

---

---

# 白杖の安全性と危険性の検証

## — 略式モデルによる物理学的考察 —

日本ライトハウス養成部  
田邊 正明\*

---

---

### はじめに

白杖の目的は視覚障害者が視覚障害を持っていることを第三者に認識してもらうことと、視覚障害者自身で単独歩行するための道具として使用することである。視覚障害者の補装具として給付されるようになっているが、給付されるときには、そのどちらの目的で使うのかは限定されない。しかし、単独歩行するための道具として用いる場合は、剣道の竹刀や、野球のバットなどと同様に物体に衝突させる動的な作用を伴うため、使用法の習得が必要である。その動きは3次元空間の探知であり、どのように物体を探知するのかを解析することは非常に困難である。そこで、白杖を床面に射影した線として2次元空間に変換することで単純、略式化し、床面をどのように探知しているかを解析し、危険物を探知する状況を調べることにした。

解析は次の手順で行った。まず白杖本体の長さがどのように決定されているかを調査し、床面への投射を一般化した。また、床面をスライドさせて使うことから、力学的な観点でも考察を試みた。さらに、床面における白杖の射影の繰り返し動作を数式で表現することで、障害物を探知できない範囲がどのように変化していくのかを検証した。それぞれの方法論は2014年発行「視覚リハビリテーション研究第4巻1号「白杖は路面にどれくらい引っかかるのか? - 滑り出し角と静止摩擦係数、長さとの角度 -」、2015年発行「視覚リハビリテーション研究第5巻第1号「白杖の長さ、振り幅、歩幅による軌跡の変化」、2017年発行視覚リハビリテーション

---

\* たなべただあき 日本ライトハウス養成部

研究第6巻1号「白杖の長さ・振り幅・歩幅による死角部分の面積の変化」に記述したが、本稿ではすべてをまとめて改変、再掲し、再検証する。

### I. 白杖の長さの決定と白杖の傾斜角

白杖は写真1のように持ち、床面に対して斜めに接地する。そのときの床面と白杖の間の角度 $\theta$ を傾斜角とした。日本ライトハウスでは白杖の長さは剣状突起+10cmの長さを基準に作成しているが、実際に作成された白杖は基準値を中心にばらつきがあり、白杖の傾斜角にどのように影響するのかを調査した。調査対象者は平成25年度および平成26年度の日本ライトハウス視覚障害生活訓練等指導者養成課程基礎Iの修了者25名。使用した白杖は、シャフトがグラスファイバー製、グリップはゴルフグリップ、石突はノーマルチップで構成されている。シャフトの長さは剣状突起+10cmを基準として切断し、グリップ、石突を取り付けた。講習会ではタッチテクニック、スライド法の練習を行った。グリップの握り方は平らな面を上方にして親指を置くことで、左手右手両方で使用しても白杖の接地面が固定されるようにした。白杖の傾斜角の評価は石突の削られ方を参照した(写真2)。つまり、石突が摩耗し残された部分の角度( $\theta$ )が白杖の傾斜角と同値であるとした。4月から9月までの講習会を通して使用された白杖の石突の摩耗により残された部分の角度を分度器で測定し、白杖の長さの基準値からのずれとの関係を調べた。

白杖の長さの基準値からのずれと傾斜角の関係は表1に示した。剣状突起+10cmの基準値からのずれの正の最大値は7.2cm、負の最小値は-7.7cmで、平均は $1.2 \pm 3.48$ cmであり、誤差は $\pm 5.7\%$ 以内であった。傾斜角の最大値は51度、最小値は41度、平均は $44.3 \pm 2.13$ 度であった。表2の度数分布表から最頻値は45度であった。図1に示した分散図から、傾斜角と杖の長さの基準値からのずれの長さは5%水準で有意な直線的関係はなかった。

これらの結果から白杖の長さの $\pm 5.7\%$ 程度の誤差は、白杖の傾斜角に影響しているとは考えられなかった。よって、白杖の長さの基準値からのずれの値に関係なく、タッチテクニックで石突の摩耗によって残された部分の角度、つまり白杖の傾斜角は45度に近くなると考えられた。



写真1. 白杖の持ち方と傾斜角( $\theta$ )

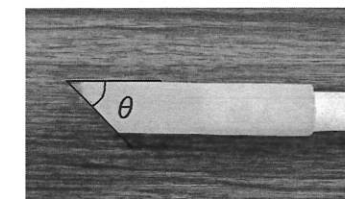


写真2. 石突が摩耗し残された部分の角度( $\theta$ )

