

油圧ショベルの安全性に関する一考察

杉 明

油圧ショベルは、近年多用途化するとともに、製品群も大幅に拡大している。製品質量では約 300 kg から 800 t、用途においても従来の掘削作業主体から道路工事や家屋解体やクレーン用途など使用される範囲が広がり、機械を運転するオペレータのみならず周囲の人に対する安全性の確保も大きな課題である。本稿では比較的安全性が確立されている製造工場の旋盤やロボットの安全理論を油圧ショベルと比較し油圧ショベルの安全性確保の条件について論理式を用いて示し、油圧ショベルの後退時における安全確保について事例をもとに考察する。

キーワード：油圧ショベル、安全性、走行、視界、CCTV

1. はじめに

油圧ショベルは近年多用途化するとともに、製品群も大幅に拡大している。製品質量では約 300 kg から 800 t、用途では本来の掘削から家屋解体や自動車解体などの産業リサイクル用途、林業用途、クレーン用途といわゆるバケット作業のほかに色々なアタッチメントを取り付けることにより使用される範囲が広範に増加している。したがって、従来は第三者などが侵入しない限られていた作業空間が周囲の人に影響を与えるような作業空間となってきている状況にある。また、道路改修などでは油圧ショベルが主体となり、このような工事では一般の通行人や工事関連作業員などが、機械の周囲に存在し災害が発生しやすい環境にある。このようなことから、油圧ショベルは機械を運転するオペレータのみならず周囲の人に対する安全性の確保も大きな課題である。本稿では比較的安全性が確立されている工場で使用されている旋盤やロボットの安全理論を油圧ショベルと比較し油圧ショベルの安全性確保の条件を論理式を用いて示し、油圧ショベルの後退時における安全確保について事例をもとに考察する。

って可能であるので、ドアインタフェース原理が適用されればよいので安全確保の条件は次式で表すことができる。

M = 1 機械が稼動している(ワークを加工している)

M = 0 機械が稼動していない(ワークを加工していない)

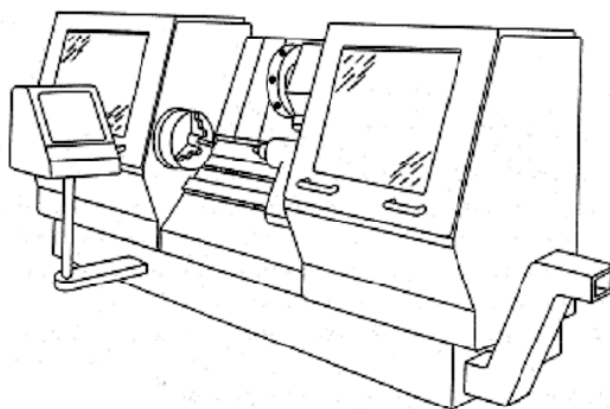
G = 1 ガードが閉じている

G = 0 ガードが閉じていない

とすると、安全確保の条件は

$G \geq M$ ①
である。

このシステムは、ガードが閉じている時のみ、旋盤は可動できるということを示している。



図一 旋盤の外観例

2. 産業機械と油圧ショベルの比較

(1) 旋盤

図一に機械加工工場で見受ける旋盤の事例を示す。通常考えられる危険源はワークを加工する主軸であるバイトと、回転されるワークを考えればよい。安全確保はワークと主軸部をガードで隔離することによ

