

# ヘリコプタホイスト活動中における回転現象の科学的 解明及び回転制御技量の確立

神戸市消防局（兵庫県） 岩倉 徹

## 1 回転現象の現状と課題

回転現象とは、ホイスト活動中に回転翼から発生するダウンウォッシュの影響を受け、救助隊員がホイストフックのスイベルを支点に回転することや、円錐状に回転することを指し、航空救助活動では代表的な危険因子といえる。懸念すべきは、回転現象が稀に想像を超える高速回転に発展することである。そのため、回転現象の予兆が発生すれば、回転制御手技（以下「制御手技」とする。）を行って直ちに停止させなければならない。以下の内容は、高速回転に起因する代表的な危険因子の一例である。

### □ 高速回転から起因する危険因子

- ・ 激しい遠心力による要救助者の容態悪化及び障害物への強い接触
- ・ 救助隊員の平衡感覚の喪失及び周囲の監視能力の欠落
- ・ スキッドへの激しい横ずれによるホイストケーブル（4 mm）の剪断
- ・ 間違った制御手技による回転速度の助長

本研究に伴い日本全国の航空消防隊の救助隊員総勢477名を対象にアンケートを実施した。資料1はアンケートの集約結果である。アンケートによると、回転現象を経験した救助隊員は、回答者388名中、364名が該当し、その内144名が回転現象に伴うヒヤリハットを経験したと回答している。特筆すべきは、ヒヤリハット経験者が全救助隊員の30%と高いことである。当隊の調べによると、2019年にアメリカ・アリゾナ州において、吊り上げ救出中の担架が高速回転した事案がある。この事案では、要救助者の容態が悪化しており、救助機関に対して、高額な損害賠償請求が発生している。さらに、制御手技習得方法の項目では、多くの救助隊員が「個人の経験則で回転を制御している」と回答している。制御手技は、ダウンウォッシュの力を利用した高度な技術であるため、この回答結果には共感できる。しかしながら、前述したヒヤリハット経験者の割合を考慮すると、経験則から

得た制御手技が、回転現象に対して必ずしも効果的に作用しているとはいえない。また、一般的に救助隊員には任期があるため、経験則から得られる技量には限界があり、技量の差が生じる。

以上のことから、本研究では、回転現象に関する根本原因を解明し、誰もが理論に基づいた制御手技を習熟できることを目標にしている。

## 2 研究の進め方

本研究を進めるためには、ダウンウォッシュによる「流体力学」の分野と、その力が回転現象に起因する「動力学」の分野について、それらの知識を正しく理解すること、及び専門的な実験ができる設備が必要である。そこで、当隊では、防衛大学校及び大阪大学と協力体制を築き研究を進めた。

なお、本研究の過程では、ヘリコプタを使用した実機検証を実施している。当然のことながら、実機を用いた検証は、想定外の事象が発生した場合、重大な事故に繋がる危険性が高い。そのため、科学的根拠に基づき根本原因を解明させた上で、(図1)の風洞実験装置と回転模型を用いて、理論どおりの現象を発生させることで、実機検証前の安全性を立証している。

## 3 ダウンウォッシュに関する共通概念

### (1) BK117のダウンウォッシュの風速と他機との差異

(図2)(a)(b)は、防衛大学校がヘリコプタのダウンウォッシュについて、神戸市消防局が保有するBK117に相当する条件で、CFD(Computational Fluid Dynamics)解析した結果である。(図2)(a)がダウンウォッシュの強さをロータ中心からの水平方向の距離に応じて示したものである。この結果を、ロータとの位置関係が理解しやすいように、胴体と同時に示したのが(図2)(b)である。(図2)(b)の距離表示は、ロータ面からの鉛直距離を表している。これらの図から、ダウンウォッシュの最大風速は、ロータ中心から水平方向に約4m付近において約25m/sであることがわかる。

また、(図2)(b)のとおり、救助隊員はロータ中心から約1.7m離れた位置で活動することから、(図2)(a)のグラフを読み取ると、平均して

約 1.3 m/s の風を受ける。

さらに、ダウンウォッシュの風速を、BK 117 と約 2 倍の最大離陸重量を持つ AW 139 で比較し、運動量理論に基づき算出すると、ダウンウォッシュの風速は 10% 程度の差異であった。したがって、日本の官公庁救助機関が使用する中型ヘリコプタ（UH 60、AW 139、H 225、ベル 412、AS 365 等）においても差異は少なく、BK 117 を用いた本研究の成果は他機においても適用可能である。

