

2023年11月22日

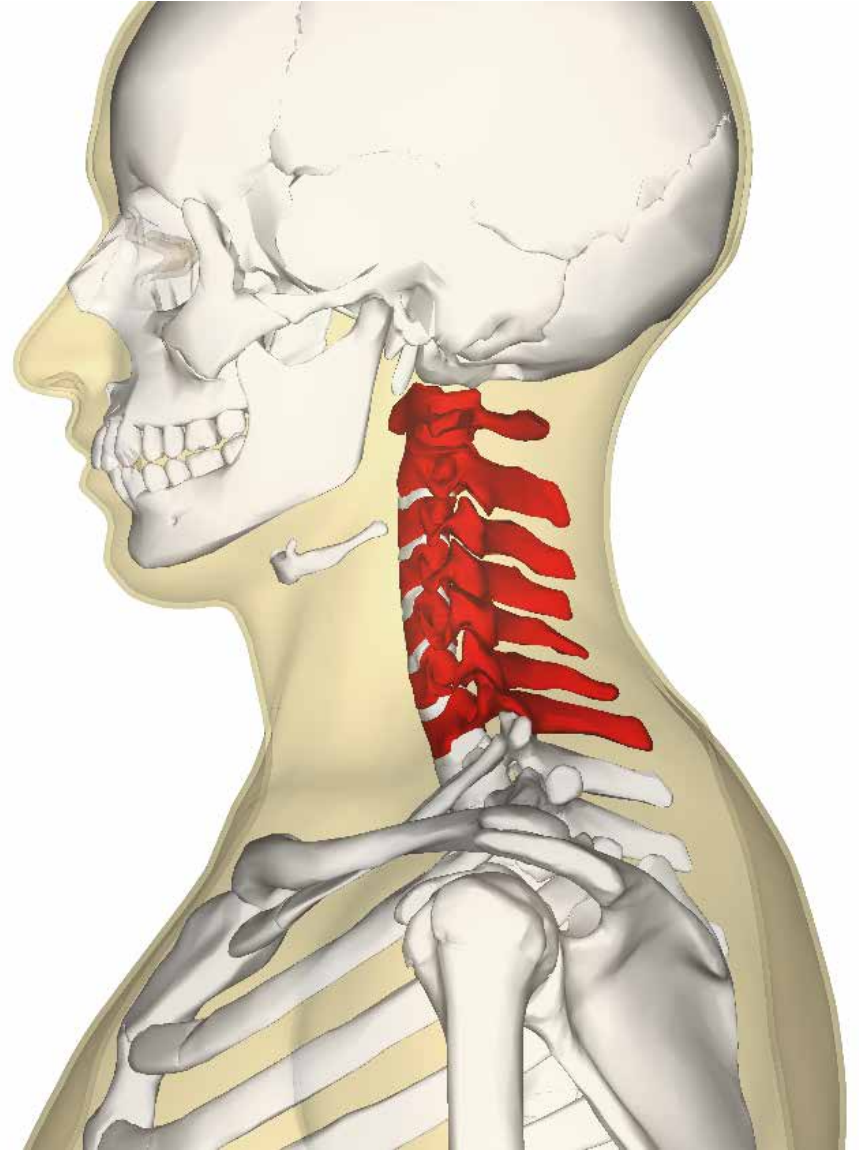
第5回産学官研修会

むちうち症の生体力学的考察

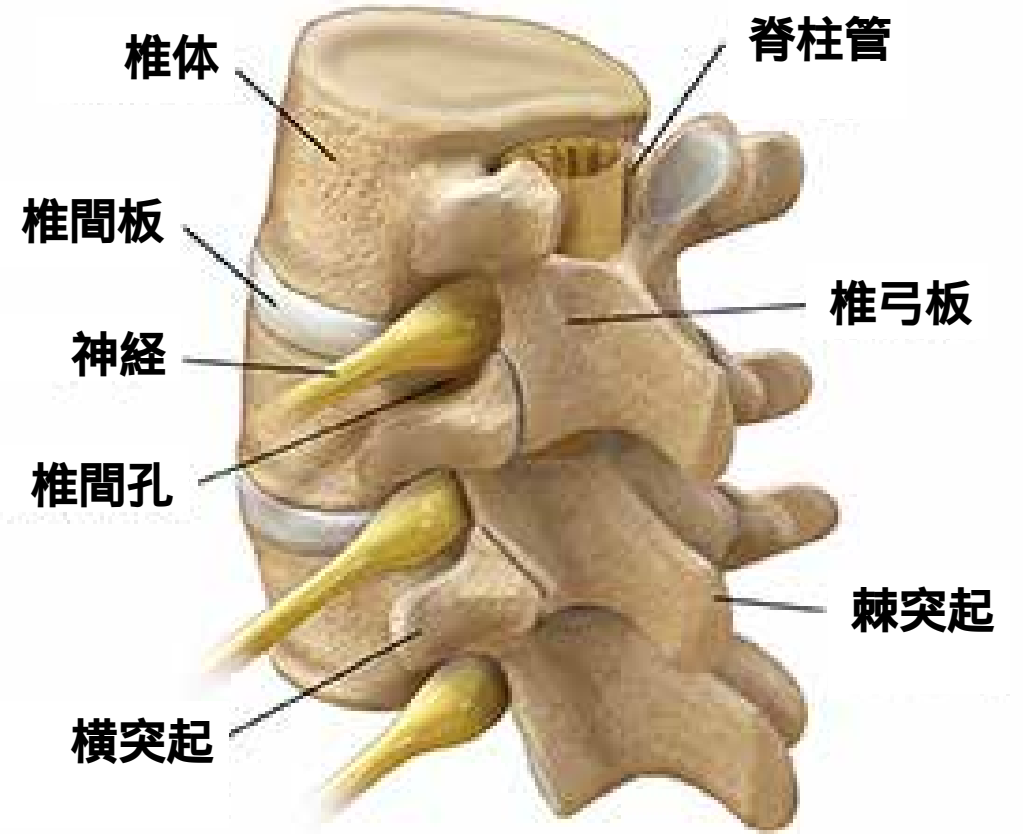
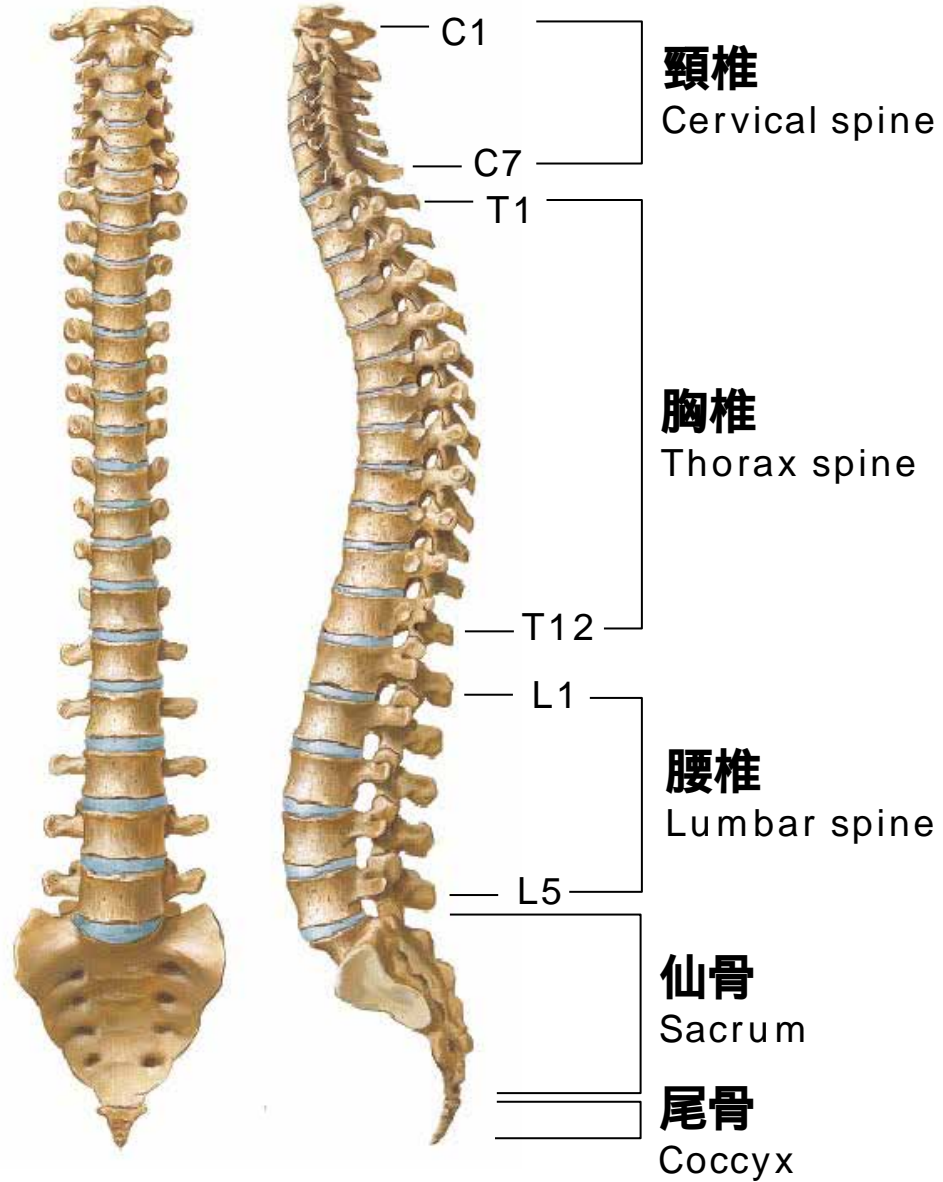
—新しい着眼点を踏まえた再整理—

名古屋大学 水野 幸治

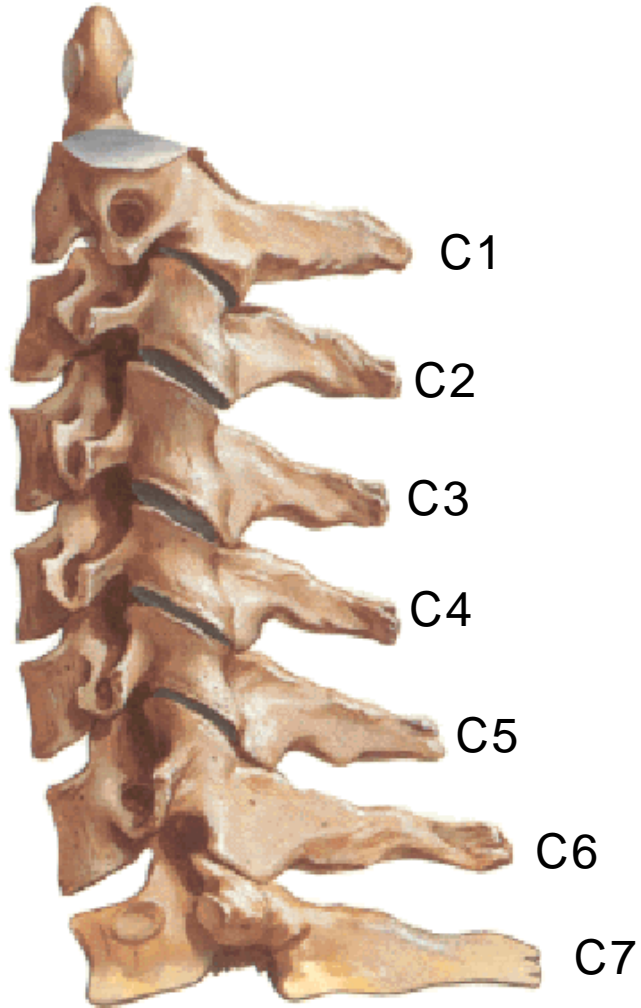
頸部の解剖学



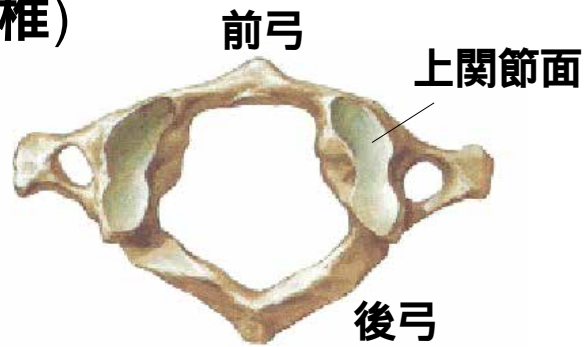
脊椎



頸椎



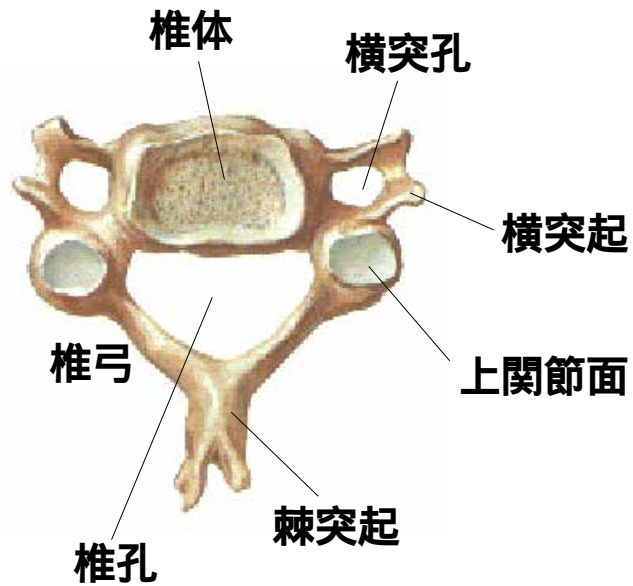
C1 (環椎)



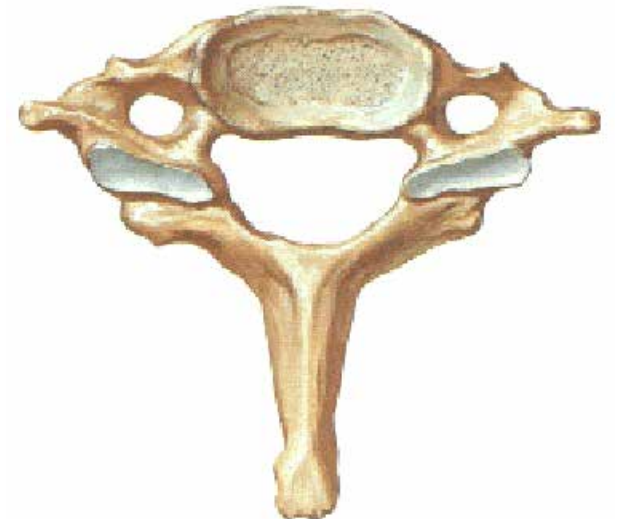
C2 (軸椎)



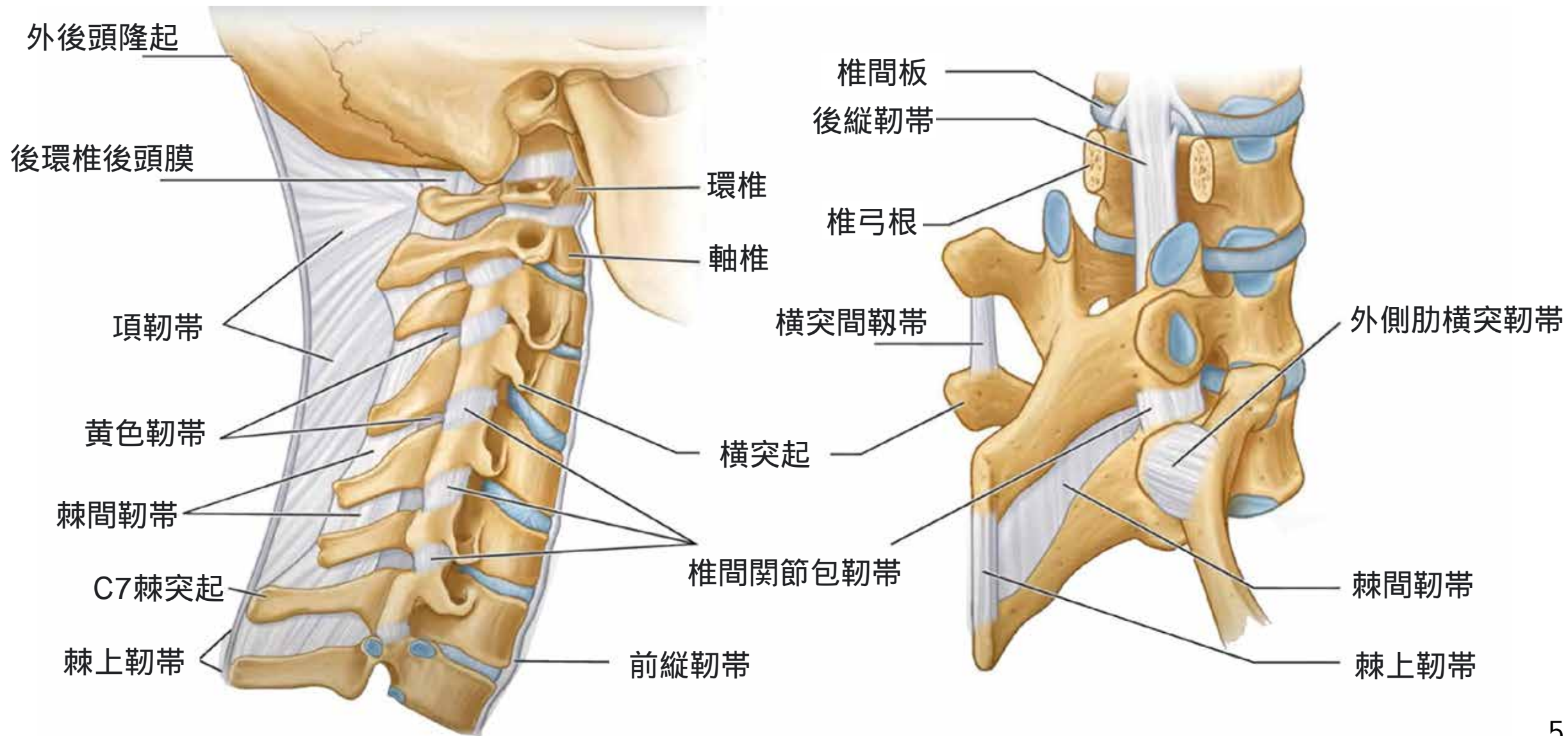
C4



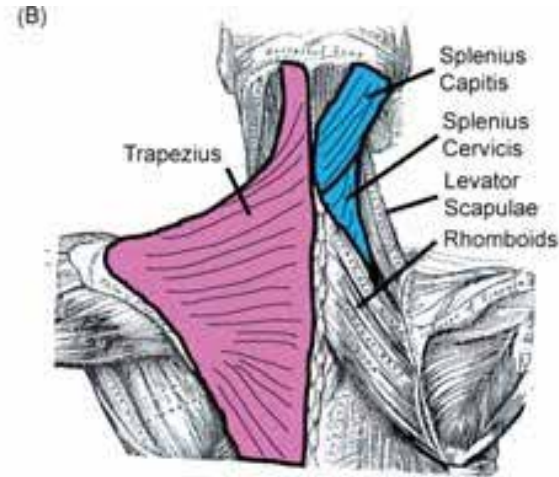
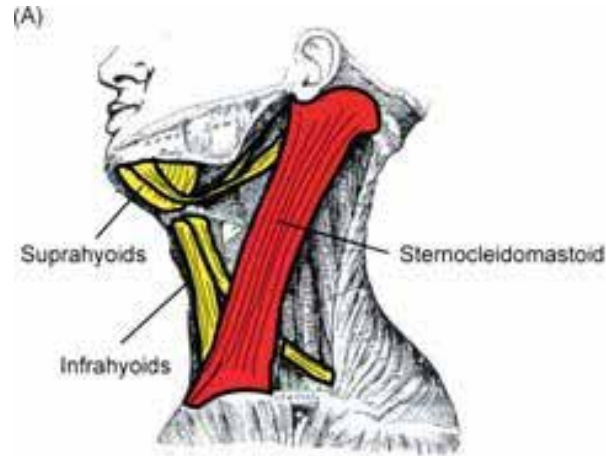
C7 (隆椎)



