

油圧ショベルの転倒時保護構造 (ROPS) (ISO12117-2)

—日本発信の国際規格に至るまで—

田中 健三

油圧ショベルの転倒時保護構造 (ROPS) が、2008年12月に ISO12117-2 として制定・発行された。この規格化に当たって、国内の油圧ショベルメーカー、日本建設機械化協会や ISO/TC127 (土工機械専門委員会) 日本委員会など関係者が協同して ISO 規格化に取り組んだ。日本として、国際規格への発信を標榜している中、この規格の ISO 化は日本提案の ISO として日本の地位を大きく高めた。

この規格制定に至った経緯と ISO12117-2 の規格概要について記述する。

キーワード：油圧ショベル，運転者保護構造，ROPS，TOPS，ISO12117-2，ISO3471，

1. はじめに

転倒時保護構造 (ROPS) の規制・規格制定の歴史を調べて見ると、1960年代の後半に米国において、建設現場や木材伐採現場における建設機械の転落・転倒によるオペレータの死亡事故が多発したことにより、表—1に示すように、OSHA (アメリカ連邦職業安全・保険局) が1970年に規制化したのが最初であろう¹⁾。このROPSに関する規定はOSHA規制 (§1926.1000) として、現在も生きている。

この当時の建設機械としては、タイヤローダ・ドーザやブルドーザ、モーターグレーダが主要な建設機械であったことから、それぞれの機械毎に、米国のSAE規格 (SAE J394, J395, J396) が準拠規格として制定された。これら個別機械毎の規格も建設機械全般のROPS規格SAE J1040として1974年にSAE規格は統一された。一方、国際規格化の動きから、このSAE規格をベースに1980年にはISO3471が制定され、そして2003年にはSAE J1040は廃止され、ROPSのSAE規格は国際規格ISO3471に置き換わった。

建設機械以外の産業用トラックや農業・林業用トラクターでも、機械の転倒による死亡事故を防止するため、ISOでROPS規格が制定されてきた。又、最近では搭乗式の芝刈り機もISO規格が制定された。

このように、転落・転倒によるオペレータの死亡事故を防止するための運転者保護構造としてROPSの有効性が認知されてきた。

しかし、建設機械全般のROPS規格であるISO3471も油圧ショベルは適用外となっていた。これは、油

圧ショベルは、前方に大きな作業機を持ち (写真—1参照)、機体が転倒する前に作業機で支えることができるので、転倒を未然に防止できる可能性が高い、そして、走行の比率が低いので転倒の比率も低いと考えられ適用されなかったと思われる。



写真—1 油圧ショベル

ところが、国内でも油圧ショベルは平地作業が多い都市土木から、より転倒の危険がある傾斜地や不整地での作業が多い林道・碎石・ダム工事へと使われ方が拡大・変化するにつれ、油圧ショベルの事故の中でも転倒事故が大きな割合を占めていることがわかった。

そこで、業界でも運転席を強化する必要性を認識し、強度基準を作成することになった。安全に関わることなので、各社ともに同一基準レベル以上の強度を持つことにより、どこの会社の油圧ショベルでも安心して使用できるようにするというのが業界の一致した意見であった。ここでは、業界協調の規格づくりから、日本発信のISO規格に仕立て上げるまでを順を追って、紹介する。

油圧ショベル)が横転(90°の横倒し)しやすいとされ、横転時保護構造(TOPS: Tip Over Protective Structure)が1997年にISO規格化されている。これは対象が6tまでの機械に限られていて、6tを超える油圧ショベルで、「360°転がり落ちる」のに耐えるROPSの規格はなかった。

油圧ショベルはメーカーが日本に集中していることから、まず、日本国内で業界規格を作成することとした。日本建設機械化協会の標準部のISO規格部会の中に「TOPS分科会」(ROPSがTOPSの延長線上にあると意味を込めて)を設け、油圧ショベル国内各メーカーと当時の建設機械化研究所(現施工技術総合研究所)とで、検討を開始した。

(1) 機械転倒試験

従来の油圧ショベルの運転室(キャブと呼ぶ)は、風雨に晒されない運転空間をオペレータに提供するためのもので、できるだけ軽量の構造とし、転倒に耐える強度は特に必要とされなかった。このため、機械が転倒すると、機械の重量がキャブにかかり、写真-2のように原形をとどめず変形する事例もあった。