## (2) ダウンウォッシュの気流成分

(図 3) (a) は防衛大学の CFD 解析によって可視化したダウンウォッシュの風域である。旋回風とは、(図 3) (b) のとおり、螺旋状に吹き降ろす風であり、ロータの回転方向に従って発生している。この旋回速度成分を CFD 解析によって確認したところ、鉛直方向の速度成分に比べ、ダウンウォッシュの全域でその値は極めて小さかった。なお、旋回速度成分とは、(図 3) (c) のとおり、ダウンウォッシュに含まれる水平（旋回）方向の速度成分である。したがって気流の向きは、ほぼ鉛直方向と考えてよく、本研究の成果はロータの回転方向によらず適用可能である。

なお、実機検証において、旋回速度成分が比較的大きくなるロータ直下及びロータ中心付近で、旋回速度成分が回転現象へわずかながら影響することが確認されたものの、研究の成果へ影響を及ぼすものでは無かった。

## (3) 自然風によるダウンウォッシュの風域の変位

横風を受けた場合、(図 4) (a) のとおりダウンウォッシュの風域が変位し、活動中の救助隊員は、ロータの回転中心から約 4 m 離れた位置に相当する最も強いダウンウォッシュの影響を受ける。また、ホイストケーブルに揺れが発生した際も同様である。救助隊員は、回転中心から約 1.7 m 離れた位置で活動するため、片側に約 2.3 m の揺れが発生すれば、(図 4) (b) のとおり、最も強いダウンウォッシュの影響を受ける。

## 4 回転現象の要因分析

### (1) 回転力の発生要因と回転方向

回転現象は、物体が鉛直方向のダウンウォッシュを受け止めることで、回転現象に起因する力を発生させることが要因となる。(図 5) (a) は、大

阪大学の回流水槽実験装置で、斜度を付け設置した平板にダウンウォッシュを模擬した水流を受け止めさせ、流れの変位を可視化したものである。

(図5)(b)は、その様子を作図したものである。この時、平板がダウンウォッシュを受け止める角度を「受風角度」という。

(図5)(c)は、平板が受ける力を図示したものである。この時、平板に対して、おおむね垂直方向に「押される力」が発生する。さらに、「押される力」を分解し、「横向きの力」と「下向きの力」にわけると、回転現象の発生要因は、この時の「横向きの力」であり、この力が指す向きに回転現象や揺れが発生する。以降、「横向きの力」を「回転力」とする。

## (2) 回転力の大小に影響する「受風角度」

回転力の大小は、「受風角度」の変位に従って変化する。これについては、(図6)のSheildahl and Kilmas, 1981の実験結果より明らかにされている。回転力は、「受風角度」が0度から45度付近に向けて徐々に大きくなり、受風角度90度に向けて再び小さくなっている。このことから、「受風角度」のみに焦点を当てると、45度付近が回転力の最大値となる。

## (3) ホイスト活動中の回転軸

回転軸とは、回転する物体の中心を通る軸をいう。つまり、ホイスト活動中の回転軸は、ホイストフックに繋がる救助隊員の命綱及びその延長のホイストケーブルとなる。

## (4) 回転力の大小に影響する「受風面積」と「回転軸からの距離」

「受風面積」とは、直接ダウンウォッシュの影響を受ける物体の表面積である。(図7)(a)は、ラペリング降下する救助隊員を真上から見た図である。この時、ダウンウォッシュの影響を受けるのは、視認できる体の表部分であり、視認できない体の裏部分は「受風面積」といわない。「受風面積」のみに焦点を当てると、「受風面積」が広いほど、回転力が大きくなり、「受風面積」が狭いほど、回転力は小さくなる。

次に、「回転軸からの距離」とは、回転軸と受風面積との位置関係を示し、この位置関係が遠隔であるほど回転力が大きくなる。(図7)(b)はラペリング降下する救助隊員を横から見た図であり、左右の救助隊員を比べると、

左側の救助隊員の下肢が回転軸から遠隔であり、より大きな回転力を発生させることになる。

#### (5) 回転現象の発生要因のまとめ

ホイスト活動中の回転現象は、「受風角度」を付けてダウンウォッシュを受けることで発生し、回転力の指す向きに従って回転している。

例えば、救助隊員が右上肢を横に伸ばし、手のひらを回外させ「受風角度」を付けてダウンウォッシュを受けると、救助隊員は真上から見て、「時計回り」に回転する。この時の回転力の大小は、手のひらの「受風角度」、「受風面積」、「回転軸からの距離」の合成で決定する。

### 5 制御手技の確立

#### (1) 制御手技とは

制御手技とは、回転力が指す向き（時計回り・反時計回り）に対して、救助隊員が、「頭部」、「上肢」、「下肢」等を使用し、逆向きの回転力（制御力）を意図的に生みだし、回転力を相殺させ制御する手技をいう。