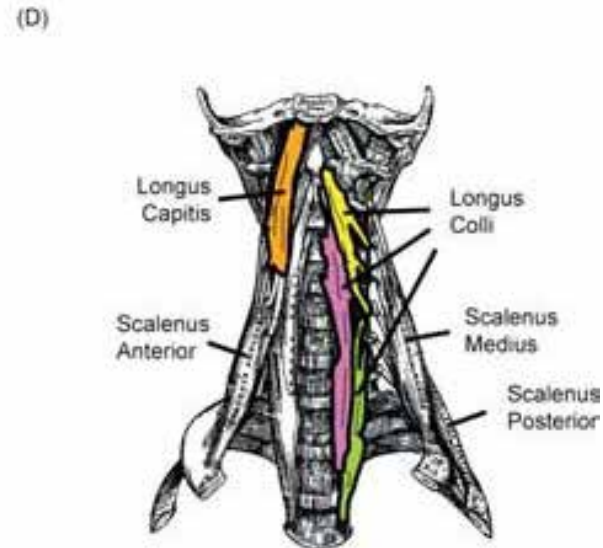
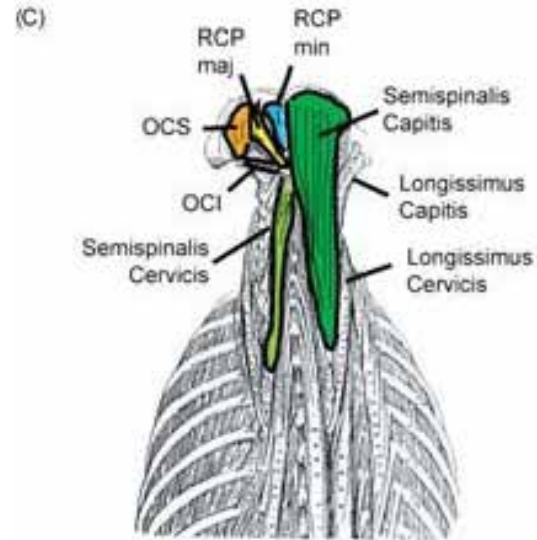
韌帶



筋



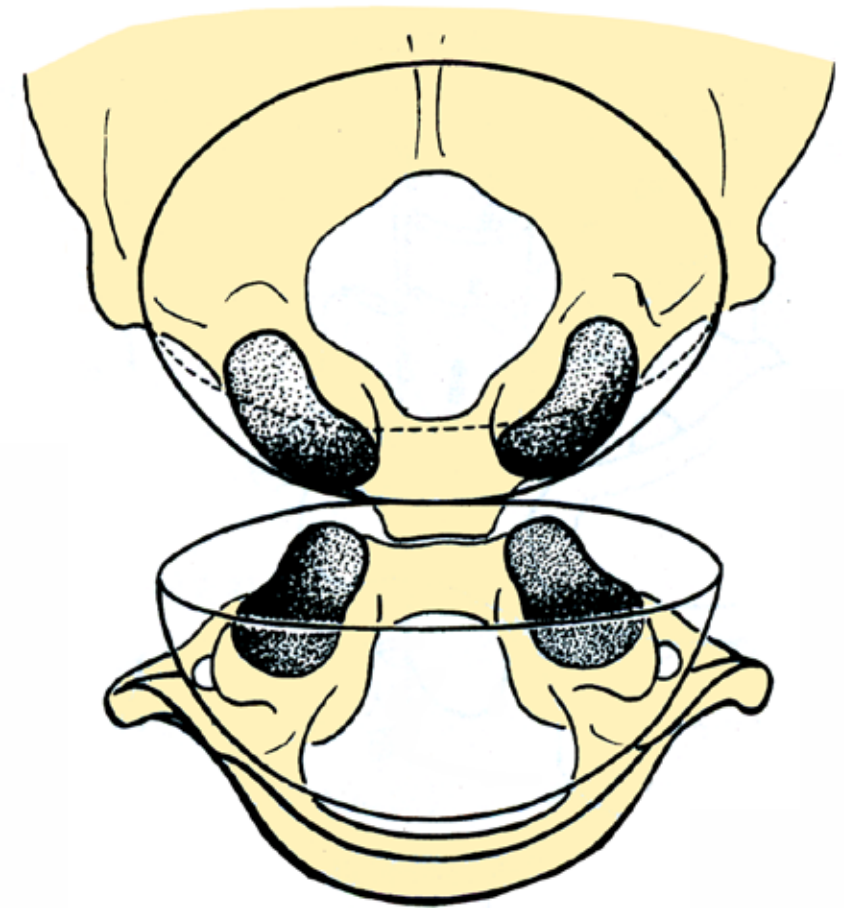
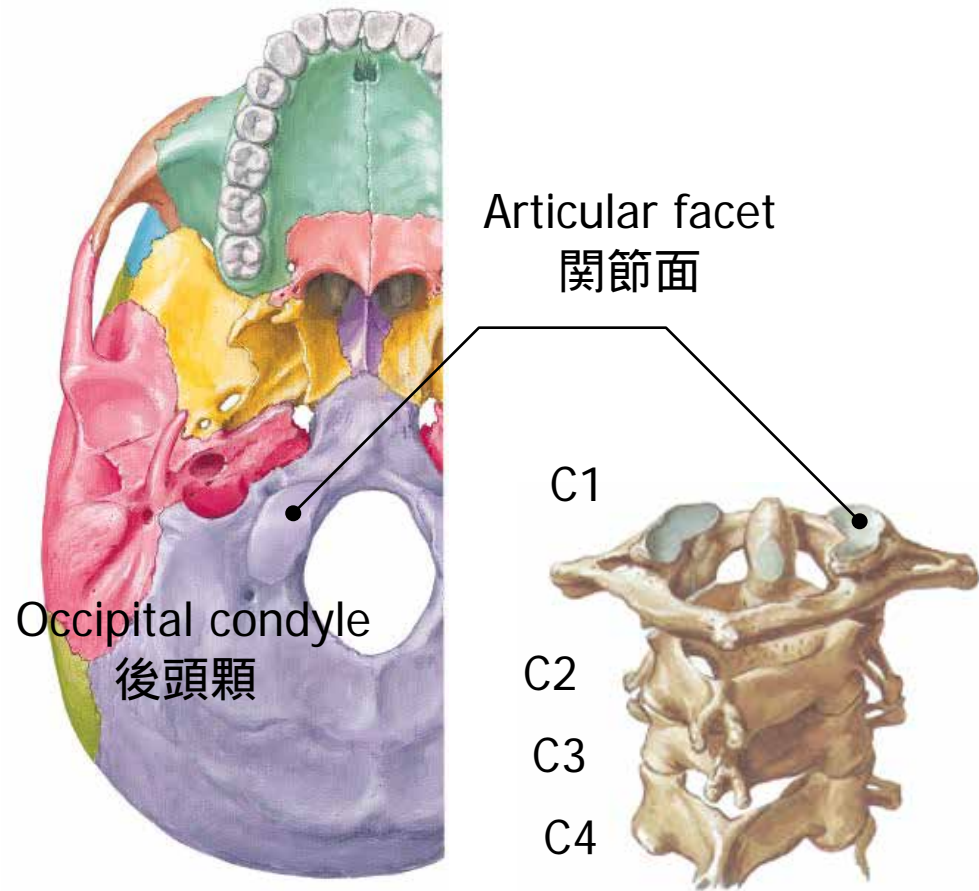
表層筋 (superficial muscle)



深層筋 (deep muscle)

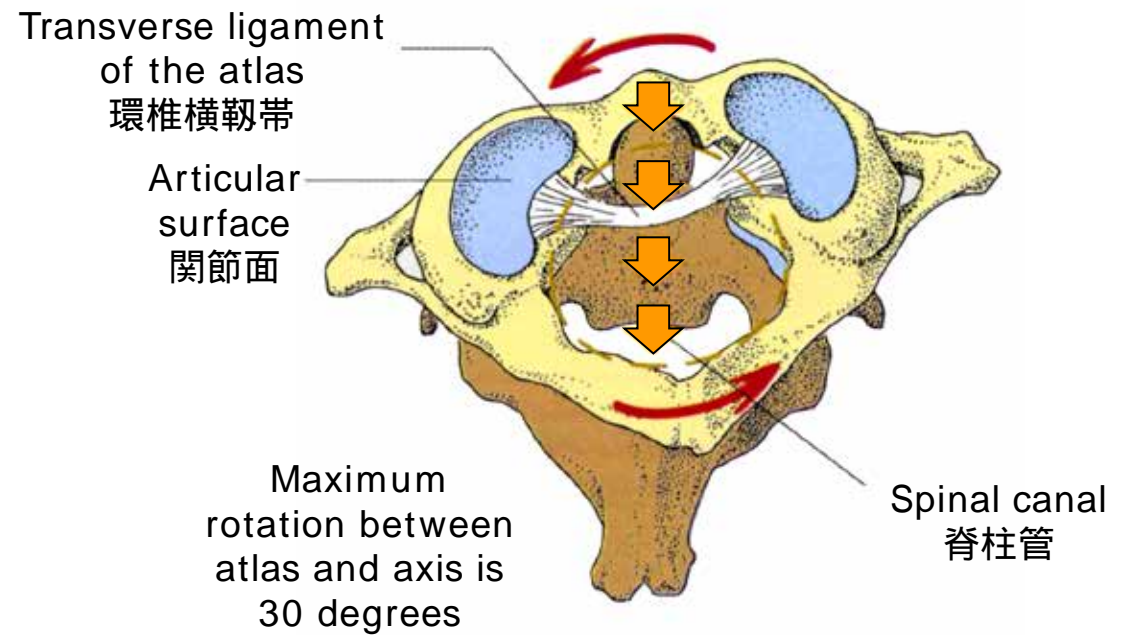
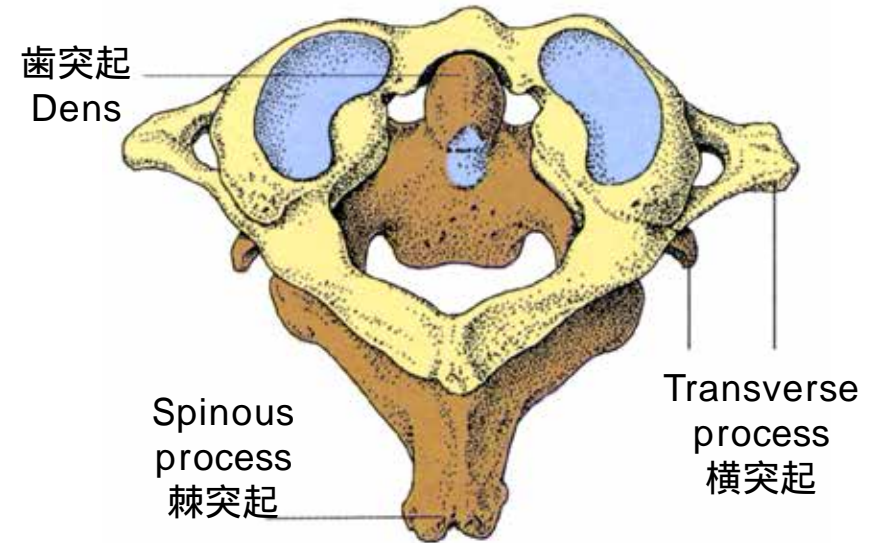
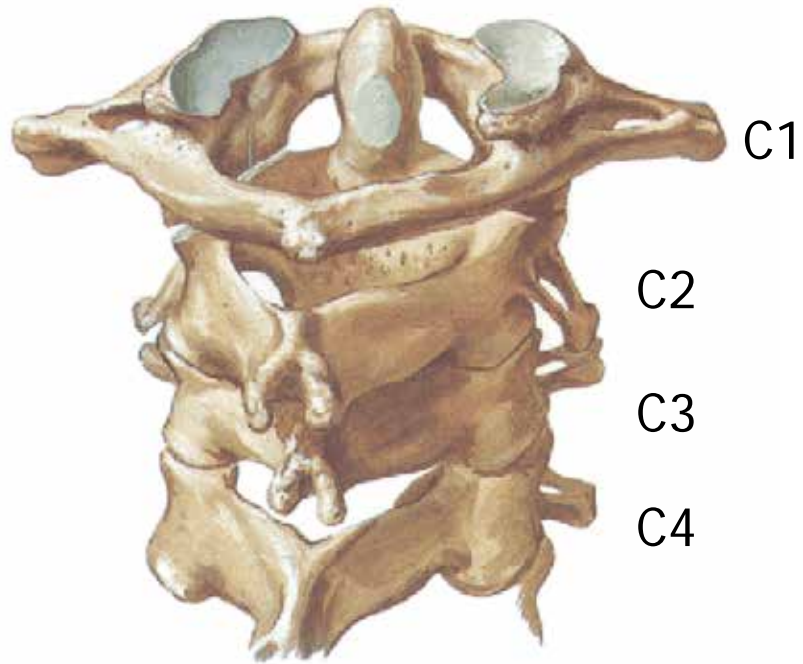
- 表層筋
 - 胸鎖乳突筋
 - 僧帽筋
- 深層筋
 - 板狀筋
 - 半棘筋
 - 最長筋
 - 斜角筋
 - 頸長筋

環椎後頭關節 (Atlanto-Occipital Joint)

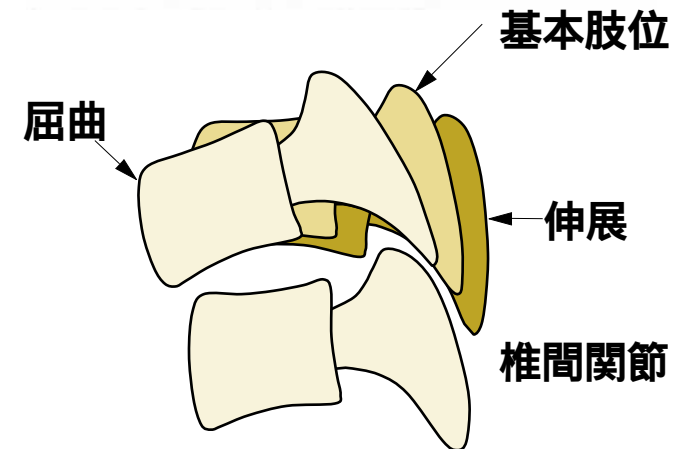
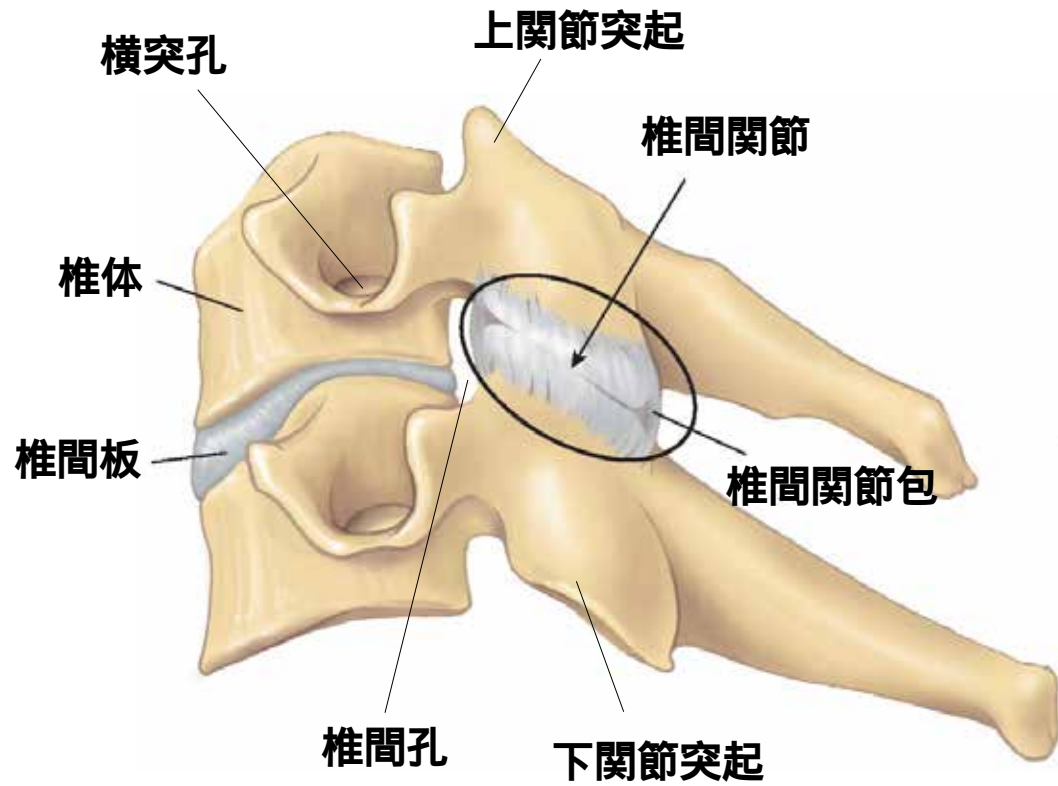


