

筑波大学

博士（医学）学位論文

高齢者頰椎外傷の発生メカニズムの研究
-疫学調査を基礎にした交通外傷
シミュレーション実験の解析-

2 0 1 6

筑波大学大学院博士課程人間総合科学研究科

中山 敬太

目次

第1章 序論

1-1 背景	p.6
1-2 頚椎外傷の現状	p.7
1-3 交通事故による頚椎外傷の発生メカニズム	p.8
1-4 高齢者の特性	p.9
1-5 本研究の目的	p.10
1-6 本論文の構成	p.11

第2章 本邦における頚椎外傷の統計解析 外傷データベースを用いて

2-1 頚椎外傷の疫学	p.13
2-2 日本外傷データベース	p.14
2-3 研究概要	p.15
2-4 結果	p.17
2-5 考察	p.25
2-6 本研究の限界	p.27
2-7 小括 1	p.28

第3章 交通事故により生じる頸椎外傷の衝突速度の疫学調査

3-1 頸椎外傷	p.29
3-2 交通事故総合分析センター	p.30
3-3 研究概要	p.31
3-4 結果	p.32
3-5 考察	p.37
3-6 本研究の限界	p.38
3-7 小括 2	p.39

第4章 被験者を用いた前方衝突直前の頸椎挙動の三次元解析

4-1 被験者を用いた衝突実験	p.40
4-2 研究概要	p.42
4-3 結果	p.46
4-4 考察	p.50
4-5 本研究の限界	p.51
4-6 小括 3	p.52

第5章 有限要素法を用いた衝突時の高齢者頸椎挙動解析

5-1 背景	p.53
5-2 研究概要	p.55
5-3 結果	p.57
5-4 考察	p.60
5-5 本研究の限界	p.62
5-6 小括 4	p.62

第6章 総括

6-1 総括	p.63
6-2 本研究の限界と今後への展望	p.65
用語集	p.66
引用文献	p.69
謝辞	p.80
参考論文	p.81

第 1 章 序論

1.1 背景

頰椎外傷（Cervical spine injuries CSI）は低頻度であるが、重傷度の高い外傷である。頰椎外傷は頰椎骨折、頰椎脱臼、頰椎脱臼骨折、頰髄損傷の総称であり 10 万人辺り 19-88 人発生すると報告されている¹。頰椎外傷は脊椎外傷の 19-51%であり、受傷機転はほぼ転落か交通事故であるとされている^{2,3,4,5}。高齢者が軽微な外傷で受傷することにより、高齢者の受傷者が増加していると報告されているが、本邦では過去に大規模な調査は行われていない⁶。

頰椎外傷の重要な受傷機転である交通事故は近年、道路交通環境の整備、交通安全思想の普及徹底、安全運転の確保、車両の安全性の確保、道路交通秩序の維持、救助及び救急体制等の整備等が総合的に寄与することにより発生件数・死傷者数ともに減少傾向にある⁷。平成 25 年の交通事故死者数は 4373 人であり、過去最悪であった昭和 45 年の 1 万 6755 人の 3 割以下となった。また、その数は 13 年連続で減少し、特に直近の 5 年はいずれも 5000 人を下回っている⁷。しかし、高齢者の占める割合は年々増加している⁸。平成 24 年の交通事故による死者数は 4400 人でその内の約 5 割を 65 歳以上の高齢

者が占めている⁸。高齢者の交通事故の増加は重大な社会問題となっており、「本格的な高齢社会への移行に向けた総合的な高齢者交通事故安全対策」として、道路交通環境の整備、車両安全の向上、交通安全教育などが政府より行なわれている⁷。

本邦の高齢化は平成 26 年の統計では 65 歳以上の人口は 3186 万人と総人口に占める割合は 25.0%となり、人口、割合共に過去最高となっており最も高齢者の割合が多い国である^{8,9}。さらに平成 47 年には 65 歳以上の人口の割合が 33.4%となり、3 人に 1 人が高齢者になると見込まれている⁸。

今後の更なる高齢者人口の増加は高齢者の交通事故がより一層重大な社会問題となる可能性や、高齢者の頸椎外傷が増加する可能性がある。

1.2 頸椎外傷の現状

頸椎外傷の受傷機転はほぼ転落か交通事故であるとされている³。受傷機転の一つである交通事故では、平成 25 年度の交通事故調査では一ヶ月以上の治療を要する重傷者で頸椎外傷は前年比+88 人、2.4%増加しており、頸椎外傷の増加が報告されている¹¹<Table1>。

○ 損傷部位別死傷者数の推移（各年12月末）

損傷部位別	年	15年	16年	17年	18年	19年	20年	21年	22年	23年	24年	25年	増減数	増減率	構成率	指数	
死者	全損	705	628	617	589	470	434	397	403	347	337	316	-21	-6.2	7.2	45	
	頭部	3,854	3,728	3,412	3,101	2,830	2,473	2,322	2,250	2,205	1,986	2,039	53	2.7	46.6	53	
	顔部	86	74	82	68	68	54	56	55	52	52	41	-11	-21.2	0.9	48	
	頸部	420	395	360	263	239	213	211	216	232	224	203	-21	-9.4	4.6	48	
	胸部	1,600	1,464	1,434	1,396	1,231	1,171	1,091	1,120	1,018	1,032	1,039	7	0.7	23.8	65	
	腹部	580	561	494	473	464	385	400	381	333	313	308	-5	-1.6	7.0	53	
	背部	13	15	11	15	14	12	19	25	17	11	19	8	72.7	0.4	146	
	腰部	262	303	290	277	297	260	294	294	284	314	260	-54	-17.2	5.9	99	
	腕部	18	23	18	11	10	13	9	10	12	10	5	-5	-50.0	0.1	28	
	脚部	121	143	144	120	93	94	105	86	99	74	63	-11	-14.9	1.4	52	
	その他	109	91	65	90	66	88	64	82	64	58	80	22	37.9	1.8	73	
	計	7,768	7,425	6,927	6,403	5,782	5,197	4,968	4,922	4,663	4,411	4,373	-38	-0.9	100.0	56	
	重傷者	頭部	9,619	9,436	8,682	8,052	7,624	6,993	6,718	6,541	6,324	6,139	5,909	-230	-3.7	13.3	61
顔部		3,018	3,015	2,803	2,613	2,523	2,396	2,365	2,222	2,160	1,996	1,878	-118	-5.9	4.2	62	
頸部		6,500	6,185	5,799	5,164	4,680	4,386	4,113	4,064	3,734	3,710	3,798	88	2.4	8.5	58	
胸部		11,146	10,881	10,442	10,010	9,587	9,168	8,561	8,236	7,760	7,573	7,191	-382	-5.0	16.1	65	
腹部		1,412	1,381	1,364	1,269	1,225	1,163	1,147	1,169	1,130	1,115	1,031	-84	-7.5	2.3	73	
背部		809	717	718	675	659	561	578	565	571	478	497	19	4.0	1.1	61	
腰部		5,200	5,048	4,811	4,683	4,442	4,239	4,147	4,261	3,880	3,932	3,870	-62	-1.6	8.7	74	
腕部		12,525	12,463	12,231	11,513	11,086	10,220	9,506	8,954	8,513	8,089	7,645	-444	-5.5	17.2	61	
脚部		24,856	23,674	22,114	20,158	19,198	17,683	16,565	15,520	14,579	13,622	12,723	-899	-6.6	28.6	51	
その他		27	17	13	10	11	9	10	5	12	11	5	-6	-54.5	0.0	19	
計		75,112	72,817	68,977	64,147	61,035	56,818	53,710	51,537	48,663	46,665	44,547	-2,118	-4.5	100.0	59	
軽傷者		頭部	83,511	80,249	74,361	68,940	63,887	56,276	51,624	49,834	45,366	42,205	37,998	-4,207	-10.0	5.2	46
		顔部	38,719	36,737	34,669	31,322	28,485	25,364	23,225	21,997	19,921	17,742	16,008	-1,734	-9.8	2.2	41
	頸部	588,890	594,591	589,118	566,894	531,762	485,996	475,728	475,538	462,462	457,942	442,284	-15,658	-3.4	60.0	75	
	胸部	43,819	43,881	42,933	41,262	40,416	37,170	35,815	34,353	31,876	29,759	27,034	-2,725	-9.2	3.7	62	
	腹部	7,076	7,132	7,066	6,560	6,248	5,635	5,553	5,283	5,029	4,628	4,421	-207	-4.5	0.6	62	
	背部	8,128	7,876	7,960	7,354	7,376	6,915	6,756	6,593	6,334	6,015	5,538	-477	-7.9	0.8	68	
	腰部	60,612	61,175	61,579	60,213	58,430	54,956	53,112	53,087	50,602	49,424	47,218	-2,206	-4.5	6.4	78	
	腕部	88,803	92,203	89,419	84,826	82,907	76,635	73,721	72,252	68,010	64,027	59,807	-4,220	-6.6	8.1	67	
	脚部	186,936	186,875	180,968	166,977	153,957	139,814	131,831	125,630	116,139	106,866	96,528	-10,338	-9.7	13.1	52	
	その他	75	80	65	71	150	124	140	190	208	123	111	-11	-9.8	0.0	148	
	計	1,106,569	1,110,799	1,088,138	1,034,419	973,618	888,895	857,505	844,757	805,947	778,731	736,947	-41,784	-5.4	100.0	67	

1. Table 1. 平成25年事故発生状況と死傷者構成率

「平成25年中の交通事故発生状況¹¹⁾」警察庁交通局. 2015

交通事故の重傷者数が減少しているのに対して、頸椎外傷が増加している理由としては事故対象者の高齢化が関与しているのではないかと推測される。しかし、過去に本邦の頸椎外傷の年齢分布は明らかとなっていない。

1.3 交通事故による頸椎外傷の発生メカニズム

交通事故による頸椎外傷の発生メカニズムの研究としてはシネラジオグラフィを用いた志願者模擬実験による、衝突時の頸椎挙動解析

^{12,13}、屍体や衝突研究用ダミーを用いた研究¹⁴⁻¹⁸、コンピューターシミュレーションモデルによる研究¹⁹、三次元動作解析による研究がされている^{19,20}。

1.4 高齢者の特性

高齢者の特性としては認知機能、心理、身体的機能など複雑な要因があるとされている²¹。また、それ以外にも加齢による組織変性に起因する筋骨格系構成体の力学的脆弱性など多くの要因が考えられる^{22,23}。

高齢者では認知能力が低下しているとされ、交通事故の大きな要因の一つであるとされている²⁴。本邦では高齢者は自動車の運転時に潜在的な危険の予測に弱点が見られことから、安全講習を受講することが大切であると交通安全教育がされている²⁵。

高齢者の頸椎では加齢による組織変性に起因する骨棘の形成や脊柱管の狭窄、可動域の低下の存在や筋骨格系構成体の力学的脆弱性により生じる骨粗鬆症が生じることにより、若年者と受傷時の病態メカニズムが異なっていることが知られている^{6,22,23}。

しかし、高齢者の特性は複雑であり、どの要因がどの程度、交通

事故に関与しているかは明らかとはなっていない。

1.5 本研究の目的

本研究では、頸椎外傷の疫学研究することにより、年齢分布を調査し、高齢化の実態を明らかにすることである。また、頸椎外傷の重要な受傷機転であり、受傷機転に法則性がある交通外傷に注目し、高齢者の特性を考慮したモデルを作成し、頸椎外傷の発生メカニズムを若年者と比較することにより、頸椎外傷における高齢者の特性を評価研究することである。

1.6 本論文の構成

本論文は「高齢者の頸椎外傷-疫学調査及び発生メカニズムの研究-」と題して以下の6章により構成される。

第1章「序論」では、本研究の背景を述べ、高齢者の頸椎外傷を研究する意義および目的を明確にする。

第2章「本邦における頸椎外傷の統計解析-外傷データベースを用いて-」では、本邦における頸椎外傷の年齢分布、死亡率を調査する。頸椎外傷の年齢分布を明らかにすることにより、高齢化の実態を明らかにする。

第3章「交通事故により生じる頸椎外傷の衝突速度の疫学調査」では、どれくらいの衝突速度で頸椎外傷が生じるか、また、若年者と受傷が生じる衝突速度が異なるかを検討する。

第4章「被験者を用いた前方衝突直前の頸椎挙動の三次元解析」では、認識の有無の頸椎挙動に対する影響を被験者実験で三次元動作解析を用いて評価する。

第5章「有限要素法を用いた、衝突時の高齢者頸椎挙動解析」では、有限要素法を用いたコンピューターシミュレーションで高齢者の変性した頸椎では若年者と挙動が異なるか、比較検討する。

第 6 章「総括」では、本研究で得られた疫学研究、被験者研究、コンピューターモデルに関して考察を行なうと共に、本研究により得られた結果をまとめ、今後の展望について述べる。

第2章 本邦における頸椎外傷の統計解析 —外傷データバンクを用いて—

2.1 頸椎外傷の疫学

頸椎外傷（Cervical spine injuries CSI）は低頻度であるが、重傷度の高い外傷である。頸椎外傷は頸椎骨折、頸椎脱臼、頸椎脱臼骨折、頸髄損傷の総称であり10万人辺り19-88人発生すると報告されている¹。頸椎外傷は脊椎外傷の19-51%であり、受傷機転はほぼ転落か交通事故であるとされている^{2,3,4,5}。

頸髄損傷は頸椎外傷の2-3%であり、11.2-25%と高い死亡率である²⁷。死亡率の高い原因としては、脊髄麻痺による呼吸筋麻痺が考えられる^{28,29,30}。

本邦では頸髄損傷に関しては過去に2回大規模な全国調査が行なわれ、一回目では9752名、二回目では1706名登録された。しかし、アンケート形式であり、一回目の回収率が51.4%、二回目の回収率も20.6%であった。そのため、継続されておらず、頸椎外傷に関しても過去に大規模な疫学調査は行なわれていない^{31,32}。

高齢者では頸椎外傷は比較的軽微な外傷でも発生すると報告され、頸椎の変性や骨粗鬆症の関与が示唆されている^{33, 34, 35, 36, 37}。高齢者の頸椎外傷は若年者と比較して死亡率が高いという報告がある一方、高齢者でも適切な治療がされれば機能回復は良く、社会復帰可能であるという報告もされている^{38, 39, 40, 41}。システマティックレビューでは年齢、脊髄損傷の有無、合併症の存在と頸椎外傷の死亡率の相関関係が報告されているが、統計学的には明らかではなく、高齢者の頸椎外傷の予後に関してはまだ、議論されているのが現状である⁴²。

本研究の目的は過去に大規模な疫学調査が行われていない、本邦の頸椎外傷の疫学調査を行い、年齢分布、受傷機転、死亡率を明らかにすることである。

2.2 日本外傷データバンク

日本外傷データバンク（JTDB）は、外傷研究の促進を目的にした本邦初の外傷データベースであり、救急救命センターが中心となり、現在223施設が加盟している。登録施設では外傷症例をAbbreviated Injury Score (AIS)を用いて、登録している⁴³。AISとは1971年に米国自動車医学振興協会により自動車事故に関する大規模なデータベー