本章では、基本的な個人の制御手技について「4章 回転現象の要因分析」に基づき考察する。

#### (2) 模型を使用した風洞実験

風洞実験装置内で、人型模型に（図8）の4種の制御手技をとらせることで、意図した方向に回転現象が発生するのかを検証する。

#### (3) 制御手技の制御力（回転力）の測定

制御力（回転力）は、防衛大学校の6分力計測器で計測している。装置の外観は（図9）(a)のとおりであり、人型模型は救助隊員の10分の1サイズである。なお、人型模型の位置は実機相当でロータ面から鉛直方向に約8m、ロータ中心から水平方向に約1.7m外側としている。

計測結果は、（図9）(b)のとおり、制御力（回転力）が大きい順に「下肢」、「上肢」、「頭部」となる。

#### (4) 制御手技の実機検証

検証方法は、ヘリコプタをホバリング飛行させ、救助隊員を吊り上げる。その後、ダウンウォッシュの影響を強く受ける位置で停止し、5章(2)で考

案した各制御手技で、意図的に回転現象を発生させる。なお、回転現象の継続は、救助隊員に高い負荷が掛かるため、継続時間は10秒とし、その間に計測した回転数を6倍することで、1分間の回転数 (rotations per minute:rpm) を算出し、制御力 (回転力) に置き換える。

検証の結果、各制御手技の1分間の回転数は (表1) のとおりであり、回転数が多い順に「下肢」、「上肢」、「頭部」であった。回転数が多いほど制御力 (回転力) が大きいことを意味しており、これは防衛大学で実施した (図9) の回転力の測定結果と合致する。

#### (5) 制御手技についての考察

回転現象に伴う科学的根拠、模型実験及び実機検証を通して、全ての研究結果が一致しており、制御手技として確立することができる。

(図10) の制御手技は、時計回りの回転力が発生するため、反時計回りの回転現象に対して有効となる。反対に、時計回りの回転現象は、(図10) の制御手技を左右対称にすることで対応することができる。

また、制御手技を行う上で、あらかじめ回転方向が予測できれば、対応が容易となる。次章では、制御手技をより効果的に実施するため、回転方向の予測や原因解明に使用する解析手法について述べる。

### 6 回転現象の解析手法と解析結果から導き出せる制御手技について

#### (1) 回転現象の解析手法

回転現象は、救助隊員の「真上」の画像、「正面」及び「横」の画像から「回転力」を解析することができる。

本章では、解析における基本要素が含まれたラペリング降下を題材とする。

#### (2) 「真上」の画像から解析できる要因

(図11) (a) は、ラペリング降下する救助隊員の「真上」の画像である。次に (図11) (b) は、中央を回転軸とし、十字の点線で①から④に区切った解析図である。(図11) (c) は、それらを組み合わせたものであり、この図から、各区切り内の「回転力」を解析する。

「真上」の画像からは、「受風面積」と「回転軸からの距離」がわかる。「受風面積」は、視認できる範囲が対象であり、「回転軸からの距離」は、

回転軸と「受風面積」の位置関係を計測する。

(3) 「正面」、「横」の画像から解析できる要因

「正面」、「横」の画像からは、「受風角度」がわかる。(図12)(a)は、降下中の救助隊員の「正面」の画像であり、右下を覗き込む姿勢から、「頭部」に顕著な「受風角度」が確認できる。次に、(図12)(b)は、降下中の救助隊員の「横」の画像であり、伸展した「下半身」に顕著な「受風角度」が確認できる。

(4) 回転現象の解析結果

回転現象の解析結果を説明する上で、各区切り内の「回転力」の作用について説明する。(図13)(a)(b)は、「ボルト」を回す「スパナ」を真上から見た図であり、回転軸を「ボルト」、受風する救助隊員を「スパナ」に例える。(図13)(a)のとおり、「スパナ」に対して、矢印の向き(反時計回り)に「回転力」が作用すると、「ボルト」は反時計回りに回る。

しかしながら、(図13)(b)のとおり、回転軸に対して矢印の向きに「回転力」が作用すると、「スパナ」が「ボルト」を押す向きとなり、「ボルト」は回らない。この時、「ボルト」が、宙づりであれば矢印の方向に揺れ動く。

以上を踏まえた上で、(図14)は、6章(2)の解析要因に6章(3)の「回転力」の矢印を挿入したものである。各区切り内の回転方向を解析すると、①は救助隊員に対して左向きに「回転力」の矢印があることから、真上から見て反時計回りに回転現象が発生する。次に②を解析すると、「回転力」の矢印が無いことから、回転要因はない。③及び④は、回転軸に向かって「回転力」の矢印があることから、回転軸を押す向きとなり、回転現象ではなく、横揺れが発生する。このことから、ラペリング降下する救助隊員は、①により反時計回りに回転し、③及び④により横揺れが発生することから、反時計回りに円錐状の回転現象が発生することが明らかとなる。