表1. 白杖の長さの基準値からのずれと傾斜角

	角度(度)	身長(cm)	剣状突起+10cm	白杖の長さ(cm)	白杖の長さ-(剣状突起+10cm)	誤差(%)
A	41	171.8	130.0	134.2	4.2	3.2%
B	48	181.6	140.0	141.3	1.3	0.9%
C	45	175.9	136.0	133.7	-2.3	-1.7%
D	45	179.7	136.0	135.8	-0.2	-0.1%
E	42	138.5	106.0	111.7	5.7	5.4%
F	43	170.3	126.0	133.2	7.2	5.7%
G	42	172.0	129.0	132.7	3.7	2.9%
H	44	172.8	135.0	136.2	1.2	0.9%
I	45	156.6	117.0	123.0	6.0	5.1%
J	45	166.5	131.0	127.0	-4.0	-3.1%
K	45	154.0	116.0	116.0	0.0	0.0%
L	44	159.4	125.0	122.0	-3.0	-2.4%
M	45	165.2	129.0	125.0	-4.0	-3.1%
N	43	169.0	130.0	131.0	1.0	0.8%
O	46	170.7	128.0	129.2	1.2	0.9%
P	44	168.8	131.0	125.0	-6.0	-4.6%
Q	45	157.5	125.0	127.0	2.0	1.6%
R	42	160.0	126.0	122.8	-3.2	-2.5%
S	47	151.9	116.0	117.0	1.0	0.9%
T	51	175.5	134.0	133.5	-0.5	-0.4%
U	45	177.8	136.0	130.5	-5.5	-4.0%
H	42	166.0	131.0	128.3	-2.7	-2.1%
I	43	178.6	138.0	134.0	-4.0	-2.9%
J	43	174.0	135.0	127.3	-7.7	-5.7%
K	43	152.6	119.0	123.0	4.0	3.4%
平均	44.3	166.7	128.2	128.0	1.2	-0.04%
標準偏差	2.13	10.32	8.01	6.85	3.48	0.03
不偏標準偏差	2.17	10.53	8.17	6.99	3.61	

表2. 傾斜角の度数分布

傾斜角(度)	人数
41	1
42	4
43	5
44	3
45	8
46	1
47	1
48	1
49	0
50	0
51	1
合計	25

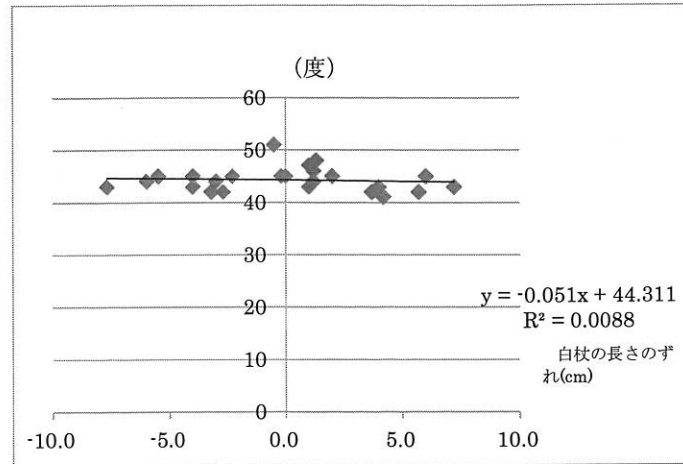


図1. 白杖の長さの基準値からのずれと傾斜角の分散図

## II. 白杖の傾斜角がおよそ45度になる要因

高齢者が用いる杖は体重を支えるため、杖は滑らないように静摩擦係数が高いゴム製のカバーが装着されている。それに対して、視覚障害者用の白杖は路面に一定の角度を保持し滑らせ、前方の障害物に衝突させることにより生じる振動を腕で知覚する、動物の髭のような触角に当たる道具である。路面を滑らせる行為は、路面に対し一定の角度で路面に接する白杖の先端に装着された石突と路面との間に生じる摩擦に抗する力を加えることにより滑り出す。白杖はグリップ、シャフト、石突の3つの部品から構成され、それぞれの部品にはさまざまな種類が存在する。グリップはゴムグリップ、カーボングリップかそれ以外の材質、シャフトはグラスファイバー、ブラックカーボン、アルミニウムなどで作られた1本の棒であるが、折り畳むために複数部分に分割されたものもある。石突の材質はナイロン、アラミド繊維強化熱可塑性樹脂などで、形状はスタンダード(棒状)タイプ、ティアドロップ(滴)タイプ、マシュマロタイプ、ローラータイプ、クッションが入ったパームチップなどがある。それぞれはさまざまな路面を滑らせることによる触覚の感度を上げるために工夫されており、利用者は感覚的に選択をしている。そこで、数種類の白杖を抽出し、アスファルトでの滑り方を数値化した。