環軸關節

Atlantoaxial Joint

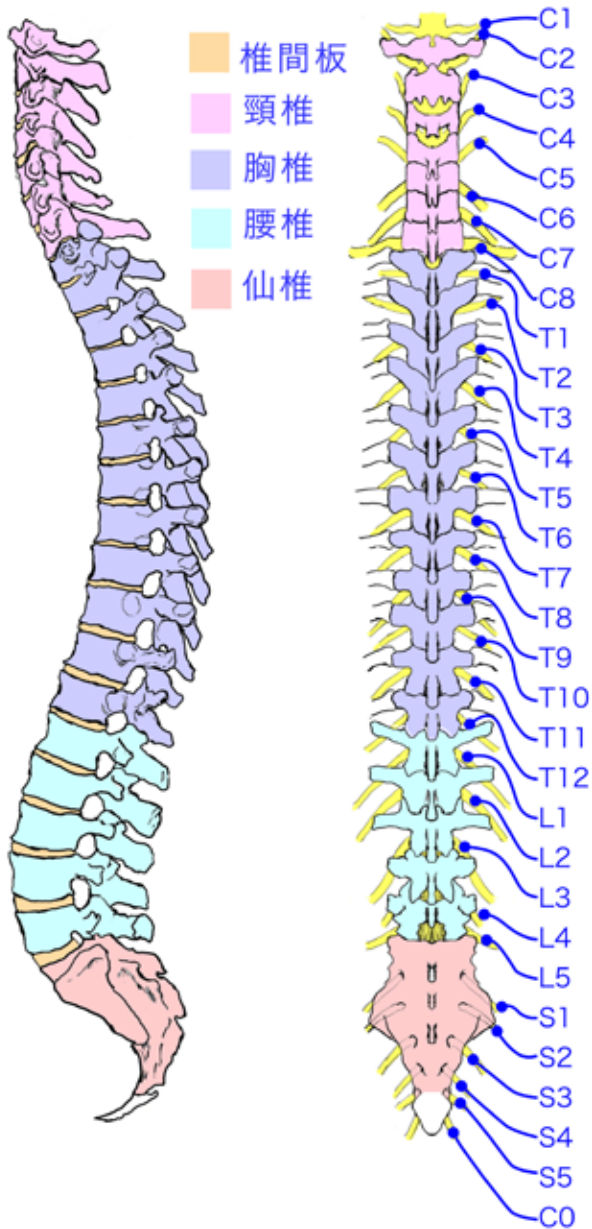


椎間板・椎間関節

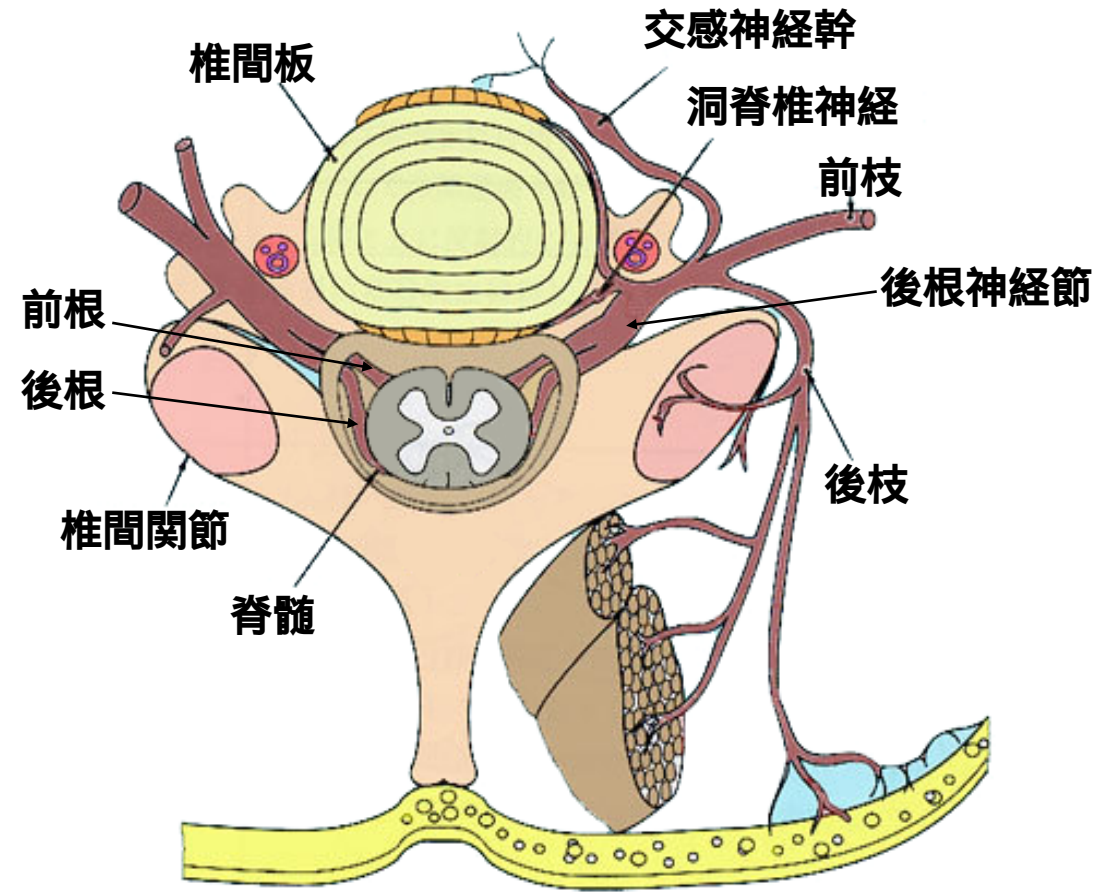
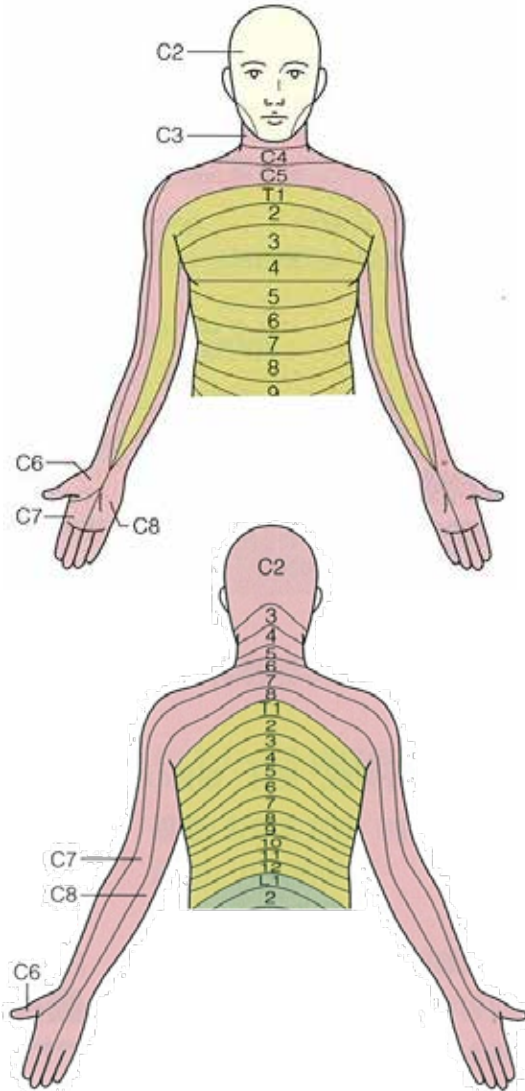


脊椎には、椎間板と椎間関節の2つの荷重経路が存在する

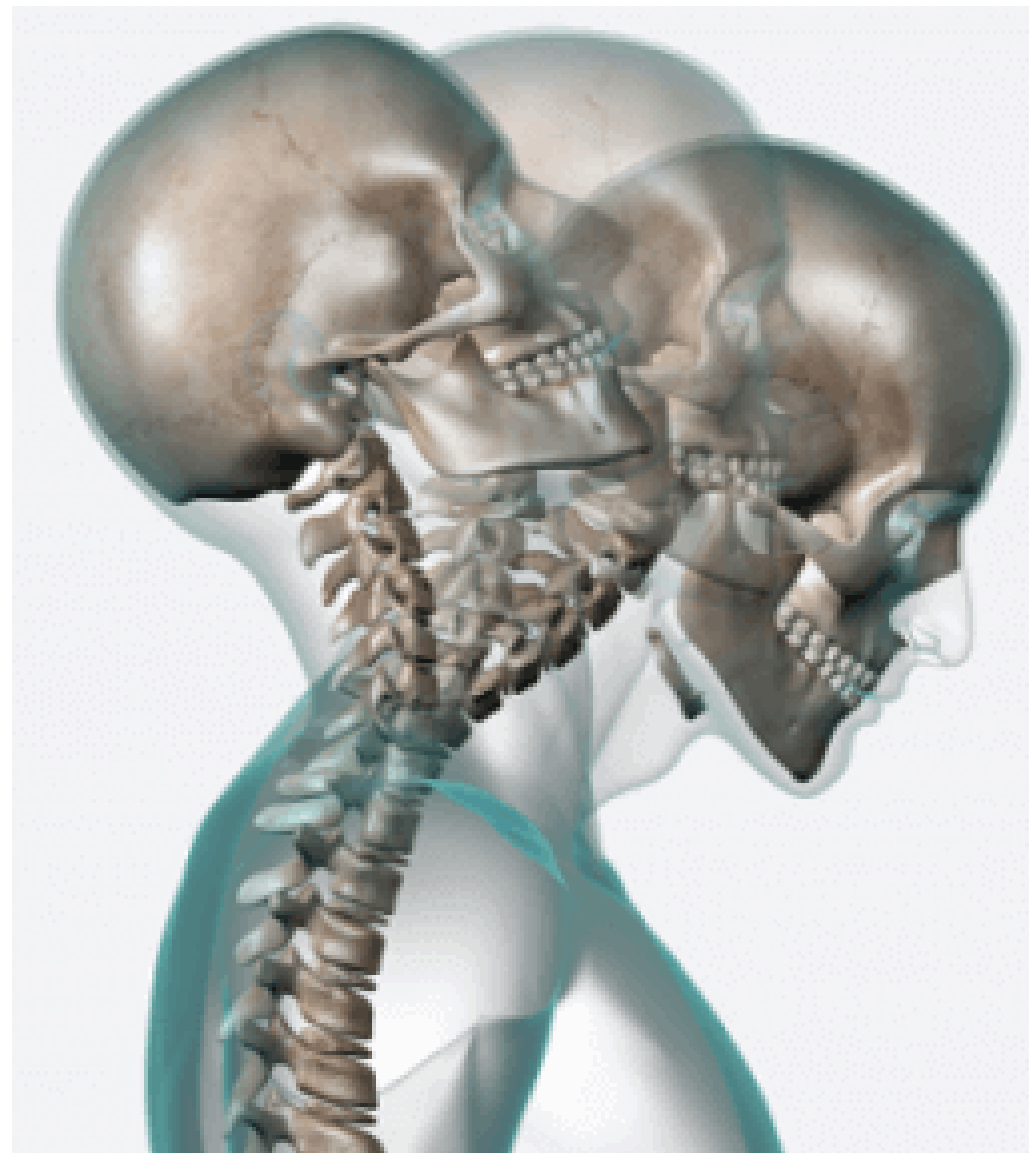
神経



デルマトーム



頭頸部運動と 頸部傷害



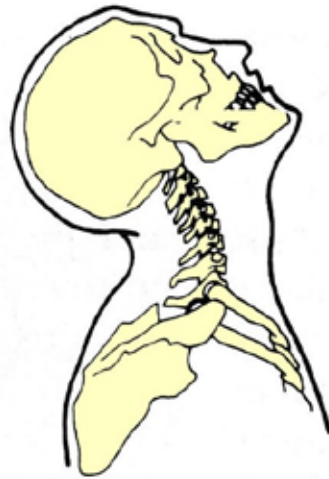
頭頸部運動



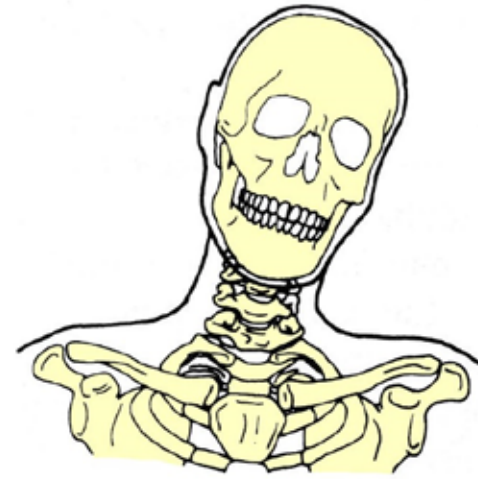
中立
Neutral



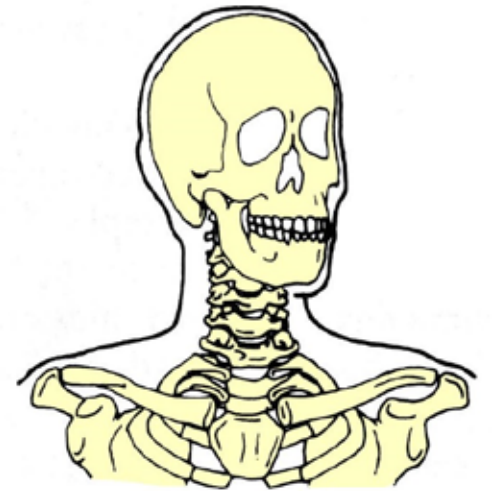
屈曲
Flexion



伸展
Extension



側屈
Lateral
bending



回旋
Rotation

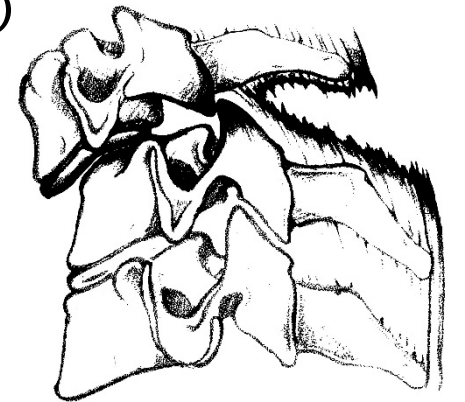
頸部傷害（屈曲モード）

引張-屈曲:

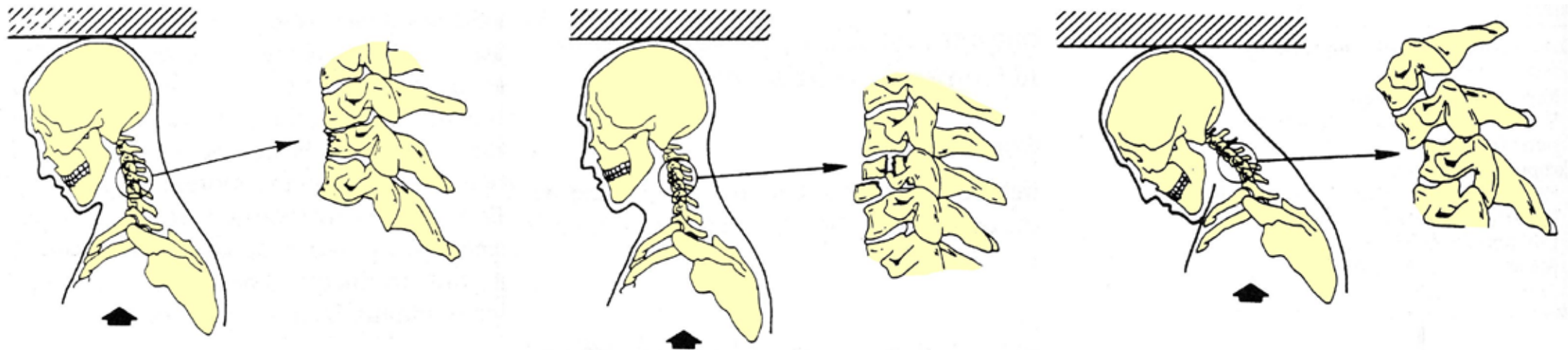
- 前突時など頭部の慣性による頸部の過屈曲（事故における傷害の発生はあまりない）
- 筋，靭帯の断裂
- 椎間板損傷，ヘルニア
- 椎体骨折，脱臼 脊髄や神経根の損傷

圧縮-屈曲（頭部接触をとまなう）

- 椎体圧迫骨折（楔状骨折，粉碎骨折，剥離骨折）
- 椎間関節脱臼，椎間関節嵌頓，後縦靭帯断裂，脊髄損傷



圧縮-屈曲メカニズム



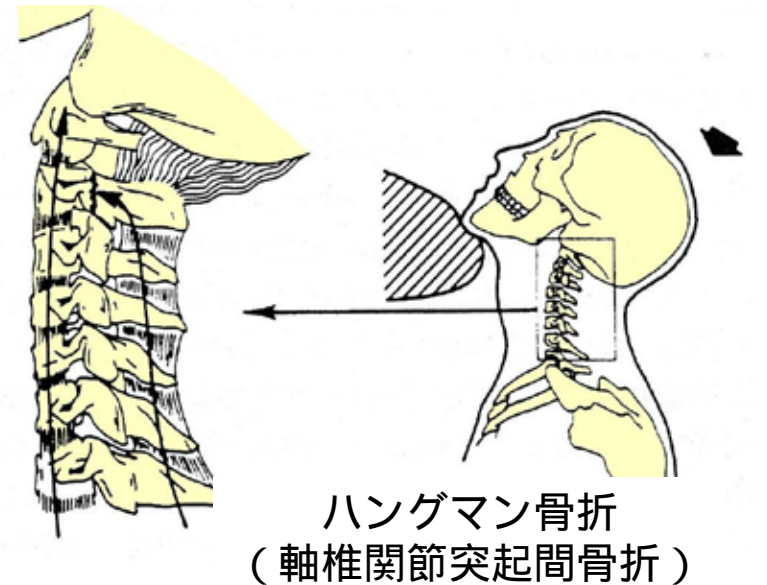
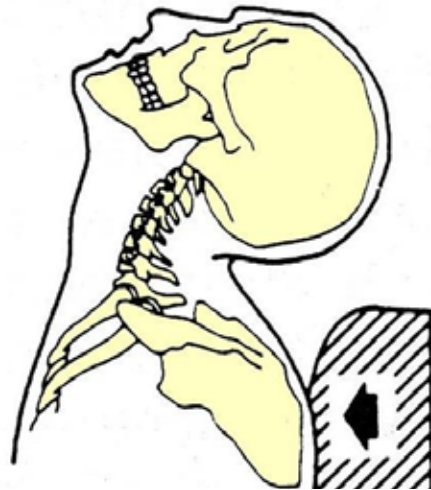
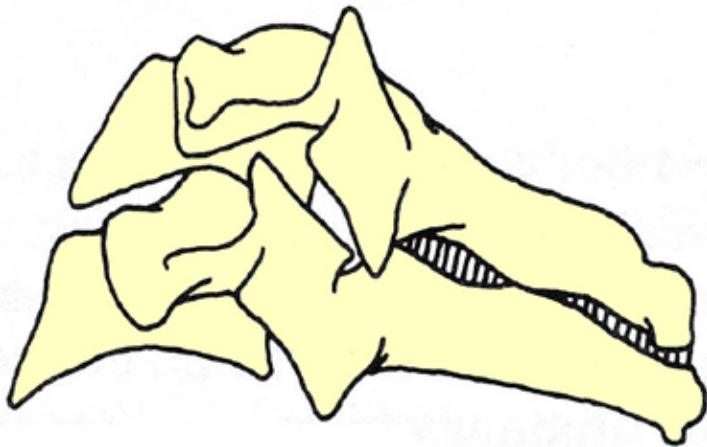
頸部傷害（伸展モード）

引張-伸展:

- 後突などの過伸展，頸部前方の筋・靭帯の引張り，頸部後方の圧縮
- 椎間板損傷，棘突起・椎弓の骨折，前縦靭帯断裂，ハングマン骨折

圧縮-伸展:

- 椎弓の骨折，椎間関節の脱臼

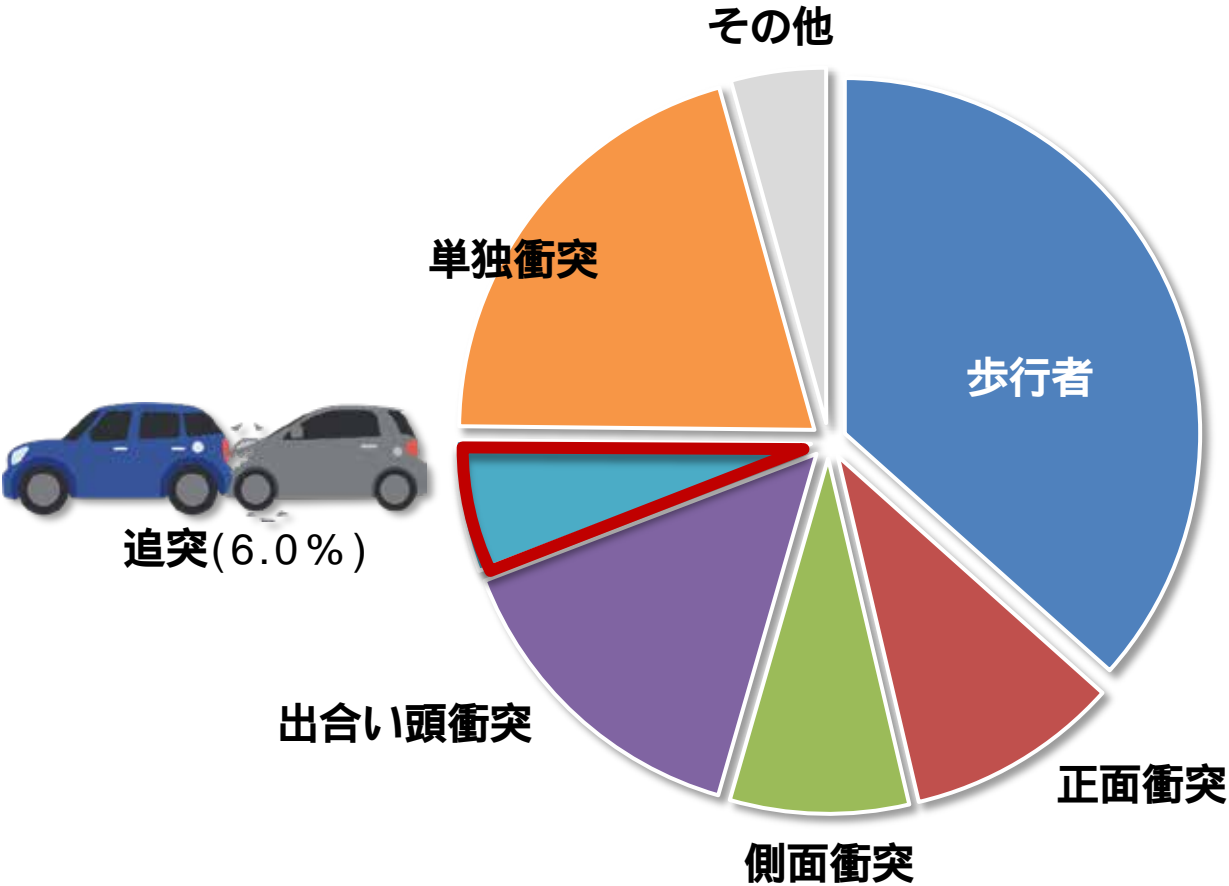


むち打ち損傷の概略

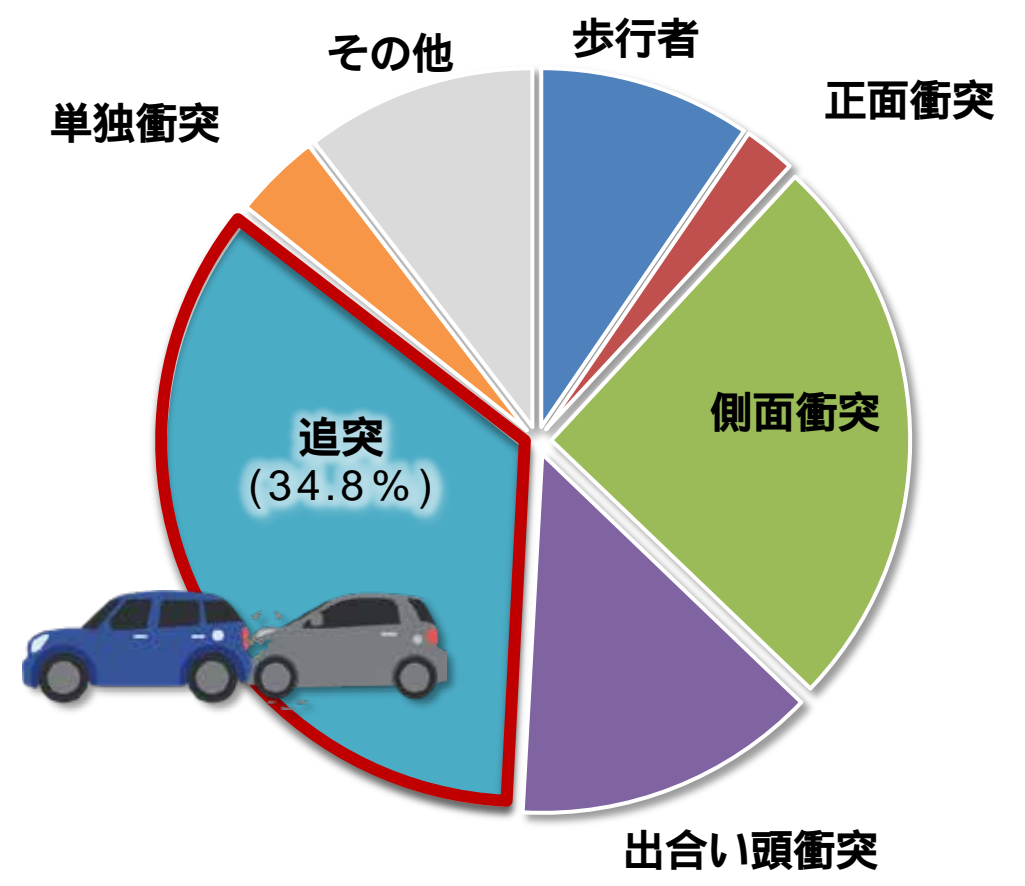


事故分析 (日本)