(2) ロボット

図二に人間／機械安全作業システム例を示す。これは人間とロボットの協調作業における安全確保条

件を、小林、森貞、蓬原が表した原則である。このシステムは2. (1) 項における旋盤のガードを一部開放したものである。

表一1は作業者とロボットの作業状態を表す論理変数である。

この表に基づき安全確保の条件は次式で表される。

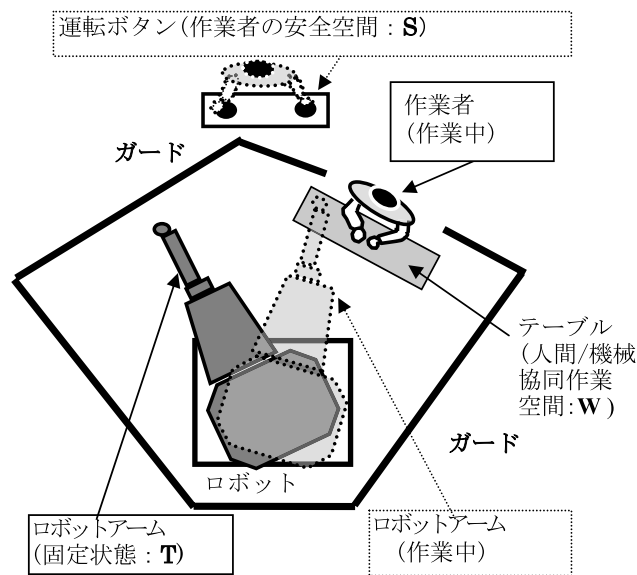
$$M^w \cdot H^w = 0 \dots\dots\dots\textcircled{2}$$

また、作業者の行動条件とロボットアームの移行はインタロック条件として次のように定まる。

$$\text{作業者の行動条件： } M^T \geq H^w \dots\dots\dots\textcircled{3}$$

$$\text{ロボットアームの状態： } H^s \geq M^w \dots\dots\dots\textcircled{4}$$

このシステムは作業者とロボットは同時刻に同じ場所に存在してはならないことを示している。



図一2 人間/機械安全作業システムの例

表一1 作業者とロボットの作業状態を表す論理変数

変数	論理値	論理値の意味
H^w	1	作業者がテーブル W に就いている
	0	作業者がテーブル W に就いていない
M^w	1	ロボットアームがテーブル W にある
	0	ロボットアームがテーブル W がない
H^s	1	作業者が運転ボタンの所 S にいる
	0	作業者が運転ボタンの所 S にいない
M^T	1	ロボットアームが固定状態 T にある
	0	ロボットアームが固定状態 T がない

(3) 油圧ショベル

油圧ショベルは機械そのものの仕様から、ガードによって危険源と人間を隔離することが不可能に近い。表一2に示すように安全確保のための論理変数をとると安全確保条件は次式で与えられる。

$$W_s = O_v \cdot \neg H_w \cdot O_c^* \cdot M_c^* \cdot E^* \dots\dots\dots\textcircled{5}$$

油圧ショベルではフロントや上部旋回体の旋回動作

表一2 油圧ショベルの安全確保のための論理変数

変数	論理値	論理値の意味
O_v	1	オペレータが意図する危険領域に人間がいないことがわかる
	0	オペレータが意図する危険領域に人間がいないことがわからない
H_w	1	人間がオペレータの意図する危険区域にいる
	0	人間がオペレータの意図する危険区域にいない
O_c^*	1	オペレータの操作が正常である
	0	オペレータの操作が正常でない
M_c^*	1	機械が正常である
	0	機械が正常ではない
W_s	1	機械を稼働できる
	0	機械を稼働できない
E^*	1	周囲の環境が安全である(地形, 地面強度)
	0	周囲の環境が安全ではない

および走行の可動部とオペレータは、通常機械稼働時には接触することがないので機械可動部はオペレータにとっては危険源とはならない。機械可動部の危険源としての存在は、周囲の作業人や一般人が危険領域に侵入するか、危険領域に存在している場合に限られる。したがって、油圧ショベルにおいては、危険領域に誰かが存在している時は、オペレータがその存在を検知し、オペレータの操作によって、危険状態を回避することを要請している。

以下、3種類の機械の比較を表一3に示す。

表一3 油圧ショベルと他機械の安全確保の比較

機械の種類	安全確保の条件	備考
旋盤	$G \geq M$	開閉式ガード
ロボット	$M^w \cdot H^w = 0$ (インタロック条件: $M^T \geq H^w$, $H^s \geq M^w$)	ガードの一部開放
油圧ショベル	$W_s = O_v \cdot \neg H_w \cdot O_c^* \cdot M_c^* \cdot E^*$	ガードなし

この結果より、油圧ショベルの安全確保条件は旋盤ロボットとまったく異なり複雑でありオペレータに依存していることがわかる。

ここで、式中の「 \cdot 」は論理積を表し、「 \neg 」は否定を表す(2項及び以下同様)。

3. 油圧ショベル後退時の安全性

油圧ショベルは機械の構造上、上部旋回体が360度回転することと、地上位置より高いところにオペレータの居住空間があること理由から、機械の稼働時や

移動時においてオペレータはすべての局面で確実に視認性を確保することは不可能である。したがって、油圧ショベルの視界性に関して国際規格ではオペレータからの機械周囲の視界はマスキング（死角）を一部許容しているのが現状である。特に、右後方視界はオペレータにはまったく見えなくてよいことを容認している。したがって、マスキング位置に第三者の侵入があると、第三者が危険状態を認識してみずから危険領域から退避しなければ、いずれ災害が発生することになる。図-3は油圧ショベルで後退時に轢かれるなどで死亡災害に至った年度毎の災害発生件数推移を示したものである。

