

交通事故による自転車乗員頭部外傷の
発生要因解明と頭部保護に関する研究

2017年9月

及川 昌子

首都大学東京

目次

第1章	緒論	1
1.1	研究背景	1
1.1.1	自転車の利用	1
1.1.2	自転車の交通事故	3
1.2	自転車事故の特徴	4
1.2.1	都市部での自転車事故頻発	4
1.2.2	自転車事故の相手当事者	5
1.3	自転車乗員の外傷	5
1.3.1	頭部外傷	6
1.3.2	頭部外傷による意識障害	7
1.4	自転車事故削減のための対策	10
1.4.1	自転車運転者の交通ルールに対する意識	10
1.4.2	自転車用ヘルメット	11
1.4.3	道路環境整備	11
1.5	研究目的	12
1.6	本論文の構成	13
第2章	東京都の特定エリアにおける自転車調査	15
2.1	諸言	15
2.2	自転車利用者アンケート調査	15
2.2.1	解析方法	15
2.2.2	アンケート回答者の属性	16
2.2.3	アンケート結果	19
2.2.4	考察	24
2.3	自転車交通事故の詳細な分析	26
2.3.1	自転車事故データ	26
2.3.2	環境的要因	27
2.3.3	当事者種別による解析	28
2.3.4	考察	32
2.4	交差点での自転車走行状況調査	33
2.4.1	調査方法	33
2.4.2	交差点での走行状況	37

2.4.3	考察	40
2.5	結言	45
第3章	自転車事故の頭部外傷の実態調査	47
3.1	諸言	47
3.2	車との衝突による自転車乗員の外傷	48
3.2.1	解析方法	48
3.2.2	年齢帯別外傷の特性	50
3.2.3	重傷の場合の損傷主部位	52
3.2.4	死亡の場合の損傷主部位	53
3.2.5	頭部外傷とヘルメット着用の関係	54
3.2.6	「ヘルメット着用なし」の頭部主損傷	56
3.2.7	考察	57
3.3	高齢自転車乗員の交通事故様態	59
3.3.1	解析方法	59
3.3.2	傷害程度別, 年齢帯の構成率	61
3.3.3	法令違反	61
3.3.4	道路環境的要因	62
3.3.5	頭部外傷の起因となった加害部位 (車, 路面)	63
3.3.6	考察	65
3.4	救急搬送された自転車乗員の頭部外傷および意識障害	66
3.4.1	解析方法	66
3.4.2	交通事故による救急患者	66
3.4.3	自転車乗員患者の頭部外傷	69
3.4.4	頭部外傷による意識障害	70
3.4.5	考察	74
3.5	結言	75
第4章	頭部外傷発症予測のための衝撃実験	77
4.1	諸言	77
4.2	車への衝撃実験	77
4.2.1	頭部インパクト	77
4.2.2	自転車用ヘルメット	79
4.2.3	供試車両	79
4.2.4	打撃方法	80
4.2.5	実験結果	81

4.3	路面への衝撃実験	83
4.3.1	実験条件	83
4.3.2	実験結果	85
4.4	考察	87
4.5	結言	90
第5章	有限要素モデル解析	91
5.1	諸言	91
5.2	人間の頭部	91
5.2.1	脳の構造	91
5.2.2	頭部外傷の発生機序	93
5.3	有限要素モデル	94
5.3.1	頭部モデル	94
5.3.2	頭部インパクトモデル	97
5.3.3	自転車用ヘルメットモデル	99
5.4	自転車単独事故での頭部の路面衝突に対するヘルメット着用効果	101
5.4.1	解析条件	101
5.4.2	解析結果	103
5.5	車と衝突後の頭部の路面衝突に対するヘルメット着用効果	106
5.5.1	解析条件	107
5.5.2	解析結果	110
5.6	壁との衝突による頭部外傷へのヘルメット着用効果	112
5.6.1	症例の詳細情報	113
5.6.2	MADYMOによる症例の衝突再現	114
5.6.3	有限要素モデルによる再現解析及びヘルメット着用効果	114
5.6.4	解析結果	115
5.7	考察	116
5.8	結言	119
第6章	結言	121
6.1	結論	121
6.2	展望	125
	参考文献	126
	謝辞	132

第 1 章

緒論

1.1 研究背景

1.1.1 自転車の利用

我が国において自転車の利用は、通学や通勤、買物、子供の送迎、サイクリング等のレジャー手段など自転車利用のニーズは多様化しており、身近で便利な交通手段として、子供から高齢者まで幅広い年齢層に利用されている[1]。日本の自転車は、明治 23 年に初めて国産が開始されて以来、身近で便利な乗り物として保有台数は年々増加傾向を示している。東日本大震災時、都心部では公共機関の混乱を経験したことで、自転車の便利さが再認識され、自転車利用の活性化を助長していることも考えられる。近年、都市部では、流通業界のトラックに代わり短距離の配送業務用としてリヤカー付自転車の利用も見られる。日本における自転車保有台数を見ると、2013 年の全国自転車保有台数推計は 71,551 千台（対前年伸び率 1.5%）であり、増加傾向を示す（図 1.1）[2]。人口 1 人当たりの自転車保有台数を海外と比較すると、日本は 0.67 台（2005 年）保有しており、自転車先進国である欧州諸国のオランダ、ドイツ、デンマーク、スウェーデン、ノルウェーに続き 6 番目に位置している（図 1.2）[2]。

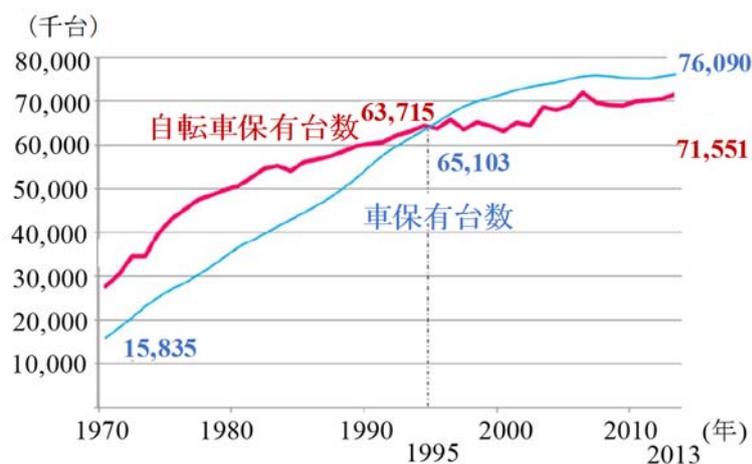


図 1.1 自転車保有台数の推移[2]

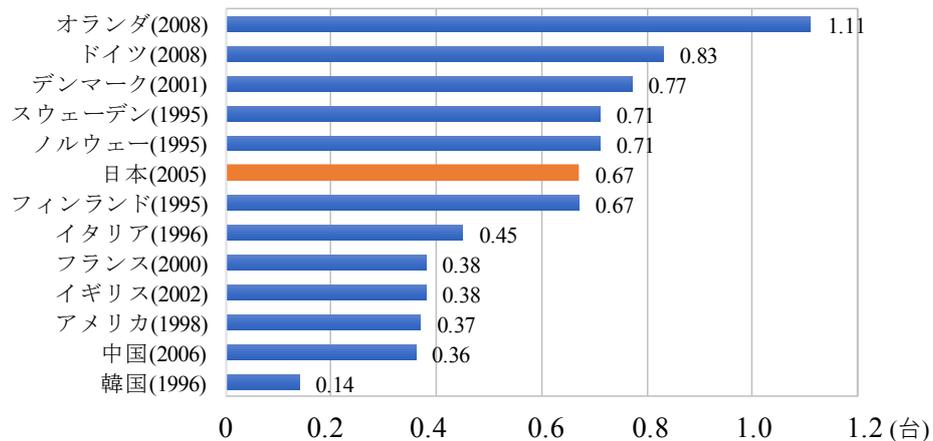
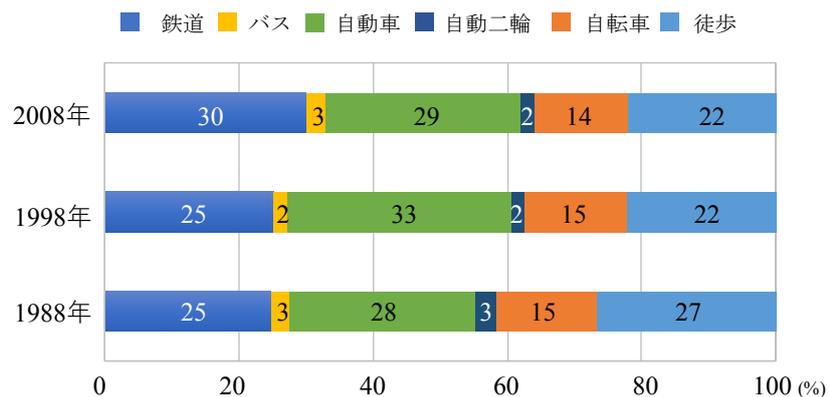


図 1.2 人口 1 人当たりの自転車保有台数 (台/人) [2]

※ () は統計年次

交通手段としての自転車利用の割合 (交通手段分担率) は、日本全体で 13%を占め、欧米諸国と比較すると、オランダ (27%)、デンマーク (19%) に次いで 3 番目に高い水準である[2]。自転車が交通手段として重要な担い手であることが伺える。日本の都市規模別では、地方都市圏 (11%) に比べて東京や大阪のような大都市圏 (14%) での自転車の交通手段分担率が高い[2]。代表交通手段の分担率について、東京都市圏 (東京都、神奈川県 (横浜市、相模原市、川崎市)、千葉県 (千葉市)、埼玉県 (さいたま市)、茨城県南部) を対象に、1988 年、1998 年、2008 年で比較した場合、自転車はほぼ横ばい (15% から 14%) で推移している (図 1.3) [3]。



※グラフ中の数値は四捨五入しているため合計は100にならない場合あり

図 1.3 東京都市圏の代表交通手段分担率等[3]

自転車の種類として、最も一般的に使用されているのがシティサイクル (俗称ママチャリ) と呼ばれる自転車である。学生から高齢者まで、通学、通勤、買い物用など多目

的に使用されている。通常より車輪が小さい成人向けのミニサイクルや、舗装路を主とした道路での高速走行を目的に設計されたロードバイクという自転車もある。電動アシスト自転車は、搭載のモーターによりペダルを踏む力が低減されるため、特に自転車に子供を同乗させる母親に人気が高い。また、最近では、配送業者用としてアシスト力の大きい電動アシスト自転車も販売されている。

1.1.2 自転車の交通事故[4]

日本の交通事故死亡者数について、2016年では3,904人であり、最も多かった1970年(16,765人)に比べると77%減少した。1986年～2016年(30年間)の交通事故死亡者の推移について状態別で比較すると、1993年(4,835人)をピークに自動車乗車中が減少し、2009年には歩行者(1,717人)が自動車乗車中(1,627人)を上回り、最も多い人数となる(図1.4)。自動車乗車中の死亡者減少は、その保護対策として、乗用車を対象としたフルラップ前面衝突試験(1994年)、側面衝突試験(1998年)、オフセット前面衝突試験(2007年)といった各種衝突試験の採用による効果と考えられる。交通事故において、2013年に世界保健機構(World Health Organization, WHO)は、歩行者、自転車乗員、自動二輪乗員を交通弱者として特定している[5]。歩行者保護の対策として、乗用車と一部の貨物車を対象に、ボンネットの衝撃緩和性能を規定する歩行者頭部保護基準が2005年に導入された。本基準は、頭部を模した測定機器(頭部インパクト)を自動車のボンネット上の数箇所に衝突させ、頭部インパクトが受ける衝撃を測定し、その結果から試験車両の可否を判定する。車両との衝突による歩行者の頭部保護対策として、歩行者の死亡者数低減が期待されている。歩行者と同様、交通弱者とされる自転車乗員の死亡者数の推移を見ると、ピーク時1989年の1,210人が2016年では509人となり58%減少したが、最近の過去10年間はほぼ横ばいの推移である。しかし、自転車乗員保護に特化した車両への法規は、現時点では特に採用がない。

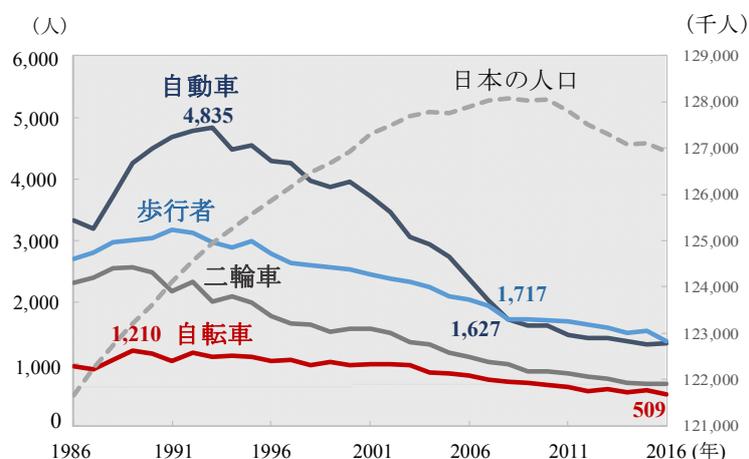


図 1.4 交通事故による状態別死亡者の推移 [4]

2016年の日本の交通事故死傷者について、状態別、傷害程度別（軽傷、重傷、死亡）の構成率を図1.5に示す。ここで、死亡とは、交通事故発生から24時間以内に亡くなった場合で、重傷とは交通事故で負傷し1箇月（30日）以上の治療を要する場合で、軽傷とは交通事故で負傷し1箇月（30日）未満の治療を要する場合である。交通事故による死亡及び負傷程度は、医師または検案等の判断に基づく。2016年の交通事故による軽傷は581,497人、重傷は37,356人、死亡は3,904人である。軽傷では自動車乗員（69%）、自転車（14%）の順に多い。重傷では軽傷と同様、自動車乗員（28%）が最も多いが、軽傷（69%）に比べて構成率は大いに減少する。その一方で、自転車（14%が22%）及び歩行者（7%が24%）が軽傷に比べて構成率の増加を示す。死亡では、歩行者（35%）、自動車乗車中（34%）、自転車乗員（13%）の順に多い。自転車乗員に着目すると、軽傷（14%）や死亡（13%）に比べて、重傷（22%）が最も高い構成率を示す。

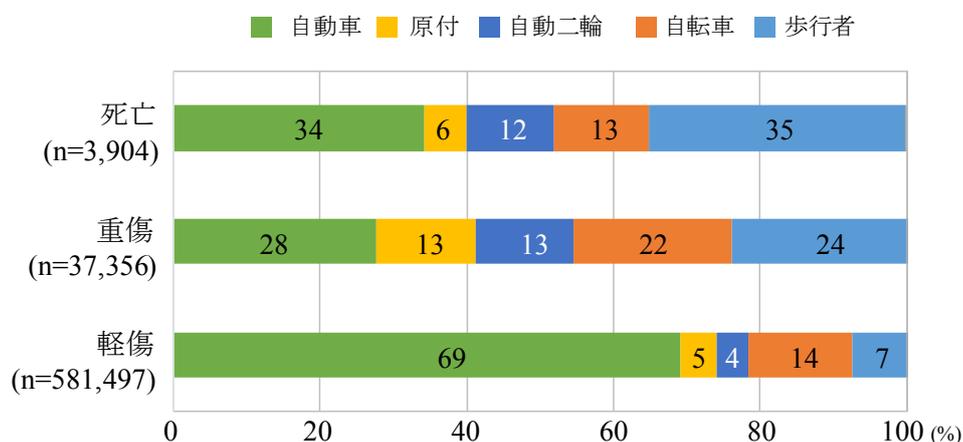


図1.5 交通事故死傷者の状態別、傷害程度別割合（2016年）[4]

2016年の自転車乗員の死傷者を年齢帯で比較すると、重軽傷では、13-39歳が47%（41,826人）を占め、その中でも特に16-19歳（12,987人、14%）の構成率が高い[4]。死亡者では、65-74歳が22%（110人）、75歳以上が46%（232人）であり、65歳以上が全体の67%を占めていた。自転車事故の場合、傷害程度により年齢帯の占める割合が異なる傾向にある。

1.2 自転車事故の特徴

1.2.1 都市部での自転車事故頻発

2015年に発生した自転車に関する交通事故件数について、都道府県別、当事者種別（第1当事者、第2当事者）に比較すると、都市部が上位を占めている[6]。当事者別

として、「過失の軽重」により、第1当事者は過失がより重いか、又は過失が同程度の場合には被害がより小さい当事者を指し、第2当事者は過失がより軽いか、または過失が同程度の場合には被害がより大きい当事者を指す。第1当事者では東京都(2,226件)が最も多く、次いで兵庫県(2,095件)、愛知県(1,733件)の順に自転車事故件数が多い。第2当事者は大阪府(11,596件)、東京都(9,415件)、愛知県(7,293件)の順に多い。第1当事者及び第2当事者合算では、大阪府(12,720件)、東京都(11,641件)、愛知県(9,026件)の順に多い。このように、自転車が関与する交通事故の発生場所は、第1当事者、第2当事者ともに人口の多い都市(東京区部、大阪市、名古屋市)を抱える都県が上位を占める。こうした都市部においては、自動車、自転車、歩行者の台(人)数が多く、道路上で遭遇する場面も多いと考えられる。

1.2.2 自転車事故の相手当事者[6]

自転車の交通事故では、主な相手当事者として、四輪車(乗用車、貨物車、トレーラー、バス等)、二輪車(自動二輪、原付等)、自転車相互、歩行者である。2006年～2015年(10年間)の自転車事故について、単年毎に相手当事者別の推移を見ると、自転車事故における相手当事者は過去10年間常に四輪車が8割以上を占める[6]。2015年の自転車事故件数は97,339件であり、相手当事者の四輪車は85%(82,403件)を占める。自転車と四輪車との衝突事故の場合、自転車乗員の方が傷害を負う可能性が高い。自転車事故件数について2015年と10年前の2006年(174,469件)を比較すると、44%の減少を示す。相手当事者別に2015年を2006年と比較すると、自転車単独(74%減)が最も減少し、対二輪車(55%減)が続く。その一方で、対歩行者(11%)は低い減少を示す。交通弱者同士(自転車対歩行者)の事故では、自転車が加害者として相手当事者に大きな傷害を与える場合もある[7]。

1.3 自転車乗員の外傷

自転車事故において、自転車乗員の傷害程度や身体の損傷部位は、衝突相手や衝突時の状況により異なる。自転車と車との衝突では、自転車乗員の方が車運転者より重症度の高い傷害を負う可能性がある。2016年の自転車乗員死亡では、損傷主部位(致命傷の部位)として頭顔部の割合が60%(307人)であった[4]。さらに、頭部外傷による脳の器質的病変が原因で、記憶障害、注意障害、遂行機能障害、社会的行動障害などの認知障害を発症するケースがあり、自転車乗員の頭部保護が重要な課題と考える。

1.3.1 頭部外傷

頭部外傷とは、頭部に外から力が加わり、頭蓋骨や脳などに損傷を来たすことである。交通事故で傷害を負った自転車乗員の場合、頭部外傷が主原因で死亡する割合が高い[4]。2016年では、自転車乗員の死亡者509人のうち、頭部外傷が主原因で死亡した自転車乗員は307人(60%)であった。自転車乗員の死亡を減少させるためには、自転車乗員の頭部外傷を十分に理解することが重要である。交通事故による主な頭部外傷として、頭蓋骨骨折、急性硬膜下血腫、急性硬膜外血腫、脳挫傷、脳内血腫、慢性硬膜下血腫、びまん性軸索損傷、脳震盪などがある[8]。

頭蓋骨骨折[9]

頭蓋における骨折の存在は、受傷時に外力が加わったことを示唆する。頭蓋骨骨折は、頭蓋円蓋部骨折と頭蓋底骨折に分類でき、頭蓋円蓋部骨折として、ひび割れ線が入る程度の線状骨折、頭蓋の内側にめりこんでしまうような陥没骨折、及び粉碎骨折がある。頭蓋底骨折の画像診断は困難とされ、随伴する脳神経損傷で臨床診断されることが多い。

急性硬膜下血腫[8][9]

外傷後数時間以内に脳の表面に出血が発生し、頭蓋骨のすぐ内側で脳を覆っている硬膜と脳表との間に血液が溜まり、ゼリー状に固まった状態を急性硬膜下血腫と呼ぶ。頭部外傷により脳の表面が損傷し、その部分の血管が破綻して出血、硬膜下に溜まるものである。脳の表面の血管の損傷が原因であることが多く、脳そのものの損傷(脳挫傷)を伴うこともある。脳の損傷はなく、血管の損傷が原因の場合は、受傷当初には発生しなかった意識障害が、血腫の増大によって徐々に発現してくることがある。死亡率は60%以上とされる。

急性硬膜外血腫[8][9]

硬膜の血管が損傷され、外傷後数時間以内に頭蓋骨と硬膜の間に出血した病態である。中硬膜動脈が走る側頭部、側頭部、頭頂部での発症が最も多く、頭蓋骨骨折を伴うことが多い。脳損傷が軽度な場合、早期に開頭血腫除去術を施行することで回復が期待される。

脳挫傷・脳内血腫[8][9]

脳挫傷とは、頭部に外力が加わることで頭蓋骨内において脳が急激に動き、脳内に損傷や出血が発生している病態である。前頭葉、側頭葉に多く発生する。具体的には、前頭葉底部(下面)や前頭極、側頭葉下面や先端部、シルビウス裂の上下の脳皮質、頭蓋陥没骨折直下の頭頂葉など頭蓋内板の凹凸の多い部分や脳鎌、テントなどと接触しやすい部位、などが好発部位で多発も多いとされる。脳挫傷に伴って出血した血が塊にな

ったものを「脳内血腫」と呼ぶ。高齢者の場合、受傷から症状出現まで時間に遅れがある。入院時の意識障害の程度により異なり、昏睡状態の重症脳挫傷（脳内血腫の合併を含む）の場合の死亡率は44%、社会復帰は31%とされる。治癒しても麻痺などの後遺症が残ることもある。

慢性硬膜下血腫[8][9]

軽度の頭部外傷後から1~2ヶ月または数カ月かけて、硬膜と脳の間にくっきりと血液が貯留する病態である。血腫が比較的しっかりと膜で覆われ、その中に液体のさらさらした薄い血液が溜まっているのが特徴である。頭痛や麻痺、高齢者では認知症などの症状が出現する。慢性の場合は脳に損傷があることはほとんどなく、脳の表面と硬膜を繋ぐ、橋静脈が傷つき、くっきりと出血を起こすと考えられている。血腫が除去できれば完治する。

びまん性軸索損傷（Diffuse Axonal Injury, DAI） [8][9]

頭部への強い外力により意識障害を呈しているにもかかわらず、頭部のCT(Computed Tomography, コンピューター断層撮影)やMRI(Magnetic Resonance Imaging, 核磁気共鳴画像法)で明らかな血腫、脳挫傷を認めない病態である。脳表面の広範囲に渡り挫傷が発生しているものと考えられる。この損傷は、強い外力で脳に回転力が生じることで、軸索が損傷すると考えられる。軸索とは、細胞から延びている突起部分で、神経細胞において信号の出力を担うものである。死亡率は60%とされ、回復した場合でも、後遺症として麻痺や記憶力の低下などが見られる。

脳震盪[8][9]

頭部外傷後に一時的に意識を失った状態である。症状としては、頭痛や受傷前後の記憶の喪失という健忘症が見られる。そうした意識障害が発生したが、頭部CTやMRIの検査において脳の中に異常を認めない場合、脳震盪と診断される。

1.3.2 頭部外傷による意識障害[10]

頭部外傷による障害として、意識障害がある。意識障害とは、意識清明でなくなった状態である。意識清明とは意識がある状態であり、「覚醒」していること、周囲を「認識」できること、開眼、言語、動作などで外界からの刺激や情報に「反応」できる状態である。意識障害を厳密に定義することは困難であるため、意識評価スケールが用いられる。その基本的な考え方として、「覚醒」「運動反応」「意識内容」の3つの要素に意識を分類し評価する。「覚醒」とは、動物と共通の意識要素として「目が覚めている（目を開けている）」という状態であり、覚めていない場合は覚醒させるのに必要な刺激の強さに応じて意識障害の程度を判断する。繰り返し強い刺激を加えることで覚醒するよ

うな状態を「昏迷」、強い刺激や痛みなどに対しても覚醒しないことを「昏睡」、あらゆる刺激に対して全く反応のない状態を「深昏睡」と呼ぶ。「運動反応」とは、外界からの刺激に対する顔面や手足の動作による反応の度合を指す。命令に従う、異常な反応など、段階に応じて傷害の程度が分類される。「意識内容」とは、人間に固有の認識内容として、自身の所在する場所、時間、自身の認識の程度を示す。障害がある場合は発語する言語内容、発語がない場合は発声の有無等に応じて障害の程度が分類される。急性期の意識障害の評価として代表的な指標に、英国のグラスゴー・コーマ・スケール (Glasgow Coma Scale, GCS) がある[11]。その評価点数付与の方法を表 1.1 に示す。1947年に英国のグラスゴー大学によって発表された意識障害の分類で、世界的に広く使用される評価分類スケールである。「開眼 (E)」、「言語 (V)」、「運動 (M)」の3分野に分けて記録し、意識状態の簡潔かつ的確な記録が可能とされている。この評価法では、3つの要素の和で総合的に意識レベルを表現でき、意識清明の場合には15点満点となり、最も悪い意識レベル(深昏睡)の場合には3点となる。しかし、この評価法は3つの要素を独立して評価するため、各要素の組合せは(4×5×6)で120通り存在し、同じ合計点数でも、意識レベルが異なる可能性がある。

表 1.1 GCS 評価点数付与の方法[10]

E: eye opening (開眼)	
4点	自発的に開眼
3点	言葉により開眼
2点	痛み刺激により開眼
1点	開眼しない
V: best verbal response (最良言語反応)	
5点	見当識あり
4点	混乱状態
3点	不適當な発語
2点	理解不明の音声
1点	発語なし
M: best motor response (最良運動反応)	
6点	命令に従う
5点	痛み刺激部位に手足を持ってくる
4点	痛み刺激から逃避する
3点	痛み刺激に対して屈曲運動を示す
2点	痛み刺激に対して伸展運動を示す
1点	痛み刺激に対して反応なし

さらに、頭部外傷による後遺障害として、高次脳機能障害がある[12]。高次脳機能障害は、脳の器質的病変による認知障害（記憶障害、注意障害、遂行機能障害、社会的行動障害など）を有した人たちへの支援対策を推進するため、厚生労働省が行政上の疾患区分として導入した用語である。高次脳機能障害は幅広い概念で、全般的障害としての急性期の意識障害や、部分的障害としての失語、失行、失認、記憶障害、注意障害が含まれる。高次脳機能障害患者に対して診断基準が設けられており、すべての要件を満たした場合、高次脳機能障害者として認定される（表 1.2）。東京都が高次脳機能障害者の実態を把握するため、2008年に東京都の全病院、診療所（通院、入院、退院患者）及び患者本人を対象に、アンケートによる高次脳機能障害実態調査を実施している[13]。その結果、高次脳機能障害となった原因疾患（脳外傷、脳血管障害）は、通院患者では脳外傷が10%（90人）であったが、年齢別にみると、29歳以下は脳外傷の方が脳血管障害より多い結果であった。受傷時のGCSに関するアンケート回答では、入院患者（12人）の場合、GCS評価の軽度（15～13点）が58%（7人）、中程度（12～9点）が17%（2人）、重度（8～3点）が25%（3人）であった。さらに、退院患者の88人の場合、軽度（15～13点）が49%（43人）で最も多く、重度（8～3点）が28%（25人）中程度（12～9点）が23%（20人）であった。従って、これらのアンケート回答から、受傷直後の急性期に意識障害を発症した場合、退院後に高次脳機能障害になる可能性が考えられる。高次脳機能障害の場合、脳の器質的病変の存在が明らかにできない症例など、その認定には慎重な評価が求められ、長期の医学的及び社会的リハビリテーションを必要とするが、高次脳機能障害に十分に対応可能な病院も少ない。さらに、高次脳機能障害患者において、外見から患者の障害の性質や程度を診断できない上、画像診断などの客観的検査所見が困難な場合がある。自転車事故による高次脳機能障害者の実態や、自転車事故と高次脳機能障害との関係なども、明らかになっていない状況にある。

表 1.2 高次脳機能障害の判断基準[12]

I. 主要症状等	
1)	脳の器質的病変の原因となる事故による受傷や疾病の発症の事実が確認されている。
2)	現在、日常生活または社会生活に制約があり、その主たる原因が記憶障害、注意障害、遂行機能障害、社会的行動障害などの認知障害である。
II. 検査所見	
MRI、CT、脳波などにより認知障害の原因と考えられる脳の器質的病変の存在が確認されているか、あるいは診断書により脳の器質的病変が存在したと確認できる。	
III. 除外項目	
1)	脳の器質的病変に基づく認知障害のうち、身体障害として認定可能である症状を有するが上記主要症状（1-2）を欠く者は除外する。
2)	診断にあたり、受傷または発症以前から有する症状と検査所見は除外する。
3)	先天性疾患、周産期における脳損傷、発達障害、進行性疾患を原因とする者は除外する。
IV. 診断	
1)	I～IIIをすべて満たした場合に高次脳機能障害と診断する。
2)	高次脳機能障害の診断は脳の器質的病変の原因となった外傷や疾病の急性期症状を脱した後に行う。
3)	神経心理学的検査の所見を参考にすることができる。

1.4 自転車事故削減のための対策

1.4.1 自転車運転者の交通ルールに対する意識

交通事故の発生要因には、自転車乗員（自転車の運転者）の交通ルール違反やマナーの欠如も影響していると考えられる。2015年6月に施行された道路交通法一部改正により、自転車の交通違反について、罰則規定が強化された。自転車乗車中に信号無視等の危険行為（14の危険行為）を行い、警察による交通違反の取り締まり、または交通事故で3年以内に2回以上摘発された場合、公安委員会から3カ月以内の指定された期間内に自転車運転者講習会の受講が命じられる。その受講命令に従わなかった場合は5万円以下の罰金が課せられる。「14の危険行為」を表1.3に示す。

表 1.3 自転車の14の危険行為（2015年6月1日付け道路交通法一部改正）

1)	信号無視	8)	交差点優先車妨害等
2)	通行禁止違反	9)	環状交差点安全進行義務違反等
3)	歩行者用道路における車両の義務違反（徐行違反）	10)	指定場所一時不停止等
4)	通行区分違反	11)	歩道通行時の通行方法違反
5)	路側帯通行時の歩行者の通行妨害	12)	制動装置（ブレーキ）不良自転車運転
6)	遮断踏切立入り	13)	酒酔い運転
7)	交差点安全進行義務違反等	14)	安全運転義務違反

国土交通省、警察庁は「安全で快適な自転車利用環境創出ガイドライン」（2012年11月）を作成し、全国市区町村における積極的な自転車ネットワークの計画策定や、安全で快適な自転車利用環境整備の促進する一方、自転車の通行ルールの徹底などを目指している。東京都では、2017年2月から改正自転車安全利用条例が施行され、自転車小売り業者による安全利用の啓発の義務規定が新たに設けられた。自転車購入時、購入者に対して販売店からチェックシート等を用いた交通ルールの説明がされることになる。各自治体が主催者となり、交通ルールの遵守と安全運転マナーの向上を目指した講習会や、特に高齢者を対象にした交通安全教室も実施されている（図1.6(a)）。さらに、主に中学生を対象に、自転車事故の恐怖と責任を体験することで、自転車事故につながる危険行為を未然に防ぎ、交通ルールを遵守することの大切さを学ぶ教育方法として、スケアード・ストレイト方式（スタントマンによる交通事故再現）による自転車安全教室が広く実施されている（図1.6(b)）。しかし、自転車講習会や安全教室への参加者は自転車利用者の一部である。また、スケアード・ストレイト方式について、実際の自転車の交通ルール遵守等への効果を論じた学術論文はほぼ存在しない現状にある。



(a) 自転車講習会

(b) スケアード・ストレイト自転車安全教室

図 1.6 自転車交通ルールを学ぶための教育

1.4.2 自転車用ヘルメット

自転車乗員の頭部保護対策の1つとして、自転車用ヘルメットがある。自転車用ヘルメットのデザインは、自転車乗員頭部の落下時の衝撃を減らすような機能とともに、自転車走行中の体温上昇による頭部の温度調整から、軽量で通気性の機能も考慮されている。自転車用ヘルメットは、日本工業規格（Japanese Industrial Standard, JIS T8134）により、ヘルメットの形状や保持性、衝撃吸収性などの規格が規定されている[14][15]。また、自転車用ヘルメットの安全基準については、一般財団法人製品安全協会により規定されている[16]。日本では、2008年6月の道路交通法改正により、幼児及び児童（13歳未満）に対する自転車用ヘルメットの着用努力義務が施行された（道路交通法 第63条の10）。大阪府では、2016年4月の大阪府の条例により、65歳以上の高齢者のヘルメット着用が義務化された。大阪府の自治体（堺市、松原市など）によっては、自転車用ヘルメット購入補助の助成金制度も施行されている。東京都では、2017年2月施行の改正自転車安全利用条例により、自転車小売り業者によるヘルメット着用の啓発が義務規定に含まれている。その一方で、東京都市整備局が東京都民を対象に Web で実施した「東京都自転車・歩行者の利用実態 Web アンケート」（2015年）の結果では、自転車利用時のヘルメットは「着用しない」という回答が93%であった。このように、日本における自転車用ヘルメット着用の推奨や義務化については、自治体により異なる。海外では、オーストラリア、カナダ、ニュージーランドの一部などで自転車のヘルメット着用が義務化されている。

1.4.3 道路環境整備

自転車を取り巻く交通環境においては課題が多い状況にある。日本において自転車は「軽車両」として車道通行が大原則とされているが、自転車専用道はまだ開発の途上である。自転車の交通事故削減のため、自転車が安全で快適に利用できるような走行空間

の整備を目指し、国土交通省は、交通安全対策基本法（1970年制定）による「交通安全基本計画」に基づき、「自転車通行空間（自転車道、自転車専用通行帯等）の整備」、その整備を計画的に推進するための「自転車ネットワーク計画策定の推進」などを実施している。自転車通行空間の整備では、車道通行を基本とした3つの整備形態（自転車道、自転車専用通行帯、車道で自動車と混在する方法）が選定されている（図1.7）。この整備により、自転車事故が自転車道で約3割、自転車専用通行帯で約4割削減など、その効果が確認されている[2]。しかし、自転車専用道路などの整備には予算や時間を要する。対象モデル地域が限定されている上、自転車専用道路は断片的で連続性が図られていない地区もある。既成の市街地等では、新たに用地を取得して自転車通行空間を確保することは困難であり、自転車通行空間の整備を推進する上で大きな課題となっている。

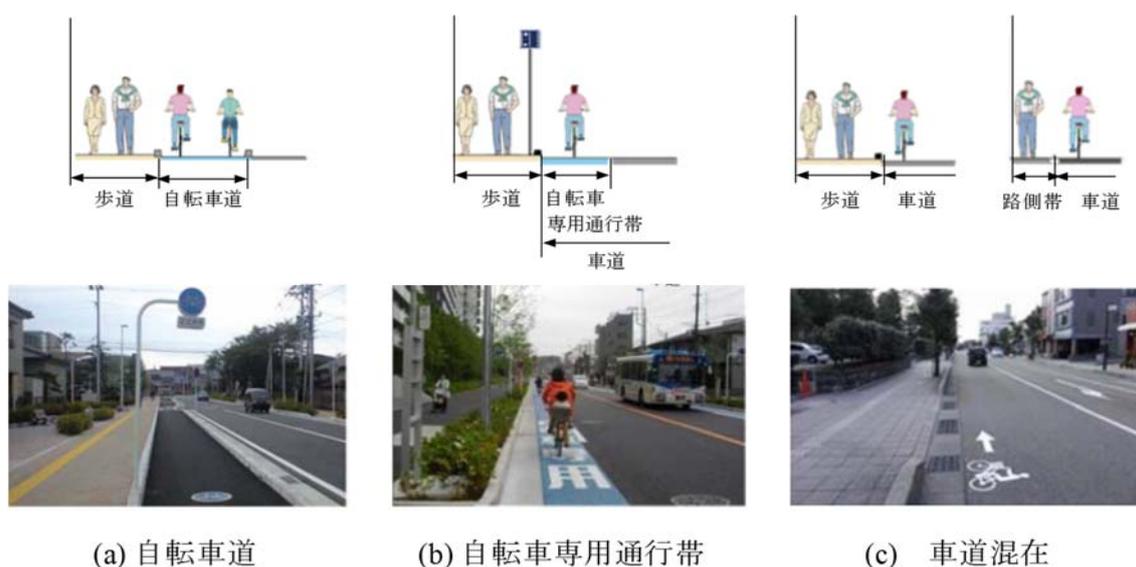


図 1.7 自転車ガイドラインに示された基本的な整備形態[2]

1.5 研究目的

交通弱者としての自転車乗員は、車や歩行者と共存する交通社会において、前項で紹介した対策が十分とは言い難い状況である。自転車と車の衝突では自転車乗員が受傷する可能性が高いが、自転車乗員保護に特化した車への法規は現時点で採用がない。事故防止対策を講じるためには、交通事故発生要因及び事故と自転車乗員外傷との関係解明が必要だが、それらは十分に解明されていない。特に、自転車乗員の頭部外傷による重症化は対策すべき重要な課題である。そこで、本研究では自転車乗員の頭部外傷に着目し、自転車事故の環境的・人為的要因、事故と頭部外傷との関係、自転車乗員の年齢と頭部外傷の関係等の多角的視点から潜在する問題点を明確にし、自転車乗員頭部外傷の

発生要因解明により有効な頭部保護対策を模索することを目的とする。

1.6 本論文の構成

本論文は6章からなり、全体の構成を図1.8に、その概要を以下に示す。また、本論文では、図・表・式について章を単位として通し番号を付けている。

第1章 緒論

第2章 東京都特定エリアにおける自転車調査

東京都の一つの市を対象とし、自転車事故の発生要因について3つの調査手法を経て分析する。(1) 自転車利用者アンケート、(2) 自転車交通事故の実態調査、(3) ビデオ撮影による交差点での自転車走行状況調査を実施する。(1)、(2)、(3)の分析から、自転車の走行速度、障害物による死角の存在、道路環境で共存する車の存在など、自転車事故発生に至る環境的要因を解明する。

第3章 自転車事故の頭部外傷の実態調査

日本全国で発生した自転車交通事故データ（警察庁）及び救命救急センターに搬送された患者データ（医療機関）を基に、自転車乗員外傷の特性を身体部位別に整理し、頭部外傷の特性を明確にする。

第4章 頭部外傷発症予測のための衝撃実験

自転車乗員の頭部外傷の起因として車及び路面との衝突に着目し、人間の頭部を模した頭部インパクトと自転車用ヘルメットを使用し、車及び路面への衝撃実験を実施する。頭部インパクトを使用し、頭部が車や路面へ衝突した時の頭部傷害 HIC（Head Injury Criterion）値で評価する。さらに、頭部インパクトにヘルメットを着用させ、衝撃実験によりヘルメット着用効果を評価する。

第5章 有限要素モデル解析

路面との衝突による自転車乗員の頭部外傷及びヘルメット着用効果に着目し、有限要素モデルを用いて、頭蓋骨骨折や脳傷害の発症及びヘルメット効果を予測する。

第6章 結言

本論文の結論として各章で得られた成果を総括的にまとめ、今後必要とされる研究課題及び今後の展望について述べる。

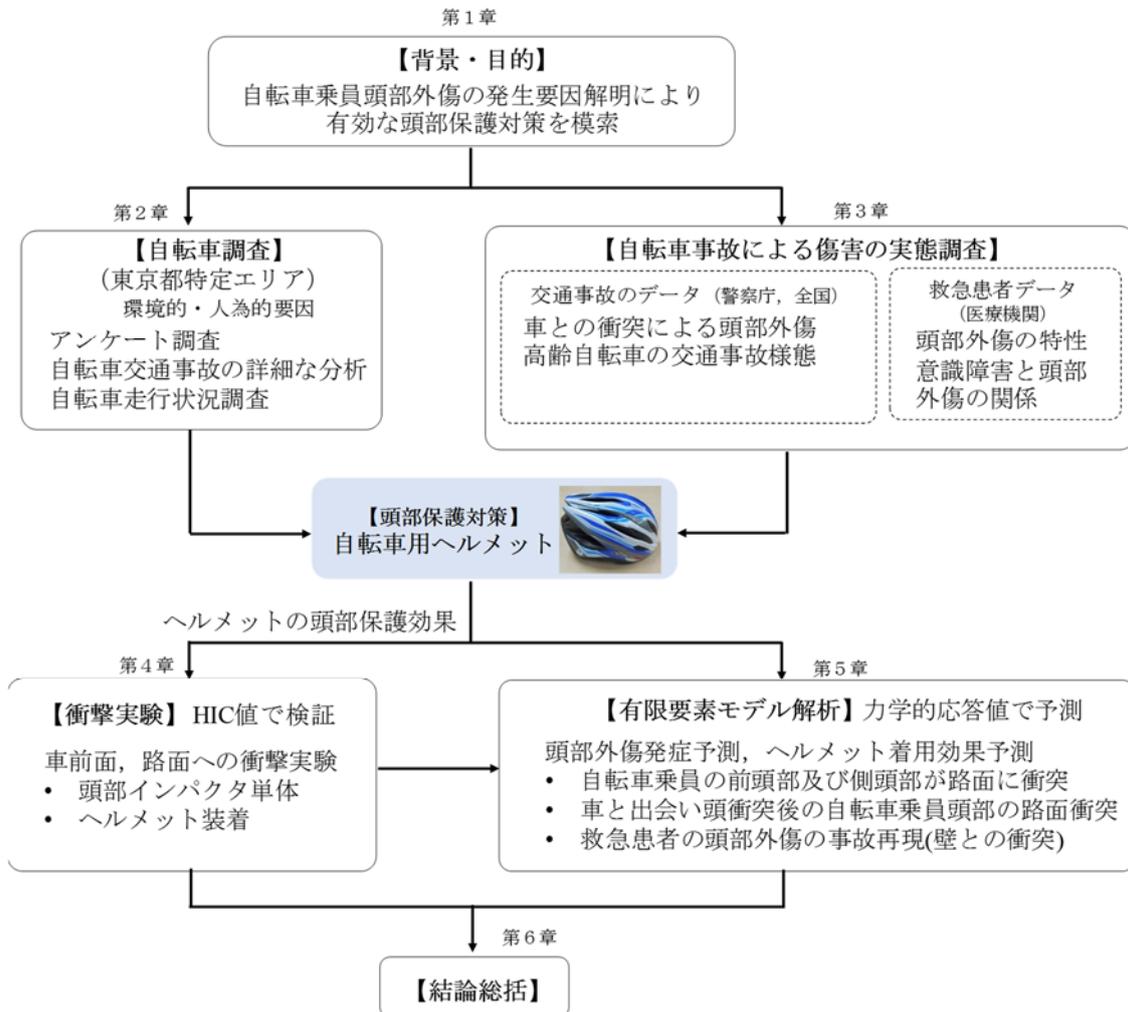


図 1.8 本論文全体の構成

第2章

東京都の特定エリアにおける自転車調査

2.1 諸言

本研究では、東京都の1つの市（M市と呼称）を対象とし、自転車事故の発生要因について次の3つの調査手法を経て分析した。(1) 自転車利用者アンケート調査、(2) 自転車交通事故の詳細な分析、(3) ビデオ撮影による交差点での自転車走行状況調査、である。2014年の東京都区市町村別の自転車事故関与率（事故総件数に対する自転車関与事故の割合）において、東京都の中でM市は上位から7番目に自転車事故が多い[17]。本調査では、都市部における特定のエリアに焦点をあて、自転車乗員の行動・意識等を把握し、自転車事故の特徴を分析した上で、自転車走行状況の実態を調査することで、自転車頭部外傷の発生要因を明確にし、事故発生に至る環境的・人為的要因を解明することを目的とする。

2.2 自転車利用者アンケート調査

2.2.1 解析方法

M市では、市内在住の自転車利用者を対象に、M市主催の自転車安全講習会が、1年間に数回、市内のコミュニティーセンター等の会場で実施されている。本調査では、自転車安全講習会の出席者を対象にアンケートを実施した。講習会場入場時に、出席者全員にアンケート用紙を配布し、回答は無記名の記入式として講習会終了後に回収した。アンケートの記入可能な時間が限定されていることを考慮し、異なる質問項目により2種（アンケートA、アンケートB）用意した。アンケートAの質問項目は表2.1(a)に、アンケートBの質問項目は表2.1(b)に示す。「質問1」から「質問6」は、アンケートA、アンケートBにおいて共通の質問内容とした。アンケートAは、2013年及び2014年の自転車安全講習会の出席者を対象に、計5回実施した。アンケートBは、2015年の自転車安全講習会の出席者を対象に、計2回実施した。本アンケートは、東京都三鷹市役所の許可を取得し、実施した。

表 2.1 アンケート質問項目

(a) アンケート A

全ての方への質問		回答
問1	あなたの性別をお答えください	1つ選択
問2	年齢をお答えください	1つ選択
問3	ご職業をお答えください	1つ選択
問4	自動車の運転免許をお持ちですか	1つ選択
問5	どのくらい自転車を利用していますか	1つ選択
自転車を利用している方のみお答え下さい.		回答
問6	自転車をよく利用する時間帯はいつですか	複数回答可
問7	あなたが車道を自転車で走行する場合、危険に感じるのはどんなときですか	2つまで選択可
問8	あなたが歩道を自転車で走行する場合、危険に感じるのはどんなときですか	2つまで選択可
問9	他者が自転車で走行しているのを見て、あなたが危険に感じる自転車の行動は何ですか	2つまで選択可
問10	自転車事故をなくすために、重要だと思ふ施策を教えてください	上位2つ選択

(b) アンケート B

全ての方への質問		回答
問1	あなたの性別をお答えください	1つ選択
問2	年齢をお答えください	1つ選択
問3	ご職業をお答えください	1つ選択
問4	自動車の運転免許をお持ちですか	1つ選択
問5	どのくらい自転車を利用していますか	1つ選択
自転車を利用している方のみお答え下さい.		回答
問6	自転車をよく利用する時間帯はいつですか	複数回答可
問7	普段、自転車で車道、歩道どちらを通行することが多いですか	1つ選択
問8	自転車で車道を通行するとき、どちら側を通行することが多いですか	1つ選択
問9	夜、自転車を利用するとき、ライトは点灯させますか	1つ選択
問10	電動アシスト自転車(モーターでペダルを踏む力を補助する自転車)を利用していますか	1つ選択
問11	自転車の交通事故をなくすために、何が大切だと思いますか	複数回答可

2.2.2 アンケート回答者の属性

アンケート A では 304 人、アンケート B では 213 人からそれぞれ有効回答を得た。両アンケートの回答者について、男女別構成率を図 2.1 に示す。アンケート A では男性が 50.3%、女性が 47.4%であり、アンケート B では男性が 37.1%、女性が 58.2%の構成率であった。

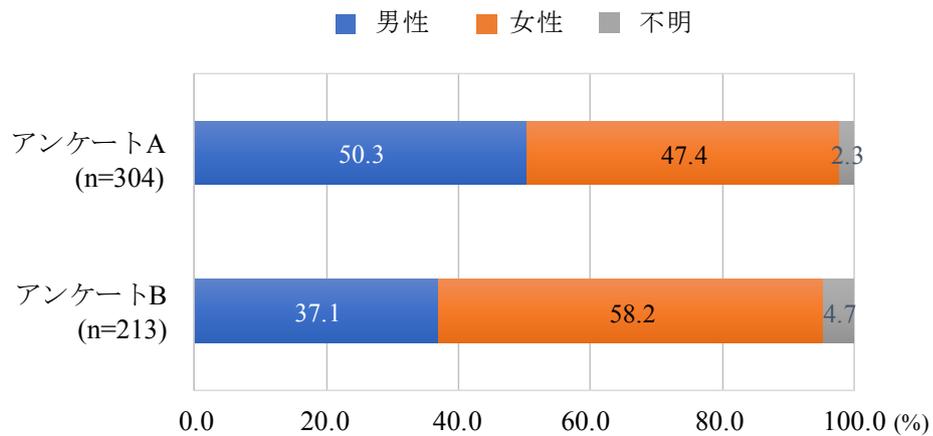
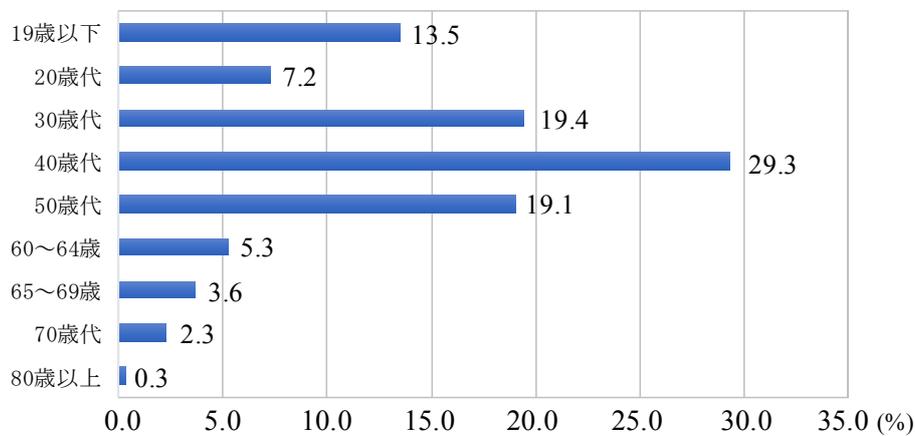