死亡事故

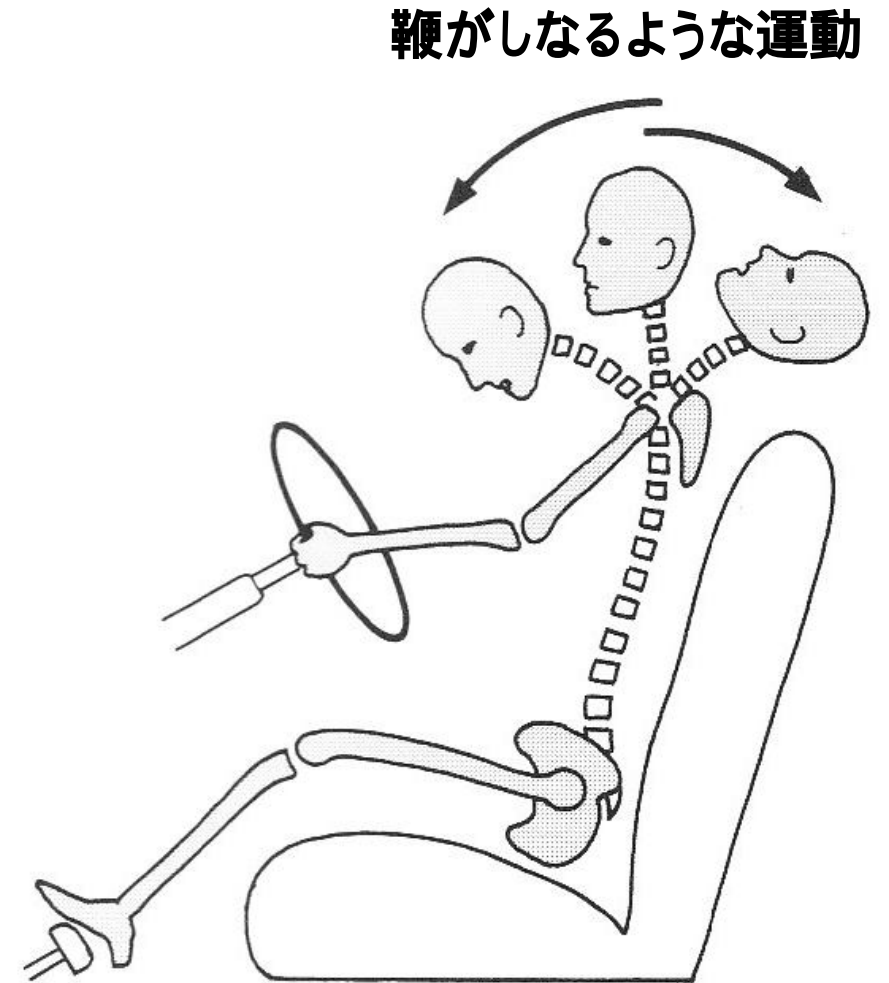


人身事故数



むち打ち損傷

- 「むち打ち損傷」は Crowne によって 1928年に最初に紹介された
- 「むち打ち」は元々は後方衝撃時の頸部の運動を表現するものであったが、後方衝撃後の頸部の症状を表現するものとして用いられるようになった
- むち打ち関連障害 WAD (whiplash associated disorder) という用語が用いられることが多い（「むち打ち」は傷害メカニズムを表現するものであるため）



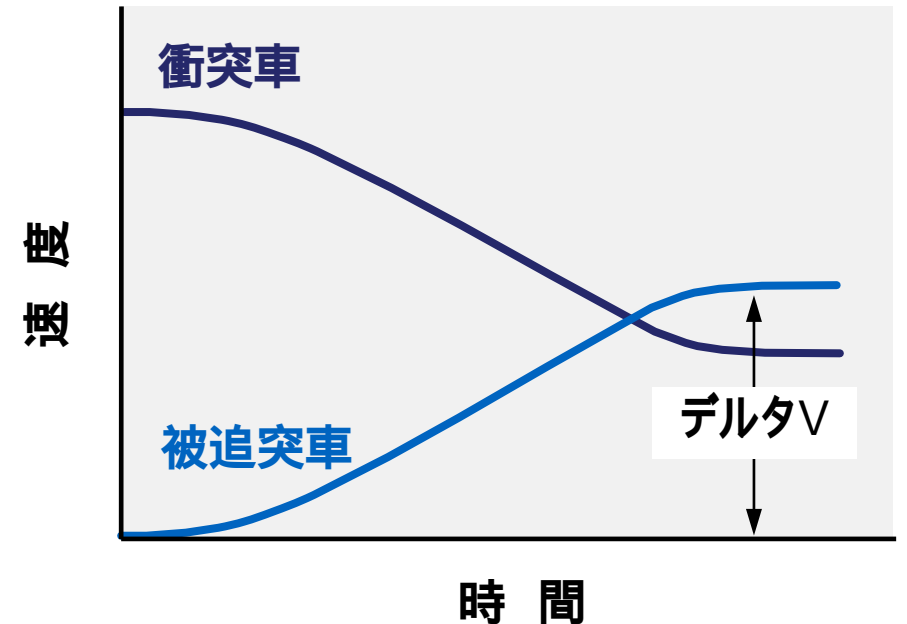
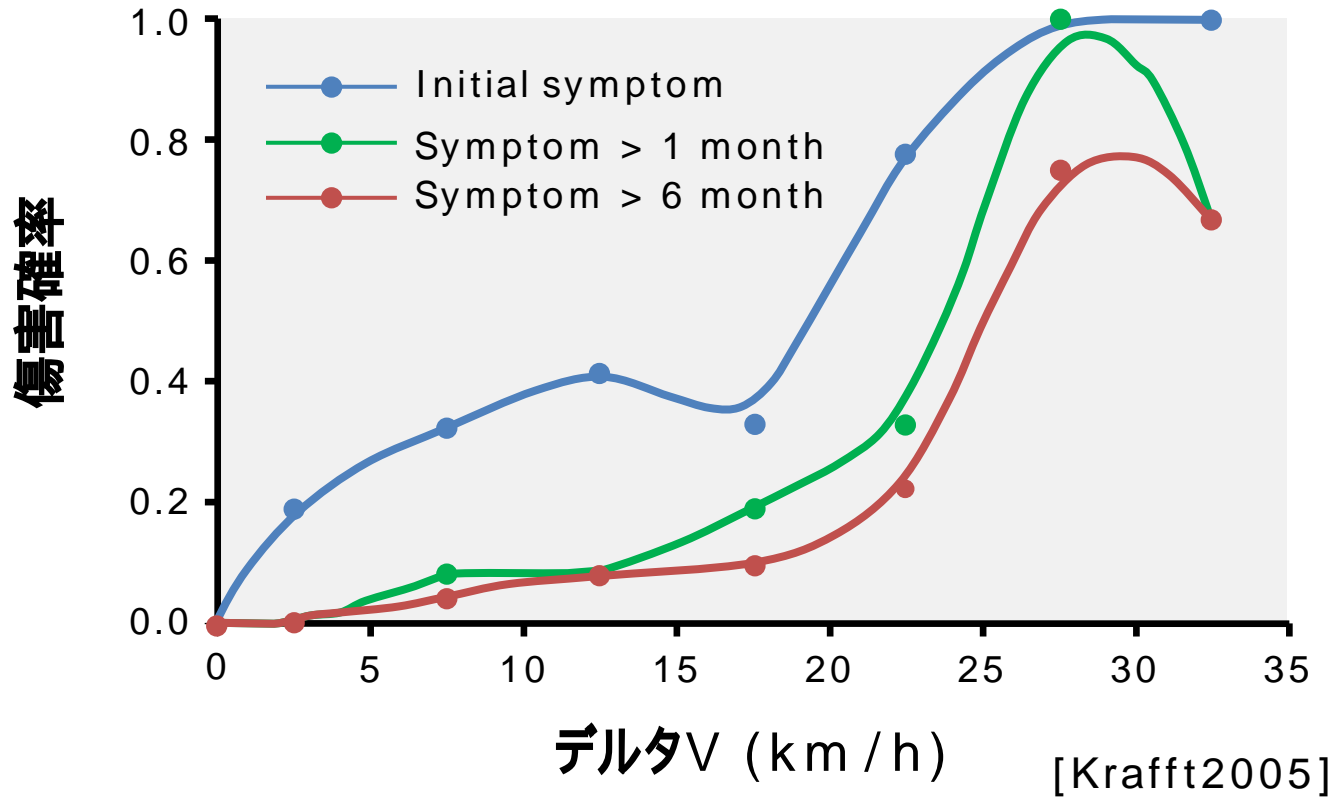
むち打ち損傷の定義

[ケベックタスクフォース 1995]

- むち打ちは、加速または減速のメカニズムによる頸部へのエネルギー伝達である。自動車の追突事故や側面衝突事故によって起きることもあるが、ダイビングやその他の事故によっても起きる。
- 衝撃は、骨折や軟部組織の損傷を引き起こす可能性があり、その結果、さまざまな臨床的な症状（むちうち関連障害）が発生することがある



衝撃度によるむち打ち損傷



追突事故によるむち打ち損傷リスクが最小から無視できる
Vは、8 ~ 12 km/h とされている

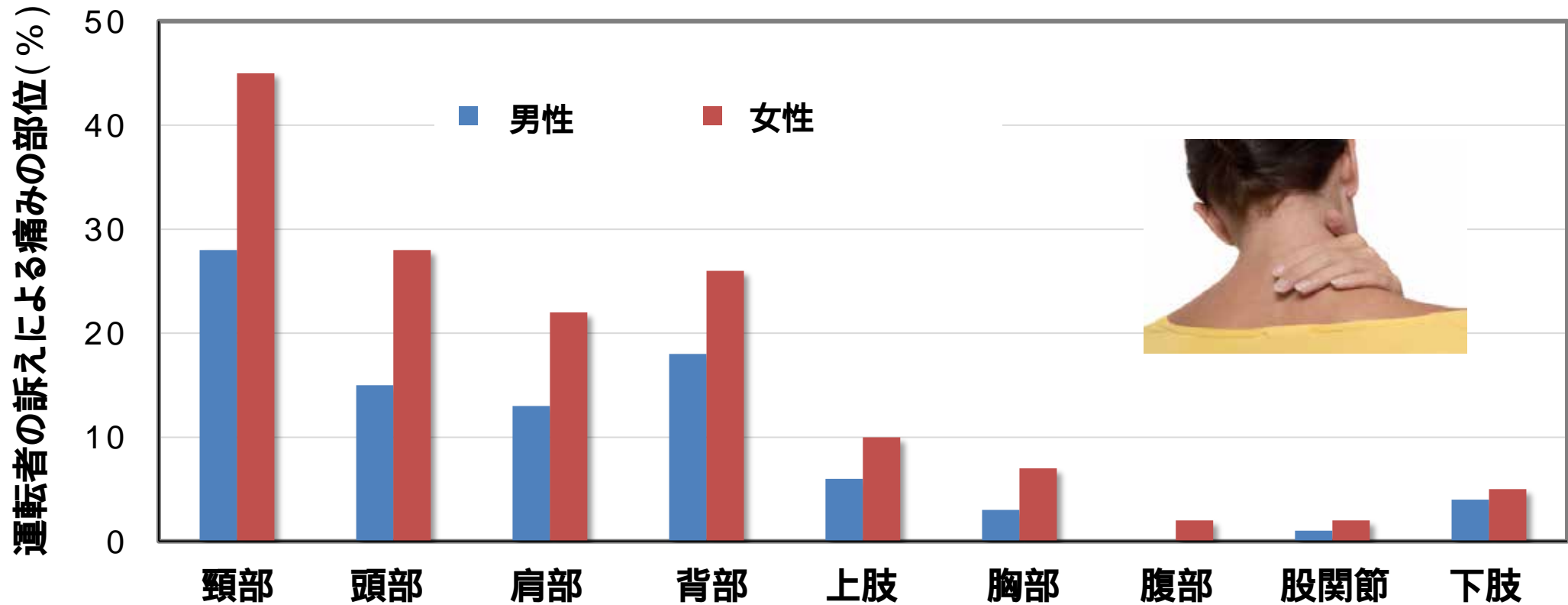
むち打ち損傷の謎

- むち打ち症は，X線検査で客観的に特定することはできない．
多くの場合，唯一の指標は，患者の頸部痛の訴えである
- むち打ち症は，車の損傷が小さくても発生する
- むち打ち症の症状は，事故から1～2日後に現れることがある
- むち打ち症が詐病の疑いのある場合もある

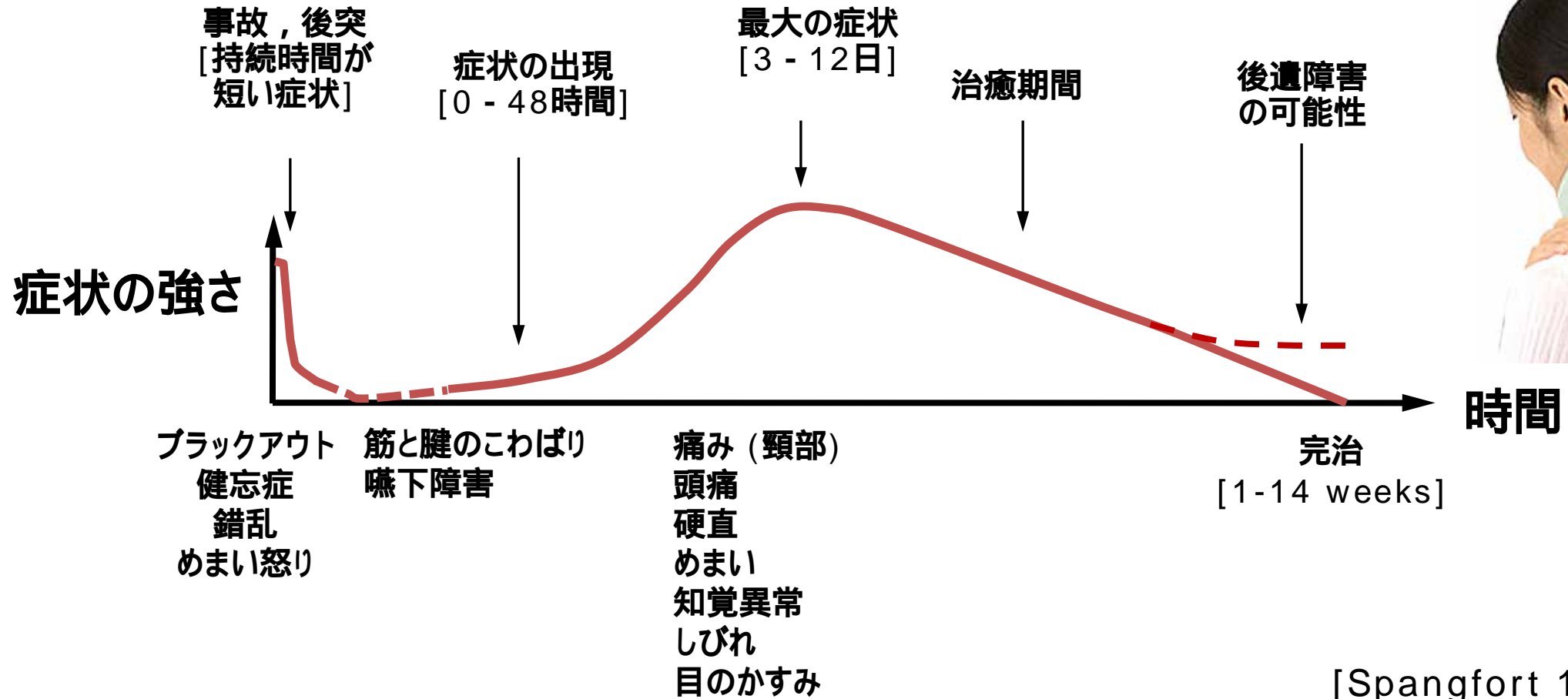


むち打ちによる受傷部位

追突時における痛みの部位 (IIHS 1999)



むち打ちの症状の推移

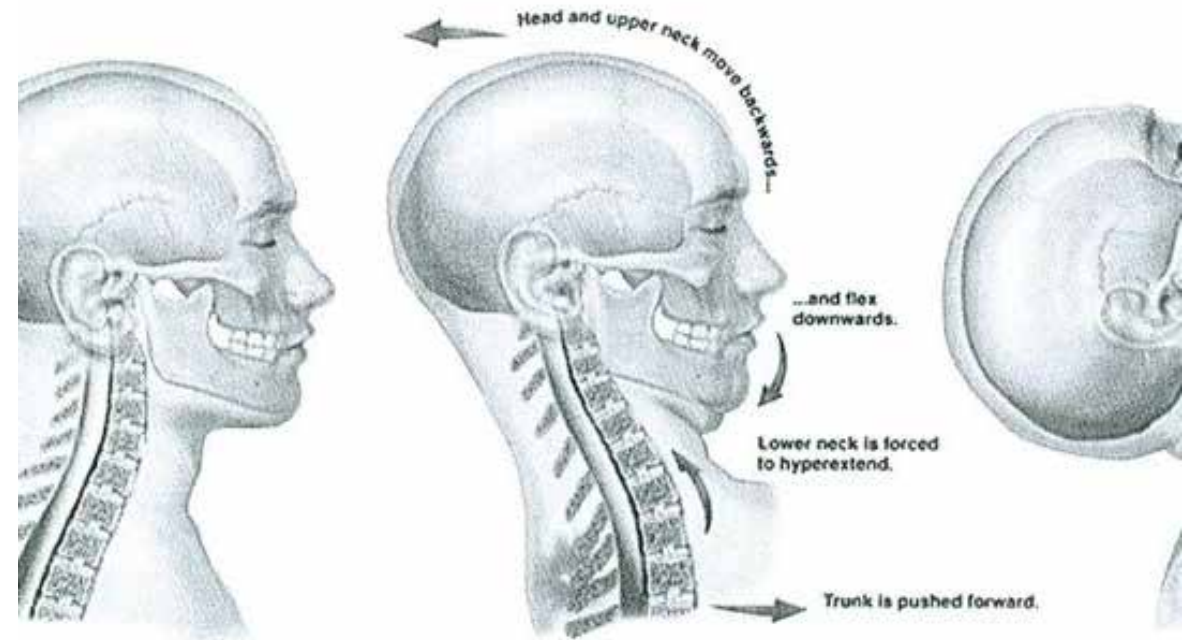


ケベック報告によるWADの分類



Grade	症 状
Grade 0	頸部に訴えがない 客観的な徴候が確認できない
Grade I	頸部痛，こわばり，圧痛のみの主訴 客観的な徴候が確認できない
Grade II	頸部主訴，可動制限・圧痛を含む筋骨格徴候
Grade III	頸部主訴，深部腱反射の減退または消失，筋力低下，感覚障害を含む神経学的徴候
Grade IV	頸部主訴と骨折または脱臼

後方衝撃時の 頭頸部の運動学



rior to Impact:
is normal curvature

1/20th Second (50ms) Later:
Neck has an "S" shaped curve.
Lower neck with possible facet injury.

