生労働科学研究「ドクターヘリの適正配置・利用に関する研究」
- 1-5) 手稲溪仁会病院, 出動について,
https://www.keijinkai.com/teine/about/doctor_heli/marching/ (2023 年 11 月 30 日閲覧)
- 1-6) 道央ドクターヘリ運航調整委員会, 2021 年度(令和 3 年度)道央ドクターヘリ運航実績報告書,
https://www.keijinkai.com/teine/wpadmin/wp-content/uploads/2023/02/2021_Doctor-Heli.pdf (2023 年 12 月 1 日閲覧)
- 1-7) 島崎修次、救命救急センターにおける避け得た外傷死の実態とその要因調査のための研究、2005.4
- 1-8) 遠藤彰, 白石淳, 本藤憲一, 大友康裕: 我が国の 11 年間の外傷診療成績の検討 (JTDB における PTD 症例数の推移から), 日外傷会誌, 30(2), p.127, 2016.
- 1-9) 日本外傷学会外傷初期診療ガイドライン改訂第 6 版編集委員会, 外傷初期診療ガイドライン: JATEC, へるす出版, 東京, 2021

- 1-10) 日本救急医学会，医学用語解説集「致死の3徴」，
<https://www.jaam.jp/dictionary/dictionary/word/0121.html>（2023年12月7日閲覧）
- 1-11) 佐藤武揚：多発外傷患者の輸液管理，救急・集中治療，33(2)，p.617，2021.
- 1-12) Frischknecht A, Lustenberger T, Bukur M, Turina M, Billeter A, Mica L, Keel M: Damage control in severely injured trauma patients - A ten-year experience. J Emerg Trauma Shock. 4(4), pp.450–454, 2011.
- 1-13) Sage-Rockoff A, Schubert FD, Ciardiello A, Douglas E: Improving Thermoregulation for Trauma Patients in the Emergency Department: An Evidence-Based Practice Project. J Trauma Nurs. 25(1), pp.14–20, 2018.
- 1-14) Hsieh TM, Kuo PJ, Hsu SY, Chien PC, Hsieh HY, Hsieh CH: Effect of Hypothermia in the Emergency Department on the Outcome of Trauma Patients: A Cross-Sectional Analysis. Int J Environ Res Public Health 15(8), p.1769, 2018.
- 1-15) Balmer JC, Hieb N, Daley BJ, Many HR, Heidel E, Rowe S, McKnight CL: Continued Relevance of Initial Temperature Measurement in Trauma Patients. Am Surg. 88(3), pp.424–428, 2022.
- 1-16) Van Veelen MJ, Brodmann Maeder M: Hypothermia in Trauma. Int J Environ Res Public Health 18(16), p.8719, 2021.
- 1-17) Frédéric Lapostolle, Jean Luc Sebbah, James Couvreur 他: Risk factors for onset of hypothermia in trauma victims : The HypoTraum study, Critical Care (Open Access) , 2012.
- 1-18) Sessler DI: Perioperative thermoregulation and heat balance. Ann NY Acad Sci, 813, pp.757-777, 1997.

- 1-19) Cassidy ES, Adkins CR, Rayl JH, Wipfler EJ: Evaluation of warmed intravenous fluids in the prehospital setting. *Air Med J.* 20(5), pp.25–26, 2001.
- 2-1) Bickell WH, Wall MJ Jr, Pepe PE, Martin RR, Ginger VF, Allen MK, Mattox KL: Immediate versus delayed fluid resuscitation for hypotensive patients with penetrating torso injuries. *N Engl J Med.* 331(17), pp.1105–1109, 1994.
- 2-2) 一般社団法人 日本機械学会, 機械工学辞典「冷却速度」, <https://www.jsme.or.jp/jsme-medwiki/doku.php?id=10:1013597> (2023 年 12 月 7 日閲覧)
- 2-3) Blumenberg A, Dosing Heat: Expected Core Temperature Change with Warmed or Cooled Intravenous Fluids. *Ther Hypothermia Temp Manag.* 11(4), pp.223-229, 2021.12
- 2-4) Peng RY, Bongard FS, Hypothermia in trauma patients. *J Am Coll Surg.* 188(6), pp.685–696, 1999.
- 2-5) Utoh J, Harasaki H: Damage to erythrocytes from long-term heat stress. *Clin Sci.* 82(1), pp.9–11, 1992.
- 2-6) Kruskall MS, Pacini DG, Malynn ER, Button LN: Evaluation of a blood warmer that uses a 40 °C heat exchanger. *Transfusion* 30(1), pp.7–10, 1990.
- 4-1) 小松康宏, 西崎祐史, 津川友介, “改訂第 2 版 シチュエーションで学ぶ 輸液 レッスン”, 株式会社メジカルビュー社, 2016 年 6 月発行

