

<研究課題>

自動車乗員のラップベルトと上前腸骨棘の相互作用にもとづくサブマリン発生機序の解明

代表研究者 名古屋大学大学院工学研究科機械システム専攻 研究員 田中 良彦
共同研究者 名古屋大学大学院工学研究科機械システム専攻 教授 水野 幸治

【まとめ】

自動車衝突時にはラップベルトが骨盤上前腸骨棘（ASIS）に掛かる必要がある。男女各 10名の腰ベルト着用状態の着座姿勢を CT で撮影した。大腿部と ASIS の高さの差は、BMI が増加するほど減少し、女性の方が男性よりも大きい。この差が大きいほど、ラップベルトと ASIS のオーバーラップが大きい。THOR ダミーの有限要素解析では、リクライニング姿勢においてラップベルトが骨盤から外れるサブマリンが発生した。

1. 研究の目的

自動車前面衝突時における乗員保護では、ラップベルトによる腰部拘束は基本となるものであり、衝撃中にラップベルトは腸骨前縁に掛かり続ける必要がある。特に骨盤の上前腸骨棘（ASIS）はラップベルトに対して、フックの役割を果たす（図 1）。ラップベルトが腸骨前縁から外れ、腹部に移動することをサブマリンといい、サブマリンが発生すると腹部傷害や脊椎損傷を引き起こし、シートベルトが加害する傷害として重要な課題とされる。

これまでサブマリンの発生メカニズムや対策が研究されてきたが、多くの場合、衝突前にラップベルトが骨盤上前腸骨棘（ASIS）よりも下に位置し、ラップベルトがあらかじめ ASIS にかかった状態にあることを前提としている。これは、自動車衝突試験で一般的に使用される Hybrid III AM50 ではラップベルトが ASIS と十分にオーバーラップしていることもあり、標準サイズの乗員の場合、ラップベルトが ASIS よりも下に掛かり、ラップベルトが ASIS にオーバーラップすると一般的に考えられていることによる。

本研究ではボランティアの CT 撮影によって、ラップベルトと ASIS のオーバーラップの現状を把握した。さらに、サブマリン発生メカニズム解明のため、先進衝突ダミー THOR を用いて衝突シミュレーションを行った。



図 1 ラップベルトによる骨盤拘束

2. 研究方法と経過

2-1 CT 画像解析

慶應義塾大学医学部病院が有する世界初の立位 CT を用いて、慶應大学と名古屋大学の共同研究のもと、志願者による立位、直立座位、後傾着座姿勢による撮影を実施した（図 2）。直立・後傾着座ではラップベルトを着用した。CT 画像から人体とラップベルトの位置関係が 3次元で得られ、人体外表面形状、ASIS と腰ベルトの位置関係を明確にすることができる。CT データの分析では Mimics を用いた。本計測は名古屋大学と慶應大学の共同研究（2019-559）に基づくもので、慶應大学医学部倫理委員会の承認を受けている（承認番号 20190217）



図 2 立位，直立着座，リクライニング姿勢

図3のように、CTから得られたデータを用いて、体格と腰ベルトの位置を測定した。骨盤の大きさは、骨盤高さ（腸骨上端から坐骨下端まで）と左右のASIS幅で表した。ASISを通る矢状面における体幹と大腿部の接合部で、大腿部の高さを測定した。ASISの車両前方方向(X方向)の軟組織厚さは、前面衝突時のラップベルトとASISのオーバーラップに影響する。身長とボディマス指数（Body Mass Index; BMI）を人体計測を表す基本パラメータとして用いた。

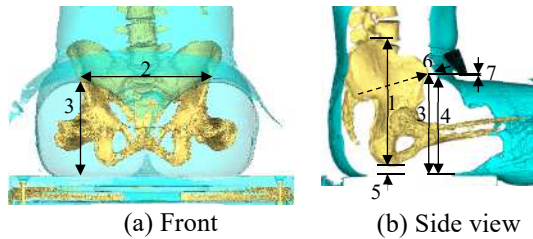


図3 身体計測の変数

2-2 THOR ダミーによる着座姿勢とサブマリン発生メカニズムの検討

動的有限要素プログラム LS-DYNA を用いて衝突シミュレーションを実施した。図4のように、先進衝突ダミーである THOR をシートに着座させ、3点式シートベルト着用状態で、衝撃加速度（50 km/h）を与えた。通常の着座姿勢（シートバック角度 25°）とリクライニング着座姿勢（シートバック角度 40°）におけるサブマリンの発生を検討した。

