研究論文

転倒時保護機構に対応したゲレンデ整備車のキャビン製造に係わる安全性と低コスト開発

須貝　裕之*　片山　聡**　本田　崇*　小林　邦夫***　村上　光徳***

Development of Cabin of Snow Grooming Equipment with Roll Over Protective Stracture by CAE Analysis

SUGAI Hiroyuki*, KATAYAMA Satoshi**, HONDA Takashi*,
KOBAYASHI Kunio***and MURAKAMI Mitsunori***

抄　　録

コンピューターシミュレーションにより，転倒時保護構造（ROPS）に対応したゲレンデ整備用雪上車のキャビンの外付け補強を開発した。汎用有限要素法解析ソフトウエアを用いて，コンピューターで試作キャビンの ROPS 試験と評価を繰り返して，低コストで強度の高い外付け補強形状を検討した。外付け補強形状の完成後，実際に外付け補強キャビンを製作して ROPS 試験を行い，ROPS 規格を満足することを確認した。

1. 緒　　言

クレーンやブルドーザーなどの建設作業車には，横転時に乗員が車に押しつぶされることを防ぐため，キャビンの強度を規定する転倒時保護構造（Roll Over Protective Structure，以下 ROPS と略す）が規格化 [1] されている。スキー場で雪面の整備を行うゲレンデ整備用雪上車については，日本国内では ROPS 規格は適用されていない。しかし，ヨーロッパではすでに適用が進んでおり，日本においても乗員の安全確保の観点より今後適用が予想される。

一方，ROPS 規格では，実車の運転席を大荷重で変形させる試験により強度を評価する。試験の際、運転席は 200mm 前後に大きく変形し，構造材料も弾性域を超えて塑性変形する。このため従来の弾性域の微小変形を前提とした強度計算では対応できず，ROPS キャビン構造の開発は実物の試作と試験を繰り返す方法が主体となる。ゲレンデ整備用雪上車の場合，キャビンの骨材寸法は一辺約 1.6m，重量約 160 kg と大きいため，実物の試作と試験の繰り返しには多大な費用と時間を要する。

そこで本研究では，図 1 に示す(株)大原鉄工所製のゲレンデ整備用雪上車 DF-430（全長 10.09 m，全幅 6.23 m，全高 2.91 m，車両質量 10.10 t）を対象として，コンピューターシミュレーションにより低コスト・高強度な外付け補強キャビンを開発した。

図 1　対象としたゲレンデ整備車

最初に，シミュレーション上で試作キャビンの ROPS 試験と評価を繰り返して，低コストで強度の高い外付け補強形状を検討した。シミュレーション結果をもとに実際にキャビンを製作し，ROPS 試験を行って強度を確認した。

*　研究開発センター
**　中越技術支援センター
*** (株)大原鉄工所

2.　ROPS 試験について

ROPS 試験方法について概略を説明する。JIS 規格 A8910 によれば ROPS 試験が想定するのは，走行速度 16km/h 以下で，傾斜角 30°以下の硬い粘土地盤の斜面上を転がって，機械の前後方向軸を中心に 360°転倒する状況である。この状況を模擬するため図 2 に示す手順で ROPS 試験を実施する。

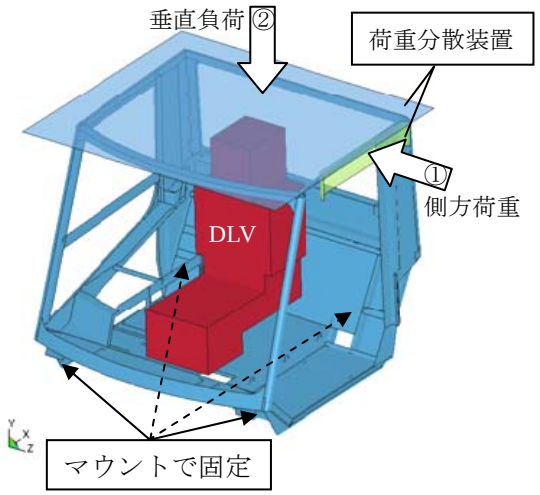

図 2　ROPS 試験方法

試験対象のキャビンを実際に車体に取り付けられる時と同じ位置で地面に固定する。最初に側方から所定の荷重（①側方負荷試験）を加える。次に，上方から所定の荷重を加える（②垂直負荷試験）。なお，試験中に荷重着力点が局部的に試験体に食い込むことを防ぐため、荷重分散装置を用いることもある。試験中に乗員を模したたわみ限界領域 DLV（Deflection Limiting Volume）にキャビンのフレーム等が接触しないことが要求される。