写真-2 転倒後のキャブ損壊の例

転倒時に、オペレータの空間を確保するキャブ構造はどの程度の剛性が必要かを把握するため、実際の機械を用い、転倒試験を実施した。この転倒試験には、転倒してもオペレータ空間を確保できるよう特別に設計したキャブ構造物を油圧ショベルに装着し転倒させ変形させた。一方、同一構造の新品のキャブ構造物に油圧シリンダを用いて載荷し変形させ、その時の変形量を転倒試験での変形量と一致させた。このときに要した荷重から構造物が吸収したエネルギーを把握した。試験の概要については次の通りである。

(a) 供試油圧ショベル

転倒時のキャブへの衝撃は機体重量の大きさに関係するので、市場で稼動実績がある、12t、20t、44tの油圧ショベルを転倒させることとした。ただし、従

来のキャブは転倒した際に機体重量相当に耐える強度は有していないので、ある程度は変形するが衝撃を吸収し得る強度の擬似キャブを製作し、転倒させた。

(b) 転倒地面の条件

従来のISO3471「ROPS試験方法」は、傾斜角度30°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、ことを前提条件としているので、油圧ショベルもこの条件に従った。

(c) 転倒姿勢

油圧ショベルが転倒するときの姿勢は、走行中に道路わきの斜面に車体が乗り入れ、バランスを崩し転倒するということを想定した。走行姿勢は、作業機最大リーチ姿勢、作業機先端のバケットを地面よりわずか上方に位置するようにした(写真-3参照)。実際の転倒事故の写真から類推すると、作業機は比較的キャブより高い位置にあり、その結果キャブの変形を小さく抑えることになるが、試験としては、できるだけキャブに負荷がかかる条件を想定して試験した(写真-4参照)。



写真-3 転倒姿勢と試験斜面



写真-4 転倒の様子

(d) 試験結果

転倒試験後のキャブの変形量を測定し、同一の新品キャブをシリンダで押してその変形量を再現させ、要した荷重と変形量を記録した(写真-5参照)。

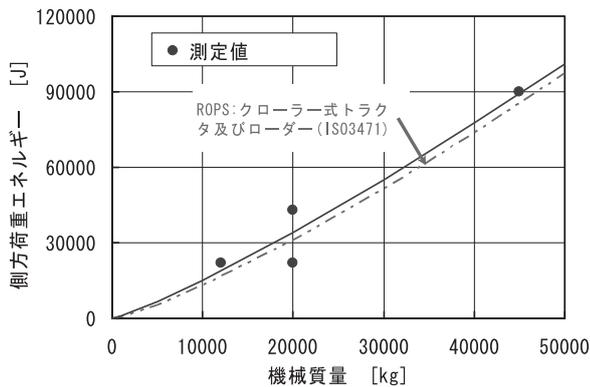
① エネルギーを計算

360°転倒の場合、キャブに伝わる最初の衝撃は斜



写真一五 変形再現試験

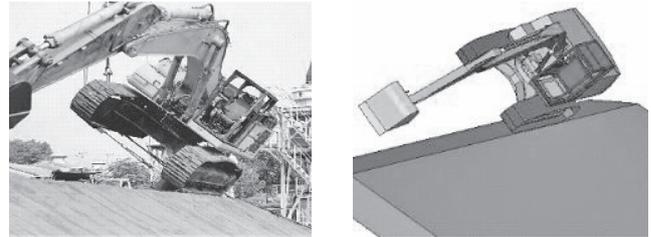
面に対して90°回転し、キャブが斜面と衝突した時に生じる。このときにキャブは横方向荷重を受ける。この荷重により変形が進行するが、荷重の変形量に対する積分値がエネルギーとなる。その結果、車体重量に対するエネルギー値は図一2のグラフのようになり、ISO3471のブルドーザで規定されたエネルギー値に近い値となった。これは、6t未満の油圧ショベルのTOPS規格の横方向エネルギー値とも一致した。