比較するために抽出した白杖は、日本ライトハウスで自作している直杖(ゴムグリップ、グラスファイバー製シャフト、石突はナイロン製のスタンダードタイプ)、アドバンテージ(石突はナイロン製のスタンダードタイプ、マシュマロチップ、パームチップ)、マイケーン(グリップはカーボン、石突はアラミド繊維強化熱可塑性樹脂製のティアドロップ)の6種類である。白杖の路面に対する滑り方の比較は壁に白杖を立てかけ、自重によって滑り出すときのシャフトと路面の角度(本稿では‘滑り出し角’と定義する)を計測した。計測にあたっては壁とグリップの摩擦は考慮せず壁の抗力のみを考えた。滑り落ちる角度は白杖の重心が関与しており角度で白杖の滑り方を比較できない。そこで、石突の路面に対する滑り方を比較するために石突と路面の静摩擦係数を求めた。静摩擦係数の求め方は次のとおりである。

図2のように白杖グリップを上にして壁に立てかけ、滑り始めたときの角度を $\theta$ 、壁から受ける抗力を $R_2$ 、白杖の重さを $W$ 、床からの垂直抗力を $R_1$ 、床と石突の間の摩擦力を $F$ 、静摩擦係数を $\mu$ とし、壁は滑らかで白杖と壁の間に摩擦はないと仮定すると、

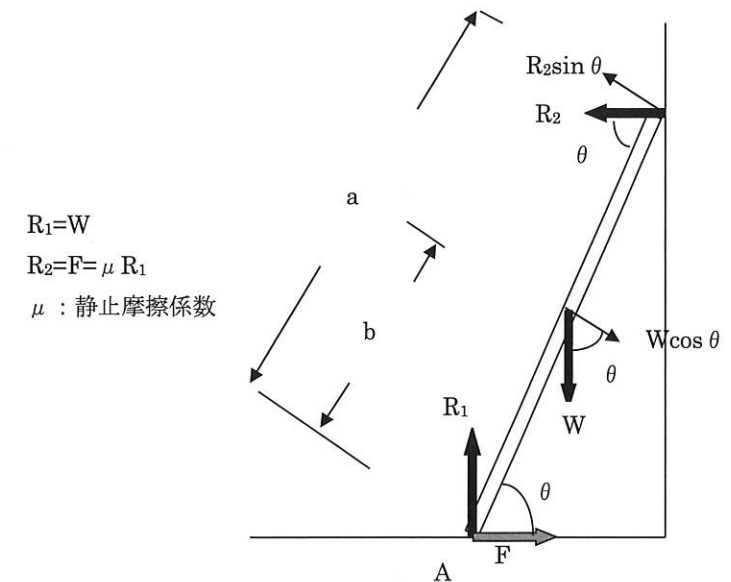


図2. 白杖をグリップを上にして壁に立てかけた状態

$$R_1 = W \quad \dots(1)$$

$$R_2 = \mu R_1 \quad \dots(2)$$

の関係がある。そして、点Aを回転中心とした力のモーメントのつりあいの式をたてると、

$$R_2 \sin\theta \cdot a = W \cos\theta \cdot b \quad \dots(3)$$

(1)(2)(3)より、

$$\frac{\sin\theta}{\cos\theta} = \frac{Wb}{aR_2}$$

$$\tan\theta = \frac{R_1 b}{\mu R_1 a}$$

$$\tan\theta = \frac{b}{a\mu}$$

$$\therefore \mu = \frac{b}{a \tan\theta}$$

表3に示したように、アスファルトの路面で白杖が自重で滑り始めるときの滑り出し角はアドバンテージのスタンダードタイプの石突が一番早く45度で、同じスタンダードタイプの石突を装着した日本ライトハウス製白杖も44度とほぼ同値であった。マシュマロチップ42度、パームチップ40度、ローラーチップ38度と続き、マイケーンは35度と滑り出し角は40度に満たなかった。静止摩擦係数はスタンダードタイプはアドバンテージ0.63、日本ライトハウス製0.62とほぼ同値であった。また、マシュマロチップ0.66、パームチップ0.72、ローラーチップ0.73であり、これらはスタンダードタイプよりやや滑りにくくなっていた。

マイケーンの滑り出し角が小さい原因は、アスファルトに対する静止摩擦係数は0.68でアドバンテージのマシュマロチップの0.66とほとんど変わらないことから、石突が原因とは考えられなかった。他の白杖がグリップから0.4の

表3. 白杖のアスファルトにおける滑り出し角、静止摩擦係数

アスファルト					
	角度 (度)	杖の長さ (a)(cm)	グリップから 重心までの 長さ(a-b)	重心の比 (a-b)/a	静止摩擦 係数
スタンダード(アドバンテージ)	45	127.0	47.5	0.4	0.63
スタンダード(日本ライトハウス)	44	127.0	51.0	0.4	0.62
マシュマロチップ(アドバンテージ)	42	116.0	47.0	0.4	0.66
パームチップ(アドバンテージ)	40	120.6	47.5	0.4	0.72
ローラーチップ(アドバンテージ)	38	138.0	59.0	0.4	0.73
マイケーン(KOSUGE)	35	140.5	73.5	0.5	0.68
平均					0.67
標準偏差					0.04