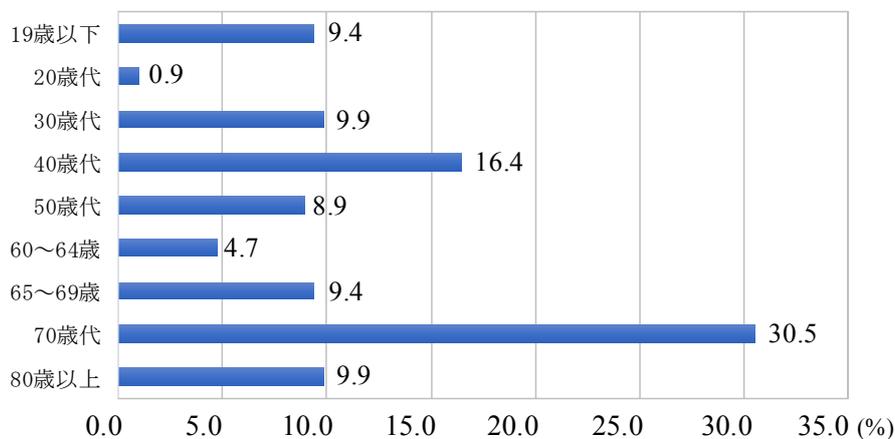
図 2.1 男女別構成率

アンケート別に、回答者の年齢帯別構成率を図 2.2 (a) (b) に示す。回答者の最も多い年齢帯は、アンケート A では 40 歳代 (29.3%)、アンケート B では 70 歳代 (30.5%) であった。2 番目に多いのは、アンケート A では 30 歳代 (19.4%)、アンケート B では 40 歳代 (16.4%) であった。



(a) アンケート A (n=304)

(図 2.2 年齢帯別構成率)



(b) アンケート B (n=213)

図 2.2 年齢帯別構成率

回答者の職業別構成率を図 2.3 に示す。最も多い職業は、アンケート A では会社員・公務員 (53.6%)、アンケート B では主婦 (32.9%) であった。2 番目に多い職業は、アンケート A では主婦 (16.8%)、アンケート B では会社員・公務員 (22.5%) であった。

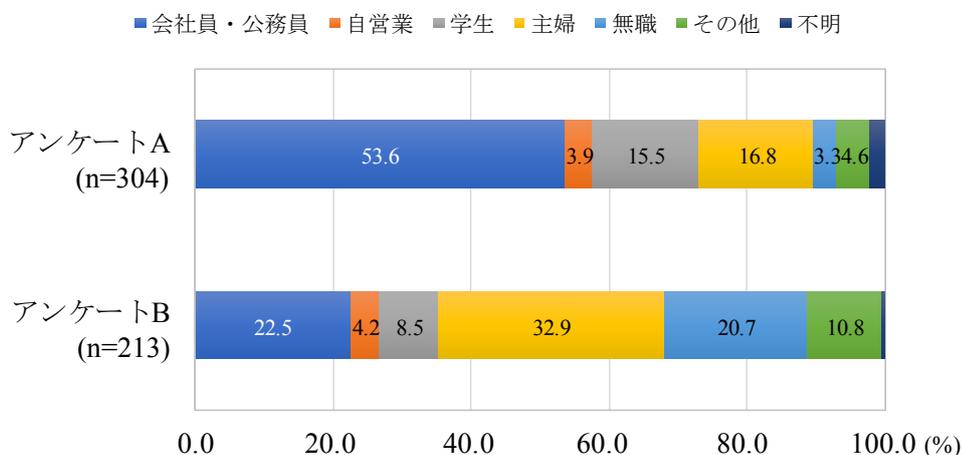


図 2.3 職業別構成率

回答者の普通運転免許の取得有無別構成率を図 2.4 に示す。アンケート A では、普通運転免許「取得有り」(72.7%) の方が、「取得無し」(22.0%) より多かった。アンケート B においても、普通運転免許「取得有り」(51.6%) の方が、「取得無し」(46.5%) より僅かに多かった。

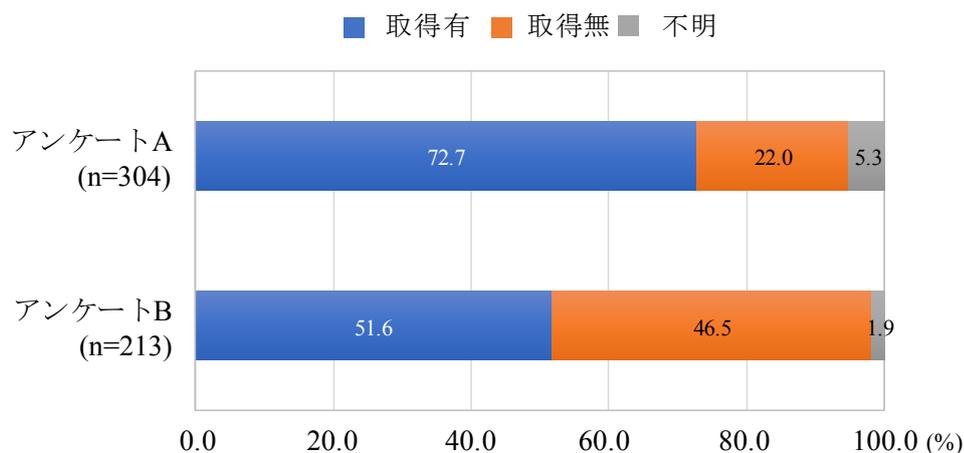


図 2.4 普通運転免許の取得有無別構成率

回答者の自転車利用頻度の構成率を図 2.5 に示す。最も多かったのは、アンケート A では「ほぼ毎日」(73.7%)，アンケート B でも「ほぼ毎日」(58.7%) であった。2 番目に多かったのは，アンケート A では「1 週間に 3~4 回」(10.2%)，アンケート B でも「1 週間に 3~4 回」(14.1%) であった。

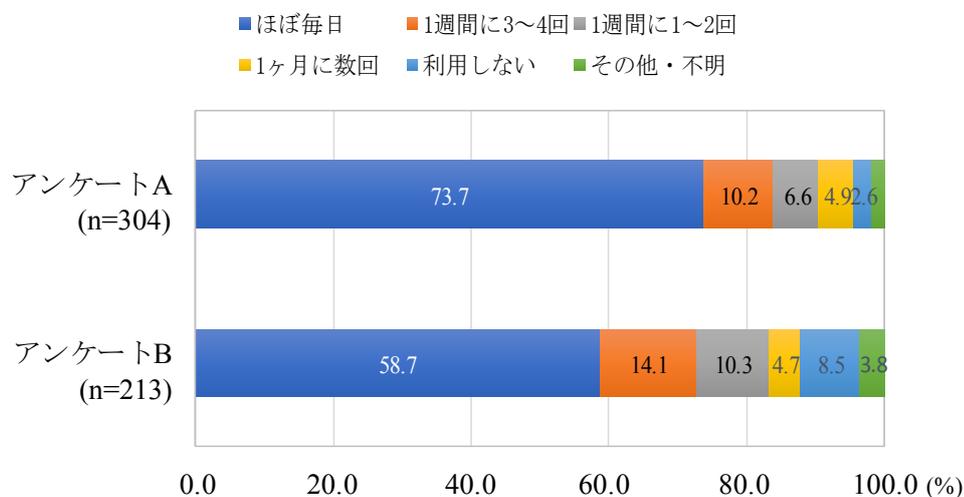
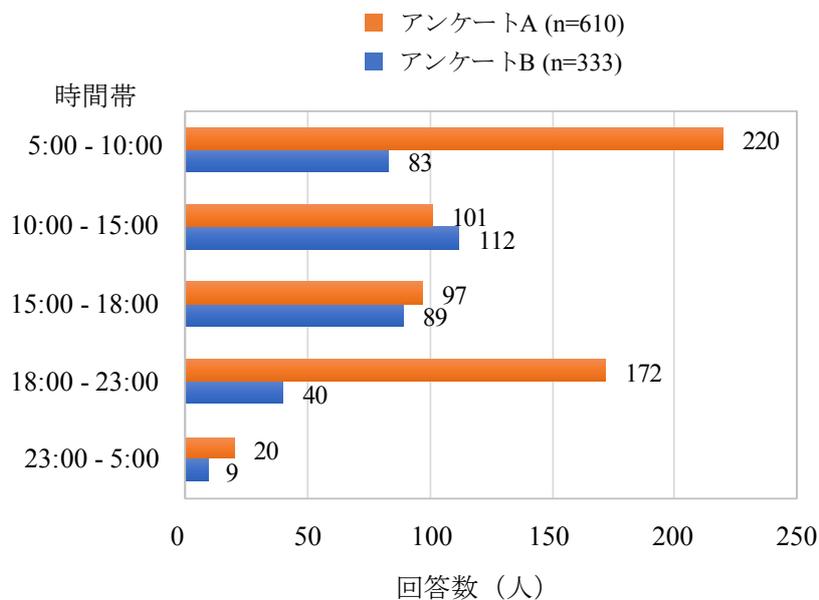


図 2.5 自転車利用頻度の構成率

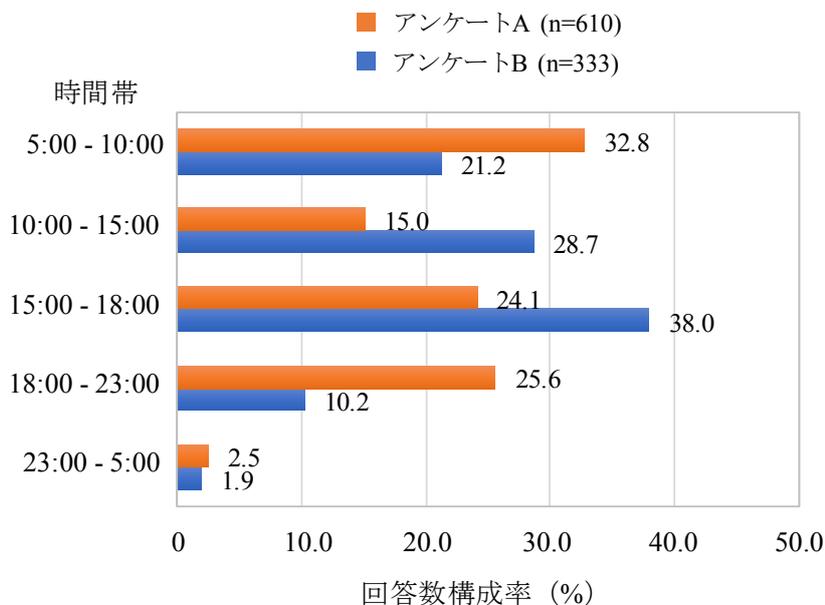
2.2.3 アンケート結果

「自転車を利用するのはどの時間帯が多いですか」の質問に対する回答数(複数回答可)を図 2.6(a) に示す。最も多かったのは，アンケート A では「5:00-10:00」(220 人)，アンケート B では「10:00-15:00」(112 人) であった。2 番目に多かったのは，アンケート A では「18:00-23:00」(172 人)，アンケート B では「15:00-18:00」(89 人) であった。アンケート A 及びアンケート B を合算すると，「5:00-10:00」(303 人) の時間帯が最も

回答数が多かった。選択肢に指定した時間範囲に差があることから、各時間帯における1時間単位の平均回答数についてアンケート種別に構成率を算出し、その結果を図2.6(b)に示す。最も多かったのは、アンケートAが「5:00-10:00」(1時間単位32.8%)、アンケートBでは「15:00-18:00」(1時間単位38.0%)であった。



(a) 時間帯別回答数



(b) 時間帯別、1時間単位での平均回答数構成率

図2.6 質問：自転車を利用するのはどの時間帯が多いですか（複数回答可）

「あなたが車道を自転車で走行する場合、危険に感じるのはどんなときですか」の質問に対する回答(2つまで選択可)の構成率を図 2.7 に示す。「車に追い越される」(29.0%)、「車の交通量が多い」(27.3%)、「車の速度が速い」(20.7%) の順で多かった。

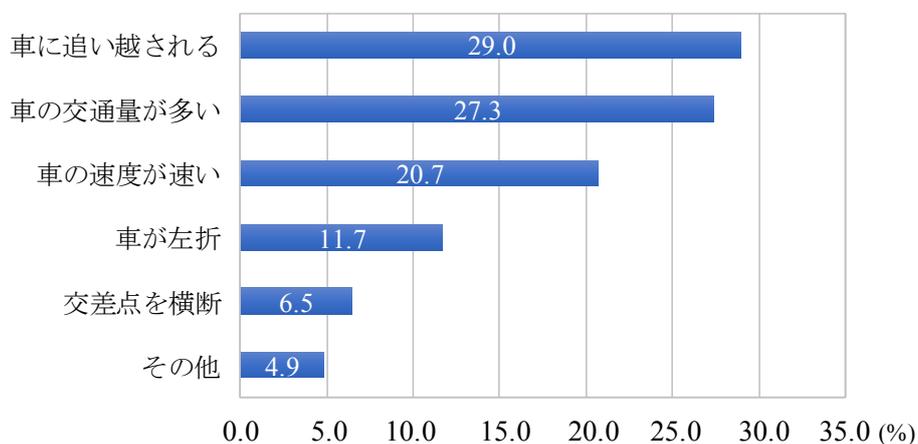


図 2.7 質問：あなたが車道を自転車で走行する場合、危険に感じるのはどんなときですか (アンケート A, 2つまで選択可; n=556)

「あなたが歩道を自転車で走行する場合、危険に感じるのはどんなときですか」の質問に対する回答(2つまで選択可)の構成率を図 2.8 に示す。「歩道が狭いとき」(37.2%)、「歩行者が多いとき」(29.5%)、「路肩が狭いとき」(24.4%) の順で多かった。

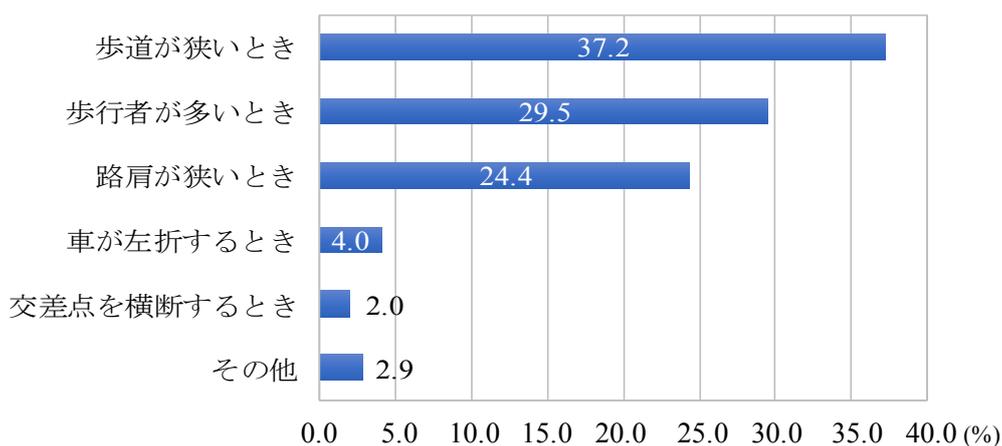


図 2.8 質問：あなたが歩道を自転車で走行する場合、危険に感じるのはどんなときですか (アンケート A, 2つまで選択可; n=546)

「他者が自転車で走行しているのを見て、あなたが危険に感じる自転車の行動は何ですか」の質問に対する回答(2つまで選択可)の構成率を図 2.9 に示す。「携帯電話使用」

(23.3%), 「夜間無灯火」(22.6%), 「信号無視」(17.0%) の順で多かった。

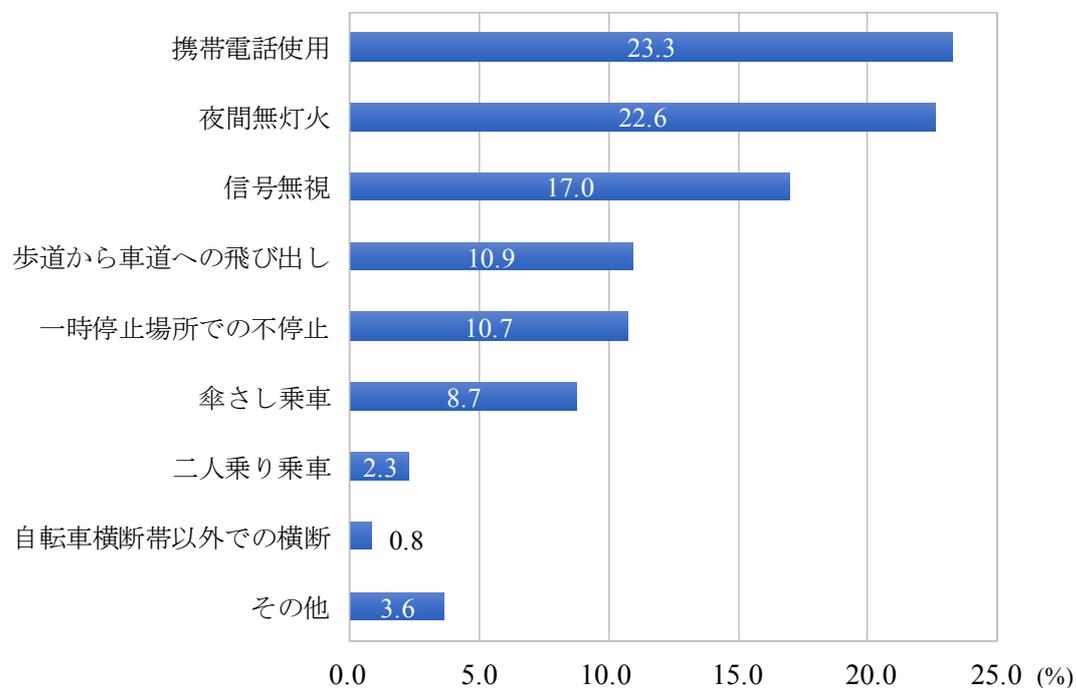


図 2.9 質問：他者が自転車で走行しているのを見て、あなたが危険に感じる自転車の行動は何ですか（アンケート A, 2つまで選択可; n=606）

「普段、自転車で車道、歩道どちらを通行することが多いですか」の質問に対する回答（1つ選択）の構成率を図 2.10 に示す。「歩道が多い」(40.6%), 「車道・歩道同程度」(33.7%), 「車道が多い」(24.6%) の順で多かった。

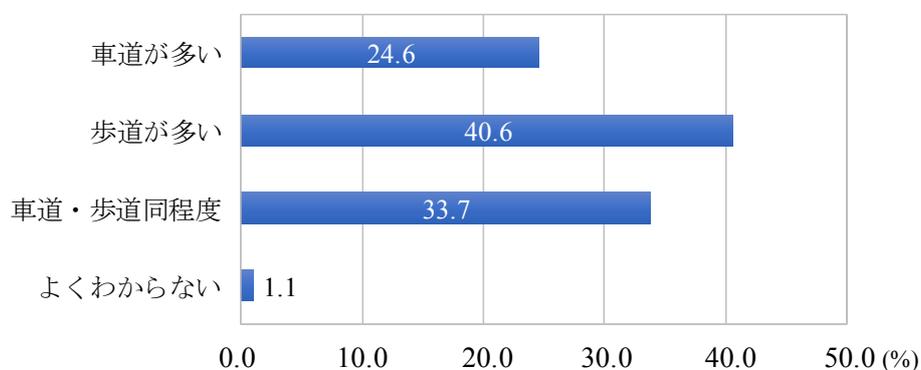


図 2.10 質問：普段、自転車で車道、歩道どちらを通行することが多いですか（アンケート B, 1つ選択; n=187）

「自転車で車道を通行するとき、どちら側を通行することが多いですか」の質問に対する回答（1つ選択）の構成率を図 2.11 に示す。「左側」（86.8%）が最も多かった。

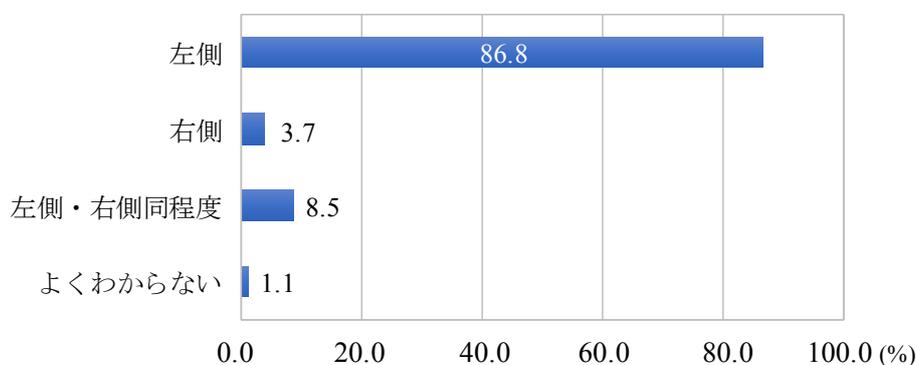


図 2.11 質問：自転車で車道を通行するとき、どちら側を通行することが多いですか
(アンケート B, 1つ選択; n=189)

「夜、自転車を利用するときライトは点灯させますか」の質問に対する回答（1つ選択）の構成率を図 2.12 に示す。「必ず点灯させる」（93.6%）が最も多かった。

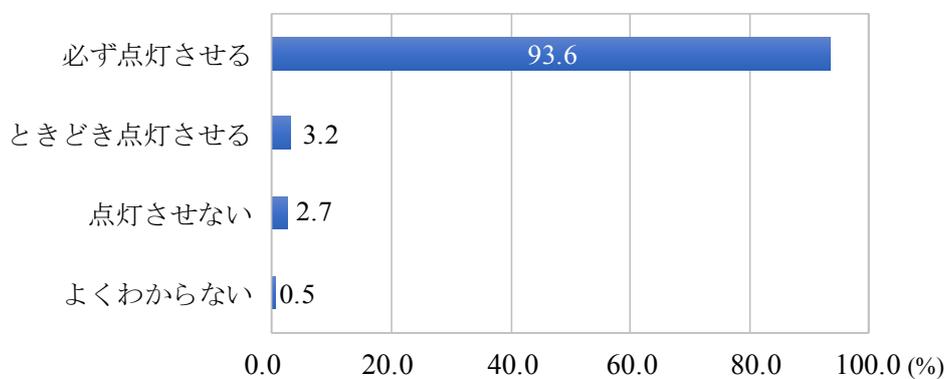


図 2.12 質問：夜、自転車を利用するときライトは点灯させますか
(アンケート B, 1つ選択; n=189)

「電動アシスト自転車（モーターでペダルを踏む力を補助する自転車）を利用していますか」の質問に対する回答（1つ選択）の構成率を図 2.13 に示す。「利用していない（今後も利用は考えていない）」（53.8%）、「利用していない（興味あり、利用してみたい）」（32.6%）、「利用している」（13.6%）の順に多かった。

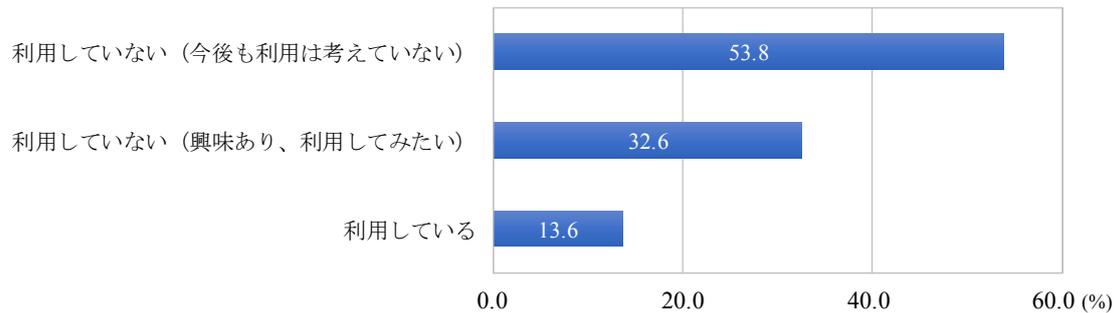


図 2.13 質問：電動アシスト自転車（モーターでペダルを踏む力を補助する自転車を
利用していますか（アンケート B, 1つ選択; n=184）

「自転車の交通事故をなくすために、何が大切だと思いますか」の質問に対する回答（複数回答可）の構成率を図 2.14 に示す。最も多かったのは、アンケート A では「自転車の専用道路の整備」(40.6%)、アンケート B では「自転車のルール・マナーの周知」(37.4%)であった。次に多かったのは、アンケート A では「自転車のルール・マナーの周知」(36.0%)、アンケート B では「自転車のルール・マナーの周知」(37.4%)であった。

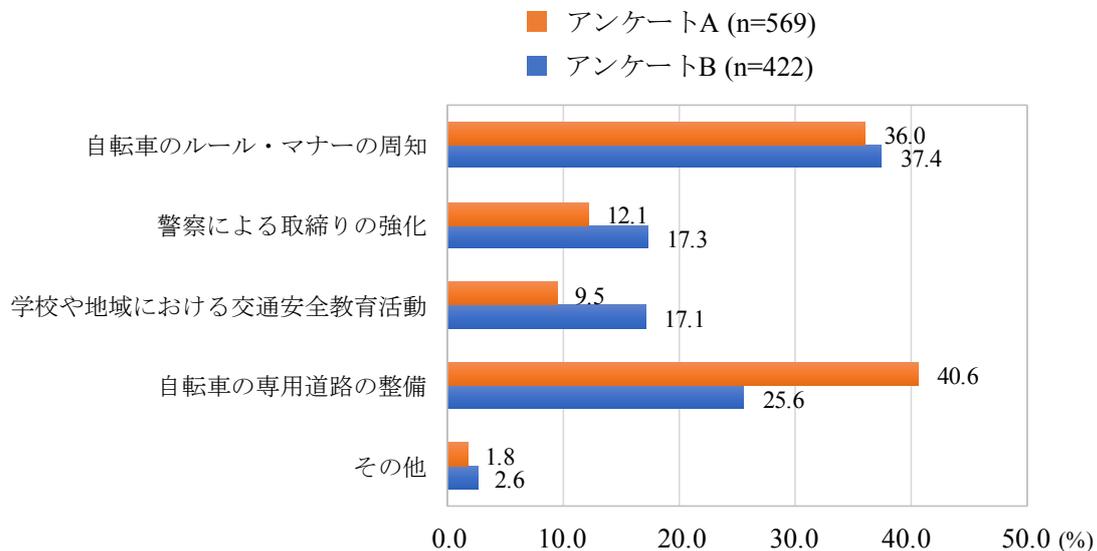


図 2.14 質問：自転車の交通事故をなくすために、何が大切だと思いますか
(アンケート A, B, 複数回答可)

2.2.4 考察

自転車の利用時間帯に関する回答において、最も回答数が多い時間帯はアンケート A とアンケート B で異なった。各時間帯における 1 時間当たりの平均回答数で比較する

と、アンケート A では「5:00-10:00」(1時間単位 32.8%) が最も多く、アンケート B では「15:00-18:00」(1時間単位 38.0%) が最も多かった(図 2.6 (b)). アンケートによる最多の時間帯の違いは、回答者の職業と関係があると考えられる。アンケート A では、「会社員・公務員」(53.6%) が最も多く、アンケート B では、「主婦」(32.9%) が最も多かった(図 2.3). 職業により自転車を利用する時間帯が異なることを示唆する。

自転車利用者が車道を自転車で走行中に危険に感じるのは、「車に追い越される」、「車の交通量が多い」、「車の速度が速い」状況において、車の存在に危険を感じていることが判明した(図 2.7). 東京都の場合、道路幅が狭く交通量の多い道路が多数存在し、車と並走する自転車に対して十分な環境(道路幅)が確保されていないと考えられる。通常利用している走行帯に関して、「歩道が多い」(40.6%)、「車道・歩道同程度」(33.7%)、「車道が多い」(24.6%)の順に多かった(図 2.10). アンケート B は 2015 年 5 月に 2 回実施しており、2015 年 6 月 1 日の改正道路交通法が施行される前月である。既に施行されてから 2 年程経過しており、現状では走行帯の傾向が異なる可能性がある。道路交通法では、原則、自転車の車道走行が規定されており、2015 年 6 月 1 日に施行された改正道路交通法により、危険行為を行い 3 年以内に 2 回以上摘発された自転車運転者には講習の受講が義務付けられた。今後、自転車の車道走行頻度も高くなることで、車に対して危険に感じる場面が増え、衝突事故に繋がる危険性の増加が懸念される。

他者が「携帯電話使用」しながら自転車で走行しているのを見て、危険に感じる自転車利用者は 23.3%であった。最近では、携帯電話からスマートフォン利用者が増加傾向にあるが、スマートフォンの場合、通話だけでなく音楽を聴くことも可能である。携帯電話やスマートフォンの使用は、2015 年 6 月 1 日に施行された改正道路交通法では危険行為として禁止されているが、実際、どの程度、交通ルールが遵守されているのか不明である。今後、自転車乗車中のスマートフォン使用有無の実態など、2015 年改正後の交通ルール遵守について調査する必要がある。

電動アシスト自転車の利用は、アンケート結果では 13.6%であったが、「利用していない(興味あり、利用してみたい)」の回答が 32.6%であった(図 2.13). 日本では、自転車に搭載されているモーターによりペダル操作の負担が軽減される電動アシスト自転車は、一般的な(電気のアシストのない)自転車に比べて市場価格は高額であるが、販売は増加傾向にある[2]. 電動アシスト自転車の利用状況と交通事故との関係について、今後、調査する必要がある。

2.3 自転車交通事故の詳細な分析

2.3.1 自転車事故データ

M市において、2013年（1月～12月）に発生した自転車に関与する交通事故のデータを使用し、交通事故の実態を調査した。解析対象とした自転車事故件数は250件であった。自転車事故データは、自転車事故に関与した人すべて（自転車乗員及び衝突相手当事者）の情報で構成されている。自転車事故250件のうち、自転車対自転車の事故が38件含まれていたことから、自転車事故に関与した自転車乗員数は288人であった。本データは、M市警察署の協力のもと解析を実施した。

通常、交通事故が発生した場合、警察調査班は事故に関与した当事者について、過失が最も重い者（第1当事者）、あるいは過失の程度を判断する[6]。第1当事者とは、最初に交通事故に関与した車両等の運転者または歩行者のうち、当該交通事故における過失が重い者であり、また、過失が同程度の場合は、人身損傷程度が軽い者を傷害が軽度の者が該当する[6]。第2当事者とは、事故に関与した第1当事者以外の者である。データには、年齢、性別、事故が発生した道路形状（交差点、交差点付近、単路）、信号機有無、第1当事者、第2当事者の情報を有する。交差点付近とは、交差点の側端から30m以内の道路の部分のことである[18]。さらに、本事故データにおける事故発生場所の住所に関する情報により、交差点の特性（交差点での死角有無）を調査した。また、自転車乗員を2群（第1当事者、第2当事者）に分け、年齢帯、性別、事故発生場所（交差点、交差点付近、単路）、交差点信号機有無、交差点死角有無、それらの母比率の違いについて分析した。年齢帯では、第1当事者及び第2当事者における自転車乗員の年齢帯の構成率について、2群の母比率の差の検定（両側検定）を行い、その2群の有意差有無を調査した。統計モデルについて、統計値Zは正規分布に従い、次式2.1で求めた。解析対象項目において比較する2群のいずれかの人数が10人未満の場合には、検定解析より除外した。

$$Z = \frac{\frac{n}{N} - \frac{m}{M}}{\sqrt{p^*(1-p^*)\left[\frac{1}{N} + \frac{1}{M}\right]}} \quad \text{式 2.1}$$

ここでは

$$p^* = \frac{n + m}{N + M}$$

n, m は比較する2群のn数（人）、N, M は比較する2群の全体数（人）である。

2.3.2 環境的要因

M市において実際に自転車に関与した交通事故のデータを使用し、自転車交通事故件数について、事故が発生した時間帯別構成率を図2.15に示す。事故発生時刻の「分」は削除し、「時」で分類した。例えば、自転車事故の発生時間が午前7時30分の場合、時間帯は「7時」に分類した。自転車事故の発生は、午前8時台（13.2%）が最も多く、午前9時台（10.0%）、午後5時台（10.0%）の順に多かった。

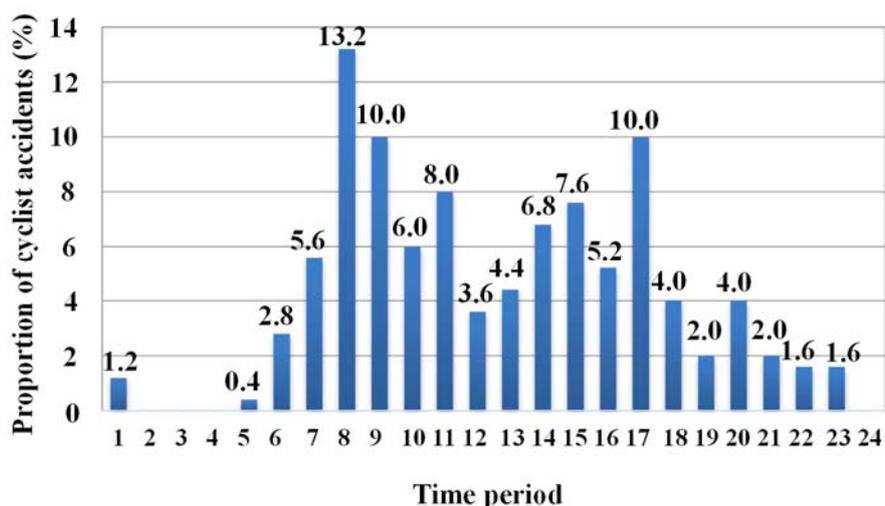


図 2.15 自転車交通事故発生の時間帯別構成率 (n=250)

自転車事故が発生した道路種別構成率では、都道（30.0%）に比べ、区市町村道（61.6%）で自転車事故が多く発生していた（図 2.16）。区市町村道には住宅街の車線のない道路も含まれ、日常生活に必要な生活道路に相当する。

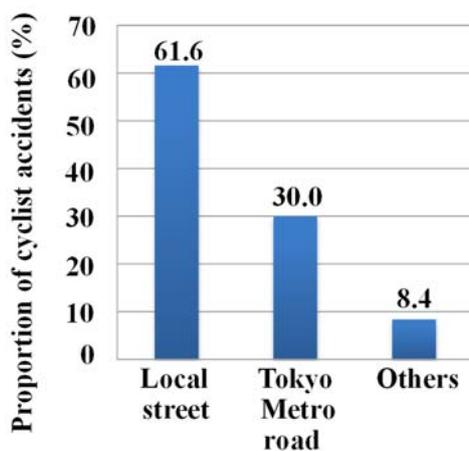


図 2.16 道路種別構成率 (n=250)

自転車事故が発生した道路形状別構成率を図2.17に示す。自転車事故は交差点(57.6%)が最も多く、続いて単路(28.8%)が多かった。

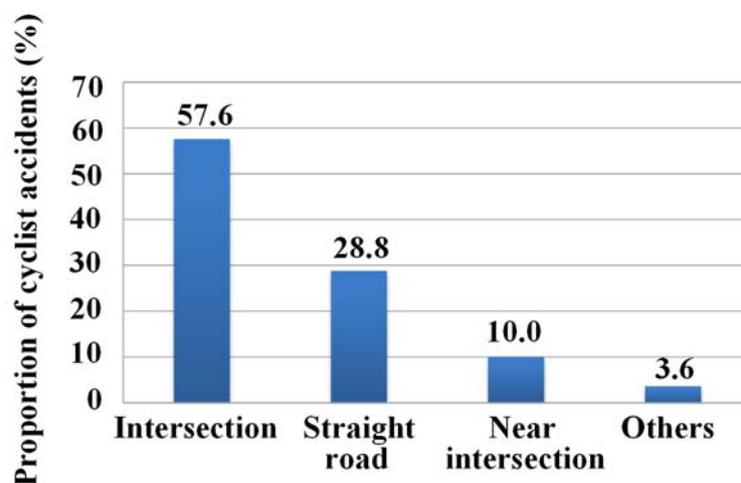


図 2.17 道路形状別構成率 (n=250)

自転車事故の衝突形態について、自転車の走行状況に着目し、その構成率を図2.18に示す。衝突形態としては、出会頭(52.0%)の事故が極めて多く、自転車が左折時(8.8%)、右折時(8.8%)が続いた。出会い頭事故とは、異なった方向から進入してきた車両(自転車も含む)が交差する時に衝突する事故のことである。

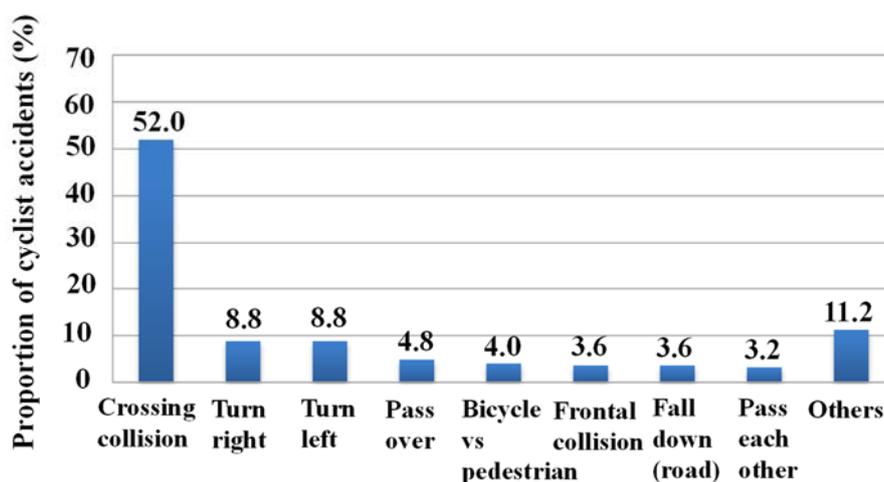
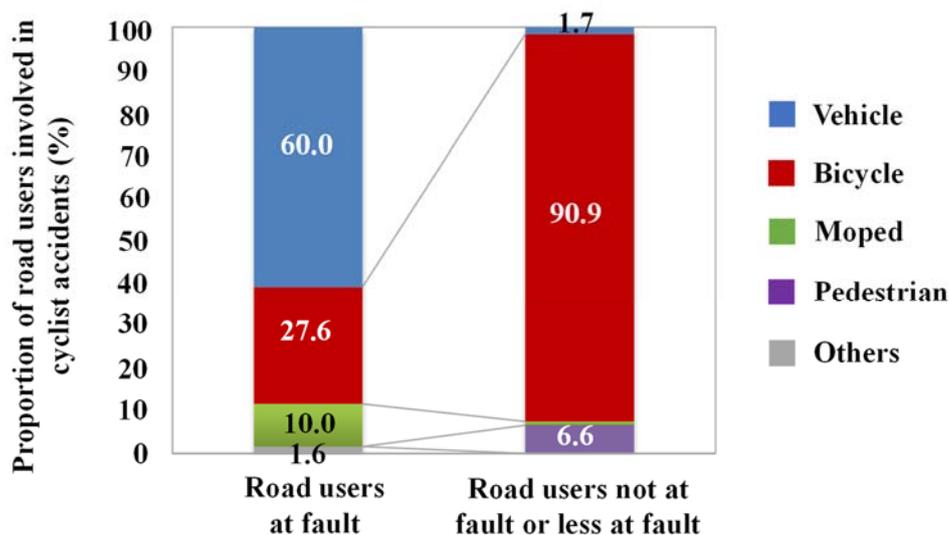


図 2.18 衝突形態別構成率 (n=250)

2.3.3 当事者種別による解析

自転車事故に関与した第1当事者、第2当事者の2群に着目し、解析を行った。図

2.19 に示すように、第 1 当事者及び第 2 当事者について、車の運転者、自転車乗員、歩行者を比較すると、第 1 当事者では車の運転者（60.0%）が最も多く、続いて自転車乗員（27.6%）であった。第 2 当事者では自転車乗員が 90.9% を占めた。自転車事故の 60.0% は自転車と車との事故であり、その事故では車の運転者が第 1 当事者であることを示す。さらに、自転車事故の 27.6% は自転車同士の事故であることを示す。



* Road users at fault included cyclists (n=9) in single bicycle crashes.

図 2.19 自転車事故（n=250）に関与した第 1 当事者（n=250）及び第 2 当事者（n=241）の状態別構成率

自転車乗員の当事者種別の 2 群について、年齢帯別に分類した（表 2.2）。第 1 当事者では 20-29 歳（29.0%）が最も多く、続いて 10-19 歳（20.3%）が多かった。第 2 当事者では 40-49 歳（17.8%）が最も多く、続いて 10-19 歳（17.4%）が多かった。構成率で 10.0% 以上は、第 1 当事者では 10 歳代、20 歳代、30 歳代、60 歳代であり、第 2 当事者では 10 歳代から 60 歳代の各年齢帯全てであった。同年齢帯の第 1 当事者、第 2 当事者の 2 群について構成率を比較すると、20-29 歳の第 1 当事者（29.0%）は同年齢帯の第 2 当事者（16.4%）より有意（ $p=0.022$ ）に多かった。また、40-49 歳の第 2 当事者（17.8%）は同年齢帯の第 1 当事者（5.8%）より有意（ $p=0.015$ ）に多かった。20-29 歳及び 40-49 歳以外の年齢帯については、第 1 当事者と第 2 当事者の 2 群に有意差は示されなかった。

表 2.2 自転車乗員の第 1 当事者, 第 2 当事者における年齢帯別構成率の比較

Age group	Cyclists at fault			Cyclists not at fault or less at fault			Difference A-B %	p-value
	n	N	(A) n/N %	m	M	(B) m/M %		
0-9 years	1	69	1.4	4	219	1.8	-0.4	0.834
10-19 years	14	69	20.3	38	219	17.4	2.9	0.580
20-29 years	20	69	29.0	36	219	16.4	12.5	0.022*
30-39 years	11	69	15.9	32	219	14.6	1.3	0.787
40-49 years	4	69	5.8	39	219	17.8	-12.0	0.015*
50-59 years	5	69	7.2	32	219	14.6	-7.4	0.111
60-69 years	7	69	10.1	24	219	11.0	-0.8	0.849
70-79 years	6	69	8.7	13	219	5.9	2.8	0.421
80-89 years	1	69	1.4	1	219	0.5	1.0	0.387

*Significant at the 5% level

n, m: number of cyclists at fault/not at fault or less at fault

N, M: total number of cyclists at fault/not at fault or less at fault

自転車乗員の当事者種別の 2 群について, 男女別に分類した (表 2.3). 男性, 女性ともに第 2 当事者の方が多かった. 第 2 当事者の割合は, 男性の場合 67.6%であり, 女性では 83.2%であった. 第 1 当事者の男性と女性の構成率を比較したところ, 男性(32.3%)は女性 (16.8%) より有意 ($p = 0.002$) に多かった.

表 2.3 自転車乗員の第 1 当事者, 第 2 当事者における男女別構成率の比較

Type of fault	Male			Female			Difference A-B %	p-value
	n	N	(A) n/N %	m	M	(B) m/M %		
Cyclists at fault	43	133	32.3	26	155	16.8	15.6	0.002**
Cyclists not at fault or less at fault	90	133	67.7	129	155	83.2	-15.6	-

**Significant at the 1% level

n, m: male cyclists or female cyclists who had faults

N, M: total number of male or female cyclists

自転車乗員の当事者種別の 2 群について, 事故発生の道路形状別に分類した (表 2.4). いずれの道路形状においても, 第 2 当事者の方が多かった. 第 2 当事者の割合は, 交差点の場合 83.9%, 交差点付近では 78.6%, 単路では 62.4%であった. 交差点, 交差点付近, 単路の構成率を比較すると, 第 1 当事者の交差点 (16.1%) と交差点付近 (21.4%) の構成率に有意差はなかった. 第 1 当事者の単路 (37.6%) は, 交差点 (16.1%) より有

意 ($p < 0.001$) に多かった。

表 2.4 自転車乗員の第 1 当事者, 第 2 当事者における交差点, 交差点付近, 単路の構成率の比較

Type of fault	Accident location						Difference A-B %	p-value
	Intersection			Near intersection				
	n	N	(A) n/N %	m	M	(B) m/M %		
Cyclists at fault	26	161	16.1	6	28	21.4	-5.3	0.492
Cyclists not at fault or less at fault	135	161	83.9	22	28	78.6	5.3	-

n, m: number of cyclists at intersection/near intersection

N, M: total number of cyclists at intersection/near intersection

Type of fault	Accident location						Difference A-B %	p-value
	Intersection			Straight road				
	n	N	(A) n/N %	m	M	(B) m/M %		
Cyclists at fault	26	161	16.1	35	93	37.6	-21.5	<0.001**
Cyclists not at fault or less at fault	135	161	83.9	58	93	62.4	21.5	-

**Significant at the 1% level

n, m: number of cyclists at intersection/straight road

N, M: total number of cyclists at intersection/straight road

交差点での事故を対象に, 自転車乗員の当事者種別の 2 群について, 信号機有り, 信号機無しで分類した (表 2.5). 信号機有り, 信号機無しともに, 第 2 当事者の方が多かった. 第 2 当事者の割合は, 信号機有りの場合 83.9%で, 信号機無しでは 80.4%であった. 信号機有り, 信号機無しの構成率を比較すると, 第 1 当事者の信号機有り (10.2%) と信号機無し (19.6%) に有意差は示されなかった.