1/10th Second (10ms)
All levels extend,
Likely after the m

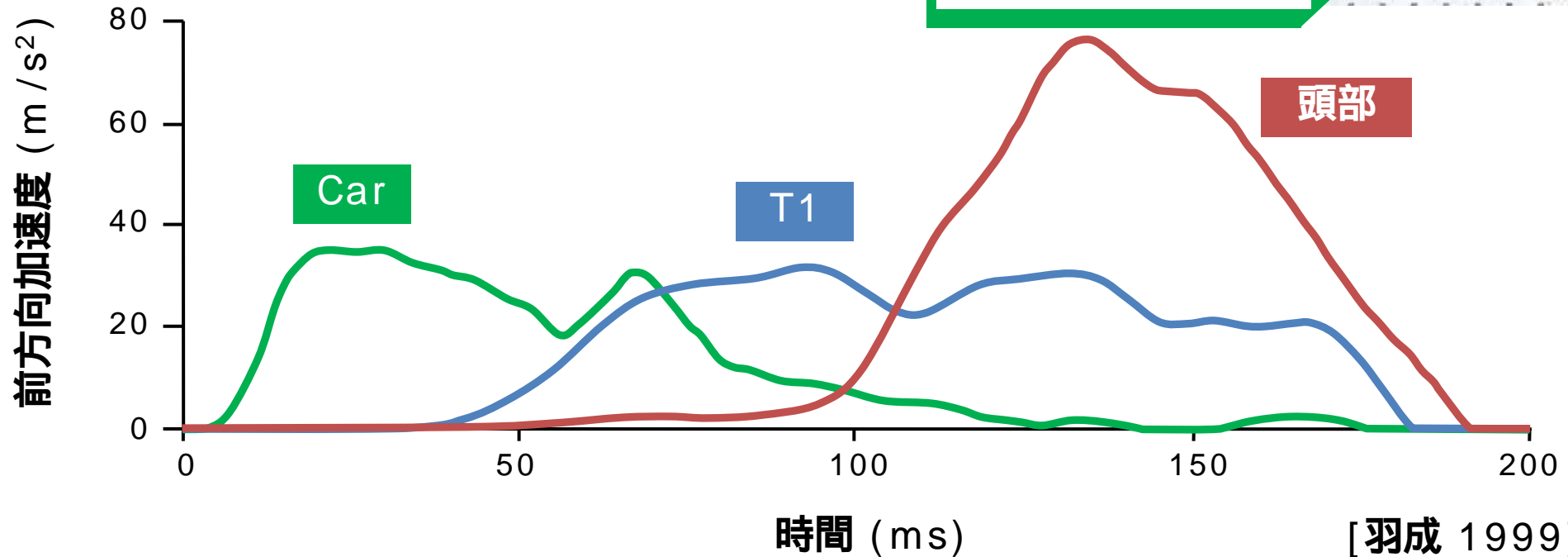
乗員の加速度



ヘッドレストによる
頭部の支持

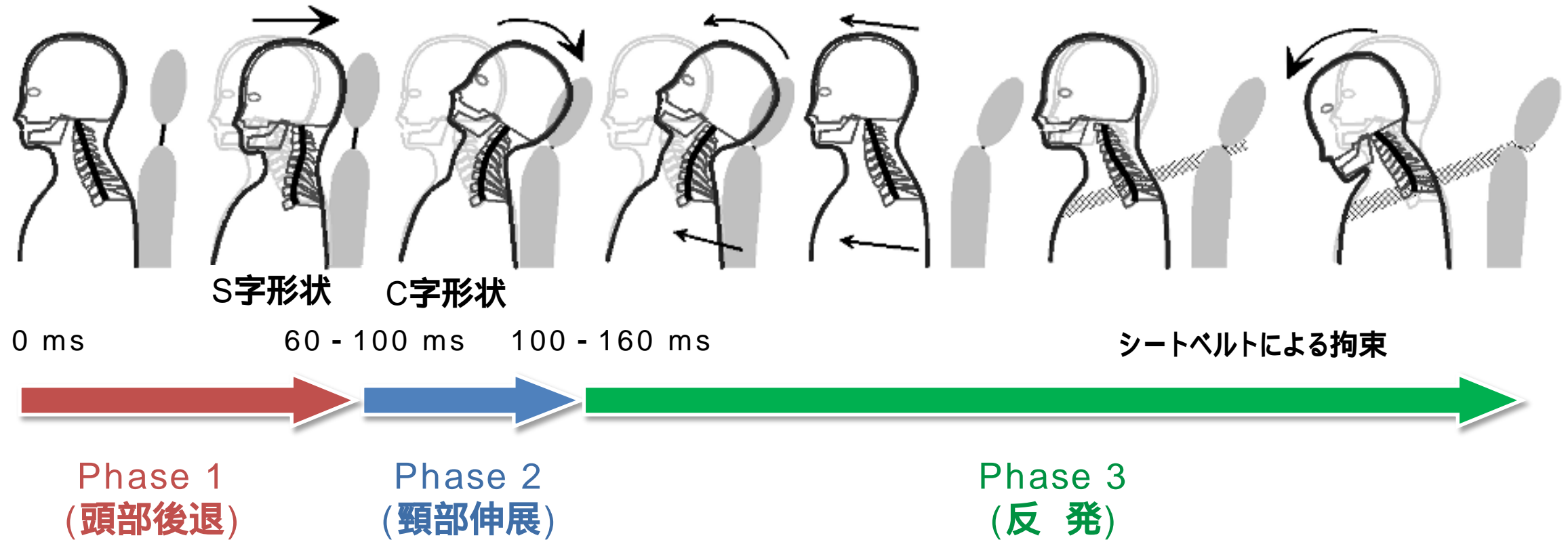
シートバックに
よる体幹の加速

構造からシートのフ
レームへの力の伝達



[羽成 1999]

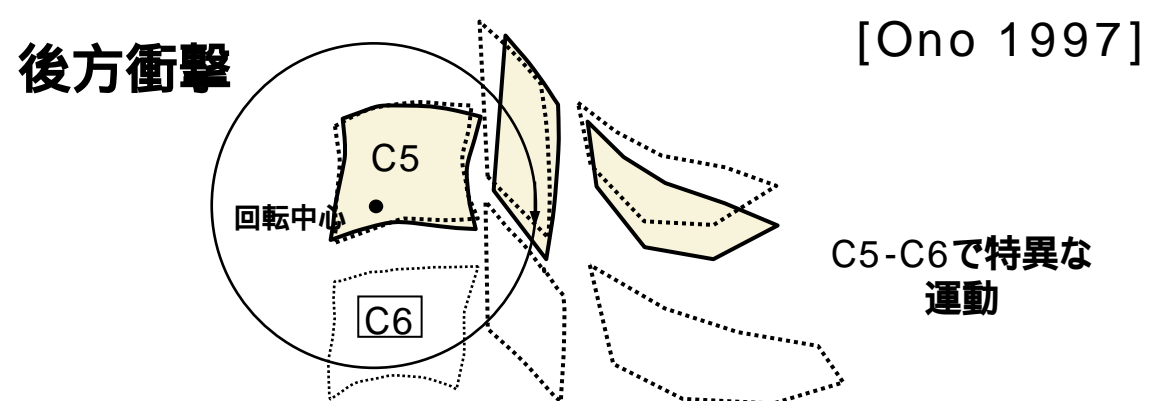
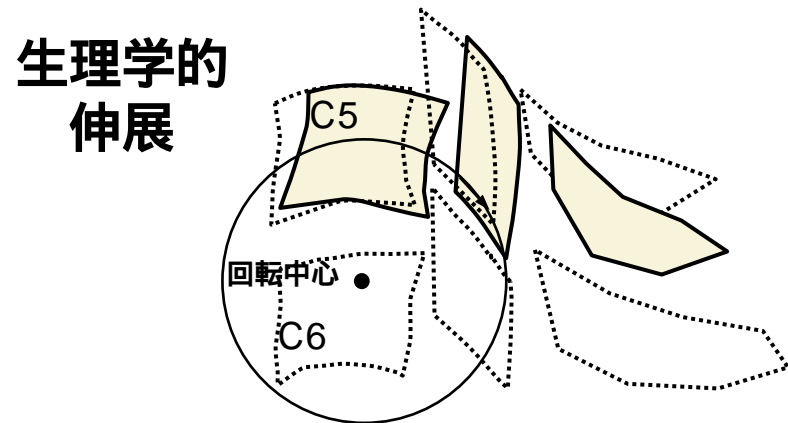
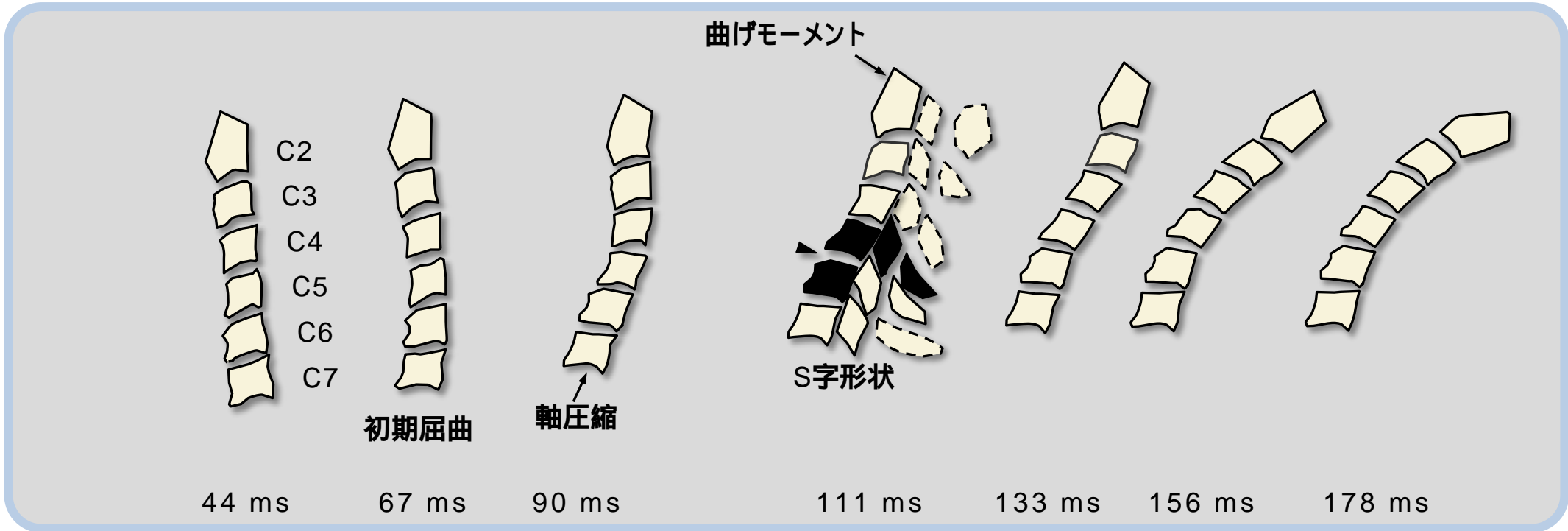
頭頸部の運動学



体幹が前方に押し出され、
上方に移動する

[Muser 2000]

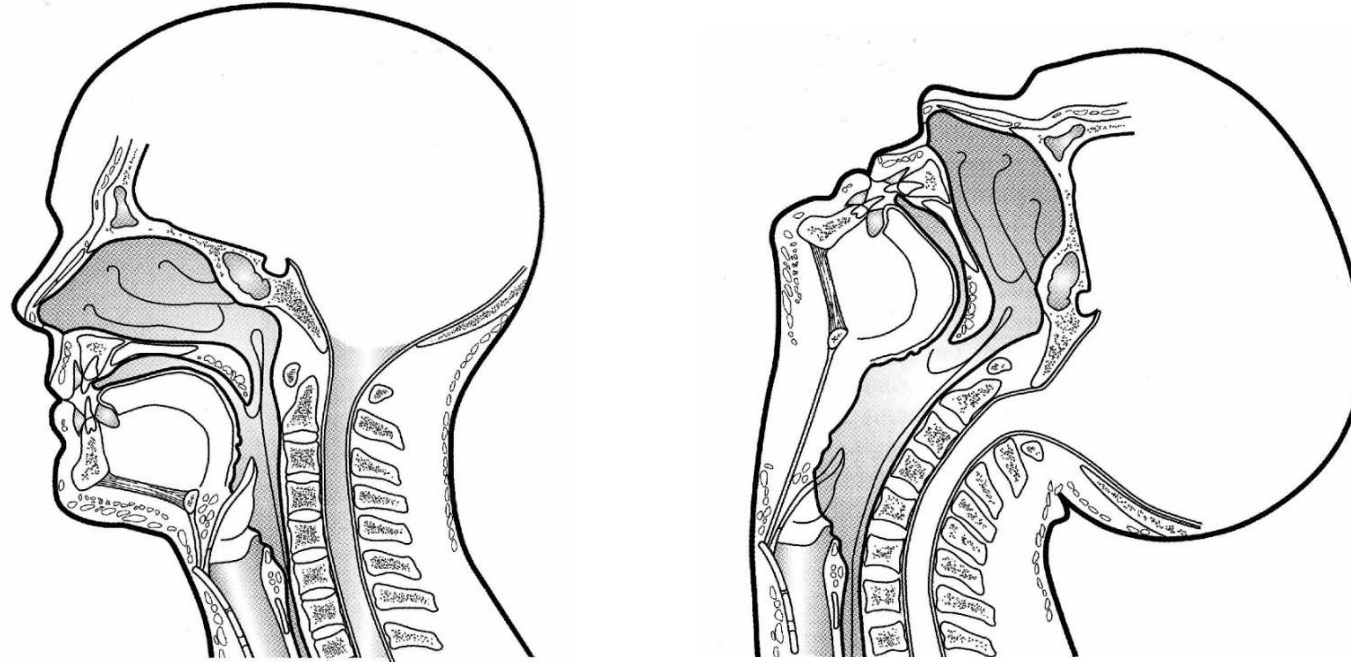
頸椎の動き (ボランティア試験)



■ ■ ■ 傷害メカニズム

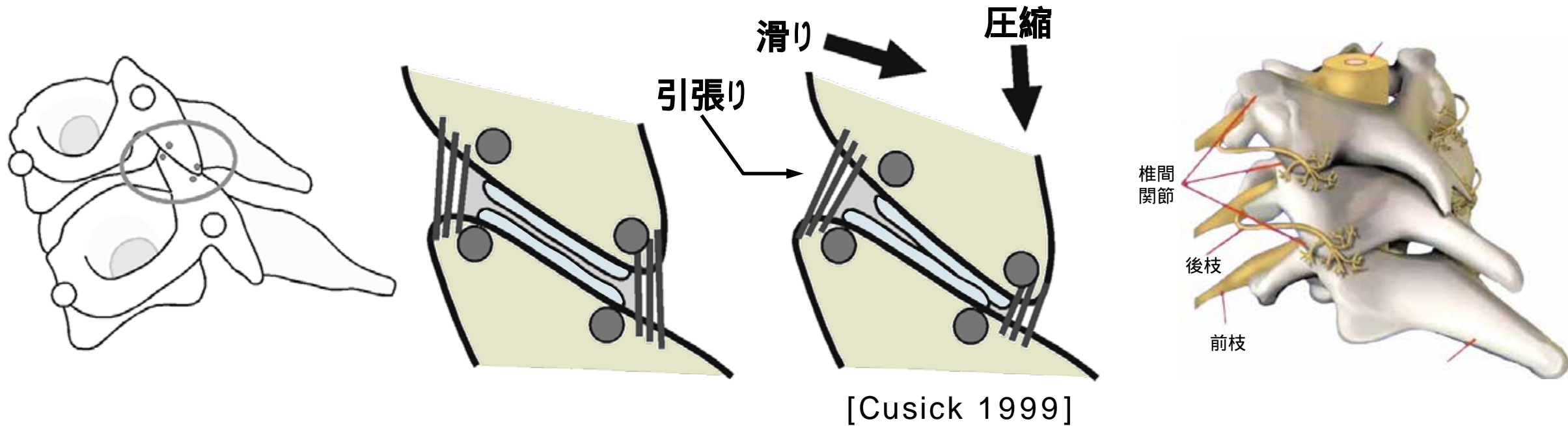


過伸展



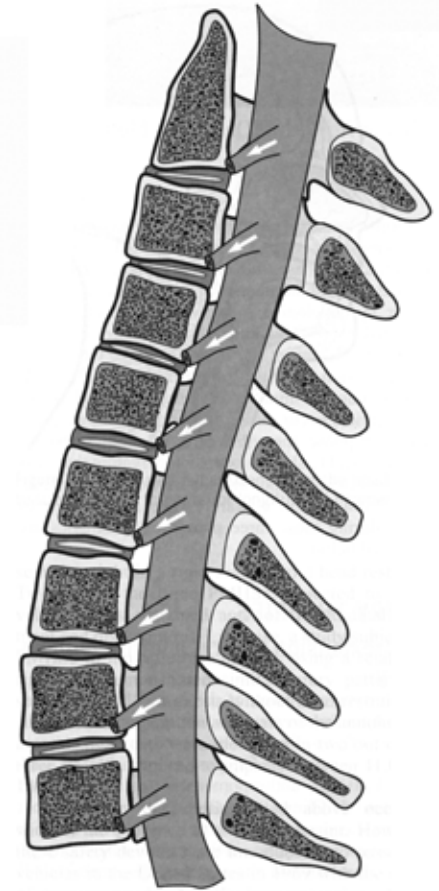
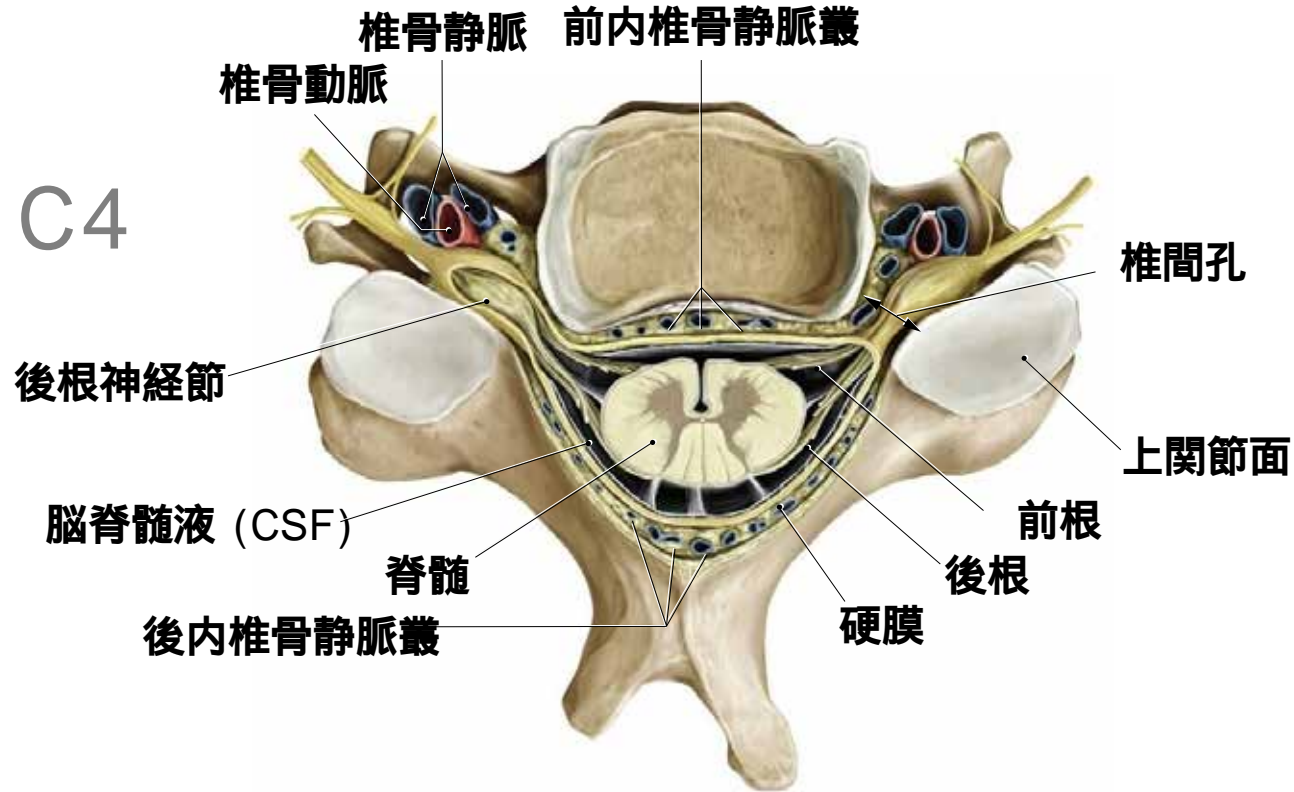
- 頭頸部の全体的な過伸展は，前頸部の損傷を引き起こす可能性がある
- 米国では1969年にヘッドレストが導入されたが，むち打ち損傷は13～18%しか減少しなかった．したがって，過伸展メカニズムではむち打ち損傷（後頸部痛）は説明できない
- 局所的な過伸展（C4-C7）は 前頸部軟組織の損傷につながる可能性がある