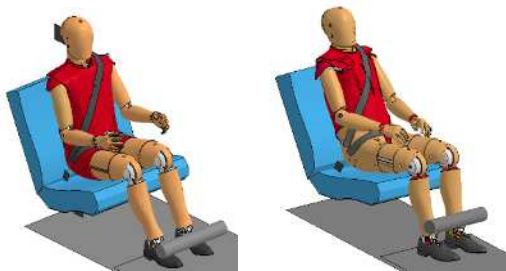


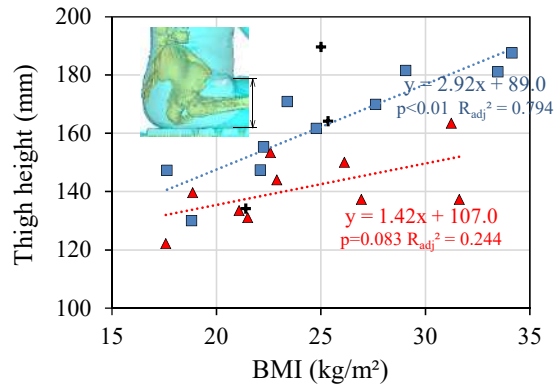
図4 シミュレーションモデル：左は標準着座姿勢，右はリクライニング姿勢

3. 研究の成果

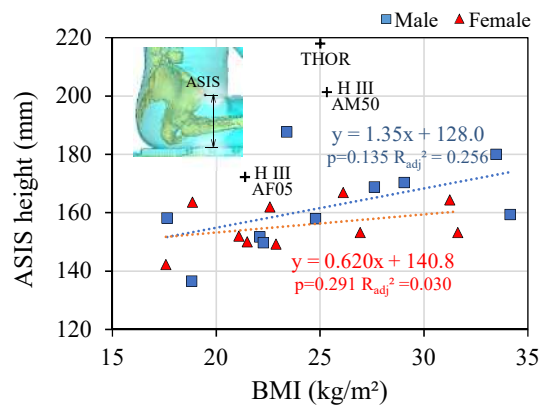
3-1 CT 画像解析

大腿部上面高さ（ASIS）について BMI の関係を図5に示す。直立座位における大腿部上面高さは BMI が增加するほど高くなる（図5(a)）。共分散分析を行うと、大腿部上面高さについては、男女間で有意な差が確認された。これは、男性に比べて女性では大腿部で脂肪の割合が多く、着座したときに、大腿部が横に広がるので、大腿部の上面高さ（前後径）が小さくなることによる。

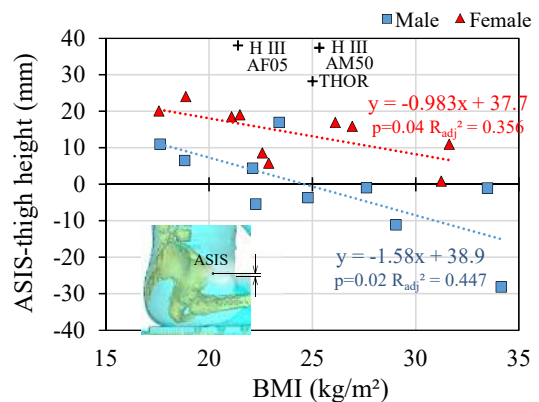
一方、ASIS 高さは図5(b)のように BMI との関係は見られない。男女間の有意な差も見られなかった。図5(c)に ASIS と大腿部上面の高さの差である ASIS-大腿部高さ（前後径）と BMI の関係を示す。BMI が減少するほど、ASIS-大腿部上面高さは大きくなる。共分散分析の結果、ASIS-大腿部高さには男女間で有意な差が見られた。これは、女性は大腿部の上面高さ（前後径）が小さいが、ASIS 高さは男女差が見られないことによる。