表 2.5 自転車乗員の第 1 当事者, 第 2 当事者における信号機あり, 信号機なしの比較

Type of fault	Intersection type						Difference A-B %	p-value
	with a traffic light			without a traffic light				
	n	N	(A) n/N %	m	M	(B) m/M %		
Cyclists at fault	6	59	10.2	20	102	19.6	-9.4	0.117
Cyclists not at fault or less at fault	53	59	89.8	82	102	80.4	9.4	-

n, m: number of cyclists at intersections with a traffic light/without a traffic light

N, M: total number of cyclists at intersections with a traffic light/without a traffic light

交差点での事故を対象に, 自転車乗員の当事者種別の 2 群について, 交差点での死角有り, 死角無しで分類し, さらに男女別に分類した (表 2.6). 死角有り, 死角無しでの男性, 女性において, 全て第 2 当事者の方が多かった. 第 2 当事者の割合は, 死角有りの場合, 男性が 76.2%, 女性が 98.0%であり, 死角無しでは男性が 86.2%, 女性が 73.2%

であった。交差点での死角有り，死角無しの構成率の比較を男女別で比較すると，男性第1当事者の場合，死角有り（23.8%）と死角無し（13.8%）の構成率に有意差はなかった。女性第1当事者の場合，死角無し（26.8%）の方が死角有り（2.0%）より有意に多かった（ $p < 0.001$ ）。

表 2.6 自転車乗員の第1当事者，第2当事者における交差点での死角あり，死角なし男女別構成率

Gender	View at intersection feature							p-value	
	at blind corner			at clear view corner			Difference		
	n	N	(A) n/N %	m	M	(B) m/M %	A-B %		
Male									
	Cyclists at fault	10	42	23.8	4	29	13.8	10.0	0.297
	Cyclists not at fault or less at fault	32	42	76.2	25	29	86.2	-10.0	-
Female									
	Cyclists at fault	1	49	2.0	11	41	26.8	-24.8	<0.001**
	Cyclists not at fault or less at fault	48	49	98.0	30	41	73.2	24.8	-

n, m: number of cyclists at blind corner/good view corner of intersections

N, M: total number of cyclists at blind corner/good view corner of intersections

2.3.4 考察

実際の自転車の交通事故データを解析した結果，男性の第1当事者は女性の第1当事者より有意（ $p = 0.002$ ）に多かった（表 2.3）。この結果は，男性と女性の自転車走行平均速度の違いに関係があると考えられる。次項 2.4 の調査結果では，男性の自転車走行平均速度が 3.2 m/s で，女性は 2.9 m/s であり，その 2 群に有意差（ $p = 0.058$ ）はなかったが，男性の方が女性よりも速かった。次項 2.4 の調査において，走行速度が最も速かった事例は男性が 6.1m/s で，女性は 4.6 m/s であった。一般的に，自転車と自転車との衝突，あるいは自転車と歩行者との衝突事故において，移動速度の速い自転車乗員の方が第1当事者になりえる。従って，自転車の走行速度が速い要因の多い男性の方が，女性より第1当事者になるケースが多いと考えられる。

自転車事故発生場所の道路形状別の解析結果では，第1当事者の単路（37.6%）は，交差点（16.1%）より有意（ $p < 0.001$ ）に多かった（表 2.4）。交差点での自転車事故に関わった全ての第1当事者（ $n = 144$ ）を状態別構成率で比較すると，車の運転者（69%）が最も多く，続いて自転車乗員（17%），自動二輪乗員（13%）であった。従って，交差点での自転車事故の場合，車の運転者が第1当事者で，自転車乗員が第2当事者になる事例が最も多いことが判明した。しかし，自転車事故では，自転車が歩行者または自転車と衝突する事故も存在し（図 2.19），そのような事故では自転車乗員が第1当事者になることも考えられる。例えば，自転車乗員が第1当事者と判断される理由の1つに，禁止されている反対側のレーン（自転車乗員から見て右側）の走行がある。単路の場合，交差点に比べて，自転車が第1当事者になるような事故が多いと考えられる。

本解析で使用した自転車事故データの場合、単路では、自転車乗員 35 人が第 1 当事者であった（表 2.4）。それらの事故について、第 2 当事者を状態別に見ると、自転車乗員が最も多く（17 人, 48.6%）、続いて歩行者（10 人, 28.6%）であった（表 2.7）。本データのうち 1 件は自転車と車の衝突事故で、自転車乗員の小学生が公園から道路へ飛び出し、走行中の車と衝突した事例であった。自転車乗員の行動特性について、このような単路での事故の原因を理解するために、今後さらに調査する必要がある。

表 2.7 自転車事故の第 2 当事者における状態別人数及び構成率

Road user types not at fault or less at fault (n=35)	Car driver	Moped rider	Cyclist	Pedestrian	No-partner (Single accident by cyclists)
Number	1	1	17	10	6
Component rate (%)	2.9	2.9	48.6	28.6	17.1

2.4 交差点での自転車走行状況調査

2.4.1 調査方法

前項 2.3 での実際の自転車交通事故の分析から、M 市において自転車事故が多発する交差点を明確にした。その結果、事故多発の交差点では、朝及び夕方の通勤・通学時間帯に、区市町村道の交差点において、出会い頭の形態で衝突する事例の多いことが判明した。本調査では、M 市において自転車事故が多発する交差点の中から 1 箇所、信号機のない交差点を選定し、朝の通勤時間帯に交差点を通行する自転車乗員の行動特性を調査した。その交差点周辺は商業店舗と住宅地が混在し、自転車、歩行者、車両が相互に走行、通行する交差点である。

調査対象の交差点の概略を図 2.20 に示す。この交差点を交差する南北道路は、道路幅が 4.1m で、車は北から南方向への一方通行である。従って、この交差点を通過して南から北方向へ走行する車は存在しない。東西道路は道路幅 4.2m で、車が双方向に走行できる。交差点角の道路標識ポールの高さは、撮影用のビデオカメラを設置した（図 2.21）。撮影に使用したビデオカメラは、ソニーHDR-PJ790V デジタル HD ビデオカメラ (Sony 2013) で、ビデオカメラのフレームレートは毎秒 60 フレームである。ビデオカメラ撮影は、平日朝 7 時 10 分から 8 時 10 分までの 60 分間連続撮影し、実際の自転車の走行状況を調査した。実際の道路環境におけるビデオカメラ撮影については、東京都の三鷹警察署の許可を取得し、警察官立ち会いのもとビデオカメラを設置した。

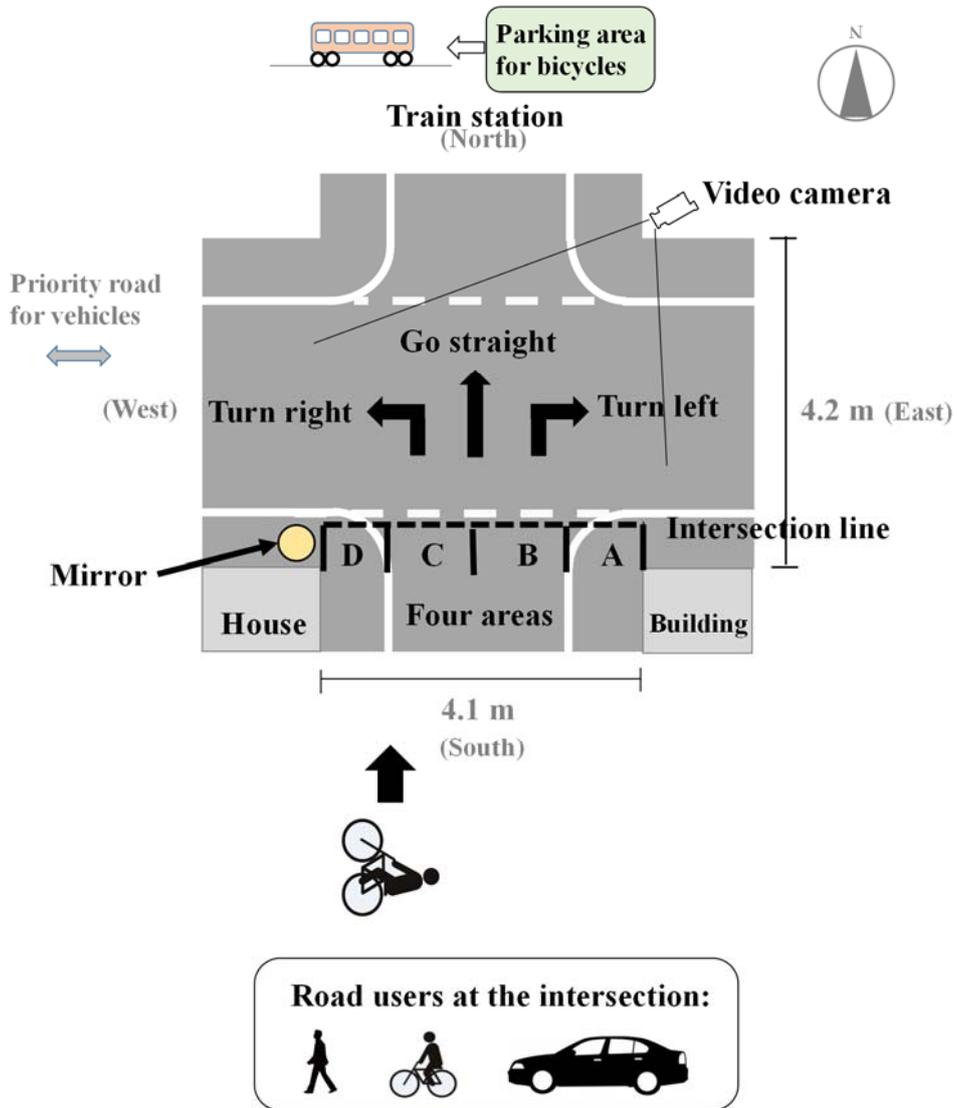


図 2.20 交差点の概略



図 2.21 道路標識ポールに設置した撮影用ビデオカメラ

交差点から北方向へ徒歩約 10 分の距離に JR の駅があり、朝の通勤・通学の時間帯は、北方向の駅周辺にある自転車駐輪場を目指す自転車が多いと仮定した。その場合、自転車は南から北方向へ走行し、交差点通過後、直進、左折、あるいは右折走行すると考えられる。そこで、南から交差点を通過して北方向、東方向、西方向へ移動する自転車の走行状況を録画撮影した。

録画した動画データを使用し分析した調査項目を表 2.8 に示す。自転車は、交差点において東西道路を走行する車との衝突を避けるため、交差点進入手前で一時停止し、安全確認をしなければならない。項目(1) 自転車乗員の左右安全確認については、交差点進入時に自転車乗員が左右どちらか一方、または左右に首を回転させる動作を行う場合、安全確認を行ったものと仮定した。項目(2) 自転車の交差点進入時の走行速度については、東西道路の端部を示す交差点の白破線を使用し、自転車の前輪が交差点の白破線に接した時点の自転車の走行速度を調査した (図 2.22 (a))。項目(3) 自転車の交差点進入までの走行位置については、図 2.22 (b)に示すように、道路の両側に緑色に路面ペイントされた路側帯により、南北道路の路面を 4 つのエリア (A, B, C, D) に分け、自転車の交差点進入までの走行位置を調査した。項目(4) 交差点通過後の進行方向については、自転車が交差点通過後の走行先として、直進、右折、左折に分類した。尚、自転車乗員の性別、安全確認及び交差点通過後の進行方向については、撮影したビデオ動画から識別した。

表 2.8 調査項目

調査項目	
(1)	交差点進入時の自転車乗員による左右安全確認(交差点進入時、自転車乗員が左右一方、または左右確認の有無)
(2)	交差点進入時の自転車の走行速度
(3)	自転車の交差点進入までの走行位置
(4)	交差点通過後の走行方向(直進, 右・左折)



(a) 交差点の白破線



(b) 4つのエリア (A, B, C, D)

図 2.22 調査対象とした信号機のない交差点

本調査では、交差点角の道路標識ポールにビデオカメラを設置し、南から北方向へ移動する自転車の走行状況を録画撮影した。ビデオカメラで収録した自転車の走行状況の斜位像について、ソフトウェア Dipp-Motion V (DITECT 2014) を用いて、道路を真上から観察したかのように、二次元座標値へ変換し、自転車の走行速度及び交差点進入までの走行位置を分析した。さらに、南北道路上の自転車の各走行位置について、図 2.22 に示す通り、4つのエリア (A, B, C, D) に分けて解析を行った。

自転車乗員の男性及び女性の自転車平均速度の比較については、t 検定を使用した。まず、F 検定で2群の等分散性を検定した。比較する2群の分散が等しい場合、スチューデントの t 検定を使用し、2群の分散が等しくない場合、ウェルチの t 検定を使用した。

2.4.2 交差点での走行状況

表 2.9 に示す通り、動画における分析が可能な自転車は合計 250 台（人）であった。男性が 155 人（62.0%）、女性が 95 人（38.0%）であった。交差点進入時の平均走行速度は、男性が 3.2 m/s で、女性は 2.9 m/s であり、男性の方が女性より平均走行速度が速かった（ $p=0.058$ ）。調査対象すべての自転車の平均走行速度は 3.1 m/s であった。

表 2.9 男女別，自転車乗員の人数及び平均走行速度

Cyclist	Number	Component ratio (%)	Velocity (m/s)		
			Average	SD	p-value
Male	155	62.0	3.2	1.0	0.058
Female	95	38.0	2.9	1.0	-
Total	250	100.0	3.1	1.0	

走行位置別（エリア A, B, C, D）及び交差点通過後の進行方向別に、交差点侵入時の自転車数を表 2.10 に示す。さらに、交差点侵入時における安全確認有無の自転車乗員数についても表 2.10 に示す。4つのエリア別に自転車の走行台数を比較すると、エリア D（自転車乗員から見て、道路の左路側帯）が 110 台（44.0%）で最も多く、続いてエリア C（道路中央より左側）が 105 台（42.0%）であった。交差点通過後の進行方向では、250 台のうち直進が 187 台（74.8%）で最も多く、左折 57 台（22.8%）、右折 6 台（2.4%）の順に多かった。進行方向別に安全確認の有無を比較すると、直進では安全確認有り（116 人，62.0%）の方が安全確認なし（71 人，38.0%）より多く、左折では安全確認なし（44 人，77.2%）の方が安全確認あり（13 人，22.8%）より多かった。右折では、左折と同様、安全確認なし（4 人，66.7%）の方が安全確認あり（2 人，33.3%）より多かった。

表 2.10 走行位置別及び交差点通過後の走行方向別，自転車数

Number										
Entry area	Directions									Total
	Go straight			Turn left			Turn right			
	Confirming safety									
	Done	Not	Total	Done	Not	Total	Done	Not	Total	
Area A	4	3	7	0	0	0	1	4	5	12
Area B	18	5	23	0	0	0	0	0	0	23
Area C	60	44	104	0	1	1	0	0	0	105
Area D	34	19	53	13	43	56	1	0	1	110
Total	116	71	187	13	44	57	2	4	6	250

交差点通過後の進行方向別に自転車台数を比較すると、表 2.11 に示すように、250 台のうち直進が 187 台 (74.8%) で最も多く、続いて左折 57 台 (22.8%)、右折 6 台 (2.4%) であった。このように、解析対象とした交差点では、南から北 (駅方向) に直進する自転車が最も多かった。進行方向別に自転車の平均走行速度を比較すると、直進 (3.1 m/s) と左折 (3.1 m/s) が同じ平均走行速度で、右折 (2.2 m/s) より速かった。

表 2.11 交差点通過後の進行方向別、自転車数及び平均走行速度

Direction	Number	Component ratio (%)	Velocity (m/s)		
			Average	SD	p-value
Go straight	187	74.8	3.1	1.0	0.849
Turn left	57	22.8	3.1	0.8	-
Turn right	6	2.4	2.2	1.5	NA
Total	250	100.0	3.1	1.0	

交差点における進行方向別の自転車の走行速度について、安全確認の有・無での平均走行速度を図 2.23 に示す。自転車が直進した場合、安全確認を行うことなく交差点を通過した自転車の平均走行速度 (3.3 m/s, 標準偏差 1.0 m/s) は、安全確認を行った自転車の平均走行速度 (3.0 m/s, 標準偏差 0.9 m/s) に比べ、有意に速かった ($p < 0.05$)。自転車が左折した場合、直進と同様、乗員が安全確認を行わなかった自転車の平均走行速度 (3.2 m/s, 標準偏差 0.8 m/s) は、安全確認を行った乗員の自転車平均走行速度 (3.1 m/s, 標準偏差 0.7 m/s) に比べ僅かに速かったが、有意差はなかった。

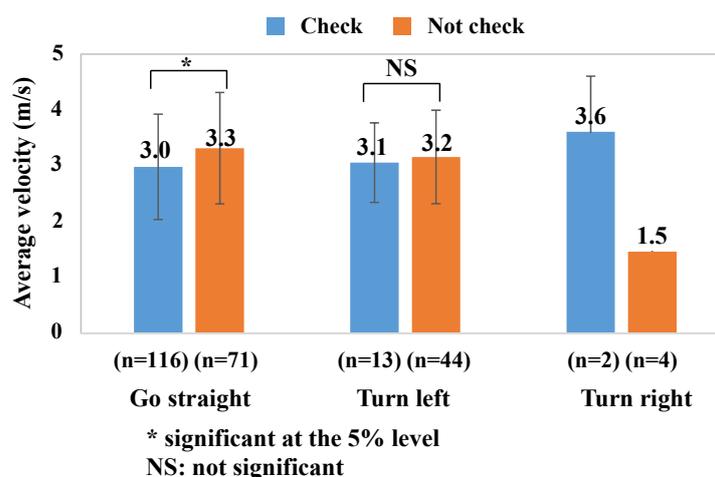


図 2.23 安全確認の有・無別、自転車の平均走行速度

自転車の走行位置 4 つのエリア別に、自転車数と平均走行速度を表 2.12 に示す。自転車乗員から見て道路の左路側帯であるエリア D (110 台, 44.0%) が最も多く、続いて、道路中央より左側のエリア C (105 台, 42.0%), 道路中央より右側のエリア B (23 台, 9.2%), そして道路の右路側帯のエリア A (12 台, 4.8%) の順であった。自転車の平均走行速度はエリア B (3.2 m/s) 及びエリア C (3.2 m/s) が、エリア D (3.1 m/s) 及びエリア A (2.4 m/s) より速かった。

表 2.12 走行位置 4 つのエリア別、自転車走行数及び平均走行速度

Entry area	Number	Component ratio (%)	Velocity (m/s)	
			Average	SD
Area A	12	4.8	2.4	1.5
Area B	23	9.2	3.2	0.8
Area C	105	42.0	3.2	0.9
Area D	110	44.0	3.1	0.9
Total	250	100.0	3.1	1.0

エリア B (3.2 m/s) とエリア C (3.2 m/s), エリア B (3.2 m/s) とエリア C (3.2 m/s), エリア C (3.2 m/s) とエリア D (3.1 m/s) 間には有意差は示されなかった (図 2.24)。エリア A は自転車数が少数であったため統計検定対象外とした。

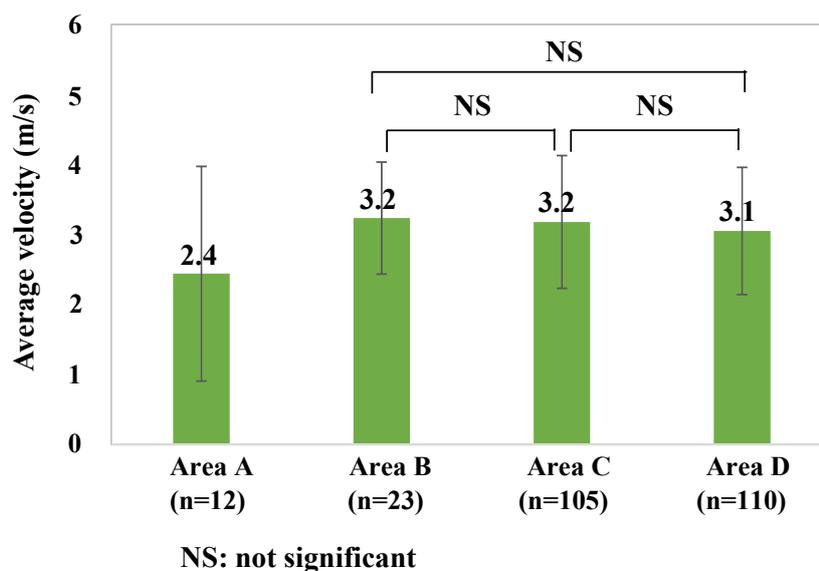


図 2.24 エリア別、自転車平均走行速度の比較

自転車の進行方向と走行エリアとの関係を分析したところ、走行台数が最も多かったエリア D では、56 台の自転車が左折し、53 台の自転車が直進した（図 2.25）。エリア C を走行する自転車のほとんどは直進（104 台）し、左折した自転車は 1 台であった。エリア B では全自転車（23 台）が直進（23 台）であった。エリア A では 7 台が直進し、5 台が右折した。この結果から、交差点で左折する自転車の多くはエリア D を走行し、交差点を直進する場合はエリア C を走行する自転車が最も多いことが判明した。

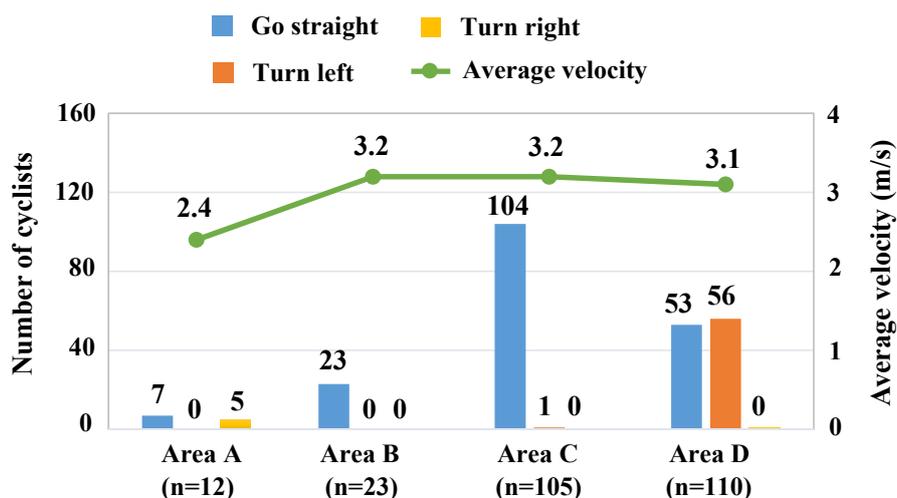


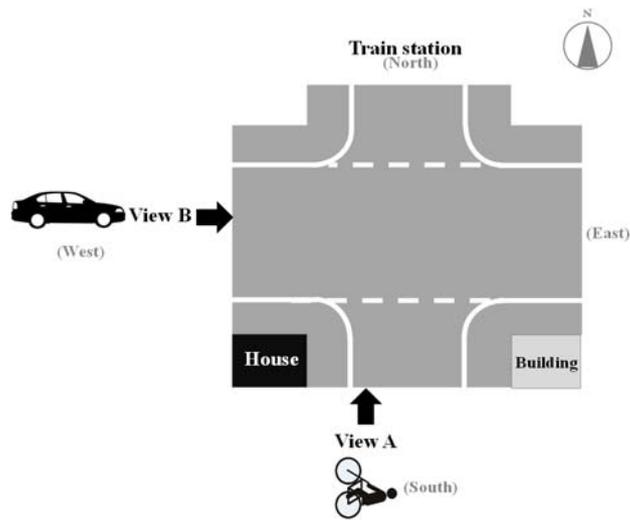
図 2.25 走行エリアと進行方向別，自転車走行数及び平均走行速度

2.4.3 考察

本調査では、M 市において自転車事故が多発する交差点を選定したが、自転車事故発生の要因の 1 つに、交差点での視界が関係していると考えられる。本調査で対象とした交差点角には、箱型の建物（図 2.26 (a)）が存在した。図 2.26 (b)は交差点の鳥瞰図を示す。図 2.26 (c)は、南から交差点方向に接近走行する自転車乗員の視界を示す。このような状況の場合、自転車乗員は交差点角の視界が建物で遮られているため、交差点で交差している東西道路で左方向から接近する車両は全く見えない。その一方で、車の運転者は、西から東方向に見た交差点の視界（車両）を図 2.26 (d)に示す通り、同建物により視界が遮られているため、南北道路で南から交差点に接近する自転車は一切見えない。自転車事故に至る理由の 1 つとして、本調査で判明した、区市町村道といった生活道路に存在する建物の影などのように、車の運転者の視界が障害物により遮られていることが考えられる。また、この結果は、松井らの研究[19]で示された、乗用車と自転車との最も危険な状況と同じ傾向を示す。松井らの研究では、東京都のタクシーに設置されたドライブレコーダーから取得されたデータを使用し、乗用車と自転車とのニアミス（実際に事故には至らなかったが、極めて危険な状況）の事例を調査した結果、乗用車と自転車との最も危険な状況は、自転車が建物の影から飛び出すケースであった。



(a) 交差点角の箱型建物



(b) 交差点鳥瞰図



(c) 南（自転車乗員）から見た交差点（View A）
 (図 2.26 交差点の様子)



(d) 西（車運転者）から見た交差点（View B）

図 2.26 交差点の様子

本調査で対象にした交差点では、南から北方向に交差点に進入する（自転車を含む）車両に対して、一時停止の「止まれ」の標識（図 2.21）が設置されている。一時停止の道路標識により一時停止が指定されている場合、道路標識等による停止線の直前（停止線がない場合は、交差点の直前）で一時停止の義務があり、交差道路を通行する車両などの進行妨害の禁止が道路交通法（第 43 条）により定められている。従って、調査対象とした交差点に自転車が進入する場合、自転車乗員は交差点手前で一時停止し、安全確認をする必要がある。しかし、交差点手前で車の接近音の有無で横断可能と予測し、自転車乗員の多くが、一時停止及び安全確認の必要性を感じていないと考えられる。近年日本では、ガソリン車に比べてエンジン音が静かな、電気自動車やハイブリッド車の保有台数が増加傾向にある[20]。生活道路のような比較的狭い道路を電気自動車やハイブリッド車が低速度で走行する場合、車の走行音は静音になる。その場合、自転車乗員は車の接近を音で判断することは困難な状況になり、自転車乗員と車が衝突する危険性が高くなることが危惧される。

本調査を実施した平日朝 7 時 10 分から 8 時 10 分までの 60 分間において、分析が可能な自転車は合計 250 台（人）であった。その一方で、同時時間帯に交差点を通過した自動車は 15 台であった。このような状況から、多くの自転車乗員は、交差点進入時に遭遇する自動車は存在しないと予測し、一時停止及び安全確認の必要性を感じていないとも考えられる。本調査では、自転車乗員の行動のみを調査対象としたが、今後、同じ環境下における自転車と車の走行関係について調査する必要がある。

本調査では、交差点における自転車乗員の行動特性について、南北道路の自転車の走行状況を調査した。図 2.27 (a) は、北から南方向に交差点を見た景色を示す。南北道路は一方通行のため、車は JR の駅のある北から交差点を通過して南方向へ走行可能である。従って、車の運転者が交差点進入時に安全確認できるように、交差点角にはカーブミラーが設置されている。図 2.27 (b) は南から北方向に交差点を見た景色を示す。交差

点先の南北道路は一方通行のため、車の進入禁止の標識が設置されていた。本調査では、南から北方向へ交差点に進入する自転車に着目し調査を実施した。調査対象となった自転車乗員から交差点を見た景色が図 2.27 (b) である。自転車及び歩行者のみが南から北方向へ交差点に進入可能であるが、その自転車乗員や歩行者が交差点進入時に安全確認できるカーブミラーは設置されていない。本調査を実施した平日朝の通勤・通学時間帯では、多数の自転車が南から北方向へ交差点を通過した（1 時間で 250 台）。視界の悪い交差点では、自転車乗員が交差点進入時に安全確認ができるように、カーブミラーを設置するなどして、交差点に接近する車の存在を自転車乗員に気付かせることが重要と考える。例えば、米国では車車間通信や歩車間通信が開発途上にある[21]。自転車対車の通信技術が開発され、そうした最新の技術が日本の住宅街でも利用可能になることが望まれる。



(a) 北から南方向に見る交差点に設置のカーブミラー



(b) 南から北方向に見る交差点に設置の標識

図 2.27 交差点角のカーブミラー及び標識

前項 2.3 の解析結果より、自転車事故の発生頻度が高い場所として、道路種別では区市町村道 (61.6%) が多く (図 2.16)、道路形状別では交差点 (57.6%) であることが示された (図 2.17)。それらの結果を考慮し、本項の自転車走行状況調査では、信号機の設置が無く、道路幅がそれ程広くない生活道路の交差点を調査対象とした。自転車事故を減少させるためには、今回調査対象とは異なる道路環境、例えば、信号機が設置された交差点、単路などを対象にした自転車乗員の行動特性についても、さらに調査する必要がある。

本研究では、(1) 自転車利用者アンケート調査、(2) 自転車交通事故の詳細な分析、(3) 交差点での自転車走行状況調査、以上の 3 つのアプローチから、自転車事故発生の要因を明確にした。本調査結果は、自転車乗員の安全保護のための新しい技術開発 (自転車乗員及び車の運転者への警報装置、両者間のワイヤレス通信システム、自転車検知システム、衝突被害軽減システムを搭載した最新の車両など[22]) への寄与が大いに期待される。自転車乗員を対象とした新しい警報装置が開発されることで、本調査の結果で示された障害物で視界が遮られている交差点において、接近車両の存在に対して自転車乗員は事前の認知が可能になる。また、車の運転者への警報装置が自転車検知可能なシステムとして開発されることで、車と自転車の衝突事故を避けることができる。実際、自転車乗員と車の運転者間のワイヤレス通信システムについては、現在、開発途上である[23]。また、歩行者検知用のセンサーを使用した衝突被害軽減システムを搭載した最新の車の場合、歩行者との衝突速度を減少させるようにブレーキが作動する。歩行者検知システムを搭載した車は、既に世界的に生産・販売がされている[24]。将来、自転車乗員保護のための自転車検知システムや自転車衝突被害軽減システムが開発され、そのような新システムを搭載した車により、自転車乗員と車との衝突の減少が大いに期待される。

交差点を通過した自転車 250 台について、交差点進入時の走行速度を解析した結果、平均走行速度は 3.1 m/s であり、最速走行速度は 6.1 m/s であった。前項 2.3 の結果において、M 市で発生した自転車事故の場合、自転車乗員の第 1 当事者では、年齢帯 10 歳代 (20.3%) と 20 歳代 (29.0%) が他の年齢帯より構成率が高かった (表 2.2)。第 2 当事者では、10 歳代が 17.4%、20 歳代が 16.4%、30 歳代が 14.6%、40 歳代が 17.8%、50 歳代が 14.6%、60 歳代が 11.0% という構成率であった (表 2.2)。東京都では、小学校及び中学校において自転車安全講習が実施されているが、高校、大学などではそれほど積極的には実施されていない。日本において車の運転免許は 18 歳以上が取得可能であり、免許取得の際に車の安全運転講習を受講する、しかし、自転車は免許が不要であるため、自転車の利用者は各自治体を中心となり実施されているような安全講習会への参加は義務付けられていない。自転車事故を減少させるためには、さまざまな年齢を対象に、自転車安全講習会などによる正しい自転車交通ルールを習得するための教育や自転車事故の危険性を習得するための啓蒙活動が重要と考える。

自転車に搭載されているモーターによりペダル操作の負担が軽減される電動アシスト自転車は、一般的な（電気のアシストのない）自転車に比べて市場価格は高額であるが、販売は増加傾向にある[2]。電動アシスト自転車は、道路交通法施行規則（第三十九条の三）において、「人の力を補うため原動機を用いる自転車」あるいは「駆動補助付自転車」と呼称されている。電動アシスト自転車は、急な坂道や重い荷物を載せて走行するような場合、ペダル操作が軽いため、自転車走行が容易になる。例えば、低年齢の子供を持つ母親の場合、子供を自転車に同乗させるため、電動アシスト自転車を利用する人が多い。しかし、電気がペダル操作をアシストするため、同じ力でペダルを操作した場合、電気のアシストのない自転車に比べて、電動アシスト自転車の方が走行速度は速い。子供を同乗させた自転車乗員が高速度で走行し、衝突事故を起こした場合、自転車運転者だけでなく同乗の子供も重傷を負う危険性がある。また、衝突相手が高齢歩行者の場合、自転車運転者が第1当事者と判断される可能性は高い。日本では、高齢者向け電動アシスト自転車も販売されている。自転車乗員の死亡事故では、2016年では65歳以上が67%を占めていた[4]。半田らは、高齢自転車乗員と若年自転車乗員を対象に、年齢の違いによる行動特性の比較について、シミュレーション実験を実施している。その結果では、高齢自転車乗員は、若年自転車乗員よりも事故に至る頻度が高いことを示している[25]。その要因として、自転車走行中における、高齢自転車乗員の認知・判断は、若年自転車乗員と異なることが挙げられた。松井らの研究においても、同様に、高齢歩行者の認知・判断が若年歩行者と異なる結果が示された[26]。今後、高齢者による電動アシスト自転車の走行数が増加した場合、その運転者である高齢者が関与する事故が増加し、傷害の程度も重傷度が高くなることが懸念される。電動アシスト自転車の乗員は、年齢や性別に関係なく、衝突時の外傷を軽減させるための保護対策が必要と考える。

2.5 結言

本調査では、都市部における特定のエリアに焦点をあて、自転車乗員の行動・意識等を把握し、自転車事故の特徴を分析した上で、自転車走行状況の実態を調査することで、自転車事故発生要因を明確にし、事故発生に至る環境的・人為的要因を解明することを目的とした。

自転車利用者を対象としたアンケート調査の結果により、自転車の利用者数が多い時間帯は「5:00-10:00」及び「15:00-18:00」であった。車道を自転車で走行中、「車に追い越される」ときに危険を感じると回答した人が多く、歩道を自転車で走行中、「歩道が狭いとき」危険を感じるという回答が多かった。他者が自転車で走行しているのを見て危険に感じる自転車の行動として、「携帯電話使用」、「夜間無灯火」、「信号無視」を選

択した回答者が多かった。普段の走行帯としては、「歩道」が最も多かった。しかし、自転車で車道を通行するときは「左側」の回答が 86.8%であり、夜間点灯については「必ず点灯させる」が 93.6%であった。電動アシスト自転車の利用については、「利用していない(今後も利用は考えていない)」が 53.8%で最も多かったが、「利用していない(興味あり、利用してみたい)」(32.6%)、「利用している」(13.6%)を合算すると 46.2%になり、今後、増加する可能性が示唆された。

自転車交通事故を詳細に分析した結果から、自転車事故の発生した時間帯は、午前 8 時台 (13.2%) が最も多く、続いて午前 9 時台 (10.0%)、午後 5 時台 (10.0%) の順であった。これらの時間帯は、アンケート調査結果で、自転車の利用者数が多い時間帯と重複している。区市町村道の交差点での事故発生が多く、衝突形態としては出会い頭 (52.0%) の事故が最も多かった。自転車事故の当事者種別による解析では、自転車事故の 60.0%が自転車と車との事故であり、その事故では車の運転者が第 1 当事者であった。さらに、自転車事故の 27.6%は自転車と自転車との事故であった。自転車乗員の当事者種別の 2 群について、年齢帯別に構成率の比較したところ、20-29 歳の第 1 当事者 (29.0%) は同年齢帯の第 2 当事者 (16.4%) より有意 ($p = 0.022$) に多かった。また、40-49 歳の第 2 当事者 (17.8%) は同年齢帯の第 1 当事者 (5.8%) より有意 ($p = 0.015$) に多かった。第 1 当事者の男性と女性の構成率を比較したところ、男性 (32.3%) は女性 (16.8%) より有意 ($p = 0.002$) に多かった。事故が発生した道路形状では、第 1 当事者の単路 (37.6%) は、交差点 (16.1%) より有意 ($p < 0.001$) に多かった。交差点での事故を対象に、交差点での死角有り と 死角無し で分類し、さらに男女別に比較したところ、女性第 1 当事者の場合、死角なし (26.8%) の方が死角あり (2.0%) より有意に多かった ($p < 0.001$)。

交差点での自転車走行状況調査では、自転車事故が多発する交差点の中から 1 箇所、信号機のない交差点を選定し、ビデオカメラ撮影により、朝の通勤時間帯に交差点を通行する自転車乗員の行動特性を調査した。交差点進入時の平均走行速度は、男性が 3.2 m/s で、女性は 2.9 m/s であり、男性の方が女性より平均走行速度が速かった ($p = 0.058$)。調査対象すべての自転車の平均走行速度は 3.1 m/s であった。道路環境要因として、「障害物(交差点の角の建物等)による死角の存在」、「交差点での車との出会い頭事故」、生活道路など車の走行が少ない「区市町村道での交差道路を行き交う自転車や車の存在」、人為的要因として、自転車乗員による「安全確認せずに交差点へ進入」、「交差点進入時の自転車の走行速度」、「自転車乗員の法令違反」など、これら複数の要因が重複したタイミングに自転車事故が発生すると予測された。

第3章

自転車事故の頭部外傷の実態調査

3.1 諸言

本研究では、日本で発生した自転車の交通事故データ（警察庁）及び救命救急センターに搬送された患者データ（医療機関）を基に、警察庁及び医療機関の両者から自転車事故の実態について調査した。

自転車の交通事故データは、公益財団法人交通事故総合分析センター（以下、ITARDA）が所有する ITARDA データベースから抽出されたものである。ITARDA は、1992 年に警察庁、運輸省（当時）、建設省（当時）から認可を得て、日本の公益法人として設立された機関であり、警察庁交通局からの資料に基づき、日本の全交通事故に関するデータベースを保持している[6]。本研究で解析した項目はすべて、ITARDA データベースに基づく。自転車事故において、自転車の衝突相手当事者の多くは車である[27][28]。その中でも、乗用車が多いという報告がある[27]。自転車事故における相手当事者は8割以上が車であり、自転車対車の衝突事故の場合、死傷者は99.8%が自転車乗員であったという報告もある[29]。第2章の自転車交通事故を詳細に分析した結果では、自転車事故の60.0%が自転車と車との事故であり、その事故では車の運転者が第1当事者であった。さらに、第2章の結果では、交差点での出会い頭（52.0%）の自転車事故が最も多いことが示された。そこで、本調査では、自転車対車の出会い頭事故に着目し、最初に、ITARDA の交通事故データを使用し、車との衝突による自転車乗員の外傷の特性を身体部位別に整理し、頭部外傷の特性を明確にした。衝突相手の車種と衝突部位を限定し、自転車乗員の年齢帯を分類することで、衝突相手である車と自転車乗員の年齢や外傷の関係を明確にすることを目的とした。

日本の自転車乗員の死亡者では、65歳以上の占める割合が多い状況にある[4]。そこで、ITARDA の交通事故データを使用し、自転車乗員の傷害程度、法令違反、道路環境的要因、さらには、重傷・死亡に至った頭部外傷の起因となった加害種別（路面、車）という視点から、自転車乗員の年齢帯別に解析を行った。自転車乗員の年齢帯において、60歳以上を3つの年齢帯に分類し、青壮年の年齢帯と比較することで、高齢自転車乗員の交通事故様態を明確にすることを目的とした。

さらに、獨協医大越谷病院 救命救急センターに搬送された患者データを使用し、自転車乗員の頭部外傷について詳細な解析を行った。獨協医大救急医療センターは埼玉県越谷市にある6つの救急医療センターの1つで、埼玉東地区の人口約170万人を管轄し

ている。救命救急センターに搬送された交通事故による自転車乗員患者を対象とし、頭部外傷について種類別に調査した。さらに、自転車乗員患者の重軽傷者において、解析可能な頭部外傷を有した患者を対象に、意識障害の状況を評価し、意識障害と頭部骨折、脳傷害との関係を調査した。本調査の解析により、自転車乗員の頭部外傷の特性を明確にすることを目的とした。

3.2 車との衝突による自転車乗員の外傷

本解析では、異なるタイプの車との衝突による自転車乗員の傷害について、自転車乗員の年齢、傷害程度、損傷程度が最も重い身体の部位（損傷主部位と呼称）などに焦点をあて、自転車乗員の外傷の特性を調査した。特に、死亡に至る危険要因である頭部外傷に着目し、自転車用ヘルメットの着用有無による、自転車乗員の年齢帯と頭部外傷の関係を調査した。本解析では、衝突相手である車と自転車乗員の年齢や外傷の関係を明確にすることを目的とした。

3.2.1 解析方法

本解析では、2004年～2013年（10年間）の自転車と車との衝突の事故データを使用し、解析を行った。自転車の衝突相手の車種は、乗用車タイプのセダン、ミニバン、軽乗用車、そして貨物車タイプのワンボックス車、軽貨物車、以上の5車種とした（図3.1）。セダン、ミニバン、軽乗用車はボンネットを有する車両である。通常、ミニバンはセダンに比べて車体のルーフが高く、ボンネットの長さは短い。ワンボックス車はボンネットがなく、エンジンが前席床下に配置されている。日本では、セダン、ミニバン、ワンボックス車は、排気量が660 cc ($6.6 \times 10^{-4} \text{ m}^3$) 超である。軽乗用車及び軽貨物車は、排気量が660 cc ($6.6 \times 10^{-4} \text{ m}^3$) 以下であり、日本特有の車種である。本調査では、出会い頭事故に着目し、各車種の車体の前面部（正面、前右角、前左角）と衝突した自転車の事故データを解析対象とした。出会い頭事故とは、異なった方向から進入してきた車両（自転車も含む）が交差する時に衝突する事故のことである。そのような衝突形態においては、自転車は車体の前面部に衝突する事例が多いと予測される。さらに、車両の前端部の形状は、自転車乗員の外傷へ影響するという報告[30]を考慮し、車体の前面部に限定した。従って、車体の側面部や後面部と衝突した自転車の事故データは解析対象に含まれていない。2004年～2013年において日本の自転車乗員死亡者は7,123人であり[4]、そのうち5車種の前面部との衝突による死亡者は43.6%（3,103人）に相当する。



(a) セダン



(b) ミニバン



(c) 軽乗用車



(e) ワンボックス車



(f) 軽貨物車

図 3.1 対象車種

自転車乗員について、年齢帯を 0-12 歳，13-64 歳，65-74 歳，75 歳以上の 4 つのグループに分類した。65 歳以上については、日本の健康保険制度に従い、65-74 歳，75 歳以上の 2 つのグループに分類した。自転車乗員の傷害程度は、ITARDA のデータベースに従い、軽傷，重傷，死亡に分類した[4]。軽傷とは、交通事故によって負傷し，1 箇月（30 日）未満の治療を要する場合である。重傷とは，交通事故によって負傷し，1 箇月（30 日）以上の治療を要する場合である。死亡とは，交通事故によって，発生から 24 時間以内に亡くなった場合である。これら交通事故による負傷程度及び死亡の判断は，医師の診断，または検案等に基づく。年齢帯別の重傷率及び死亡率は，式 3.1 及び式 3.2 より，5 車種別に算出した。

$$\text{重傷率 (\%)} = \frac{\text{重傷者数 (人)}}{\text{(軽傷者数 + 重傷者数) (人)}} \times 100 \quad \text{式 3.1}$$

$$\text{死亡率 (\%)} = \frac{\text{死亡者数 (人)}}{\text{(軽傷者数 + 重傷者数 + 死亡者数) (人)}} \times 100 \quad \text{式 3.2}$$

自転車乗員の傷害を負った身体の部位について，損傷主部位別に調査した。損傷主部位とは，損傷程度が最も重い部位であり，死亡の場合は致命傷の部位となる。損傷主部位

位は、医師の診断または検案に基づいて決められる。本調査では、ITARDA データベースに従い、損傷主部位を「頭部、頸部、胸部、腹部、腰部、上肢、下肢、その他部位」に分類した。さらに、頭部外傷は重症化の危険因子になる可能性があることから[31][32]、頭部外傷の状態について、ITARDA データベースに従い、頭蓋骨骨折、脳傷害その他、の2つに分類した。Bambach らは、自転車乗員の頭部外傷（頭蓋骨骨折）に対して、自転車用ヘルメット（以下、ヘルメット）の有効性を示している[33]。そこで、主損傷部位の頭部外傷を対象に、ヘルメットの着用有無や頭部外傷とヘルメットの関係性を調査した。

本調査では、年齢帯による外傷の違いを明確にするため、重傷（表 3.2）及び死亡（表 3.3）での各損傷主部位の構成率、ヘルメット着用有無別の頭部外傷（重傷、死亡）の構成率（表 3.4）、「ヘルメット着用なし」の頭部主損傷の構成率（表 3.5）について、13-64 歳とそれ以外の各年齢帯での 2 群の母比率の差の検定（両側検定）を行い、その 2 群の有意差有無を調査した。統計モデルについて、統計値 Z は正規分布に従い、第 2 章で使用した式 2.3 で求めた。ここで、解析対象項目において各年齢帯の人数が 10 人未満の場合には、検定解析より除外した。また、表 3.2 及び表 3.3 における損傷主部位「その他 (Others)」、表 3.4 における自転車用ヘルメット着用「不明 (Unknown)」は検定解析の対象外とした。

3.2.2 年齢帯別外傷の特性

2004 年～2013 年（10 年間）において、5 車種との衝突により外傷を負った自転車乗員について、年齢帯別にまとめた結果を表 3.1 に示す。自転車乗員の死傷者数は 912,728 人で、13-64 歳（74.2%）が最も多く、続いて 65-74 歳（10.1%）、0-12 歳（9.7%）、75 歳以上（6.1%）の順であった。912,728 人のうち、男性は 49.8%、女性は 50.2%であった。男性では、0-12 歳（73.8%）が、女性では 65-74 歳（59.3%）が最も多かった。各年齢帯での 5 車種を比較すると、セダンが他の車種に比べて多かった。セダンの構成率は、0-12 歳が 48.2%、13-64 歳が 54.2%、65-74 歳が 50.3%、75 歳以上が 46.1%であった。傷害程度別では、軽傷が 92.8%（846,402 人）、重傷が 6.9%（63,223 人）、死亡が 0.3%（3103 人）であった。軽傷では 13-64 歳（94.6%）が最も多く、重傷（18.5%）及び死亡（2.4%）では 75 歳以上が最も多かった。年齢帯別に重傷率及び死亡率を算出した結果、重傷率・死亡率ともに、65-74 歳、75 歳以上が 0-12 歳、13-64 歳より高い割合であった。重傷率は 65-74 歳が 13.0%、75 歳以上が 19.0%であり、死亡率は 65-74 歳が 0.9%、75 歳以上が 2.4%であった。死亡率は、年齢帯が高齢になるほど増加し、0-12 歳が 0.1%、13-64 歳が 0.1%、65-74 歳が 0.9%、75 歳以上が 2.4%であった。軽傷、重傷、死亡を合算した損傷主部位では、いずれの年齢帯においても、最も多い損傷は下肢であった。下肢の構成率は、0-12 歳が 48.3%、13-64 歳が 46.1%、65-74 歳が 38.5%、75 歳以上が 34.8%であった。2 番目に多い損傷主部位は、0-12 歳（18.1%）及び 75 歳以上（19.6%）が頭

部で、13-64歳（16.9%）及び65-74歳（15.4%）は上肢であった。頭部外傷を負った自転車乗員を対象に、ヘルメット着用率を調査した。その結果、頭部外傷を負った自転車乗員（104,546人）のうち、「ヘルメット着用なし」が92.5%、「ヘルメット着用あり」が6.7%、ヘルメット着用不明が0.8%であった。「ヘルメット着用なし」の頭部外傷の構成率について、年齢帯別に比較すると、年齢が高くなるほど構成率の増加を示した。0-12歳が83.4%、13-64歳が93.3%、65-74歳が96.5%、75歳以上が96.7%であった。頭部外傷における頭部主損傷の解析では、頭部外傷を負った自転車乗員（104,546人）のうち、7.2%が頭蓋骨骨折で、92.8%が脳損傷その他であった。頭蓋骨骨折の構成率は、0-12歳が6.6%、13-64歳が6.4%に対して、65-74歳は8.8%、75歳以上は11.1%であった。

表 3.1 5車種との衝突による自転車乗員の年齢帯別外傷の特性（2004年～2013年）

	Age group of cyclists								Total	
	0-12		13-64		65-74		75+			
	n	(%)	n	(%)	n	(%)	n	(%)	n	(%)
N (%)	88,420	(9.7)	677,196	(74.2)	91,822	(10.1)	55,290	(6.1)	912,728	(100.0)
Gender										
Male	65,273	73.8	321,962	47.5	37,336	40.7	30,006	54.3	454,577	49.8
Femal	23,147	26.2	355,234	52.5	54,486	59.3	25,284	45.7	458,151	50.2
Vehicle type										
Sedan	42,627	48.2	367,349	54.2	46,219	50.3	25,490	46.1	481,685	52.8
Mini van	10,660	12.1	77,640	11.5	10,241	11.2	5,934	10.7	104,475	11.4
Box van	2,207	2.5	17,515	2.6	2,451	2.7	1,313	2.4	23,486	2.6
LPC ^a	22,301	25.2	149,157	22.0	22,252	24.2	15,174	27.4	208,884	22.9
LCV ^b	10,625	12.0	65,535	9.7	10,659	11.6	7,379	13.3	94,198	10.3
Injury level										
Minor injury	82,924	93.8	640,593	94.6	79,158	86.2	43,727	79.1	846,402	92.8
Serious injury	5,439	6.2	35,691	5.3	11,858	12.9	10,235	18.5	63,223	6.9
Fatality	57	0.1	912	0.1	806	0.9	1,328	2.4	3,103	0.3
Risk of serious injury and fatality										
Serious injury risk		6.2		5.3		13.0		19.0		7.0
Fatality risk		0.1		0.1		0.9		2.4		0.3
Main body region injured										
Head	16,015	18.1	65,358	9.7	12,358	13.5	10,815	19.6	104,546	11.5
Neck	4,176	4.7	73,343	10.8	7,639	8.3	3,352	6.1	88,510	9.7
Chest	3,596	4.1	31,441	4.6	8,321	9.1	5,469	9.9	48,827	5.3
Abdomen	1,827	2.1	5,794	0.9	820	0.9	494	0.9	8,935	1.0
Hip	3,695	4.2	68,479	10.1	12,176	13.3	7,022	12.7	91,372	10.0
Upper extremity	15,663	17.7	114,527	16.9	14,133	15.4	8,227	14.9	152,550	16.7
Lower extremity	42,747	48.3	312,400	46.1	35,397	38.5	19,238	34.8	409,782	44.9
Others	701	0.8	5,854	0.9	978	1.1	673	1.2	8,206	0.9
Bicycle helmet in head injury										
No helmet	13,352	83.4	60,973	93.3	11,928	96.5	10,459	96.7	96,712	92.5
With a helmet	2,506	15.6	3,887	5.9	360	2.9	273	2.5	7,026	6.7
Unknown	157	1.0	498	0.8	70	0.6	83	0.8	808	0.8
Type of head injury of main body regions										
Skull fracture	1,053	6.6	4,166	6.4	1,092	8.8	1,201	11.1	7,512	7.2
Brain and other injuries	14,962	93.4	61,192	93.6	11,266	91.2	9,614	88.9	97,034	92.8

^a LPC is a light passenger car.

^b LCV is a light cargo van.

3.2.3 重傷の場合の損傷主部位

重傷の自転車乗員の損傷主部位について、衝突相手の5車種別、年齢帯別にまとめた結果を表3.2に示す。13-64歳と他の年齢帯との構成率の差について、統計検定により比較した。13-64歳はいずれの車種についても構成率が最も高い年齢帯であった。セダンが58.9%、ミニバンが59.2%、ワンボックス車が59.1%、軽乗用車が53.2%、軽貨物車が50.4%であった。重傷の場合、セダンとミニバンとの衝突において、いずれの年齢帯においても下肢が最も多かった。軽乗用車と軽貨物車では、13-64歳、65-74歳、75歳以上は下肢が最も多く、0-12歳は上肢が最も多かった。ワンボックス車では、いずれの年齢帯においても、頭部が最も多かった。

セダンとの衝突において、13-64歳と他の年齢帯の構成率を統計的検定で比較した結果、頭部の0-12歳 ($p < 0.001$) 及び75歳以上 ($p < 0.001$)、胸部の65-74歳 ($p = 0.036$)、腰部の65-74歳 ($p < 0.001$) 及び75歳以上 ($p < 0.001$)、上肢の0-12歳 ($p < 0.001$)、下肢の65-74歳 ($p = 0.019$) 及び75歳以上 ($p = 0.014$)の方が、13-64歳より有意に高かった。また、頸部の0-12歳 ($p < 0.001$) 及び75歳以上 ($p = 0.006$)、胸部の0-12歳 ($p < 0.001$)、腰部の0-12歳 ($p < 0.001$)、上肢の65-74歳 ($p < 0.001$) 及び75歳以上 ($p < 0.001$)の構成率の方が、13-64歳より有意に低かった。

ミニバンとの衝突では、頭部の0-12歳 ($p < 0.001$) 及び75歳以上 ($p < 0.001$)、腹部の0-12歳 ($p = 0.002$)、腰部の65-74歳 ($p = 0.030$) 及び75歳以上 ($p = 0.003$)、上肢の0-12歳 ($p = 0.010$)、下肢の75歳以上 ($p = 0.031$)の構成率の方が、13-64歳より有意に高かった。また、頸部の65-74歳 ($p < 0.001$)、腰部の0-12歳 ($p < 0.001$)、上肢の65-74歳 ($p < 0.001$) 及び75歳以上 ($p < 0.001$)の構成率の方が、13-64歳より有意に低かった。

ワンボックス車との衝突では、頭部の0-12歳 ($p < 0.001$)の構成率の方が、13-64歳より有意に高かった。また、上肢の75歳以上 ($p < 0.001$)の構成率の方が、13-64歳より有意に低かった。

軽乗用車との衝突では、頭部の0-12歳 ($p < 0.001$) 及び75歳以上 ($p < 0.001$)、腰部の65-74歳 ($p < 0.001$) 及び75歳以上 ($p < 0.001$)、上肢の0-12歳 ($p < 0.001$)、下肢の65-74歳 ($p < 0.001$) 及び75歳以上 ($p < 0.001$)の構成率の方が、13-64歳より有意に高かった。また、頸部の0-12歳 ($p = 0.008$) 及び75歳以上 ($p = 0.029$)、腰部の0-12歳 ($p < 0.001$)、上肢の65-74歳 ($p < 0.001$) 及び75歳以上 ($p < 0.001$)の構成率の方が、13-64歳より有意に低かった。

軽貨物車との衝突では、頭部の0-12歳 ($p < 0.001$) 及び75歳以上 ($p < 0.001$)、腹部の0-12歳 ($p < 0.001$)、腰部の65-74歳 ($p = 0.014$) 及び75歳以上 ($p = 0.002$)、上肢の0-12歳 ($p < 0.001$)の構成率の方が、13-64歳より有意に高かった。また、頸部の0-12歳 ($p = 0.020$) 及び65-74歳 ($p = 0.005$)、胸部の0-12歳 ($p = 0.006$)、腰部の0-12歳 ($p < 0.001$)、上肢の65-74歳 ($p < 0.001$) 及び75歳以上 ($p < 0.001$)、下肢の0-12歳

($p = 0.023$) の構成率の方が, 13–64 歳より有意に低かった.