椎間関節損傷



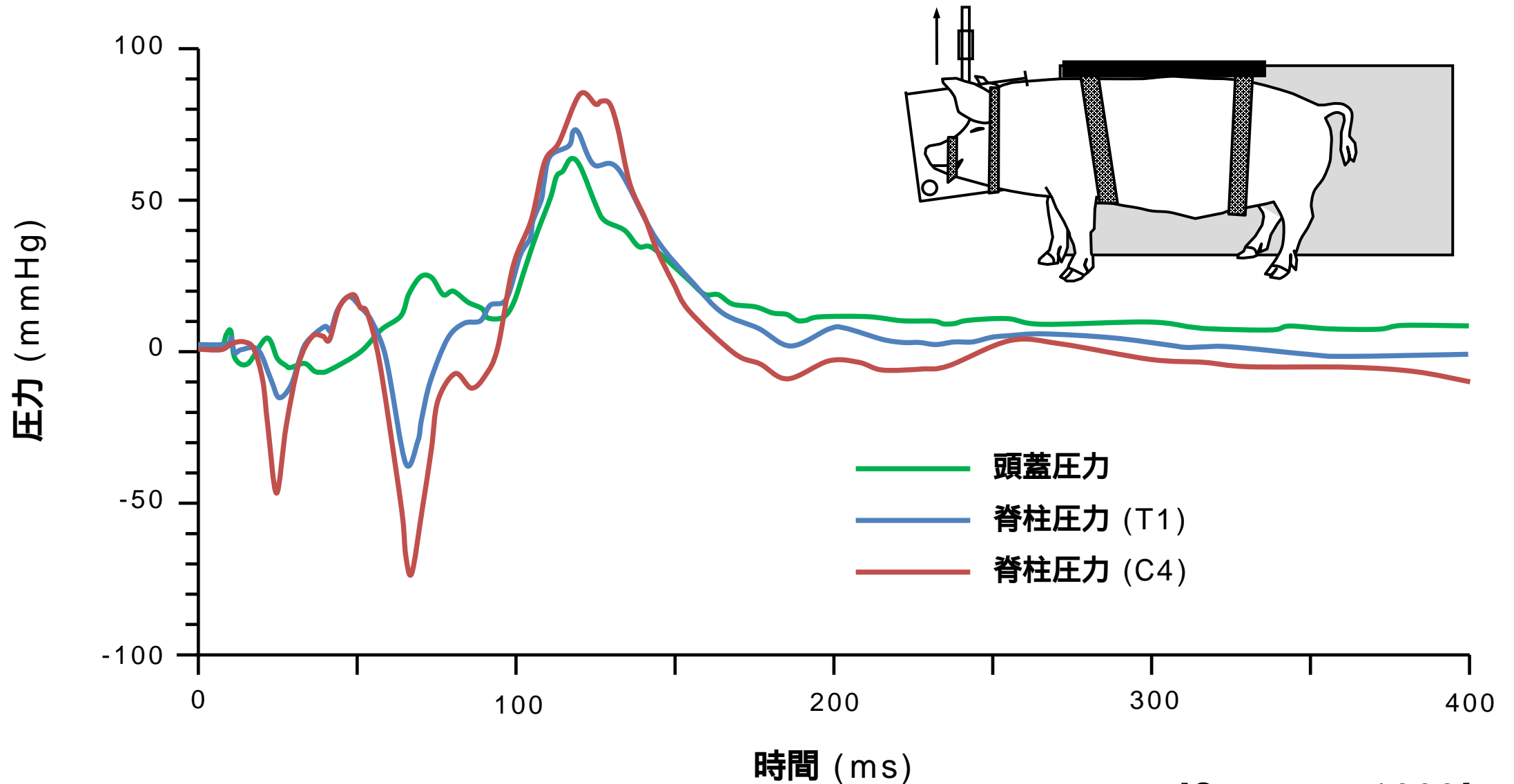
- 頭部後退時に下位頸椎の局所的な伸展が起こる
- 椎間関節包の引張り（C5-C6関節で大きい）は、むち打ち症の原因となる
- 椎間関節の神経ブロックは、むち打ち症の痛みを緩和することができる
- 椎間関節には、痛みを感知する機械受容器（侵害受容器）がある

神経根損傷（流体力学）



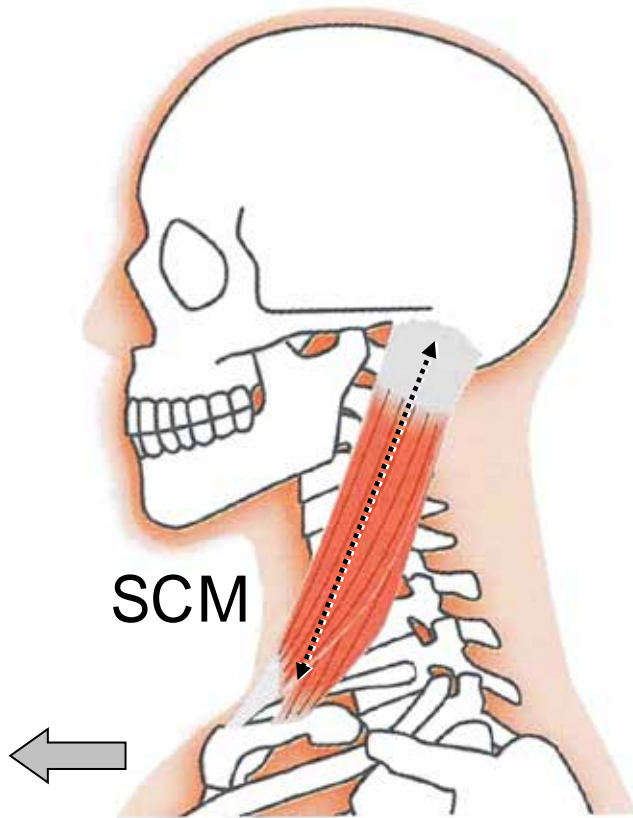
- 頭部後退時に脊柱管の長さが変化し，脊柱管内が陰圧になる．
- 血液や髄液の流れが後根神経節に力を加える．
- むち打ち症の痛みは，後根神経節の損傷と関連している可能性がある．

頸部負荷時の脳脊髄液の圧力変化

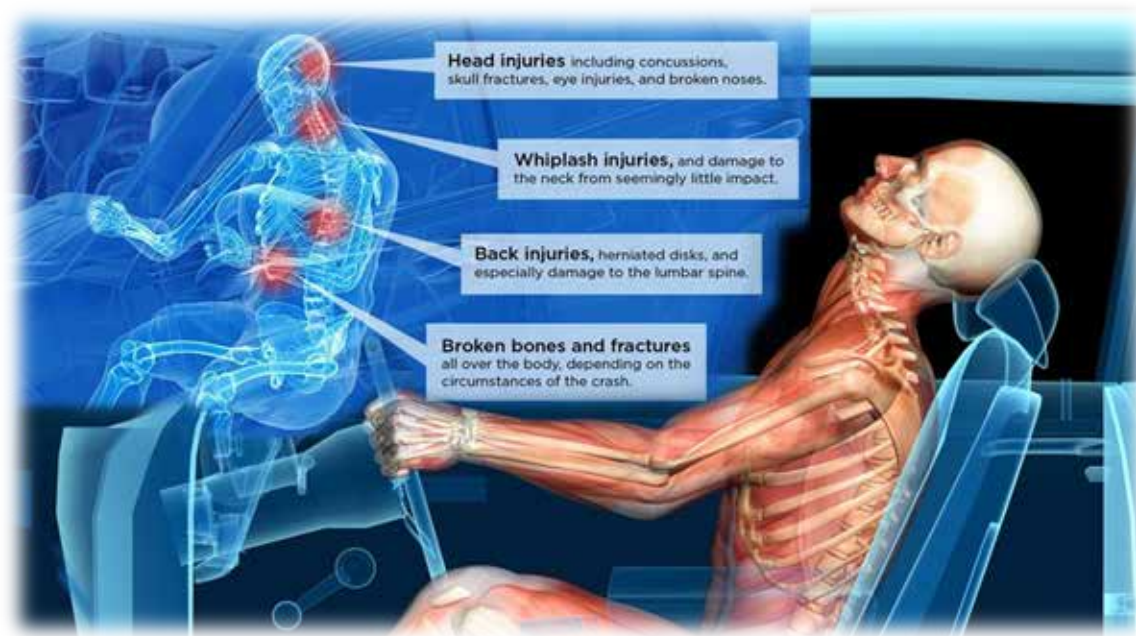


筋傷害

- 筋力は後面衝突時の頸部の挙動に影響を及ぼす可能性がある
- 筋は収縮によって力を生み出す
- 筋の損傷は、伸張性収縮状態（筋が引き伸ばされながら力を発生させること）の際に起こりうる
- 胸鎖乳突筋(SCM)は頭部後退時に伸張される．
SCMは衝撃から70～90ms後に活性化し始める
- 筋損傷はすぐに治癒する傾向があるため、WADの慢性症状を説明することはできない



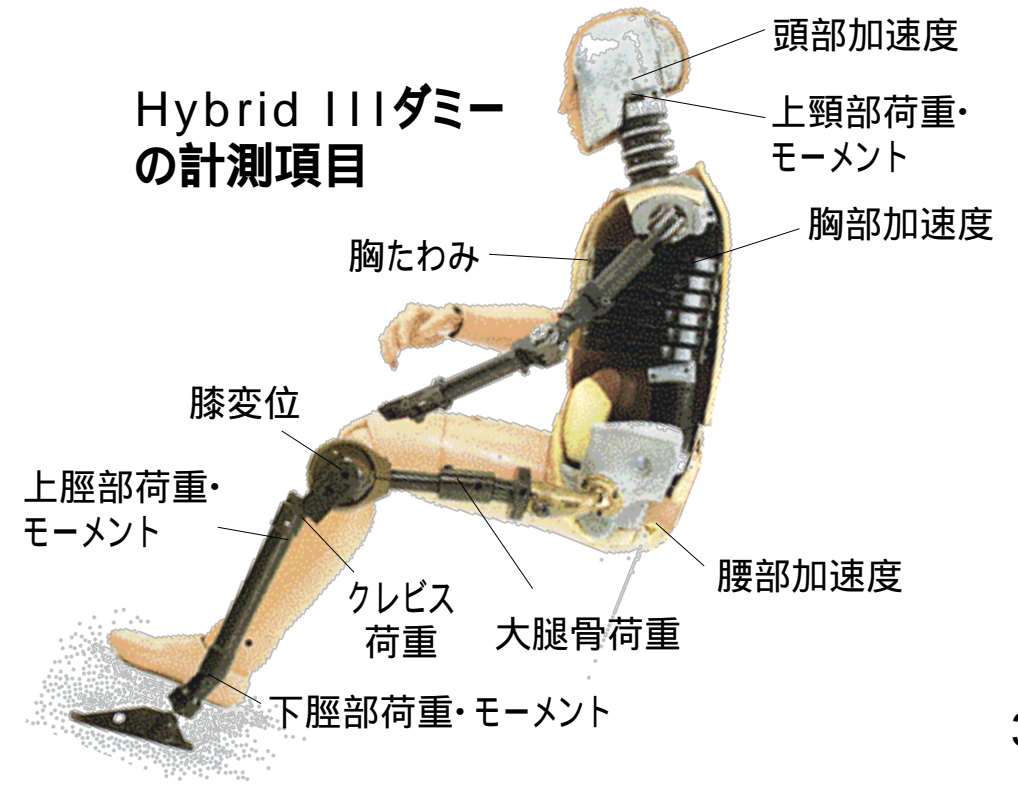
傷害基準



傷害基準 (Injury Criterion)

- 人体各部位の傷害メカニズムと関連の強い物理値
- 加速度，変形量，力で表されることが多い
- 衝突ダミーで容易に測定できる必要がある
- 傷害発生確率は傷害基準の関数として表される

部位	傷害基準 (前面衝突)
頭部	HIC
頸部	NIJ, FNIC
胸部	胸たわみ, 胸部加速度, VC
大腿部	大腿骨荷重
下腿部	Tibia index, 脛骨軸力

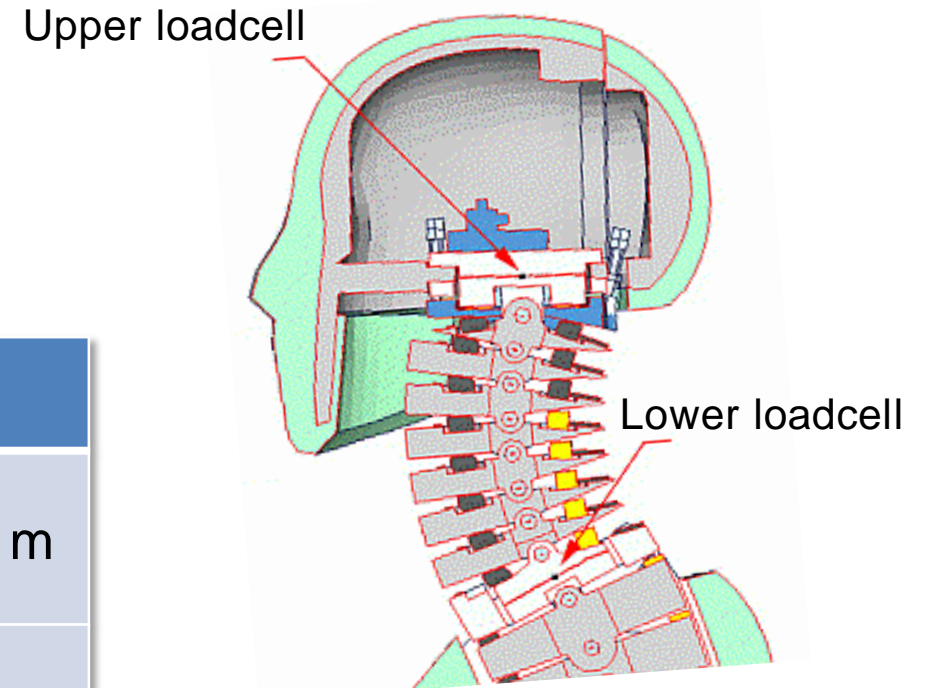


Nkm

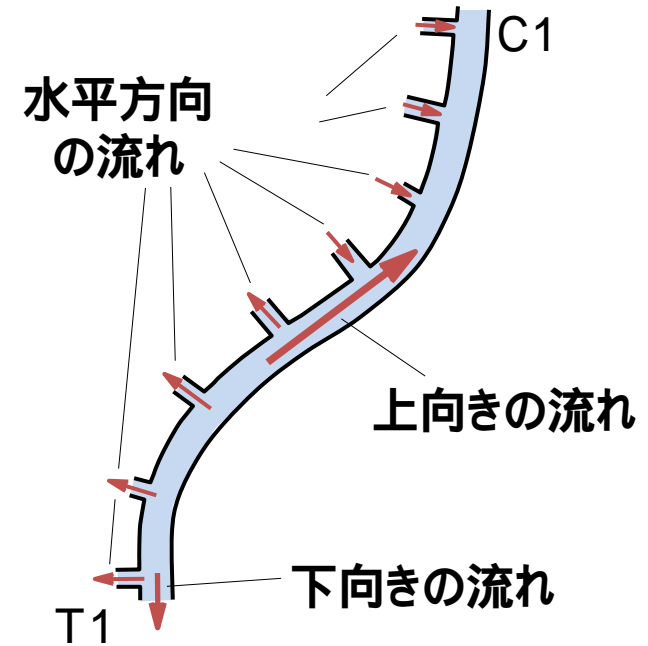
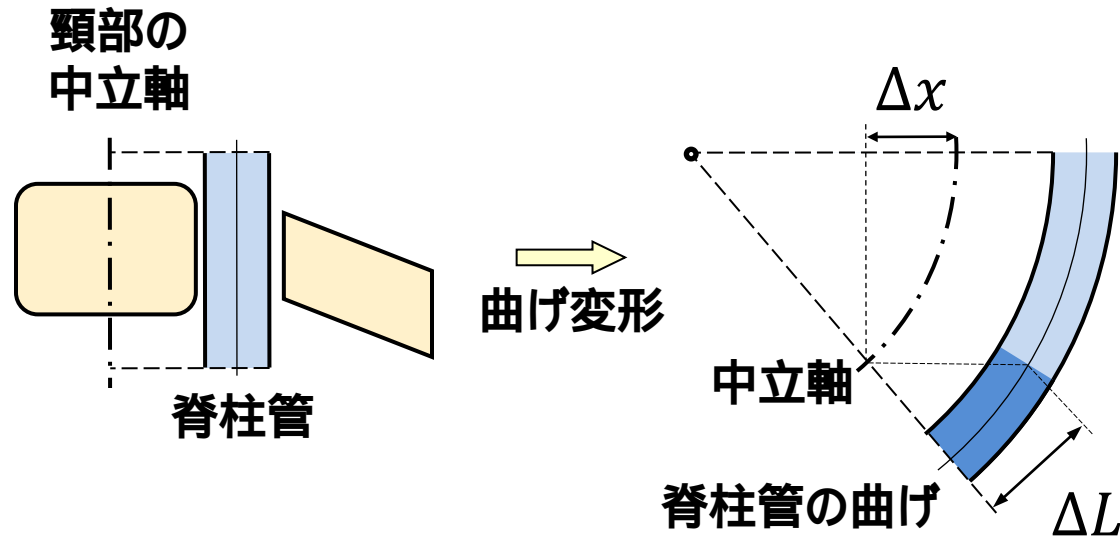
むち打ち損傷は，頸部のせん断力 F_x と曲げモーメント M_y によって発生すると考えられる ($N_{km} < 1$)

$$N_{km} = \frac{|F_x|}{F_{int}} + \frac{|M_y|}{M_{int}}$$

	N_{km}	F_{int}	M_{int}
N_{fa}	屈曲-前方せん断	845 N	88.1 Nm
N_{fp}	屈曲-後方せん断		88.1 Nm
N_{ea}	伸展-前方せん断	845 N	47.5 Nm
N_{ep}	伸展-後方せん断		47.5 Nm



頸部傷害基準 (NIC)