(a) 大腿部高さと BMI



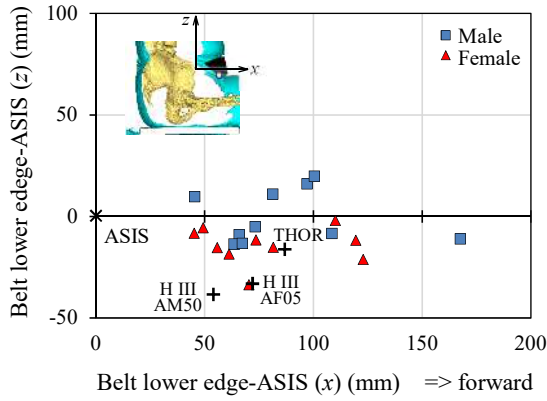
(b) ASIS 高さと BMI



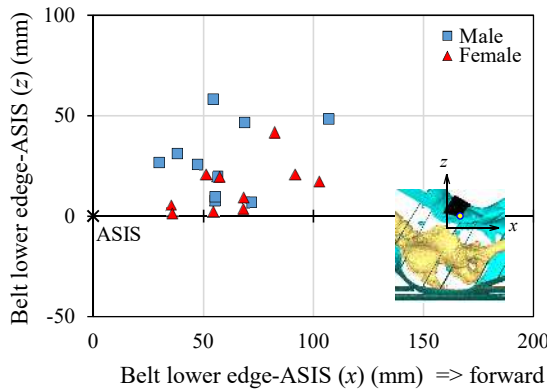
(c) ASIS-大腿部上面高さと BMI

図5 ASIS 高さと BMI

図6にラップベルト下端位置とASISの関係を示す。直立座位では、ASISより前方、およびやや低い位置にラップベルト下端高さが分布している。リクライニングでは骨盤が後傾し、ラップベルトがASISの上方に位置している。直立座位、リクライニングではともに、男性よりも女性の方がラップベルト下端位置が低く、ラップベルトが骨盤に掛かりやすいことを示している。



(a) 直立座位



(b) リクライニング姿勢

図6 ASISを原点としたときのラップベルト下端高さ

図7にラップベルトとASISのオーバーラップを直立座位とリクライニング姿勢について示す。ラップベルトとASISのオーバーラップは、ASIS-大腿部上面高さに依存する。これは、ラップベルトを体幹/大腿部境界（鼠径部）に掛けることによる。直立座位では回帰直線に男女に差が見られないが、リクライニングでは同じASIS-大腿部上面高さであっても、男性よりも女性の方が、ラップベルトのASISのオーバーラップは有意に大きい。これは、女性では腹部の鼠径部まわりの凹形状のため、ラップベルトが安定して骨盤まわりに掛かりやすいことによる。

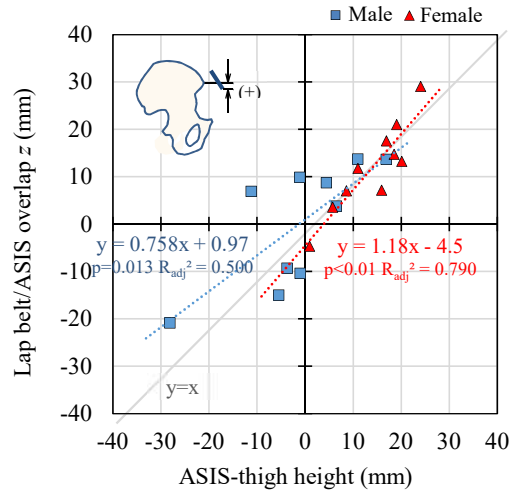
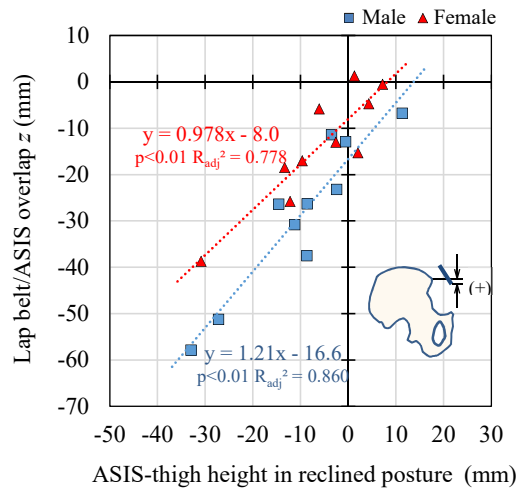


Fig.6(a) 直立座位



(b) リクライニング

図7 直立座位とリクライニングにおけるラップベルトとASISのオーバーラップ

3-2 衝撃シミュレーション

衝撃時には、大腿部から股関節に前方の慣性力が加わるので、骨盤が後傾していく。力学的に、サブマリンはラップベルトと腸骨前縁の接触力が最大摩擦係数より大きくなることでラップベルトが腸骨前縁から滑り始めることによると考えられる(図8)。ラップベルトの張力を T 、ラップベルトと腸骨前縁のなす角を θ 、ラップベルトと腸骨前縁の最大摩擦係数を μ_{\max} とすると、ラップベルトが腸骨前縁に保持されている条件は、ベルトから骨盤に人体上向きに加わる力が最大摩擦係数を越えなければよいので

$$T \sin \theta \leq \mu_{\max} T \cos \theta \quad (1)$$

となり、ここから

$$\tan \theta \leq \mu_{\max} \quad (2)$$

が得られる。したがって、ラップベルトと腸骨前縁のなす角 θ がベルトと骨盤の間の最大摩擦係数 μ_{\max} を超えなければラップベルトが腸骨前縁に保持される。