(5) 解析結果から導き出せる制御手技

ラペリング降下する救助隊員は、反時計回りに円錐状の回転をする。そのため、時計回りの「回転力」を意図的に発生させ、横揺れの要因である下半身の受風角度を抑えることで、回転現象及び横揺れを静止させることが可能である。ラペリング降下中は、降下地点を確認する「頭部」及び制動手である「右手」、姿勢を維持する「左手」が拘束されるため、「右足」を使用し、(図15)(a)(b)のとおり、時計回りの「回転力」を発生させ、

「左足」を真下に下げ受風角度の影響を抑えることで安定したラペリング降下が可能となる。

#### (6) 回転現象の解析結果のまとめ

物体がダウンウォッシュの影響を受けると、常に回転力や横揺れの力が発生している。回転現象や横揺れは、これら発生要因が複数重なり、相殺しあった結果、優位性が残る力に従い発生している。特に、高速化した回転現象では、この関係性が顕著であり、発生要因の解析が容易である。

### 7 おわりに

本論文の内容は、制御手技の基本的な技量である。そして、これらの技量を理解し応用することで、全ての回転現象が制御可能となる。例えば、単純に各制御手技を組み合わせることで、制御能力が上乘せされ、より大きな制御力が発揮できる。また、回転現象の発生要因を意図的に操作しバランスを変えることで、回転力を抑えることも可能となる。当隊では、これら応用的な技量を駆使し、保有する全ての救出手段で回転制御を実機実証している。

さらに、これまでは経験則により技量を習得していたが、教育体制を整えたことで、新規隊員であっても、現役隊員と遜色ない制御手技が実施可能となった。

現在、全国の航空消防隊において、回転現象の公式な研究結果及び教材は存在しない。そのため、本研究の成果を広く普及することで、正しい回転制御技量が標準になることが期待できる。当隊では、各航空隊からの要望もあり、現在までに200名を超える航空救助を担う官公庁（自衛隊、海上保安庁、警察、消防、関係機関）の隊員に回転制御技量の説明や訓練展示を行ってきた。各航空隊に浸透し定着することで、回転現象に伴うヒヤリハットが根絶し、より安全な航空救助活動が実現すると確信している。

本研究に伴い、回転現象映像の提供、及びアンケートに快く協力して下さった多くの航空隊員様に深謝するとともに、これからも日本全国の航空隊、消防組織が安全に活動し、国民のニーズに応じて頂くことを祈念して研究を終える。

参考文献 著者：Sheldahl, Robert E., and Paul C. Klimas. タイトル：Aerodynamic characteristics of seven symmetrical airfoil sections through 180-degree angle of attack for use in aerodynamic analysis of vertical axis wind turbines. 文献管理番号：No. SAND-80-2114. 1981.

共同研究 防衛大学校システム工学群航空宇宙工学科：回転現象の解明（理論考察、CFD 解析、6 分力計測器実験）  
大阪大学基礎工学研究科：回流水槽実験

他機関応募 消防庁消防大学校消防研究センター：令和 7 年消防科学技術賞

(資料1)