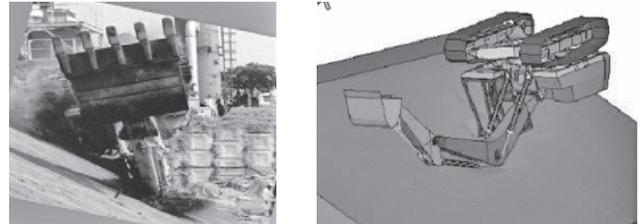
図一2 機械質量に対する側方荷重エネルギー

②シミュレーションの実施 (写真一6, 7)

試験結果の検証の一つの手段として衝撃問題を取り扱うのに適した解析ソフトを使いシミュレーションを実施した³⁾。キャブ自体は擬似ROPSの材料の非線形塑性域の応力-ひずみ特性をインプットし、機械の他の構成要素はそれぞれの材料に応じて、均一な質量の固まりとして扱い、転倒地面の反発力は、土の貫入試験結果から、貫入量-貫入力、土の変形力特性としてインプットした。この結果、試験を再現できた。このシミュレーションモデルは、後のISO規格作成時にも、様々な転倒モードの要求にシミュレーション解析して対応することができ、非常に有用であった。



写真一六 実車転倒試験とシミュレーション (その1)

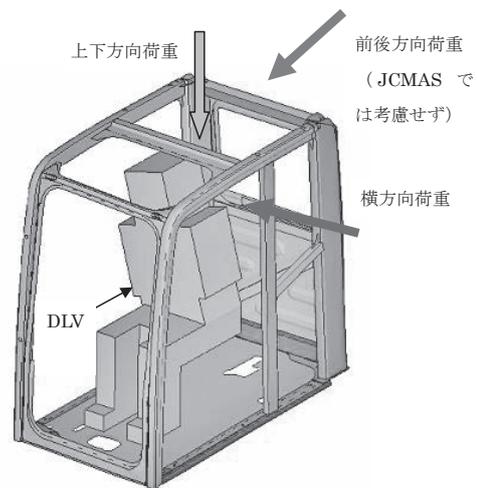


写真一七 実車転倒試験とシミュレーション (その2)

(2) 日本建設機械化協会規格

規格化にあたり、転倒モードは実機の試験結果から、機械左横方向への転倒とし、前後方向の転倒は無視できるとした。この典型的な転倒モードでの荷重条件を、前述の試験結果を基にシミュレーション結果を参照しながら試験方法と規格値を策定した。

転倒のプロセスを解析し、最初の衝撃を吸収するのに必要なエネルギー、そしてキャブが機械本体の下に位置した時のキャブにかかる荷重を室内試験での荷重条件にした。又、試験による負荷荷重によるキャブの変形に対するDLV¹を15°傾けた状態で、変形したキャブがDLVに接触または、侵入しないことを合格基準とした (図一3参照)。



図一3 DLVと載荷方向

¹ DLV (Deflection-limiting volume: たわみ限界領域) はISO3164で規定されており、通常の服装でヘルメットを装着した大柄運転員 (ISO3411で規定) の着席時の近似的箱形空間形状を示し、この空間内は安全が確保されているとしている。

そして、荷重条件は横方向の吸収エネルギーと上下方向の荷重を次の通り決めて、2003年に日本建設機械化協会規格JCMAS H018として発行された。

- ・横方向の吸収エネルギー: $13000 (M/10000)^{1.25} (J)$
(Mは機械質量: kg)
- ・上下方向荷重: $9.8 M (N)$ (これは、機械1台の重量と同じ)

4. ISO規格作成作業

世界で生産・販売している油圧ショベルの80%が日本設計である現状を考えると、ISO/TC127(土工機械専門委員会)日本委員会としても日本主導でISO規格化に取り組むのが当然のことと考えた。

2000年10月にリオ・デ・ジャネイロで開催されたISO/TC127国際会議で、日本から新規作業項目として提案し、各国メンバーの承認を得て国際ワーキンググループを設立し、著者がプロジェクトリーダー兼議長(コンベンナー)に就任し、ISO土工機械専門委員会の日本委員会が事務局を務めた。ワーキンググループ参加国は、米国、イギリス、ドイツ、イタリア、スウェーデン、ニュージーランド、オーストラリア、日本であった。メンバーは、メーカーの設計者、試験担当者、各国の安全担当機関や試験機関の行政官・担当者、この規格に興味を持つもので構成された。メンバーのバックグラウンドが多彩であるだけに様々な意見が出、そのたびに検討し、結果、より多様な転倒モードに対応することになり充実した規格となり、荷重条件は以下のように見直された。