ナビエ Stokes の式

$$\frac{\Delta p}{\Delta z} = -\rho \left\{ \frac{\Delta u}{\Delta t} + \frac{1}{2} \frac{\Delta(u^2)}{\Delta z} \right\} = -\rho \left(a_{\text{rel}} + \frac{1}{2} \frac{v_{\text{rel}}^2}{\Delta z} \right)$$

$$= -1100 \left(0.1 a_{\text{rel}} + \frac{1}{2} v_{\text{rel}}^2 \right)$$

頸部傷害基準 (NIC)

$$NIC = a_{\text{rel}} \cdot 0.2 + v_{\text{rel}}^2$$

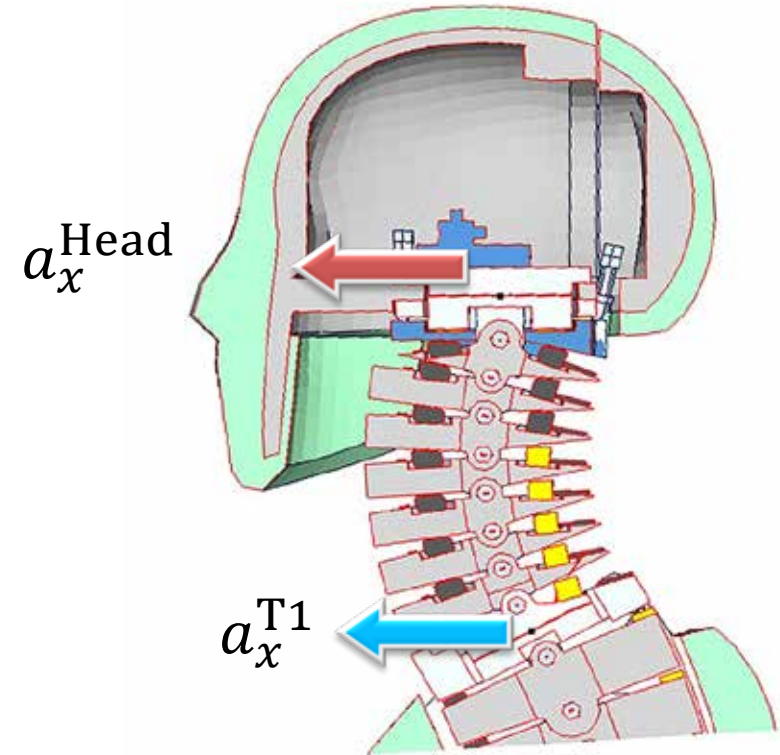
[Boström 1996]

頸部傷害基準 (続き)

$$NIC = a_{\text{rel}} \cdot 0.2 + v_{\text{rel}}^2$$

$$a_{\text{rel}} = a_x^{\text{T1}} - a_x^{\text{Head}}$$

$$v_{\text{rel}} = \int_0^t a_{\text{rel}} dt$$



$NIC < 15 \text{ m}^2/\text{s}^2$: 長期障害が発生しない
NIC は頭部後退フェーズしか適用できない

むち打ちリスク 評価試験法

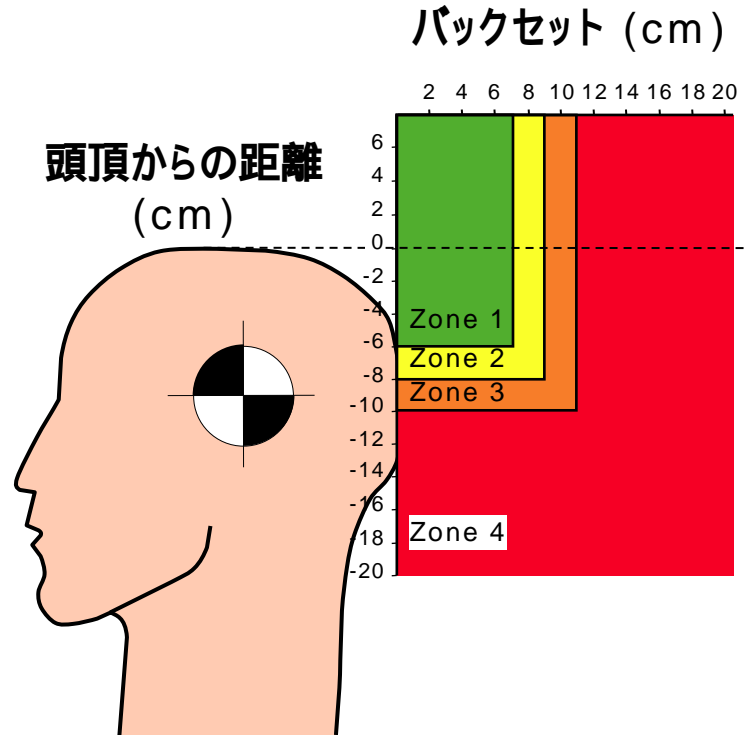
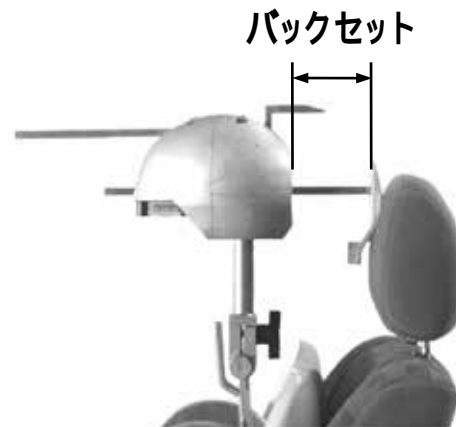


ヘッドレストの幾何形状の静的計測

Rcar-IIWPGによる評価方法

自動車のシートとヘッドレストによる後面衝突保護性能を評価する最初のステップは、平均的な大きさの成人男性に対する静的ヘッドレスト形状を測定することである。

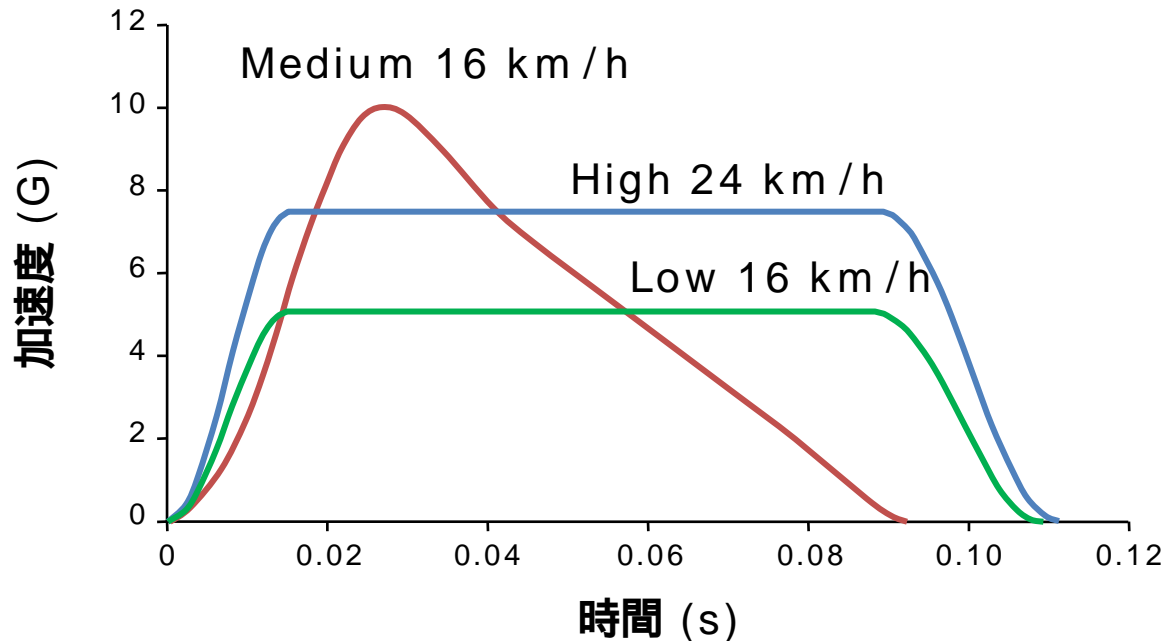
ヘッドレスト計測装置
(HRMD)



スレッド試験 (動的試験)

- シートの性能はむち打ち損傷の予防に大きく影響する。
- スレッド試験は、自動車衝突試験と比較して安価である。
- 乗員はさまざまな加速度波形を受ける。むち打ち損傷のリスクは自動車の構造によっても軽減できるが、シートは最優先で試験すべき重要な部品である。

スレッドの加速度波形



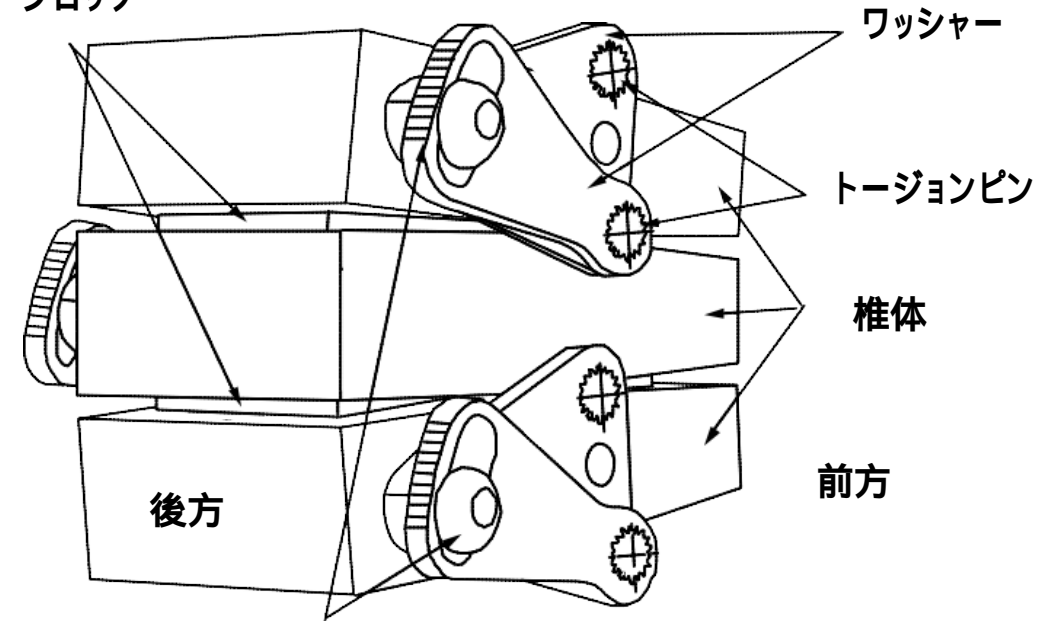
BioRID II ダミー

後方衝撃に対して、シートとヘッドレストを評価するために開発されたダミーであり、人体を模擬した柔軟な脊椎をもつ。



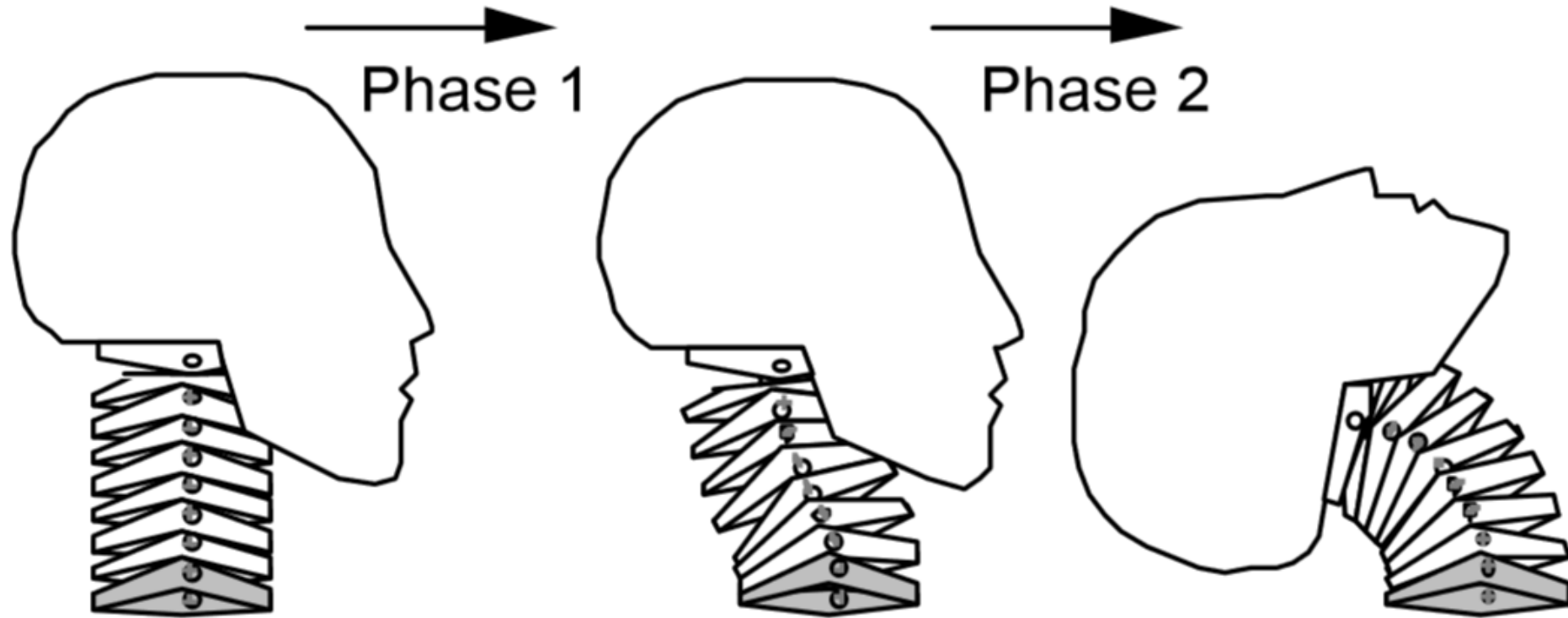
脊椎の構造

ポリウレタン
ラバーブロック



隣接する椎骨の
角度調整ねじ

BioRID II 頭頸部運動



頭部後退
S字變形

伸展
C字變形

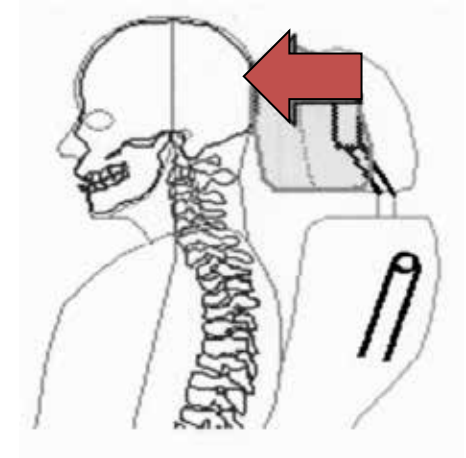
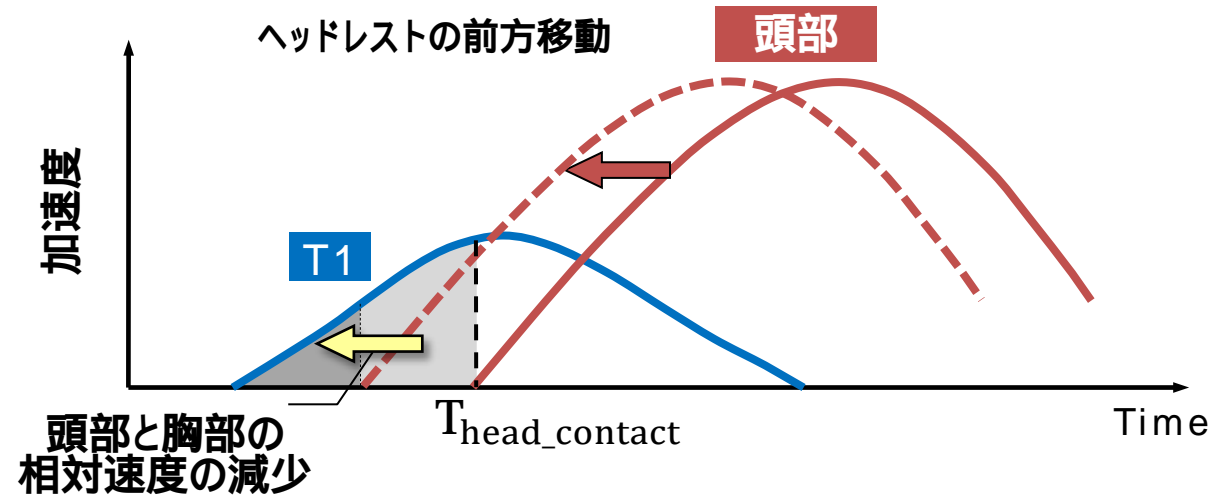
むち打ち傷害 軽減シート

WHIPS - Whiplash Protection System

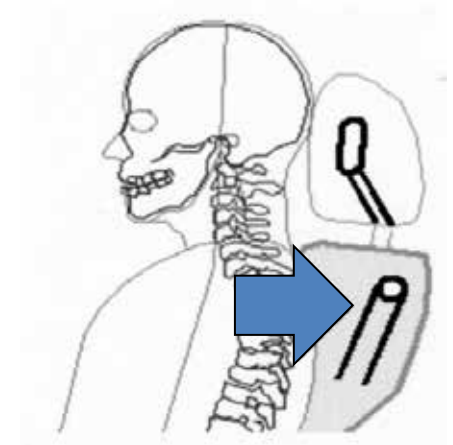
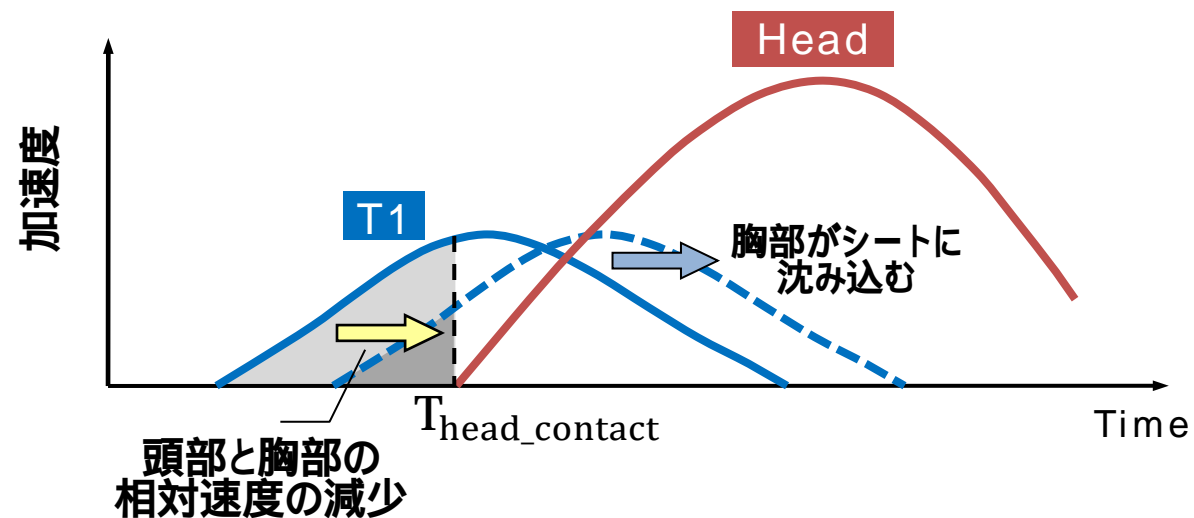


むち打ち損傷の軽減方法

アクティブ ヘッドレスト



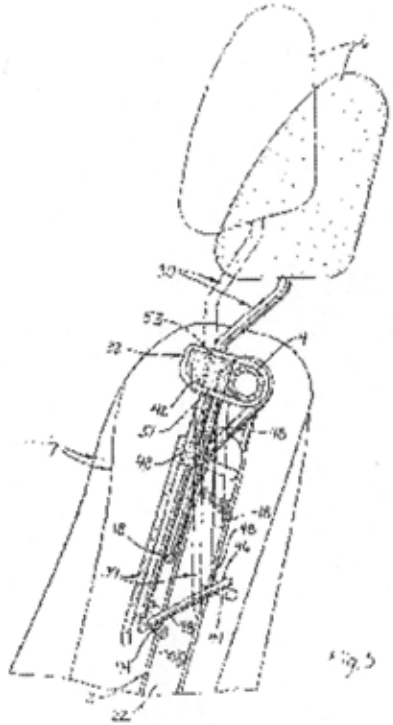
パッシブシート



[Sawada 2005]