## 全国航空消防隊（救助隊員）個人アンケート集計結果

477名中 388名回答 回答率 81.3%

### □ホイスト活動中の回転経験の有無

\* グラフ%は小数点第2位四捨五入

①経験有	364名
②経験無し	24名



■ ①93.8% ■ ②6.2%

### □回転に伴うヒヤリハット経験の有無

\* グラフ%は小数点第2位四捨五入

①経験有	144名
②経験無し	238名
③不明	6名



■ ①37.1 ■ ②61.3% ■ ③1.5%

### □隊で指定された回転制御手技の有無

\* グラフ%は小数点第2位四捨五入

①個人の感覚で行っている	167名
②指定された手技がある	104名
③指定された手技がない	116名
④その他	1名

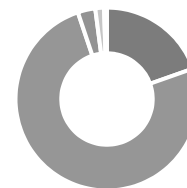


■ ①43% ■ ②26.8% ■ ③29.9% ■ ④0.3%

### □隊員投入・回収時の回転制御について

\* グラフ%は小数点第2位四捨五入

①制御可能	76名
②制御可能時と不可能時がある	292名
③制御方法が不明	12名
④制御不可能	6名
⑤その他	2名



■ ①19.6% ■ ②75.3% ■ ③3.1%  
■ ④1.5% ■ ⑤0.5%

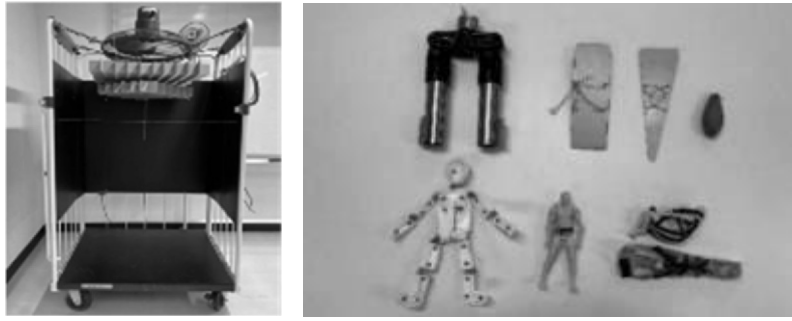
### □各救助資機材による回収時の回転制御について

\* グラフ%は小数点第2位四捨五入

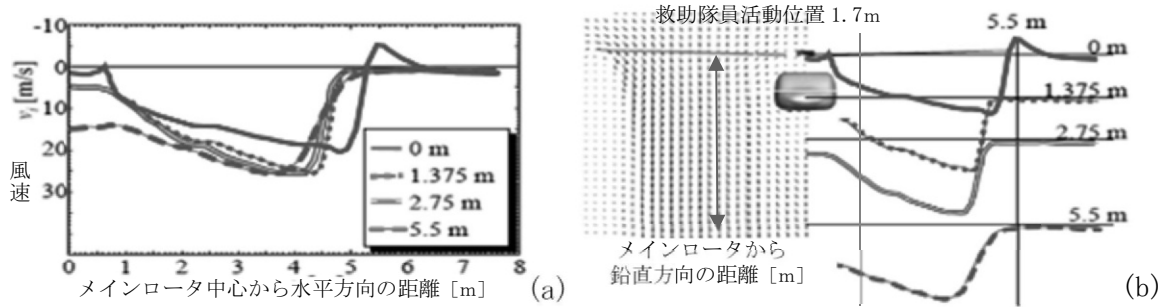
①全ての救助資機材で制御可能	33名
②一部制御不可能な資機材がある	86名
③制御可能時と不可能時がある	247名
④制御不可能	16名
⑤その他	6名



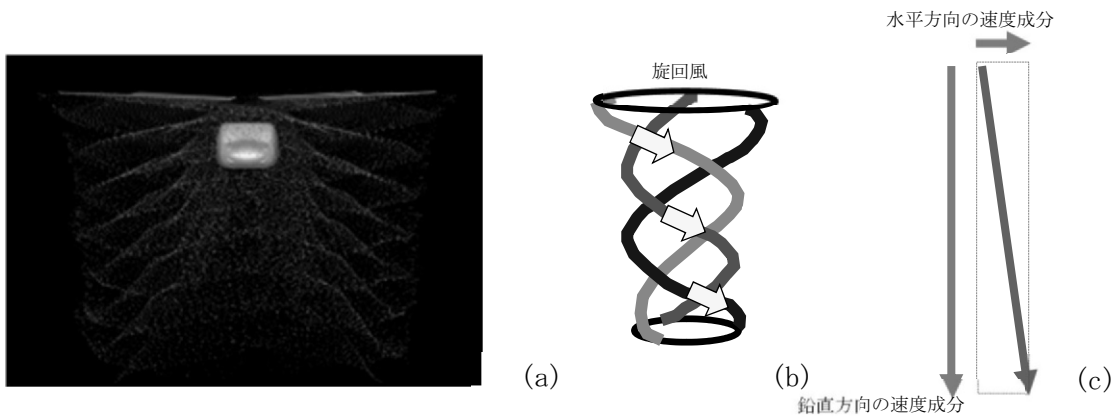
■ ①8.5% ■ ②22.2% ■ ③63.7%  
■ ④4.1% ■ ⑤1.5%



