

報告番号	甲 第 12509号
------	------------

主 論 文 の 要 旨

論文題目 自動車衝突時の減速度に対する部材寄与度の解析
(Identifying Structural Component Contributions to Deceleration Profiles in Car Collisions)

氏 名 長坂 圭

論 文 内 容 の 要 旨

世界保健機構のまとめによると、2013年時点における世界の交通事故による死者数は125万人にのぼり、負傷者数は2.5千万人と推計される。日本国内に目を向けてみると、警察庁の発表によれば、2017年中の日本国内における交通事故による死者数は3,694人（発生から24時間以内）、負傷者数は580,847人であった。第10次交通安全基本計画では、2020年までに交通事故による死者数を2,500人以下、死傷者数を50万人以下にすることを目標としており、さらなる交通事故死傷者数の減少が喫緊の課題となっている。自動車の衝突安全性能を評価する方法として、各国で定められている安全規則試験や自動車アセスメント試験があり、前面衝突に関して、現在、欧州および日本では国連 UN 規則 R137 および R94 に準拠した試験法が採用されており、フルラップ衝突とオフセット衝突により、評価が行われている。歩行者頭部保護性能に関する評価では、頭部を模擬したヘッドフォームインパクトによる打撃試験が行われている。

自動車衝突時の乗員傷害は客室の減速度に大きく依存し、客室の減速度はフロントサイドメンバー等の部材が変形してエネルギーを吸収することで発生する。したがって、車体を構成する各部材が客室減速度に及ぼす影響を知ることは、乗員にとってより安全な車両を開発するうえで、設計者にとって有用な情報となる。しかしながら、これまで車体を構成する部材の変形から客室減速度を系統的にコントロールする手法に関する研究は見あたらない。本論文では各部材が客室減速度に及ぼす寄与度を系の力学的エネルギーの時間微分にもとづき定量的に算出し、様々な衝突形態で各部材の寄与度を明確にする。

また、エネルギー微分法を歩行者頭部保打撃シミュレーションに応用することで、頭部インパクトの減速度に対する車体部材の寄与度を求める。

本論文は6章で構成される。第1章は緒論であり、最初に交通事故統計データから自動車乗員と歩行者保護の重要性について述べる。次に自動車の衝突安全性能評価のために実施される各国の法規試験やアセスメント試験について触れ、衝突時の客室減速度と乗員傷害リスクの関係や、乗員にとって最適な減速度特性について研究された事例の調査から、自動車衝突時において客室減速度が乗員に負荷を与え、乗員傷害に最も大きな影響を及ぼすことを述べる。さらに客室減速度と密接に関係する部材の変形モードやエネルギー吸収特性の最大化に関する文献を調査する。また、現在の自動車開発で欠かせないCAEによる衝突シミュレーションの活用事例について調査し、これまで実施されている客室減速度の設計方法を述べるとともに、自動車乗員保護のために系統的な客室減速度の設計方法を確立するという本論文の目的や意義を述べる。

第2章「エネルギー微分法」では、前面衝突におけるエネルギー保存則の微分に基づき、客室減速度に対する任意の部材の寄与度を求める式を導出する（これをエネルギー微分法と呼ぶ）。さらにエネルギー微分法の式を1次元から2次元に拡張し、回転や横方向移動の影響を考慮できるようにする。次に、クラッシュボックスやフロントサイドメンバー等のエネルギー吸収部材を簡易的に模擬した中空角管の圧潰シミュレーションを実施し、エネルギー微分法の妥当性について検証する。さらに同様の簡易シミュレーションモデルを用いて、従来の断面力を用いた評価方法では、客室減速度に対する部材寄与度を求められないことを示し、この点に関するエネルギー微分法の優位性を示す。得られた各部材の寄与度の合計は、客室減速度とおおむね一致しており、エネルギー微分法は、前面衝突における客室減速度に対する各部材の寄与度を求める上で有用な方法であることがわかった。