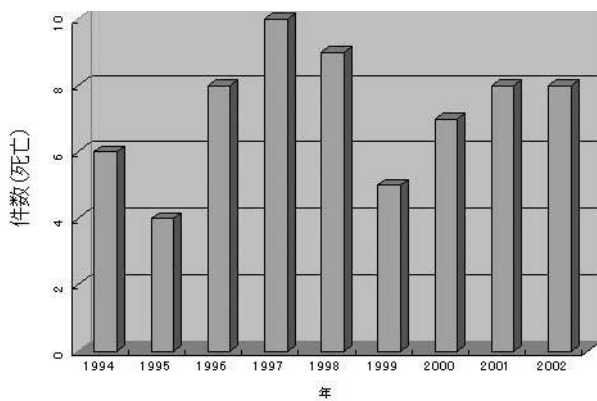


図-3 後退時死亡災害推移

このように毎年8件程の死亡事故災害があり低減がみられていないのが実情である。20t級油圧ショベルの走行速度と旋回速度の推移を図-4に示す。油圧ショベルの走行速度は現在では人間の歩行速度より速くなっていることも後退時の災害要因の一つと考えられる。

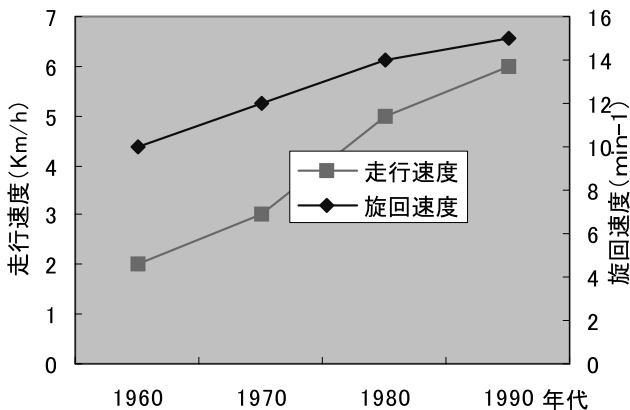


図-4 走行、旋回速度推移

国際規格では、油圧ショベルの周囲作業員や通行人に対しオペレータの視野による検知性をあげることで

安全性向上策が検討されている。これは機械全周1mを1.5mの高さまでオペレータが視認できなければならないというもので、近々規格化される予定である。しかし、視認方法については、ミラーや他のものでも可というものであり満足できるものとはいえない。

このような背景から現在市場で装備されている安全性確保、走行警報装置や後方カメラについて述べる。

(1) 後退時の安全確保条件

油圧ショベルの後退時には周囲の状況に応じて監視員をおく場合がある。この場合における稼動条件を示す2値の複数の論理変数と、それらの論理変数の論理値の意味を示したものを表-4に示す。ただし、同表でBは機械の後退条件を表す論理変数で、Oc*, Op, Cm, Co, Hw, Mc*は機械が稼動するために必要とする環境条件を表す論理変数で機械の動作状態を含めてある。機械の稼動にはこれらの環境条件のすべてを満たさなければならないから、機械の後退条件Bは次式で与えられる

$$B = Oc^* \cdot Op \cdot Om \cdot Co \cdot \neg Hw \cdot Mc^* \dots \textcircled{6}$$

⑥式は、監視員は常にオペレータの視界内に存在していなければならないことと、オペレータと監視員の

表-4 油圧ショベル後退に対して定めた論理変数と論理値の意味

論理変数の定義	論理変数	論理値	論理変数の意味
機械の稼動状態	B	1	後退できる
		0	後退できない
オペレータの操作状態	Oc*	1	オペレータの操作が正常である
		0	オペレータの操作が正常でない
オペレータの監視員確認状態	Op	1	オペレータが監視員を見ている
		0	オペレータが監視員を見していない
監視員の第三者確認状態	Cm	1	監視員が第三者の存在を確認できている
		0	監視員が第三者の存在を確認できていない
監視員の合図の状態	Co	1	監視員が第三者の存在を合図する
		0	監視員が第三者の存在を合図しない
第三者の存在状態	Hw	1	第三者が危険領域に存在する
		0	第三者が危険領域に存在しない
機械（油圧ショベル）の状態	Mc*	1	機械が正常である
		0	機械が正常ではない