表 1　荷重とエネルギー

機械質量 (M) kg	700<M<4630 kg	4630<M<59500 kg
側方荷重 N	$3.6\times M$	$42000\left(\frac{M}{10000}\right)^{1.20}$
側方エネルギー J	$7800\left(\frac{M}{10000}\right)^{1.25}$	
垂直荷重 N	$11.77\times M$	

表 1 にゲレンデ整備車の ROPS 規格が規定されている BS EN15059[2] の試験荷重を示す。試験荷重は対象とする雪上車の総重量 M をもとに計算される。表中の側方エネルギーについて説明する。図 3 に側方負荷試験時の荷重と荷重着力点のストロークの関係を模式的に示す。図中の実線はストロークに対する荷重の変化である。側方エネルギーは図の斜線の面積に相当し，キャビンを変形させるために必要なエネルギーである。これにより強度だけでなく，衝撃吸収性能も評価する。側方負荷試験では，荷重値だけでなく側方エネルギーも同時に満たす必要がある。

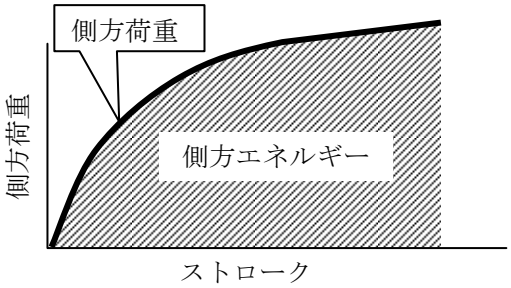

図 3　荷重-ストロークのグラフ

表 2 に今回対象とする DF-430 の装備重量をもとに表 1 の式を用いて計算した荷重とエネルギーの値を示す。

表 2　DF-430 の荷重とエネルギー

機械質量	10,100 kg
側方荷重	42,505 N
側方エネルギー	7,898 J
垂直荷重	118,877 N

3.　シミュレーションによる ROPS 構造の開発

3.1　解析ソフトウエア

解析モデルの作成には三次元 CAD ソフトウエア SolidWorks を使用した。また，要素分割には ANSYS WorkBench ver.11 を使用し，解析には汎用動的陽解法有限要素法ソフトウエア LS-DYNA ver.971 を使用した。結果の表示には LS-PrePost を使用した。

3.2　従来型キャビンの ROPS 試験シミュレーション

最初に，従来型キャビンの ROPS 試験シミュレーションを行った。このキャビンは ROPS 規格を考慮に入れて設計されていない。図 4 に解析モデルを示す。

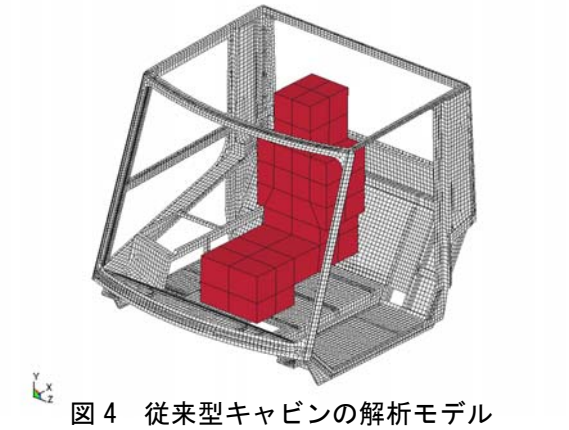

図 4　従来型キャビンの解析モデル

三節点と四節点のシェル要素を用いてモデルを作成した。要素数は 25938，節点数は 25633 である。シェル要素の定式化は Belytchko-Tsay を使用した。なお，DLV に関しては八節点ソリッド要素を用いてモデル化してある。