第3章「客室減速度に対する部材寄与度の計算」では、小型乗用車の有限要素モデルを用いた前面衝突シミュレーションを実施し、これにエネルギー微分法を適用することで、客室減速度に対する各部材の寄与度を定量的に求める。エネルギー微分法では、クラッシュボックスやフロントサイドメンバー等の部材変形によるエネルギー吸収の寄与度だけでなく、エンジンのような質量の慣性力の寄与度についても評価できることを示す。

さらに、オフセット前面衝突や車対車衝突のシミュレーションを実施し、エネルギー微分法を適用することで、それぞれの衝突試験条件における部材寄与度の傾向や、ハニカムバリアおよび相手車両の寄与度について調べる。求めた各部材の寄与度の合計とおおむね一致しており、エネルギー微分法は、前面衝突における客室減速度に対する各部材の寄与度を求める上で有用な方法であることがわかった。

第4章「乗員減速度に対する部材寄与度」では、エネルギー微分法を用いて、乗員減速度に対する部材寄与度を求める方法について検討する。しかし、乗員の質量が車両の質量に対し小さいため、エネルギー微分法で直接、乗員減速度に対する部材の寄与度を求めることは難しいことがわかった。そこで、拘束装置の力-変位特性特性が線形で近似できる点に

着目し、エネルギー微分法とデジタルフィルターの一種である有限インパルス応答 (FIR) を組み合わせることで、乗員減速度に対する部材の寄与度を求められることを示す。これにより、乗員の減速度は、特に客室の変形に大きな景況を受けることが示された。

第5章「歩行者頭部打撃シミュレーション」では、エネルギー微分法の応用事例として、歩行者頭部打撃シミュレーションに適用し、ヘッドフォームインパクトの減速度に対するボンネットフードの寄与度を求める。頭部インパクトは回転運動を伴うため、2次元のエネルギー微分法を適用する。歩行者頭部打撃では、ボンネットフードの変形抵抗と慣性抵抗が作用してヘッドフォームインパクトに減速度が生じるが、エネルギー微分法であれば、変形抵抗と慣性抵抗の寄与度をそれぞれ分けて求められることを示す。これにより本手法は、従来の断面力を用いた方法では評価が難しかった、慣性抵抗による寄与度についても定量的に求められることを示した。これにより剛性と質量がそれぞれヘッドフォームインパクトの減速度にどのように寄与しているかがわかり、ボンネットフードを設計する上で有用な指針を示すことができる。

第6章「結論」では、本研究で得られた知見を要約するとともに、車両開発において本手法を用いることの意義について述べる。力学的エネルギー保存則に基づき導出されたエネルギー微分法に、有限要素シミュレーションで得られる各部材の力学的エネルギーを代入することで、減速度に対する各部材の寄与度を求めることができる。減速度に対する部材の寄与度を求めることは、複雑な減速度波形の発生要因を特定し、減速度波形の理解を促進する上で重要である。

減速度に対し寄与度の高い部材を優先的に対策することで、減速特性の最適化検討や、車両構造設計を効率的に行えるようになると期待される。また、衝突試験とCAEの減速度波形に乖離が見られる場合、乖離している箇所に寄与している部材が特定できれば、CAEモデルの精度向上に役立つと考えられる。エネルギー微分法では、個々の部材の変形抵抗と慣性抵抗の寄与度を定量的に求めることができるため、例えば近年注目されているモデルベース開発 (MBD) で必要なバネ質量系で物理モデルを構築する際に、個々の部材に物理的に裏付けられた特性を与え、システムの同定をすることが可能となる。

エネルギー微分法は、有限要素法による衝突シミュレーション結果に対して適用することを前提に開発されたものであり、非常にシンプルな式で表される点で、自動車開発者 (特にCAE技術者) にとって扱いやすい方法といえる。また、従来の断面力を用いた方法では得られなかった、慣性力の影響についても評価できる点は、エネルギー微分法の優位性の一つである。エネルギー微分法は、変形抵抗だけでなく慣性抵抗の寄与度も表すことができる手法であるため、さらなる車両の軽量化に向けて、衝突時の減速度をどのように抑えていくかべきか検討する際に、本手法が適用できると考えられる。