(1) 横方向荷重

現行ROPS規格ISO3471では、横方向のエネルギー値に加え、荷重も規定している。JCMASでは、TOPSと同様、横方向のエネルギー値のみを規定し、荷重を規定せず、変形するのに必要な荷重を加え、変形量あたりの荷重を積分してエネルギー値に到達するまで負荷し続けることとした。ROPSでは90°を超えて回転し続けるために必要な反力があるはずであるから、TOPSと違い、目安としての荷重が必要との意見が国際ワーキンググループから出てきた。現行規格(ブルドーザ等のROPS)との整合のため、横荷重を追加した。

(2) 前後方向荷重

機械上方からみて、上部旋回体が左に旋回した状態で転倒すると、転倒の方向に作業機が位置するため、

最初にバケットが斜面に接してバケット刃先が転倒の支点となり、転倒を続け、キャブ屋根の左後ろ角が当たる(図-4参照)。

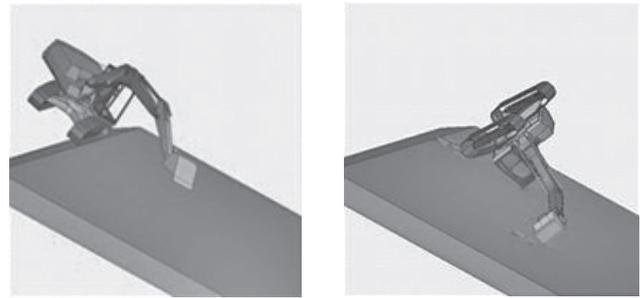


図-4 上部旋回体が左方向に旋回した状態での転倒

また、上部旋回体が右に旋回した状態では、作業機は転倒地面から遠く、最初にキャブ屋根左後ろ角が当たる。最初のインパクトは作業機ではなく、キャブ屋根左後ろ角が受ける。荷重としては、右旋回した時のほうが大きい。

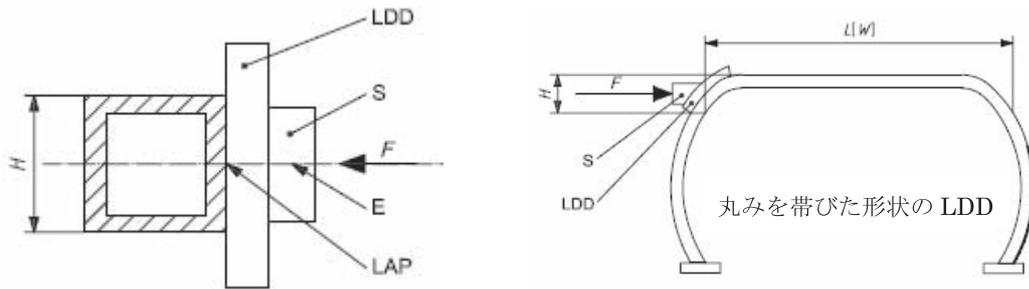
左角部が受ける荷重の前後方向分力を計算すると、横方向荷重と比べ、約1/8と小さい値となった。いくらかの前後方向荷重があるということで、ミニ油圧ショベルで実績がある前後方向吸収エネルギーとして、 $4300 (M/10000)^{1.25}$ と決定した。

(3) 上下方向荷重

JCMASでは、油圧ショベルが作業機がない場合に転倒することは想定していなかった。作業機がない場合の転倒とは、輸送時に作業機を本体から外して輸送することがあり、トレーラに載せるとき、道板を踏み外し転倒するというリスクの存在である。又、作業機が付いている場合でも、地下作業では作業機がキャブの高さよりも低い位置での作業が多く、このときに転倒すると作業機の保護を期待できない。そこで、シミュレーションモデルで作業機位置を低くし、転倒した時も作業機が地面に接触しない状態として計算した結果、上下方向荷重は12.75M(N)となり、作業機がキャブを保護する場合に比べ、1.3倍の力がかかる計算結果となった。