解析に使用する材料特性を調べるため，キャビンに使用されている材質 SPCC の引張試験を行った。試験形状は JIS Z2201 の 4 号試験片とし，板厚は 3.2t とした。材料試験機は，（株）島津製作所製，万能材料試験機オートグラフ AG-100KNG-M1 を使用した。試験速度は 5 mm/min とし，伸びの測定にはビデオ伸び計 DV200 を使用して，弾性から塑性域にいたる

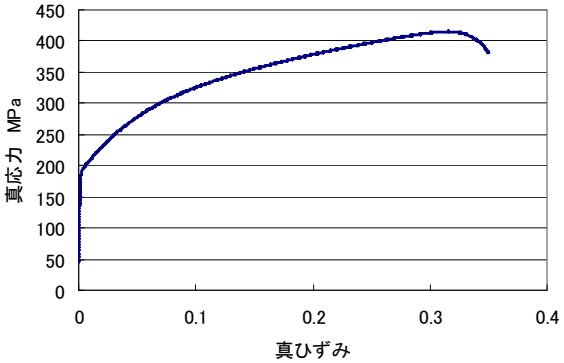

図 5　SPCC の応力—ひずみ曲線

応力－ひずみ特性を調べた。図 5 に試験結果を示す。上記のデータをもとにして ROPS シミュレーションを行った。

図 6 に側方負荷試験時の荷重と着力点ストロークの計算結果を示す。図 7 にフレームが DLV に接触した，着力点ストローク 610 mm におけるキャビンの変形状態と Mises 応力分布を示す。

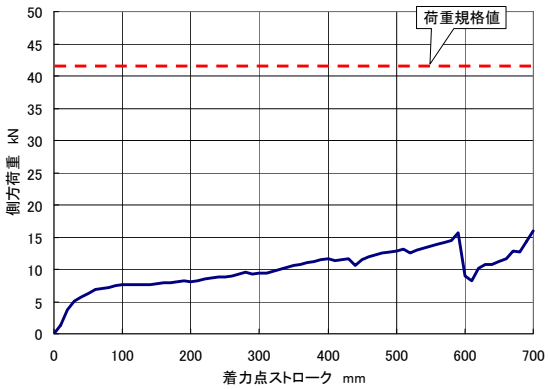

図 6　側方負荷試験計算結果

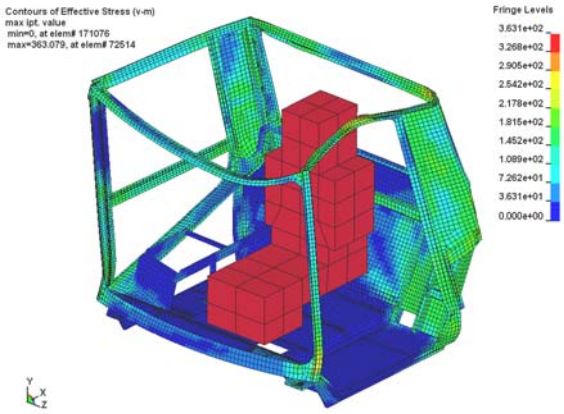

図 7　キャビンの変形状態と応力分布

フレームが DLV に接触するまで変形させても，側方荷重の目標値 42 kN に対して荷重は 15 kN 程度までしか上がらなかった。

3.3　外付け補強キャビンの開発

前章の結果より，従来型キャビンでは ROPS 規格を満足しない可能性が高いことが確認された。そこで，従来型キャビンに取り付けることによって，ROPS 規格を満足する外付け補強を検討した。図 8 に外付け補強の初期案を示す。