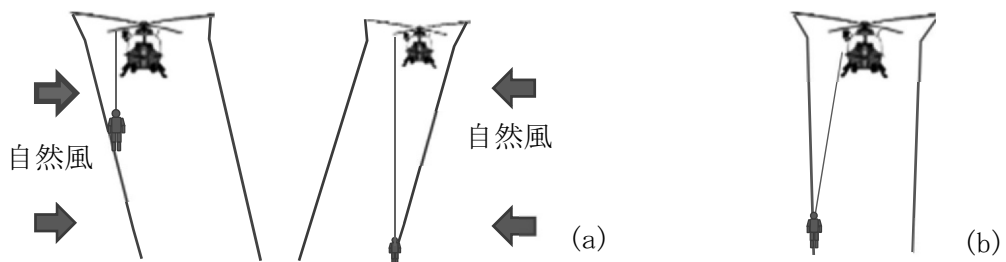
(図1) 風洞実験装置と回転模型



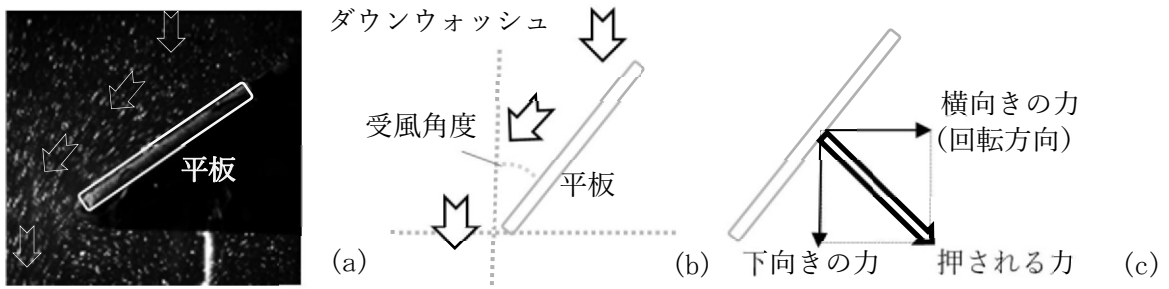
(図2) BK 1 1 7 ダウンウォッシュ分布と速度 (CFD解析結果)



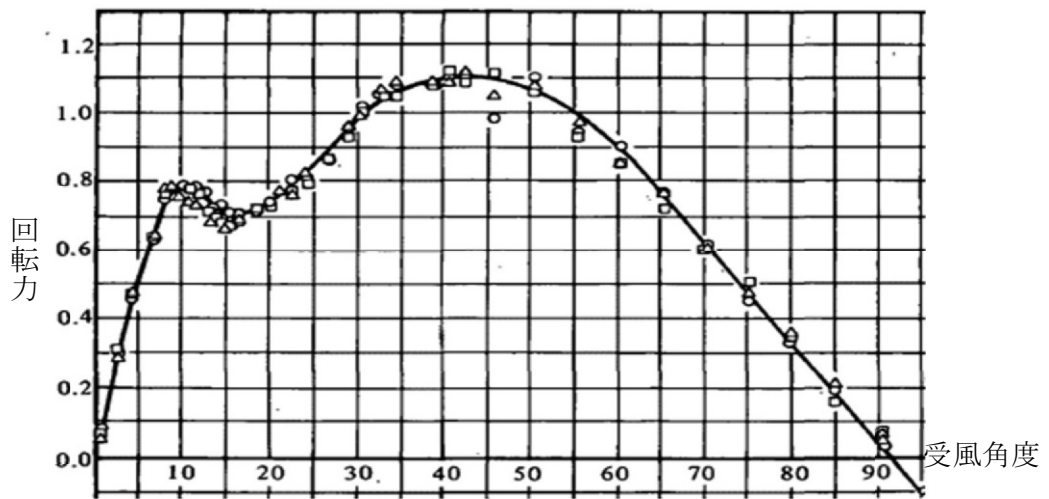
(図3) ダウンウォッシュの風域と旋回速度成分



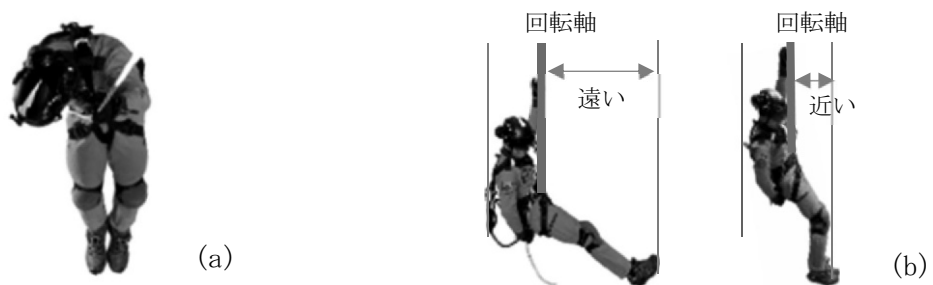
(図4) 自然風によるダウンウォッシュの風域変位とホイストケーブルの揺れによる影響