(4) 負荷分散装置(LDD: Load distribution device) (図-5)

ROPS試験は横方向荷重、前後方向荷重、上下方向荷重の順に負荷を掛け試験を実施するが、油圧ショベルのキャブが曲面構成の構造物が多いことから、負荷分散装置LDDは従来の規格では規定されていなかった曲面形状に対しての試験方法が追加となった。ま



図一五 負荷分散装置 (LDD : Load distribution device)

た、この LDD に関する規定は従来からの ROPS 規格 ISO3471 の 2008 年版にも反映された。

(5) キャブライザ仕様機の検討

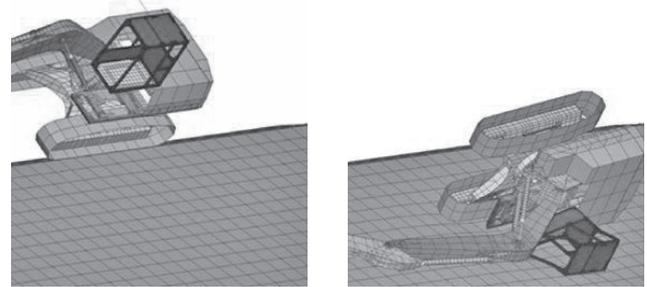
ISO の林業機械を扱う専門委員会 (TC23/SC15) では、ROPS 規格を見直していたが、油圧ショベルと同様、上部が旋回する機械があり、構造が似ているとして油圧ショベルを扱うわれわれの土工機械専門委員会と合同で規格作りを進めることとなった。しかし、従来から林業機械はブルドーザと同じ荷重条件を使用していたため、作業機がキャブにかかる荷重を軽減するという油圧ショベルの荷重条件と相容れず、結局、調和作業は断念した。

このとき、林業機械でも油圧ショベルをベースとした機械は、構造が同じで、転倒モードも同じといえるので、土工機械専門委員会 (TC127/SC2) で扱うこととした。林業機械の特徴としては、森林の中での移動や作業に際し、枝葉に視界が邪魔されるので視界性を確保することが重要である。そのため、キャブライザといい、キャブの位置を高くしている機械がある。解体機械にも同様、キャブライザ仕様の機械がある。これらのキャブライザ仕様の機械について、キャブの高さにより負荷荷重が異なることをシミュレーションで確かめた。

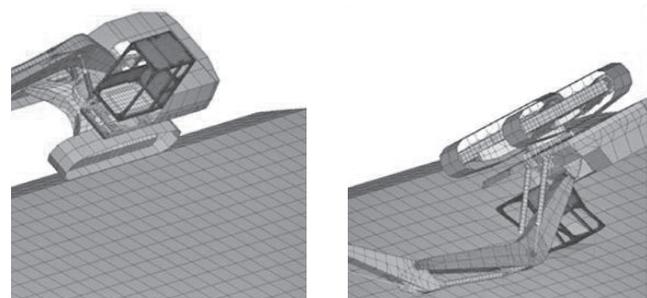
予想されたことであるが、キャブライザを高くすると、作業機よりキャブの高さが高くなり、地面に対し 180° 転倒時 (キャブが下になる状態) には、作業機が受けていた荷重分担がなくなり、キャブに全荷重がかかることになる。さらにキャブライザを高くすると、90° 転倒し、地面に接地から次の 90° に回転する時の支点となる。キャブの屋根左端が支点となるが、機体中心から遠くなり、それ以上回転せず、そのままの姿勢で傾斜面を滑るようになる (図一 6, 7 参照)。

(6) 最終規格案

以上の結果、表一 2 の規格となった。JCMAS 規格



図一六 キャブ高さを 1 m 高くした場合の転倒



図一七 キャブ高さを 0.5 m 高くした場合の転倒

と ISO 規格最終案 (発行版) を比較すると、前述の転倒モードが追加された結果、荷重条件が厳しくなり、より多くの転倒形態にも対応できるようになった。

なお、キャブライザの高さにより、表一 3 の荷重条件を推奨値として規格に追加した。

5. 終わりに

2008 年 12 月に本規格が発行されたが、この規格に適合した ROPS キャブを搭載した油圧ショベルでは、転倒リスクに晒される現場での作業でも、ユーザの方々には、今までにない安全・安心の感覚で機械を運転していただくと確信している。当社では、規格発行に先行して同等以上の強度のキャブを搭載した油圧ショベルを 2005 年から販売しているが、転倒したにも関わらずキャブの変形が少なく、オペレータが助かった報告もあった。このような報告は、規格制定に