スとして利用することを目的に開発された外傷の種類と解剖学的重症度を表すコード体系でスコアリングシステムである⁴⁴。7桁の数列により表され、解剖学的部位、損傷の分類、損傷レベル、傷害度を分類している⁴⁵。

2.3 研究概要

2.3.1 対象

JTDB に登録されている 2004 年から 2013 年に登録されている 152722 件より、頸椎外傷（頸椎骨折、頸椎脱臼、頸椎脱臼骨折、頸髄損傷）を示す AIS コーディングの症例を対象とした。

頸椎外傷を示すコーディングとは一桁目が 6、三桁目、四桁目が 02 であり、傷害度が 2 以上の症例である。

2.3.2 調査項目

調査項目としては頸椎外傷を示す AIS コーディングをもつ症例数、及び症例の年齢分布、受傷機転を抽出した。また、受傷機転の中でも交通事故による外傷を抽出し、詳細な受傷機転を調査した。そして、自動車運転における座席位置と頸椎外傷の関連をみる目的で、

運転席ならびに助手席における全体の受傷者と頸椎外傷の年齢分布を調べた。

頸椎外傷に起因する死亡率を算出するにあたっては、多発外傷では複数の AIS コーディングを持つ症例も含まれているため複雑である。そのため、頸椎外傷の AIS コーディングが最も傷害度が高く、重傷度が高いと考えられる症例を抽出し、その年齢分布、死亡者数、死亡率を調査した。

2.3.3 統計学的検討

高齢者の頸椎外傷に起因する死亡率を算出する目的で、10歳毎に頸椎外傷が最も傷害度が高い症例数と死亡数を求めた。その後、ROC 曲線を求め、最も左上方にある年齢をカットオフ値として設定した。その年齢を基準として死亡率を求め、 χ^2 乗検定を行った。有意水準 5%未満を有意差ありとした。

2.4 結果

2.4.1 頸椎外傷：年齢分布

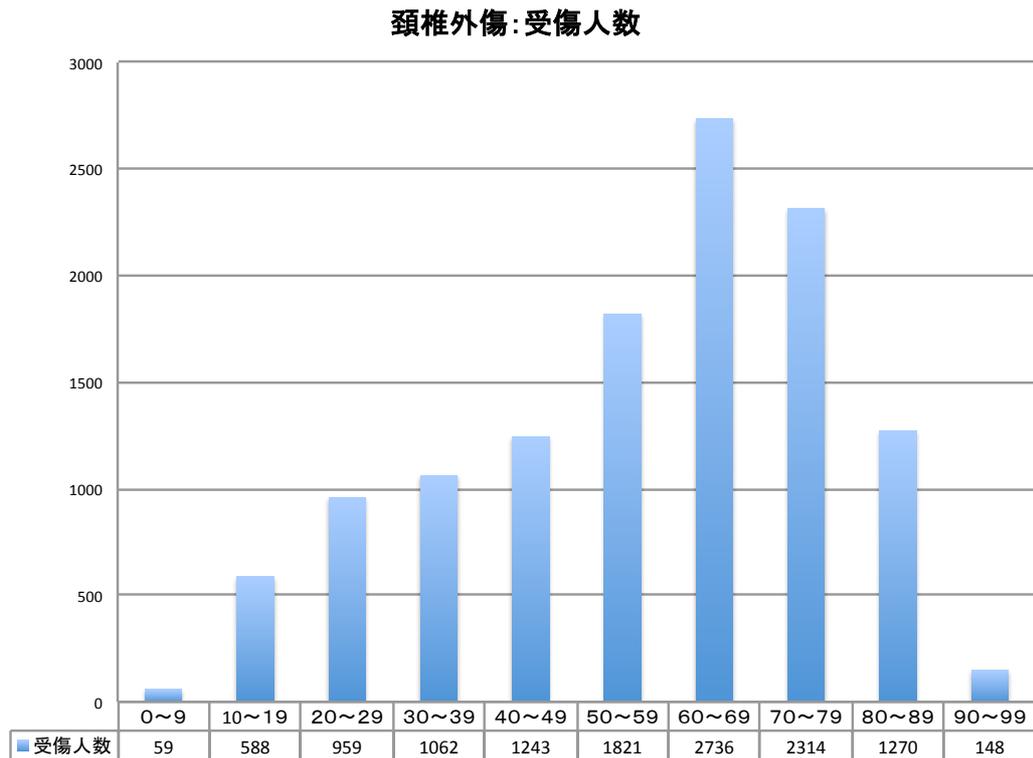


Figure 1. 頸椎外傷：年齢分布

頸椎外傷は 12116 人であった。60 歳台が 2736 人と最も多く、続いて 70 歳台の 2314 人、50 歳台の 1821 人と 60 歳台の一峰性の年齢分布を示した (Figure 1)。

2.4.2 頸椎外傷：受傷機転

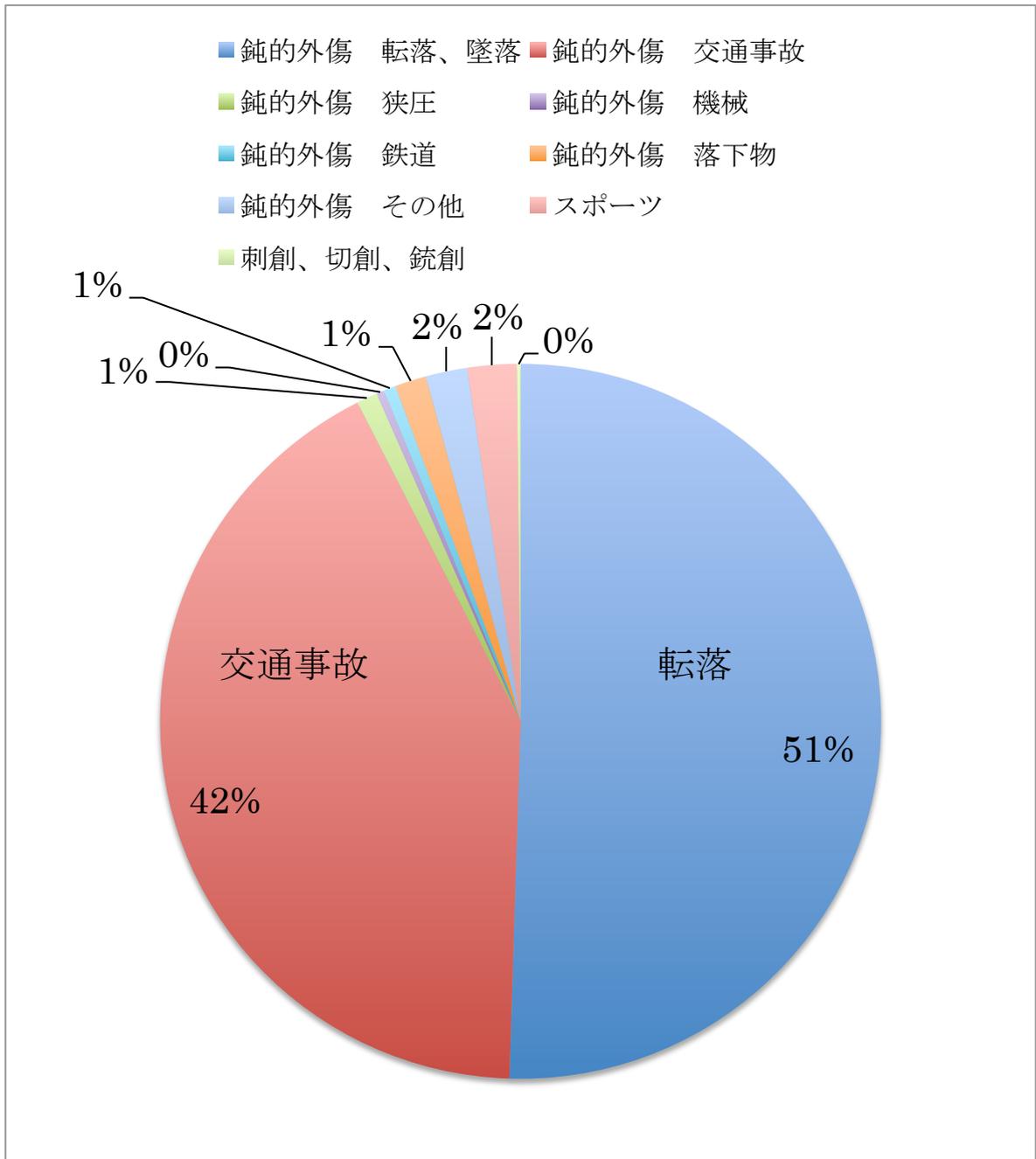


Figure 2. 頸椎外傷：受傷機転

頸椎外傷の受傷機転は 51%が転落で最も多く、続いて交通事故が 42%であった (Figure 2)。

2.4.3 頸椎外傷：交通事故

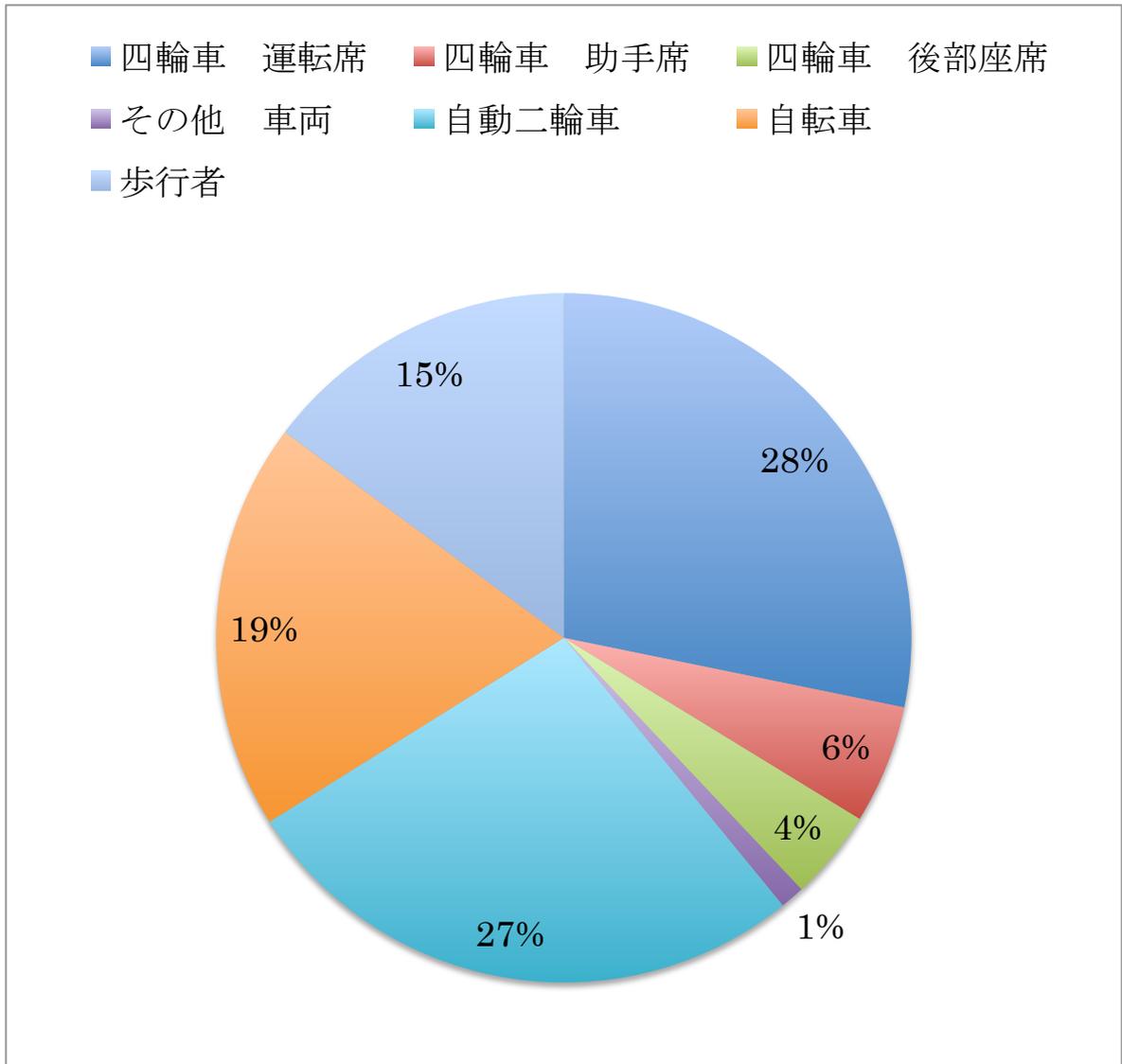


Figure 3. 頸椎外傷：交通事故

頸椎外傷の交通事故による受傷機転として、四輪者の運転席での受傷が最多で 28%であり、続いて、自動二輪車が 27%、自転車の 19%であった (Figure 3)。