表 3.2 重傷自転車乗員の損傷主部位について 13–65 歳とその他の年齢帯との比較 (5 車種別)

Vehicle type	Main body region injured	Age group of cyclists injured seriously (n=63,223)					Significant difference between 13–64 and other age groups					
		0–12	13–64	65–74	75+	Total	0–12		65–74		75+	
		n/N: A (%)	n/N: B (%)	n/N: C (%)	n/N: D (%)	(%)	A% – B%	p-Value	C% – B%	p-Value	D% – B%	p-Value
Sedan												
	N (%)	2,256 (7.5)	17,718 (58.9)	5,621 (18.7)	4,480 (14.9)	30,075 (100.0)						
	Head	18.6	13.9	13.3	17.8	14.7	4.7	<0.001**	-0.6	0.259	3.9	<0.001**
	Neck	0.9	3.1	2.7	2.3	2.8	-2.2	<0.001**	-0.4	0.107	-0.8	0.006**
	Chest	10.4	12.9	14.0	13.8	13.1	-2.5	<0.001**	1.1	0.036*	0.9	0.095
	Abdomen	1.2	0.9	1.0	0.9	1.0	0.3	0.174	0.1	0.475	0.0	0.975
	Hip	2.0	8.6	12.0	11.6	9.2	-6.6	<0.001**	3.3	<0.001**	3.0	<0.001**
	Upper extremity	26.2	20.3	15.2	11.2	18.4	5.9	<0.001**	-5.1	<0.001**	-9.1	<0.001**
	Lower extremity	40.1	39.0	40.8	41.0	39.7	1.0	0.347	1.7	0.019*	2.0	0.014*
	Others	0.5	1.2	1.0	1.2	1.1	–	–	–	–	–	–
Mini van												
	N (%)	723 (9.5)	4,506 (59.2)	1,268 (16.7)	1,111 (14.6)	7,608 (100.0)						
	Head	22.4	16.6	17.1	20.8	17.9	5.8	<0.001**	0.5	0.693	4.1	<0.001**
	Neck	1.9	3.2	1.5	2.5	2.7	-1.2	0.070	-1.7	<0.001**	-0.7	0.256
	Chest	11.1	13.4	14.7	14.5	13.6	-2.3	0.086	1.4	0.211	1.1	0.334
	Abdomen	2.4	1.0	1.7	0.7	1.2	1.3	0.002**	0.6	0.062	-0.3	n/a
	Hip	2.2	9.8	11.9	12.9	9.9	-7.6	<0.001**	2.1	0.030*	3.1	0.003**
	Upper extremity	25.6	21.3	15.6	11.0	19.3	4.3	0.010**	-5.7	<0.001**	-10.3	<0.001**
	Lower extremity	34.0	33.6	36.4	37.0	34.6	0.5	0.804	2.8	0.063	3.4	0.031*
	Others	0.4	1.1	1.1	0.6	1.0	–	–	–	–	–	–
Box van												
	N (%)	167 (9.7)	1,017 (59.1)	286 (16.6)	252 (14.6)	1,722 (100.0)						
	Head	44.3	28.5	30.4	32.1	30.9	15.8	<0.001**	1.9	0.530	3.6	0.257
	Neck	1.2	2.7	0.7	2.0	2.1	-1.5	n/a	-2.0	n/a	-0.7	n/a
	Chest	3.6	13.6	15.4	17.1	13.4	-10.0	n/a	1.8	0.434	3.5	0.156
	Abdomen	0.6	1.0	1.0	1.6	1.0	-0.4	n/a	0.1	n/a	0.6	n/a
	Hip	2.4	8.2	9.1	11.9	8.3	-5.8	n/a	0.9	0.616	3.7	0.062
	Upper extremity	21.0	16.6	13.6	8.3	15.3	4.3	0.169	-3.0	0.224	-8.3	<0.001**
	Lower extremity	26.9	28.0	29.0	27.0	27.9	-1.1	0.773	1.0	0.741	-1.0	0.742
	Others	0.0	1.5	0.7	0.0	1.0	–	–	–	–	–	–
LPC ^a												
	N (%)	1,462 (9.2)	8,480 (53.2)	3,082 (19.3)	2,921 (18.3)	15,945 (100.0)						
	Head	23.2	18.2	17.2	23.0	19.3	5.0	<0.001**	-0.9	0.248	4.8	<0.001**
	Neck	1.8	3.1	2.5	2.3	2.7	-1.3	0.008**	-0.6	0.069	-0.8	0.029**
	Chest	14.6	15.9	15.2	14.5	15.4	-1.4	0.190	-0.8	0.316	-1.4	0.078
	Abdomen	1.4	1.2	1.1	1.1	1.2	0.2	0.532	-0.1	0.556	-0.1	0.542
	Hip	1.6	9.3	13.9	12.3	10.1	-7.7	<0.001**	4.6	<0.001**	3.0	<0.001**
	Upper extremity	30.2	22.6	14.8	12.3	19.9	7.7	<0.001**	-7.7	<0.001**	-10.3	<0.001**
	Lower extremity	26.6	28.1	33.5	33.3	30.0	-1.5	0.243	5.4	<0.001**	5.2	<0.001**
	Others	0.5	1.6	1.8	1.1	1.5	–	–	–	–	–	–
LCV ^b												
	N (%)	831 (10.6)	3,970 (50.4)	1,601 (20.3)	1,471 (18.7)	7,873 (100.0)						
	Head	25.8	18.0	19.2	26.0	20.6	7.8	<0.001**	1.3	0.274	8.0	<0.001**
	Neck	1.3	2.7	1.4	1.8	2.1	-1.4	0.020*	-1.3	0.005**	-0.9	0.069
	Chest	10.1	13.6	14.6	13.5	13.4	-3.5	0.006**	1.0	0.335	-0.1	0.925
	Abdomen	2.4	0.8	1.2	1.2	1.1	1.6	<0.001**	0.4	0.212	0.3	0.265
	Hip	2.4	9.5	11.7	12.4	9.8	-7.1	<0.001**	2.2	0.014*	2.8	0.002**
	Upper extremity	29.5	22.4	16.6	13.3	20.3	7.0	<0.001**	-5.9	<0.001**	-9.1	<0.001**
	Lower extremity	27.4	31.4	33.7	30.8	31.4	-4.0	0.023*	2.3	0.097	-0.6	0.651
	Others	1.1	1.4	1.5	1.0	1.3	–	–	–	–	–	–

^aLPC is a light passenger car.

^bLCV is a light cargo van.

*Significant at the 5% level, **Significant at the 1% level.

3.2.4 死亡の場合の損傷主部位

死亡した自転車乗員の損傷主部位について, 衝突相手の 5 車種別, 年齢帯別にまとめた結果を表 3.3 に示す. 13–64 歳と他の年齢帯との構成率の差について, 統計的検定を用いて比較した. 75 歳以上は, セダン (39.1%), ワンボックス車 (42.6%), 軽乗用車 (47.3%), 軽貨物車 (51.4%) において, 他の年齢帯に比べて構成率が最も高かった.

ミニバンでは、13-64歳（35.1%）が最も多く、次いで75歳以上（34.4%）であった。自転車乗員が死亡に至った損傷主部位では、いずれの年齢帯でも、5車種すべてにおいて、頭部の割合が高く、13-64歳とそれ以外の年齢帯との構成率の差には有意差がなかった。13-64歳と他の年齢帯の構成率を統計検定で比較した結果、75歳以上の腰部の構成率の方が、セダン（ $p < 0.001$ ）、ミニバン（ $p < 0.001$ ）、軽乗用車（ $p < 0.001$ ）、軽貨物車（ $p < 0.001$ ）において、13-64歳より有意に高かった。同様に、65-74歳の腰部の構成率の方が、軽乗用車（ $p = 0.006$ ）及び軽貨物車（ $p = 0.040$ ）において、13-64歳より有意に高かった。75歳以上の頸部の構成率は、セダン（ $p = 0.038$ ）、軽乗用車（ $p = 0.009$ ）との衝突において、13-64歳より有意に低かった。軽貨物車との衝突では、75歳以上（ $p = 0.024$ ）の胸部の構成率の方が、13-64歳より有意に低かった。

3.2.5 頭部外傷とヘルメット着用の関係

本調査では、表3.1に示す通り、いずれの年齢帯においてもセダンが最も人数が多かったことから、セダンとの衝突による重傷、死亡の頭部外傷を対象に、ヘルメット着用との関係を解析した（表3.4）。重傷の頭部外傷（4,423人）において、「ヘルメット着用なし」が93.5%で、着用ありが5.5%、着用不明が1.0%であった。「ヘルメット着用なし」の頭部外傷（重傷）について、年齢帯別の構成率を比較すると、年齢帯が高くなるほど構成率が高かった。0-12歳が83.6%、13-64歳が94.2%、65-74歳が96.7%、75歳以上が96.6%であった。65-74歳（ $p = 0.008$ ）及び75歳以上（ $p = 0.008$ ）の構成率は、13-64歳と比較して、有意に高かった。その一方で、「ヘルメット着用なし」の頭部外傷（重傷）では、0-12歳の構成率は、13-64歳と比較して有意に低かった（ $p < 0.001$ ）。

死亡の頭部外傷（692人）において、「ヘルメット着用なし」は97.2%で、着用ありが2.3%、着用不明が0.5%であった。「ヘルメット着用なし」の頭部外傷の構成率について、重傷と死亡における年齢帯別構成率を比較すると、いずれの年齢帯においても、死亡の構成率の方が重傷よりも高かった。0-12歳が85.7%（死亡）対83.6%（重傷）、13-64歳が97.1%（死亡）対94.2%（重傷）、65-74歳は97.8%（死亡）対96.7%（重傷）、75歳以上が97.7%（死亡）対96.6%（重傷）であった。つまり、いずれの年齢帯においても、ヘルメットを着用して頭部外傷で死亡した自転車乗員の構成率は、ヘルメット着用して頭部外傷で重傷に至った自転車乗員の構成率よりも低かった。

表 3.3 死亡自転車乗員の損傷主部位について 13-65 歳とその他の年齢帯との比較 (5 車種別)

Vehicle type	Main body region injured	Age group of cyclists injured fatally (n=3,103)					Significant difference between 13-64 and other age groups					
		0-12	13-64	65-74	75+	Total	0-12		65-74		75+	
		n/N: A (%)	n/N: B (%)	n/N: C (%)	n/N: D (%)	(%)	A% - B%	p-Value ^c	C% - B%	p-Value ^c	D% - B%	p-Value ^c
Sedan												
	N (%)	20 (1.6)	412 (34.6)	307 (25.3)	474 (39.1)	1,213 (100.0)						
	Head	35.0	58.5	58.6	55.7	57.0	-23.5	n/a	0.1	0.971	-2.8	0.401
	Neck	20.0	8.0	7.2	4.6	6.7	12.0	n/a	-0.8	0.674	-3.4	0.038*
	Chest	20.0	13.6	15.6	12.0	13.6	6.4	n/a	2.0	0.441	-1.6	0.486
	Abdomen	15.0	3.9	2.3	3.4	3.5	11.1	n/a	-1.6	n/a	-0.5	0.686
	Hip	0.0	3.4	4.9	13.3	7.6	-3.4	n/a	1.5	0.316	9.9	<0.001**
	Upper extremity	0.0	0.7	0.3	0.2	0.4	-0.7	n/a	-0.4	n/a	-0.5	n/a
	Lower extremity	0.0	2.2	2.6	4.0	3.0	-2.2	n/a	0.4	n/a	1.8	0.122
	Others	10.0	9.7	8.5	6.8	8.2	-	-	-	-	-	-
Mini van												
	N (%)	14 (3.3)	148 (35.1)	115 (27.3)	145 (34.4)	422 (100.0)						
	Head	50.0	58.8	61.7	55.9	58.3	-8.8	n/a	3.0	0.531	-2.9	0.581
	Neck	14.3	5.4	3.5	3.4	4.5	8.9	n/a	-1.9	n/a	-2.0	n/a
	Chest	7.1	18.2	14.8	13.1	15.2	-11.1	n/a	-3.5	0.744	-5.1	0.882
	Abdomen	14.3	4.7	4.3	4.1	4.7	9.6	n/a	-0.4	n/a	-0.6	n/a
	Hip	0.0	3.4	4.3	11.0	6.2	-3.4	n/a	1.0	n/a	7.7	<0.001**
	Upper extremity	0.0	0.0	0.0	0.7	0.2	0.0	n/a	0.0	n/a	0.7	0.962
	Lower extremity	0.0	0.7	0.9	2.1	1.2	-0.7	n/a	0.2	n/a	1.4	0.934
	Others	14.3	8.8	10.4	9.7	9.7	-	-	-	-	-	-
Box van												
	N (%)	6 (3.7)	46 (28.4)	41 (25.3)	69 (42.6)	162 (100.0)						
	Head	33.3	47.8	68.3	62.3	58.6	-14.5	n/a	20.5	0.223	14.5	0.550
	Neck	33.3	0.0	4.9	5.8	4.9	33.3	n/a	4.9	n/a	5.8	0.523
	Chest	0.0	26.1	12.2	11.6	15.4	-26.1	n/a	-13.9	n/a	-14.5	0.651
	Abdomen	16.7	8.7	0.0	2.9	4.3	8.0	n/a	-8.7	n/a	-5.8	0.690
	Hip	0.0	10.9	4.9	2.9	5.6	-10.9	n/a	-6.0	n/a	-8.0	0.830
	Upper extremity	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	n/a	0.0	n/a	0.0	0.477
	Lower extremity	0.0	0.0	0.0	2.9	1.2	0.0	n/a	0.0	n/a	2.9	0.713
	Others	16.7	6.5	9.8	11.6	9.9	-	-	-	-	-	-
LPC ^e												
	N (%)	8 (1.0)	187 (24.2)	212 (27.4)	366 (47.3)	773 (100.0)						
	Head	87.5	66.8	60.8	54.1	59.4	20.7	n/a	-6.0	0.571	-12.7	0.217
	Neck	0.0	5.9	5.7	3.6	4.7	-5.9	n/a	-0.2	0.283	-2.3	0.009**
	Chest	12.5	15.5	13.2	13.4	13.8	-3.0	n/a	-2.3	0.894	-2.1	0.934
	Abdomen	0.0	2.7	3.8	2.7	3.0	-2.7	n/a	1.1	n/a	0.1	0.373
	Hip	0.0	3.2	8.5	15.3	10.3	-3.2	n/a	5.3	0.006**	12.1	<0.001**
	Upper extremity	0.0	0.0	0.0	0.3	0.1	0.0	n/a	0.0	n/a	0.3	0.376
	Lower extremity	0.0	0.5	1.4	3.0	1.9	-0.5	n/a	0.9	n/a	2.5	0.470
	Others	0.0	5.3	6.6	7.7	6.7	-	-	-	-	-	-
LCV ^f												
	N (%)	9 (1.7)	119 (22.3)	131 (24.6)	274 (51.4)	533 (100.0)						
	Head	55.6	61.3	63.4	54.4	58.2	-5.8	n/a	2.0	0.323	-7.0	0.286
	Neck	11.1	1.7	1.5	1.8	1.9	9.4	n/a	-0.2	n/a	0.1	n/a
	Chest	22.2	24.4	16.0	20.1	20.1	-2.1	n/a	-8.3	0.486	-4.3	0.024*
	Abdomen	11.1	3.4	4.6	4.7	4.5	7.7	n/a	1.2	n/a	1.4	0.583
	Hip	0.0	3.4	7.6	12.8	9.2	-3.4	n/a	4.3	0.040*	9.4	<0.001**
	Upper extremity	0.0	0.0	0.8	0.4	0.4	0.0	n/a	0.8	n/a	0.4	n/a
	Lower extremity	0.0	0.0	0.0	0.7	0.4	0.0	n/a	0.0	n/a	0.7	n/a
	Others	0.0	5.9	6.1	5.1	5.4	-	-	-	-	-	-

^a LPC is a light passenger car.

^b LCV is a light cargo van.

^c P-Value was not available (n/a) when either n or N was 9 or less.

*Significant at the 5% level, **Significant at the 1% level.

表 3.4 ヘルメット着用有無別の頭部外傷（重傷，死亡）について 13-65 歳とその他の年齢帯との比較（セダンとの衝突）

Injury severity	Bicycle helmet	Age group of cyclists injured to heads by sedans					Significant difference between 13-64 and other age groups			
		0-12	13-64	65-74	75+	Total	0-12	65-74	75+	
		n/N: A (%)	n/N: B (%)	n/N: C (%)	n/N: D (%)	%	A% - B% p-Value ^a	C% - B% p-Value ^a	D% - B% p-Value ^a	
Serious injury										
	N (%)	420 (9.5)	2,460 (55.6)	747 (16.9)	796 (18.0)	4,423 (100.0)				
	No helmet	83.6	94.2	96.7	96.6	93.5	-10.6	<0.001**	2.5	0.008**
	With a helmet	14.5	4.7	3.1	2.8	5.5	9.8	<0.001**	-1.6	0.054
	Unknown	1.9	1.1	0.3	0.6	1.0	-	-	-	-
Fatality										
	N (%)	7 (1.0)	241 (34.8)	180 (26.0)	264 (38.2)	692 (100.0)				
	No helmet	85.7	97.1	97.8	97.7	97.2	-11.4	n/a	0.7	0.664
	With a helmet	14.3	2.5	1.7	1.5	2.3	11.8	n/a	-0.8	n/a
	Unknown	0.0	0.4	0.6	0.8	0.5	-	-	-	-

^a P-Value was not available (n/a) when either n or N was 9 or less.

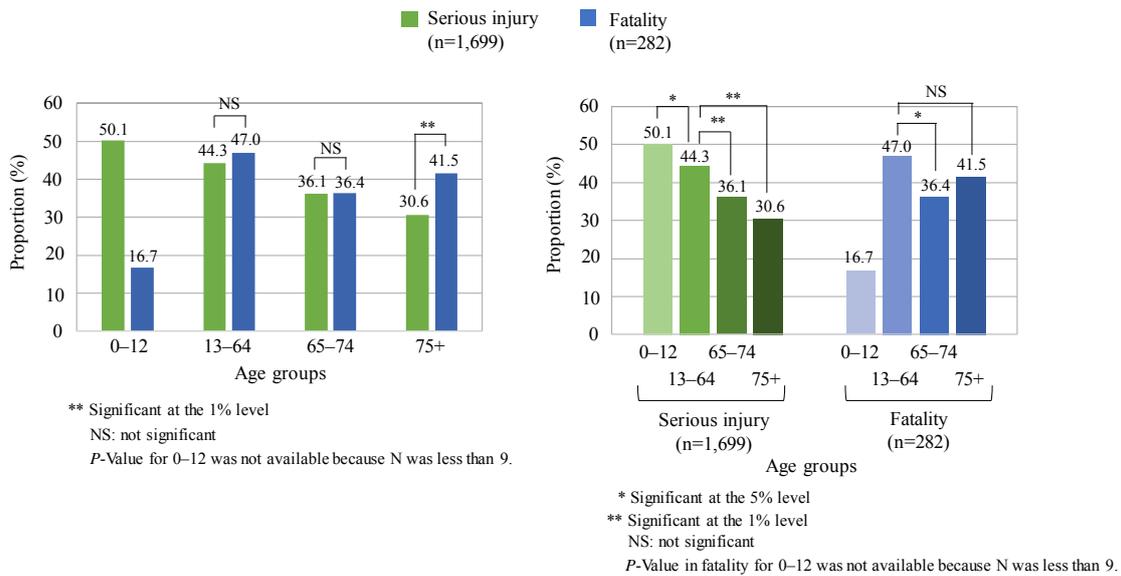
*Significant at the 5% level, **Significant at the 1% level.

3.2.6 「ヘルメット着用なし」の頭部主損傷

ヘルメットは、自転車乗員の頭部外傷（頭蓋骨骨折）に対する保護効果が文献で報告されていることから[33]，頭部主損傷を「頭蓋骨骨折」と「脳傷害その他」の2つに分類し，解析を行った．前項と同様，セダンとの衝突による重傷，死亡の頭部外傷を対象とした．その結果，頭蓋骨骨折については重傷（4,159人）が40.9%，死亡（674）が41.8%であった（表3.5）．その年齢帯別の頭蓋骨骨折の構成率について，年齢帯ごとに重傷と死亡で比較した結果を図3.2（a）に示す．75歳以上の場合，死亡の構成率（41.5%）は重傷（30.6%）より有意に高かった（ $p < 0.001$ ）．13-64歳及び65-74歳については，死亡と重傷の構成率にそれぞれ有意差はなかった．さらに，その年齢帯別の頭蓋骨骨折の構成率について，13-64歳とその他の年齢帯を比較した結果を図3.2（b）に示す．重傷では，0-12歳の構成率は13-64歳より有意に高かった（ $p = 0.041$ ）．対照的に，重傷での65-74歳（ $p < 0.001$ ）及び75歳以上（ $p < 0.001$ ）の構成率は，13-64歳より有意に低かった．死亡において，65-74歳の構成率は，13-64歳より有意に低かった（ $p = 0.031$ ）．

表 3.5 「ヘルメット着用なし」の頭部主損傷について 13-65 歳とその他の年齢帯との比較（セダンとの衝突）

Injury severity	Head injury type without a helmet	Age group of no helmeted cyclists injured to heads by sedans				
		0-12	13-64	65-74	75+	Total
		n/N: A (%)	n/N: B (%)	n/N: C (%)	n/N: D (%)	%
Serious injury						
	N (%)	351 (8.4)	2,317 (55.7)	722 (17.4)	769 (18.5)	4,159 (100.0)
	Skull fracture	50.1	44.3	36.1	30.6	40.9
	Brain and other injuries	49.9	55.7	63.9	69.4	59.1
Fatality						
	N (%)	6 (0.9)	234 (34.7)	176 (26.1)	258 (38.3)	674 (100.0)
	Skull fracture	16.7	47.0	36.4	41.5	41.8
	Brain and other injuries	83.3	53.0	63.6	58.5	58.2



(a) 年齢帯別、重傷と死亡の比較 (b) 重傷・死亡別、13-65歳とその他の年齢帯との比較

図 3.2 年齢帯別「ヘルメット着用なし」の頭蓋骨骨折構成率の比較（セダンとの衝突）

3.2.7 考察

本解析から、65-74歳及び75歳以上は、0-12歳、13-64歳に比べて、重傷率、死亡率が高いことが判明した。特に、死亡率は年齢帯が高齢になるほど増加した。Pentらの文献では、自転車と乗用車の衝突では、車と共に、路面が自転車乗員の頭部外傷の起因にもなる、と報告されている[34]。この路面との衝突による頭部外傷が、本解析結果が示した65-74歳及び75歳以上の高い重傷率・死亡率に影響している可能性がある。また、本調査結果において、65-74歳及び75歳以上の自転車乗員では、腰部傷害が13-64歳より有意に高い構成率であることが判明しており（表 3.2, 表 3.3）、このことが65-74歳及び75歳以上の高い重傷率、死亡率の要因の1つとも考えられる。本解析で得られた結果は、Scholtenらが示した、55歳以上の自転車乗員は重傷になる可能性が高く、救急病院への搬送や入院するケースも多いとする結果と同様の傾向を示している [35]。

重傷の場合、0-12歳及び75歳以上の自転車乗員の頭部外傷の構成率は、セダン、ミニバン、軽乗用車、軽貨物車との衝突において、13-64歳より有意に高かった（表 3.2）。この結果について、0-12歳と75歳以上の自転車乗員では、衝突相手の部位が異なることが考えられる。セダン、ミニバン、軽乗用車はボンネット型である。一般的に、自転車対ボンネット型の車との衝突の場合、自転車乗員は車と衝突し、その後、路面に投げ出されて路面に衝突すると考えられる[36][37]。0-12歳の自転車乗員の頭部は、13歳以上より身長が低いことから車のボンネットに衝突する傾向が予測され[36]、その結果、

頭部傷害 (Head Injury Criterion, 以下, HIC) 値が高い可能性がある[38]. 尚, HIC 値は交通事故における頭部傷害の指標として, 世界的に広く採用されている傷害値である. その一方で, 13 歳以上の自転車乗員の頭部は, 車のウィンドスクリーンと衝突する場合が多く, ウィンドスクリーンは広範囲において HIC 値が 1000 未満と考えられる[39]. 75 歳以上の自転車乗員については, 車との衝突により, 路面との衝突が頭部外傷の主原因である場合が多いことが, 頭部外傷の割合が高い原因とも考えられる[40].

重傷の場合, いずれの年齢帯においても, ワンボックス車との衝突では, 頭部が損傷主部位であることが判明した (表 3.2). この結果は, ボンネットのない箱型という, ワンボックス車の前面の形状が影響していると考えられる. 剛体モデルを使用した自転車乗員とワンボックス車との衝突再現では, 自転車乗員の頭部はウィンドスクリーンと衝突する頻度が高い (93.3%) ことが文献で報告されている[38]. ウィンドスクリーンの周辺部は, HIC 2000 以上で, その中央部の HIC 値 1000 以下よりも HIC 値が高い[39]. 自転車乗員の頭部が, ワンボックス車のウィンドスクリーンの剛性が高い箇所と衝突した場合, 頭部外傷により重傷度が高くなる可能性がある. ワンボックス車と自転車乗員との衝突において, 年齢の違いによる頭部外傷の主要因について, さらに明確にする必要がある.

自転車乗員の死亡では, 5 車種すべて, いずれの年齢帯においても, 重傷の構成率と比較して頭部外傷の構成率が高くなった一方で, 上肢や下肢の構成率は減少した (表 3.3). この結果は, ITARDA の事故データの損傷主部位を解析対象としたことが要因と考えられる. ITARDA の事故データでは, 自転車乗員が, 胸部や下肢の傷害を伴いながら, 頭部外傷が主原因で重傷に至った場合, 損傷主部位は「頭部」として記録される. 従って, 損傷主部位のいずれかが増加すると, 他の身体部位の構成率は減少することを意味する.

重傷における 65-74 歳及び 75 歳以上の腰部傷害の構成率は, セダン ($p < 0.001$, $p < 0.001$), ミニバン ($p = 0.030$, $p = 0.003$), 軽乗用車 ($p < 0.001$, $p < 0.001$), 軽貨物車 ($p = 0.014$, $p = 0.002$) との衝突において, 13-64 歳より有意に高かった (表 3.2). また, 死亡の場合, 75 歳以上の腰部外傷の構成率は, セダン ($p < 0.001$), ミニバン ($p < 0.001$), 軽乗用車 ($p < 0.001$), 軽貨物車 ($p < 0.001$) との衝突において, 13-64 歳より有意に高いことが示された (表 3.3). 65-74 歳の腰部傷害の構成率は, 軽乗用車 ($p = 0.006$) 及び軽貨物車 ($p = 0.040$) において, 13-64 歳より有意に高かった. 従って, 65 歳以上の自転車乗員が車と衝突した場合, 腰部傷害により重傷度が高くなる可能性が予測される. こうした結果から, 車の設計においては, 自転車乗員の頭部保護だけでなく, 腰部保護も視点に入れる必要があると考える.

頭部外傷におけるヘルメットの着用有無では, いずれの年齢帯においても, ヘルメット着用の無い自転車乗員の方が, ヘルメットを着用した自転車乗員より多いことが判明した (表 3.1). その一方で, 自転車乗員が死亡に至った損傷主部位は, いずれの車種,

年齢帯においても、頭部外傷が多かった（表 3.3）。セダンとの衝突による頭部主損傷として、頭蓋骨骨折は重傷（5159 人）が 40.9%，死亡（674 人）が 41.8%であった（表 3.5）。過去の複数の文献において、自転車用ヘルメットは自転車乗員の頭部保護としての効果があることが報告されている[33][41][42][43][44]。Bambach らは、自転車と車との衝突において、ヘルメット使用により、頭部外傷の発症リスクが 74%まで減少し、頭蓋骨骨折、頭蓋内傷害、頭部開放創に対する頭部保護の効果があると報告している[33]。本解析結果では、頭部外傷におけるヘルメットの着用率が低かったが、その理由として、日本では一部の年齢帯を対象に自転車用ヘルメット着用が推奨されているが、法律で義務化されていないことが挙げられる。自転車乗員の重傷や死亡を減少させるためには、頭部保護として、年齢を問わず自転車の利用者全員に、自転車用ヘルメットの着用を広く推奨する必要があると考えられる。

3.3 高齢自転車乗員の交通事故様態

前節の解析により、65–74 歳及び 75 歳以上は、0–12 歳、13–64 歳に比べて、重傷率、死亡率が高いことが判明した（表 3.1）。そこで、高齢者の自転車乗員に着目し、車と衝突した自転車乗員を対象に、自転車乗員の傷害程度、交通事故発生時の自転車乗員の法令違反、道路環境的要因、それらと自転車乗員の年齢帯との関係を調査した。さらに、重傷及び死亡において、損傷主部位が頭部外傷の自転車乗員を対象に、頭部外傷の起因となった加害種別（路面、車）、車の走行速度、自転車乗員の年齢帯との関係について解析を行った。自転車乗員の年齢帯において、60 歳以上を 3 つの年齢帯に分類し、青壮年の年齢帯と比較することで、高齢自転車乗員の交通事故様態を明確にすることを目的とした。

3.3.1 解析方法

本解析では、高齢自転車乗員の事故の実態を解析するため、2009 年～2013 年（5 年間）に日本で発生した自転車とセダンとの衝突事故のデータを使用して解析を行った。セダンは、前節 2.2.1 で示した通り、自転車の衝突相手当事者として頻度が高いと考えられることから、本調査の解析対象の車種として選定した。自転車と衝突したセダンの衝突位置として、車の前面部（正面、前右角、前左角）と衝突した自転車の事故データを解析対象とした。自転車乗員の年齢帯について、解析対象を 13 歳以上とし、13–59 歳、60–64 歳、65–74 歳、75 歳以上の 4 つのグループに分類した。国際連合では 60 歳以上 [45]、世界保健機関（WHO, World Health Organization）では 65–74 歳を前期高齢者、75 歳以上を後期高齢者と定義している[46]。これらを考慮し、高齢者の年齢を分類した。

自転車乗員の傷害の程度は、前項 2.2 と同様、ITARDA のデータベースに従い、軽傷、重傷、死亡に分類した[4].

自転車乗員の法令違反については、「安全不確認」、「交差点安全進行義務違反」、「信号無視」、「一時不停止」、「動静不注視」の 5 つの違反を解析対象とした。それら各法令違反は、道路交通法では次のように規定されている。

- 安全不確認： 一時停止や徐行を行ったが、十分な安全確認を行わなかったことで、相手の動きを認識できなかった、あるいは、認識が遅れ、結果として事故や交通違反に至った場合を指す。
- 交差点安全進行義務違反： 付近に自転車横断帯がある際に自転車横断帯を通行しなかった場合、あるいは、信号機の無い交差点等で交差道路が優先道路を通行する他車や、狭い道路から広い道路等に出る時に交差道路等を通行する他車の進行を妨害し、徐行もせず走行した場合を指す。さらに、交差点内を通行する際、状況に応じて他の車や歩行者に注意せず、危険な速度と方法で進行した場合も、交差点安全進行義務違反に該当する。
- 信号無視： 自転車が道路を通行する際、信号機等に従わなかった場合を指す。
- 指定場所一時不停止等： 道路標識等により一時停止すべきとされている箇所、一時停止しなかった場合を指す。
- 動静不注視： 相手を認知していながら、その相手の動きに注視しなかった場合などを指す。

交通事故時の道路環境的要因では、「交差点信号機あり」、「交差点信号機なし」、「単路信号機あり」、「単路信号機なし」の 4 つのカテゴリについて、その環境的要因と自転車乗員の年齢帯との関係を解析した。

自転車乗員の頭部が損傷主部位の起因となった加害種別（路面、車）の解析では、セダンの走行速度を「30 km/h 以下」と「31–60 km/h」の 2 つの速度帯に分類し、加害種別と自転車乗員の年齢帯との関係について解析を行った。自転車が車と衝突する交通事故では、一般的に、自転車乗員は最初に車に衝突（一次衝突）し、その後、路面に衝突（二次衝突）する[37]。そこで、自転車乗員の年齢帯と路面と路面との衝突による頭部外傷の関係について解析した。

各解析結果では、式 2.3 を用いて、13–59 歳と 60 歳以上の各年齢帯での 2 群の母比率の差の検定（両側検定）を行い、その 2 群の有意差有無を調査した。ここで、解析対象項目において各年齢帯の人数が 10 人未満の場合には、検定解析より除外した。

3.3.2 傷害程度別、年齢帯の構成率

2009年～2013年(5年間)に日本で発生した自転車とセダンとの衝突事故において、13歳以上の自転車乗員の死傷者数は194,551人であった。軽傷、重傷、死亡における年齢帯の構成率を図3.3に示す。軽傷では、13-59歳(79.0%)が最も多く、60歳以上の年齢帯の構成率はいずれも10%未満であった。重傷においても13-59歳(53.9%)が最も多く、次いで65-74歳(19.2%)、75歳以上(17.7%)の順であった。死亡では、75歳以上(40.5%)が最も多かった。この結果から、軽傷より重傷、重傷より死亡のように、傷害程度が高くなるに従い、65歳以上の構成率の増加が示された。

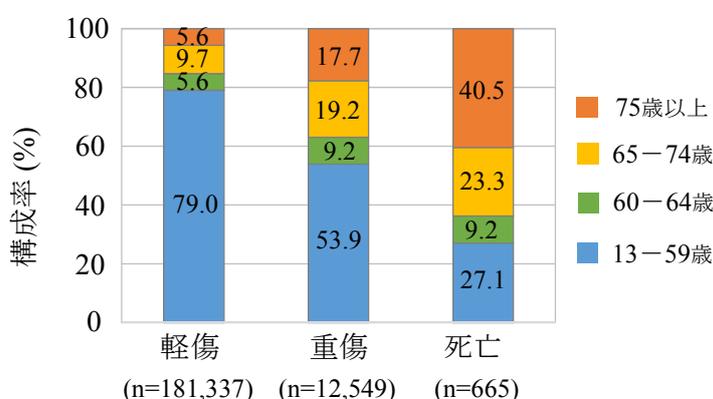


図 3.3 傷害程度別、自転車乗員の年齢帯の構成率

3.3.3 法令違反

自転車乗員の法令違反について、「安全不確認」、「交差点安全進行義務違反」、「信号無視」、「一時不停止」、「動静不注視」の5つの違反を解析項目とし、年齢帯ごとに法令違反の割合を調査した。その構成率について、項目ごとに年齢帯で比較した結果を図3.4に示す。いずれの年齢帯においても、法令違反が最も多かったのは、「安全不確認」であった。「安全不確認」が原因でセダンと衝突した65-74歳($p<0.01$)、75歳以上($p<0.01$)の自転車乗員の構成率は、13-59歳に比べ有意に高かった。「信号無視」においても、60-64歳($p<0.05$)、65-74歳($p<0.05$)の構成率は、13-59歳に比べ有意に低かった。「一時不停止」では、60-64歳($p<0.01$)、65-74歳($p<0.01$)の構成率が、13-59歳に比べ有意に低かった。「動静不注視」では、60-64歳($p<0.01$)の構成率は13-59歳に比べ有意に高く、75歳以上($p<0.01$)の構成率は13-59歳に比べ有意に低かった。「交差点安全進行義務違反」では、13-59歳と60歳以上の各年齢帯の構成率において有意差はなかった。

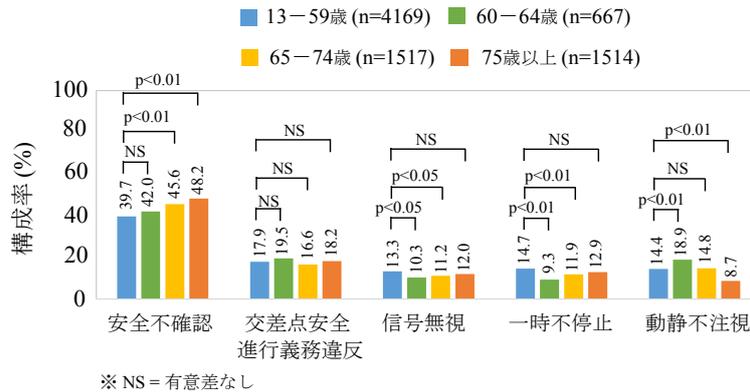
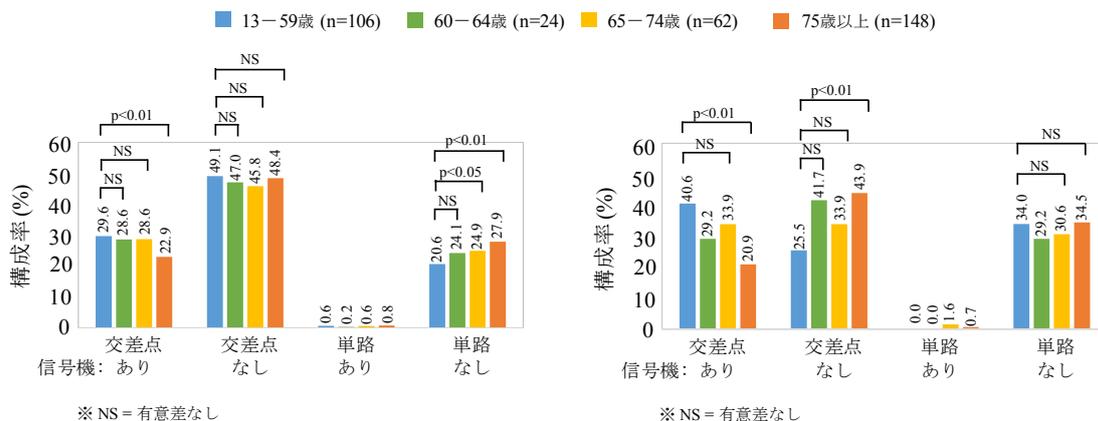


図 3.4 自転車乗員による主な法令違反行為の年齢帯別構成率比較

3.3.4 道路環境的要因

交通事故時の道路環境的要因では、「交差点信号機あり」、「交差点信号機なし」、「単路信号機あり」、「単路信号機なし」の4つのカテゴリーについて、年齢帯ごとにそのカテゴリーの割合を調査した。その構成率をカテゴリーごとに年齢帯で比較した。前項 3.3.2 で解析した結果 (図 3.3) において、軽傷に比べて重傷及び死亡の場合、65 歳以上の自転車乗員の構成率の増加が示されたことから、本解析では重傷及び死亡を対象とした。解析した結果について、重傷は図 3.5 (a) に、死亡は図 3.5 (b) に示す。重傷の場合、いずれの年齢帯においても「交差点信号機なし」の構成率が最も高く、各年齢帯とも 45% 以上であった。「交差点信号機なし」では、13-59 歳と 60 歳以上の各年齢帯における構成率の間に有意差は示されなかった。「交差点信号機あり」では、13-59 歳 (29.6%) の構成率が最も高く、60 歳以上では、年齢帯が高齢になるほど、その構成率は減少傾向であった。75 歳以上 (22.9%) の「交差点信号機あり」の構成率は、13-59 歳 (29.6%) に比べて有意に低かった ($p < 0.01$)。「単路信号機なし」では、75 歳以上 (27.9%) の構成率が最も高く、年齢帯が高齢になるほど構成率が増加する傾向を示した。65-74 歳 (24.1%, $p < 0.05$)、75 歳以上 (27.9%, $p < 0.01$) の「単路信号機なし」の構成率は、13-59 歳 (20.6%) に比べ有意に高かった。死亡の場合、65 歳以上に着目すると、「交差点信号機なし」の構成率が高く、75 歳以上 (43.9%) が最も高い構成率を示した。その 75 歳以上の構成率は、13-59 歳に比べ有意に高かった ($p < 0.01$)。「交差点信号機あり」では、13-59 歳 (40.6%) の構成率が最も高い一方で、75 歳以上 (20.9%) の構成率は最も低く、その 75 歳以上の構成率は 13-59 歳に比べ有意に低かった ($p < 0.01$)。「単路信号機なし」では、75 歳以上 (34.5%) の構成率が最も高かったが、13-59 歳と 60 歳以上の各年齢帯の構成率に有意差は示されなかった。「単路信号機あり」では、いずれの年齢帯においても、重傷、死亡ともに、その構成率は 2% 未満であった。



(a) 重傷 (b) 死亡

図 3.5 道路環境的要因別，年齢帯別構成率比較

3.3.5 頭部外傷の起因となった加害部位（車，路面）

セダンとの衝突により頭部外傷が損傷主部位で重傷・死亡に至った自転車乗員について年齢帯別に分類し，さらに，セダンの走行速度を「30 km/h 以下」（低速度）と「31-60 km/h」（高速度）の 2 群に分け，頭部への加害部位（路面，車）別に解析を行った（表 3.6）．表 3.6 の頭部への加害部位が路面の構成率について，13-59 歳と 60 歳以上の各年齢帯を比較した結果を図 3.6 に示す．低速度の場合，死亡の 60-64 歳を除き，重傷，死亡ともに，頭部外傷の加害部位として，車に比べ路面の構成率の方が高かった．低速度における死亡の 60-64 歳は，車と路面が同構成率（50.0%，各 5 人）であった．路面衝突による頭部外傷の構成率に着目すると，重傷で低速度の場合，75 歳以上（80.6%）の構成率が最も高く，年齢帯が高齢になるほど，その構成率は増加傾向であった（図 3.6 (a)）．重傷で低速度の場合，65-74 歳（75.9%， $p<0.01$ ），75 歳以上（80.6%， $p<0.01$ ）の頭部外傷の構成率は，13-59 歳（60.9%）に比べ有意に高かった．重傷で高速度の場合，低速度と同様，75 歳以上（57.5%）の構成率が最も高く，低速度の構成率に比べて，どの年齢帯においても路面の構成率が減少した．さらに，重傷で高速度の場合，75 歳以上（57.5%）の路面の構成率は，13-59 歳（49.1%）に比べ有意に高かった（ $p<0.05$ ）．死亡で低速度の場合，65-74 歳（72.0%）の構成率が最も高く，高速度では 60-64 歳（40.7%）の構成率が最も高かった（図 3.6 (b)）．死亡で高速度の場合，路面の構成率は，いずれの年齢帯においても，低速度の構成率に比べて減少した．さらに，死亡の構成率について，低速度・高速度ともに，13-59 歳と 60 歳以上の各年齢帯の構成率には有意差がなかった．

表 3.6 加害種別（路面，車）自転車乗員の年齢帯別人数及び構成率（セダンの衝突）

(a) 重傷

重傷自転車乗員数(人)					
走行速度	加害種別	13-59歳	60-64歳	65-74歳	75歳以上
30 km/h 以下	車	312	41	70	53
	路面	486	85	220	220
	合計	798	126	290	273
31-60 km/h	車	295	35	88	107
	路面	284	42	94	145
	合計	579	77	182	252
構成率(%)					
走行速度	加害種別	13-59歳	60-64歳	65-74歳	75歳以上
30 km/h 以下	車	39.1	32.5	24.1	19.4
	路面	60.9	67.5	75.9	80.6
	合計	100.0	100.0	100.0	100.0
31-60 km/h	車	50.9	45.5	48.4	42.5
	路面	49.1	54.5	51.6	57.5
	合計	100.0	100.0	100.0	100.0

(b) 死亡

死亡自転車乗員数(人)					
走行速度	加害種別	13-59歳	60-64歳	65-74歳	75歳以上
30 km/h 以下	車	10	5	7	20
	路面	12	5	18	33
	合計	22	10	25	53
31-60 km/h	車	53	16	44	66
	路面	21	11	23	42
	合計	74	27	67	108
構成率(%)					
走行速度	加害種別	13-59歳	60-64歳	65-74歳	75歳以上
30 km/h 以下	車	45.5	50.0	28.0	37.7
	路面	54.5	50.0	72.0	62.3
	合計	100.0	100.0	100.0	100.0
31-60 km/h	車	71.6	59.3	65.7	61.1
	路面	28.4	40.7	34.3	38.9
	合計	100.0	100.0	100.0	100.0

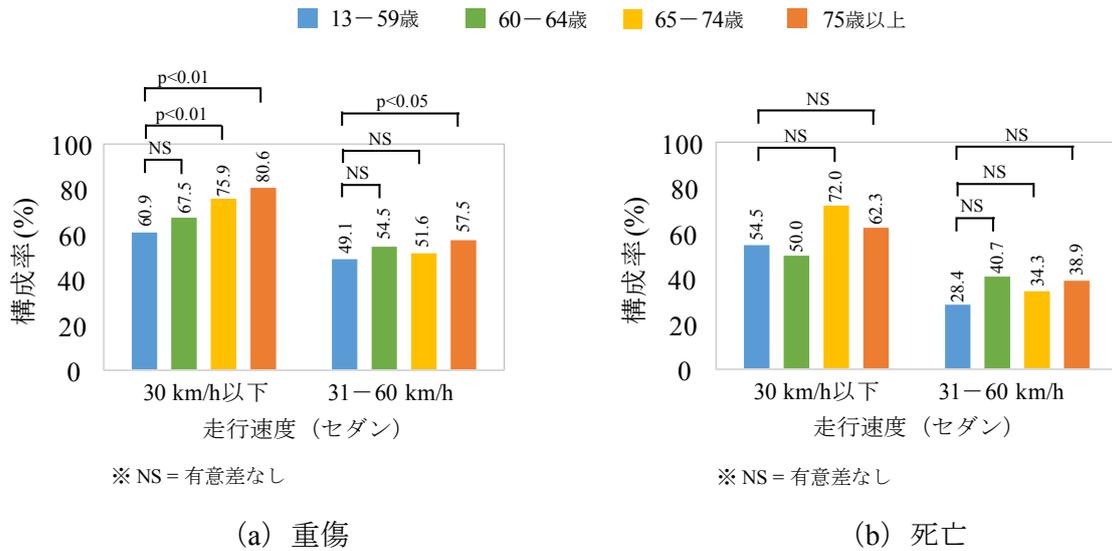


図 3.6 路面が加害となった自転車乗員の年齢帯別構成率比較

3.3.6 考察

自転車乗員の法令違反において、自転車乗員の年齢帯が高くなるほど、安全不確認の構成率が高かった (図 3.4)。また、交通事故発生時の道路環境的要因では、60 歳以上の自転車乗員に着目すると、信号機のない交差点での重傷、死亡の構成率が他の道路環境に比べて最も高かった (図 3.5)。また、信号機のない単路の場合、年齢帯が高齢になるほど構成率が増加傾向を示した。これらの結果から、高齢自転車乗員に対しては、信号機の無い交差点や単路において、安全確認を促す対策が必要と考えられる。例えば、欧州では、高齢者向けに衝突回避のためのシステムを搭載した自転車が開発されている [47]。そのシステムは、レーダーやカメラにより、自転車が走行中に危険な状況に近づくと、自転車のハンドルやサドルに振動を発生させることで、自転車乗員にその危険を知らせる機能を有する。今後、自転車用の新しい衝突回避システムにおいて、本研究の結果で明確になった高齢自転車乗員の特性が反映され、実用化されることで、高齢自転車乗員の事故減少の効果が期待される。

自転車乗員の頭部外傷 (損傷主部位) の起因となった加害種別 (路面, 車) について解析した結果、重傷、死亡ともに、車の走行速度が低速度 (30 km/h 以下) では、車と比べて路面が加害となる自転車乗員の構成率が高かった (表 3.6)。特に重傷の場合、低速度では、年齢帯が高齢になるほど、路面の構成率は増加傾向であった (図 3.6 (a))。従って、高齢自転車乗員は、車の走行速度が低速度でも、頭部の路面との衝突により重傷もしくは死亡に至る可能性が高いことから、可能な限り車の速度をゼロにする必要がある。近年、車に搭載されたレーダーやカメラで前方の歩行者を検知し、車の運転者へ警報で衝突の危険性を知らせ、自動ブレーキにより衝突回避させる技術の開発が途上にある。検知対象として、歩行者だけではなく自転車の検知可能なシステムも一部の車に

は搭載され始めている[22]. 最近では、完全に自動運転走行可能な車が開発途上にあり、日本において公道での完全自動運転車の実験が開始されている[48]. 今後、このような新しい技術により、自転車と車との衝突速度を可能な限りゼロにする、あるいは、衝突を回避することで、自転車乗員の被害が大いに軽減されることが期待される。

3.4 救急搬送された自転車乗員の頭部外傷及び意識障害

日本における救急医療は、患者の重症度に応じて第一次（初期）、第二次、第三次救急医療の3段階の体制を採用している。初期救急医療機関は、軽症患者を対象とした医療機関である。第二次救急医療機関は、入院治療や手術を必要とする重症患者を対象とした医療機関である。第三次救急医療機関は、重篤な救急患者に対し24時間体制で高度な救命救急医療を実施し、複数の専門診療科にわたる処置が可能であり、人口100万人に1施設の割合で設置されている[49]. 第三次救急医療機関として設置されている獨協医科大学越谷病院 救命救急センターは、埼玉県にある6つの救急医療センターの1つで、埼玉東地区の人口約170万人を管轄している。本調査では、その救命救急センターに搬送された、交通事故による自転車乗員患者を対象とし、頭部外傷について種別に調査した。さらに、重軽傷の自転車乗員患者において、解析可能な頭部外傷を有した患者を対象に、意識障害の状況を評価し、意識障害と頭部骨折、脳傷害との関係を調査した。本調査の解析により、自転車乗員の頭部外傷の特性を明確にすることを目的とした。尚、本調査は、獨協医科大学越谷病院の倫理委員会の許諾を得て実施した。

3.4.1 解析方法

獨協医科大学越谷病院 救命救急センターに搬送された2011年～2013年（3年間）の患者データを解析対象とした。患者データには、患者の性別、年齢、外傷の原因、外傷名、診断、傷害の程度などが含まれている。本調査では、まず、交通事故が原因で搬送された患者について、状態別割合、男女の割合、傷害程度別年齢帯、衝突形態を解析した。次に、自転車乗員の患者を対象に、頭部外傷及び意識障害について調査した。

3.4.2 交通事故による救急患者

3年間に救命救急センターに搬送された外因性疾患の患者は1,083人で、その原因として交通事故（358人、33.1%）が最も多かった（図3.7）。交通事故による患者（358人）の状態別構成率を見ると、自動二輪車乗員（101人、28.2%）が最も多く、続いて多かったのは自転車乗員（92人、25.7%）であった（図3.8）。交通事故による患者について男女の割合は、男性が72.1%（258人）で、女性は27.7%（99人）であり、男性の方が多

かった (図 3.9 (a)). 自転車乗員の患者についても、同様に、男性 (57.6%, 53 人) の方が女性 (41.3%, 38 人) より多かった (図 3.9 (b)).