位置に重心があるのに対し、マイケーンの白杖の重心の比が0.5であり、重心が中心部に位置することが原因と考えられた。マシュマロチップ、パームチップ、ローラーチップがスタンダードタイプよりも滑り出し角が小さいのは静止摩擦係数がスタンダードタイプよりも高いことが原因と考えられたが、材質の違いは確認できなかった。

石突のアスファルトに対する静止摩擦係数の平均値は $0.67 \pm 0.04$ となり、乾いたアスファルトとタイヤの静止摩擦係数の0.7にはほぼ近いものとなった。つまり、石突による進行方向への路面の滑りには大きな違いはないと考えられた。ローラーチップは、横方向の摩擦に関しては左右に振る時には回転するため静止摩擦係数はゼロに近くなると考えられる。しかし、アスファルト面に対する滑り出し角が38度、進行方向の静止摩擦係数が0.73であることから、白杖に加える進行方向の力はスタンダードタイプよりも大きくなると考えられた。パームチップの滑り出し角は40度、静止摩擦係数は0.72とスタンダードタイプよりも滑りにくいが、力を受けた方向に石突が可動するため衝撃が弱まり、自動車などに使われているショックアブソーバーのように、引っかかった衝撃を吸収し引っかかかりの感覚をなくしていると考えられた。

日本ライトハウスで作成した白杖に関してはアスファルト面に対する滑り出し角がほぼ45度であるのは、日本ライトハウス視覚障害生活訓練等指導者養

成課程の修了者25名の白杖の傾斜角が45度であったという結果と因果関係があるのではないかと推測される。

### Ⅲ. 白杖の石突による完全な探索

白杖の石突が完全に床面に接地する点は床面の安全が保障される場所である。視覚障害者の白杖は体の正中線上で左右に振って使用するが、白杖の長さ、振り幅、歩幅によってどのように白杖の石突の軌跡が変化し、障害物の探知に影響しているのかを、波の式を利用してシミュレーションを描くことにより軌道を描写した。

視覚障害者の白杖は体の正中線に回旋中心を置き、障害物の探知を行うために左右に振子のように振って歩き(スライド法(constant contact cane technique)やタッチテクニック(two-point-touch cane technique))、白杖の石突の軌跡は振子の単振動の軌跡と同様であるが、振子の単振動がcosカーブで表せられるのに対し、白杖の長さをRとしたときの地面への射影をr、肩幅/2をA、距離をx、振り幅をy、2歩幅をλとすると、図3のように白杖の石突の軌跡は地面への射影(r)が描く円弧と弦の間(Δx)の長さだけ、肩幅/2(A)を振幅の最大値としたcosカーブより進行方向へ移動する。

2歩幅の周期をT、振り始めの位置を変えるために左端から振ったと仮定し

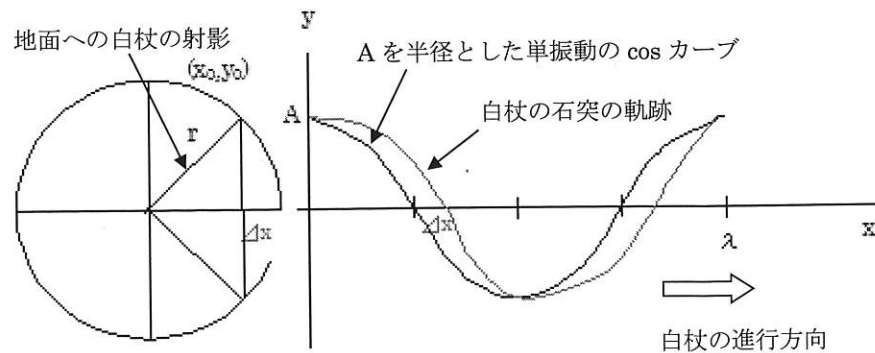


図3. 静止した状態の白杖の振り、移動したときの軌跡

r: 白杖の長さをRとしたときの地面への射影、A: 肩幅/2(白杖の振り幅の最大値を肩幅とする)、x: 進行方向への距離をx、y: 振り幅の変化、λ: 2歩幅、T: 2歩幅の周期、t: 左端から白杖を振ったときの経過時間

たときの経過時間をtとした波の式は次のようにして導出した。

静止した状態での白杖の振りを石突の座標(x<sub>0</sub>, y<sub>0</sub>)で表すと、

$$\begin{aligned} x_0^2 + y_0^2 &= r^2 \\ x_0^2 &= r^2 - y_0^2 \\ x_0 &= \sqrt{r^2 - y_0^2} \end{aligned} \quad \dots(1)$$