2.4.4 四輪者乗車中の受傷者：年齢分布

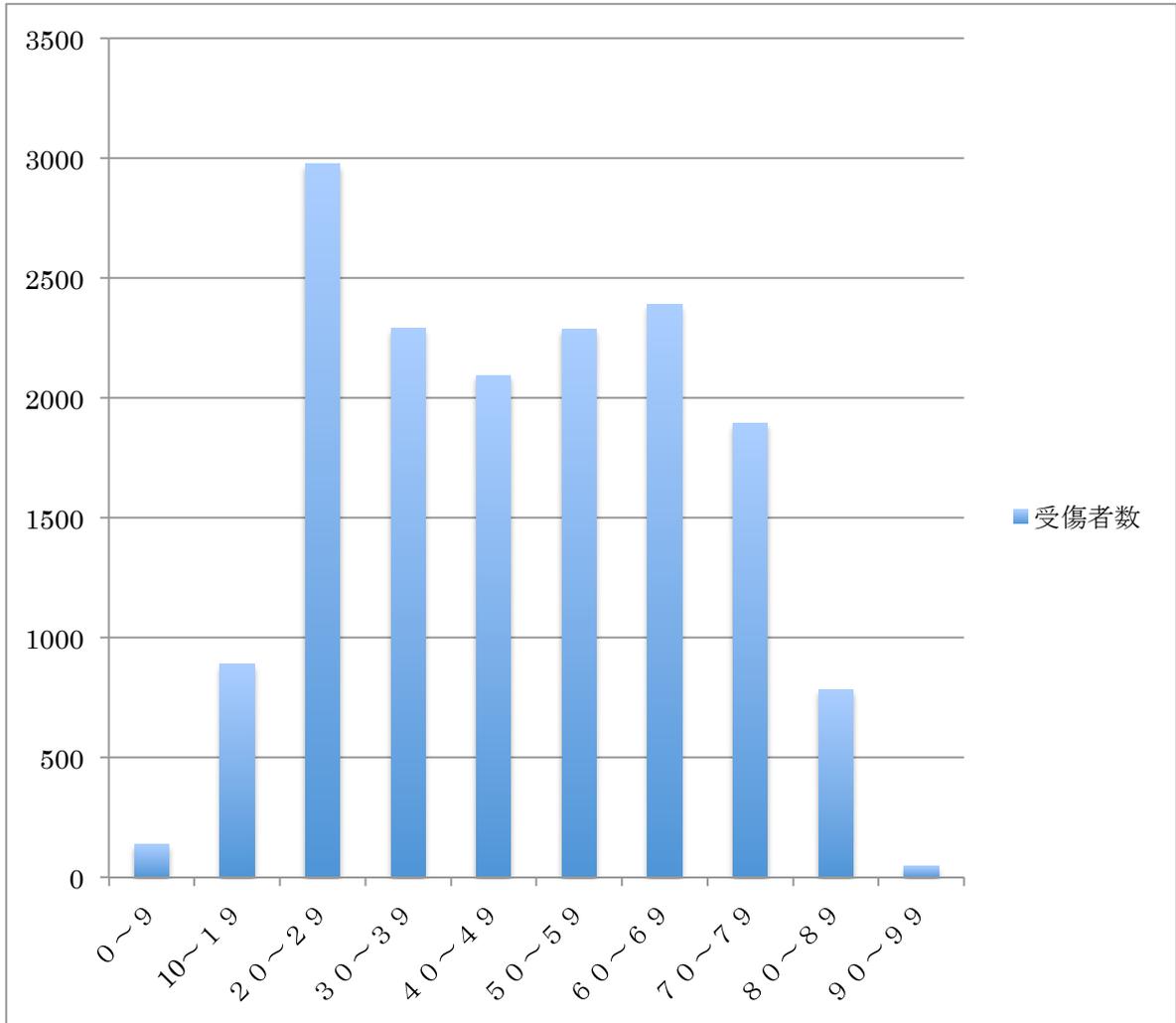


Figure 4. 四輪者乗車中の受傷者：年齢分布

四輪者運転席・助手席での受傷者は 15787 人おり、20 歳台が最も多かった (Figure 4)。

2.4.5 四輪者乗車中の頸椎外傷：年齢分布

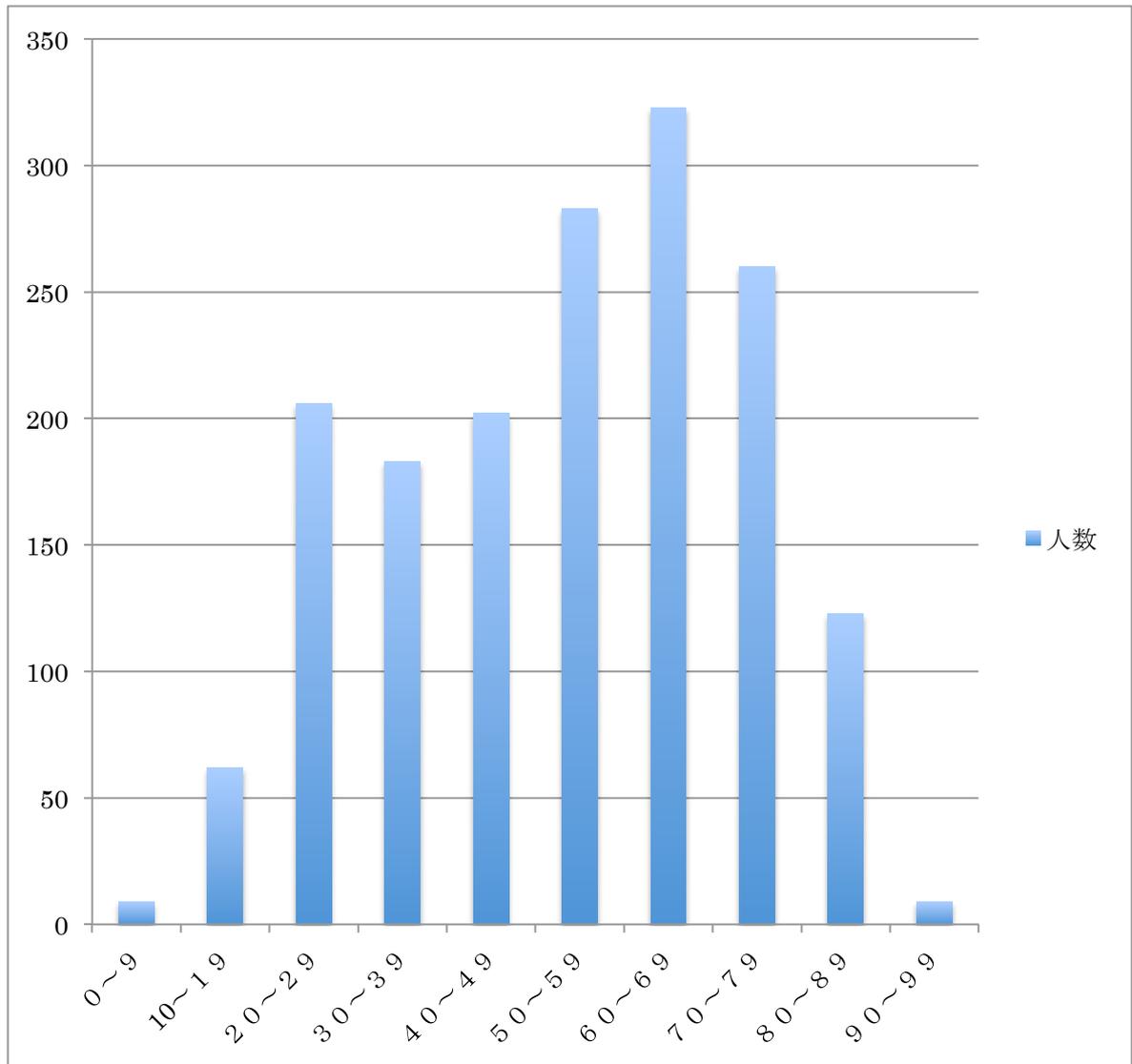


Figure 5. 四輪者乗車中の頸椎外傷：年齢分布

四輪者運転席・助手席での頸椎外傷受傷者は1660人で、60歳台が最も受傷者数が多かった(Figure 5)。

2.4.6 頸椎外傷（主部位）：年齢分布

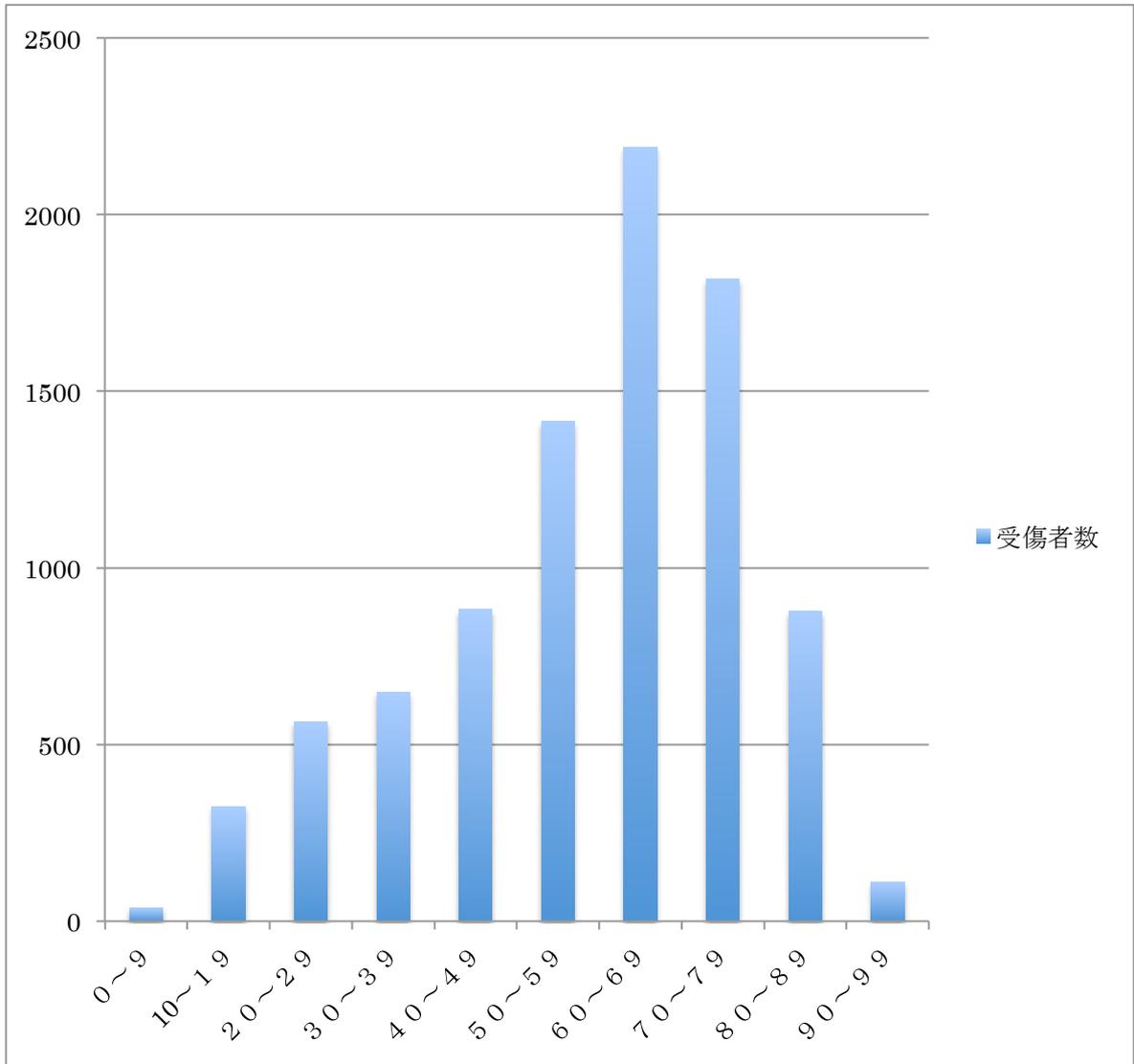


Figure 6. 頸椎外傷（主部位）：受傷者数

頸椎外傷が主部位の受傷者数は 8982 人で、60 歳台が最も多く、続いて 70 歳台、50 歳台であった、60 歳台を中心とした一峰性の年齢分布を示した (Figure 6)。

2.4.7 頸椎外傷（主部位）：死亡者数

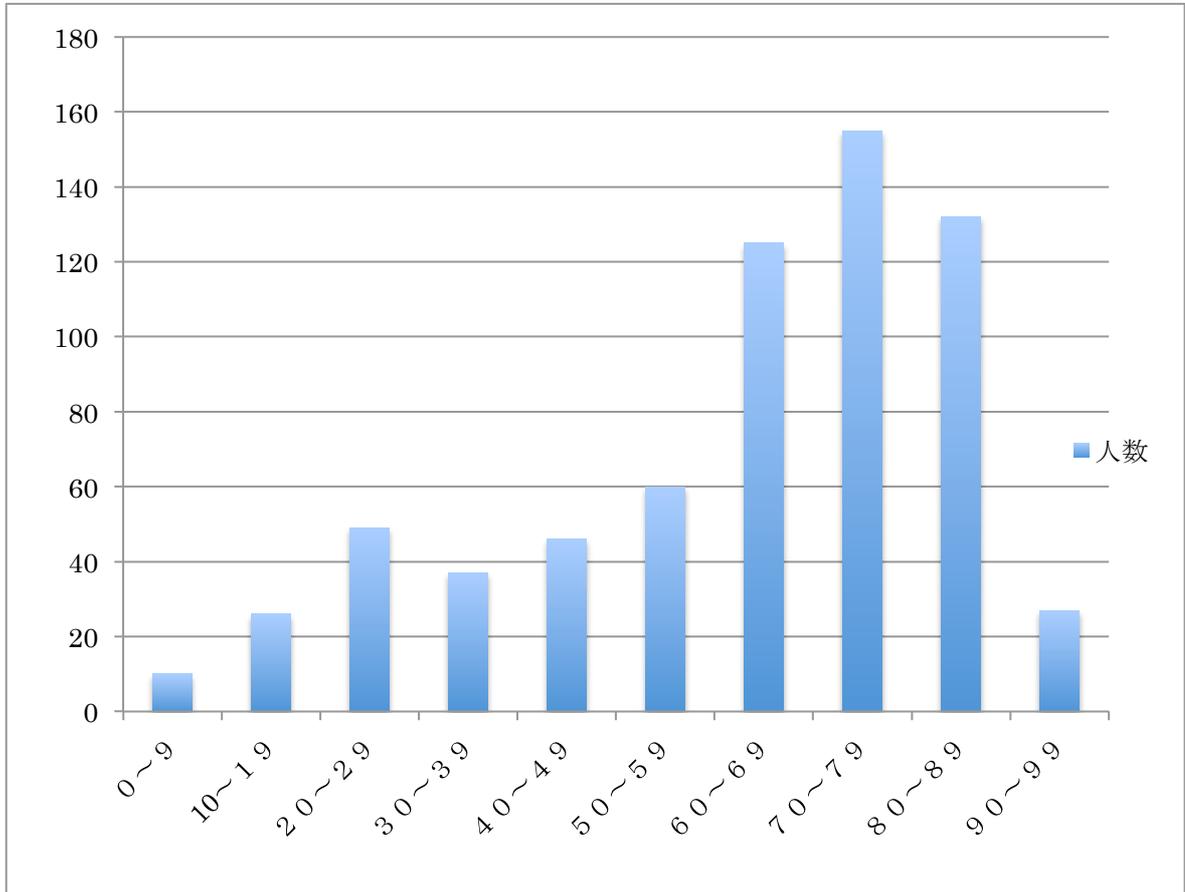


Figure 7. 頸椎外傷（主部位）：死亡者数

頸椎外傷が主部位の死亡者数は 668 人で、70 歳台が最も多く、続いて 80 歳台、60 歳台であった、70 歳台を中心として一峰性の年齢分布を示した(Figure 7)。

2.4.8 頸椎外傷（主部位）：死亡率

年齢	0-69	70-99
死亡数	354	314
受傷者数	6062	2805
死亡率	5.83 *	11.19 *

Table 2. 頸椎外傷：死亡率

カットオフ値は ROC 曲線を描き最も左上方にあった 70 歳を選択した。70 歳以上と未満で死亡率を χ^2 乗検定を用いて比較すると有意差を認めた (Table 2)。

2.5 考察

頰椎外傷の本邦での年齢分布については過去に明らかにされていなかった。今回の結果から頰椎外傷は60歳台に最も多く、続いて70歳台、50歳台と60歳台を中心とした一峰性の年齢分布を示した。高齢者で受傷者数が多い理由として高齢者の頰椎外傷は比較的軽微な外傷でも発生すると報告され、高齢者の特性である危険察知能力の低下や合併症の存在、頰椎の変性、骨粗鬆症などの関与が示唆されている^{33, 34, 35, 36, 37}。今回の結果からも高齢者で頰椎外傷は多く発生しており、若年者よりも軽微な外傷で発生している可能性があると考ええる。

頰椎外傷の受傷機転はほぼ転落か交通事故であると報告されている^{4, 5}。今回の研究結果でも頰椎外傷の受傷機転は51%が転落で最も多く、続いて交通事故が42%であり、頰椎外傷の受傷機転の大部分は転落と交通事故であった。頰椎外傷が発生した交通事故の詳細では四輪者の運転席での受傷が最多で28%であり、続いて、自動二輪車が27%、自転車の19%であった。本邦での交通事故による受傷機転として、乗用車の事故が最も多い事が報告されていたが、自転車事故による受傷機転も多い事が、今回の結果より明らかとなった⁶。近年、