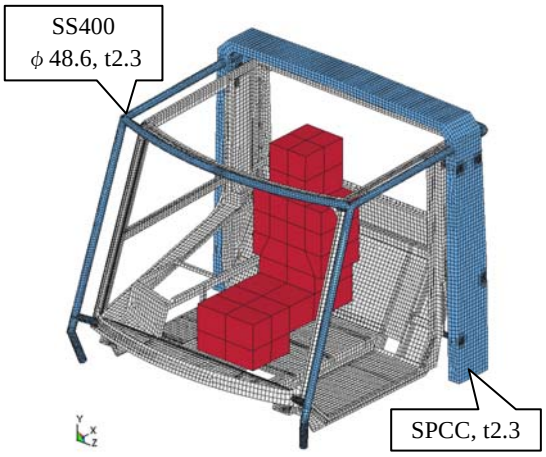

図 8　外付け補強初期案

外付け補強には強度だけでなく，ドアの開閉に支障を来さないことや，運転席からの視界を可能な限り妨げないこと，そして軽量・低コストであることが要求される。そこで，キャビン前半分はパイプによるロールケージとして視界を確保し，後ろ半分は強度を確保するため板材を用いた門型形状として強度を上げた。また，板厚の変更が容易に行えるよう，外付け補強もキャビンと同じくシェル要素でモデル化した。

このようにしてコンピューター上で外付け補強の試作と ROPS 試験のシミュレーションを繰り返すことにより開発を行った。図 9 に外付け補強最終案の形状を示す。

ROPS 試験では，側方負荷試験を満足した場合，引き続き垂直負荷試験を実施する。側方負荷試験終了後にキャビンが大きく傾いた状態に

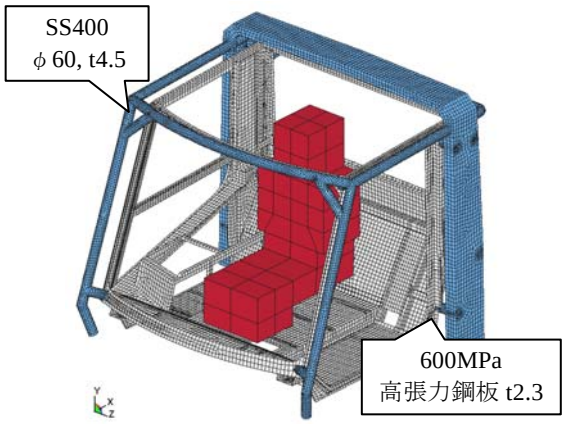

図 9　外付け補強最終案

変形していると，垂直負荷に対して不利な状態となる。そこで，門型補強は弾性域が広く強度の高い 600Mpa 級の高張力鋼板を使用した。

図 10 に側方負荷試験時の荷重とエネルギーに対する着力点ストロークの計算結果を示す。図 11 に着力点ストローク 190 mm におけるキャビンの変形状態と応力分布を示す。

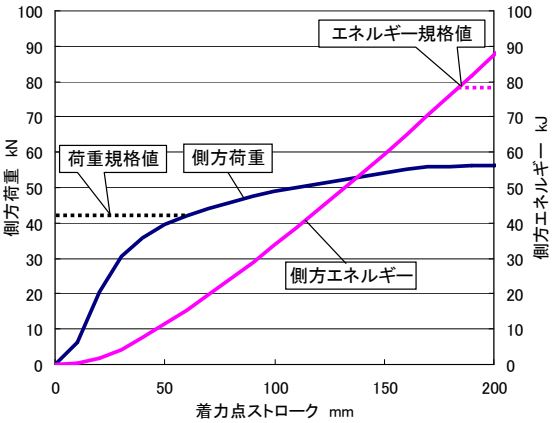

図 10　側方荷重，エネルギーとストローク

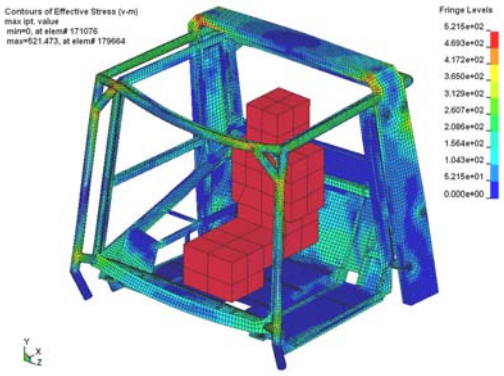

図 11　キャビンの変形状態

計算の結果，ストローク 60 mm で荷重を満足し，190 mm でエネルギーを満足する。また，図には示していないが，引き続き行った垂直負荷試験も着力点ストローク 50 mm で荷重を満足した。