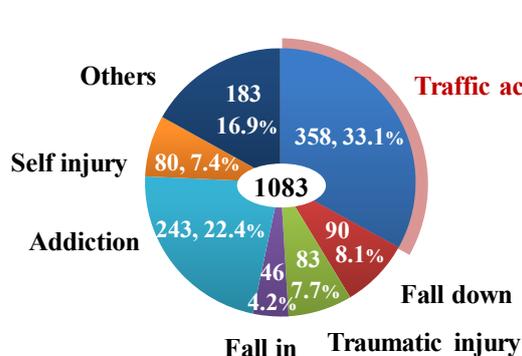


図 3.7 外因性疾患の救急患者の割合 (2011 年～2013 年)

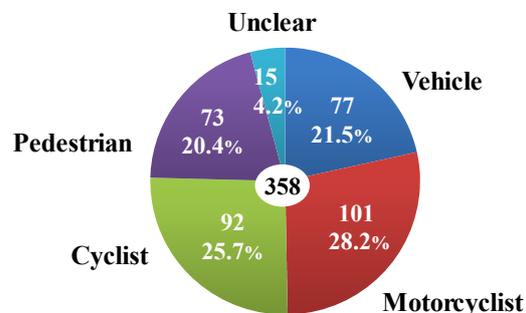
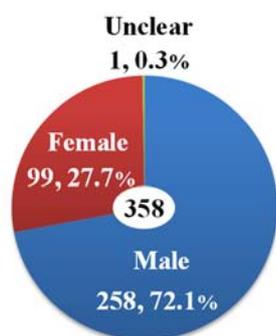
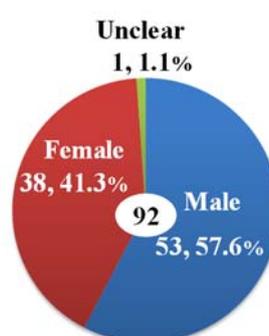


図 3.8 交通事故による救急患者の交通形態



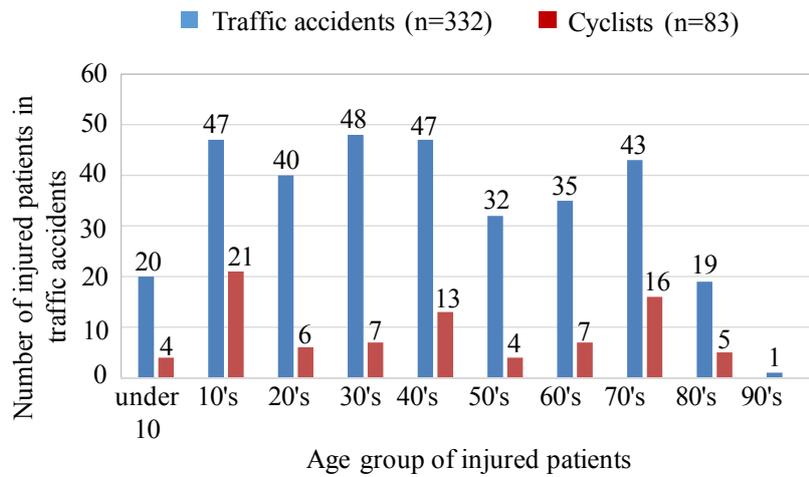
(a) 交通事故による患者全体



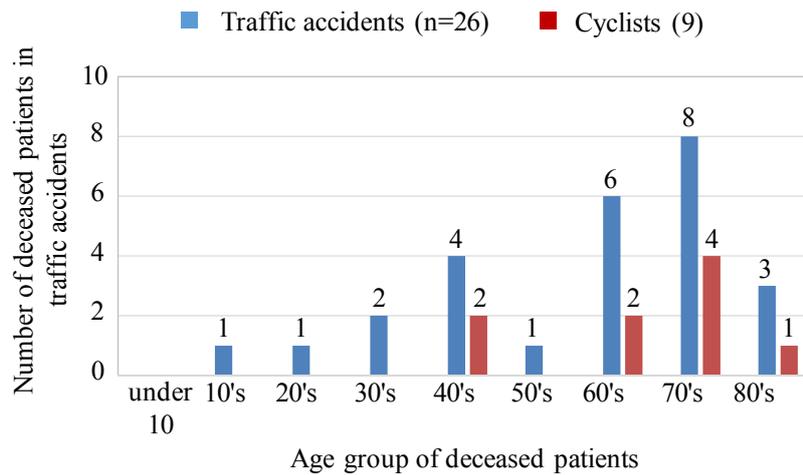
(b) 自転車乗員

図 3.9 交通事故による救急患者の男女の割合

交通事故で救急搬送された患者 358 人のうち、重軽傷が 332 人 (92.7%) で、死亡が 26 人 (7.3%) であった。自転車乗員の 92 人においては、重軽傷が 83 人 (90.2%) で、死亡が 9 人 (9.8%) であった。交通事故による患者全体及び自転車乗員について、図 3.10 (a) に重軽傷を、図 3.10 (b) に死亡の年齢帯別人数を示す。尚、図 3.10 の交通事故による患者全体は自転車乗員も含む。重軽傷の場合、交通事故全体では 10 歳代 (47 人, 14.2%), 30 歳代 (48 人, 14.5%), 40 歳代 (47 人, 14.2%), 70 歳代 (43 人, 13.0%) が多く、自転車乗員では 10 歳代 (21 人, 25.3%) が最も多かった。死亡について、交通事故全体及び自転車乗員ともに 70 歳代が最も多く、交通事故全体では 43 人 (30.8%), 自転車乗員では 16 人 (44.4%) であった。



(a) 重軽傷



(b) 死亡

図 3.10 交通事故による患者全体及び自転車乗員の年齢帯別，傷害程度別人数

交通事故における車両（車，二輪車，自転車）乗車の患者について，事故の衝突形態の割合を図 3.11 に示す．車乗員では，相互衝突（45 人，58.4%）が単独事故（32 人，41.6%）より多かった．二輪車では，相互衝突（86 人，85.1%）が単独（15 人，14.9%）に比べて極めて多かった．自転車では，車乗員や二輪車に比べて，相互衝突（84 人，91.3%）の方が単独（8 人，8.7%）より多い結果が示された．

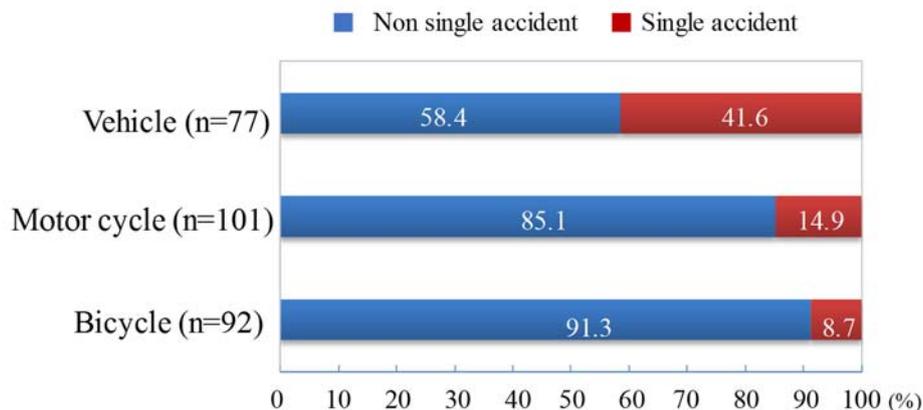


図 3.11 交通事故による車両乗車患者の状態別，衝突形態（相互，単独）の割合

3.4.3 自転車乗員患者の頭部外傷

自転車乗員（92人）について，頭部外傷有無の割合を重軽傷，死亡別に図 3.12 に示す。重軽傷は 83 人であり，死亡は 9 人であった。重軽傷では，「頭部外傷あり」（47.0%）に比べて「頭部外傷なし」（53.0%）の方が多かった。死亡では，「頭部外傷あり」は 88.9% で，重軽傷の頭部外傷の割合（47.0%）と比べて高かった。次に，頭部外傷について種類別に集計し，重軽傷，死亡別に頭部外傷の種別受傷数及び割合を表 3.7 に示す。重軽傷では，頭部外傷を負った患者 39 人において，頭部外傷の種別受傷数は合計 67 件であった。死亡では，頭部外傷を負った患者 8 人において，種別受傷数は合計 9 件であった。この結果から，1 人の自転車乗員患者に対する平均種別受傷数は，重軽傷の場合平均 1.7 種，死亡の場合 1.1 種となり，重軽傷と死亡を合算した全体については 1.6 種の頭部外傷を受傷している結果が示された。従って，頭部外傷を負った患者の場合，事例によっては 1 人の患者に対して複数種の頭部外傷を負っていること示唆する。

次に，自転車乗員の頭部外傷について種類別に分類した。本解析では，死亡者数が少数のため，重軽傷と死亡を合算して分類した。自転車乗員の頭部外傷の種別構成割合を図 3.13 に示す。頭蓋骨骨折（19 件，25.0%）が最も多く，続いて，くも膜下出血（12 人，15.8%），硬膜下血腫（9 件，11.8%）であり，この 3 種で 52.6% の割合を占めた。4 番目以降は，脳挫傷（7 件，9.2%），気脳症（5 件，6.6%），硬膜外血腫（4 件，5.3%）の順であった。

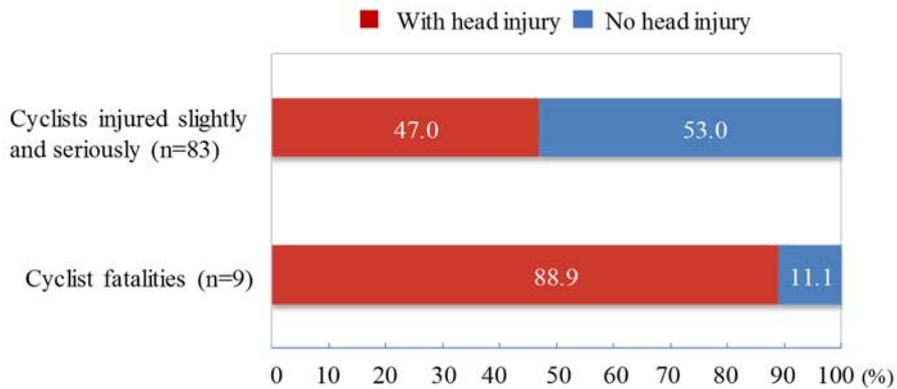


図 3.12 自転車乗員患者（重軽傷，死亡）の頭部外傷有無の割合

表 3.7 自転車乗員患者の頭部外傷の種別受傷数及び割合

	Injured	Deceased	Total
Number of cyclists in emergency patients (a)	83	9	92
Number of head-injured cyclists (b)	39	8	47
Ratio of head-injured cyclists (b) / (a)	47.0%	88.9%	51.1%
Number of different types of head injuries (c)	67	9	76
Average number of head injuries by types per person (c) / (b)	1.7	1.1	1.6

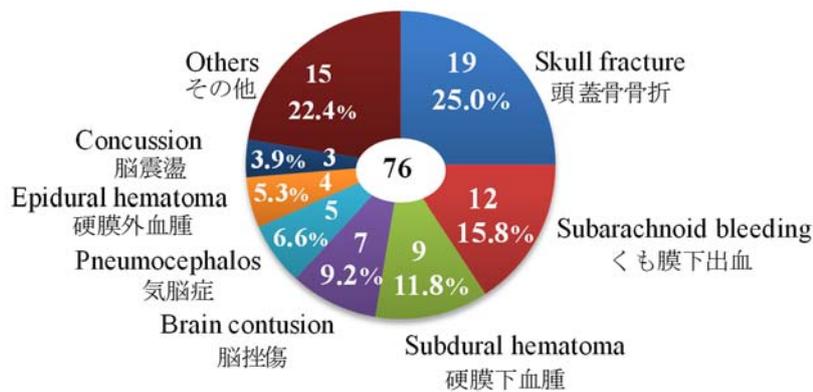


図 3.13 自転車乗員の頭部外傷種別の割合

3.4.4 頭部外傷による意識障害

本調査では、自転車乗員患者の重軽傷者において、解析可能な頭部外傷を有した患者を対象に意識障害の状況を評価し、意識障害と頭部骨折、脳傷害との関係を調査した。搬送時に飲酒があると診断された患者については、意識障害の判別が困難なことから、本分析の対象から除外した。調査対象の頭部外傷を有した重軽傷の自転車乗員は 32 人

のうち、意識障害を発症した患者は 15 人 (46.9%) であった (表 3.8)。平均年齢は 38 歳であった。意識障害の有無については、カルテ記載情報より判断した。カルテにおける主な記載例は、次の通りである。

- ・「認知機能の低下が見られる」
- ・「思ったことを言葉に出す、行動を起こすということがスムーズにできない状況」
- ・「退院時 (転院時)、意識清明にならなかった」
- ・「びまん性軸索損傷の状態」

表 3.8 解析対象とした自転車乗員の平均年齢

調査対象 頭部外傷 (人)	意識障害		
	あり (人)	割合 (%)	平均年齢 (歳)
32	15	46.9	38

急性期の意識障害の評価として代表的な指標に、グラスゴー・コーマ・スケール (Glasgow Coma Scale, GCS) [11]がある。そこで、調査対象の頭部外傷を有した重軽傷の自転車乗員 (32 人) を対象に、意識障害の有無と GCS との関係进行调查し、その結果を図 3.14 に示す。GCS 9 点以下 (6 人) 及び GCS 10-12 点 (7 人) では、意識障害の「発生あり」が 100.0%であった。GCS 13-15 点では、意識障害の「発生なし」が 89.5% (17 人) で、「発生あり」は 10.5% (2 人) であった。

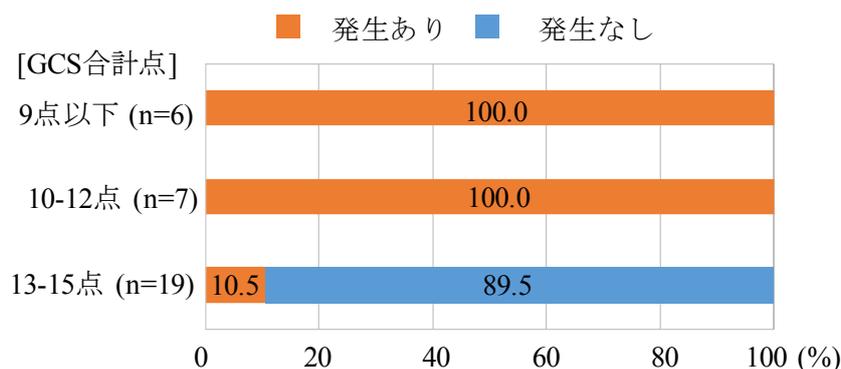


図 3.14 意識障害の有無と GCS との関係 (n=32)

意識障害の有無と頭部外傷との関係を表 3.10 に示す。表 3.10 は「傷害延べ数」及び、意識障害有無別の受傷割合 (%) を示す。頭部外傷については、頭部骨折と脳傷害で分類した。頭部骨折について、意識障害の「発生あり」(15 人) の頭部外傷患者の場合、頭蓋骨骨折 (33.3%)、頭蓋底骨折 (20.0%) の順に多く、全体では頭部骨折の発症は 86.7%

であった。意識障害の「発生なし」(17人)の場合、頭蓋底骨折(23.5%)が最も多く、続いて側頭骨骨折(17.6%)、顔面骨折(17.6%)は同率を示し、全体では頭部骨折の発症は70.6%であった。意識障害の「発生あり」と「発生なし」の場合で、発症の多い頭部骨折の種類は異なり、全体では意識障害の「発生あり」の方が「発生なし」に比べて頭部骨折の発生の割合が高かった。脳傷害について、意識障害の「発生なし」(15人)の頭部外傷患者の場合、脳挫傷(66.7%)、硬膜下血腫(急性含む)(40.0%)、くも膜下出血(26.7%)の順に多かった。全体では193.3%となり、脳傷害の種別では1人当たり平均1.9種であることを示す。意識障害の「発生なし」(17人)の場合、意識障害の「発生あり」と同様、脳挫傷(17.6%)が最も多く、続いて、くも膜下出血(11.8%)、脳震盪(11.8%)が同率を示し、全体では52.9%であった。意識障害の「発生あり」と「発生なし」において、発症率の高い脳傷害の種類は両者で異なり、全体の受傷割合についても、意識障害の「発生あり」(126.7%)と「発生なし」(35.3%)では、極めて異なる結果が示された。

表 3.10 意識障害有無と頭部外傷との関係

	傷害延べ数 (件)			意識障害有無別受傷割合 (%)		
	意識障害			意識障害		
	あり (Y)	なし (N)	計 (Y)+(N)	あり (Y) / 15	なし (N) / 17	計 {(Y)+(N)} / 32
自転車乗員・頭部外傷患者数 (人)	15	17	32			
頭部骨折						
頭蓋骨骨折	5	1	6	33.3	5.9	18.8
頭蓋底骨折	3	4	7	20.0	23.5	21.9
側頭骨骨折	1	3	4	6.7	17.6	12.5
顔面骨折	2	3	5	13.3	17.6	15.6
眼窩(底)骨折	2	1	3	13.3	5.9	9.4
計 (件)	13	12	25	86.7	70.6	78.1
脳傷害						
脳挫傷	10	3	13	66.7	17.6	40.6
硬膜下血腫(急性含む)	6	1	7	40.0	5.9	21.9
くも膜下出血	4	2	6	26.7	11.8	18.8
硬膜外血腫	3	1	4	20.0	5.9	12.5
脳浮腫	3	0	3	20.0	0.0	9.4
脳震盪	3	2	5	20.0	11.8	15.6
計 (件)	29	9	38	193.3	52.9	118.8

次に、意識障害の「発生あり」(15人)の頭部外傷患者について、カルテの記載情報

より、衝突相手が車であり、且つ、車の走行速度が判明する事例を対象とし、車の走行速度と頭部外傷、さらには意識障害の関係を調査した。対象とした頭部外傷は、表 3.10 における頭部骨折のうち、頭蓋骨骨折、頭蓋底骨折、側頭骨骨折とし、脳傷害については脳挫傷とした。頭部（頭蓋骨・頭蓋底・側頭骨）骨折の場合、表 3.11 に示す通り、車の走行速度が 30 km/h 以下では意識障害の発生率が 25.0%であり、走行速度帯が高くなるほど意識障害の発生率が高くなることが判明した。車の走行速度が 40 km/h 超では、意識障害の発生率が 100.0%であった。脳挫傷の場合、表 3.12 に示す通り、車の走行速度が 30 km/h 以下でも意識障害の発生率は 75.0%であり、同速度帯の頭部（頭蓋骨・頭蓋底・側頭骨）骨折の意識障害発生率（25.0%）に比べて、発生率が高かった。脳挫傷についても、車の走行速度が 40 km/h 超では、意識障害の発生率が 100.0%であった。

表 3.11 車の走行速度，頭部（頭蓋骨・頭蓋底・側頭骨）骨折及び意識障害の関係

車の走行速度	頭蓋骨・頭蓋底・側頭骨 骨折		意識障害あり	
	構成率		速度帯別発生率	
	n (件) (a)	%	n (件) (b)	% (b) / (a) *100
30 km/h以下	4	36.4	1	25.0
31-40 km/h	4	36.4	2	50.0
41-50 km/h	1	9.1	1	100.0
50 km/h超	2	18.2	2	100.0
合計	11	100.0	6	54.5

表 3.12 車の走行速度，脳挫傷及び意識障害の関係

車の走行速度	脳挫傷		意識障害あり	
	構成率		速度帯別発生率	
	n (件) (a)	%	n (件) (b)	% (b) / (a) *100
30 km/h以下	4	30.8	3	75.0
31-40 km/h	4	30.8	3	75.0
41-50 km/h	1	7.7	1	100.0
50 km/h以上	1	7.7	1	100.0
合計	10	76.9	8	80.0

3.4.5 考察

救急医療センターにおける救急患者データを解析し、交通事故による自転車乗員の頭部外傷の頭部外傷について種類別に調査した。その結果、頭部外傷を負った自転車乗員患者1人に対して、重軽傷が平均1.7種、死亡が平均1.1種であった。重軽傷の平均数の方が死亡より高い結果が示されたが、これは、本解析がカルテ情報に基づき実施されたことが要因と考えられる。死亡の場合、カルテには死亡の主原因の外傷名が記載され、その他に発症した頭部外傷の詳細な情報の記載はされていないことが多かった。死亡に比べて、重軽傷の場合は、いかなる頭部傷害も患者の様態に影響するリスクがあることから、詳細な情報が記載されている。従って、重傷の患者における頭部外傷の詳細な情報を基に、死亡に至る頭部外傷の主原因を予測する必要があると考える。

本研究では、救急医療センターにおける患者データを解析し、交通事故による自転車乗員の頭部外傷の特性について調査した。その結果、頭蓋骨骨折(19件,25.0%)が最も多いことが判明した。救急医療センターにおける救急患者データにおいて、搬送された自転車乗員患者のヘルメット着用に関する情報は有していなかった。従って、ヘルメット着用の有無と頭部外傷の関係は解析できなかった。ヘルメットは、自転車乗員の頭部外傷(頭蓋骨骨折)に対する保護効果があると考えられることから[18]、今後、ヘルメット着用有無による頭部外傷の種類の違いについて、さらなる調査が必要と考える。

自転車乗員患者の重軽傷者において、頭部外傷が要因で意識障害を生じた患者は46.9%であった。意識障害の有無とGCSとの関係を調査した結果、GCS12点以下では意識障害が100.0%であることが判明した。従って、GCSの合計点で意識障害の発生有無の予測が可能なが推察される。ただし、該当した人数はまだ十分とは言えず、今後は解析データの対象期間を長くするなど、十分なデータ数に基づき解析する必要がある。また、東京都が実施した実態調査において、退院患者の回答として、GCSが軽度であっても高次脳機能障害になった人が48.9%であったと報告がされている[13]。今後、自転車乗員の後遺障害という視点から、意識障害と高次脳機能障害との関係について調査する必要がある。

意識障害の有無と頭部外傷との関係を頭部外傷の種類別に調査した結果、頭部骨折、脳傷害ともに、意識障害の「発生あり」と「発生なし」場合で異なる傾向を示した。意識障害あり(15人)の頭部外傷患者の場合、頭蓋骨骨折(33.3%)が最も多く、頭部骨折全体では、意識障害の「発生あり」(86.7%)の方が意識障害の「発生なし」(70.6%)に比べて頭部骨折の発生率が高かった。また、脳傷害については、意識障害の有無ともに脳挫傷が最も多かったが、意識障害の「発生あり」が66.7%であったのに対し、意識障害の「発生なし」は17.6%であった。脳傷害全体では、意識障害の「発生あり」(193.3%)の方が意識障害の「発生なし」(52.9%)に比べて脳傷害の発生率が極めて高かった。これらの結果から、頭部骨折や脳傷害を受傷した場合、意識障害を生じる可能性が高くなることが予測され、これらの頭部外傷への対策が急務である。

車の走行速度と頭部外傷，さらには意識障害の関係を調査した結果，頭部（頭蓋骨・頭蓋底・側頭骨）骨折，あるいは脳挫傷を受傷した場合，いずれの場合も，車の走行速度が高くなるほど，意識障害の発生率が高くなり，車の走行速度が 40 km/h 超では意識障害の発生率が 100.0%になることが示された．この結果から，頭部（頭蓋骨・頭蓋底・側頭骨）骨折，脳挫傷による意識障害の発生を抑制するためには，自転車と衝突時の車の走行速度を可能な限り減速させることが重要である．自転車の検知可能なシステムにより自動ブレーキで衝突回避させる技術[22]など，近年，車における新しい技術開発が途上にあり，今後，自転車乗員の頭部外傷が大いに軽減されることが期待される．その一方で，脳挫傷を受傷した場合，車の走行速度が 30 km/h 以下でも意識障害の発生率は 75.0%と高い割合であったことから，脳挫傷の発生させないための対策，例えば自転車乗員側においても頭部保護のための対策が必要である．

第三次救急医療機関である獨協医科大学越谷病院では，意識障害等などにより，長期リハビリを必要な患者の場合，他の医療機関へ転院することになる．従って，本調査により得られた意識障害に関する結果は，急性期での発症状況であり，転院先の長期間での意識障害の回復の有無や状況などは不明である．交通事故による頭部外傷と後遺症との関係を明確にするためには，急性期とともに，リハビリにおける回復状況なども今後解明する必要がある．

3.5 結言

2003～2014 年（10 年間）の自転車事故データを使用し，5 車種の車（前面）との衝突で傷害を負った自転車乗員を対象に，年齢帯別に外傷の特性について解析を行った．その結果，重傷では，0-12 歳及び 75 歳以上の自転車乗員の頭部傷害の割合は，セダン，ミニバン，軽乗用車，軽貨物車との衝突において，13-64 歳より有意に高かった．自転車乗員が死亡に至った損傷主部位では，いずれの年齢帯でも，5 車種すべてにおいて，頭部の割合が高く，13-64 歳とそれ以外の年齢帯との構成率の差には有意差がなかった．セダンとの衝突による重傷，死亡の頭部外傷を対象に，ヘルメット着用との関係を解析した．その結果，重傷の頭部外傷（4,423 人）において「ヘルメット着用なし」が 93.5%であり，死亡の頭部外傷（692 人）において「ヘルメット着用なし」が 97.2%であり，ほとんどの自転車乗員がヘルメット着用せずに頭部外傷で重傷，死亡に至っていることが判明した．また，65 歳以上の自転車乗員は，腰部損傷により重傷，死亡に至る危険性が高いことが判明した．

高齢自転車乗員の交通事故様態を明確にするため，2009 年～2013 年（5 年間）の自転車とセダン（前面）との衝突事故のデータを使用し，13-59 歳と 60 歳以上の各年齢帯を比較した．いずれの年齢帯においても自転車乗員の法令違反の構成率が最も高かつ

たのは、安全不確認であった。安全不確認が原因でセダンと衝突した 65–74 歳 ($p<0.01$)、75 歳以上 ($p<0.01$) の自転車乗員の構成率は、13–59 歳に比べ有意に高かった。セダンとの衝突により頭部外傷が損傷主部位で重傷・死亡に至った自転車乗員では、車の走行速度が低速度 (30 km/h 以下) の場合、死亡の 60–64 歳を除き、頭部外傷の加害部位として、車に比べ路面の構成率の方が高かった。重傷で低速度の場合、65–74 歳 (75.9%, $p<0.01$)、75 歳以上 (80.6%, $p<0.01$) の頭部外傷の構成率は、13–59 歳 (60.9%) に比べ有意に高かった。

獨協医科大学越谷病院 救命救急センターに搬送された 2011 年～2013 年 (3 年間) の患者データ解析の結果、自転車乗員 (92 人) において、頭部外傷を負った患者は 47 人 (51.1%) で、1 人の自転車乗員患者に対して平均 1.6 種の頭部外傷を受傷していることが判明した。自転車乗員の頭部外傷の重軽傷患者 (32 人) を対象に意識障害の有無を調査した結果、意識障害を発生した患者は 15 人 (46.9%) であった。意識障害の「発生あり」(15 人) の場合、頭部骨折種別では頭蓋骨骨折 (33.3%) が最も多く、頭部骨折全体では意識障害の「発生あり」(86.7%) の方が意識障害の「発生なし」(70.6%) に比べて頭部骨折の発生率が高かった。脳傷害種別では、意識障害の発生有無ともに脳挫傷が最も多かったが、脳挫傷の発生率については意識障害の「発生あり」の 66.7%に対し、「発生なし」は 17.6%であった。脳傷害全体では、意識障害の「発生あり」(193.3%) の方が「発生なし」(52.9%) に比べて脳傷害の発生率が極めて高かった。さらに、意識障害の「発生あり」(15 人) について、頭部 (頭蓋骨・頭蓋底・側頭骨) 骨折、あるいは脳挫傷を受傷した患者において、いずれの場合も、車の走行速度が高くなるほど意識障害の発生率が高くなり、車の走行速度が 40 km/h 超では意識障害の発生率が 100.0%になることが示された。

第4章

頭部外傷発症予測のための衝撃実験

4.1 諸言

本論第2章において、自転車の衝突形態としては交差点での出会い頭事故が最も多く、自転車事故の60.0%が自転車と車との事故であることが判明した。第3章では、自転車乗員が死亡に至った損傷主部位では、いずれの年齢帯でも、衝突相手の5車種すべてにおいて、他の損傷部位に比べて頭部の割合が高く、13-64歳とそれ以外の年齢帯との頭部外傷の構成率の差には有意差がなかった。また、セダンとの衝突による重傷、死亡の頭部外傷を対象に、ヘルメット着用との関係を解析した結果、重傷の頭部外傷(4,423人)では「ヘルメット着用なし」が93.5%であり、死亡の頭部外傷(692人)では「ヘルメット着用なし」が97.2%であった。さらに、セダンとの衝突により頭部外傷が損傷主部位で重傷・死亡に至った自転車乗員では、車の走行速度が低速度(30 km/h以下)の場合、頭部外傷の加害部位として、車に比べ路面の構成率の方が高かった。自転車がセダンや軽乗用車のようなボンネット型の車と衝突した場合、自転車乗員は車と衝突し、その後、投げ出されて路面に衝突すると考えられる[36][37]。そこで、自転車乗員の頭部に傷害を生じさせる衝突相手として、車あるいは路面のどちらが主原因になり得るのか、詳細に調査する必要がある。本章では、第2章及び第3章で導出された結果を基に条件を選定し、自転車乗員の頭部が実際の車の前面、並びに路面に衝突した時の頭部傷害値を把握することを目的に衝撃実験を実施した。さらに、実際の頭部外傷においてほぼ着用されていない自転車用ヘルメットに着目し、ヘルメットを着用した場合の車及び路面への衝撃実験をそれぞれ実施することで、自転車乗員がヘルメットを着用した場合の傷害値の低減割合を把握し、ヘルメット着用の効果を明らかにすることを第二の目的とする。

4.2 車への衝撃実験

4.2.1 頭部インパクト

本実験では、質量4.5 kgの大人歩行者頭部インパクト(以下、頭部インパクト)[50]を使用し、車への衝撃実験を実施した。頭部インパクトは、通常、歩行者頭部保護の技術基準、及び日本自動車アセスメント(J-NCAP)試験において、歩行者頭部に対する車

両ボンネットの安全性を確認するために用いられる。頭部インパクトは、人間の頭部を模した半球体とベースプレートから構成されており、ともにアルミニウム製である。図 4.1 (a) (b) に示す通り、半球体はポリ塩化ビニル製 (PVC) で覆われている。従来、外部のデータ収録装置と頭部インパクトを接続するため、計測用ケーブルが付していたが、この計測用ケーブルは重量を有するためフリーフライト中の頭部インパクトの軌跡に影響を与え、ボンネット衝撃時の加速度波形がその影響を受ける可能性のあると考えられてきた。しかし、頭部インパクトにヘルメットを装着させる場合、計測用ケーブルを排除した計測が望まれる。そこで、本実験では、データ収録装置[51] (図 4.1 (c)) を大人頭部インパクトに内蔵させたケーブルレス頭部インパクトを使用することで、ケーブルの加速度波形への影響を排除した[52]。頭部インパクトに単軸加速度計を 3 個装着し、3 軸方向の加速度を計測した。加速度計については、現在、技術基準において使用されている小型のオイル式減衰型加速度計[53] (図 4.1 (c)) を装着した。

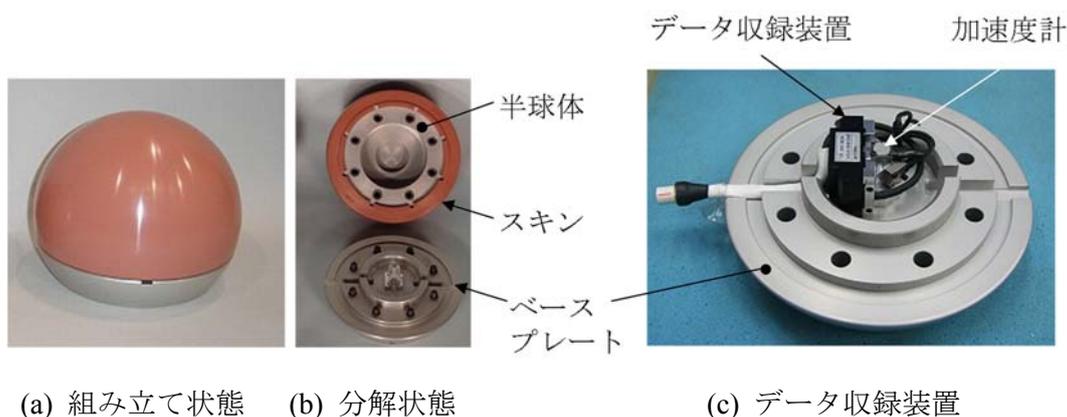


図 4.1 頭部インパクトの外観及び内観

衝撃実験の結果は、x 方向、y 方向、z 方向の 3 軸方向の合成加速度より算出した頭部傷害 HIC (Head Injury Criterion) 値で評価した。HIC 値は頭部の傷害程度を示す指標とされており、3 軸合成加速度を次式 4.1 へ適用させて算出した[54][55]。

$$\text{HIC} = \max \left[\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a(t) dt \right]^{2.5} (t_2 - t_1)$$

式 4.1

ここで頭部合成加速度 t_1 , t_2 は HIC が最大値をとる時間間隔における初期時刻と最終時刻 (s) である。

4.2.2 自転車用ヘルメット

自転車用ヘルメット（以下、ヘルメット）は、日本国内で開発されている Kabuto 社製 FIGO G-1 成人用を使用した（図 4.2）。ヘルメットには 16 箇所の通気孔があり、薄いプラスチック製の外殻の内側の衝撃吸収材（発泡スチレン）により、衝撃エネルギーの吸収が可能な構造となっている。ヘルメットのサイズは、最大幅として、縦 220 mm、幅 180mm であった。ヘルメットの後部は、外殻を有していない。ヘルメットの重量は 0.250 kg であった。実際の自転車事故におけるヘルメットの衝突位置として、ヘルメットの前面部や側面部の頻度が多く、頭頂部や後頭部は頻度が少ないことが報告されている[56]。そこで、本研究における車及び路面との衝撃実験では、ヘルメットの衝撃部位は側面部（図 4.2）とした。実験では、頭部インパクトにヘルメットを装着させて車に衝撃させた。



図 4.2 自転車ヘルメットの外観及び内観

4.2.3 供試車両

供試車両として、2003 年製の軽乗用車（排気量 650 cc、車両重量 820kg、長さ 3390 mm × 幅 1470 mm × 高さ 1640 mm）を使用した（図 4.3）。実際の自転車と車との衝突事故において、自転車が車の前面と衝突する事例では、自転車乗員の頭部は車の前面ウィンドスクリーン、窓枠、ルーフ等に衝突することが報告されている[57]。さらに、自転車と車との衝突において、自転車乗員の傷害程度が高い事例では、前面ウィンドスクリーンの中央部よりも離れた部分（A ピラー、窓枠下端など）に自転車乗員の頭部が衝突する頻度が高いことが報告されている[58]。そこで、本実験では、車の衝突対象は A ピラーとした。A ピラーの上端部及び下端部は、ともに中央部よりも剛性が高いことが報告されていることから[39]、本実験では A ピラーの運転席側下端部を衝撃対象とした（図 4.4）。目標衝突位置は A ピラーの下端部から 70mm 上方の位置とした。打撃位置における WAD（Wrap Around Distance）は 1400mm であった。尚、WAD とは、地面から頭部接触位置まで車両表面上にテープを添えたときの距離である。車は複数台準備し、

同一カ所に対する衝撃は1台につき1回のみ実施した。



図 4.3 実験で使用した軽乗用車



図 4.4 打撃位置

4.2.4 打撃方法

衝撃実験は、交通安全環境研究所、自動車試験場第二地区施設（埼玉県熊谷市）における歩行者頭部衝撃試験装置を使用して実施した。実験では、頭部インパクトをフリーフライトにより車の A ピラー下端部へ打撃させた（図 4.5）。頭部インパクトの車への目標衝突速度は 35 km/h、衝突角度は水平面から 65 度、室温は $20\pm 4^{\circ}\text{C}$ とした（図 4.5 (b)）。セダンが 40 km/h で自転車乗員の側方へ衝突する有限要素解析では、自転車乗員頭部の車に対する衝突速度は約 35 km/h、衝突角度は水平面から約 65 度となることが推定されている[59]。供試車両のタイヤの空気圧は推奨圧力とし、成人男性 2 名が乗車した状態を模擬し、運転席と助手席にはそれぞれ 75 kg（座席 50 kg, 足元 25 kg）のダミーウェイトを搭載した。供試車両は駐車ブレーキを作動させて静止状態に置いた。頭

部インパクト単体(図 4.5 (a)), 及びヘルメットを装着させた頭部インパクト(図 4.5 (b))を供試車両へ上記の条件にて打撃させた。ヘルメットを装着した実験結果の繰り返し性を調査するため、2回繰り返し実験を行った。尚、実験では、頭部インパクトと歩行者頭部衝撃試験装置の間にワイヤーを繋げることで、A ピラー衝突後の頭部インパクトの動きを制限させた。さらに、頭部インパクトには、電気蓄積を避けるため、地面に繋げたアース用ワイヤーを接続した。

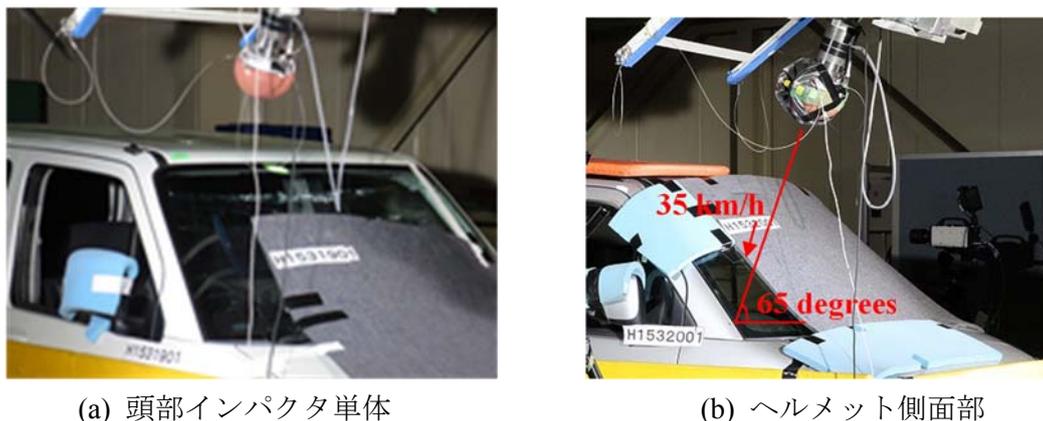


図 4.5 A ピラーへの頭部インパクト衝撃実験

4.2.5 実験結果

実験装置の再現性を検証するため、ヘルメットを装着した頭部インパクトを、車両 A ピラー下端部に対し 2 回繰り返し衝撃させた。ヘルメットを装着させた頭部インパクトより計測される 3 軸合成加速度の時間履歴曲線を図 4.6 に示す。2 回実施した結果における合成加速度の時間履歴はほぼ一致していた。計測 HIC 値をまとめて表 4.1 に示す。1 回目の HIC 値は 2644, 2 回目の HIC 値は 2789 であった。打撃位置における実験回数は 2 回であったため、2 回の平均 HIC 値に対する HIC 値差の割合に着目した。2 回の平均 HIC 値に対する HIC 値差の割合は、5.3%であった。

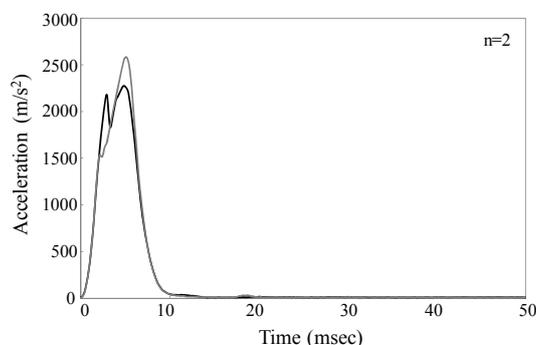


図 4.6 ヘルメット装着頭部インパクトを車両 A ピラー下端部へ衝撃させた時の繰り返し衝撃時の合成加速度時間履歴曲線

表 4.1 繰り返し衝撃時の HIC 値

車両衝撃位置	ヘルメット衝撃位置	(1) 1回目計測 HIC値	(2) 2回目計測 HIC値	HIC値差 (1)-(2)	平均HIC値	平均HIC値に対する HIC値差の割合 (1)-(2) /平均
Aピラー 運転席側 下端部	側頭部	2644	2789	145	2717	5.3%

頭部インパクト単体，及び頭部インパクトにヘルメットを装着させ供試車両 A ピラー下端部へ衝突させた場合の動的挙動を図 4.7 に，時間履歴での合成加速度を図 4.8 に，最大合成加速度，HIC 値，及び HIC 値減少率を表 4.2 にそれぞれ示す．最大加速度は，頭部インパクト単体が 4189 m/s^2 で，ヘルメット装着頭部インパクトが 2275 m/s^2 であった．HIC 値は，頭部インパクト単体が 6529 で，ヘルメット装着頭部インパクトが 2644 であった．頭部インパクト単体とヘルメット装着時の両 HIC 値の差に対する頭部インパクト単体の HIC 値の割合を HIC 値減少率とすると，HIC 値減少率は 59.5% であった．HIC 値 6529 及び 2644 は，重篤以上の頭部傷害となる確率 100% とされる値である[38]．現在の日本における歩行者頭部保護の技術基準では，ボンネットの 2/3 の面積については HIC 値 1000，高剛性部位（ボンネットの 1/2 の面積）については HIC 値 1700 をそれぞれ上限と規定しているが[60]，ヘルメット装着時の HIC 値 2644 は，技術基準上限値を超えていた．

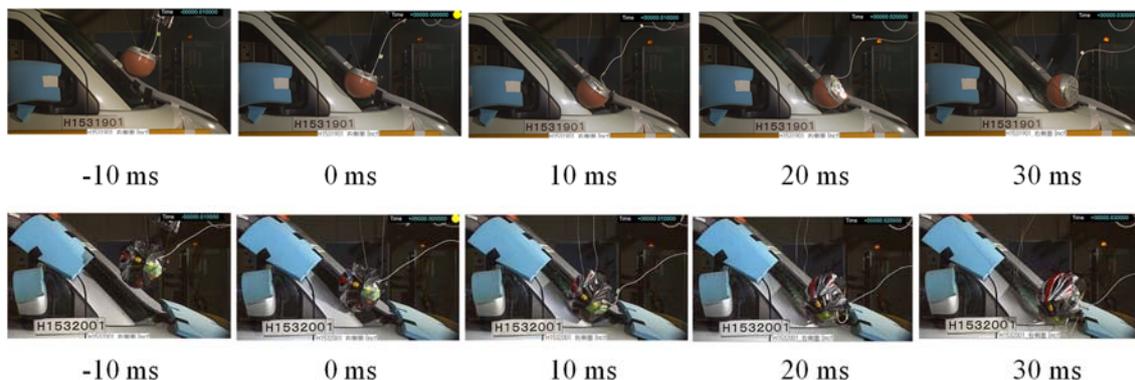


図 4.7 頭部インパクト単体，ヘルメット装着頭部インパクトを車両 A ピラー下端部へ衝撃させた時の動的挙動

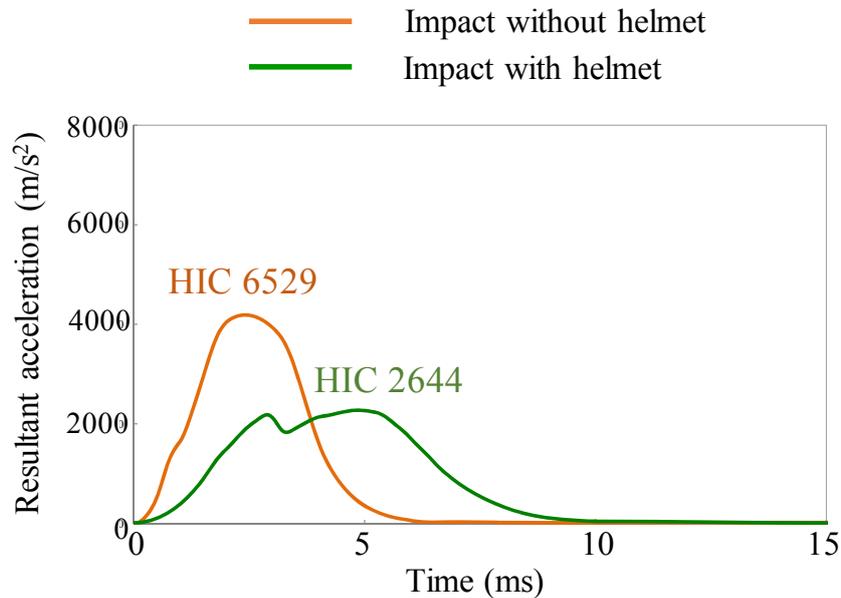


図 4.8 頭部インパクト単体，ヘルメット装着頭部インパクトについて
時間履歴での合成加速度及び HIC 値

表 4.2 最大合成加速度，HIC 値，及び HIC 値減少率

	最大合成加速度	HIC値	HIC値減少率 $\{(a)-(b)\} / (a) * 100$
頭部インパクト単体 (a)	4189 (m/s ²)	6529	59.5%
ヘルメット装着 (b)	2275 (m/s ²)	2644	