表-2 ROPS 規格 試験荷重・エネルギー一覧表

	ROPS for TTT (ISO 3471)	TOPS for Compact excavator (ISO 12117-1)	EOPS for Excavator (JCMAS H 018)	ROPS for Excavator (ISO 12117-2)
Scope	machine mass ≥ 700kg	Operating mass of 1000 to 6000kg	6000kg< <50000kg exclude excavators with fixed and elevating cab risers	6000kg< <50000kg exclude excavators with elevating cab risers
Load and Energy Criteria	Machine mass M (kg)	4630~59500 (crawler EMM)	1000~6000	6000~50000
	Lateral load force F (N)	70000 (M/ 10000) ^{1.2}	---	---
	DLV inclination	no inclination	---	---
	Lateral load energy U (J)	13000 (M/ 10000) ^{1.25}	13000 (M/ 10000) ^{1.25}	13000 (M/ 10000) ^{1.25}
	DLV inclination	no inclination	15 degrees	15 degrees
	Vertical load force F (N)	19.61M (=2W)	---	9.8M (=1.0W)
	DLV inclination	no inclination	---	no inclination
	Longitudinal load force F (N)	56000 (M/ 10000) ^{1.2}	---	---
	DLV inclination	15 degrees	---	---
	Longitudinal load energy U (J)	---	4300 (M/ 10000) ^{1.25}	---
DLV inclination	---	15 degrees	---	

表-3 キャブライザ高さによる荷重条件 (推奨値)

	With low cab riser up to 500 mm	With medium height greater than 500 up to 1300 mm cab riser	With greater than 1300 mm high cab riser (TOPS)
Lateral load energy U_x (J)	13,000 (M/10,000) ^{1.25}	13,000 (M/10,000) ^{1.25}	13,000 (M/10,000) ^{1.25}
Lateral load force F_x (N)	35,000 (M/10,000) ^{1.2}	50,000 (M/10,000) ^{1.2}	50,000 (M/10,000) ^{1.2}
Longitudinal load energy U_r (J)	4,300 (M/10,000) ^{1.25}	4,300 (M/10,000) ^{1.25}	4,300 (M/10,000) ^{1.25}
Vertical load force F_v (N)	12.75 M	19.61 M	7 M

携わった者の一人として望外の喜びである。

2000年10月にリオ・デ・ジャネイロでのISO/TC127国際会議に提案し、各国メンバーの承認を得てISO規格化の活動が始まり2008年12月の規格発行にこぎ着けることができた。日本として、国際規格への発信を標榜している中、この規格のISO化は日本提案のISOとして日本の地位を大きく高めた。ここまで来ることができたのも、国内の油圧ショベルメーカー、日本建設機械化協会の関係者の皆さんの努力の賜物である。改めて謝意を表したい。



《参考文献》

1) W. C. Jackson : A Historical Review of the Evolution of Farm

Tractors, Earthmoving Machines, and Concurrent Evolution of Safety and Operator Rollover Protection, SAE paper 851498 : 1985

- 2) 建設業安全衛生年鑑：建設業労働災害防止協会
- 3) 田村和久：ISO/TC127/SC2/WG5 東京国際会議 (2006/2/16), Roll Over Simulation (Presentation)
- 4) ISO/TC127 部会報告資料：建設の機械化' 01.1,' 02.10,' 04.4, 建設の施工企画' 04.9,' 06.4,' 07.2
- 5) TOPS 報告書：日本建設機械化協会 ISO 部会第2委員会 TOPS 試験分科会資料 (2002/4)
- 6) 田中健三：油圧ショベルの転倒時保護構造 (ROPS), 精密工学会誌 Vol.75, No.3, 2009

【筆者紹介】

田中 健三 (たなか けんぞう)
TC127 (土工機械委員会)
SC2 油圧ショベル ROPS 規格ワーキンググループ議長
(コマツ 開発本部 業務部
規制・標準グループ 主査)