4.　実車の ROPS 試験による強度確認

シミュレーションの結果を確認するため，最終案をもとに実際に外付け補強を作成し ROPS 試験を行った。

4.1　ROPS 試験装置について

ROPS 試験を行うため，ROPS 試験装置を製作した。図 12 に概要を示す。

図 12　ROPS 試験装置

H 鋼によりフレームを構成し，荷重は油圧シリンダーにより負荷する。側方負荷シリンダーの先端は半球，垂直負荷シリンダーはフレームとユニバーサルジョイントで結合することにより，荷重分散装置に回転モーメントが作用しない構造となっている。試験中の荷重値の測定は，油圧シリンダーに取り付けた圧力センサーの値から換算する。また，荷重着力点の変位はワイヤー式変位計（(株)ムトーエンジニアリング製 DES-91-V）により測定する。これらの値は測定用パーソナルコンピューターに所定の間隔で取り込まれ，画面上（図 13）に表示される。

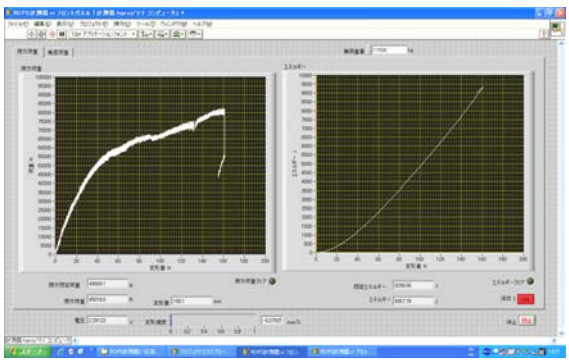

図 13　ROPS 試験結果表示画面

4.2　ROPS 試験結果

実際に，ROPS 試験を行った結果を図 14 にシミュレーションの結果と比較して示す。実線が試験，点線がシミュレーションの値である。試験の結果，側方負荷ストローク 40 mm と 160 mm で，側方荷重，エネルギーそれぞれが ROPS 規格を満足したため試験を終了した。

シミュレーションと試験の結果について比較する。側方負荷荷重について見てみると，試験開始からストローク 40 mm まではほぼ同じ値であるが，それ以降でシミュレーションの方が高い傾向がでている。実験値を基準とした場合の最大誤差は＋20%程度となった。この原因として，門型補強溶接部の強度不足が考えられる。理由としては試験の最中数回に渡って大きな破断音が生じたこと。試験終了後に門型補強溶接部が数カ所破断していたこと。シミュレーションでは溶接部の強度を母材と同等として計算していたことがあげられる。

側方エネルギーについて見てみると，実験値に対するシミュレーションの誤差は－9%と荷重ほどに大きくなく，ストロークではシミュレーションの 146 mm に対して実験では 160 mm と 14 mm の差であった。

側方負荷試験の特性として，最初に側方荷重を満足し，その後エネルギーを満足する。従って今回の ROPS 試験のシミュレーション精度として重要なのは，負荷エネルギーの方であり，今回のシミュレーションの精度－9%は十分実用に耐えるものと考えられる。