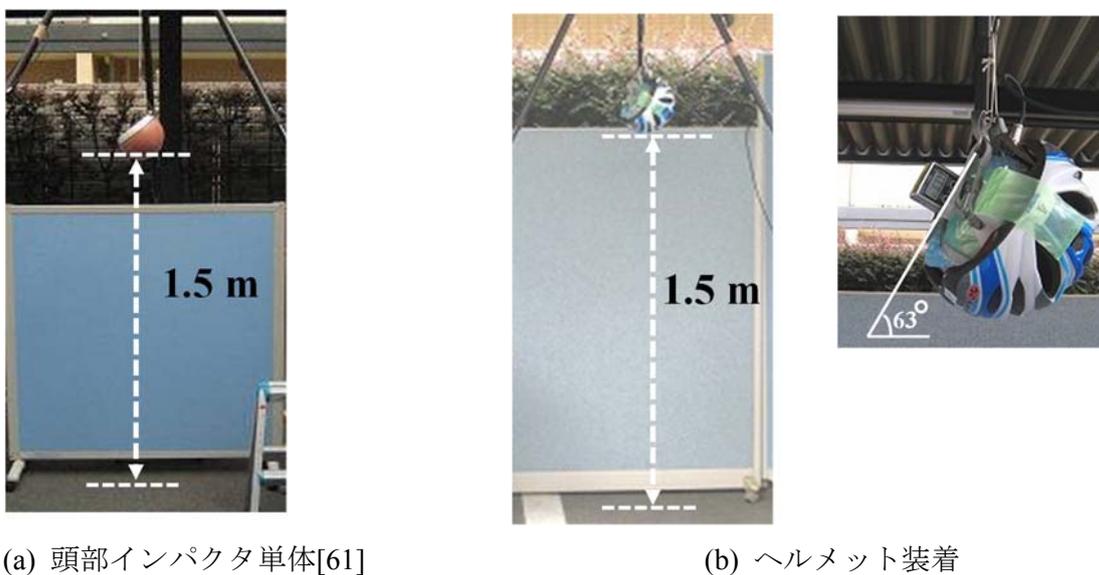
4.3 路面への衝撃実験

4.3.1 実験条件

自転車乗員頭部の路面との衝突を想定し，頭部が路面に衝突した時の頭部傷害値を計測した．路面への衝撃実験では，頭部インパクト単体（図 4.1）及び自転車用ヘルメット（図 4.2）を使用し，ヘルメットを装着した頭部インパクトをアスファルト路面に自由落下させた．路面への衝撃実験の状況を図 4.9 に示す．本実験で使用したヘルメットは，前項 4.2 「車への衝撃実験」のヘルメットと同様，Kabuto 社製 FIGO G-1 成人用である（図 4.2）．路面に対するヘルメットの衝撃部位は，前項 4.2 「車への衝撃実験」を考慮し．本実験においてもヘルメット側面とした（図 4.2）．図 4.9 (b) に示す通り，頭

部インパクトの底面と水平面との角度は 63 度とした。

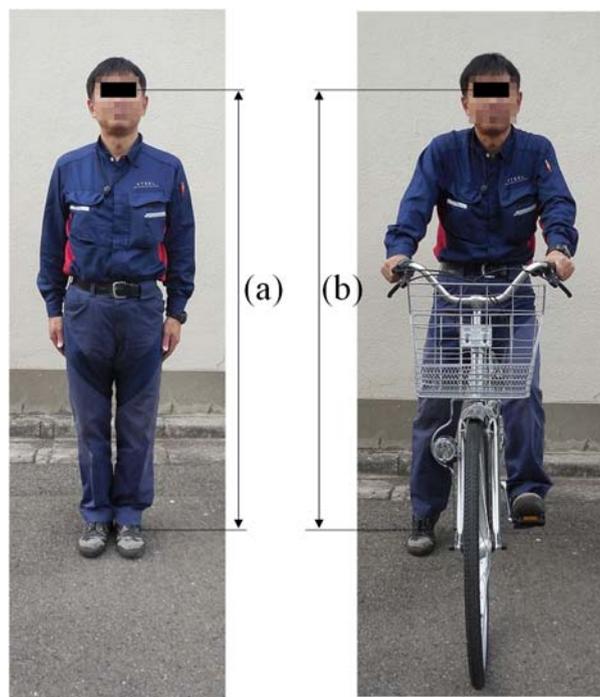
本実験では、ヘルメットを装着した頭部インパクトと路面との距離を 1.5 m（成人男性の顎高に相当）になるように落下高さを調整した（図 4.9 (b)） [61]。本研究では実験に先立ち、交通安全環境研究所の倫理委員会の許可を得た上で、日本人の成人 5 人を対象に、立位（図 4.10 (a)）と自転車乗車時（図 4.10 (b)）の眼高の違いを計測した。眼高の最大差は、表 4.3 に示す通り、5 人の実験参加者において 0.03m であった。この結果から、本研究では歩行者と自転車乗員の眼高はほぼ同じと仮定した。一般社団法人 人間生活工学研究センター（1997 年）による日本人の人体計測データ [62] では、20 歳代の日本人男性の立位での平均顎高が 1.47m であった。そこで、落下高さを記述の 1.5 m に設定した。また、ヘルメットの衝突相手の路面について、日本の一般的な道路がアスファルトであることから、実験における路面はアスファルトを選択した。



(a) 頭部インパクト単体[61]

(b) ヘルメット装着

図 4.9 路面への衝撃実験



(a) 立位 (b) 自転車乗車時

図 4.10 立位及び自転車乗車時の眼高

表 4.3 立位と自転車乗車時の眼高の違い

実験参加者	眼高 (m)		
	(a) 立位	(b) 自転車乗車時	立位と自転車乗車時の差 (b)-(a)
#1	1.625	1.625	0.000
#2	1.640	1.640	0.000
#3	1.590	1.570	-0.020
#4	1.470	1.490	0.020
#5	1.590	1.620	0.030

4.3.2 実験結果

実験の繰り返し性を調査するため、ヘルメットを装着した頭部インパクトの路面に対する衝撃実験を2回実施した。ヘルメットを装着させた頭部インパクトより計測される3軸合成加速度の時間履歴曲線を図4.11に示す。それぞれの実験において、2回実施した結果における合成加速度の時間履歴はほぼ一致していた。計測 HIC 値をまとめて表4.4に示す。1回目の HIC 値は 860、2回目の HIC 値は 885であった。実験回数は2回であったため、2回の平均 HIC 値に対する HIC 値差の割合に着目すると、HIC 値差の割合は 2.9%であった。

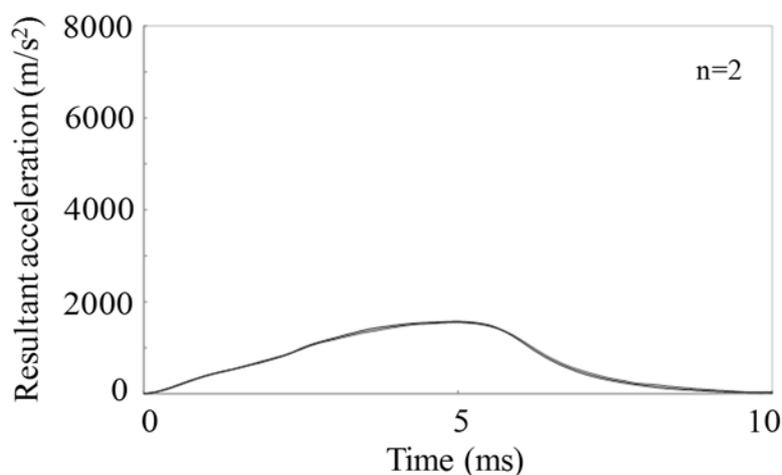


図 4.11 ヘルメット装着頭部インパクトを路面へ衝撃させた時の繰り返し衝撃時の合成加速度時間履歴曲線

表 4.4 繰り返し衝撃時の HIC 値

車両衝撃位置	ヘルメット衝撃位置	(1) 1回目計測 HIC値	(2) 2回目計測 HIC値	HIC値差 (1)-(2)	平均HIC値	平均HIC値に対する HIC値差の割合 (1)-(2) /平均
路面	側頭部	860	885	25	873	2.9%

頭部インパクトにヘルメットを装着した頭部インパクトを路面へ自由落下させた時の時間履歴における合成加速度及び HIC 値を図 4.12 に示す。ヘルメット着用の効果を明確にするため、比較対照として、松井らの実験による頭部インパクトを路面へ自由落下させた時の合成加速度及び HIC 値[61]も図 4.12 に示す。最大合成加速度は、頭部インパクト単体が 6434 m/s^2 に対して[61]、ヘルメットを装着した頭部インパクトでは 1571 m/s^2 であった。HIC 値は、頭部インパクト単体が 6525 に対して[61]、ヘルメットを装着した頭部インパクトでは 885 であった(表 4.5)。HIC 値の減少率はヘルメット装着において 86.4%を示した。HIC 値 6525 は、重篤以上の頭部傷害となる確率 100%とされる値であるが、HIC 値 885 は重篤以上の頭部傷害となる可能性は極めて低い値である[38]。ヘルメット装着した場合の HIC 値 885 は、日本の技術基準で規定されている、自動車のボンネットにおける HIC 値上限 (1000, 1700) [60]を満足していた。

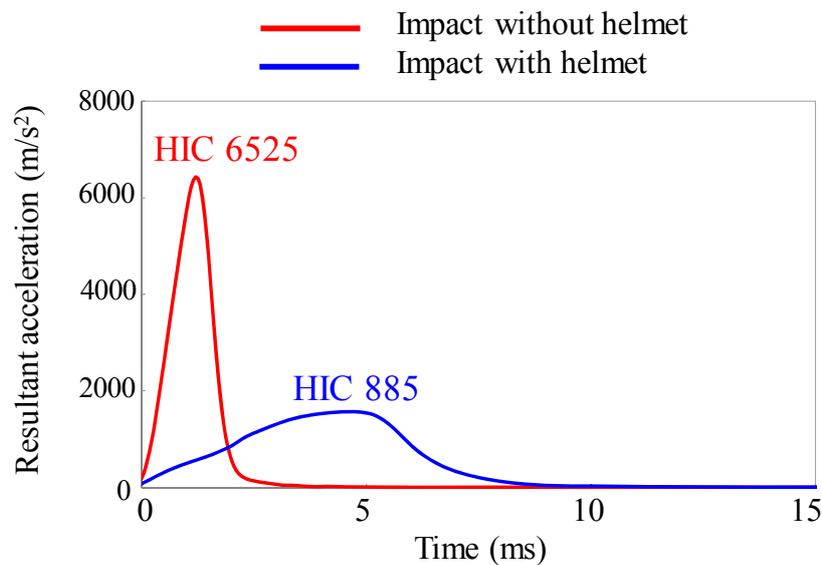


図 4.12 路面に対し頭部インパクト単体[61], ヘルメット装着頭部インパクトを衝撃させたときの時間履歴における合成加速度及び HIC 値

表 4.5 路面に対し頭部インパクト単体[61], ヘルメット装着頭部インパクトを衝突させた場合の合成加速度, HIC 値, HIC 値減少率

	最大合成加速度	HIC値	HIC値減少率 {(a)-(b)} / (a) * 100
頭部インパクト単体 (a)	6434 (m/s ²)	6525	86.4%
ヘルメット装着 (b)	1571 (m/s ²)	885	

4.4 考察

本衝撃実験の結果は、頭部の傷害程度を示す指標とされる HIC 値を用いて評価した。HIC 値は交通事故における頭部傷害の指標として、世界的に広く採用されている傷害値であり、日本における車のボンネットを対象とした歩行者頭部保護性能試験の評価指標としても採用されている[63]。HIC 値は、頭蓋骨骨折の頭部耐性曲線 (Wayne State Tolerance Curve) (図 4.13) を基に傷害指標として開発されたことから[54]、頭部への強い衝撃力は頭蓋骨骨折の発症リスクに大いに関係があると予測される[55]。本研究における車への衝撃実験では、自転車乗員にとって傷害程度が最も厳しい状況を想定し、車のボンネットや前面ウィンドスクリーンよりも剛性が高い A ピラーを衝撃位置とした[39][58]。さらに、自転車が車に衝突した場合、車と共に、路面が自転車乗員の頭部外傷

の起因にもなる可能性があることから[34]、路面に対する衝撃実験を実施した。車及び路面に対する両実験において、ヘルメットを装着した頭部インパクトの HIC 値は、頭部インパクト単体の HIC 値に比べて極めて低く、HIC 値減少率は、車の場合が 59.5%、路面の場合が 86.4%であった。これらの結果から、ヘルメット装着は、自転車乗員の頭部外傷、特に頭蓋骨骨折の発生リスクを減少させる効果を有することが示された。

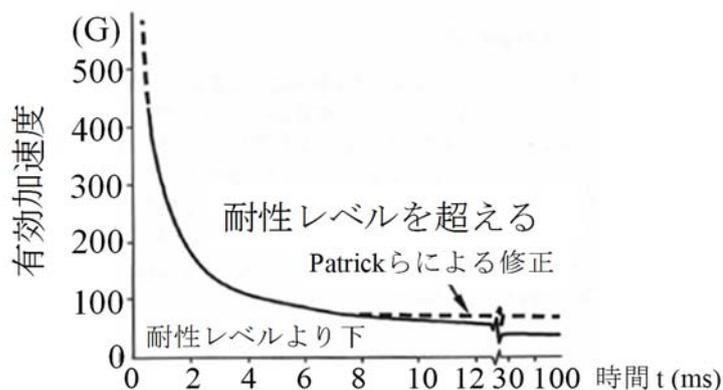


図 4.13 頭部耐性曲線 (Wayne State Tolerance Curve) [55]

A ピラー下端部への衝撃実験での HIC 値は、頭部インパクト単体が 6529 で、ヘルメットを装着した頭部インパクトが 2644 であった。HIC 値の減少率は 59.5%であった。路面への衝撃実験での HIC 値は、頭部インパクト単体が 6525 に対して[61]、ヘルメットを装着した頭部インパクトでは 885 であった。HIC 値の減少率はヘルメット装着において 86.4%を示した。A ピラー下端部及び路面への衝撃の頭部インパクト単体の HIC 値は近似しているが、ヘルメットを装着した頭部インパクトの HIC 値は異なり、路面への衝撃 (86.4%) の方が A ピラー下端部への衝撃 (59.5%) に比べて減少率が高かった。これは、両者の衝突速度と衝突相手の材料の違いが原因と考えられる。A ピラー下端部への衝突速度は 35 km/h であるが、路面への衝突速度は、高さ 1.5m からの自由落下のため、約 20 km/h と算出される。さらに、A ピラー下端部への頭部インパクト単体の衝撃後、A ピラーの衝撃箇所の変形 (凹み) が目視で確認された。しかし、路面への頭部インパクト単体の衝撃では、アスファルト路面に変形が生じたことは文献で報告されていない[61]。本実験におけるヘルメットを装着した頭部インパクトの路面への衝撃実験では、路面の変形は全く観察されなかった。以上のことから、A ピラー下端部及び路面への衝撃実験の結果において、HIC 値の減少率に差が生じたと予測される。

A ピラー下端部への衝撃実験において、ヘルメットを装着した場合の HIC 値 2644 は、日本の技術基準で規定されている、自動車のボンネットの高剛性部位に対する HIC 値上限の 1700 [60]を超えていた。HIC 値をさらに減少させるためには、A ピラーにおいて、車両運転者の視界を遮ることなく、衝突エネルギーを減少させるような構造を組み

込む等、車側の新たな対策が必要と考える。

車両 A ピラー下端部及び路面に衝撃させた後のヘルメット側面の状況を図 4.13 に示す。両実験の実施後、ヘルメットに生じた割れが目視で確認された。本結果から、ヘルメット装着による HIC 値減少は、ヘルメットの内側の衝撃吸収材（発泡スチレン）による衝撃エネルギー吸収が寄与したと考えられる。



(a) 車両衝撃実験

(b) 路面衝撃実験

図 4.13 衝突実験後のヘルメットに生じた割れ

本実験では、実際の自転車事故において頻度の高いヘルメットの衝撃部位を考慮し[56]、ヘルメットの衝突部位を側面部とした。ヘルメットの側面部と同様、ヘルメット前面部の衝突頻度も高いことが報告されていることから[56]、今後、ヘルメットの異なる部位でのヘルメット頭部保護効果も調査する必要がある。

車への衝撃実験では、自転車乗員の傷害程度が高い事例を考慮し、車両ボンネットや前面窓よりも高剛性である、A ピラー下端部を衝撃位置とした。しかし、実際の自転車と車との事故では、自転車乗員頭部は車両前面のウィンドスクリーンと衝突する頻度が高いと報告されている[58]。ウィンドスクリーンのように剛性が低い部位との衝突についても、今後同様の調査を実施する必要がある。

車への衝撃実験では、有限要素モデルを用いた山田らの文献[59]に基づき、頭部インパクトの車への目標衝突速度（35 km/h）、及び衝突角度（水平面から 65 度）を衝撃実験条件として設定した。山田らによる有限要素モデル解析では、自転車モデルに人体ダミー（AM50）モデルを乗車させ、セダンの中央に 40 km/h で衝突させた結果、頭部の車への相対衝突速度は 36.8 km/h で、水平面に対する角度は 66 度という結果であった[59]。一般的に、衝突速度や角度などの衝突条件は、自転車の走行速度、自転車乗員の乗車姿勢、車のブレーキ作動による減速条件など、様々な要因に影響を受ける可能性がある。車への衝撃実験の条件は、自転車乗員が車両走行速度 40 km/h で車に衝突する 1 つの状況を再現した。従って、車両走行速度が 40 km/h 未満あるいは 40 km/h 以上、自転車の走行速度有りなど、本実験とは異なる条件における自転車乗員の頭部外傷について、さらなる調査を実施する必要がある。

路面に対する衝撃実験では、自転車乗員の頭部のポテンシャル・エネルギーのみを考慮し、頭部インパクトの落下高さを設定した。しかし、車と自転車との衝突事故において、車の水平速度からの運動エネルギーが自転車乗員へ伝わる。これにより、回転速度が自転車乗員の頭部に傷害を発生させ、重傷度が高くなる可能性がある。今後の研究にて、回転速度による頭部傷害の重傷度の違いを調査することで、将来、自転車乗員頭部の回転加速度による脳傷害の評価手法の開発が期待される。

4.5 結言

本研究では、実際の軽自動車の A ピラー下端部に対し頭部インパクト単体、及びヘルメットを装着させた頭部インパクトを打撃させる衝撃実験を実施した。その結果、頭部インパクト単体の HIC 値は 6529 であったが、ヘルメットを装着した場合 2644 となった。頭部インパクト単体の HIC 値に対するヘルメット装着時の HIC 値の差を HIC 値減少率とすると、HIC 値減少率は 59.5%であった。しかし、ヘルメット装着時の HIC 値 2644 は、重篤以上の頭部傷害となる確率は 100%となる値である[38]。

路面に対する衝撃実験では、ヘルメットを装着した頭部インパクトをアスファルト路面に自由落下させた。その結果、HIC 値は、頭部インパクト単体が 6525 に対して[61]、ヘルメットを装着した頭部インパクトでは 885 となった。HIC 値の減少率はヘルメット装着において 86.4%を示した。HIC 値 885 は重篤以上の頭部傷害となる可能性は極めて低い値である[38]。

これらの結果から、自転車用ヘルメットを着用せずに、自転車乗員の頭部が車の高剛性部位に衝突した場合、死亡に至る危険性が極めて高いことが示された。自転車用ヘルメットの着用により、車の前面、路面ともに頭部保護効果が示され、特に、路面への衝撃において頭部保護効果が有効であることが判明した。車の前面の中でも特に高剛性部位 (A ピラーなど) への衝突においては、ヘルメット着用により HIC 値は減少するが、依然として自転車乗員が死亡に至る危険性は高いことが示された。そうした場面では、ヘルメット着用だけでは頭部保護として十分とは言えず、高剛性部位において、車の衝突安全技術として、頭部衝突時のエネルギー吸収の向上が求められる。

第5章

有限要素モデル解析

5.1 諸言

自転車交通事故において、交差点での出会い頭事故の危険性（第2章）、路面との衝突による頭部外傷（第3章）、及び自転車用ヘルメットの着用効果（第4章）に着目し、本章では、頭部及び自転車用ヘルメットの有限要素モデルを用いて、頭蓋骨骨折や脳傷害発症及びヘルメット着用効果を定量的に求めた。使用した頭部有限要素モデル[64]は、頭部が衝撃を受けた時の頭蓋内の変化の再現予測が可能である。本解析では、自転車単独事故として、自転車乗員の前頭部及び側頭部が路面に衝突する状況、並びに、出会い頭事故（第2章）に着目し、車と出会い頭衝突後の自転車乗員頭部が路面に衝突する状況、それぞれの状況を想定し、頭部外傷の発症時のヘルメット効果を推定した。さらに、第3章において、獨協医科大学越谷病院 救命救急センターの自転車乗員患者の症例について、頭部有限要素モデルにより実際の頭部外傷（頭蓋骨骨折、脳挫傷）を再現し、その頭部外傷に対するヘルメットの頭部保護効果を推定した。ヘルメットモデルの検証に際し、第4章の路面への衝撃実験結果と比較する。本解析では、頭部外傷として、頭蓋骨骨折、脳内血腫、脳挫傷、DAI（diffuse axonal injury、びまん性軸索損傷）について発症リスクの可能性を評価した。

5.2 人間の頭部

5.2.1 脳の構造[65][66]

人間の脳は、周囲の事象を把握し、思考行動する中枢である。脳の構造を図5.1に示す。頭部表面の軟部組織は5層構造から成り、外側から順に皮膚（頭皮）、皮下組織、帽状腱膜、帽状腱膜下組織、骨膜である。頭蓋骨は、脳を保護する脳頭蓋（頭蓋冠、頭蓋底）と顔面頭蓋から成る。頭蓋骨の下には脳を包む髄膜があり、髄膜は外側から順に、硬膜、クモ膜、軟膜、の3層構造から成る。硬膜は、脳脊髄を包む固い膜で、左右の大腦の間の大脳鎌と呼ばれ、大腦と小脳の間には小脳テント等を形成している。クモ膜は、硬膜と軟膜の間の膜で、軟膜とクモ膜の間にはクモ膜下腔という空間がある。クモ膜下腔は脳脊髄液で満たされており、この空間に出血が生じるとクモ膜下出血になる。軟膜は、外側の上軟膜層と内側の内軟膜の2層から成る。脳全体の後下方の小脳は、運動のバランスやスムーズさを調節する。脳幹は中脳、橋、延髄から成り、意識、体温調節、

呼吸， 血圧， 脈拍など生命維持に関する機能の中枢で， 極めて重要な役割を果たしている． 頭蓋内の脳室内とクモ膜下腔に， 脊柱管内では脊髄クモ膜下腔に， それぞれ脳脊髄液が存在し， 相互に交通している． 脳脊髄液は水様透明な液体で絶えず循環している． 脳脊髄液圧の上昇や脳脊髄液の組成の変化は， 脳外科及び神経内科疾患の貴重な検査所見として重要とされる．

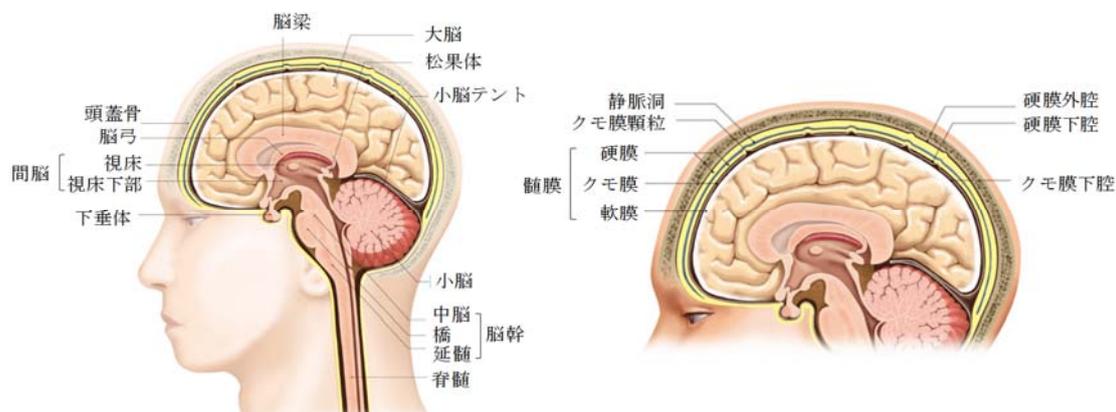


図 5.1 脳の構造[66]

大脳は前頭葉， 側頭葉， 頭頂葉， 後頭葉に分かれ， 機能が分化している． 大脳の部位とその役割を図 5.2 に示す[67]． 前頭葉は物を考える・運動の指令を行う． 頭頂葉は物を感じ解析する． 側頭葉は記憶や言語， 音の解析を行う． 後頭葉は目から届く視覚情報を取り入れ解析する． これらは脳の機能局在と呼ばれる． 左脳が言語の優位半球となり， 計算や数値的なことを主に担当し， 右脳は画像等の情報を処理すると言われる． しかし， 10～20%の人では言語の中枢が右側や両側にあると言われる． 左右の脳は脳梁という太い神経の束で結ばれている．

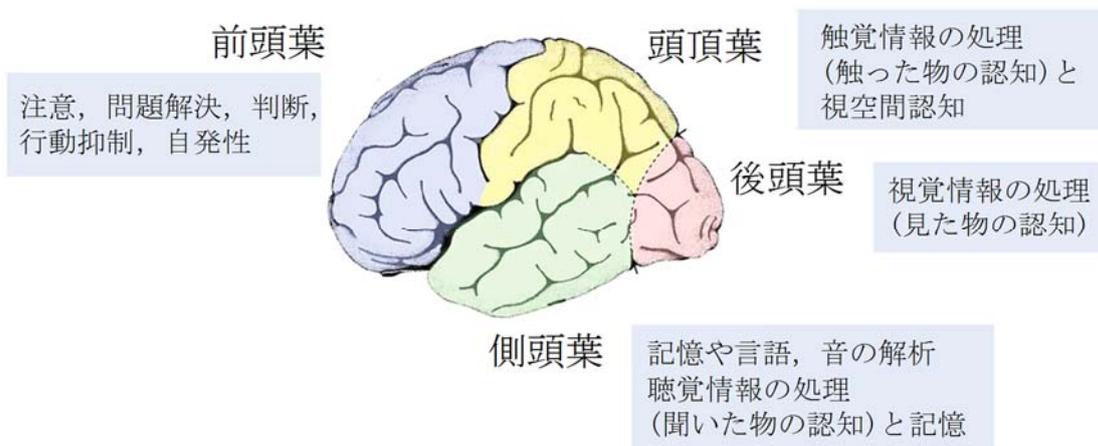


図 5.2 大脳の部位とその役割 [67]

5.2.2 頭部外傷の発生機序[8][9]

人間の脳は、固い頭蓋骨と脳脊髄液を含む髄膜に覆われており緩衝材のような役目になり、保護されている。しかし、交通事故により脳全体が衝撃を受けた場合、頭部外傷を発症する。本章では、交通事故による主な頭部外傷の中から、頭蓋骨骨折、脳挫傷、脳内血腫、びまん性軸索損傷に着目する。

頭蓋骨骨折

頭蓋の骨折の存在は、受傷時に有意な力が加わったことを示唆する。頭蓋骨骨折により、頭蓋骨骨折の無い頭部外傷よりも脳に与えるダメージは大きくなる。しかし、頭蓋骨に骨折が生じて、脳まで損傷しない場合も多い。頭蓋の後部や底部の骨折では、脳を覆っている髄膜が破れ、まれに骨折部位から細菌が頭蓋内へ侵入して感染症を起こし、脳に重大な損傷を与える場合がある。折れた頭蓋骨の断片が脳を圧迫し傷つける場合もある。このような骨折を陥没骨折と言う。後頭骨および頭蓋底（後頭骨底部）の骨は厚く強靱であるため、これらの部位の骨折は強い衝撃を受けたことを意味し、脳損傷のリスクを有意に高める。側頭骨の錐体部に及んだ頭蓋底の骨折では、しばしば中耳および内耳の構造が損傷し、顔面神経、聴神経、および前庭神経の機能が障害される可能性がある。

脳挫傷

主な原因は頭部への強打とされ、衝撃により脳全体が加速度衝撃を受けた場合や、頭部が固定物に衝突することで急に減速されることによる、脳の組織の損傷である。開放性と閉鎖性の両方があり、挫傷の大きさや位置により、様々な脳機能が障害される。挫傷が小規模であれば脳へのダメージも僅かで、症状はほとんど現れない、あるいは軽症の頭部外傷の症状を生じる。脳挫傷が重傷の場合、脳浮腫や頭蓋内圧亢進を来たす場合がある。脳挫傷は最初の受傷から数時間～数日かけて拡大し、神経機能の悪化を招くことがある。平衡感覚や協調運動が損なわれる場合もある。思考能力、感情の調節、運動、感覚、言語、視力、聴力、記憶などに障害が現れる場合もある。重症の場合は、脳の内部で腫れが起こり、脳組織の損傷が進行する。脳ヘルニアが生じ、昏睡状態に陥る場合もある。

脳内血腫

脳内血腫は、脳内部に血液が貯留したものである。外傷の場合、脳内血腫は挫傷が融合することによって生じる。1つまたは複数の挫傷が厳密にどの時点をもって血腫となるかについては、明確な定義がない。続いて頭蓋内圧亢進、脳ヘルニア、および脳幹機能不全が発生する可能性があり、特に側頭葉の病変でよく見られる。

びまん性軸索損傷 (Diffuse Axonal Injury, DAI)

びまん性軸索損傷 (DAI) は、回転方向の減速により剪断力が発生した結果として、軸索線維とミエリン鞘が広範囲に渡りびまん性に破壊されることにより生じる。数個の DAI 病変であれば、軽微な頭部損傷でも生じる場合がある。DAI には肉眼的な器質的病変は含まれないが、CT および病理組織学的検査では、白質に小さな点状出血が観察される場合が多い。DAI は時に、特異的な局所病変がない状態で 6 時間以上持続する意識消失と臨床的に定義されることもある。この損傷による浮腫は、しばしば頭蓋内圧を亢進させて、様々な症候をもたらす。DAI は、揺さぶられっ子症候群における典型的な基礎病態とされる。

5.3 有限要素モデル

5.3.1 頭部モデル[64]

本研究で使用した頭部有限要素モデル (THM, Tokyo Metropolitan University Finite Element Head Model, ver.1.0, 以下, 頭部モデル) は、図 5.3 に示す通り、被撮影者を成人の男性として、MRI 装置の撮影法である T1 強調の MRI (Magnetic Resonance Imaging, 核磁気共鳴画像法) の矢状断 (縦切り) データを用いて構築された。T1 強調は脂肪分を強調し、脳実質の形状を鮮明にすることができる。脳実質モデルは、解剖学的に重要とされる、大脳、脳幹、小脳、脳梁、脳室、硬膜 (髄膜、大脳鎌、小脳テント) の部位が再現されている (図 5.4 (a))。頭部モデルの内観を図 5.4 (b) に示す。頭部モデルは、頭皮、外板・板間層・内板の三層構造から成る頭蓋骨、脳脊髄液、脳実質の各モデルで構成されている。頭部モデル各部位の材料物性値を表 5.1 に示す。一般に、有限要素モデルは、ノード (点) に有限要素が結合し、モデルの材料物性や構造上のプロパティを有した有限要素メッシュを形成することで、モデルが構築される。頭部モデルの総ノード数は 89,226、総要素数は 74,462 であり、総質量は 4.2 kg である。頭部モデルに用いた材料については、頭皮は弾性体、頭蓋骨は等方弾塑性体、そして、脳脊髄液・脳実質は粘弾性体が使用されている。

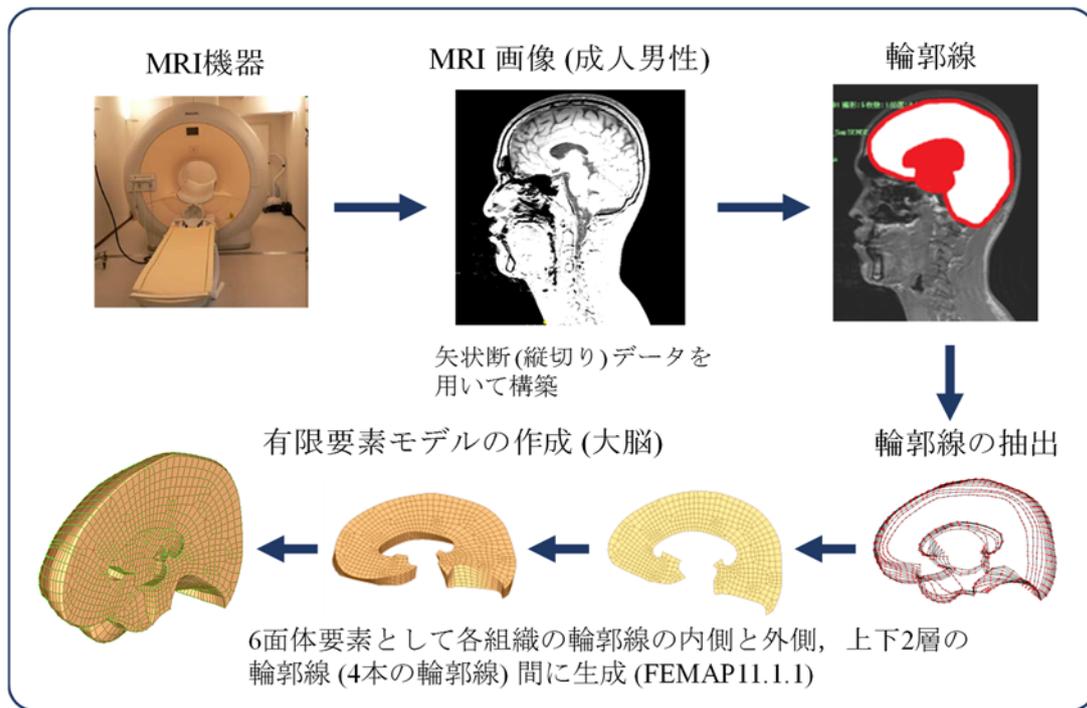
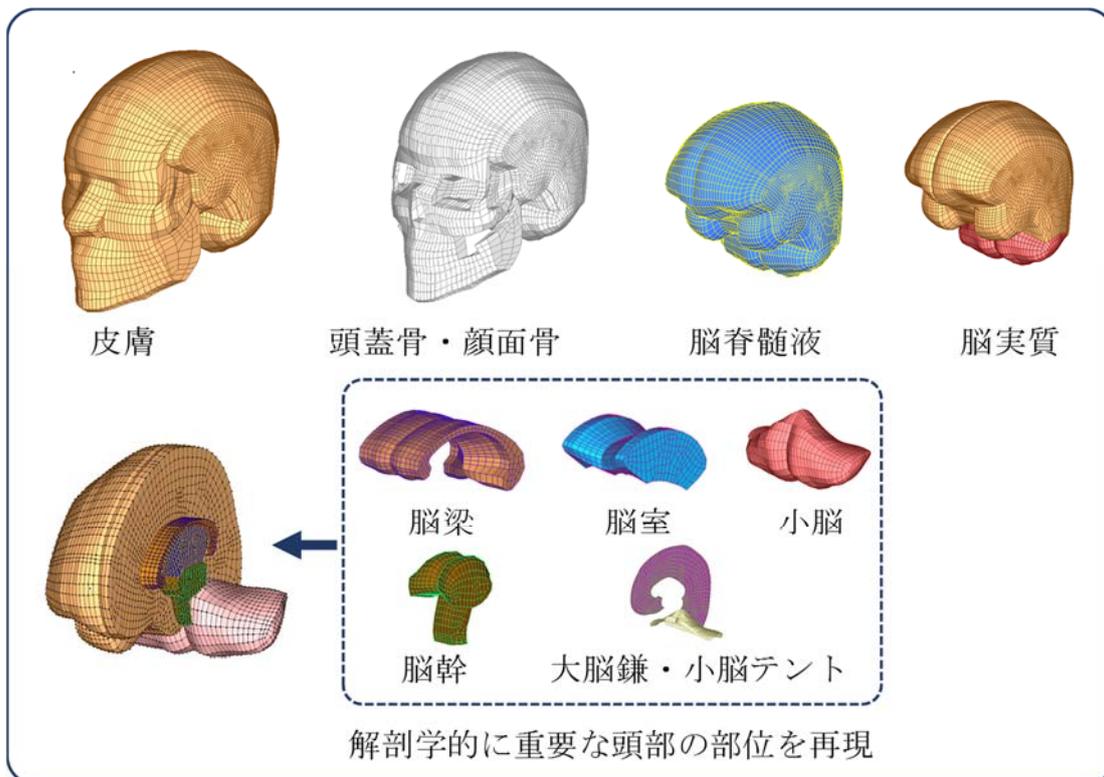
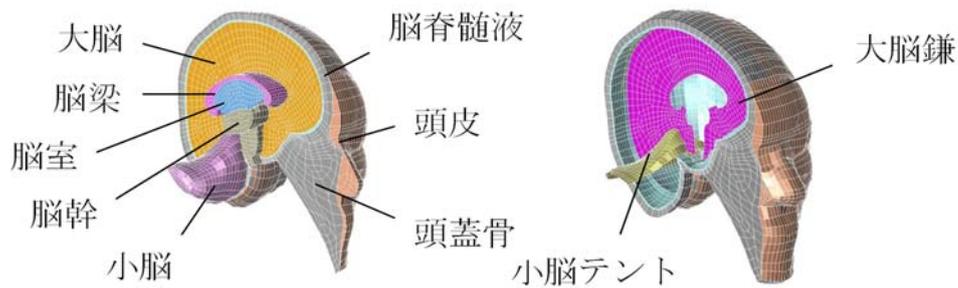


図 5.3 有限要素頭部モデルの構築方法



(a) 頭部モデルの部位別概要

(図 5.4 頭部モデル[64])



(b) 頭部モデルの内観

図 5.4 頭部モデル[64]

表 5.1 頭部モデル材料物性値[68][69][70]

	密度 ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	ヤング率 (MPa)	体積弾性 係数 (MPa)	短期せん断 係数 (MPa)	長期せん断 係数 (MPa)	ポワソン比 (-)	減衰係数 (/s)
頭皮	1000	16.7	-	-	-	0.42	
顔面骨	1213	5000	-	-	-	0.23	
外板/内板	1456	5000	-	-	-	0.25	
板間層	850	2320	-	-	-	-	
脳脊髄液/脳室	1040	-	2190	-	0.0005	-	500000
大脳	1040	-	2190	0.0125	0.0025	-	80
脳幹	1040	-	2190	0.0225	0.0045	-	80
脳幹	1040	-	2190	0.041	0.0078	-	400
大脳鎌/小脳テント	1130	31.5	-	-	-	-	0.45
小脳	1040	-	2190	0.01	0.002	-	80

頭部モデルの妥当性については、Nahum らの屍体実験結果[71]との比較により検証された。その実験の概要を図 5.5 に示す。Nahum らの実験では、5 kg の鉄製インパクトを 6 m/s で頭部の前頭部に衝突させ、前頭部（図 5.5 (a) 「A」）と後頭部（図 5.5 (a) 「B」）における頭蓋内圧力、及び重心位置における加速度を計測している。Nahum らの実験における入力荷重の時間履歴を図 5.5 (b) に示す。

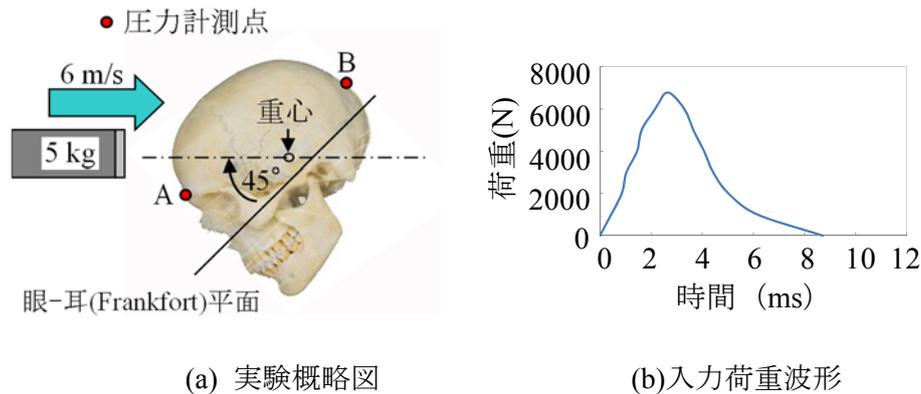


図 5.5 Nahum らによる屍体実験概略図及び実験で得られた入力荷重[71]

頭部モデルの検証では、その入力荷重を頭部モデルの前頭部に相当するノードに入力し、頭蓋内圧力及び加速度について実験結果と比較した。Nahum らの実験では、インパクトと頭部との接触面積が 846 mm^2 であったことから、その面積に相当する前頭部の 54 ノードに荷重を与えた。Nahum らの実験で得られた結果と構築した頭部モデルの解析結果との比較を図 5.6 (a), (b), (c) に示す。頭蓋内圧力や加速度の予測において、屍体実験の結果と頭部モデルの解析結果に僅かのずれはあるが最大値はほぼ一致したことから、構築した頭部モデルは妥当性の範囲内にあるものと判断された。

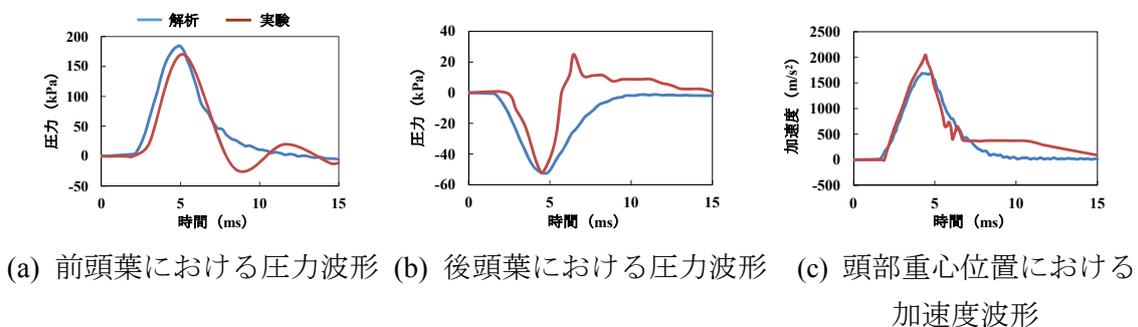


図 5.6 Nahum らの実験結果[71]と頭部モデルによる解析結果との比較

5.3.2 頭部インパクトモデル

頭部インパクト有限要素モデル（以下、頭部インパクトモデル）は、自転車用ヘルメット有限要素モデルの妥当性を検証する際に使用した。頭部インパクトの寸法及び外観を図 5.7 (a) (b) に示す。頭部インパクトの寸法（図 5.7 (a)）を基に、頭部インパクトモデルの構築を行った。成人男性頭部を模した頭部インパクトは、質量が 4.5 kg で[50]、技術基準及び J-NCAP で採用されている。頭部インパクトは、人間の頭部を模した半球体とベースプレートから構成されており、ともにアルミニウム製である。半球体はポリ塩化ビニル（Polyvinyl chloride, PVC）で覆われている。球体部については A2024BE T4

の材料特性を使用し、ベースプレートについては SS400 の材料特性を使用した。表皮に使用されているポリ塩化ビニル (PVC) は合成樹脂の為、正確な材料特性は不明である。頭部インパクトモデルに用いた材料物性を表 5.2 に示す。構築した頭部インパクトモデルは全て六面体要素で構成されている。頭部インパクトモデルの外観を図 5.8 (a) に、断面図を図 5.8 (b) に示す。頭部インパクト有限要素モデルの総ノード数は 17,502 で、総要素数は 14,696 である。頭部インパクトモデルの妥当性は、頭部インパクト落下校正試験の再現解析を行い、実験結果と解析結果を比較することで、材料特性の調整を実施した (図 5.9 (a)(b))。落下校正試験では頭部インパクトを 376 mm の高さより鉄板に自由落下させ、重心位置近傍における 3 軸合成加速度の最大値が 225 G~275 G に入ることが規定されている。実際の頭部インパクトを用いた落下校正試験による合成加速度の結果と、構築した頭部インパクトモデルの解析結果の最大値はほぼ一致し、妥当性の範囲内にあるものと判断された。

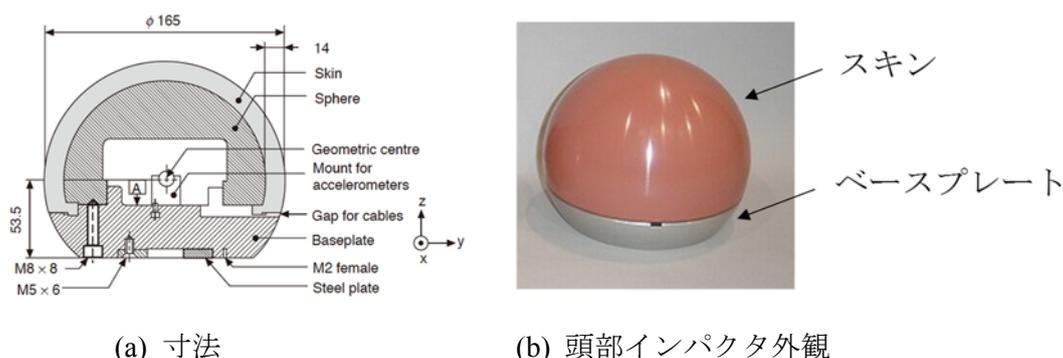


図 5.7 頭部インパクトの寸法及び外観

表 5.2 頭部インパクトモデル材料物性値

	Density ρ (kg/m^3)	Young's modulus E (MPa)	Poisson's ratio
Sphere	2700	70000	0.33
Baseplate	7870	192080	0.30

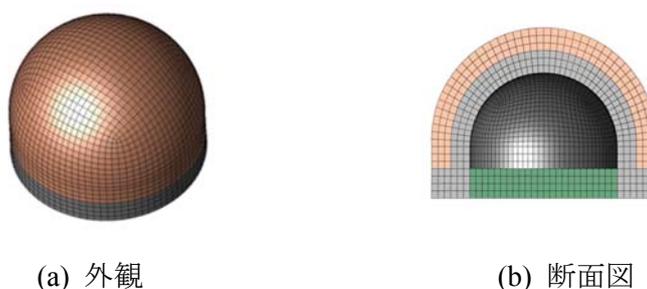


図 5.8 頭部インパクトモデルの外観及び断面図

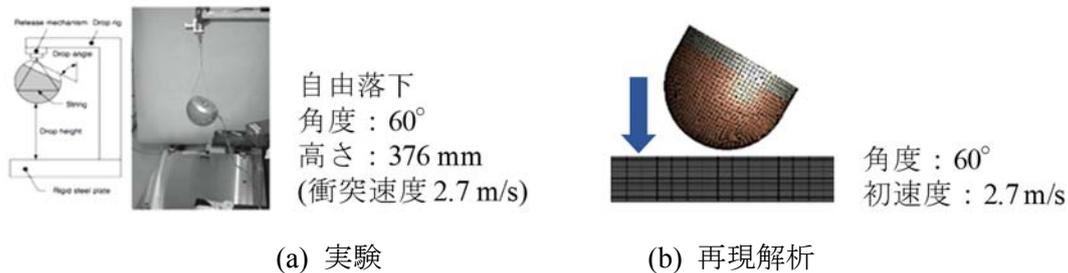


図 5.9 頭部インパクト落下構成試験

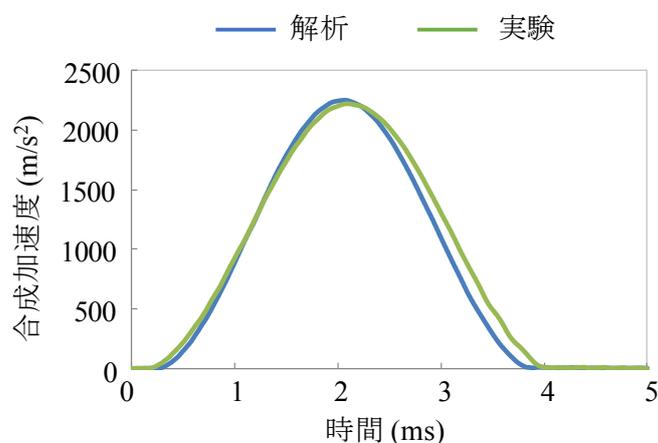


図 5.10 頭部インパクト落下校正試験結果と頭部インパクトモデルによる合成加速度の比較

5.3.3 自転車用ヘルメットモデル

自転車用ヘルメット有限要素モデル（以下、ヘルメットモデル）は、第4章の衝撃実験で使用された Kabuto 社製 FIGO G-1 成人男性用ヘルメット（OGK Kabuto, 2012）を対象に構築した。図 5.11 にヘルメットモデルの構築手順を示す。東京都立産業技術センターにてヘルメットの CT（Computed Tomography, コンピューター断層撮影）撮影を行った。撮影した CT 断層画像データを基に、ヘルメット外側の形状（シェル要素）を、続いて外側のシェルから内側シェルを作成し、外側と内側を六面体要素で厚みを生成した。モデル作成には、Siemens 社（旧 SDRC 社）製の Femap を使用した。ヘルメットモデルは、FIGO G-1 ヘルメットと同様、外殻（ポリエチレン）と衝撃吸収材（発泡スチレン）の各モデルで構成されている[73]。外殻は厚さ 1.0 mm のシェル要素で、衝撃吸収材は、六面体要素で構成されている。外殻と衝撃吸収材の材料物性値を表 5.3 に示す。ヘルメットモデルの総ノード数は 5,252、総要素数は 4,302 であり、総質量は 0.250 kg である。Kabuto 社製 FIGO G-1 の自転車用ヘルメット及びヘルメットモデルを図 5.12 に示す。ヘルメットモデルの妥当性については、前章 4.3「路面への衝撃実験」の結果（図 4.12）

との比較により検証された。路面への衝撃実験では、頭部インパクトの底面と水平面との角度は 63 度とし、ヘルメット装着した頭部インパクトを、高さ 1.5m からアスファルト路面に自由落下させた (図 4.9)。高さ 1.5m からの自由落下なので、衝突速度は 5.42 m/s と算出される。ヘルメットの衝撃部位は、ヘルメット側面であった。この実験条件に従い、本解析では、頭部インパクトモデルにヘルメットモデルを装着させた。頭部インパクトモデルの底面と路面モデルとの角度は 63 度とし、路面モデルに対するヘルメットの衝撃対象はヘルメット側面とした。路面モデルについては、その衝撃実験に従い、アスファルトとした。アスファルトの材料物性値を表 5.4 に示す[72]。前章 4.3 「路面への衝撃実験」で得られた結果とヘルメットモデルの解析結果との比較を図 5.13 に示す。路面へ衝撃させたときの合成加速度について、実験結果とヘルメットモデルの解析結果の最大値はほぼ一致し、妥当性の範囲内にあるものと判断された。