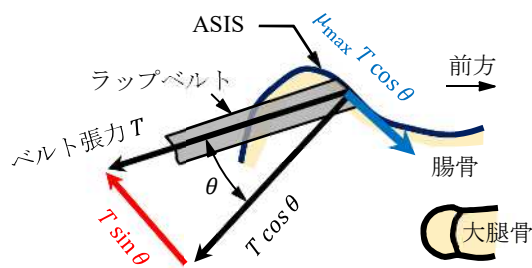


図 8 骨盤前縁に加わる力と ASIS を原点としたときのラップベルト下端高さ

図 9 に標準着座姿勢とリクライニング姿勢における THOR ダミーの挙動を示す。リクライニング姿勢では 70 ms でラップベルトが彫刻から外れるサブマリンが発生した。その結果、ラップベルトが腹部に侵入し、体幹も後傾姿勢となっている

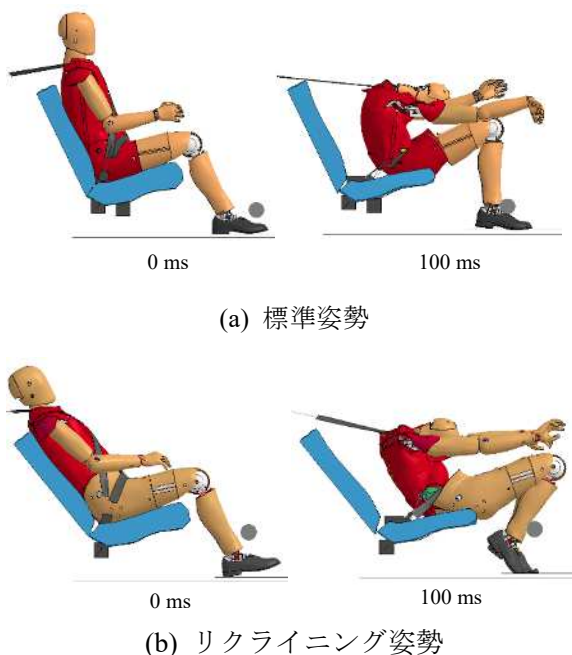


図 9 衝撃時の THOR ダミーの挙動 (50 km/h)

図 10 にラップベルトと腸骨前縁のなす角を示す。標準着座およびリクライニング姿勢の両者は時間によってベルトと骨盤前縁の角度が増加していく。リクライニング姿勢では、ベル

トと骨盤前縁のなす初期角が大きく、ベルトと骨盤前縁のなす角 17.7° でラップベルトが骨盤前縁を滑り始め、サブマリンが発生する。ここから、 $\tan(17.7^\circ) = 0.32$ となり、最大摩擦係数 0.3 とほぼ一致し、式(2)が成り立っていることが確認できる。

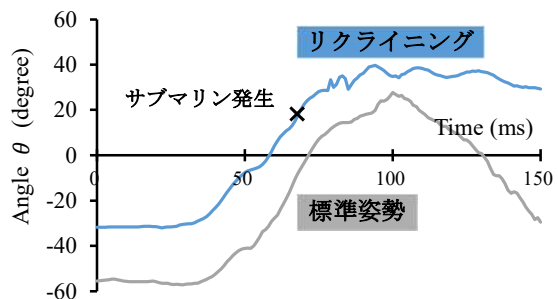


図 10 衝撃時の THOR ダミーの挙動 (50 km/h)

4. 今後の課題

これまで衝突ダミー実験や衝撃シミュレーションをもとに、女性の方がサブマリンを起こしやすいとされてきた。しかし、今回の CT による詳細な 3 次元身体計測にもとづく研究から、女性の方が、ラップベルトが骨盤に掛かりやすいことが示された。また、THOR ダミーによるシミュレーションからサブマリン発生メカニズムが明確となった。今後は、男女の身体外形状を反映した人体有限要素モデルを作成し、衝撃が加わった場合のラップベルトと ASIS の初期オーバーラップによる男女のサブマリンの発生について明確にしていく (図 11)。

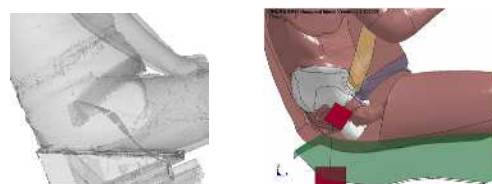


図 11 CT による形状と腹部形状を反映させた人体有限要素モデル

5. 研究成果の公表方法

本研究の成果については、自動車技術会春期講演会 (2022 年 5 月)、自動車技術会論文での発表を予定。

以上