連携が要請されることを示す。

(2) 走行警報装置付

一般の土木工事では油圧ショベルに常に監視員を配置しておくことは、極めて不経済である。また、監視員が油圧ショベルに轢かれるという事例もある。例えば、油圧ショベルの移動とトラックの侵入の両方を監視しなければならない場合、トラック側監視中に油圧ショベルが後退し監視員が轢かれるというケースである。米国では20年ほど前から後退時の後方安全確保の一つとして、走行警報装置が装備されている。これはオペレータが走行レバーを操作すると、それをセンサが検知して警報音を吹鳴させるシステムである。

このシステムの安全確保条件を、表一4と同様に論理変数と論理値を表一5のように定めると、⑥式と同様に、機械の後退条件Bは次式で与えられる。

$$B = Oc \cdot \neg Bh \cdot Ho \cdot Sh \cdot Fs^* \cdot Hs \cdot Mc^* \dots\dots\dots(7)$$

しかし、現実には後退の決定はオペレータにより実施されるので、安全確保の条件は無視される。したがって、この場合の後退条件は次式により実行される。

$$B = Oc \cdot Sh \cdot Fs \cdot Mc^* \dots\dots\dots(8)$$

⑧式ではオペレータが走行操作することにより、警報音で第三者が危険領域からの退避を要請している。

表一5 走行警報装置付油圧ショベルの後退に対して定めた論理変数と論理値の意味

論理変数の定義	論理変数	論理値	論理変数の意味
機械の稼動状態	B	1	後退できる
		0	後退できない
第三者の存在状態	Bh	1	後方危険領域に第三者がいる
		0	後方危険領域に第三者がいない
オペレータの操作状態	Oc	1	オペレータの操作が正常である
		0	オペレータの操作が正常でない
第三者の警報音聞き取り状態	Ho	1	第三者が警報音に気が付く
		0	第三者が警報音に気が付かない
警報音の作動状態	Sh	1	警報音が吹鳴する
		0	警報音が吹鳴しない
警報音の機能の状態	Fs*	1	警報機能が正常である
		0	警報機能が正常ではない
第三者の退避状態	Hs	1	第三者は退避できる
		0	第三者は退避できない
油圧ショベルの状態	Mc*	1	機械が正常である
		0	機械が正常ではない

したがって、オペレータは第三者の存在有無に関係なく後退操作を実行することになる。危険状態の回避は機械停止ではなく、第三者への動作要求となるので、安全原則に反するシステムといえる。このような警報装置を備えたシステムは、国際規格では支援システム(Back-up-system)と呼ばれる。

(3) 後方監視システム

デジタルカメラの発展で映像処理が電子情報として容易に加工できるとともに小型化が進んでいる。一般的にはCCTV(Closed Circuit Television)と呼ばれている。このCCTVを後方視界改善のために油圧ショベルに搭載した場合の安全性確保について次に検討する。

CCTV搭載時の後退時に対する安全性確保の条件として、表一4および表一5と同様に、表一6のように論理変数と論理値の意味を定めると、油圧ショベルの後退条件は次式で示されることになる。

表一6 CCTV搭載付油圧ショベルの後退に対して定めた論理変数と論理値の意

論理変数の定義	論理変数	論理値	論理変数の意味
機械の稼動状態	B	1	後退できる
		0	後退できない
第三者の存在状態	Bh	1	後方危険領域に第三者がいる
		0	後方危険領域に第三者がいない
オペレータの操作状態	Oc	1	オペレータの操作が正常である
		0	オペレータの操作が正常ではない
カメラの作動状態	Cc	1	CCTVが画面に第三者を映している
		0	CCTVが画面に第三者を映していない
カメラの機能の状態	Fc*	1	CCTVの機能が正常である
		0	CCTVの機能が正常ではない
カメラと第三者の映像空間の環境状態	Fv*	1	CCTVカメラと第三者間の環境が正常である
		0	CCTVカメラと第三者間の環境が正常ではない
オペレータの画面確認状態	Ov	1	オペレータはCCTV画面をみている
		0	オペレータはCCTV画面をみしていない
油圧ショベルの状態	Mc*	1	機械が正常である
		0	機械が正常ではない