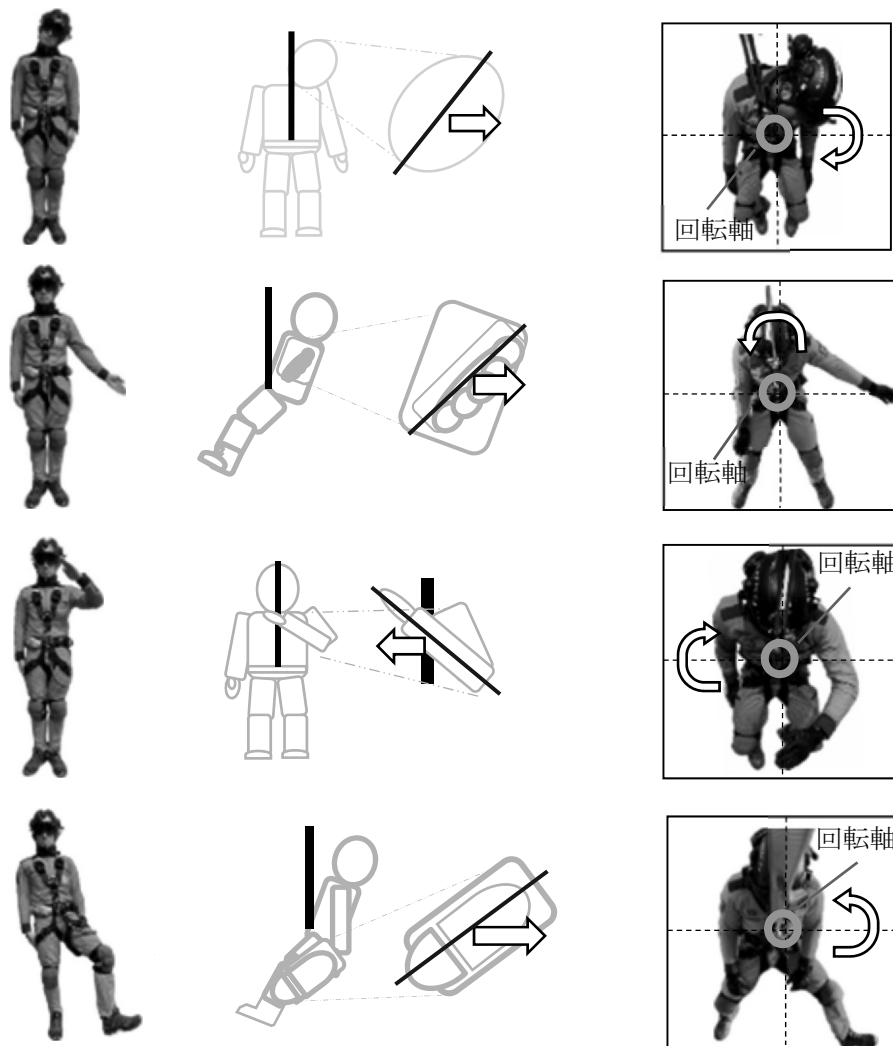
(図5) 回流実験装置による可視化と回転力の発生要因



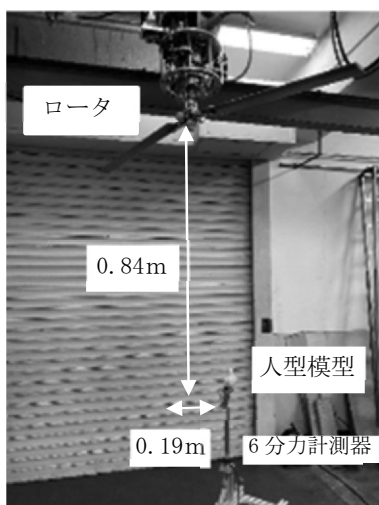
(図6) Sheldahl and Kilmas, 1981 の実験結果



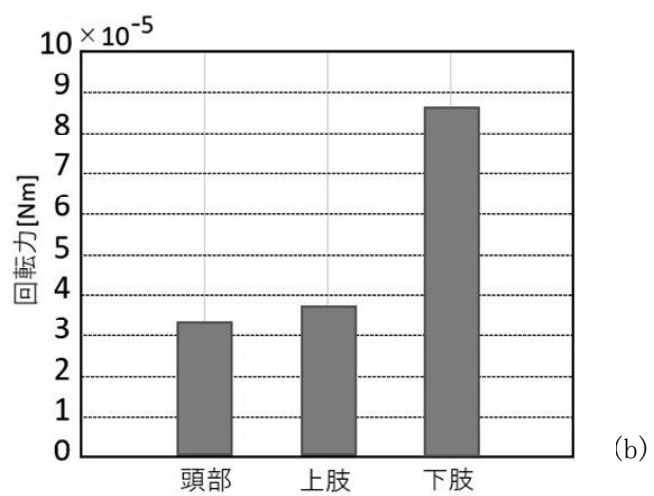
(図7) ラペリング降下する救助隊員の「受風面積」と「回転軸からの距離」



(図8) 制御手技の基本4手技



(a)