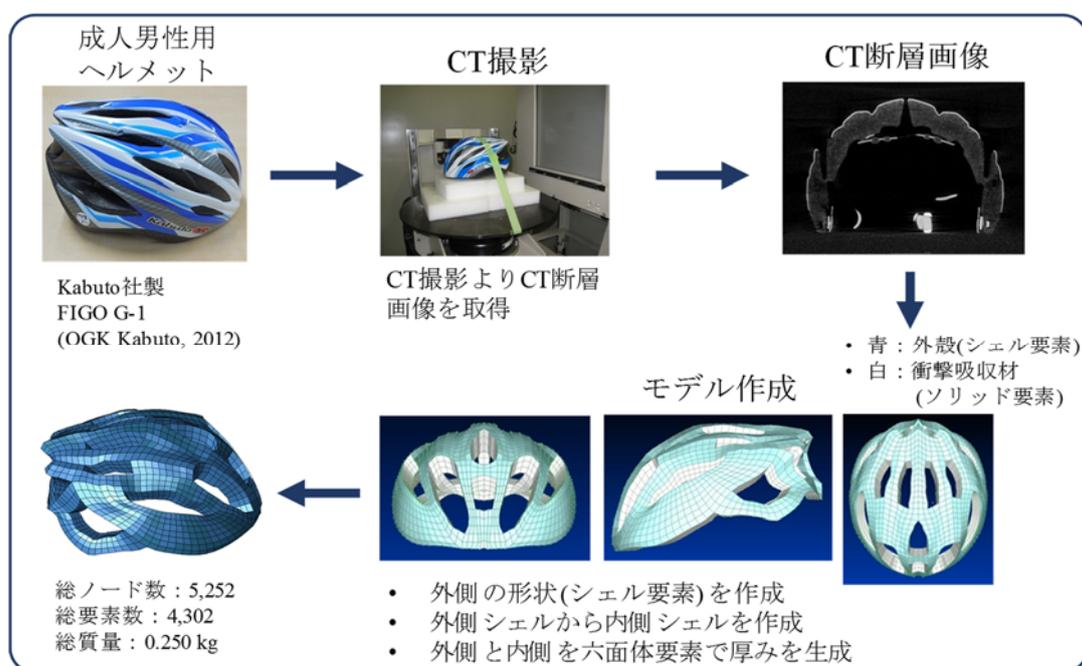
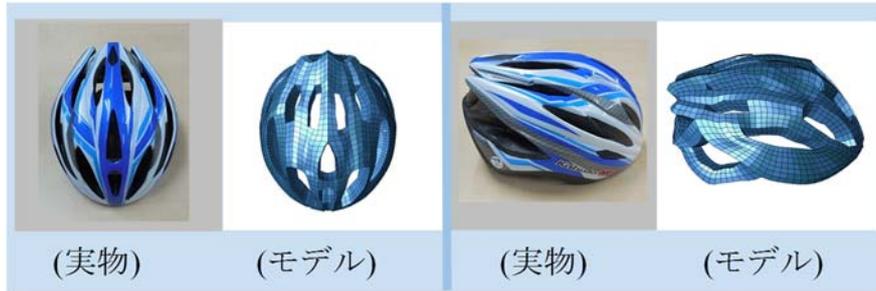


図 5.11 ヘルメットモデル構築手順

表 5.3 ヘルメットモデル材料物性値[73]

	Density ρ (kg/m^3)	Young's modulus E (MPa)	Poisson's ratio
Inner liner	187	60	
Outer shell	909	1500	0.42



(a) 真上から見た図 (b) 横から見た図

図 5.12 実際の自転車ヘルメットとヘルメットモデル

表 5.4 路面モデル材料物性値[72]

	Density ρ (kg/m^3)	Young's modulus E (MPa)	Poisson's ratio
Asphalt	250	12000	0.35

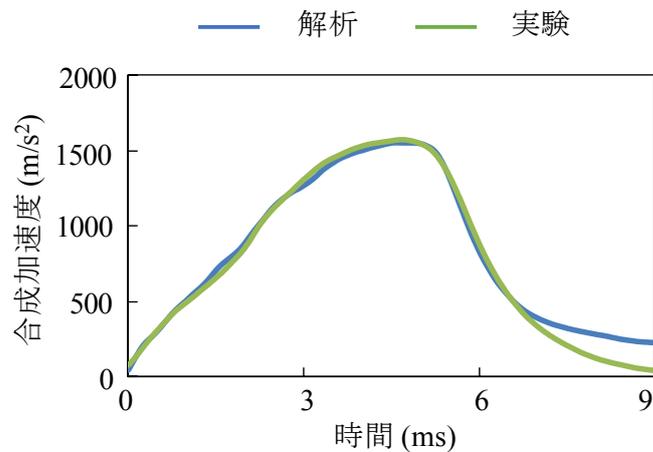


図 5.13 ヘルメットの路面への衝撃実験結果（図 4.12）とヘルメットモデルによる解析結果との合成加速度における比較

5.4 自転車単独事故での頭部の路面衝突に対するヘルメット着用効果

5.4.1 解析条件

頭部モデル単体及びヘルメットモデルを装着させた頭部モデルを用いて、自転車単独事故として自転車乗員が路面に衝突した際の、頭部外傷の発症（部位別）の可能性及び

ヘルメットの保護効果を定量的に求めた。交通事故の一例として、1.5 m の高さに位置する自転車乗員の頭部が路面に衝突したことを想定し、衝突速度は 5.42 m/s と算出した。高さ 1.5m は、4 章の路面への衝撃実験で設定した条件に基づく。自転車乗員の頭部衝突位置は、前頭部や側頭部の頻度が高いという報告[56]を考慮し、路面との衝突位置を前頭部及び側頭部（右側）の 2 条件とした。路面モデルはアスファルトを想定し、前節同様の材料物性を使用した（表 5.4）。実際の交通事故では、自転車乗員は様々な姿勢で車両に衝突され、最終的に自転車乗員の頭部は路面へ衝突する。本研究では、交通事故の一例として、頭部モデルが路面モデルに対して 90 度の衝突角度となるよう設定した。尚、路面衝突直前の頭部初期傾き角度は、前頭部が衝突する条件下では路面に対し 35.0 度、側頭部では路面に対し 40.0 度とした。路面と前頭部との衝突の設定条件を、頭部モデル単体は図 5.14 (a)に、ヘルメット装着頭部モデルは図 5.14 (b)に示す。路面と側頭部との衝突の設定条件を、頭部モデル単体は図 5.14 (c)に、ヘルメット装着頭部モデルは図 5.14 (d)に示す。

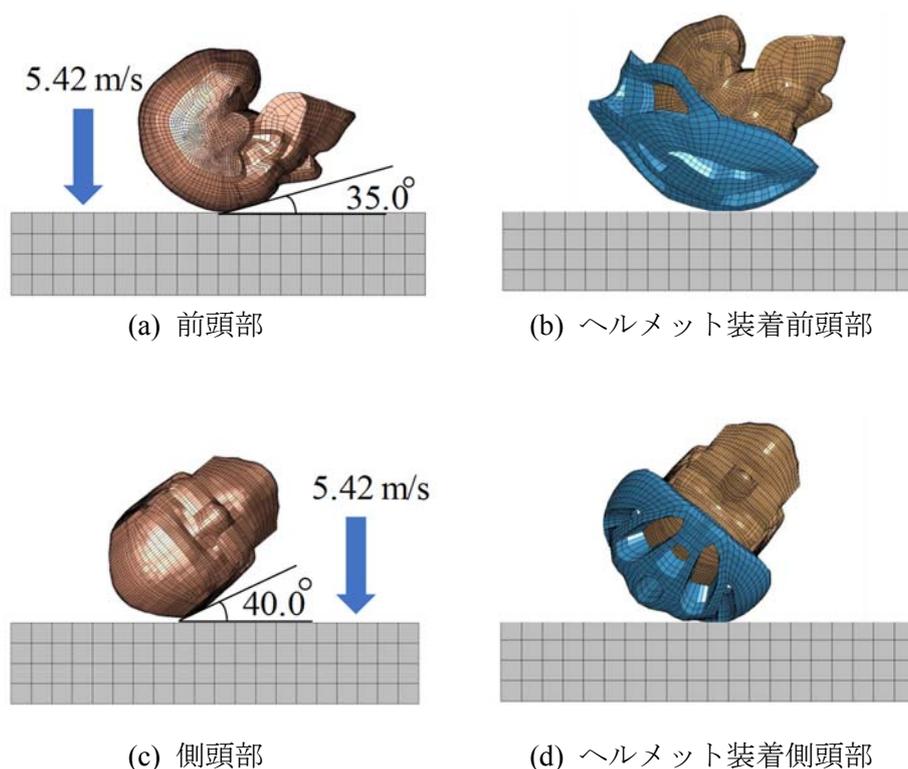


図 5.14 頭部モデルとヘルメット装着頭部モデルの路面との衝突条件

本論第 3 章にて、交通事故に関与した自転車乗員の場合、傷害程度が高くなるに従い、65 歳以上の構成率が増加することが判明した（図 3.3）。この結果を考慮し、自転車乗員の年齢を 65 歳と想定し、文献を参考に頭蓋骨の材料物性を推定し、頭部モデルにおける頭蓋骨のヤング率[74]を 8750 MPa とした（図 5.15）。

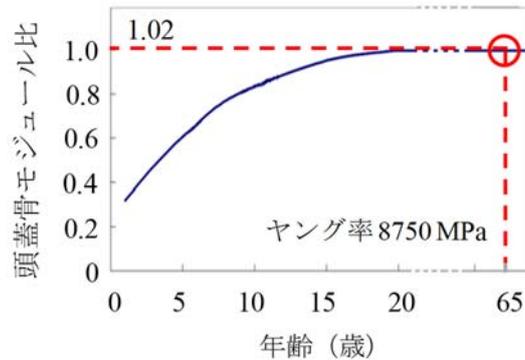


図 5.15 年齢による頭蓋骨の材料物性[74]の推定

本解析では、第 3 章において救命救急センターに搬送された自転車乗員において、頭部外傷で意識障害が発生した重軽傷患者の場合、頭蓋骨骨折及び脳挫傷の発生が高頻度であったことを考慮し、頭蓋骨骨折及び脳挫傷の発症の可能性を推定した。頭蓋骨骨折については、自転車乗員重傷者において頭蓋骨骨折の構成率 (52.5%) が最も高かった、と **Bambach** らは報告している[33]。頭蓋骨骨折[9]は、加わる力により、ひびが入る程度の骨折から、複雑な頭蓋骨骨折、さらには陥没骨折などがある。頭部外傷による頭蓋骨骨折では、骨折箇所が衝撃箇所を示唆すると言われている[75]。脳挫傷[9]は、頭を強打するなどして脳に大きな力が加わることで、脳に局所の挫滅、出血及び浮腫などをきたす病態である。脳挫傷は打撃を受けた側に発生する直接損傷と反対側に発生する対側損傷があり、打撃の受けた部位などにより発症し易さが異なることが報告されている。

頭部外傷の発症予測は、頭蓋骨骨折は頭蓋ひずみ[76]、対側損傷側の脳挫傷は脳実質の負圧[77][78][79]、脳挫傷はミーゼス応力[80]で評価した。表 5.5 に 50%発症予測のための力学的パラメータと閾値を示す。

表 5.5 頭蓋骨骨折及び脳挫傷の発症予測のための各力学的パラメータと閾値

頭部傷害	傷害予測のための力学的パラメータ	閾値
頭蓋骨骨折	ひずみ	2.1 (%) ^[76]
脳挫傷	負圧	-100 (kPa) ^{[77][78][79]}
脳挫傷	ミーゼス応力	8.6 (kPa) ^[80]

5.4.2 解析結果

頭部モデル及びヘルメットモデルを用いて、頭蓋骨骨折、脳挫傷の(部位別)発症の可能性、さらにヘルメット効果推定のための再現解析を行った。頭蓋骨骨折発症予測のための最大頭蓋ひずみの結果を表 5.6 に示す。頭部モデル単体の路面モデルへの衝突で

は、前頭部における最大頭蓋ひずみは 5.3% となり、側頭部における最大ひずみは 4.6% であった。最大頭蓋ひずみ発生時の頭部モデルにおけるひずみ分布状況を図 5.16 に示す。路面モデルと直接衝突した箇所周辺において、頭蓋ひずみが発生している。ヘルメットモデルを装着した頭部モデルの場合、前頭部における最大頭蓋ひずみは 0.3% となり、側頭部における最大ひずみは 0.2% であった。頭部モデル単体とヘルメット装着時の両最大頭蓋ひずみの差に対する頭部モデル単体の最大頭蓋ひずみの割合を減少率とすると、前頭部では 93.5%、側頭部では 94.9% を示した。以上の結果から、ヘルメット装着のない前頭部及び側頭部の最大ひずみは両者とも骨折の閾値となる 2.1% を超えていることから、前頭部及び側頭部が路面に衝突した場合、頭蓋骨骨折の発症リスクが極めて高いことが推測された。ヘルメット着用により、頭蓋骨骨折の発症が大いに減少する可能性が示された。

表 5.6 ヘルメット着用無し・有りでの最大頭蓋ひずみ：頭蓋骨骨折

頭部 衝突位置	ヘルメット 装着	最大頭蓋ひずみ (%) 閾値 2.1 ^[76]
前頭部	無し (a)	5.3*
	有り (b)	0.3
	(a) - (b)	5.0
減少率 (%)	$\{(a) - (b)\} / (a) * 100$	93.5
側頭部	無し	4.6*
	有り	0.2
	(a) - (b)	4.4
減少率 (%)	$\{(a) - (b)\} / (a) * 100$	94.9

*閾値超

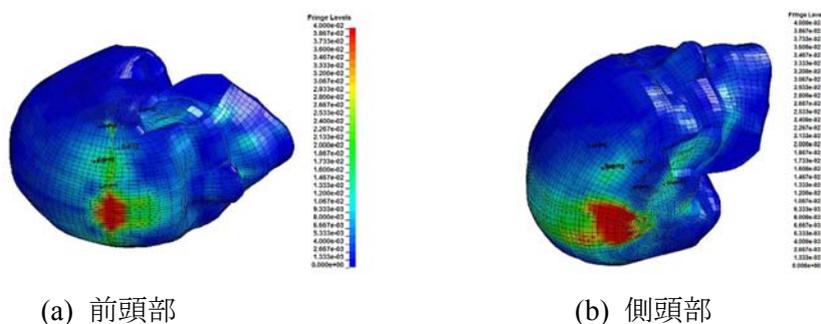


図 5.16 頭部モデル単体の路面モデルへの衝突における最大頭蓋ひずみ発生時のひずみ分布状況

脳挫傷の解析結果について、脳実質の部位別最大負圧を表 5.7 (a)に、最大ミーゼス応力を表 5.7 (b)に示す。各部位の最大負圧について閾値 (-100.0 kPa) と比較すると、頭部モデル単体の前頭部が路面モデルに衝突した場合、右脳 (-530.6 kPa)、左脳 (-531.8 kPa)、小脳 (-407.2 kPa)、脳幹 (-223.0 kPa) において閾値を超える数値を示した。ヘルメットモデルを装着した前頭部の場合、各部位の最大負圧を閾値 (-100.0 kPa) と比較すると、いずれの部位も数値は減少したが、右脳 (-152.3 kPa)、左脳 (-151.3 kPa)、小脳 (-147.1 kPa) において閾値を超える数値を示した。頭部モデル単体とヘルメット着用時の両最大負圧 (絶対値) の差に対する頭部モデル単体の最大頭蓋ひずみ (絶対値) の割合を減少率とすると、頭部モデル単体で閾値を超えた右脳 (71.3%)、左脳 (71.5%)、小脳 (63.9%) の減少率に比べて、脳梁 (91.2%)、脳室 (91.6%)、脳幹 (83.5%) の方が高い減少率を示した。頭部モデル単体の側頭部の場合、右脳 (-1896.7 kPa)、左脳 (-411.8 kPa)、小脳 (-571.8 kPa)、脳幹 (-296.3 kPa) において閾値を超える数値を示した。ヘルメットモデルを装着した側頭部の場合、各部位の最大負圧を閾値 (-100.0 kPa) と比較すると、いずれの部位も数値は減少したが、右脳 (-207.0 kPa)、左脳 (-137.7 kPa)、小脳 (-332.6 kPa) において閾値を超える数値を示した。減少率では、左脳 (89.1%) と脳幹 (83.0%) の減少率に比べて、左脳 (66.6%)、小脳 (41.8%)、脳梁 (68.5%)、脳室 (64.6%) の方が低い減少率を示した。

次に、各部位の最大ミーゼス応力について閾値 (8.6 kPa) と比較すると、前額部が衝突した場合、脳梁 (11.2 kPa) と脳幹 (12.7 kPa) において閾値を超える数値を示した。ヘルメットモデルを装着した頭部モデル前頭部の場合、各部位の最大ミーゼス応力を閾値 (8.6 kPa) と比較すると、小脳以外はいずれの部位も数値は減少し、小脳含めて全ての部位において閾値は超えなかった。頭部モデル単体では閾値を超えた脳梁 (76.9%) と脳幹 (79.2%) で高い減少率を示した。頭部モデル単体の側頭部が衝突した場合、左脳 (11.5 kPa)、右脳 (9.1 kPa)、脳幹 (18.3 kPa) の最大ミーゼス応力が閾値 (8.6 kPa) を超える数値を示した。ヘルメットモデルを装着した頭部モデル側頭部の場合、いずれの部位も数値は減少し、全ての部位において閾値は超えなかった。脳幹 (72.8%) で最も高い減少率を示した。

以上の結果から、ヘルメットモデル装着の無い前頭部、側頭部が路面に衝突した場合、脳挫傷の発症リスクが極めて高いことが推測された。ヘルメットモデルを装着した場合、依然として最大負圧が閾値を超えたことから、脳挫傷の発症リスクの可能性は示された。しかし、いずれの部位も最大負圧、最大ミーゼス応力の数値は全て減少し、特に、頭部モデル単体では閾値を超えた部位において、ヘルメットモデル装着により高い減少率が示された。従って、ヘルメット装着により、脳挫傷の発症の可能性は減少する可能性が示された。

表 5.7 脳実質における最大負圧と最大ミーゼス応力

(a) 最大負圧

頭部 衝突位置	ヘルメット 装着	最大負圧(kPa): 閾値 -100 ^{[77][78][79]}					
		右脳	左脳	小脳	脳梁	脳室	脳幹
前頭部	無し (a)	-530.6*	-531.8*	-407.2*	-83.9	-61.9	-223.0*
	有り (b)	-152.3*	-151.3*	-147.1*	-7.4	-5.2	-36.8
	{(a)} - {(b)}	378.3	380.5	260.1	76.5	56.7	186.2
減少率 (%)	{(a)} - {(b)} / {(a)} * 100	71.3	71.5	63.9	91.2	91.6	83.5
側頭部	無し	-1896.7*	-411.8*	-571.8*	-43.9	-37.4	-296.3*
	有り	-207.0*	-137.7*	-332.6*	-13.8	-13.3	-50.4
	(a) - (b)	1689.7	274.1	239.2	30.1	24.2	245.9
減少率 (%)	{(a)} - {(b)} / {(a)} * 100	89.1	66.6	41.8	68.5	64.6	83.0

*閾値超

(b) 最大ミーゼス応力

頭部 衝突位置	ヘルメット 装着	最大ミーゼス応力(kPa): 閾値 8.6 ^[80]					
		右脳	左脳	小脳	脳梁	脳室	脳幹
前頭部	無し (a)	4.4	4.4	1.4	11.2*	0.1	12.7*
	有り (b)	2.6	2.3	1.6	2.6	0.1	2.6
	(a) - (b)	1.8	2.1	-0.2	8.6	0.0	10.1
減少率 (%)	{(a)} - {(b)} / {(a)} * 100	40.2	46.9	-14.0	76.9	37.5	79.2
側頭部	無し	11.5*	9.1*	3.2	8.4	0.3	18.3*
	有り	6.2	3.7	2.6	2.7	0.1	5.0
	(a) - (b)	5.3	5.4	0.6	5.7	0.2	13.3
減少率 (%)	{(a)} - {(b)} / {(a)} * 100	46.5	58.9	18.0	67.7	59.8	72.8

*閾値超

5.5 車と衝突後の頭部の路面衝突に対するヘルメット着用効果

本解析では、自転車交通事故における交差点での車との出会い頭事故（第2章）、車との衝突後、路面との衝突による頭部外傷（第3章）、及び自転車用ヘルメットの着用効果（第4章）に着目し、頭部モデル及びヘルメットモデルを用いて、自転車乗員が車と出会い頭で衝突した後、自転車乗員の頭部が路面に衝突した場合を想定し、頭部外傷の発症とヘルメット着用の効果を定量的に求めた。その自転車乗員と衝突する車種については、セダン及びワンボックス車を想定した。その背景として、第3章での事故データの

解析結果において、セダンが他の車種に比べて自転車事故の件数が最多であり(表 3.1), ワンボックス車との衝突では, 重傷における頭部外傷(損傷主部位)の構成率が他の車種に比べて高かったことを考慮し(表 3.2), 本解析における対象車種とした.

5.5.1 解析条件

本解析での有限要素モデルによる再現に際し, 頭部の路面への衝突速度及び衝突角度条件については, 面田・鴻巣による MADYMO (MATHematical DYnamics MOdel, Ver 7.0) [81]を用いた研究において導出された結果[37]を参照した. MADYMO は剛体と関節から成る全身モデルであり, 世界標準ソフトウェアとしてダミー傷害予測, 乗員拘束装置の最適設計のために世界的に広く利用されている. MADYMO を用いて全身動作を再現することで, 頭部の衝突条件を推定することができる. 面田・鴻巣の研究では, 車, 自転車, 自転車乗員, 地面の各剛体モデルを用いて, 自転車と車との衝突事故を再現し, 自転車乗員の頭部が車との衝突(1次衝突)並びに路面との衝突(2次衝突)の状況をシミュレーション手法により解析している[37]. 事故類型は出会い頭事故を想定し, 車モデルと自転車モデルの衝突角度を 90 度に設定し, 両モデルが確実に衝突するように, 車モデルの前面中央部に自転車モデルのサドル部が衝突するように設定している. 図 5.17 に MADYMO による自転車と車との衝突再現の状況を示す. 車モデルの自転車モデルとの衝突速度は, 20 km/h (5.6 m/s), 30 km/h (8.3 m/s), 40 km/h (11.1 m/s)の 3 種類とし, 車のモデルとしてセダン, SUV (Sport Utility Vehicle), ワンボックス車の 3 車種を対象に解析を行っている. 本研究では, 車前面部の形状が異なるセダン(ボンネット有り)とワンボックス車(ボンネット無し)の 2 車種を対象とした. MADYMO によるセダンを図 5.18 (a)に, ワンボックス車を図 18 (b)に示す. 面田・鴻巣の研究では, 車モデルと衝突した自転車モデルの頭部が路面と衝突する状況を再現し, 路面衝突時の頭部の路面に対する衝突速度(水平速度, 垂直速度, 相対速度)及び衝突角度を導出しているが, 彼らの研究では, 頭部の路面との衝突時における頭部外傷の発症に関しては不明である.

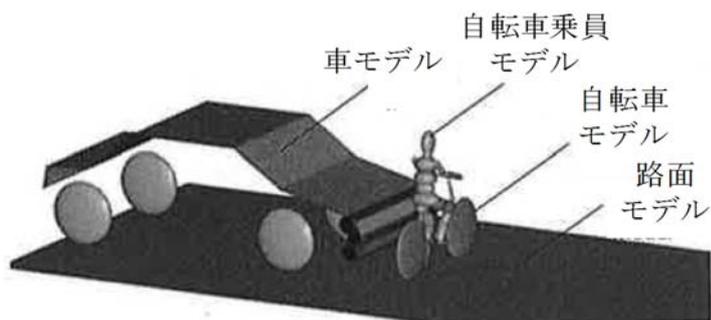


図 5.17 MADYMO による自転車と車との衝突再現[37]



図 5.18 MADYMO による車モデル[37]

本研究では、車と衝突後の頭部の路面（2次衝突）との衝突を想定し、有限要素モデルを用いた再現解析を実施することで、頭部外傷の発症の可能性を推定した。本解析では、自転車乗員がセダン（ケース A）及びワンボックス車（ケース B）との衝突を想定した。自転車と車との衝突速度は、(1) 20 km/h (5.6 m/s), (2) 30 km/h (8.3 m/s), (3) 40 km/h (11.1 m/s)とし、各衝突速度で自転車が車と衝突した後、自転車乗員の頭部が路面に衝突する状況を想定した。本解析の条件として、表 5.8 に示す通り、頭部の路面に対する衝突速度（水平速度、垂直速度、相対速度）及び衝突角度を、ケース A 及びケース B に対してそれぞれ設定した[37]。頭部モデル及びヘルメットモデルの衝突部位は側面とした。さらに、頭部モデル単体とヘルメットモデルを装着させた頭部モデルの両条件を再現し、ヘルメットの頭部外傷に対する保護効果を推定した。路面はアスファルトを想定し、剛体面とした。頭部と路面、ヘルメットと路面、さらに頭部とヘルメットとの摩擦係数は 0.5 とした[43]。有限要素解析に際し、LS-DYNA (version 8.0)[82]を使用した。設定条件の例として、A-(1)における、頭部モデル単体の設定を図 5.19 (a)に、ヘルメット装着した頭部モデルの設定を図 5.19 (b)に示す。尚、本解析においても、前項 5.4 と同様、本論第 3 章において示された結果を考慮し（図 3.3）、自転車乗員の年齢を 65 歳と想定し、文献を参考に頭蓋骨の材料物性を推定し、頭部モデルにおける頭蓋骨のヤング率[74]を 8750 MPa とした（図 5.15）。

表 5.8 頭部の路面との衝突速度及び衝突角度[23]

ケースNo.	頭部モデル衝突速度			頭部衝突角度 [α] (degree)
	水平速度 [Vy] (m/s)	垂直速度 [Vz] (m/s)	相対速度 [Vrel] (m/s)	
ケースA				
A-(1)	2.61	1.89	3.22	36.0
A-(2)	3.82	2.82	4.75	36.4
A-(3)	7.36	3.67	8.22	26.5
ケースB				
B-(1)	2.99	3.14	4.33	46.4
B-(2)	5.85	1.66	6.83	15.9
B-(3)	9.98	2.67	10.33	15.0

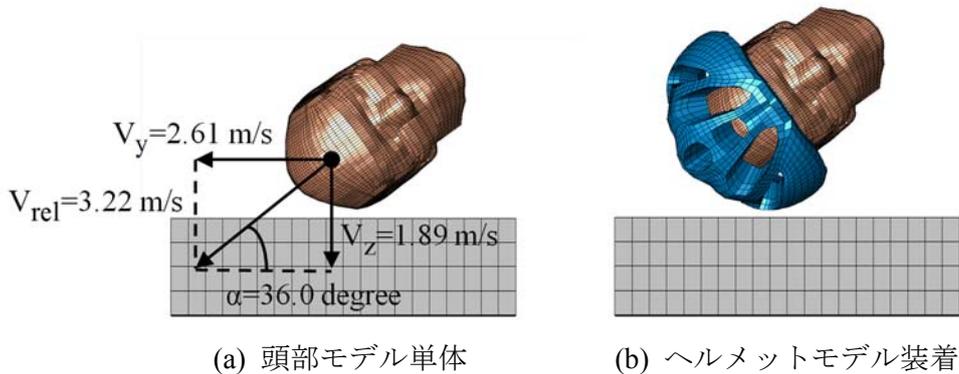


図 5.19 設定条件の例：A-(1)の場合

頭部の路面への衝突について、頭部モデル単体及びヘルメットモデルを装着させた頭部モデルを使用して再現解析を行った。解析対象とした頭部外傷は、頭蓋骨骨折、脳内血腫、脳挫傷、及び、中度 DAI・重度 DAI であり、傷害発症閾値を用いて、それら頭部外傷の発症を予測した。頭蓋における骨折の存在は、受傷時に外力が加わったことを示唆し、神経損傷と関連のある骨折が発症した患者は、頭蓋内血腫発症の危険性が増加すると言われている[9]。脳内血腫は、外傷により、挫傷の融合から生じる脳の内部に生じる血腫である[9]。脳挫傷は脳の機能を広範囲に損なう場合があり、挫傷の大きさや場所により傷害の程度が異なる。挫傷が大きいほど脳浮腫を発症し、頭蓋内圧が上昇する可能性が高くなる DAI は、強い外力で脳に回転力が生じることで、軸索が損傷すると考えられており、重度の場合には深刻な後遺症（高次脳機能障害など）や死に至ることもあり[9]、CT や MRI による診断が難しいとされる[83][84]。

頭部外傷の発症予測は、頭蓋骨骨折は頭蓋ひずみ[76]、脳内血腫は脳実質の圧力[77][78][79]、脳挫傷は脳実質の負圧[77][78][79]とミーゼス応力[80]で、その発症を予測した。中度 DAI 及び重度 DAI は、Deck と Willinger [85]のリスクカーブから発症リスクを予測した。表 5.9 に頭部外傷の 50%発症予測のための力学的パラメータと閾値を示す。

表 5.9 頭部外傷の発症予測のための力学的パラメータと閾値

頭部傷害	傷害予測のための力学的パラメータ	閾値
頭蓋骨骨折	ひずみ	2.1 (%) ^[76]
脳内血腫	圧力	300 (kPa) ^{[77][78][79]}
脳挫傷	負圧	-100 (kPa) ^{[77][78][79]}
脳挫傷	ミーゼス応力	8.6 (kPa) ^[80]

5.5.2 解析結果

頭部モデル単体(ヘルメット装着無し)とヘルメットモデルを装着した頭部モデル(ヘルメット装着有り)の路面への衝突再現について、その力学的最大応答値を表 5.10 に示す。頭部モデル単体の場合、最大頭蓋ひずみは、ケース A では 3.4%~4.9%、ケース B では 3.3%~4.8%であった。ヘルメット装着の場合、ケース A では 0.1%~0.3%、ケース B では 0.2%~0.3%であった。ヘルメット装着の数値は頭部モデル単体の数値に比べて、ケース A では 94%~97%、ケース B では 92%~94%の減少率を示した。頭蓋骨最大ひずみは、頭部モデル単体の場合、いずれの条件においても、頭蓋骨骨折の発症リスク 50%の閾値 2.1%[76]を超えたが、ヘルメット装着の場合の数値は全て閾値には達しなかった。

脳内血腫について、頭部モデル単体の場合、脳実質の最大圧力は、ケース A で 1207 kPa~1974 kPa、ケース B では 1235 kPa~2203 kPa であった。ヘルメット装着の場合、ケース A では 826 kPa~1514 kPa、ケース B では 851 kPa~1145 kPa であった。ヘルメット装着の数値は、頭部モデル単体の数値に比べて、ケース A では 23%~46%、ケース B では 25%~50%の減少率を示した。脳実質の最大圧力は、頭部モデル単体、ヘルメット装着ともに、いずれの条件においても、脳内血腫の発症リスク 50%の閾値 300 kPa[77][78][79]を超える数値を示した。

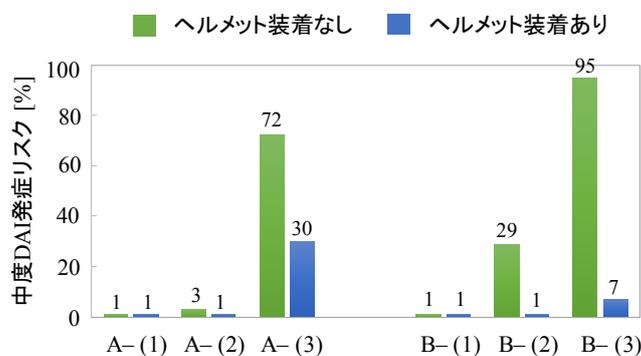
脳挫傷は、脳実質の負圧とミーゼス応力で発症予測を行った。脳実質の最大負圧は、頭部モデル単体の場合、ケース A では-1146 kPa~-1879 kPa、ケース B では-1084 kPa~-1705 kPa であった。ヘルメット装着の場合、ケース A では-688 kPa~-1168 kPa、ケース B では-1084 kPa~-1705 kPa であった。ヘルメット装着の数値は、頭部モデル単体の数値に比べて、ケース A では 33%~53%、ケース B では 25%~45%の減少率を示した。頭部モデル単体、ヘルメット装着ともに、いずれの条件においても、脳挫傷の発症リスク 50%の閾値-100 kPa [77][78][79]を超える数値を示した。脳実質の最大ミーゼス応力は、頭部モデル単体の場合、ケース A では 13.6 kPa~27.5 kPa、ケース B では 14.0 kPa~33.3 kPa であった。ヘルメット有りの場合、ケース A では 9.9 kPa~23.7 kPa、ケース B では 10.4 kPa~19.7 kPa であった。ヘルメット装着の数値は、頭部モデル単体の数値に比べて、ケース A では 14%~27%、ケース B では 26%~46%の減少率であった。頭部単体、ヘルメット装着ともに、いずれの条件においても、脳挫傷の発症リスク 50%の閾値 8.6 kPa [80]を超える数値を示した。

表 5.10 ヘルメット装着無し・有りでの頭部外傷の力学的最大応答値及び減少率

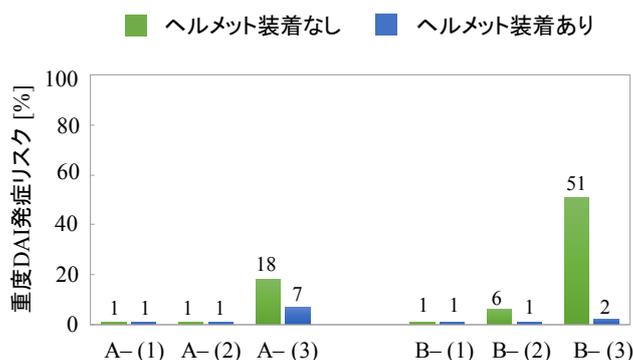
ケース	ケースNo.	V _{rel} (m/s) _ α (°)	ヘルメット装着		減少率(%)	
			無し (a)	有り (b)	(a) - (b)	{(a) - (b)} / (a) * 100
頭蓋最大ひずみ (%) : 頭蓋骨骨折						
ケースA	A-(1)	3.22_36.0	3.4*	0.1	3.3	97
	A-(2)	4.75_36.4	4.3*	0.2	4.1	94
	A-(3)	8.22_26.5	4.9*	0.3	4.6	94
ケースB	B-(1)	4.33_46.4	3.3*	0.2	3.1	94
	B-(2)	6.83_15.9	3.7*	0.3	3.4	92
	B-(3)	10.33_15.0	4.8*	0.3	4.5	94
最大正圧 (kPa) : 脳内血腫						
ケースA	A-(1)	3.22_36.0	1207*	826*	381	32
	A-(2)	4.75_36.4	1931*	1052*	879	46
	A-(3)	8.22_26.5	1974*	1514*	460	23
ケースB	B-(1)	4.33_46.4	1235*	932*	303	25
	B-(2)	6.83_15.9	1691*	851*	840	50
	B-(3)	10.33_15.0	2203*	1145*	1058	48
最大負圧 (kPa) : 脳挫傷						
ケースA	A-(1)	3.22_36.0	-1146*	-688*	-458	40
	A-(2)	4.75_36.4	-1879*	-879*	-1000	53
	A-(3)	8.22_26.5	-1748*	-1168*	-580	33
ケースB	B-(1)	4.33_46.4	-1084*	-810*	-274	25
	B-(2)	6.83_15.9	-1245*	-709*	-536	43
	B-(3)	10.33_15.0	-1705*	-933*	-772	45
最大ミーゼス応力 (kPa) : 脳挫傷						
ケースA	A-(1)	3.22_36.0	13.6*	9.9*	3.7	27
	A-(2)	4.75_36.4	17.3*	13.4*	3.9	23
	A-(3)	8.22_26.5	27.5*	23.7*	3.8	14
ケースB	B-(1)	4.33_46.4	14.0*	10.4*	3.6	26
	B-(2)	6.83_15.9	23.5*	12.7*	10.8	46
	B-(3)	10.33_15.0	33.3*	19.7*	13.6	41

* 閾値超

中度 DAI 及び重度 DAI は、最大ミーゼス応力を用いて Deck と Willinger [85] のリスクカーブから発症リスクを予測した。中度 DAI は図 5.20 (a) に、重度 DAI は図 5.20 (b) に示す。中度 DAI の場合、頭部モデル単体ではケース A-(1), (2), (3) それぞれ 1%, 3%, 72% の発症リスクが、ヘルメットモデル装着の場合は 1%, 1%, 30% であった。ケース B については、頭部モデル単体ではケース B-(1), (2), (3) それぞれ 1%, 29%, 95% の発症リスクに対して、ヘルメットモデル装着の場合は 1%, 1%, 7% であった。重度 DAI の場合、頭部モデル単体ではケース A-(1), (2), (3) それぞれ 1%, 1%, 18% の発症リスクに対して、ヘルメット装着により 1%, 1%, 7% であった。ケース B については、頭部モデル単体ではケース B-(1), (2), (3) それぞれ 1%, 6%, 51% の発症リスクに対して、ヘルメットモデル装着により 1%, 1%, 2% を示した。これらの結果から、ヘルメット装着により、中度 DAI 及び重度 DAI とともに、その発症リスクの減少が予測された。



(a) 中度 DAI



(b) 重度 DAI

図 5.20 ヘルメット装着無し・有りでの中度 DAI 及び重度 DAI の発症リスク

5.6 壁との衝突による頭部外傷へのヘルメット着用効果

本解析では、第 3 章において解析対象とした、獨協医科大学越谷病院 救命救急センタ

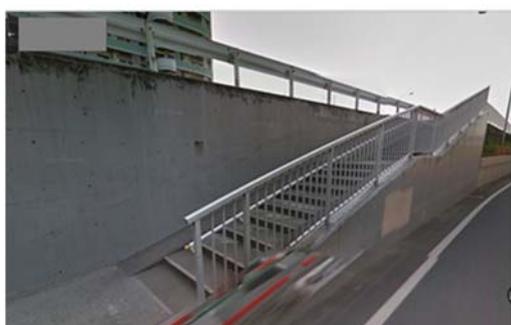
一の自転車乗員患者の症例について、カルテ情報に基づき MADYMO [81]による事故再現を実施し、その結果、導出された条件を用いて頭部モデルによる再現解析を実施した。実際の頭部外傷（頭蓋骨骨折、脳挫傷）を再現させ、さらに、その頭部外傷に対するヘルメットの保護効果を推定した。

5.6.1 症例の詳細情報

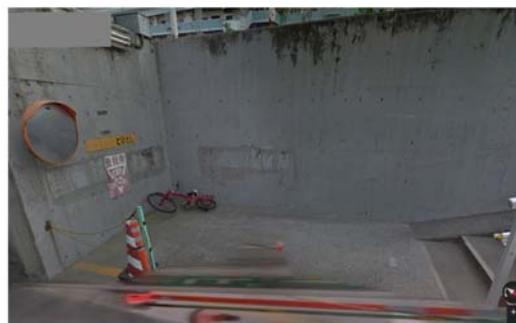
本解析で対象とした症例の詳細情報は、病院のカルテ情報により収集した。詳細情報を表 5.11 に示す。事故発生箇所と思われる現場の写真である。

表 5.11 症例の詳細情報

救急患者	22歳 男性 (168cm 63.3kg)
事故状況	階段横にあるスロープ (約10m程) を自転車走行、正面の壁に衝突
外傷	頭蓋底骨折、左眉の上骨折 急性硬膜外血腫 (※開頭血腫除去術) 左前頭葉の脳挫傷 左視神経損傷 気脳症 顔面挫創 肺挫傷
意識障害	発症 (中程度、注意記憶力低下、GCS 合計11点) 高次脳機能評価及び訓練実施記録あり
経緯	救急搬送から約3週間後に退院 退院から約1週間後、鼻出血し救急搬送され2週間ほどで退院



(a) 写真 A



(b) 写真 B

図 5.21 事故発生箇所と思われる現場の写真
(※写真中の自転車は本症例とは無関係)

5.6.2 MADYMO による症例の衝突再現

MADYMO [81]により、本症例の事故再現を実施した。現場の状況から、斜面距離を10m、斜面の最大高さを4m、自転車の初速度を0 m/s と想定し、自転車の壁への衝突速度を32 km/h と設定した。頭部外傷の状況から、人間モデルの左顔面（左目上部）が壁に衝突するように初期姿勢を設定し、再現解析を行った（図 5.22）。尚、自転車モデルには、MADYMO のソフトウェア上に標準搭載されているものを使用した。MADYMO による衝突再現により得られた、頭部の壁への衝突時の頭部の角度、角速度、並進速度を表 5.12 に示す。

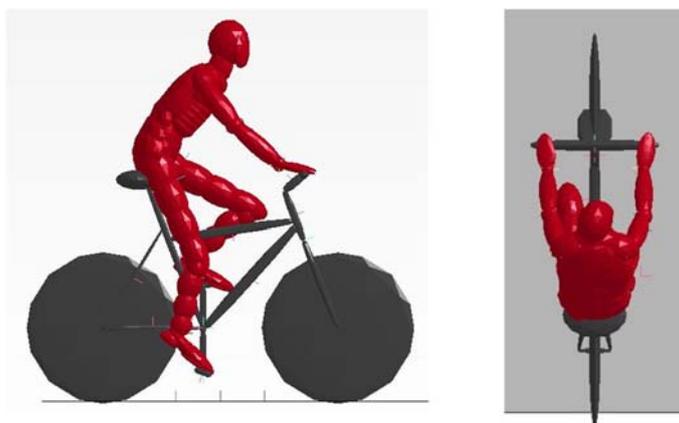


図 5.22 MADYMO による再現での初期姿勢

表 5.12 頭部の壁への衝突時の頭部の角度、角速度、並進速度

	合成	x 軸	y 軸	z 軸
角度 (degree)		-5.0	-4.8	58.0
角速度 (rad/s)	0.9	0.1	0.6	0.7
並進速度 (m/s)	7.7	0.2	7.7	-0.1

5.6.3 有限要素モデルによる再現解析及びヘルメット着用効果

頭部モデルを用いて、自転車乗員頭部の壁との衝突による、頭蓋骨骨折及び脳挫傷の発症を再現した。MADYMO により得られた頭部の壁への衝突時の頭部の角度、角速度、並進速度（表 5.12）を、頭部モデルによる解析の条件に設定した。さらに、頭部モデルにヘルメットモデルを装着させることで、ヘルメットの頭部保護効果を推定した（図 5.23）。解析対象とした頭部外傷は、実際の症例に従い、頭蓋骨骨折及び脳挫傷とし、傷害発症閾値を用いて、それら頭部外傷の発症を予測した。尚、自転車乗員の年齢が 22

歳であることから，文献を参考に頭蓋骨の材料物性を推定し，頭部モデルにおける頭蓋骨のヤング率[74]を 8750 MPa とした．頭部外傷の発症予測は，頭蓋骨骨折は頭蓋ひずみ[76]，脳挫傷はミーゼス応力[80]で評価した．表 5.13 に 50%発症予測のための力学的パラメータと閾値を示す．

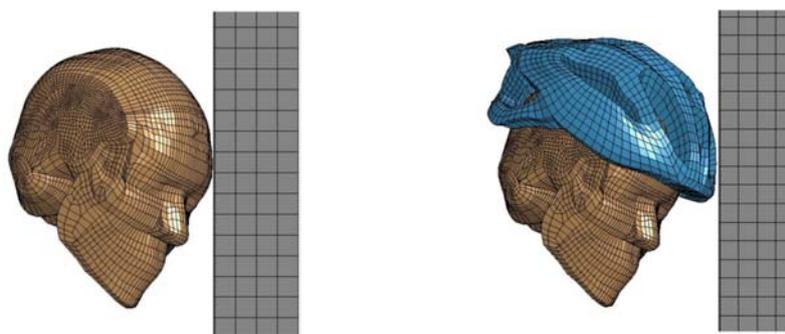


図 5.23 頭部モデルとヘルメット装着頭部モデルの路面との衝突

表 5.13 頭部外傷の発症予測のための力学的パラメータと閾値

頭部傷害	傷害予測のための力学的パラメータ	閾値
頭蓋骨骨折	ひずみ	3.5 (%) ^[76]
脳挫傷	ミーゼス応力	8.6 (kPa) ^[80]

5.6.4 解析結果

頭部モデル単体（ヘルメット無し）とヘルメットモデルを装着した頭部モデル（ヘルメット装着）の壁への衝突再現について，その力学的最大応答値を表 5.14 に示す．頭部モデル単体の場合，最大頭蓋ひずみは 5.3%であり，ヘルメットモデル装着では 0.3%であった．ヘルメットモデル装着の数値は，頭部モデル単体の数値に比べて，93.5%の減少率を示した．最大頭蓋ひずみは，頭部モデル単体の場合，頭蓋骨骨折の発症リスク 50%の閾値 3.5%^[76]を超えたが，ヘルメットモデル装着での数値は閾値に達しなかった．脳挫傷については，脳実質のミーゼス応力で発症予測を行った．脳実質の最大ミーゼス応力は，頭部モデル単体の場合 11.6 kPa であったが，ヘルメットモデル装着の場合は 8.9 kPa であった．ヘルメットモデル装着の数値は，頭部モデル単体の数値に比べて 23.3%の減少率であった．頭部単体，ヘルメットモデル装着ともに，脳挫傷の発症リスク 50%の閾値 8.6 kPa^[80]を超える数値を示した．しかし，ヘルメットモデル装着での数値は，閾値 8.6 kPa を僅かに上回る数値（8.9 kPa）にまで減少された．頭部モデル単体の解析

結果において、頭蓋骨骨折及び脳挫傷の発症が予測されたことから、実際の症例を再現できたと考えられる。その一方で、頭蓋骨骨折及び脳挫傷の発症リスクが減少したことから、ヘルメット着用による頭部保護効果が予測された。

表 5.14 ヘルメット装着無し・有りでの頭部外傷の力学的最大応答値及び減少率

頭部 衝突位置	ヘルメット 装着	最大頭蓋ひずみ (%) 閾値 3.5 ^[76]	最大ミーゼス応力(kPa) 閾値 8.6 ^[80]
前頭部	無し (a)	5.3*	11.6*
	有り (b)	0.3	8.9*
	(a) - (b)	5.0	2.7
減少率 (%)	{(a) - (b)} / (a) * 100	93.5	23.3

*閾値超

5.7 考察

本章 5.4 では、自転車乗員の前頭部、右側側頭部が、路面に対して衝突した場合を想定し、頭蓋骨骨折及び脳挫傷の発症について発症の可能性を評価した。頭部モデル単体の場合、頭蓋骨骨折に対する最大頭蓋ひずみでは、前頭部 (5.3%) が側頭部 (4.6%) より高い数値を示した。また、脳挫傷発症予測のための最大負圧では、前頭部の右脳 (-530.6 kPa) と左脳 (-531.8 kPa) の数値が近似している上、共に他の部位より数値が大きく、側頭部では右脳 (-1896.7 kPa) が極めて低い数値を示した。ミーゼス最大応力では、前頭部及び側頭部ともに脳幹 (12.7 kPa, 18.3 kPa) が他の部位に比べて高い数値を示した。これらの結果から、頭蓋ひずみ及び負圧については、頭部の衝突位置 (前頭部、側頭部路面) により異なり、ミーゼス応力については、頭部の衝突位置に関わらず影響を受けることが推測される。ヘルメットモデルを装着した解析では、頭部の衝突位置に関わらず、最大頭蓋ひずみ (93.5%, 94.9%) 及び脳幹 (負圧 83.0%, 83.5%, ミーゼス最大応力 72.8%, 79.2%) において数値が大いに減少したが、脳的部位により数値の減少率は異なった。今後、外部から受ける力エネルギーと脳内への伝わり方を調査し、ヘルメットの頭部保護としての可能性を評価する必要がある。

本章 5.4 では、自転車単独事故の一例として、1.5 m の高さに位置する自転車乗員の頭部が、路面に対して角度 90 度で衝突する場合を想定した状況を再現解析した。その結果、頭蓋骨骨折、脳挫傷どちらも発症の可能性が非常に高いことが示唆された。さらに、本章 5.4 では、自転車乗員が車と出会い頭で衝突した後、自転車乗員の頭部が路面に衝突した場合を想定し、再現解析を行った。その結果、頭部モデル単体の場合、いずれの条件においても、頭部外傷が発症する可能性が極めて高いことが示唆された。しかし、

頭部モデルにヘルメットモデルを装着させた解析結果では、いずれの条件においても頭蓋ひずみの最大値が閾値に達しなかった。これらの結果から、ヘルメット着用により、頭蓋骨骨折が発症する可能性が大いに減少することが示唆された。その一方で、本論文第4章において、頭部インパクトをヘルメット装着無し、有りの両条件で車のAピラー及び路面へ衝撃させる実験を実施したが、その結果では、ヘルメット装着により、Aピラーでは59.5%（表4.2）、路面では86.4%（表4.5）のHIC値減少が示された。以上の結果から総合的に判断すると、交通事故による頭部傷害発症の評価として広く採用されているHIC値は、頭蓋骨骨折の発症予測としては有効であるが、脳傷害については発症予測が難しい場合がありえると考えられる。第4章の実験において、ヘルメット装着によりHIC値が減少したが、そのヘルメット効果は脳傷害というよりは、頭蓋骨骨折発症に対する保護効果を示していると推測される。これは、HIC値が頭蓋骨骨折の頭部耐性曲線（Wayne State Tolerance Curve）を基に傷害指標として開発された[54]という背景によると考えられる。その一方で、Newman[87]やChamouardら[88]は、HIC値が低い場合でも重度の頭蓋骨骨折が発生する場合があることを示している。従って、脳傷害を含め頭部外傷の発症リスクを評価する場合、HIC値だけではなく、他のパラメータ（脳内のひずみ、圧力、負圧、ミーゼス応力など）を採用する必要があると考える[64][85]。