$B = Oc \cdot \neg Bh \cdot Cc \cdot Fc^* \cdot Fv^* \cdot Ov \cdot Mc^* \dots$ ⑨
 CCTV 搭載時の油圧ショベルは、オペレータが画面で第三者の有無を確認でき、かつ、第三者が存在する場合オペレータ自身で危険状態を回避するか、または機械を停止させることを要請するシステムである。CCTV のシステムを備えたシステムもまた、走行警報装置付油圧ショベルと同様に、オペレータ支援のシステムである。

4. むすび

油圧ショベルは欧州における C 規格相当が整備されていることから標準化が進んでいる製品のひとつである。また、日本では油圧ショベルの安全規格として欧州規格を 2004 年に JIS 化した。油圧ショベルと他の産業機械との安全制御技術で大きく異なる点は、移動機械であるとともに製品質量が大きいことから、危険を検知しても即座に停止せず慣性による流れが大きくなることである。

例えば、現状の旋回停止時の慣性による流れ量は、20 t 級では角度で 100 度程度流れ、オペレータが危険を検知しても回避できるような状況にない。また、本文でも示したとおり、安全の確保はオペレータ依存型の安全システムといえる。このようなことから、油圧ショベルは「止める安全」または「止まる安全」より「回避する安全」の方向へ進むべきと考える。これを実現するには、オペレータに対する支援技術の開発が

必要である。現在の電子化の技術進歩は目覚ましいものがあり CCTV の採用もそのひとつであるが、転倒、転落といった災害や人の検知に関してオペレータの支援ができるようなシステムの開発を期待したい。

また、地震や風水害の天災時の災害復旧においては最初に投入される製品である。現状の災害復旧においては、オペレータが災害現場で昼夜危険と隣合せて懸命な作業をしている姿がテレビなどで報道されている。災害復旧における二次災害防止として無線化などによる通信制御を利用した運転操作技術開発が期待される。

【参考文献】

- 1) 森貞見, 小林孝之, 蓬原弘一: 国際安全規格における人間/機械安全作業システムの定式化, 日本信頼性学会誌, 26 [134] pp163-179 (2004)
- 2) 中央労働災害防止協会: 安全衛生情報センタ 労働災害事例 <http://www.jaish.gr.jp/jirei/jirei01.html>
- 3) ISOFDIS5006 : 2005 (E) Earth-moving machinery - Operator's field of view-Tset method and performance criteria
- 4) ISODIS16001 : 2005 Earth-moving machinery - Hazard detection systems and visual aids-Performance requirements and tests
- 5) ISO9533 : 1989 Earth-moving machinery - Machine-mounted forward and reverse audible warning alarm-Sound test method



【筆者紹介】

杉 明 (すぎ あきら)
 日立建機株
 土浦事業統括本部
 生産・調達本部 品質保証センタ



建設の機械化/建設の施工企画 2004 年バックナンバー

平成 16 年 1 月号 (第 647 号) ~平成 16 年 12 月号 (第 658 号)

1 月号 (第 647 号) ロボット技術特集	5 月号 (第 651 号) リサイクル特集	9 月号 (第 655 号) 維持管理特集	■体裁 A4 判 ■定価 各 1 部 840 円 (本体 800 円) ■送料 100 円
2 月号 (第 648 号) 地震防災特集	6 月号 (第 652 号) 海外の建設施工特集	10 月号 (第 656 号) 環境対策特集	
3 月号 (第 649 号) 地下空間特集	7 月号 (第 653 号) 安全対策特集	11 月号 (第 657 号) 除雪技術特集	
4 月号 (第 650 号) 行政特集	8 月号 (第 654 号) 情報化施工特集	12 月号 (第 658 号) 新技術・新工法特集	

社団法人 日本建設機械化協会

〒 105-0011 東京都港区芝公園 3-5-8 (機械振興会館)

Tel. 03 (3433) 1501 Fax. 03 (3432) 0289 <http://www.jcmanet.or.jp>