アクティブヘッドレスト

SAHR Mechanism



US Patent 5,378,043

Issued: January 3, 1995

Filed: June 1, 1993



後方衝撃時にヘッドレストを上方・前方に動かして頭部に近づけて、頭部を支持する。

パッシブシート

Phase 1

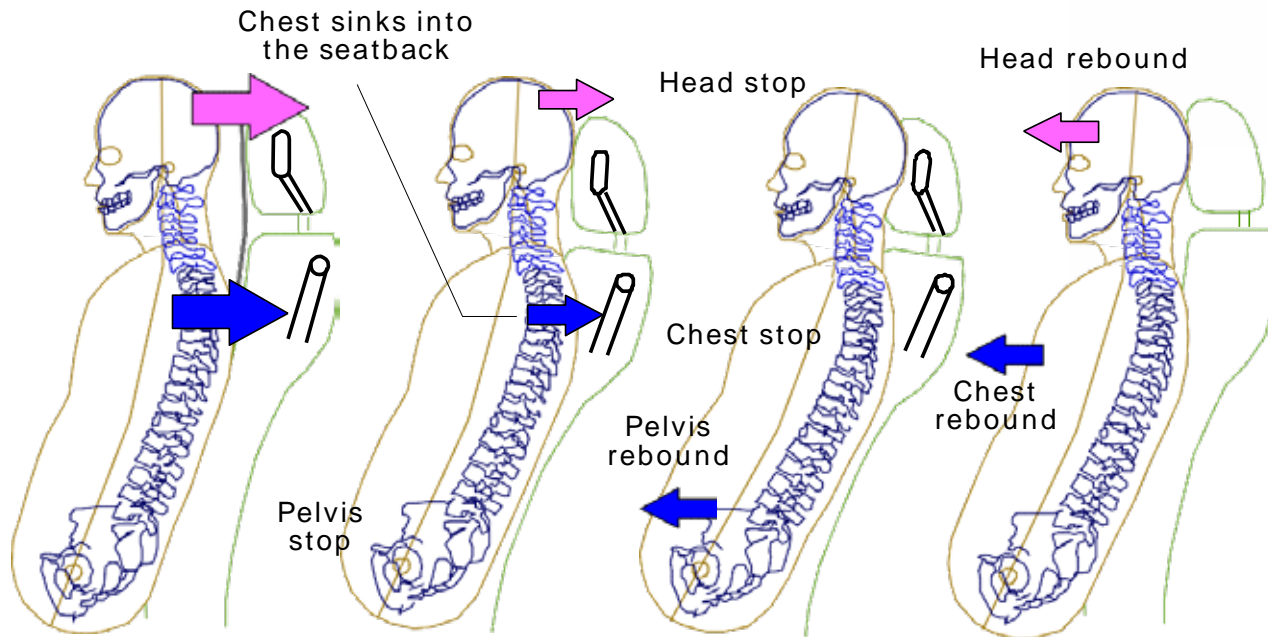
Phase 2

Phase 3

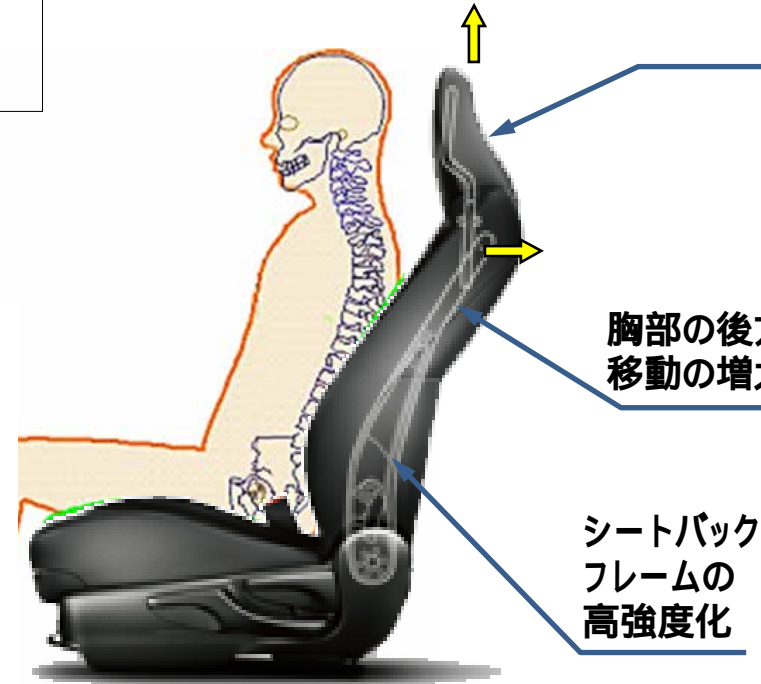
追突によってシートが前方変位する．乗員はシートに対して後方に変位する．

頭部と胸部を同時刻にシートフレームによって支持して，頸骨と胸椎の姿勢を保つ．

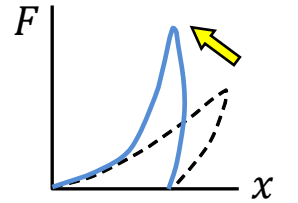
頭部と胸部の速度差を最小とする．



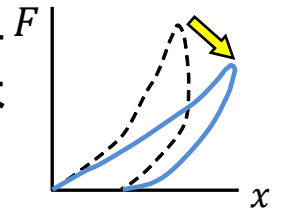
頭部を高い位置で支持



ヘッドレストのクッション

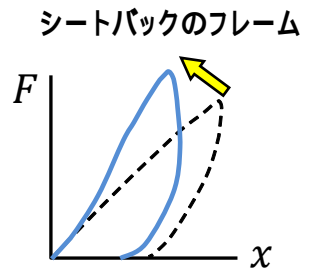


シートバックのクッション



胸部の後方移動の増大

シートバックフレームの高強度化



乗員の胸部をシートに沈み込ませることで，頸椎の姿勢を保ちつつ，頭部をヘッドレストに近づける．

自動車アセスメント (JNCAP)

<https://www.nasva.go.jp/>

The screenshot shows the NASVA website's homepage for the JNCAP 2023 results. The main banner features the JNCAP logo and the text "自動車安全性能 2023 の評価結果公表 NEW!". Below this, it highlights the "トヨタ: クラウン クロスオーバー / クラウン スポーツ" (Toyota: Crown Cross-over / Crown Sport) and includes a button that says "詳細はこちらをクリック" (Click here for details). The website header includes navigation links like "ホーム", "防ぐ", "支える", and "守る". At the bottom, there are search and menu options.

後面衝突頸部保護性能試験

自動車の衝突事故における乗員傷害のうち、後面からの衝突が乗車中の事故形態の中で最も多く、その傷害のほとんどは頸部の傷害となっています。

ここでは、後面衝突を再現できる試験機を用い、衝突された際に発生する衝撃（速度変化、波形等）をダミーを乗せた運転席又は助手席用シートに与えます。そのときの頸部が受ける衝撃をもとに、頸部保護性能の度合いを5段階で評価しています。

この試験は同一質量の自動車が停車中の自動車の時速約36.4km で衝突した際の衝撃（速度変化時速20.0km）を再現したものです。ただし、この試験における評価と実際の後面衝突事故は、衝突速度が相違する場合、質量の相違する自動車に後面から衝突された場合や乗員の乗車姿勢・体格、座席の調整位置の相違により異なることがあります。

なお、平成21年度から平成23年度は、速度変化を時速17.6kmで実施していました。



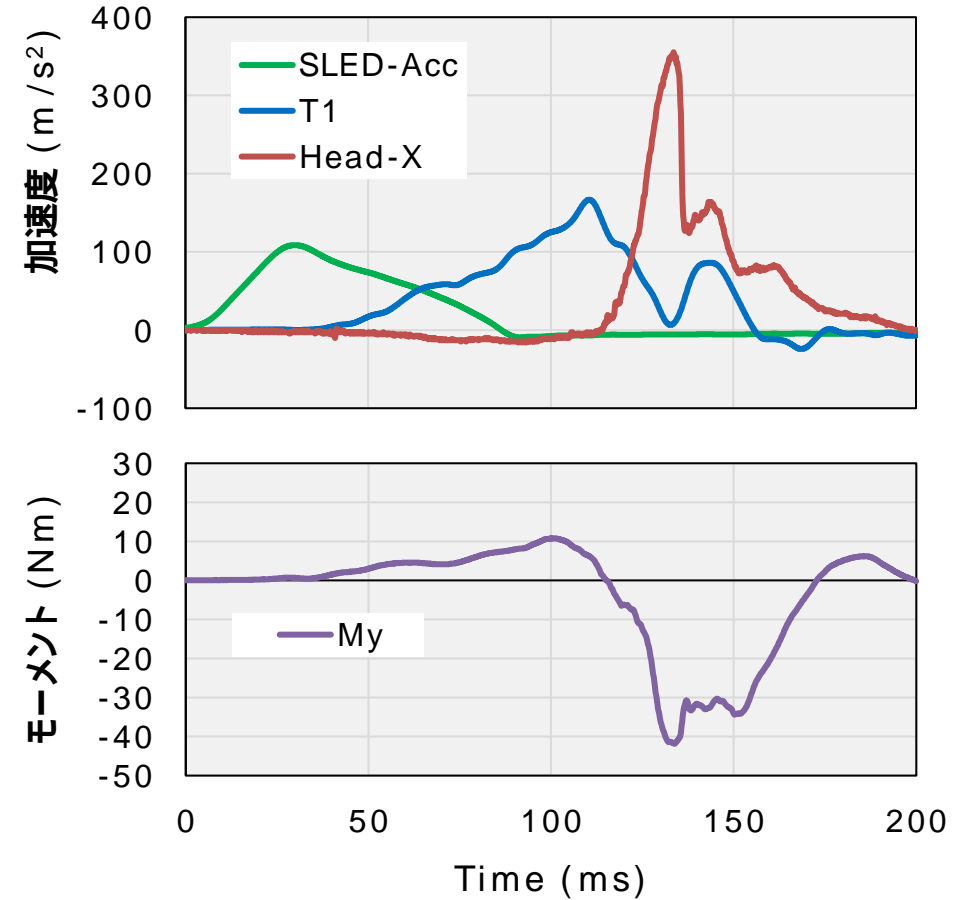
Active Head Restraint



● 後面衝突頸部保護性能試験用ダミー

「BioRID II」と呼ばれるダミーを搭載しています。このダミーは、後面衝突試験用に開発されたもので、「ハイブリッドII」に近い（身長175cm、体重約78kg（付属物を含めた試験時の質量は約85kgと なります。））仕様になっています。

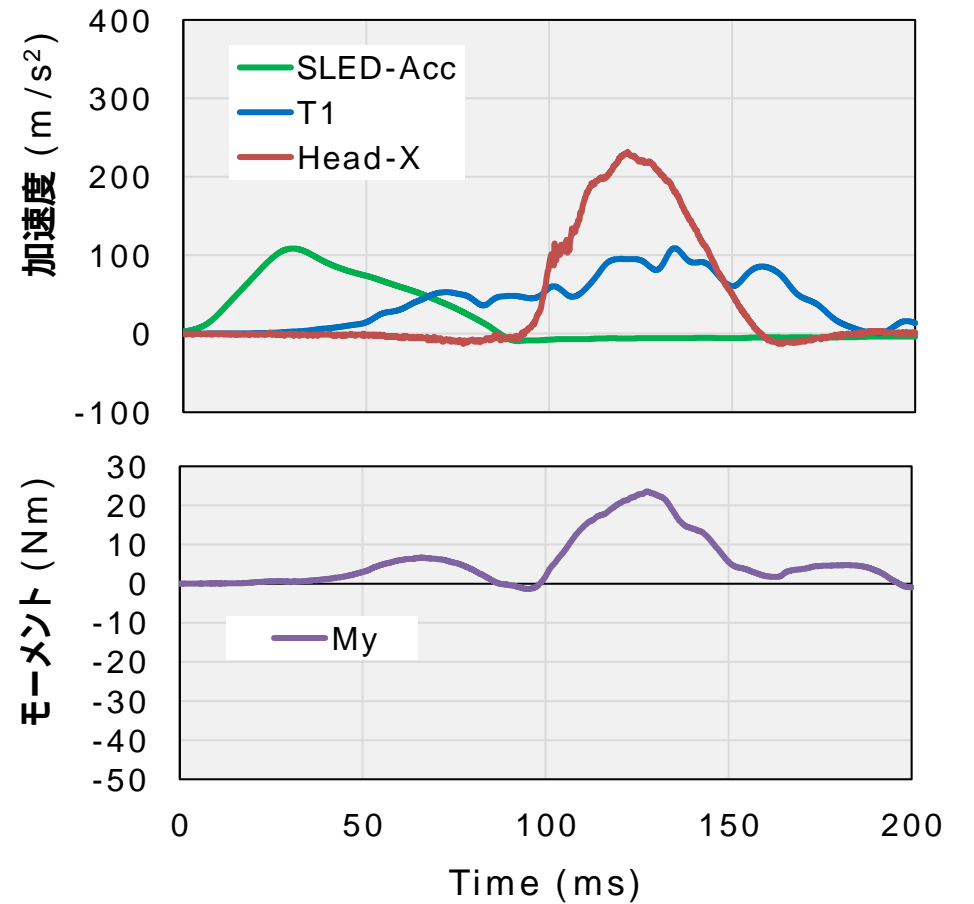
シート A



傷害基準

NIC ($<15 m^2/s^2$)	55 m^2/s^2
Fx ($<845 N$)	1268 N
My ext ($<47.5 Nm$)	41 Nm

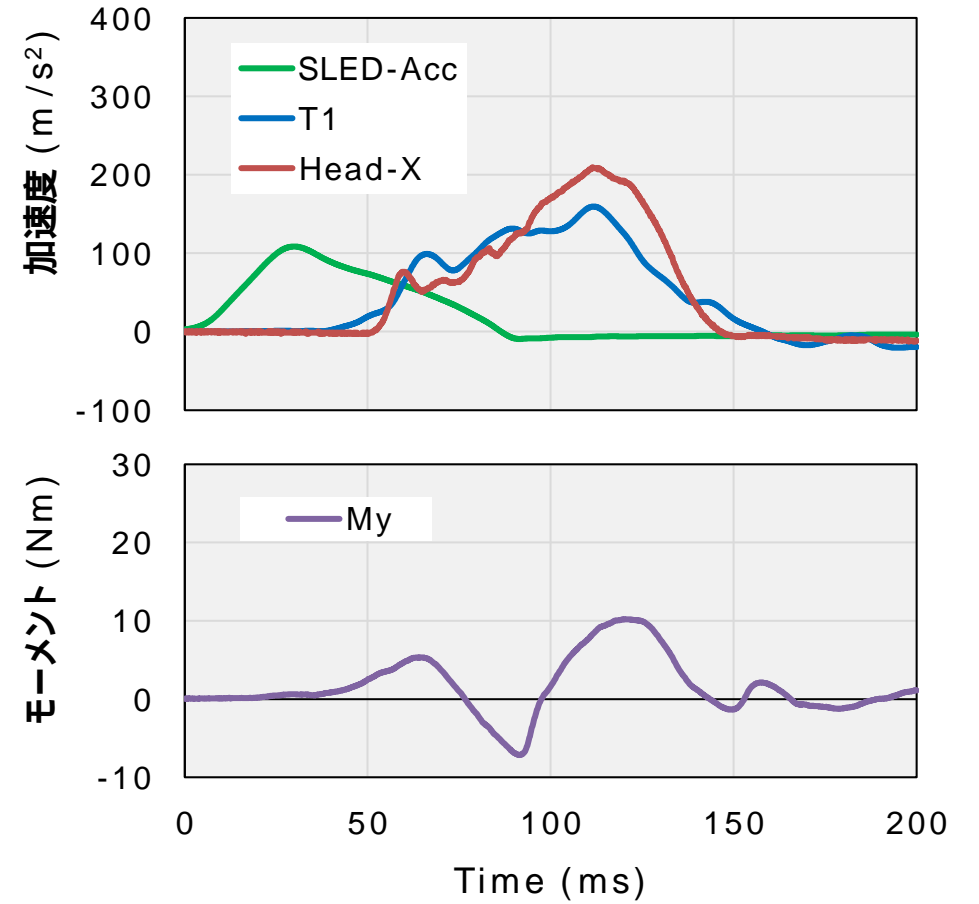
シート B



傷害基準

NIC ($<15 m^2/s^2$)	19.6 m^2/s^2
Fx ($<845 N$)	178 N
My ext ($<47.5 Nm$)	1.4 Nm

シート C



傷害基準

NIC ($< 15 m^2/s^2$)	9.1 m^2/s^2
Fx ($< 845 N$)	275 N
My ext ($< 47.5 Nm$)	7.1 Nm

ヘッドレストの推移 (トヨタ カローラ)



1966



1974



1979



1987

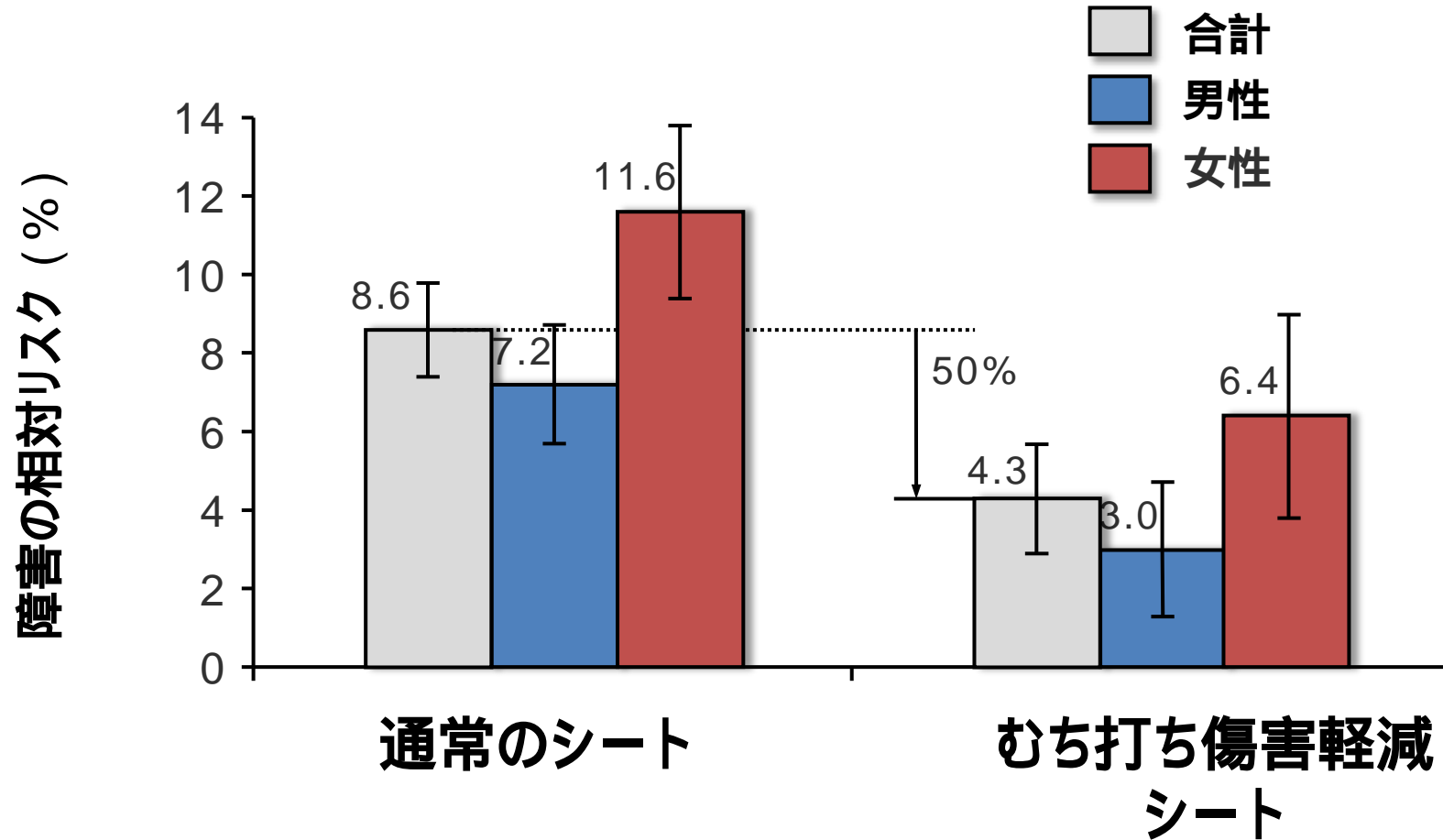


2000



2019

むち打ち傷害軽減シートの効果



今後の研究動向

- 女性の保護
- 多様な体格，姿勢の乗員の保護
- 様々な速度，衝撃波形の検討
- 衝突被害軽減ブレーキを考慮した追突衝撃条件の検討



女性ダミー
BioRID P50F

要約

- 後面衝突から1～2日後に頸部痛が出現
 - むち打ち損傷は神経と関連している
- むち打ち損傷のメカニズム：
 - 頭部後退フェーズにおける頸椎のS字形状
 - 椎間関節包に大きなひずみ
 - 血液・脳脊髄液の急激な流れによる後根神経根への負荷
- シート設計によって、後方衝撃時に頸椎を初期姿勢に保つことで、むち打ち損傷を軽減することができる
- 女性はむち打ち症のリスクが高い