- 5-1) 上村修二,“平成 29 年度一般財団法人救急振興財団調査研究助成事業「寒冷地での病院前輸液保温の実態と輸液温に関する研究」, <https://fasd.jp/files/libs/707/201803231445286298.pdf> (2023 年 12 月 26 日閲覧)
- 5-2) 名徳倫明, 輸液製剤の特徴から見た輸液ライン管理のあり方～輸液ライン管理における医薬品に関連した諸問題とその対策～, 静脈経腸栄養, 29(2), pp.31-38, 2014
- 5-3) 中村均, 坂口美佐, 井上純子:輸液配合変化のリスク・マネジメント, 外科と代謝・栄養, 51(5), pp.235-245, 2017
- 5-4) 吉田 浩二, 福崎 誠, 佐藤 誠: 滴数制御型輸液ポンプでのカテコラミン製剤投与における流量誤差の検証, Japanese journal of occupational medicine and traumatology, 59 (4), pp.189-192, 2011.
- 5-5) 大村知子, 藤澤浩美, 室 親明, 山下典子, 黒田訓宏: 輸液ポンプ使用時のパクリタキセル注射溶液の点滴速度に影響する要因について, Jpn. J. Pharm. Health Care Sci. 34(5) , pp.467-473, 2008.
- 6-1) 国土交通省, 機内持ち込み・お預け手荷物における危険物の代表例, <https://www.mlit.go.jp/common/001425421.pdf> (2023 年 11 月 28 日閲覧)

謝辞

本学 保健医療学部 臨床工学科の菅原 俊継 准教授におかれましては、学部 4 年次、修士課程そして博士課程にて研究を進めるにあたり、ご指導、ご鞭撻を賜りました。また、研究に限らず大学院生活において様々なことに挑戦する機会を頂いたこと、公私ともに数多くの懇切丁寧な御指導を頂いたことに深く感謝申し上げます。また、本論文の作成にあたり、主査である本学 保健医療学部 臨床工学科 清水 久恵 教授、副査である本学 保健医療学部 診療放射線学科 八重樫 祐司 教授、そして博士課程進学時からご指導を頂きました本学 保健医療学部 診療放射線学科 真田 哲也 教授には、査読や発表練習において熱心なご指摘やご鞭撻を賜り、ここに深く感謝申し上げます。

また、大学院講義などにおいて数多くのご指導を頂きました本学 保健医療学研究科保健医療学専攻の教員の皆様、合同ゼミ等で日頃より本研究に関して多くのご助言を頂きました本学 保健医療学部 臨床工学科の教員の皆様に改めて感謝を申し上げます。

また、当専攻の諸先輩、同期の皆様には、大学院講義や論文執筆に際し、多くのアドバイスや励ましのお言葉をいただき、心より感謝申し上げます。さらに、日々の研究にご協力頂きました本学 保健医療学研究科 医療技術学専攻の皆様ならびに菅原ゼミの学部生の皆様には、心より御礼申し上げます。