自転車運転が社会問題となっており、法規制の厳格化が議論されているが、頸椎外傷を減少するためにも必要な議論であると考ええる。

Figure3、4、5 より頸椎外傷の交通事故による受傷機転の内、34%を占める四輪者運転席、助手席乗車中の年齢分布は60歳台が多いのに対して、四輪者運転席、助手席乗車中の交通事故の受傷件数は20歳台と若年者が多い事が今回の研究で明らかとなった。我々のデータからは交通事故による受傷者は若年者に多いのに対して、頸椎外傷の受傷者は高齢者に多いという結果であった。このことより、高齢者の交通事故で頸椎外傷が多い原因として、高齢者の交通事故の増加のみが頸椎外傷が高齢者に多い一因ではなく、高齢者では軽微な外力で発生することが主因となっている可能性があると考ええる。

65歳以上の高齢者の頸椎外傷の死亡率は過去の報告によれば受傷後、3ヶ月で19%、1年で28%であり、肺炎などの呼吸器疾患などの合併症による死亡が多かったと報告されている³⁹。しかし、頸椎外傷は高エネルギー外傷で発生するためにしばしば、多発外傷で生じることが報告されている⁴⁶。そのため、多発外傷の影響を考慮し、頸椎外傷による死亡率を評価するために、頸椎外傷の重傷度が最も高く、頸椎外傷が外傷の主部位と考えられる受傷者数と死亡者数を調査し

た。結果としては頸椎外傷が主部位の受傷者数は60歳台が最も多く、60歳台を中心とした一峰性の年齢分布を示した。頸椎外傷が主部位の死亡者数は70歳台が最も多く、70歳台を中心として一峰性の年齢分布を示した。死亡率は70歳以上で有意差をもって高かった。過去のシステマティックレビューでは頸椎外傷の年齢と死亡率は統計学的には明らかではないが、相関関係が示唆されている⁴²。今回の研究では高齢者の死亡率で統計学的有意差を認めた理由としてはシステマティックレビューでは2325名が対象となっており、本研究の12116名と比較するとサンプルサイズが小さいことやレビューの元となっている論文の死亡率が6-38.5%とにばらつきが大きいことが原因ではないかと考えられる^{47,48}。

2.6 本研究の限界

本研究より頸椎外傷の年齢分布、死亡率が明らかとなったが、データベースの性質上、詳細な合併症の有無、死因の詳細は今回の研究からは得られなかった。

また、今回のデータベースは救命センターが中心となり、223施設で登録されているデータである。頸椎外傷は一般的には救急搬送され、

救急病院に搬送される疾患であり、本研究で用いたデータバンクに記載されていると考える。しかし、一次救急や一般外来より入院、加療されている患者も中にはおり、救命センターで加療されていない頸椎外傷は欠落おり、本邦でのすべての頸椎外傷は網羅されていない。

2.7 小括 1

頸椎外傷は 60 歳台での受傷が最も多く、一峰性の年齢分布であり、転落、交通事故での受傷機転が大半であることが明らかとなった。また、70 歳以上の頸椎外傷の死亡率は有意差をもって、70 歳未満よりも高かった。

第 3 章 交通事故により生じる頸椎外傷の 衝突速度の疫学調査

3.1 頸椎外傷

外傷データベースを用いた研究より、頸椎外傷は 60 歳台での受傷が最も多く、一峰性の年齢分布であり、転落、交通事故での受傷機転が大半であることが明らかとなった。そして、本邦での交通事故は近年、減少傾向であるが高齢者の受傷者は増加し、占める割合は年々増加していることより、重要な社会問題となると考える^{7,8}。

我々の研究から四輪者運転席、助手席乗車中の交通事故の受傷件数は 20 歳台と若年者が多かったのに対して、四輪者運転席、助手席乗車中の頸椎外傷の年齢分布は 60 歳台が多かった。この結果より高齢者では若年者よりも頸椎外傷が発生しやすいことが示唆された。高齢者の交通事故で頸椎外傷が多い原因として、高齢者の交通事故の増加のみが頸椎外傷が高齢者に多い一因でなく、高齢者では軽微な外力で発生することが主因となっていると考えている。

過去の研究では高齢者では頸椎外傷は比較的軽微な外傷でも発生すると報告され、頸椎の変性や骨粗鬆症の関与が示唆されている

33, 34, 35, 36, 37。しかし、どの程度の軽微な外傷で頸椎外傷が発生するかについては過去に研究されていない。そのため、どれくらいの衝撃速度で頸椎外傷が発生するか、明らかにするために本研究を行なった。

3.2 交通事故総合分析センター

公益財団法人交通事故総合分析センター Institute for Traffic Accident Research and Data Analysis (ITARDA) は交通事故に関する調査分析研究を行なっている組織である。警察庁交通局の協力のもと、交通事故統計を収集及び、公表を行なっている。平成25年の報告書では629091件の交通事故が記載されており、高齢者の占める割合は52.7%であった⁴⁹。

統計データとして、事故内容、事故類型、道路種別、天候、時間帯、疑似衝突速度、シートベルト、エアバックの有無など約80項目を集計しており、交通事故集計ツールを用いて利用可能である。

交通事故時に車両、人員に作用する衝撃力は測定困難なため衝突前後の車両速度の差、車両重量を基に算出される疑似衝突速度が衝撃力の代わりとして広く用いられている⁵⁰。

3.3 研究概要

3.3.1 対象

ITARDA に登録されている交通外傷の中より、平成 24 年度、平成 25 年度に乗用車を運転席及び助手席に乗車中に頸椎外傷を受傷した症例を抽出した。

3.3.2 調査項目

調査項目としては年齢、頸椎外傷の重傷度、死亡重傷率、シートベルトの有無、エアバックの有無、擬似衝突速度を調査した。重傷度は道路交通法により定められており、軽傷は交通事故により負傷し、一ヶ月未満の治療を要する場合である。重傷は交通事故により負傷し、一ヶ月以上の治療を要する場合、死亡は交通事故により負傷し、24 時間以内に死亡した場合と定義されている。

死亡重傷率は受傷数の中で、死亡と重傷者数の占める割合である。擬似衝突速度とは衝突の大きさを示す指標として、衝突前後の車両の速度変化を表した数値である。車両相互の正面衝突事故の場合は、自車の重量を $M1$ 、危険認知速度を $V1$ 、相手車の重量を $M2$ 、危険認知速度を $V2$ とした時に擬似衝突速度は $(M2/M1+M2) \times (V1+V2)$ で表

せる⁵⁰。

3.3.3 統計学的検討

年齢と頸椎外傷の死亡重傷率、擬似衝突速度を検討するために、シートベルトを装着し、エアバックが展開し、擬似衝突速度を求めることができた症例のみを抽出した。その後、外傷データバンクで頸椎外傷が最も多いと明らかになった60歳をカットラインとし、60歳未満と以上で頸椎外傷の死亡重傷率が擬似衝突速度で異なるか χ^2 乗検定を行い、有意水準5%未満を有意差ありとし、統計学的解析を行った。

3.4 結果

3.4.1 受傷人数

平成24年、25年度に乗用車の運転席及び助手席に乗車中に前方衝突により頸椎外傷を受傷した人数は109054件であった。その内、シートベルトを着用し、エアバックが展開し、擬似衝突速度を計測できた受傷人数は5598名であり、死亡人数は128名であった。

受傷者は20歳を頂点とした一峰性の年齢分布を示した(Figure 8)。

それに対して死亡重傷者は 50～60 歳で最も多く分布した(Figure9)。

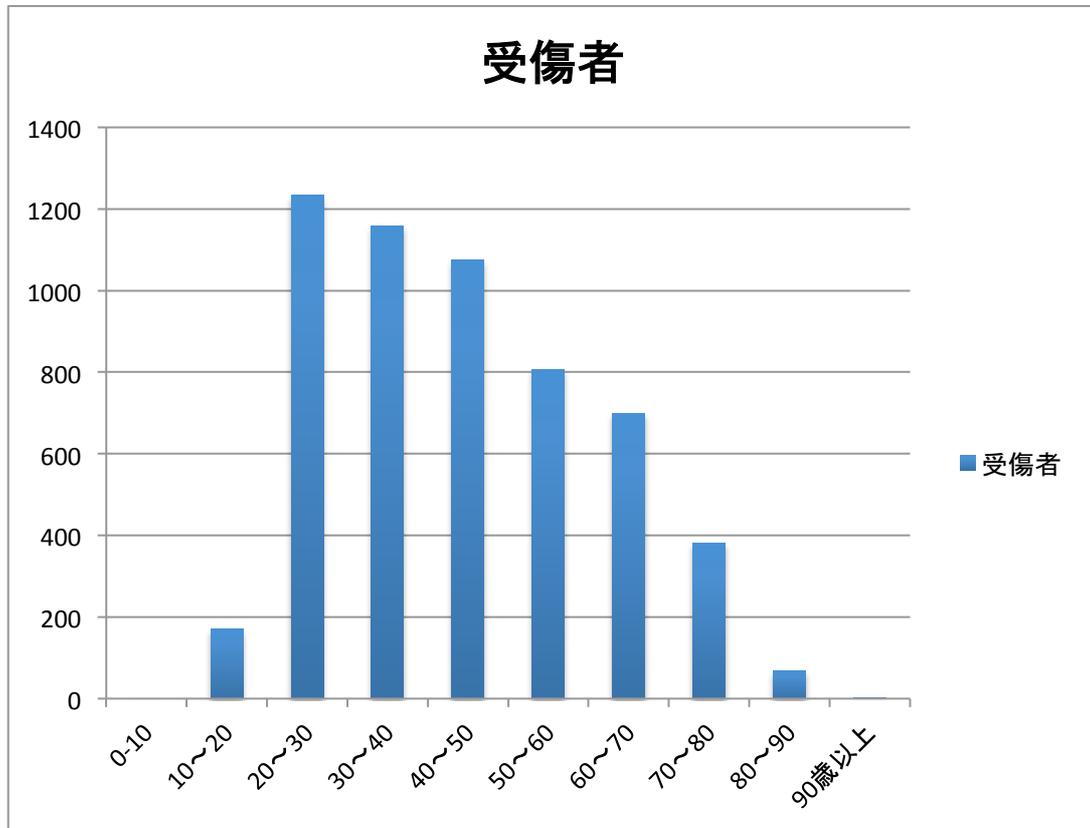


Figure 8. 受傷者：年齢分布

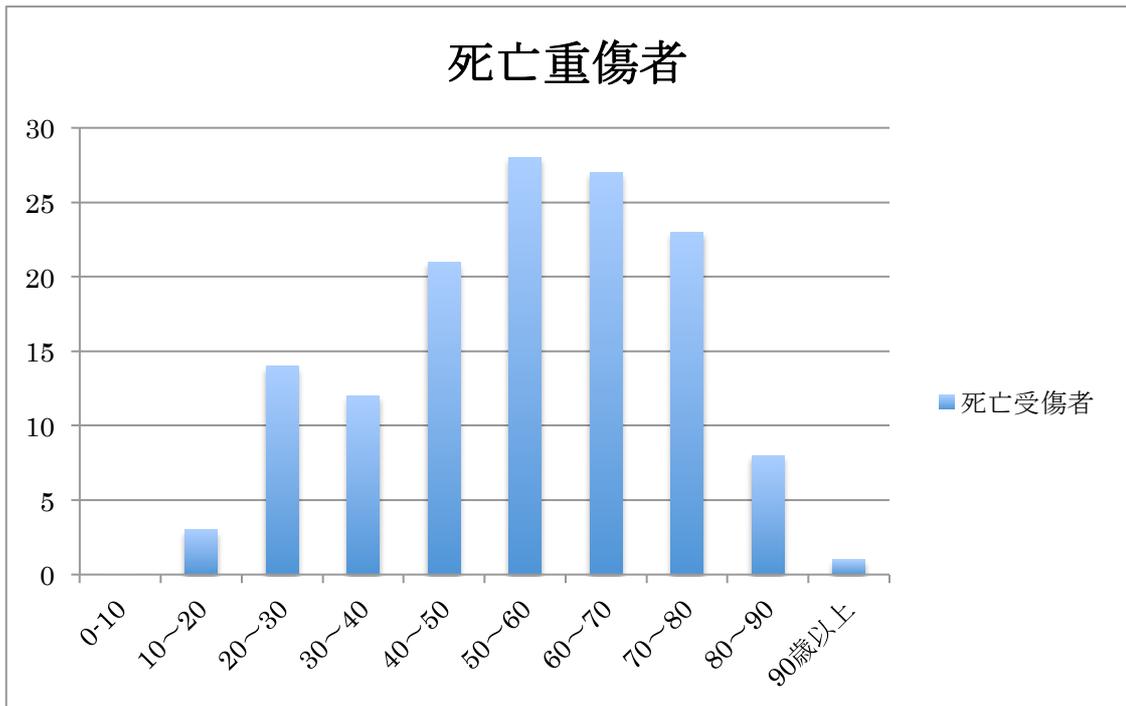


Figure 9. 死亡重傷者：年齢分布

3.4.2 死亡重傷率

受傷者数及び死亡受傷数より、死亡重傷率を求め、衝突速度との相関関係を表した (Table3、Figure 10)。60km/h 以上の衝突速度で最も死亡重傷率は高かった。60歳をカットラインとし、死亡重傷率、衝突速度を比較すると、40km/h 以上の衝突で 60歳未満と以上で統計学的有意差を認めた (Table4、Figure 11)。

衝突速度	20km以下	20-30	30-40	40-50	50-60	60km以上
死亡重傷数	24	21	27	32	6	18
受傷者数	2007	1623	1074	543	121	88
死亡重傷受 傷率	1.2	1.3	2.5	5.9	5.0	20.4