白杖が弧を描かず単振動すると考えたときの振り幅(y<sub>0</sub>)は

$$y_0 = A \cos 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right) \quad \dots(2)$$

(1)に(2)を代入すると

$$x_0 = \sqrt{r^2 - \left( A \cos 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right) \right)^2} \quad \dots(3)$$

円弧と弦の間(Δx)は

$$\Delta x = \sqrt{r^2 - \left( A \cos 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right) \right)^2} - \sqrt{r^2 - A^2} \quad \dots(4)$$

図4のように白杖の長さをR、地面との角度を45度とすると白杖の射影(r)は

$$r = \frac{\sqrt{2}R}{2} \quad \dots(5)$$

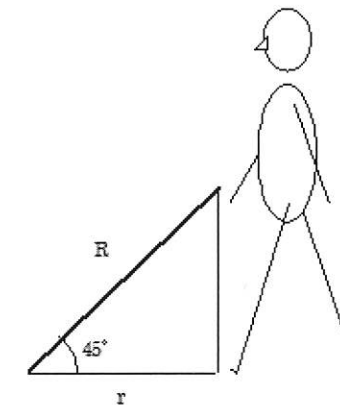


図4. 白杖の地面への射影

(4)に(5)を代入すると

$$\Delta x = \sqrt{\left(\frac{\sqrt{2}R}{2}\right)^2 - \left(A \cos 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right)\right)^2} - \sqrt{\left(\frac{\sqrt{2}R}{2}\right)^2 - A^2} \quad \dots(6)$$

よって、円弧を描きながら移動する白杖の石突の軌跡(x,y)は(6)を次の式に代入することにより求められる。

$$y = A \cos 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x - \Delta x}{\lambda}\right) \quad \dots(7)$$

ただし、上式を白杖の軌跡に利用するためには  $0 < x < \frac{\lambda}{2}$  の変域において、 $0 < \Delta x < x$  となる必要がある。

上式を用い、身長166.5cmで肩幅/2が20cm、127cmの白杖を持っている利用者を例に、白杖の長さは127cmと100cm、2歩幅は120cmと60cm、肩幅/2は40cmと20cmで比較し、8通りの石突の軌跡をプロットした。

石突の軌跡を図5から図12に示した。

肩幅が狭い場合はほぼきれいなcosカーブを描いたが、図5と6、図7と8、図9と10、図11と12を比較すると、同じ長さの白杖で歩幅が同じであれば、肩幅が広いほうが白杖を振り切った部分で前方に石突が移動するような軌跡となった。また、白杖が127cmから100cmに短くなると、図5と9、図6と10、図7と11、図8と12の比較から、歩幅、肩幅の値が同じ場合、白杖を振り切ったところでより前方に石突が移動するような軌跡となった。

同じ長さの白杖を持っていても、使用する人の状態によって白杖の振り幅は異なり、振り幅が広い人の場合は杖を振りきったところで障害物に早めに当たることが予測される。また、杖を短く持った場合でも同様のことが予測される。さらに、歩幅が半分になると壁を伝った場合に壁に当たる回数は2倍になり、伝う部分の確認は増えることになる。