そして、共同研究者として多大なご助言やご配慮頂きました手稲溪仁会病院救命救急センター医師の大西新介様、フライトナースの皆様には心から感謝を申し上げます。

最後に、9 年間の大学、大学院生活において日々支えてくれた両親、家族に心から感謝いたします。

2024 年 3 月 堀田 蛍

業績

査読付き原著論文

1. 堀田 蛍, 菅原 俊継, 大西 新介, 一宮 なぎさ, 外村 幸孝, 千葉 美里 : 低温環境における輸液の温度低下に影響する条件の検討, 日本航空医療学会雑誌, 22(3) , 3-10, 2021
2. Hotaru Horita, Toshitsugu Sugawara, Hisae O. Shimizu, Shinsuke Onishi : Investigation of Heating Temperatures of Infusion Solutions and Heating Effects in Cold Environments. Advanced Biomedical Engineering (in press)

研究会

1. 堀田 蛍, 菅原 俊継, 木村 主幸, 清水 久恵, 山下 政司, ”低温環境における輸液温の変化－輸液回路の保温の効果について－” 電子情報通信学会 ME とバイオサイバネティクス研究会, 鹿児島（オンライン開催）, 2021.1
2. 堀田 蛍, 菅原 俊継, 清水 久恵, 大西 新介: 低温環境における輸液の温度低下防止策の検討－輸液バッグの温度維持と輸液回路の保温材の検討－, 電子情報通信学会 ME とバイオサイバネティクス研究会, 沖縄（オンライン開催）, 2022.1
3. 堀田 蛍, 菅原 俊継, 清水 久恵, 大西 新介: 低温環境における輸液の温度低下防止策の検討－輸液回路の加温の範囲について－, 電子情報通信学会 ME とバイオサイバネティクス研究会, 北海道（オンライン開催）, 2022.6
4. 堀田 蛍, 菅原 俊継, 清水 久恵, 大西 新介: 低温環境における輸液回路の加温と輸液の性状変化について, 電子情報通信学会 ME とバイオサイバネティクス研究会, 宮城, 2023.10

学会発表

1. 堀田 蛭, 菅原 俊継, 大西 新介, 清水 久恵, 山下 政司, “低温環境下での輸液温の変化,” 第 58 回日本生体医工学会北海道支部大会, 北海道, 2019.10
2. 堀田 蛭, 菅原 俊継, 大西 新介, 清水 久恵, 山下 政司, “低温環境下での輸液温の変化ー生理食塩水と酢酸リンゲル液の違いー,” 第 59 回日本生体医工学会全国大会, 岡山（オンライン開催）, 2020.5
3. 堀田 蛭, 菅原 俊継, 大西 新介, 一宮 なぎさ, 外村 幸孝, 千葉 美里, “低温環境下における輸液温の低下に影響する条件の検討”第 27 回日本航空医療学会総会, 静岡（オンライン開催）, 2020.12
4. 堀田 蛭, 菅原 俊継, 大西 新介, 山下 政司, 清水 久恵: 低温環境下での輸液温の変化 3ー輸液回路内の各箇所測定した輸液の温度についてー, 第 60 回日本生体医工学会全国大会, 京都（オンライン開催）, 2021.6
5. 堀田 蛭, 大西 新介, 清水 久恵, 真田 哲也, 菅原 俊継: 低温環境における輸液の温度低下防止策の検討ー輸液バッグの保温と初期温度の上昇ー, 第 60 回日本生体医工学会北海道支部大会, 北海道（オンライン開催）, 2021.10
6. 堀田 蛭, 菅原 俊継, 清水 久恵, 大西 新介: 低温環境における輸液の温度低下防止策の検討ー輸液回路の加温の効果ー, 第 61 回日本生体医工学会全国大会, 新潟, 2022.6
7. 堀田 蛭, 菅原 俊継, 大西 新介, 一宮 なぎさ, 外村 幸孝, 千葉 美里: 低温環境において急速輸液を想定した際の輸液回路の加温の効果, 第 29 回日本航空医療学会総会, 鳥取（オンライン開催）, 2022.12

8. Hotaru Horita, Toshitsugu Sugawara, Hisae O. Shimizu, Shinsuke Onishi:
Elucidation of Heating Temperature Conditions of Infusion in Cold Environments
and Possibilities for Clinical Application, 生体医工学シンポジウム 2023, 熊本,
2023.9

受賞

1. 第 58 回日本生体医工学会北海道支部大会・北海道支部研究奨励賞, 2019.10