Table 3 衝突速度 頸椎外傷

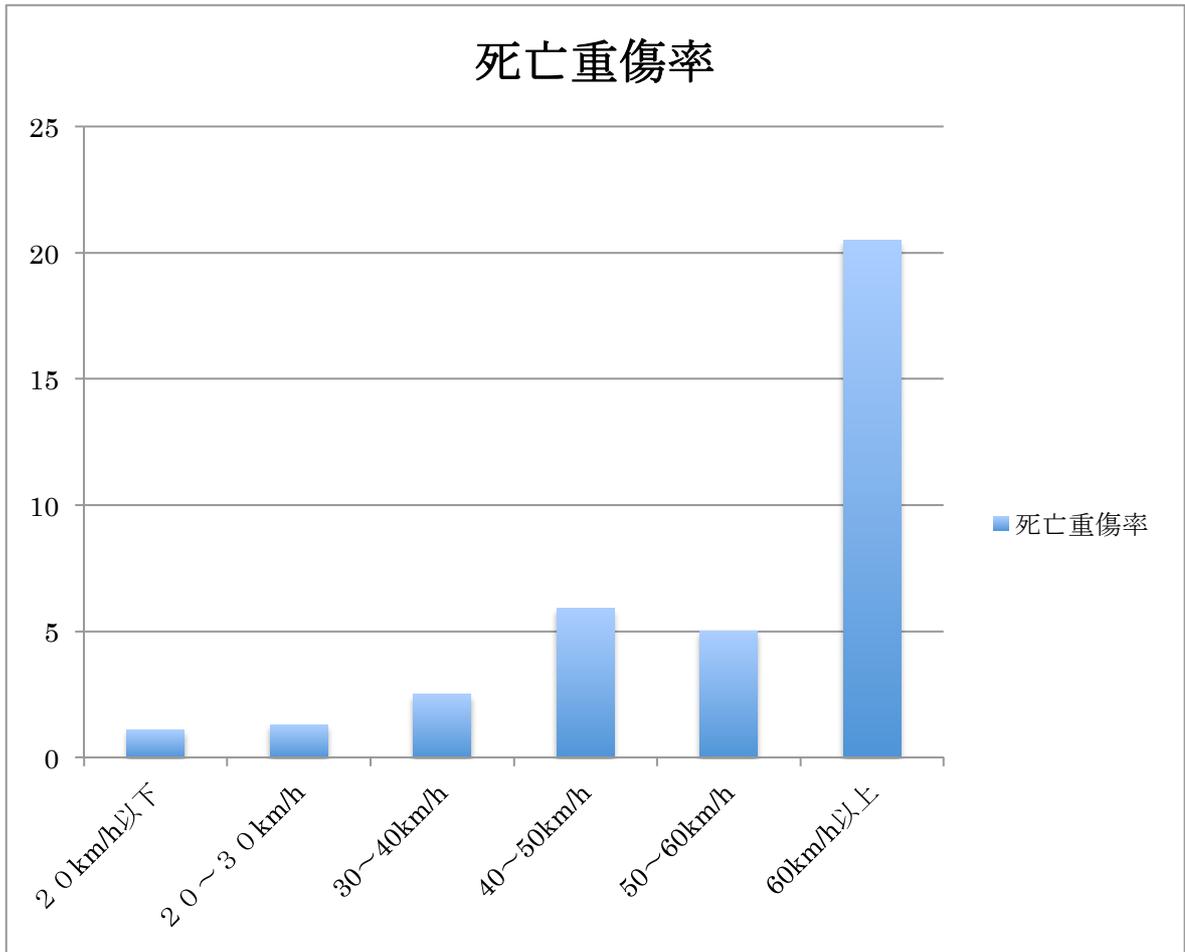


Figure 10. 死亡受傷率：衝突速度

衝突速度	20km以下	20-30km	30-40km	40-50km	50-60km	60km以上
60歲以下	1.1	1.2	1.9	2.9	2.2	17
60歲以上	1.6	1.8	4.1	16	12.5	30

Table 4 死亡重傷率

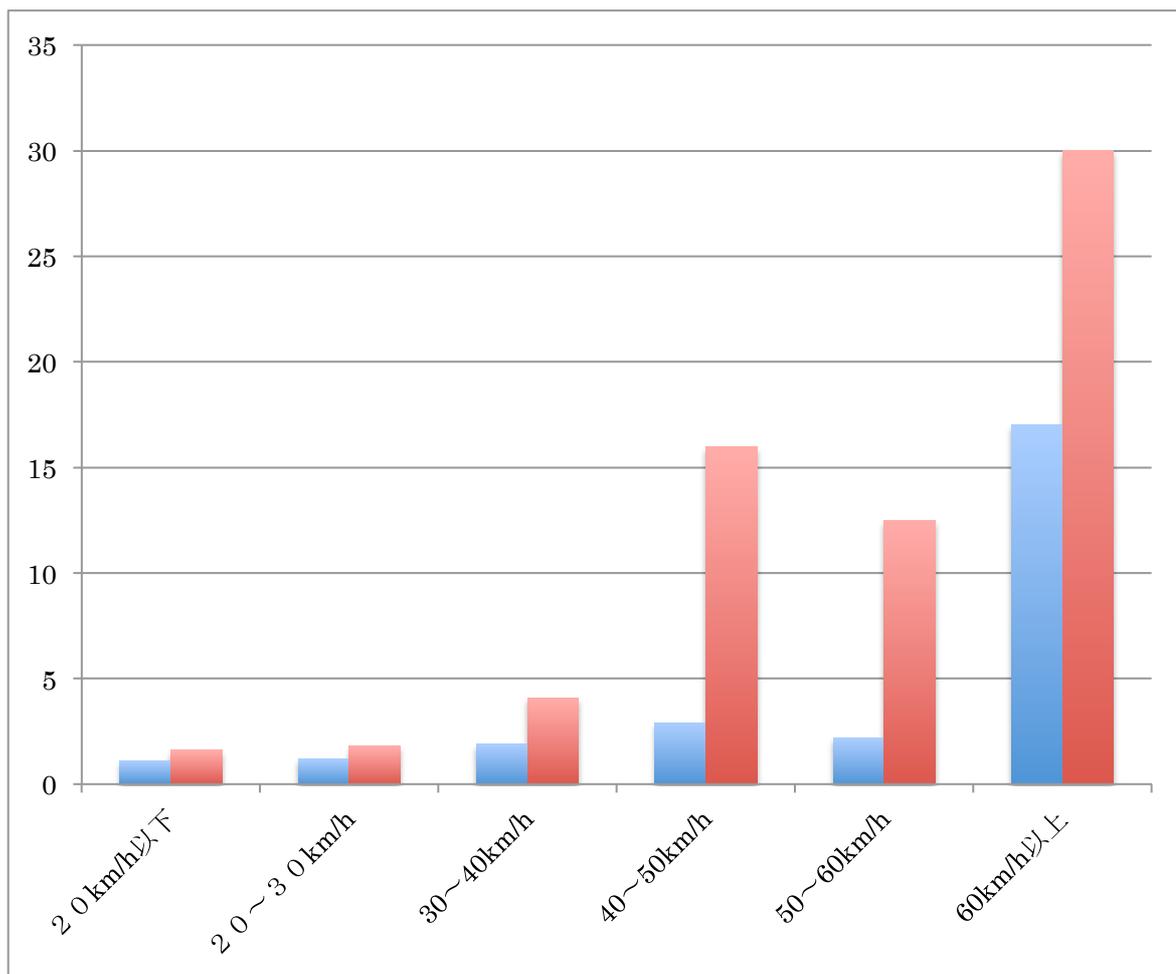


Figure 11. 死亡受傷率： 赤 60歳以上 青 60歳未満

3.5 考察

今回の結果から40km/h以上の前方衝突で頸椎外傷は60歳以上で有意差をもって、60歳未満よりも死亡重傷率が上昇することが明らかとなった。これは高齢者では若年者と比べると、軽い外傷でも頸椎外傷を発生するという、過去の報告を明らかにした結果であると考えられる^{33, 34, 35, 36, 37}。

我々の外傷データベースを用いた研究では頸椎外傷の年齢分布は60歳台に最も多く、続いて70歳台、50歳台と60歳台を中心とした一峰性の年齢分布を示した。今回の結果よりも高齢者では軽微な外傷で頸椎外傷を受傷するために、受傷人数が増加していることが示唆される。

60歳以上では40km/h以上で頸椎外傷が増加していることより、今後、高齢者が増加する中、頸椎外傷を減少させるためには、自動ブレーキの義務化など、より衝突速度を低下させるための工夫が必要と考えられる。

3.6 本研究の限界

本研究より40km/h以上の前方衝突で頸椎外傷は60歳以上で有意差をもって、60歳未満よりも死亡重傷率が上昇することが明らかとなった。データベースの性質上、詳細な頸椎外傷の病態、合併症の有無、死因の詳細は今回の研究からは得られなかった。

また、擬似衝突速度を今回の研究で用いたが、推定している数値であり、実際の衝突速度と異なる可能性がある。

3.7 小括 2

60km/h 以上の衝突速度で最も死亡重傷率は高く、40km/h 以上の前方衝突で頸椎外傷は 60 歳以上で有意差をもって、60 歳未満よりも死亡重傷率が上昇することが明らかとなり、高齢者では若年者と比較すると軽い外傷でも頸椎外傷を誘発することが示唆された。

第 4 章 被験者を用いた前方衝撃直前の 頌椎挙動の三次元解析

4.1 被験者を用いた衝突実験

我々の JTDB を用いた研究と ITARDA のデータバンクを用いた実験により高齢者で頌椎外傷は多く、若年者と比較して小さな外力でも発症することが明らかとなった。高齢者の特性としては頌椎の変性や骨粗鬆症といった筋骨格系の器質的特徴のみならず、認知能力の低下も近年、注目されている^{33, 34, 35, 36, 37, 51}。

高齢者では認知能力の低下により、ブレーキ操作が遅れるが、日本国内の交通事故分析によれば、事故直前にブレーキ操作などの事故回避動作を行った症例は全体の約 6 割程度であり、残りの 4 割は事故回避操作のないまま事故に至っている^{51, 52}。ただ、近年の被害軽減ブレーキ Autonomous Emergency Braking (AEB) の実用化にあたり、事前通知により衝突を回避する事ができ、事故の確率が減少するとの報告もされている⁵³。また、AEB が作動した際の実車実験では回避行動を取る事により姿勢変化が生じる^{54, 55}。このような報告から、前方衝撃前時の乗員で危険を察知していた場合としていなかった場合

での筋応答や姿勢は変化すると考えられ、衝突直前の頸椎挙動の解明は衝突後の頸椎捻挫や頸椎損傷などの受傷の予防にとって重要と考える。また、危険を察知していなかった場合は高齢者の認知能力の低下している状態を模擬しており、高齢者の特性を明らかにするのに重要である。

前方衝撃直前の被験者の挙動を評価する実験は過去にいくつか行われている^{56, 57, 58}。頸椎の動作は三次元的な動作であり、頸椎外傷でのメカニズムにおいて、回旋は重要な要素の一つとして考えられている。実際に頸椎の交通外傷の一つである椎間関節の脱臼骨折の発生メカニズムでは回旋も重要な要素の一つであると報告されている^{59, 60}。しかし、被験者の挙動を三次元的に sagittal 面と axial 面で行った報告はない。我々は今回の実験では危険を察知していた場合としていなかった場合の前方衝突直前の頸椎挙動を三次元的に評価することにより、高齢者の前方衝突時の頸椎外傷の発生メカニズムを明らかにする一助として、実験を行った。

4.2 研究概要

4.2.1 対象

被験者は三人の健康な正常男性。平均年齢は 23 歳であり、平均身長は 170.3cm で平均体重は 68.6kg であった。なお、志願者実験は筑波大学医の倫理特別委員会で審議され承認を受けて実施された。通知番号 692 号。また、被験者との間にはヘルシンキ宣言に沿ったインフォームドコンセントを行い、被験者より書面の同意を得て実験を実施した。

4.2.2 研究設備

我々は前方衝突直前時を再現するために過去に Ejima らが報告している低速度衝撃模擬台車以下スレッドを使用した⁵⁷。スレッドには AEB 時のブレーキに近い値である最大 8m/s^2 の後ろ向きの加速度を加え、1 秒間観察した。椅子は乗用車のシートを用い、シートベルトは 3 点ベルトを用いた。実車の椅子では T12、L3 のモーションキャプチャーができないために一部椅子を切り、テープで補強し使用した (Figure 12)。

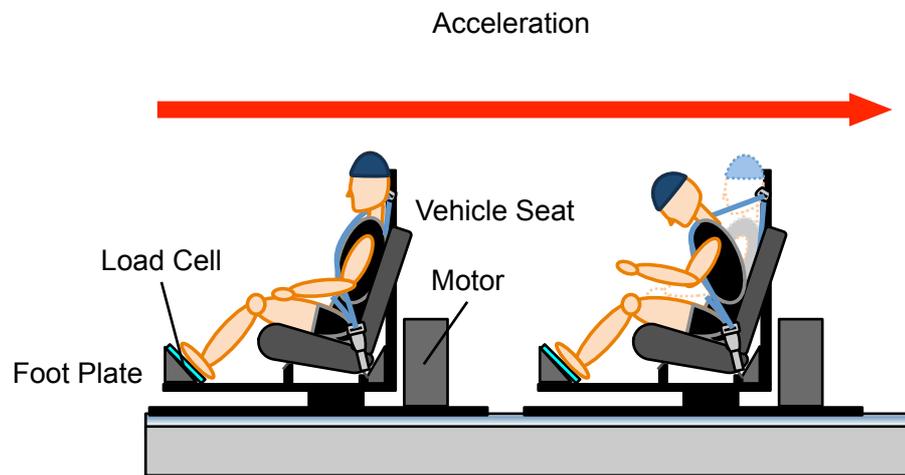


Figure.12 スレッド

4.2.3 三次元動作解析

3次元動作計測装置 (The Raptor-E Series、Motion Analysis Corporation) を用いて撮影した。撮影条件は12台のカメラを使用1280×1024pixels、500fpsで行った。計測マーカは頭頂部、頭部中心、T1、T12、L3、左右の肩峰におき、解析ソフトはCORTEX (The Raptor-E Series、Motion Analysis Corporation) を用い行った。

また、axial面の動きが筋緊張群と非筋緊張群で有意差があるか評価するために、実験前からのRight shoulder-Left shoulderの角度を計測した(Figure 13)。筋緊張群と非筋緊張群での角度変化量の最大値を比較し、2条件間の最大値の平均を比較した。F検定を行った後、分散が等しくないと仮定した2標本によるt検定を用いて有意水準5%未満を有意差ありとした。

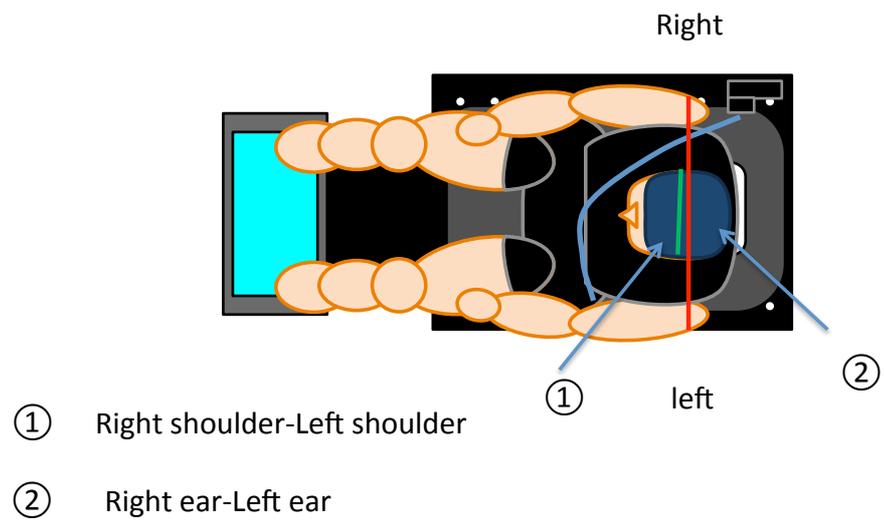


Figure 13

4.2.4 実験条件

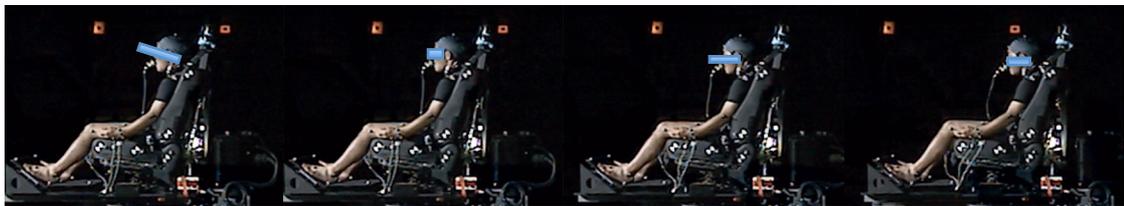
実験は筋作用が身体衝撃応答に与える影響を検討するため、非筋緊張状態と筋緊張状態の2種類の条件を設定した。非筋緊張条件とは衝撃タイミングを知らせず、全身をリラックスした状態で衝撃を負荷するのに対して、筋緊張条件ではあらかじめ、被験者に着座姿勢を保つように筋緊張を指示し、カウントダウンにより開始のタイ