## 1. 127cmの白杖の石突の変化

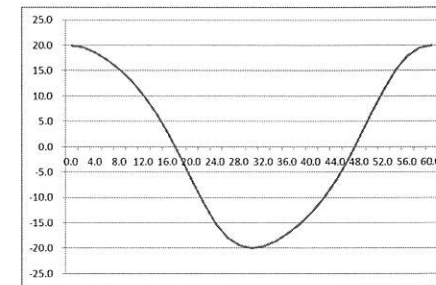


図5. 2歩幅:60cm、肩幅/2:20cm

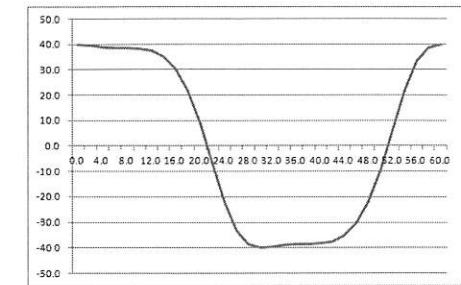


図6. 2歩幅:60cm、肩幅/2:40cm

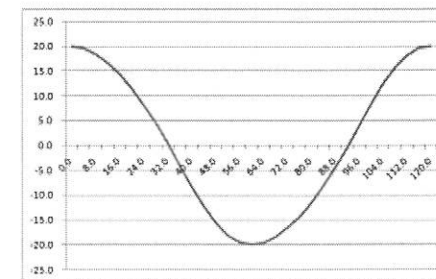


図7. 2歩幅:120cm、肩幅/2:20cm

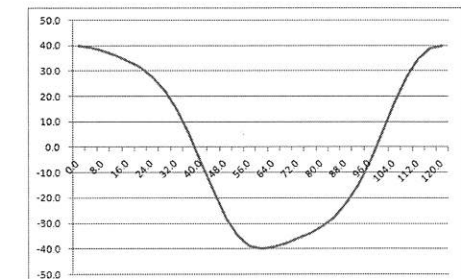


図8. 2歩幅:120cm、肩幅/2:40cm

## 2. 100cmの白杖の石突の変化

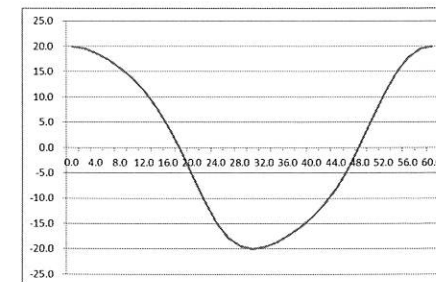


図9. 2歩幅:60cm、肩幅/2:20cm

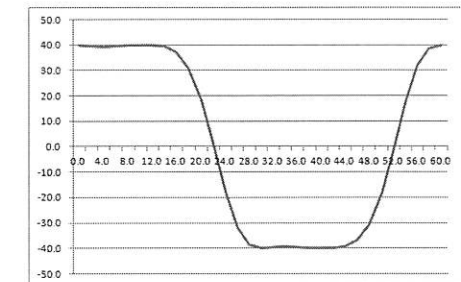


図10. 2歩幅:60cm、肩幅/2:40cm

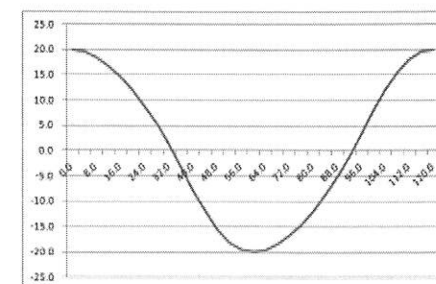


図11. 2歩幅:120cm、肩幅/2:20cm

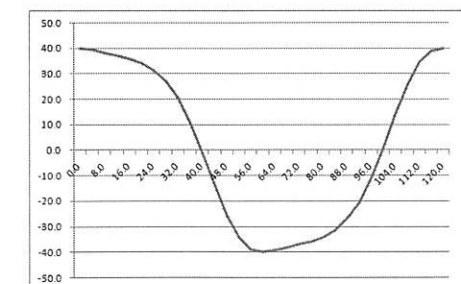


図12. 2歩幅:120cm、肩幅/2:40cm

IV. 完全に安全でない2次元面、死角になる部分

視覚障害者が使用する白杖は体の前に出し左右に振ることによって障害物を探知するが、前方にある障害物を察知できない死角にあたる部分が生じる。3次元空間で解析することは困難であるが、2次元面の略式モデルに簡素化して描き、白杖の長さ・振り幅・歩幅によって床面に白杖の射影が存在しない死角部分の面積がどのように変化するかを、白杖の石突の軌跡の方程式を利用してシミュレーションし、安全が保障されない部分を探った。

白杖の長さを130cm、歩幅を110cm、振り幅を40cmとした場合の白杖の射影の軌跡は図13のようになり、杖が障害物に当たらない部分があることが分かる。

図13をもとに、死角にあたる部分の面積を求めるために石突の軌跡、白杖を振り終わったときの直線をグラフにすると図14のようになった。

白杖を振り終わった場所での白杖の射影DCの直線の方程式 $y = ax - b$ の傾き(a)と切片(b)は次の通りであり、

切片b

$$\lambda - \sqrt{\left(\frac{\sqrt{2}R}{2}\right)^2 - A^2} : \sqrt{\left(\frac{\sqrt{2}R}{2}\right)^2 - A^2} = b : A$$

$$b = \frac{A \left( \lambda - \sqrt{\left(\frac{\sqrt{2}R}{2}\right)^2 - A^2} \right)}{\sqrt{\left(\frac{\sqrt{2}R}{2}\right)^2 - A^2}}$$