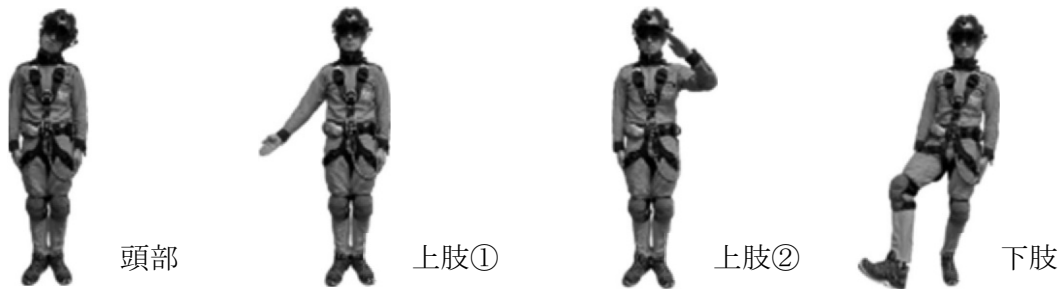


(b)

(図9) 6分力計測器と計測結果

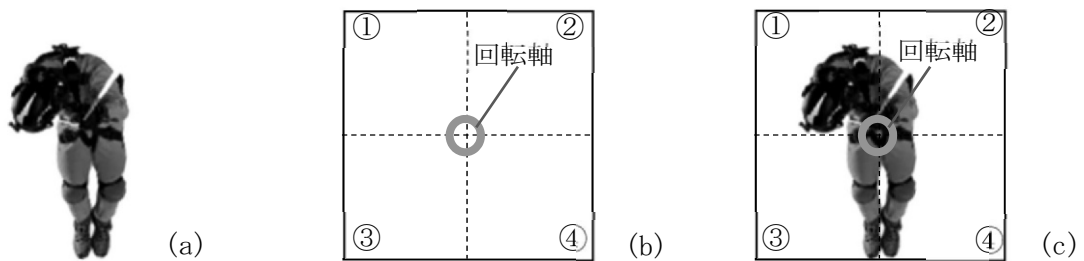
頭部	上肢①	上肢②	下肢
3.5	4.0	3.7	5.5

(表1) 1分間の回転数 (rpm)



制御手技	特徴
頭部	微調整する場合や要救助者保持の関係で手足を使えない場合
上肢①	可動域が広いことから、回転制御力の強弱が付けやすい
上肢②	上肢①と組み合わせると、片方の腕で、両方向の回転制御が可能
下肢	回転制御力が4手技の中で最大となる

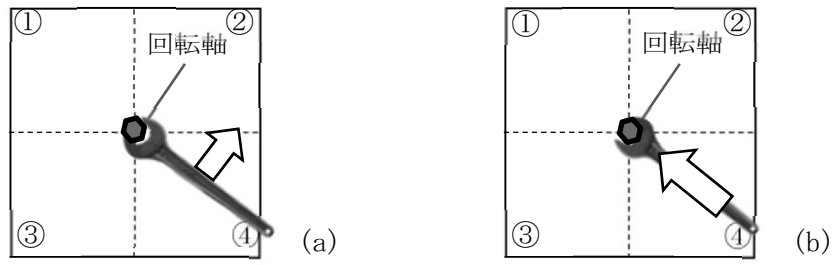
(図10) 時計回りの回転力を生む制御手技



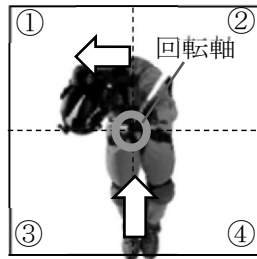
(図11) ラペリング降下する救助隊員と真上からの解析方



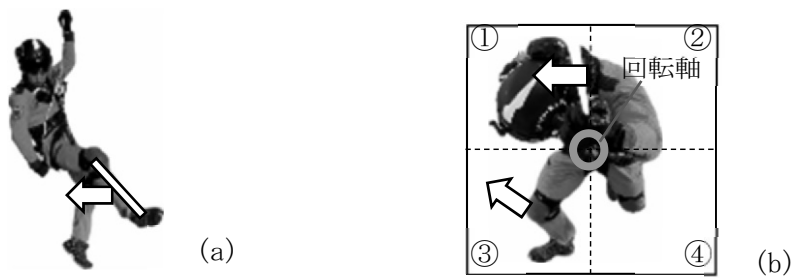
(図12) ラペリング降下する救助隊員の正面及び横からの解析方



(図 1.3) 回転力の作用について



(図 1.4) ラペリング降下する救助隊員の解析結果



(図 1.5) ラペリング降下中の制御手技