ミングを知らせ、筋緊張した状態で衝撃を与えた。

4.3 結果

今回の実験での代表例を一例供覧する。写真は筋緊張時と非筋緊張時での動きである。側面では非筋緊張状態では筋緊張状態と比較し、頸部は伸張運動を認める(Figure 14)。この挙動は他の2例にも認めた。

筋緊張時



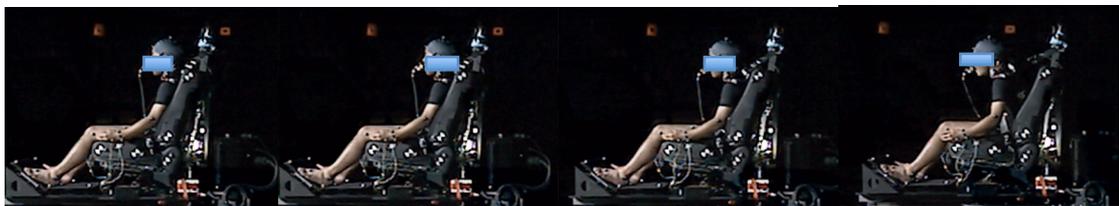
0ms

100ms

300ms

500ms

筋弛緩時



0ms

100ms

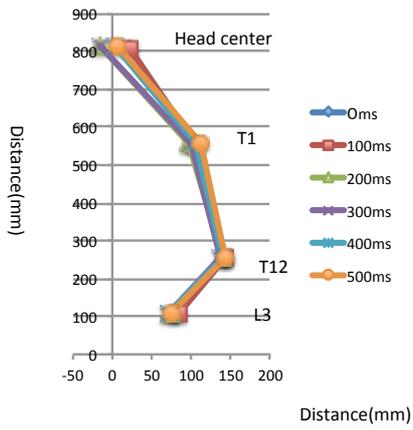
300ms

500ms

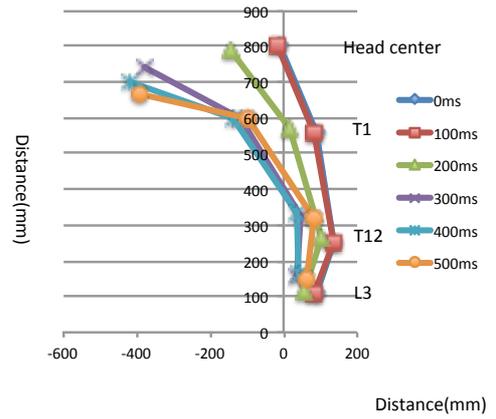
Figure 14

下記の図は代表症例の sagittal 面であり、head top-head center、head center-T1、T1-T12、T12-L3 の各マーカー間を結ぶ線により、頭部と脊柱の動きを模式化している。非緊張状態では筋緊張症例と比較すると T1 と head center では 0-300ms 間よりも 300-500ms 間の移動距離が長い。また、0ms から 500ms の間に T1 では前上方に、head center 下前方に移動している。この動きより頸椎は伸張し、屈曲している事が考えられる。また、非筋緊張群の sagittal 面では T12 が徐々に前上方に移動していることが分かる。これは股関節の屈曲に伴う動きではないかと考えられる。下記の図は代表症例の axial 面であり、head center-T1、T1-right shoulder、T1-left shoulder の各マーカーを結ぶ線により、頭部と体幹の動きを模式化している。非筋緊張状態では頭部の位置はほぼ中心であるのに対して、シートベルトをしていない、左肩は右肩より前方に位置している (Figure 15,16)。

Sagittal

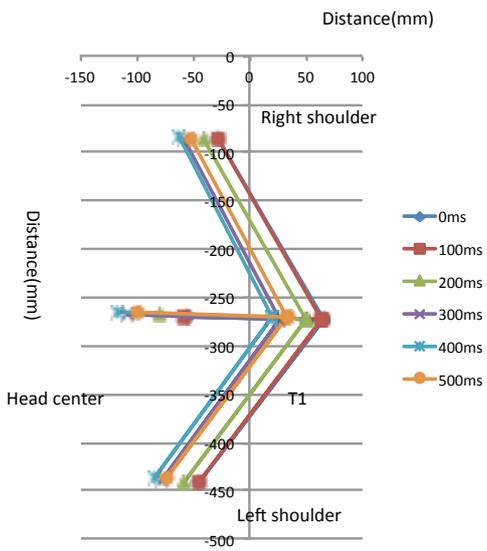


Tense

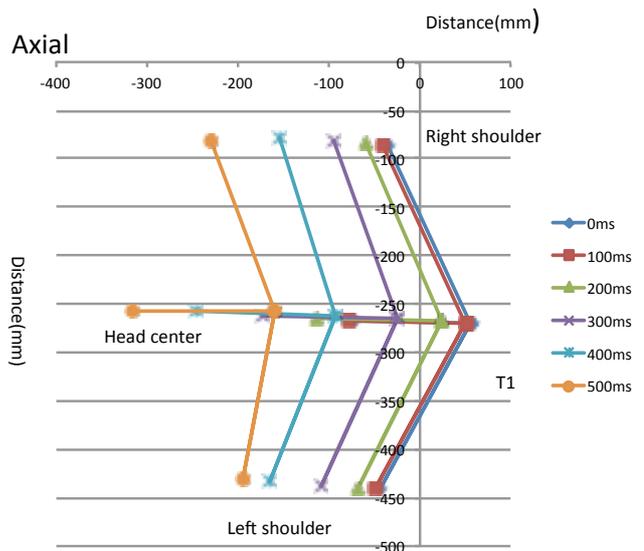


Relax

Figure 15



Tense



Relax

Figure 16

下記のグラフは axial 面での体幹の回旋の角度変化を表したグラフである。1 試技はモーションキャプチャーがうまくできずに、5 試技での比較となった。角度変化量は筋緊張時の平均が 0.2° であったのに対して非筋緊張群では平均 9.856° と大きく、F 検定を行った後、分散が等しくないと仮定した 2 標本による t 検定を用いると $p=0.017$ であった。非筋緊張群と筋緊張群では平均回旋角度で有意差を認めた (Figure 17)。

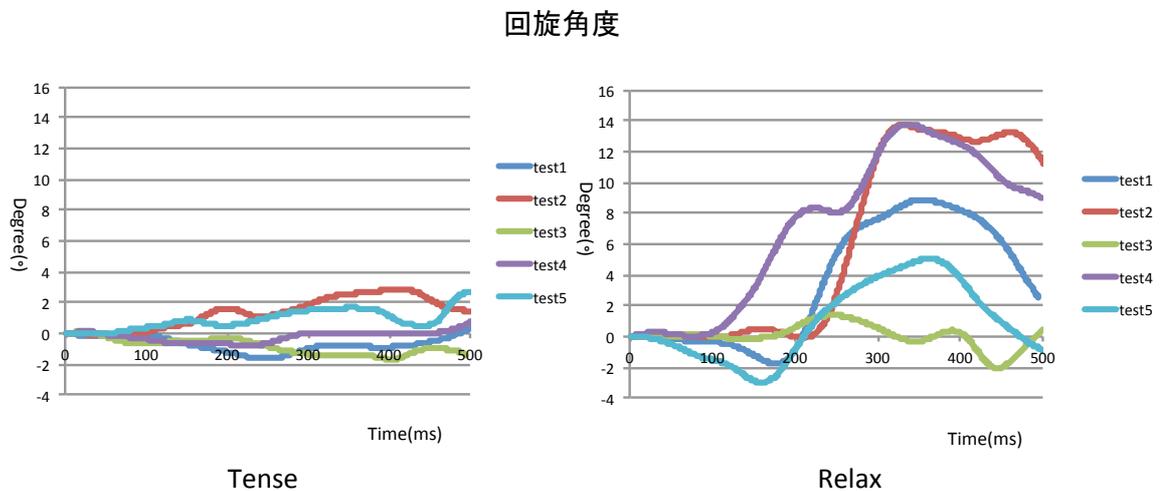


Figure 17

4.3 考察

我々は今回の実験で被験者を用いた前方衝撃直前評価実験を行い、高齢者の認知能力の低下が衝撃時の頸椎挙動に与える影響を評価するために、実験条件を筋緊張群と非筋緊張群に分ける事により、筋反応、頸椎挙動の違いを評価することができた。また、三次元動作解析を sagittal 面と axial 面で行う事により、三次元的な頸椎挙動を観察することができた。

今回の実験で被験者を用いたのは危険が生じていると判断した場合と判断していない場合の姿勢変化を調査するためである。過去にはボランティアとダミーを比較した報告やダミーの動きは筋緊張時の人間の動きと似ているとの報告、被験者とコンピューターを用いたモデルを比較した報告がされている^{61,62}。しかし、危険を察知し筋緊張や回避行動を検討する実験は被験者実験でしか行えないと考え被験者実験を行った。

三次元動作解析では筋緊張群では sagittal 面でも axial 面でも頭部と体幹の位置はほぼ保たれていた。これは AEB が作動した場合でも、危険を認識し筋を緊張すれば着座姿勢を保つことができると推測できる。今回の実験は 8m/s^2 と低速度であったが頸椎挙動は三次元

的に筋弛緩時では筋緊張時よりも大きな頸椎挙動を認めたことより、より大きな加速度が加わる前方衝突時には回旋が増大する可能性や実際の事故時には回旋している状態で衝突している可能性もあると考える。

今回の実験より危険を察知することは頸椎挙動を抑えることができ、筋緊張は頸椎外傷の受傷メカニズムの一つとして重要であることが示された。高齢者では認知能力の低下が知られており、今回の実験で行ったように認知せずに事故を起こすことは筋緊張せずに受傷することにつながり、結果として低速度でも大きな頸椎挙動を生じさせている可能性があると考え。また、運転者に危険を認識させ、反応を促す自動ブレーキの警告音などは運転者の筋緊張を促し、頸椎挙動を小さくすることが見込まれ、今後の高齢者の頸椎外傷の減少を促す可能性があることを示した。

4.4 本研究の限界

今回の実験の限界としては加速度が 8m/s^2 と AEB を模式化した値であり、実際の衝突の際の加速度と比較するとかなり低い値である点。人数が 3 人と小規模である点である。

また、頭部の回旋をより詳細に評価するにはモーションキャプチャーのポイントが少なかったと考える。詳細に頭部の回旋を評価するには頭部の側面にもポイントをおく必要があると考える。

4.5 小括 3

本章では、高齢者の認知能力の低下を模擬した、危険を察知していない場合としている場合の2種類の実験条件で被験者を用いた前方衝突実験を行うことにより、危険を察知していない筋弛緩状態では、衝撃時に三次元的に頸椎挙動は大きくなることを明らかにした。

第5章 有限要素法を用いた、衝突時の 高齢者頸椎挙動解析

5.1 背景

交通事故死傷害における高齢者の割合は、年々増加傾向にあり、頸椎外傷に関しても高齢者の割合は多い。我々の調査では頸椎外傷は60歳台で最も多かった。高齢者で頸椎外傷が生じやすい理由として頸椎の変性や認知能力の低下が考えられている^{33, 34, 35, 36, 37, 51}。前章で認知能力の低下が頸椎挙動に与える影響を被験者実験により明らかにした。

本邦では頸椎変性の頸椎外傷の発症に与える影響は非骨傷性頸髄損傷をテーマに過去に多く研究されている。非骨傷性頸髄損傷とは頸椎外傷の一種であり、明らかな脱臼や椎体骨折がないが、頸髄を損傷することにより、外傷直後に麻痺が生じた症例と定義されている。高齢者で増加しており、今後さらに増加することが予測されている⁵³。

高齢者で非骨傷性頸髄損傷が多い理由としては脊柱管の狭窄と変性に伴う脊椎の不安定性が報告されている^{54, 65, 66}。脊柱管狭窄が非骨

傷性頸髄損傷の発症因子であったという報告がある一方、最狭窄部で頸髄損傷が必ずしも生じないという報告や脊柱管前後径と麻痺重傷度は相関しないという報告もある^{54,65}。変性頸椎の不安定性の特徴としては中下位頸椎（C5/6、C6/7）に椎間板の退行変性に伴う後方膨隆や後方骨棘、あるいは黄色靭帯の肥厚が生じることにより、同部位の可動域制限が怒り、結果として上位頸椎に応力が集中して不安定性が生じることが示唆されている^{57,68}。

非骨傷性頸髄損傷の受傷形態としては過去の報告では伸展外傷で多く発症し、頸椎伸展時に前縦靭帯損傷を損傷し、結果として頸椎の不安定性が生じ頸髄を損傷することがMRIを用いた研究で報告されている^{59,70}。損傷高位としてはC3/4高位で最も多く発症すると報告されており、過伸展力が集中するためと考察されている^{57,68}。

しかし、どのようなメカニズムでC3/4に応力が集中するかについては過去に研究されていない。そこで、我々は中下位椎間板腔の変性（C5/6、C6/7）、および可動域制限を模擬した変性頸椎モデルと正常な頸椎有限要素法（FEM）モデルを用いて頸椎挙動について比較することにより、高齢者の変性した頸椎での応力分布の違いを比較検討した。

5.2 研究概要

5.2.1 使用モデル

頰椎の受傷メカニズムを評価するために、JAMA 人体 FE モデルを用いた。FE モデルとは有限要素法を用いたコンピューター上でシミュレーションを行うモデリング手法の一つであり、構造体の破断点や応力などを解析する研究手法である。JAMA 人体 FE モデルは（社）日本自動車工業会と（財）日本自動車研究所により開発されたモデルである^{71,72}。JAMA 人体 FE モデルは既存の THUMS (株式会社豊田中央研究所, トヨタ自動車株式会社) および H-mode (日本イーエスアイ株式会社) を改良したモデル (株式会社本田技術研究所) を基に、開発された。人体モデルの生体忠実度は人体組織を検討した後、頸部、大腿部、腰部などの部位毎に供試体実験を参照して比較検討をおこない、そして、全身供試体実験から外観挙動や人体に作用する負荷が再現されているか検討されている^{73,74}。