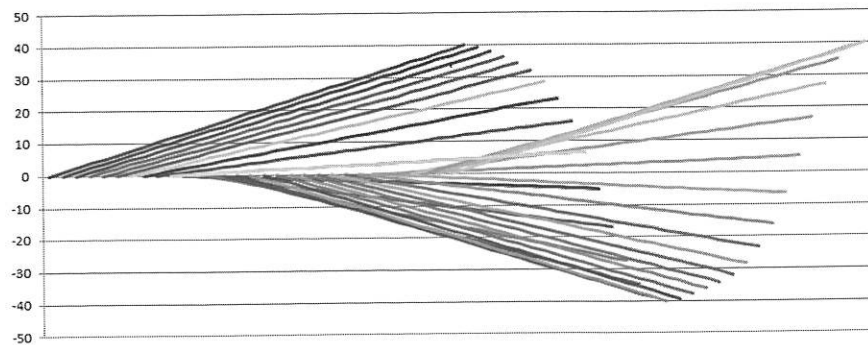


図13. 白杖の射影

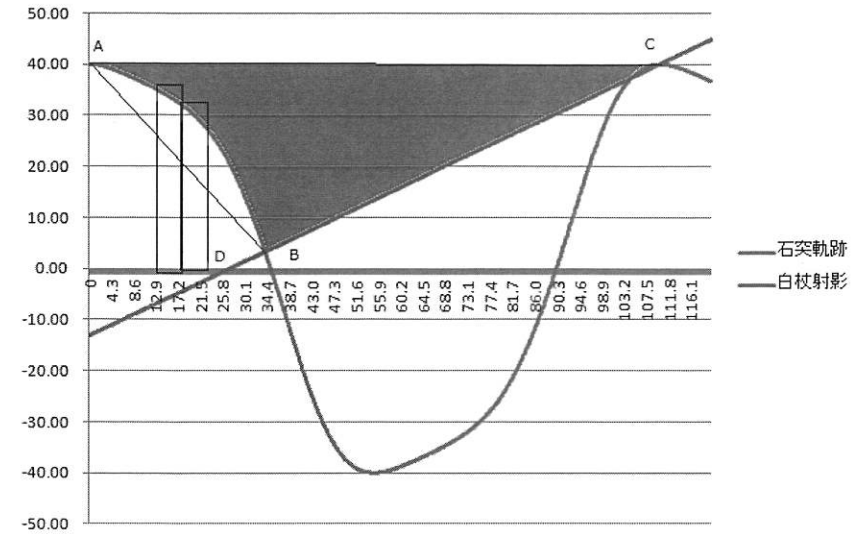


図14. 死角に当たる部分の面積

傾き a

$$a = \frac{A}{\sqrt{\left(\frac{\sqrt{2}R}{2}\right)^2 - A^2}}$$

つまり、直線の方程式は

$$y = \frac{Ax}{\sqrt{\left(\frac{\sqrt{2}R}{2}\right)^2 - A^2}} - \frac{A \left( \lambda - \sqrt{\left(\frac{\sqrt{2}R}{2}\right)^2 - A^2} \right)}{\sqrt{\left(\frac{\sqrt{2}R}{2}\right)^2 - A^2}} \quad \dots(8)$$

よって、死角に当たる部分の面積は、図14に示したように三角形ABCからABを弦とした弓型を引いた面積となり、式(7)、式(8)を利用して面積の計算を行った。弓型の部分の面積は細かい長方形の部分に分割した面積を合計して求めた。