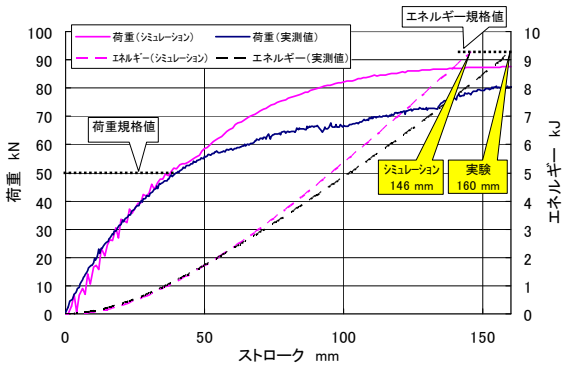

図 14　実験とシミュレーションの結果比較

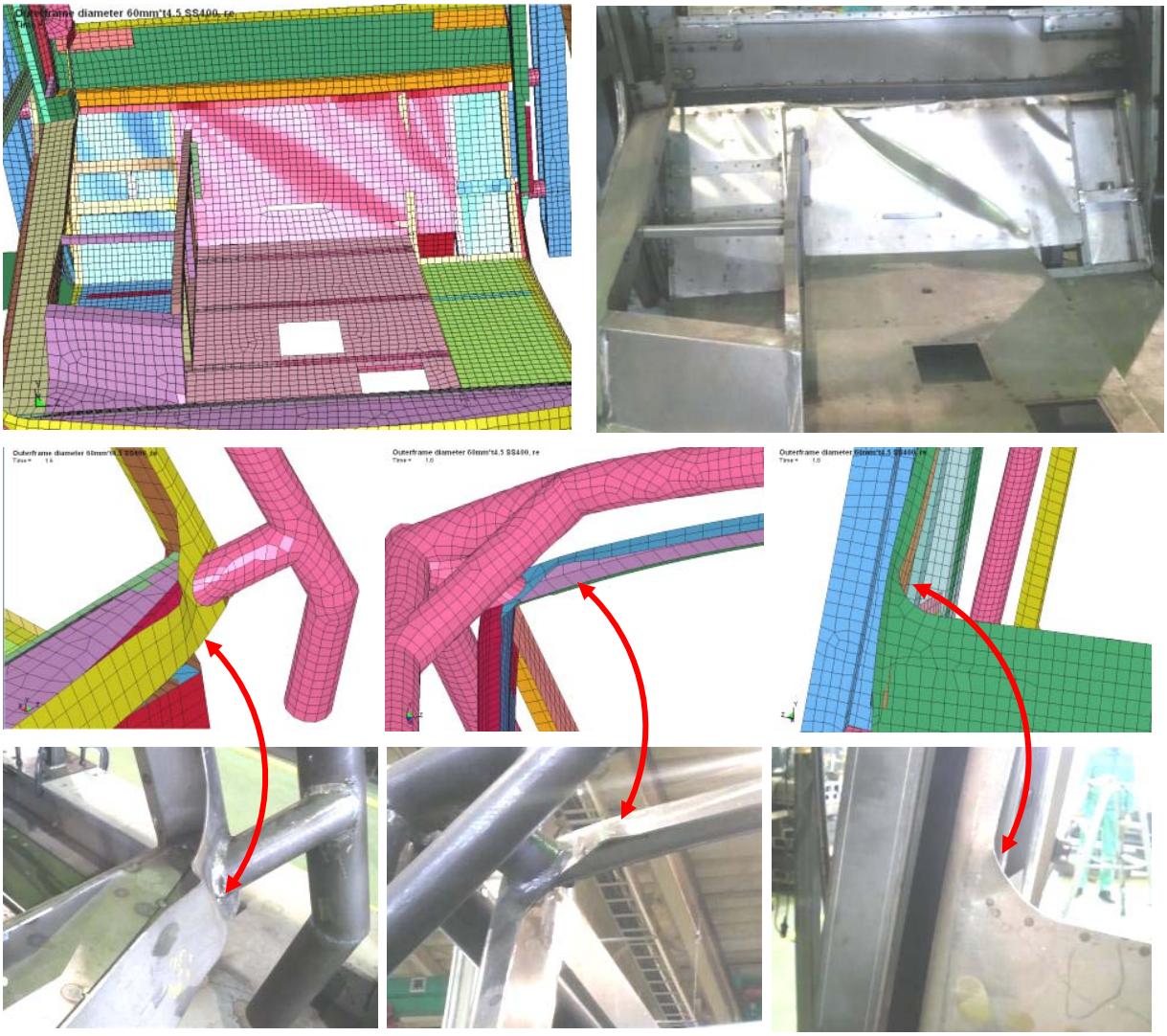

図 15　キャビン変形状態の比較

側方負荷試験終了後のキャビン各部の変形状態をシミュレーションの結果と比較して図 15 に示す。シミュレーションにより予測された各部の変形状態と極めて近い結果になっているのがわかる。

5.　結　　言

本研究で得られた結果を下記にまとめる。

（1）コンピューターシミュレーション上に構築した ROPS 試験装置と試作キャビンにより外付け補強キャビンを開発した。

（2）シミュレーションによって開発したキャビンを実際に製作して ROPS 試験を行った結果，目標の強度であることを確認した。

参考文献

1）JIS A8910　土木機械－転倒時保護構造－試験及び性能要求事項

2）BS EN15059　Snow grooming equipment-Safety requirements，2009，p11.