5.2.2 実験条件

実際の交通事故をシミュレーションするために、普通乗用車の前方衝突時を再現した。乗車中の運転手はシートベルトを装着し、衝

突後はエアバックが展開する条件とした。衝突速度は前実験より高齢者で頸椎外傷の死亡上昇率が上昇する 50km/h とした。

5.2.3 頸椎変性モデル

頸椎変性は C5/6、C6/7 に好発し、椎間板の退行変性に伴う後方膨隆や後方骨棘、あるいは黄色靭帯の肥厚により可動域の低下が出現するとされている^{57,68}。頸椎変性を模式したモデルとして、椎間板が変性し、可動域が消失したモデルを作成した。C5/6、C6/7 の椎間板及び、靭帯の物質特性を変化させ、C5、6、7 を一塊とすることにより、変性頸椎を模式した。

5.2.4 評価項目

前方衝突時の頸椎前縦靭帯（C2/3、C3/4、C4/5）にかかるひずみを評価した。また、正常モデルと頸椎変性モデルでのひずみを比較検討した。

5.3 結果

頌椎変性モデルでの前縦靱帯のひずみは C2/3、C3/4、C4/5 で比較すると最大値は C2/3 で 0.07、C3/4 で 0.09、C4/5 で 0.06 と C3/4 で最大となった (Figure 18、19、20)。最大となった 67msec 時は前方衝突し、エアバックが展開し、頭部が接触し、頌椎が伸展するタイミングであった (Figure 21)。ひずみが最大となったポイントは C3/4 では正常モデルでは 0.02 であったのに対して、変性モデルでは 0.09 と約 4.5 倍のひずみが生じていた。

C2/3 前縦靱帯 正中

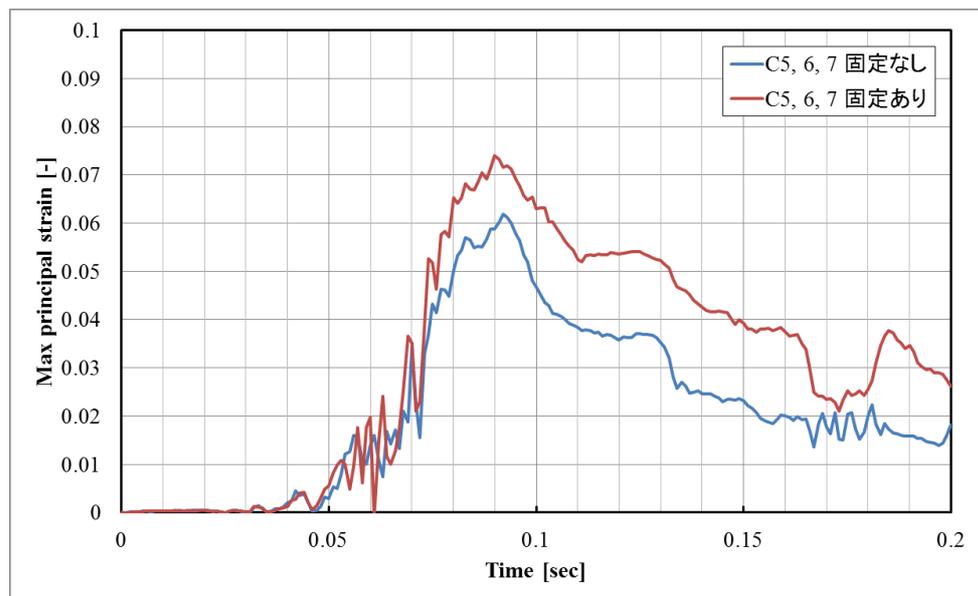


Figure 18

C3/4 前縦靱帯 正中

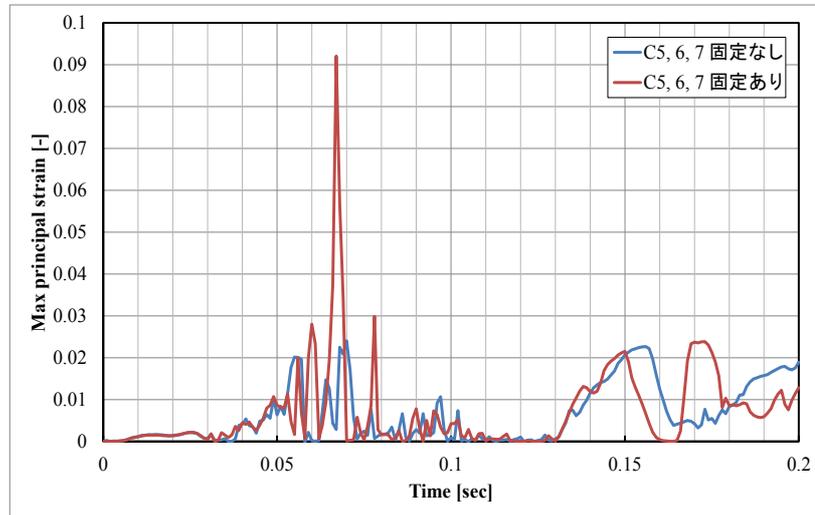


Figure 19

C4/5 前縦靱帯 正中

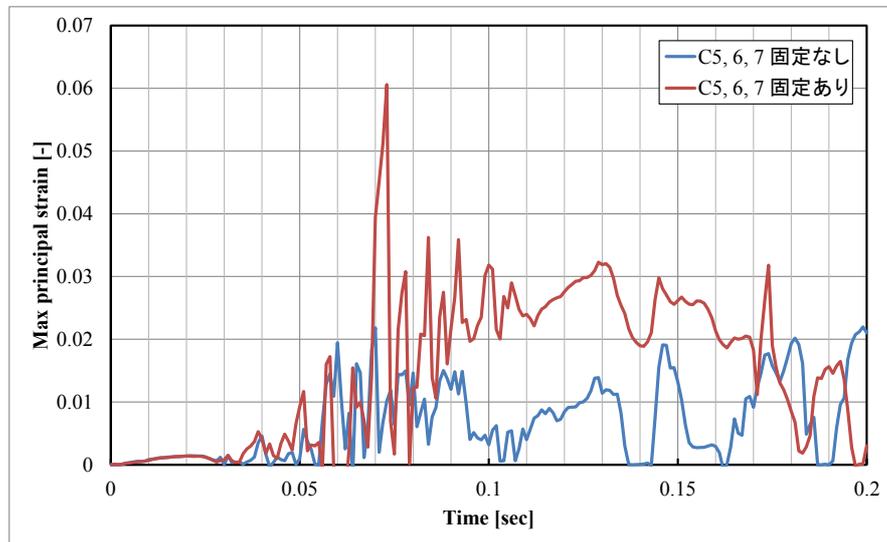


Figure 20

最大ひずみの差が大きい瞬間 (67msec)

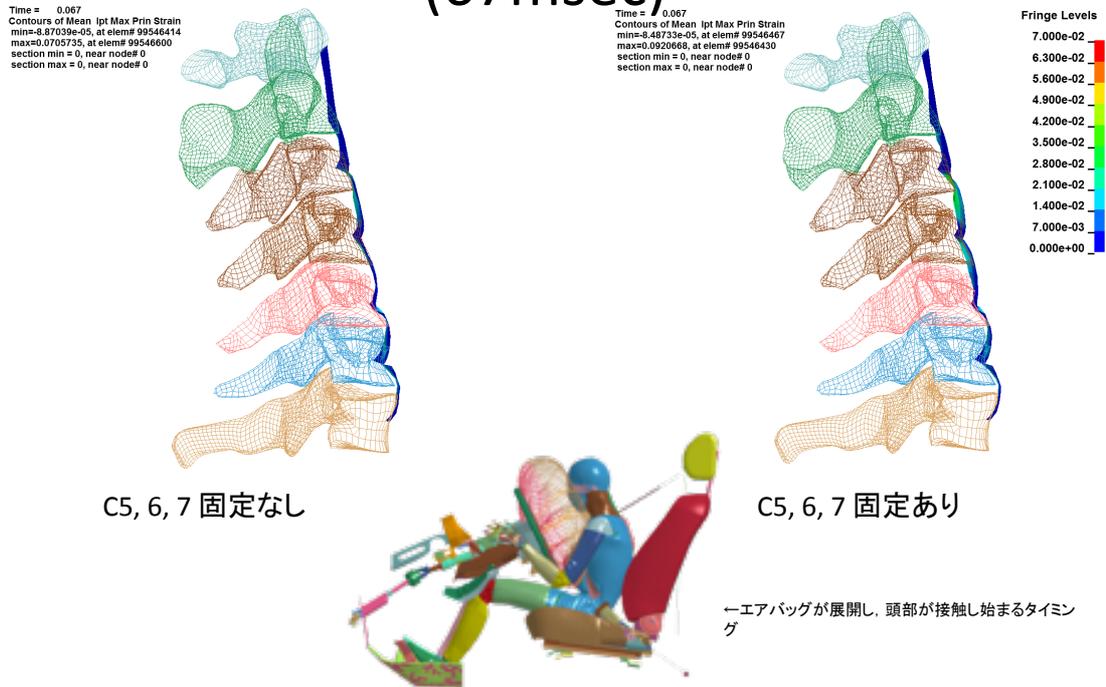


Figure 21

5.4 考察

今回の実験より頸椎が変性し、下位頸椎の可動域が減少すると伸展時に前縦靱帯のひずみは C3/4 で最大であることが明らかとなった。

過去の報告では非骨傷性頸髄損傷の損傷高位としては C3/4 で最も多く発症する理由として、不安定性が重要なメカニズムなのではないかと近年、報告されている^{54, 65, 75}。C3/4 に不安定性が出現する理由としては年齢とともに下位頸椎の椎間板が変性し、可動域が低下

することにより、不安定性が出現するためではないかと考えられている^{57,68}。

我々の実験でも C5/6、C6/7 を変性させて可動域を消失させたモデルは正常モデルと比較すると、C3/4 前縦靭帯に加わっていたひずみは約 4.5 倍に増加することが明らかとなった。この結果より、C3/4 前縦靭帯に頸椎が伸展するとひずみが加わりやすく、下位頸椎が変性していると更にひずみ加わること示唆している。これは頸椎の構造上、軽度の前弯があり、胸椎には肋骨組織があり、C1/2、頭蓋骨は解剖学的に異なった組織構造であることより、C3/4 に応力集中が起こっている可能性があると考ええる。C3/4 にひずみ加わりやすくなることにより、結果として前縦靭帯の損傷が起こるのではないかと考察する。

我々の実験では前方に衝突し、頭部が前方に移動し、エアバックに衝突し、頸椎が伸展する挙動の直後に C3/4 で最大のひずみを観察した。これは過去の報告で頸椎の伸展が非骨傷性頸髄損傷の受傷機転であると報告されているように、頸椎が伸展することにより前縦靭帯にひずみ加わるためと考察する^{59,70}。

今回の実験から、高齢者の変性した頸椎ではひずみ加わりやす

く、頸椎外傷のリスクが高まることが明らかとなった。今後、高齢者の頸椎外傷を減少させていくためには、頸椎の検診などにより、変性頸椎を早期発見し、頸椎外傷のリスクがあることを啓蒙するなどの予防教育や高齢者をシミュレーションした自動車の安全メカニズムの更なる発達などが必要になるのではないかと考える。

5.5 本研究の限界

今回の実験の限界としてはコンピューターモデルを用いた実験であり、実際の挙動と異なる可能性がある。今回は下位頸椎の可動域の低下をシミュレーションしたが、狭窄など他の要素の影響は考慮されていない。

5.6 小括 4

本章では、前方衝突時の頸椎挙動を正常モデルと頸椎変性モデルでのひずみを比較し、変性頸椎では C3/4 へのひずみを最も高く計測した。この結果は疫学調査と同様の結果であり、頸椎の変性は頸椎外傷のリスクであることが明らかとなった。

第 6 章 総括

6.1 総括

本研究では、頸椎外傷の本邦における疫学調査、被験者実験、コンピュータモデルを用いた実験を行うことにより、近年、問題となっている高齢者の頸椎外傷を多方面より研究した。

外傷データベースを用いた疫学調査では頸椎外傷は 60 歳台での受傷が最も多く、一峰性の年齢分布であり、転落、交通事故での受傷機転が大半であることが明らかとなり、高齢者の交通事故による頸椎外傷は重大な社会問題であることが明らかとなった。また、70 歳以上の頸椎外傷の死亡率は有意差をもって、70 歳以下よりも高く、高齢者の頸椎外傷は医学的にも今後、取り組むべき課題である。

ITARDA データを用いた、疫学調査では 60km/h 以上の衝突速度で最も死亡重傷率は高く、40km/h 以上の前方衝突で頸椎外傷は 60 歳以上で有意差をもって、60 歳未満よりも死亡重傷率が上昇することが明らかとなり、高齢者では若年者よりも小さな外力でも頸椎外傷を発症することが明らかとなった。

被験者を用いた実験では、高齢者の認知能力の低下を模擬した、

危険を察知している場合としていない場合と2種類の実験条件で前方衝突実験を行うことにより、認知能力の低下を模擬した、危険を察知せずに筋弛緩状態で衝撃が加わった条件では三次元的に頸椎挙動は大きくなることを明らかにした。このことは認知能力が低下する高齢者では頸椎挙動は衝撃時に大きくなりやすく、頸椎外傷が生じやすくなると考えられる。

コンピューターモデルを用いた実験では、前方衝突時の頸椎挙動を正常モデルと頸椎変性モデルでひずみを比較し、変性頸椎ではC3/4へのひずみを最も高く計測した。この結果は過去の疫学調査と同様の結果であり、頸椎の変性は頸椎外傷のリスクであることが明らかとなった。

本研究により、高齢者の認知能力の低下、頸椎の変性によって、高齢者では軽微な外傷で頸椎外傷を生じることが明らかになり、その結果、本邦では高齢者の頸椎外傷が増加していることが明らかとなった。また、高齢者の頸椎外傷は死亡率が高いことが明らかになったことより、今後も継続して、取り組むべき疾患である。

6.2 本研究の限界と今後への展望

本研究の最終的な目的は高齢者の頸椎外傷を予防し、減少させることである。第4章の被験者実験で示したように危険を認識することで頸椎挙動を抑制することができた。これは運転者に警告音などで危険の認識を促す自動ブレーキを用いることにより、頸椎挙動は抑制する可能性があると考えた。また、第3章の衝突速度の疫学調査では40km/hの衝突では高齢者の頸椎外傷の死亡重傷率は高くはないことが明らかとなった。第5章のコンピューターモデルでは下位の変性頸椎の存在はひずみの上昇を生むことが明らかとなった。

これらの結果は今後の予防に有用な情報であると考えられる。健診などで、変性頸椎のチェックをすることにより、注意喚起をすること、高齢者への自動ブレーキのより一層の普及が高齢者の頸椎外傷の減少に有用ではないかと本研究より考えられる。

本研究の限界としては高齢者の特性が複雑であることである。本研究では過去に報告されている、頸椎の変性と認知能力の低下を取り上げ実験をおこなったが、視力や脊柱管の狭窄、合併症の存在など、様々な要因により、高齢者で頸椎外傷が増加している可能性があると考えられる。

用語集

頸椎外傷

頸椎外傷は頸椎骨折、頸椎脱臼、頸椎脱臼骨折、頸髄損傷の総称であり10万人辺り19-88人発生すると報告されている。頸椎外傷は脊椎外傷の19-51%であり、受傷機転はほぼ転落か交通事故であるとされている。