白杖の長さ、歩幅、肩幅/2の数値のうち2つを定数とし、ひとつを変数としてグラフ化した。定数は白杖の長さを130cm、歩幅を110cm、肩幅/2を40cmとした。

杖の長さや肩幅を一定にして歩幅を変化させた場合の死角に当たる部分の面積の変化は図15のようになり、死角部分の面積は歩幅に対して正の相関があった。

肩幅と歩幅を一定にし、白杖の長さを変化させた場合の死角部分の面積の変化は図16のようになり、死角部分の面積は杖の長さに対して負の相関があった。

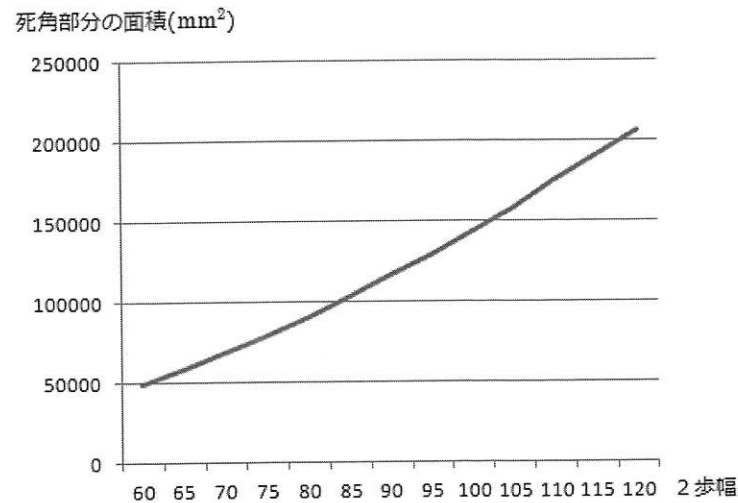


図15. 歩幅を変化させた場合の死角の部分の面積の変化  
白杖：130cm、肩幅/2：40cm

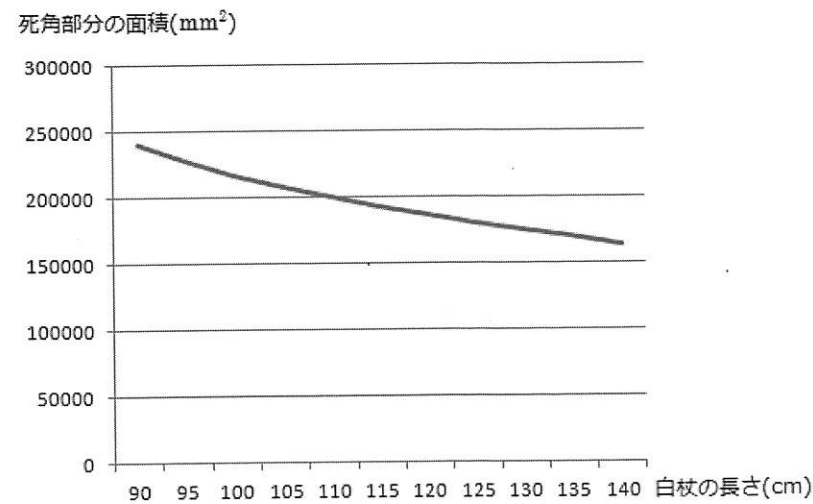


図16. 杖の長さを変化させた場合の死角部分の面積の変化  
肩幅/2：40cm、2歩幅：110cm

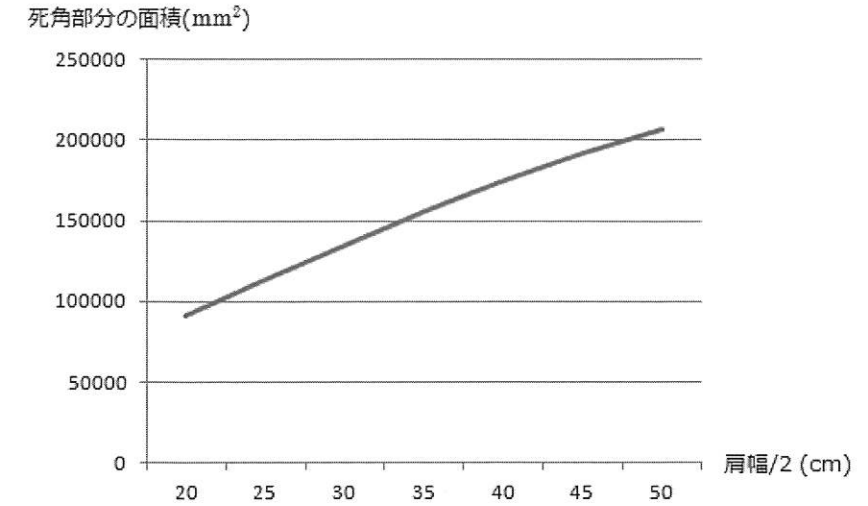


図17. 肩幅を変化させた場合の死角部分の面積の変化  
白杖の長さ：130cm、2歩幅：110cm

白杖の長さや歩幅を一定にし、肩幅を変化させた場合の死角部分の面積の変化は図17のようになり、死角部分の面積は肩幅に正の相関があった。

#### まとめ

白杖は視覚障害者の使用方法によって多彩な動きをする。その安全はどの程度保障されているのかは記述しがたいため、完全に安全でない状態を床面の2次元空間に記述することで、多少なりとも白杖歩行が及ぼす不完全さを理解することが可能となったと考えられる。

シミュレーションの結果から、安全を確保するために、白杖を振った範囲内で障害物を探知できない場所を比較し、探知できない面積を少なくする方法は次のように推測できる。1) 歩幅を小さくする、2) 振り幅を狭くする、3) 白杖の長さを長くする。しかし、振り幅を狭くする場合は歩幅、杖の長さを一定にした場合に死角部分の面積が小さくなるということであり、それにともなった左右の広い範囲での探索が行われなくなるために現実的な選択肢ではない。つまり、同じ長さの白杖を所持している場合の、安全確保の最適な方法は、歩幅を小さくするという事となる。



## 文献

- 1) 田邊正明: 白杖は路面にどれくらい引っかかるのか? - 滑り出し角と静止摩擦係数、長さと構えの角度 - . 視覚リハビリテーション研究、第4巻1号: 38-43, 2014.
- 2) 田邊正明: 白杖の長さ、振り幅、歩幅による軌跡の変化. 視覚リハビリテーション研究, 第5巻第1号: 19-21, 2015.
- 3) 田邊正明: 白杖の長さ・振り幅・歩幅による死角部分の面積の変化, 視覚リハビリテーション研究, 第6巻1号: 14-17, 2017.
- 4) 田邊正明: Cane Equation, <http://lowvision.web.fc2.com/CaneEquation.xlsx> (2014.2.2)