本章では、自転車乗員頭部の路面及び壁への衝突を想定し、頭部外傷の発症を予測した結果、いずれの条件においても、ヘルメットモデル装着により、頭部外傷の発症リスクの減少が示された。特に、最大頭蓋ひずみは、他の脳傷害の力学的応力に比べて極めて高い減少を示し、本章5.4では前頭部が93.5%、側頭部が94.9%、本章5.5では92%～97%の減少を示した。Bambachらの研究[33]では、ヘルメット着用による頭部外傷発症のリスク減少効果は極めて大きく、頭蓋骨骨折78%、頭蓋内傷害72%、脳震盪傷害74%、頭部開放創80%以上の減少を示し、総合的に74%の減少を報告している。日本では、2008年6月の道路交通法改正により、幼児及び児童（13歳未満）に対する自転車用ヘルメットの着用努力義務が施行された（道路交通法第63条の10）が、他の年齢はその対象にはなっていない。今後、自転車乗員の頭部保護という視点から、ヘルメット着用が推奨されることで、頭部損傷による交通事故の死傷者の減少が期待される。全年齢の自転車利用者において、ヘルメットの頭部外傷に対する効果の認識が高まり、ヘルメット着用が日常的になれば、頭部外傷、特に頭蓋骨骨折の減少が期待される。ヘルメット着用推奨のために、本解析で得られた数値を用いて、一般の自転車利用者へ示すことが有効と考える。

ヘルメットモデルを用いた再現解析では、すべての条件において、ヘルメットモデル装着により力学的応答値の最大値の減少が示された。本章5.4では、最大負圧（脳挫傷）において、前頭部及び側頭部の一部の部位の数値が閾値を超えたが、ヘルメットモデル装着により最大負圧は41.8%～91.6%の減少が示された。さらに、ミーゼス最大応力については、ヘルメットモデル装着により、前頭部及び側頭部の全ての部位において、数

値は閾値に達しなかった。しかし、本章 5.5 では最大正圧（脳内血腫）、最大負圧（脳挫傷）、ミーゼス応力（脳挫傷）の各数値が全て閾値を超えていた。本解析で使用したヘルメットモデルは、日本で一般に市販されている自転車用ヘルメットを基に作成した。本解析結果から、対象としたヘルメットは、頭蓋骨骨折には効果が期待されるが、頭蓋内の脳傷害発症には頭部保護効果が難しい可能性が示唆された[43][85][86]。こうした結果は、自転車用ヘルメットの製品性能試験が関係している可能性が考えられる。製品試験では、地上から高さ 1.50 m (5.42 m/s) 及び 1.06 m (4.57 m/s) [14][15]、並びに、高さ 1.72 m (5.80 m/s) 及び 1.17 m (4.79 m/s) [16]からヘルメットを自由落下させて、ヘルメットの性能を評価する。従って、こうした性能試験条件では、ヘルメットは鉛直方向で地面に衝突するが、実際の自転車事故の場合、頭部はあらゆる角度で路面へ衝突する。今後、脳傷害の発症も考慮したヘルメットの性能試験が必要になると考える。また、自転車乗員の脳外傷保護に有効と考えられるエアバッグ[86]など、ヘルメット・デザインの改良も必要と考える。

本解析で使用した頭部モデルは、頭蓋のヤング率を 65 歳の 8750 MPa [74]に設定したが、高齢者の頭部の材料物性は反映されていない。本章 5.3 及び本章 5.4 において、頭部モデル単体が路面に衝突した場合、いずれの条件においても、結果として得られた数値はすべての閾値を超えており、頭部外傷の発症する可能性が高いことが示唆された。しかし、その結果は、実際、高齢者の頭部の材料物性を反映した場合も同様の結果が得られるかは不明である。Yanaoka と Dokko の文献[89]では、年齢別特性を保持した人間の頭部有限要素モデルを使用し、20 歳代と 70 歳代の頭部傷害発生のメカニズムの違いを調査しているが、その頭部有限要素モデルは、脳質の形状、大きさ、剛性について年齢別特性を有する。今後、年齢別特性を考慮し、高齢者の材料物性を反映した頭部モデルを使用し、頭部外傷についてより詳細に調査していく必要がある。

本解析では、いずれの解析条件において回転加速度は設定しなかった。本章 5.4 では、頭部の衝突位置を前頭部及び側頭部としたが、頭部の前頭部や側頭部が衝突する場合、頭部には垂直加速度だけではなく回転加速度も発生している可能性がある[73]。また、本章 5.5 では、最大ミーゼス応力を用いて、Deck と Willinger [85]のリスクカーブにより、中度 DAI 及び重度 DAI を評価した。AIS (Abbreviated Injury Scale) に基づき、中度 DAI は $2 \leq AIS \leq 3$ 、重度 DAI は $AIS \geq 4$ と分類される。ヘルメット有りの場合、中度 DAI 及び重度 DAI とともに、発症リスクの減少が示された。ヘルメット装着により、中度 DAI の発症リスクは、ケース A-(3)の 72%が 30%へ、ケース B-(3)の 95%が 7%へ、重度 DAI の発症リスクは、ケース B-(3)の 51%が 2%へ減少した (図 5.17)。実際の自転車事故の場合、頭部傷害は並進運動と回転加速度の組合せから発生する[85]。DAI は、衝突時、回転の動きから生成される内力が頭部に伝わり、発症すると考えられる[90][91]。本研究の衝撃条件には回転加速度が含まれていないことから、今後、有限要素モデルの解析において、回転加速度も条件として設定し、回転加速度と脳傷害との関係性を評価し

た上で、ヘルメット装着による頭部外傷の減少効果を評価する必要がある。

ヘルメットを利用した自転車乗員の新しい事故回避システムとして、欧州では、新しい技術が開発されている。自転車と車が交差点で出会頭衝突になりそうな状況などにおいて、自転車乗員へはヘルメットに接近情報が送られ、警告等とバイブレーションにより危険を知らせるシステムである[92]。将来、自転車用ヘルメットにおいて、強い衝撃力からの頭部を保護する目的だけではなく、新しいシステムを搭載した未来型ヘルメット開発にも期待したい。例えば、自転車乗員が車と衝突する危険がある場面では安全確認をするような注意喚起を促す。衝突事故に至った場合には、ヘルメット（頭部）と車または路面との衝突位置や衝突速度など解析に必要なデータを記録し、そのデータを基に発症しうる傷害を瞬時に予測し救急医療現場へ送信する。高齢自転車乗員がより一層安心して参加できる交通社会の実現化を目指すためにも、このような未来型ヘルメットの開発も検討する価値があると考えられる。

5.8 結言

頭部モデル及びヘルメットモデルを使用し、自転車単独事故として高さ 1.5 m に位置する自転車乗員の前額部及び側頭部が、路面に対して角度 90 度で衝突する場合を想定し、頭蓋骨骨折、脳挫傷の発症の可能性及びヘルメット効果を推定した。再現解析の結果、頭蓋骨の最大ひずみは前頭部 (5.3%)、側頭部 (4.6%) とともに閾値 (2.1%) を超えたことから、頭蓋骨骨折発症の可能性が高いことが示唆された。脳挫傷については、前頭部が路面に衝突した場合、最大負圧は左脳 (-531.8 kPa)、最大ミーゼス応力は脳幹 (12.7 kPa) の数値が最も高く、最大負圧、最大ミーゼス応力ともに脳挫傷発症の閾値を超えた。側頭部が路面に衝突した場合、最大負圧は右脳 (-1896.7 kPa) が、最大ミーゼス応力は脳幹 (18.3 kPa) が最も大きく、最大負圧、最大ミーゼス応力ともに脳挫傷発症の閾値を超えた。最大負圧は、前頭部 (右脳) と側頭部 (左脳) で部位が異なったが、最大ミーゼス応力については、前頭部、側頭部ともに脳幹であった。前頭部、側頭部いずれの場合も、路面との衝突により脳挫傷発症の可能性が極めて高いことが示唆された。ヘルメットモデルを装着した場合、最大頭蓋ひずみは閾値に達しなかったことから、頭蓋骨骨折の発症が大いに減少する可能性が示された。脳挫傷については、依然として最大負圧が閾値を超えたことから、脳挫傷の発症リスクの可能性は示唆された。

次に、自転車がセダン、ワンボックス車と出会い頭衝突後、自転車乗員の頭部が路面に衝突した場合を想定し、頭部外傷の発症とヘルメット着用の効果を推定した。再現解析の結果、頭部モデル単体の場合、頭蓋骨最大ひずみは 3.3%~4.9%で閾値を超えたが、ヘルメットモデルを装着した場合 0.1%~0.3%で閾値を下回り、92%~97%の減少率を示した。脳実質の最大圧力を用いて脳内血腫の発症を推定したところ、頭部モデル単体で

は 1207 kPa～2203 kPa となり、ヘルメットモデル装着では 826 kPa～1514 kPa となり、頭部モデル単体に比べて 23%～50%の減少率を示したが、いずれの条件においても、閾値を超える数値であった。脳実質の負圧を用いた脳挫傷の発症予測においては、頭部モデル単体では -1084 kPa～-1879 kPa となり、ヘルメットモデル装着では-688 kPa～-1705 kPa となり、頭部モデル単体に比べて 25%～53%の減少率を示したが、いずれの条件においても、閾値を超える数値であった。ミーゼス応力を用いた脳挫傷の発症予測においては、頭部モデル単体では 13.6 kPa～33.3 kPa となり、ヘルメットモデル装着では 9.9 kPa～23.7 kPa となり、頭部モデル単体に比べて 14%～46%の減少率を示したが、いずれの条件においても、閾値を超える数値であった。さらに、中度 DAI 及び重度 DAI について、最大ミーゼス応力を用いて Deck と Willinger [85]のリスクカーブから発症予測を行った。頭部モデル単体の場合、中度 DAI では、相対速度 8.22 m/s (角度 26.5 度) が 72%、相対速度 10.33 m/s (角度 15.0 度) が 95%の高い発症リスクを示したが、ヘルメットモデル装着した場合、それぞれ 30%、7%の発症リスクに減少した。重度 DAI では、相対速度 10.33 m/s (角度 15.0 度) が 51%の発症リスクを示したが、ヘルメットモデル装着により 2%の発症リスクに減少した。以上の結果から、自転車乗員がヘルメット着用のない状態で、頭部を路面に衝突させた場合、本解析で対象とした頭部外傷発症の可能性が高いことが示唆された。その一方で、ヘルメット装着により、頭蓋骨骨折発症の可能性は極めて低くなることが示唆された。脳内血腫及び脳挫傷については、ヘルメットモデル装着により最大圧力、最大負圧、最大ミーゼス応力の数値は減少したが、依然として傷害が発症する可能性が示唆された。中度 DAI 及び重度 DAI については、ヘルメット装着により発症リスクが減少する可能性が示唆された。

さらに、実際に頭部外傷により救急搬送された自転車乗員患者の症例について、頭部モデルを用いて、実際の頭部外傷（頭蓋骨骨折、脳挫傷）を再現させ、さらに、その頭部外傷に対するヘルメットの保護効果を推定した。その結果、頭部モデル単体の場合、最大頭蓋ひずみは 5.3%であり、脳実質の最大ミーゼス応力は 11.6 kPa であり、共に閾値を超えたことから、頭蓋骨骨折及び脳挫傷の発生が予測された。従って、実際の症例を再現できたと考えられる。ヘルメットモデル装着の場合、最大頭蓋ひずみは 0.3% (減少率 93.5%) になり、脳実質の最大ミーゼス応力は 8.9 kPa (減少率 23.3%) になり、頭蓋骨最大ひずみについては発症リスク 50%の閾値 3.5%[76]には達しなかった。最大ミーゼス応力については、脳挫傷の発症リスク 50%の閾値 8.6 kPa [80]を超える結果ではあったが、僅かに上回る数値 (8.9 kPa) にまで減少された。頭蓋骨骨折及び脳挫傷の発症リスクが減少したことから、ヘルメット着用による頭部保護効果の有効性が予測された。

第6章

結言

6.1 結論

本研究では、自転車事故の環境的・人為的要因、事故と頭部外傷との関係、自転車乗員の年齢と頭部外傷の関係等の多角的視点から潜在する問題点を明確にし、自転車乗員頭部外傷の発生要因解明により有効な頭部保護対策を究明した。本論文は6章からなり、結論は以下の通りである。本論文全体の構成と結果総括を図6.1に示す。

第1章では、日本における自転車の利用増加に伴い、交通事故による自転車乗員頭部外傷による重症化は対策すべき重要な課題であることを示した。自転車事故の特徴として、都市部、事故相手当事者である車、自転車乗員の頭部外傷を示した上で、本研究の目的と本論文の構成を述べた。

第2章では、自転車乗員頭部外傷の発生要因を明確にするため、自転車事故件数の多い東京都の特定のエリア（1つの市）を対象として、自転車乗員の行動・意識等を把握し、自転車事故を分析した上で、自転車走行状況の実態を調査した。自転車利用者を対象としたアンケート調査の結果から、自転車の利用者数が多かった時間帯は「5:00-10:00」及び「15:00-18:00」であった。その一方で、同市の自転車事故の発生時間帯は、午前8時台（13.2%）が最も多く、午前9時台（10.0%）、午後5時台（10.0%）の順に多かった。自転車利用頻度と事故発生において両者の時間帯が重複していることが判明した。区市町村道の交差点での事故発生が多く、衝突形態として出会い頭（52.0%）の事故が最も多かった。自転車事故の当事者種別による解析から、自転車事故の60.0%が自転車と車との事故であることが判明した。さらに、交差点での自転車走行状況調査では、交差点進入時の自転車の平均走行速度が3.1 m/sであった。道路環境要因として、「障害物（交差点の角の建物等）による死角の存在」、「交差点での車との出会い頭事故」、生活道路など車の走行が少ない「区市町村道での交差道路を行き交う自転車や車の存在」、人為的要因として、自転車乗員による「安全確認せずに交差点へ進入」、「交差点進入時の自転車の走行速度」、「自転車乗員の法令違反」など、これら複数の要因が重複したタイミングに自転車事故が発生すると予測された。

第3章では、日本全国で発生した自転車の交通事故データを使用し、異なる車種の車と衝突し死亡した自転車乗員の損傷主部位について解析した。その結果、死亡自転車乗員の場合、車の形状、年齢帯の違いに関係なく、致命傷部位として頭部外傷の割合が高

く、13-64歳とそれ以外の年齢帯との構成率の差には有意差がないことが判明した。セダンとの衝突による重傷、死亡の頭部外傷を対象に、ヘルメット着用との関係を解析した。その結果、重傷の頭部外傷(4,423人)において「ヘルメット着用なし」が93.5%であり、死亡の頭部外傷(692人)において「ヘルメット着用なし」が97.2%であり、ほとんどの自転車乗員がヘルメット着用せずに頭部外傷で重傷、死亡に至っていることが判明した。また、高齢自転車乗員の交通事故様態について解析した結果、死亡の60-64歳を除き、13-59歳と60歳以上の各年齢帯において、重傷、死亡ともに車の走行速度が低速度(30 km/h以下)の衝突では、車に比べ路面が頭部への加害となる割合が高かった。さらに、交通事故により救命救急センターに搬送された自転車乗員(重軽傷)の頭部外傷患者(32人)を対象に、意識障害を評価した結果、意識障害あり(15人)の場合、頭部骨折種別では頭蓋骨骨折(33.3%)が最も多く、頭部骨折全体では意識障害の「発生あり」(86.7%)の方が「発生なし」(70.6%)に比べて頭部骨折の発生率が高かった。脳傷害種別では、意識障害の発生有無ともに脳挫傷が最も多かったが、脳挫傷の発生率については意識障害の「発生あり」の66.7%に対し、「発生なし」は17.6%であった。脳傷害全体では、意識障害の「発生あり」(193.3%)の方が「発生なし」(52.9%)に比べて脳傷害の発生率が極めて高かった。

第4章では、第2章、第3章で得られた結果を基に、自転車乗員の頭部外傷の起因として車及び路面との衝突に着目し、人間の頭部を模した頭部インパクトと自転車用ヘルメットを使用し、車及び路面への衝撃実験を実施した。自転車の頭部が実際の車の前面、路面に衝突した時の頭部傷害値を把握するため、実際の車のAピラー下端部に対し、頭部インパクト単体及びヘルメットを装着させた頭部インパクトを35 km/hで打撃させた。さらに、頭部の路面への衝突として、ヘルメットを装着した頭部インパクトを1.5mの高さからアスファルト路面に自由落下させた。衝撃実験の結果から、頭部が車前面の高剛性部位(Aピラー)及び路面に衝突した時のヘルメット着用効果を頭部傷害基準HIC(Head Injury Criteria)で評価した。ヘルメットを着用せずに、自転車乗員の頭部が車の高剛性部位に衝突した場合、あるいは路面に衝突した場合、重篤以上の頭部傷害になる確率が極めて高いことが示された。ヘルメット着用により、車への衝撃では、ヘルメット装着のHIC値は装着無しに比べて59.5%減少したが、重篤以上の頭部傷害になる確率が100%となるHIC値(2644)を示した。路面への衝撃では、ヘルメット装着のHIC値は86.4%減少し、重篤以上の頭部傷害となる可能性は極めて低いHIC値(885)を示した。本実験の結果から、ヘルメットの着用により、車の前面、路面ともに頭部保護効果が示されたが、特に、路面への衝撃において頭部保護効果が有効であることが判明した。

第5章では、自転車乗員の交差点での出会い頭事故の危険性(第2章)、路面衝突による頭部外傷(第3章)、ヘルメット着用効果(第4章)に着目し、頭部及びヘルメット有限要素モデルを用いて、頭蓋骨骨折や脳傷害発症に対するヘルメットの着用効果を定量的に求めた。まず、自転車単独事故として、1.5mの高さに位置する自転車乗員の

前頭部及び側頭部が路面と衝突した場合を想定し、頭蓋骨骨折、脳挫傷の発症の可能性及びヘルメット頭部保護効果を推定した。再現解析の結果、頭蓋骨の最大ひずみは前頭部（5.3%）、側頭部（4.6%）ともに閾値（2.1%）を超えたことから、頭蓋骨骨折発症の可能性が高いことが示唆された。また、前頭部の最大負圧（-531.8 kPa）、及び最大ミーゼス応力（12.7 kPa）、側頭部の最大負圧（-1896.7 kPa）、及び最大ミーゼス応力（18.3 kPa）、いずれも閾値を超えたことから、路面との衝突により脳挫傷発症の可能性が高いことが示唆された。ヘルメットモデルを装着した場合、頭蓋最大ひずみは前頭部（0.3%）、側頭部（0.2%）ともに閾値に達しなかったことから、頭蓋骨骨折の発症が大いに減少する可能性が示されたが、脳挫傷については、依然として最大負圧が前頭部（-152.3 kPa）、側頭部（-332.6 kPa）ともに閾値を超えたことから、脳挫傷が発症する可能性が示唆された。

次に、車との出会い頭事故（第2章）に着目し、車と衝突後の自転車乗員頭部と路面との衝突を想定し、頭部外傷の発症に対するヘルメットの着用効果を推定した。ここでは、第3章での事故データの解析結果において、セダンが他の車種に比べて自転車事故の件数が最多であり（表3.1）、ワンボックス車との衝突では、重傷における頭部外傷（損傷主部位）の構成率が他の車種に比べて高かったことを考慮し（表3.2）、自転車乗員と衝突する車種については、セダン及びワンボックス車を想定した。その結果、ヘルメット着用により、頭蓋骨最大ひずみ3.3%～4.9%が0.1%～0.3%に減少し、頭蓋骨骨折発症の可能性が極めて低くなることが示唆された。脳傷害については、脳モデルの最大圧力（脳内血腫）1207kPa～2203kPaが826kPa～1514kPaに、最大負圧（脳挫傷）-1084kPa～-1879kPaが-688kPa～-1168kPaに、最大ミーゼス応力（脳挫傷）13.6kPa～33.3kPaが9.9kPa～23.7kPaに減少したが、いずれも発症予測閾値を超えており、脳傷害発症の可能性が示唆された。さらに、実際に頭部外傷により救急搬送された自転車乗員患者の症例について、頭部モデルを用いて、実際の頭部外傷（頭蓋骨骨折、脳挫傷）を再現させ、さらに、その頭部外傷に対するヘルメットの着用効果を推定した。その結果、頭部モデル単体の場合、最大頭蓋ひずみは5.3%であり、脳実質の最大ミーゼス応力は11.6 kPaであり、共に閾値を超えたことから、頭蓋骨骨折及び脳挫傷の発生が予測された。ヘルメットモデル装着の場合、最大頭蓋ひずみは0.3%（減少率93.5%）になり、脳実質の最大ミーゼス応力は8.9 kPa（減少率23.3%）になり、頭蓋骨骨折及び脳挫傷の発症リスクが減少したことから、ヘルメット着用による頭部保護効果の有効性が示唆された。

上記第1章から第5章までの結論を総括すると、自転車事故は、死角の存在する交差点など環境的要因に加え、交通違反行為など自転車乗員の人為的要因も重複したタイミングに衝突事故が発生することが判明した。自転車乗員の頭部保護への意識も不十分であり、実際に頭部外傷で重傷あるいは死亡に至った事例では、ヘルメットの着用率が極めて低いことが判明した。自転車用ヘルメットの着用効果を調査した結果、路面への衝撃では頭部保護効果が有効であり、特に頭蓋骨骨折に対して保護効果が高いことが明ら

かになった。今後、自転車乗員頭部保護として、自転車用ヘルメットの着用率が増加すれば、自転車乗員の頭部外傷の減少が期待できる。その一方で、ヘルメット着用が自転車乗員頭部保護として十分ではないことも判明した。車の前面の中でも特に高剛性部位（Aピラーなど）への衝突においては、自転車乗員が死亡に至る危険性が高いことが示され、有限要素解析では、脳傷害（脳内血腫、脳挫傷）の発症する可能性が示唆されたことから、その具体的な対策については今後の課題と考える。

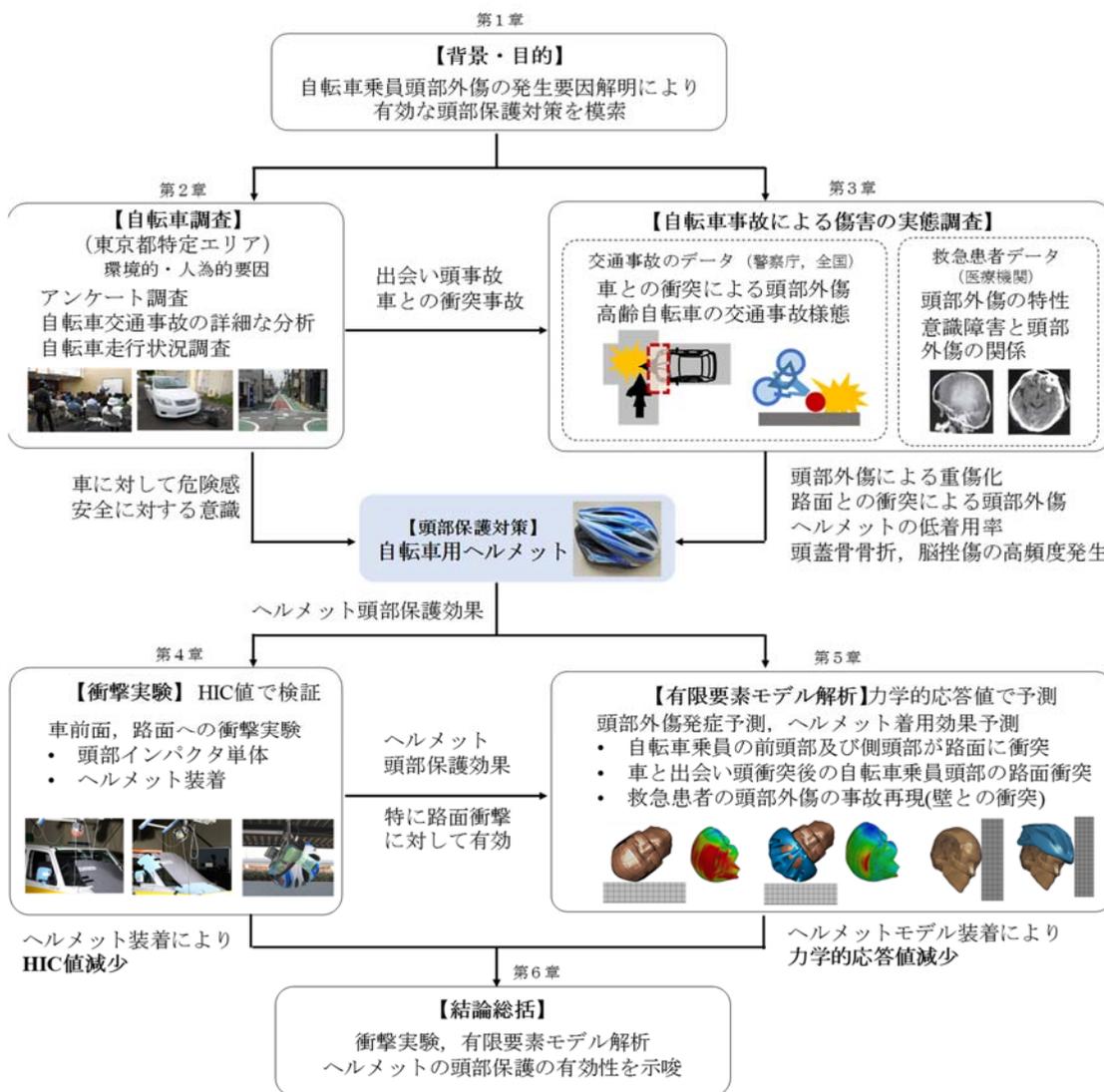


図 6.1 本論文全体の構成と結果総括

6.2 展望

本研究の結果から、交通事故による自転車乗員の頭部外傷を減少させるためには、自転車用ヘルメットの着用率を向上させることが重要であることが明確になった。頭部外傷による重傷化や後遺障害の危険性の認知度を向上させることで、ヘルメットの着用率が高くなる可能性もある。ヘルメットの有効性については、日本の行政、関係企業、さらには医療機関などを対象に、アピールしていきたい。特に、本研究で導出されたヘルメットの着用効果は、ヘルメットメーカーにおいても、自転車用ヘルメットの普及に寄与できることが期待される。

頭部外傷の詳細については、今後、回転速度による重傷度の違いを調査していく必要がある。回転角加速度と頭部外傷との関係が明確になることで、将来、自転車乗員頭部に限らず、交通事故に関与した全ての道路利用者（車両乗員、オートバイ乗員、歩行者、自転車乗員）における頭部外傷において、回転角加速度に起因した脳傷害の評価手法の開発へつなげたい。また、回転角加速度の頭部外傷への影響が解明されることで、新しい頭部保護対策の構築にもつなげたい。

現行の自転車用ヘルメットの衝撃吸収試験は、並進加速度のみで評価されているが、本研究結果から、脳傷害の発症抑制を評価できるような試験法が望まれる。実際の事故では、さまざまな状況で頭部が車や路面と衝突すると考えられる。回転角加速度も考慮するような試験法が採用されることで、頭部保護性能の高い新しいヘルメットの開発が期待される。

本研究では、自転車乗員の頭部外傷を対象に意識障害を調査したが、該当した人数はまだ十分とは言い難く、今後、解析データの対象期間を長期化し、退院後の患者の病態を調査するなど、十分なデータ数に基づき、意識障害と高次脳機能障害との関係について引き続き調査する必要がある。頭部外傷による後遺障害は社会的にも重要な問題であり、将来、診断が難しいとされる軽度の高次脳機能障害に対して有効な診断手法の提案につなげたい。

近年、完全な自動運転の車の開発も途上にあり、日本においても公道での完全自動運転車の実験が開始されるなど、自動運転の車が現実化しつつある。本研究では、自転車乗員の頭部保護の対策として自転車用ヘルメットに着目したが、車における対策も重要である。昨今では自転車乗員を検知し、自動ブレーキを作動させる車両も開発されてきており、今後、自転車乗員保護という視点から、車の新しい技術開発に寄与できるような自転車や車の運転者の行動特性を詳細に調査し、自転車乗員頭部保護のレベルを進化させたい。

参考文献

- [1] 東京都市整備局基盤部交通企画課, 東京都自転車・歩行者の利用実態 Web アンケート (結果速報), 2015.
- [2] 国土交通省, 自転車交通, 平成 26 年度 政策レビュー結果 (評価書), 2015.
- [3] 東京都市圏交通計画協議会, パーソントリップ調査からみた東京都市圏の都市交通に関する課題と対応の方向性, 第 5 回東京都市圏パーソントリップ調査, 2012.
- [4] 公益財団法人交通事故総合分析センター, 交通統計平成 28 年版, 2017.
- [5] World Health Organization, Global plan for the decade of action for road safety 2011-2020, 2011,
http://www.who.int/roadsafety/decade_of_action/plan/plan_english.pdf?ua=1.
- [6] 公益財団法人交通事故総合分析センター, 交通事故統計年報平成 27 年版, 2016.
- [7] 公益財団法人交通事故総合分析センター, イタルダイインフォメーション交通事故分析レポート No.112, 2015.
- [8] 東京慈恵会医科大学, 神経外傷, 脳神経外科学講座, 2017,
<http://www.neurosurgery.jp/neurotrauma/index.html#01>.
- [9] MSD マニュアル, プロフェッショナル版, 2017.
- [10] 松田和郎, 脳科学辞典, 2014,
<https://bsd.neuroinf.jp/wiki/意識障害>.
- [11] Glasgow Coma Scale, 2017,
<http://www.glasgowcomascale.org/>.
- [12] 国立障害者リハビリテーションセンター, 高次脳機能障害情報・支援センターホームページ, 2017,
http://www.rehab.go.jp/brain_fukyu/.
- [13] 東京都高次脳機能障害者実態調査検討委員会, 高次脳機能障害者実態調査報告書 (概要版), 2008.
- [14] 一般社団法人日本ヘルメット工業会, 自転車用ヘルメット衝撃吸収性試験, 2017
<http://japan-helmet.com/importance/shiken.html>.
- [15] 日本工業規格 (JIS, Japanese Industrial Standards), 自転車用ヘルメット, JIS T 8134, 2007,
<http://kikakurui.com/t8/T8134-2007-01.html>.
- [16] 一般財団法人製品安全協会, 自転車用, 電動車いす等用及び走行遊具用のヘルメットの認定基準及び基準確認方法, 2005,
http://www.sg-mark.org/sgzhidu_4_3_08.html.

- [17] 警察庁, 区市町村別・自転車関与事故 (過去3年比) 平成26年中, 2017,
http://www.keishicho.metro.tokyo.jp/about_mpd/jokyo_tokei/tokei_jokyo/bicycle.html.
- [18] 公益財団法人交通事故総合分析センター, 交通事故統計用語解説集, 2017,
<https://www.itarda.or.jp/service/term.php>.
- [19] Matsui, Y., Oikawa, S., and Hitosugi, M., Analysis of car-to-bicycle approach patterns for developing active safety devices, *Traffic Injury Prevention* 17(4), pp.434-439, 2016.
- [20] 一般財団法人自動車検査登録情報協会, ハイブリッド車・電気自動車の保有台数推移表 (平成10年~平成28年), 2017,
<https://www.airia.or.jp/publish/statistics/trend.html>.
- [21] Tahmasbi-Sarvestani, A., Kazemi, H., Fallah, Y., Naserian, M., and Lewis, A., System architecture for cooperative vehicle-pedestrian safety applications using DSRC communication, *SAE Technical Paper* 2015-01-0290, doi:10.4271/2015-01-0290, 2015.
- [22] 国土交通省, 乗用車メーカーによる実用化ASV技術の一覧, 2015.
- [23] Aoyama, Y., Minamida, N., Tsuboya, H., and Hirabayashi, T., Development of vehicle-to-pedestrian communication technology, *Journal of the ITU Association of Japan*, New Breeze Summer, pp.14-16, 2015.
- [24] 真壁俊介, 先進運転支援システムアイアサト(ver.2)の紹介, *自動車技術* Vol.66(3), pp.88-93, 2012.
- [25] 半田修士, バハルディンビンオマル, 松井靖浩, 及川昌子, 水戸部一孝, 自転車運転シミュレータの開発と高齢者の交通事故誘発要因の検討, *日本交通科学学会誌*, Vol.15(3), pp.44-51, 2015.
- [26] Matsui, Y., Oikawa, S., Aoki, Y., Sekine, M., and Mitobe, K., Safety assessment characteristics of pedestrian legform impactors in vehicle-front impact tests, *Stapp Car Crash Journal* 58, pp.233-250, 2014.
- [27] Badea-Romero, A., Lenard, J., Source of head injury for pedestrians and pedal cyclists: Striking vehicle or road?, *Accid. Anal. Prev.* 50, pp.1140-1150, 2013.
- [28] Otte, D., Jansch, M., Haasper, C., Injury protection and accident causation parameters for vulnerable road users based on German In-Depth Accident Study GIDAS, *Accid. Anal. Prev.* 44, pp.149-153, 2012.
- [29] 藤田健二, 四輪車と自転車の無信号交差点・出会い頭事故の人的要因分析, ITARDA 第15回研究会発表資料, pp.1-13, 2012.
- [30] Maki, T., Kajzer, J., Mizuno, K., Sekine, Y., Comparative analysis of vehicle-bicyclist and vehicle-pedestrian accidents in Japan, *Accid. Anal. Prev.* 35, pp.927-940, 2003.
- [31] Karkhaneh, M., Naghavi, M., Rowe, B.H., Hagel, B.E., Jafari, N., Saunders, L.D., Epidemiology of bicycle injuries in 13 health divisions, Islamic Republic of Iran 2003, *Accid. Anal. Prev.* 40, pp.192-199, 2008.

- [32] Törö, K., Hubay, M., Sótonyi, P., Keller, E., Fatal traffic injuries among pedestrians, bicyclists and motor vehicle occupants, *Forensic Sci. Int.* 151, pp.151-156, 2005.
- [33] Bambach, M.R., Mitchell, R.J., Grzebnieta, R.H., Olivier, J., The effectiveness of helmets in bicycle collisions with motor vehicles: A case-control study, *Accid. Anal. Prev.* 53, pp.78-88, 2013.
- [34] Peng, Y., Chen, Y., Yang, J., Otte, D., Willinger, R., A study of pedestrian and bicyclist exposure to head injury in passenger car collisions based on accident data and simulations, *Safety Science*, Vol.50, pp.1749-1759, 2012.
- [35] Scholten A.C., Polinder, S., Panneman, M.J.M., Beeck E.F., Haagsma, J.A., Incidence and costs of bicycle-related traumatic brain injuries in the Netherlands, *Accid. Anal. Prev.* 81, pp.51-60, 2015.
- [36] McNally, D.S., Rosenberg, N.M., MADYMO simulation of children in cycle accidents: A novel approach in risk assessment, *Accid. Anal. Prev.* 59, pp.469-478, 2013.
- [37] 面田雄一, 鴻巣敦宏, コンピュータシミュレーション解析手法を用いた自転車乗員頭部の自転車ならびに路面に対する衝突状況解析, 公益社団法人自動車技術会, 学術講演会前刷集, Vol.46, No.2, pp.485-490, 2015.
- [38] 松井靖浩, 事故再現手法による歩行者インパクト用傷害リスク曲線の提案, 自動車技術会論文集, Vol.35, No.4, pp.221-228, 2004.
- [39] 松井靖浩, 乗用車前面窓ガラス及びその周辺部の衝撃特性と歩行者頭部傷害値, 自動車技術会論文集, Vol.35, No.1, pp.191-197, 2004.
- [40] Matsui, Y. and Oikawa, S., Features of fatal cyclist injuries in vehicle-versus-cyclist accidents in Japan, *SAE Int. Paper*, 2015-01-1415, 2015.
- [41] Cripton, P.A., Dressler, D.M., Stuart, C.A., Dennison, C.R., Richards, D., Bicycle helmets are highly effective at preventing head injury during head impact: Head-form accelerations and injury criteria for helmeted and unhelmeted impacts, *Accid. Anal. Prev.* 70, pp.1-7, 2014.
- [42] Elvik, R., Publication bias and time-trend bias in meta-analysis of bicycle helmet efficacy: A re-analysis of Attewell, Blass and McFaden 2001, *Accid. Anal. Prev.* 43, pp.1245-1251, 2011.
- [43] Fahlstedt, M., Halldin, P., Kleiven, S., The protective effect of a helmet in three bicycle accidents—a finite element study, *Accid. Anal. Prev.* 91, pp.135-143, 2016.
- [44] McNally, D.S., Whitehead, S., A computational simulation study of the influence of helmet wearing on head injury risk in adult cyclists, *Accid. Anal. Prev.* 60, pp.15-23, 2013.
- [45] United Nations, Population Division, World population ageing 2015 report, Population Division Publications, 2015.
- [46] World Health Organization, Global health and aging, National Institute on Aging National Institutes of Health, NIH Publication no.11-7737, 2011.
- [47] TNO, Elderly safer on the road with first intelligent bike, 2014,

<https://www.tno.nl/en/about-tno/news/2014/12/elderly-safer-on-the-road-with-first-intelligent-bike/>.

- [48] 警察庁, 自動走行システムに関する行動実証実験のためのガイドライン, 2016.
- [49] 益子邦洋, 第3次救急医療における各種搬送手段の機能と役割, 国際交通安全学会誌, Vol.34, No.3, pp.286-292, 2009.
- [50] Matsui Y. and Tanahashi M., Development of JAMA-JARI pedestrian headform impactor in compliance with ISO and IHRA standards, International Journal of Crashworthiness 9 (2) pp.129-139, 2004.
- [51] 株式会社共和電業, DIS-503A 衝突試験用小型データロガー,
<http://www.kyowa-ei.com/jpn/product/category/measuring/automobile/dis-503a/index.html>.
- [52] Matsui Y., Possibility of installing a data acquisition system in a pedestrian headform impactor, International Journal of Crashworthiness, Vol.19, No.2, pp.115-125, 2014.
- [53] 株式会社共和電業, ASE-A500 自動車衝突試験用ダンピング型加速度センサ (変換器),
<http://www.kyowa-ei.com/jpn/product/category/sensors/ase-a/index.html>.
- [54] Eppinger R., Sun E., Bandak F., Haffner M., Khaewpong N., Maltese M., Kuppa S., Nguyen T., Takhounts E., Tannous R., Zhang A., Saul R., Development of improved injury criteria for the assessment of advanced automotive restraint systems – II. DOT NHTSA Grant DTNH22-93-Y-17028, 1999.
- [55] 社団法人自動車技術会, 工学技術者と医療従事者のためのインパクトバイオメカニクス, 2006.
- [56] Ching R., Thompson D., Thompson R., Thomas D., Chilcott W., and Rivara F., Damage to bicycle helmets involved with crashes, Accid. Anal. Prev. 29(5) pp.555-562, 1997.
- [57] Peng Y., Chen Y., Yang J., Otte D., and Willinger R., A study of pedestrian and bicyclist exposure to head injury in passenger car collisions based on accident data and simulations, Safety Science 50 pp. 1749-1759, 2012.
- [58] Otte D., Wrap around distance WAD of pedestrian and bicyclists and relevance as influence parameter for head injuries, SAE 2015 World Congress & Exposition SAE Technical paper, No.2015-01-1461, Society of Automotive Engineers (SAE) International, USA, 2015.
- [59] 山田英史, 伊藤大輔, 水野幸治, 自動車衝突時における自転車乗員の挙動・傷害の有限要素解析, 自動車技術会論文集, Vol.45, No.3, pp.639-644, 2015.
- [60] 株式会社交文社, 新・道路運送車両の保安基準, 省令・告示全条文, 2016.
- [61] Matsui Y., Hitosugi M., Takahashi K., and Doi T., Situations of car-to-pedestrian contact, Traffic Injury Prevention, Vol.14, No.1, pp.73-77, 2013.
- [62] 一般社団法人人間生活工学研究センター, 日本人の人体計測データ, 1997.
- [63] Matsui, Y., Improvement of accelerometers for pedestrian headform impactors in testing

- following Japanese vehicle safety regulations, *International Journal of Vehicle Safety*, Vol.5, No.4, pp.307-318, 2011.
- [64] Aomura, S., Zhang, Y., Nakadate, H., Koyama, T. and Nishimura, A., Brain injury risk estimation of collegiate football player based on game video of concussion suspected accident, *Journal of Biomechanical Science and Engineering*, Vol.11, No.4, pp.1-15, 2016.
- [65] ネット解剖学アトラス, 相磯貞和訳, 南江堂, 原書第3版.
- [66] 矢田 俊彦, 川上 正舒, 野田 泰子, からだと病気のしくみ図鑑, 株式会社法研.
- [67] 東京都, 高次脳機能障害地域支援ハンドブック(改訂第三版), 2016.
- [68] Zhang, L.Y., Bae, J.H., Hardy, W.N., Monson, K.L., Manley, G.T., Goldsmith, W., Yang, K.H., and King, A.I., Computational study of the contribution of the vasculature on the dynamic response of the brain, *Stapp Car Crash Journal*, Vol. 46, pp.145-164, 2002.
- [69] Willinger, R., Baumgartner, D., Human head tolerance limits to specific injury mechanisms, *International Journal of Crashworthiness*, Vol.8, No.6, pp.605-617, 2003.
- [70] Viano, D.C., Casson, I.R., Pellman, E.J., Zhang, L., King, A.I., Yang, K.H., Concussion in professional football, brain responses by finite element analysis, part 9. *Journal of Neurosurgery*, Vol.57, No.5, pp.891-916, 2005.
- [71] Nahum, A.M., Smith, R., Ward, C.C., Intracranial pressure dynamics during head impact, *SAE Technical Paper 770922*, 1977.
- [72] 安部隆二, 岳本秀人, 鈴木拓雄, 木村清和, 黒瀬雅詞, 田口仁, 応力解放法によるアスファルト舗装の低温クラックに関する基礎研究, *北海道開発土木研究所月報*, No.634, pp.17-26, 2006.
- [73] Milne, G., Deck, C., Bourdet, N. Carreira, R.P., Allinne, Q., Gallego, A. and Willinger, R., Bicycle helmet modelling and validation under linear and tangential impacts. *International Journal Crashworthiness*, Vol.19, No.4, pp.323-333, 2013.
- [74] Irwin, A.L., Mertz, H.J., Biomechanical bases for the CRABI and Hybrid III child dummies, 41st *Stapp Car Crash Conference*, Proceeding, pp.1-12, 1997.
- [75] Fahlstedt, M., Depreitere, B., Halldin, P., Vander Sloten, J., Kleiven, S., Correlation between injury pattern and finite element analysis in biomechanical reconstructions of traumatic brain injuries, *Journal of Biomechanics*, Vol.48, No.7, pp.1331-1335, 2015.
- [76] McCalden, R.W., McGeough, J.A., Barker, MB, Court-Brown, C.M., Age-related changes in the tensile properties of cortical bone, *The Journal of Bone and Joint Surg Am*, Vol.75, No.8, pp.1193-1205, 1993.
- [77] Gross, A.G., A new theory on the dynamics of brain concussion and brain injury, *Journal Neurosurg*, Vol.15, No.5, pp.548-561, 1958.
- [78] Gourin, C.G. Shackford, S.R., Production of tumor necrosis factor-alpha and i561 (nterleukin-1beta) by human cerebral microvascular endothelium after percussive trauma,

- Journal Trauma, Vol.42, No.6, pp.1101–1107, 1997.
- [79] Shreiber, D.I. Bain, A.C., Meaney, D.F., In vivo thresholds for mechanical injury to the blood-brain barrier, Stapp Car Crash Conference Proc, pp.277–291, 1997.
- [80] Miller, R.T., Margulies, S.S., Leoni, M., Nonaka, M., Chen, X., Smith, D.H., Finite element modeling approaches for predicting injury in an experimental model of severe diffuse axonal injury, 42nd Stapp Car Crash Conference, Proceeding, pp.155–166, 1998.
- [81] TASS International, MADYMO model manual, Delft, 2010.
- [82] Livermore Software Technology Corporation (LSTC), LS-DYNA R8.0 keyword manual, Livermore, 2016.
- [83] Azouvi, P., Neuroimaging correlates of cognitive and functional outcome after traumatic brain injury, Current Opinion in Neurology, Vol.13, No.6, pp.665–669, 2000.
- [84] Fork, M., Bartels, C., Ebert, A.D., Grubich, C., Synowitz, H. and Wallesch, C.W., Neuropsychological sequelae of diffuse traumatic brain injury, Brain Injury Vol.19, No.2, pp.101–108, 2005.
- [85] Deck, C. and Willinger, R., Improved head injury criteria based on head FE model, International Journal Crashworthiness, Vol.13, No.6, pp.667-678, 2008.
- [86] Kurt, M., Laksari, K. Kuo, C., Grant, G. and Camarillo, D., Modeling and optimization of airbag helmets for preventing head injuries in bicycling, Annals of Biomedical Engineering, pp.1-13, 2016.
- [87] Newman, J.A., A generalized acceleration model for brain injury threshold (GAMBIT), Proceeding of IRCOBI conference, Zurich, pp.121-131, 1986.
- [88] Chamouard, F., Tarriere, C., Got, C., Guillon, F., Patel, A. and Hureau, J., Relationship between some biomechanical and dimensional characteristics of the skull and the risk of cerebral injuries, Proceeding of IRCOBI conference, Zurich, pp.133-152, 1986.
- [89] Yanaoka, T. and Dokko, Y., Investigation on general difference of intracranial responses related to traumatic brain injuries using age-specific human head/brain FE models, SAE Technical Paper, 2014-01-0485, doi:10.4271/2014-01-0485, 2014.
- [90] Maxwell, W.L., Watt, C.W., Graham, D.I. and Gennarelli, T.I., Ultrastructural evidence of axonal shearing as a result of lateral acceleration of the head in non-human primates, Acta Neuropathologica, Vol.86, No.2, pp.136–144, 1993.
- [91] Gennarelli, T. A., Thibault, L.E. and Graham, D.I., Diffuse axonal injury: an important form of traumatic brain damage, Neuroscientist Vol.4, pp.202–215, 1998.
- [92] ボルボ・カー・ジャパン株式会社, ボルボクラウドを活用した自転車事故防止へ向けた世界初の試み, プレスリリース, 2015.

謝辞

本研究において多大なご指導，ご教示を頂きました青村 茂教授に心より感謝と御礼を申し上げます。青村教授には，研究を進めるに際し，筆者の自主性を尊重して下さりながらも，随所での確なご指導を頂きました。青村教授のご教示のお陰で，博士後期過程にて研究の厳しさだけでなく楽しさも学ぶことができたと思います。重ねて厚く御礼申し上げます。

交通安全環境研究所 松井 靖浩主席研究員には，本研究を遂行するにあたり，的確なアドバイスや多大なご支援を賜りました。博士後期課程入学時から常に応援して下さいましたお陰で，研究に邁進することができました。心より深く感謝申し上げます。

学位論文審査を通じてご指導並びにご教示を頂きました久保田 直行教授，長谷 和徳教授，新田 収教授に感謝申し上げます。学術的に貴重なコメントやアドバイスして頂いたお陰で論文が完成いたしましたことを，心より御礼申し上げます。

芝浦工業大学 廣瀬 敏也准教授には，常に暖かいご支援を賜り，自転車走行流に関する調査についてご指導を頂きました。獨協医大越谷病院 救命救急センター 五明 佐也香医師には，頭部交通外傷に関する第三次救命救急センターとの共同研究を可能にして下さり，多大なご支援を頂きました。心より厚く御礼申し上げます。

青山学院大学 張 月琳先生には，有限要素モデル解析に際し，ご指導並びにご支援を頂きました。元茨城キリスト教大学 土井努先生には，交通事故の統計分析モデルについてご指導頂きました。深く感謝並びに御礼を申し上げます。

警視庁三鷹警察署には，都市部における自転車交通事故の現状並びに自転車走行流に関する調査に全面的にご協力を頂きました。三鷹市役所には，三鷹市内における自転車安全運転講習会における自転車乗員のアンケート調査に長きに渡りご協力頂きました。三鷹市老人クラブ連合会には，高齢者の特性調査において多大なご協力を頂きました。株式会社共和電業には，夏・冬の厳しい季節の中，頭部インパクトの車両及び路面に対する衝撃実験実施に多大なるご協力を賜りました。株式会社ナックイメージテクノロジーには，高速度カメラ撮影に関し，ご協力を賜りました。心より御礼申し上げます。

東京高専角田 陽准教授並びに中楯 浩康助教には，脳傷害の評価手法に向けた議論を含め，本論文に貴重なコメントやアドバイスを頂きました。重ねて御礼申し上げます。

本研究をご支援していただいた，自動車技術総合機構 交通安全環境研究所 自動車研究部並びに審査部の皆様に心より感謝申し上げます。

本研究の遂行に際し，青村研究室秘書の松岡恵子様や青村研究室の皆様より，多くのご協力・ご支援を頂きました。心より感謝申し上げます。在学中は学生という同じ立場で研究に勤しみながら，楽しい研究生活になりました。ありがとうございます。

そして，入学時から応援してくれた家族や友人に心より感謝いたします。