日本外傷データバンク

日本外傷データバンク（JTDB）は、外傷研究の促進を目的にした本邦初の外傷データベースであり、救急救命センターが中心となり、現在223施設が加盟している。登録施設では外傷症例をAbbreviated Injury Score(AIS)を用いて、登録されている。

AIS

AISとは1971年に米国自動車医学振興協会により自動車事故に関する大規模なデータベースとして利用することを目的に開発された外傷の種類と解剖学的重症度を表すコード体系でスコアリングシステム

ムである。7桁の数値により表され、解剖学的部位、損傷の分類、損傷レベル、傷害度を分類している。

ITARDA

公益財団法人交通事故総合分析センター Institute for Traffic Accident Research and Data Analysis (ITARDA) は交通事故に関する調査分析研究を行なっている組織である。警察庁交通局の協力のもと、交通事故統計を収集及び、公表を行なっている。統計データとして、事故内容、事故類型、道路種別、天候、時間帯、疑似衝突速度、シートベルト、エアバックの有無など約80項目を集計しており、交通事故集計ツールを用いて利用可能である。

疑似衝突速度

疑似衝突速度とは衝突の大きさを示す指標として、衝突前後の車両の速度変化を表した数値である。車両相互の正面衝突事故の場合は、自車の重量を $M1$ 、危険認知速度を $V1$ 、相手車の重量を $M2$ 、危険認知速度を $V2$ とした時に疑似衝突速度は $(M2/M1+M2) \times (V1+V2)$ で表せる。

非骨傷性頸髄損傷

非骨傷性頸髄損傷とは頸椎外傷の一種であり、明らかな脱臼や椎体骨折がないが、頸髄を損傷することにより、外傷直後に麻痺が生じた症例と定義されている。高齢者で増加しており、今後さらに増加することが予測されている。

FEモデル

FEモデルとは有限要素法を用いたコンピューター上でシミュレーションを行うモデリング手法の一つであり、構造体の破断点や応力などを解析する研究手法である。

引用文献

1. Hasler RM , Exadaktylos AK , Bouamra O , et al. Epidemiology and predictors of cervical spine injury in adult major trauma patients: A multicenter cohort study . J Trauma Acute Care Surg ;2012 :72 . 975 – 81 .
2. Lenehan B , Boran S , Street J , et al. Demographics of acute admissions to a National Spinal Injuries Unit . Eur Spine J ;2009 : 18 .938 – 42
3. Chu D , Lee YH , Lin CH , et al. Prevalence of associated injuries of spinal trauma and their effect on medical utilization among hospitalized adult subjects—a nationwide data-based study . BMC HealthServ Res 2009 ; 9 .137
4. Holly LT, Kelly DF, Lounells GH et al.: Cervical Spine Trauma Associated with Moderate and Severe Head Injury: incidence, risk factors, and injury characteristics. J Neurosurg .2002; 96: 285-91
5. Fancher TT, Król E, Rasmussen RW, Panait L. Cervical spine injuries; an outcome analysisPol Przegl Chir. 2011 Nov;83:583-7

6. 吉松弘喜、吉田健治、神保幸太郎、他：救急外来における高齢者
頸椎外傷の検討.整形外科と災害外科.2010;59(1):33-35
7. 内閣府.平成25年交通安全白書.2015
8. 警察庁交通局.平成24年中の交通事故発生状況.2014
9. 厚労省.平成26年高齢化白書.2015
10. 総務省統計局.日本の統計2015.2015
11. 警察庁.警察庁交通局.平成25年中の交通事故発生状況.2015
12. Kaneoka K, Ono K, Inami S, et al. Motion analysis of cervical
vertebrae during whiplash loading. Spine 1999; 24: 763-770
13. Ono K, Kaneoka K. Motion analysis of human cervical vertebrae
during low-speed rear-impacts by the simulated sled. J. Crash
Prevention and Injury Control 1999; 1: 87-99
14. Chen HB, Yang KH, Wang ZG. Biomechanics of whiplash injury.
Chin J Traumatol. 2009; 12(5): 305-14
15. Pearson AM, Ivancic PC, Ito S, et al. Facet joint kinematics and
injury mechanisms during simulated whiplash. Spine 2004; 29(4):
390-7

16. Stemper BD, Yoganandan N, Pintar FA. Gender- and region-dependent local facet joint kinematics in rear impact: implications in whiplash injury. *Spine* 2004; 29(16): 1764-71
17. Yoganandan N, Pintar FA, Klienberger M. Cervical spine vertebral and facet joint kinematics under whiplash. *J Biomech Eng.* 1998; 120: 305-7
18. Tencer AF, Huber P, Mirza SK. A comparison of biomechanical mechanisms of whiplash injury from rear impacts. *Annu Proc Assoc Adv Automot Med.* 2003; 47: 383-98
19. Ejima,S.,Ono,K.,Kaneoka,K.,et al. A study on occupant kinematic behavior and muscle activity during pre-impact braking based on volunteer tests .*Proceeding of IRCOBI conference,2007 :31-45*
20. Beeman ,SM.,Kemper,AR.,Madigan,MI.,et al. Occupant kinematics in low-speed frontal sled tests:Human volunteers,Hybrid I I I ATD,and PMHS.*Accident Analysis and Prevention;2102: 47.128-139*
21. 松井靖浩， 関根道明， 萩田賢司他． 死傷事故低減に向けた高齢歩行者における行動特性の究明と対策について．平成 24 年度タカタ財団助成研究論文．2014

22. 三原久範, 大成克弘, 蜂谷將史他. 高齢 (65 歳以上) 発症頸髄症の臨床及び X 線学的検討. 日脊椎外会誌. 1998;9:425-431
23. 鷺見正敏, 片岡治, 澤村悟他. 頸椎症性脊髄症の X 線学的病態解析. 臨整外. 1998;33:1277-1286
24. Owsley K. Ball M. Sloane D, et al. Visual/cognitive correlates of vehicle accidents in older drivers. *Psychology and Aging*. 1991;6:403-415
25. 内閣府.平成25年交通安全フォーラムの開催結果について.2013
26. Choi HY, Sah SJ, Lee B, et al., Experimental and numerical studies of muscular activations of bracing occupant, *19th International Technical Conference on the Enhanced Safety Vehicles*, Paper No. 05-0139, 2005
27. Pull TGA , Skolasky RL , Cohen DB . Fracture characteristics predict patient mortality after blunt force cervical trauma . *Eur J Emerg Med* .2010 ; 17 : 107 – 9 , 126-7
28. Torretti JA, Sengupta DK. Cervical spine trauma. *Indian J Orthop* .2007;41:255-67

29. Ersmark H, Dalen N, Kalen R. Cervical spine injuries: A follow-up of 332 patients. *Paraplegia* .1990;28:25-40
30. Gerrelts BD, Petersen EU, Mabry J, Petersen SR. Delayed diagnosis of cervical spine injuries. *J Trauma* .1991;31:1622-6
31. 新宮彦助：日本における脊髄損傷疫学調査第 3 報. *日本パラプレジア医学会誌*. 1995; 8:26-27
32. 柴崎啓一：全国脊髄損傷登録統計 2002 年 1 月～ 12 月, *日本脊髄障害医学会雑誌*. 2005;18(1), 271- 274
33. Lowery DW , Wald MM , Browne BJ , et al. Epidemiology of cervical spine injury victims . *Ann Emerg Med* .2001 ; 38 : 12 – 6
34. Spivak JM, Weiss MA, Cotler JM, Call M. Cervical spine injuries in patients 65 and older. *Spine* .1994;19:2302-6
35. Wang H, Coppola M, Robinson RD, et al. Geriatric trauma patients with cervical spine fractures due to ground levels fall: five years experience in a level one trauma center. *J Clin Med Res* .2013;5:75-83
36. Lieberman IH , Webb JK . Cervical spine injuries in the elderly .*J Bone Joint Surg Br* .1994 ; 76 : 877 – 81

37. Watanabe M , Sakai D, Yamamoto Y. Analysis of predisposing factors in elderly people with Type II odontoid fracture. Spine J. 2014 Jun 1;14(6):861-6
38. Golob JF Jr., Claridge JA, Yowler CJ, Como JJ, Peerless JR. Isolated cervical spine fracture in the elderly: a deadly injury. J Trauma .2008;64:311-5
39. Harris MB, Reichmann WM, Bono CM, et al. Mortality in elderly patients after cervical fractures. J Bone Joint Surg Am .2010;92:567-74
40. Damadi AA, Saxe AW, Fath JJ, Apelgren KN. Cervical spine fractures in patients 65 years or older: a 3-year experience at a level I trauma center. J Trauma .2008;64:745-8
41. Hagen EM, Aarli JA, Gronning M. The clinical significance of spinal cord injuries in patients older than 60 years of age. Acta Neurol Scand .2005;112:42-7
42. Dan Xing , Jie Wang , DongHui Song .Predictors for Mortality in Elderly Patients With Cervical Spine Injury .SPINE ;38(9): 770–777

43. 小関一英, 益子邦洋, 坂本哲也, 他: Trauma Registry 検討委員会
活動と今後の展望. 日外傷会誌. 2004; 18: 394-9
44. Committee on Medical Aspects of Automotive Safety. Rating the
severity of tissue damage: The abbreviated scale. JAMA. 1971; 215:
277-280
45. 日本外傷学会 日本外傷データベース報告2013.2013
46. 高橋功、北原孝雄、遠藤昌孝、他：急性期頸椎、頸髄損傷におけ
る治療上の問題点-多発外傷例、合併症出現例についての検討.脊
椎脊髄.1999;12:371-6
47. Olerud C , Andersson S , Svensson B , et al. Cervical spine fractures
in the elderly: factors influencing survival in 65 cases . Acta Orthop
Scand .1999 ; 70 : 509 – 13
48. Platzer P , Thalhammer G , Oberleitner G , et al. Surgical treatment of
dens fractures in elderly patients . J Bone Joint Surg Am .2007 ; 89 :
1716 – 22
49. 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108.
2014

50. 交通事故総合分析センター.前面及び後面衝突事故の衝突速度、 ΔV の推定精度向上に関する研究.2012
51. 三村將：高齢者の運転能力評価.老年精神医学雑誌.2005;16(7) : 792-801
52. Accident Analysis Report (JAPAN).2007.Institute for Traffic Accident Ewswarch avd Data Analysis(ITARDA)
53. Grover,C.,Knight,I.,Okoro,F.,et al.,2013. Automated Emergency Braking Systems: Technical requirements, costs and benefits. Transport Research & Development.39-44
54. Carlsson,S.,Davidsson,J.,2011,Volunteer occupant kinematics during driver initiated and autonomous braking when driving in teal traffic environments.Proceeding of IRCOBI conference.125-136
55. Mages,M.,Seyffert,M.,2011. Analysis of the pre-crash benefit of reversible belt pre-pretensioning in different accident scenarios.22nd International Technical Conference on the Enhanced Safety Vehicles11.442
56. Ejima,S.,Ono,K.,Kaneoka,K.,et al.,2007.A study on occupant

- kinematic behavior and muscle activity during pre-impact braking based on volunteer tests .Proceeding of IRCOBI conference,31-45
57. Ejima,S.,Zama,Y.,Ono,K.,et al.,2009.Prediction of pre-impact occupant kinematic behavior based on the muscle activity during frontal collision.21st International Technical Conference on the Enhanced Safety Vehicles 9,193
58. Beeman ,SM.,Kemper,AR.,Madigan,MI.,et al.,2012.Occupant kinematics in low-speed frontal sled tests:Human volunteers,Hybrid I I I ATD,and PMHS.Accident Analysis and Prevention 47.128-139
59. Ivancic,P.,Pearson,A.,Tominaga,Y.,et al.,2008.Biomechanics of Cervical Facet Dislocation.Taffic Injury Prevention 9,606-611
60. Nadeau,M.,Maclachlin,SD.,Bulley,S.,Bailey,SI.,et al.,2012.A Biomechanical Assesment of Soft Tissue Damage in the Cervical Spine Felloe Unilateral Injury .J Bone joint Surg Am 94,e156(1-6)
61. Kallieris,D., Mattern,R.,Wismans,J.1989.Stress and kinematic analysis of the head and neck in frontal collision. A comparison of voluntary probands and postmortem human test cadavers.Beitr Gerichtl Med.47.235-241.

62. Choi, H.Y., Sah, S.J., Lee, B., et al., 2005. Experimental and numerical studies of muscular activations of bracing occupant. 19th International Technical Conference on the Enhanced Safety Vehicles 5, 139
63. 坂井宏旭、植田尊善、芝啓一郎、他：福岡県における脊髄損傷の疫学調査. Bone joint Nerve 2011(1)475-480
64. Maeda T, Ueta T, Mori E, et al : Soft tissue damage and segmental instability in adult patients with cervical spinal cord injury without major bone injury. Spine 2012 37(25)1560-66
65. 玉置康之、百名克文、打越顕、他：非骨症性頸髄損傷における麻痺重症度の検討 J. spine Res 2014 (5)178-181
66. Kato H, Kimura A, Sasaki R, et al : Cervical spinal cord injury without bone injury : A multicenter retrospective study of emergency and critical care center in Japan . J trauma 2008 ;65:373-379
67. 頰椎症性脊髄症ガイドライン 日本整形外科学会
68. Teraguchi M et al: Prevalence and distribution of intervertebral disc degeneration over the entire spine in a population-based cohort: the Wakayama Spine Study. Osteoarthritis Cartilage 2014 22(1)104-10

69. Regenbogen VS , Rogers LF , Atlas SW , et al.:Cervical spinal cord injuries in patients with cervical spondylosis . AJR Am J Roentgenol .1986 ; 146 : 277 – 84 .
70. Koyanagi I , Iwasaki Y , Hida K , et al: Acute cervical cord injury without fracture or dislocation of the spinal column . J Neurosurg .2000 ; 93 : 15 – 20
71. Zama, Y., et al.: Development of finite element human model for assessment of injuries in front impact, JSAE 2010
72. Sugimoto T ,Yamazaki K :First result form the JAMA human body model project,19th internationall Technical Conference on the Enhanced Safety Vehicles ,Washinton 2005
73. Yamada H Strength of biological materials (1973)
Wilkiams&Wilkins Co
74. Shaw CG, Parent DP, Puresezov DJ et al: Frontal impact PMHS sled tests for FE torso model development . Proceeding of 2009 IRCOBI Conference 2009
75. 尾原裕康、水野順一、中川洋、他：後縦靱帯骨化症を伴う頸髓損傷症例の検討.Spinal Surgery 2005;19:111-117

謝辞

本論文の作成にあたり、御指導、御校閲を賜りました山崎正志教授、西野衆文講師に心から感謝いたします。

また、御指導、御助言を賜りました筑波学園病院の坂根正孝博士、早稲田大学スポーツ科学学術院の金岡恒治教授、いちほら病院の福島真博士、守谷第一病院の椎名逸雄博士に深く感謝いたします。

更に、画像解析・データ分析に関して多大な御協力いただいた(財)日本自動車研究所の伊藤大輔研究員、江島晋研究員をはじめとする皆様に感謝いたします。

最後に、本研究の主旨を理解し研究に御協力いただいた志願者の方々に感謝いたします。

参 考 论 文