

平成 21 年 5 月 29 日現在

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2006～2008

課題番号：18310113

研究課題名（和文） 不整地盤上作業機械のための転倒安全確保システムの構築

研究課題名（英文） Construction of a system to secure the safety from the overturning of off-road working machines

研究代表者

阿部 雅二郎（ABE MASAJIRO）

長岡技術科学大学・技術経営研究科

研究者番号：60212552

研究成果の概要：不整地盤上作業機械を対象に、画像音響システム及び6自由度モーション機構を備えた実機運転室シミュレータと作業機械スケールモデルシミュレータよりなるリアルシミュレータに有限要素法等によるバーチャルシミュレータを統合するハイブリッド安全シミュレータの基盤を設計開発し、それを活用した動的解析により各種不整地盤上での基本的な荷役作業時における機械の転倒メカニズム及び機械転倒過程での機械運転者の運転・生理反応特性を解析考察するとともに転倒安全確保システムの基本原理を提案した。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	13,200,000	3,960,000	17,160,000
2007年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2008年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	15,700,000	4,710,000	20,410,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：社会システム工学・安全システム

キーワード：安全工学，機械力学・制御，シミュレータ，建設機械，不整地盤

### 1. 研究開始当初の背景

多様な不整地盤上作業機械が一般的な土木、建築工事から、近年件数が増加している防災工事、災害時の救援及び復旧工事に至るまで幅広い分野において活用されている。これらの機械の最大の使命は安全に求められた作業機能を遂行することである。しかし、これらの機械による重大事故である転倒事故の件数は減少傾向にない。にもかかわらず

転倒に関する問題の科学的究明は全く十分ではない。転倒事故の原因には不整地盤上作業による予測困難な地盤挙動や、経験の浅いオペレータによる機械の不適切な使用等がある。このような転倒事故を限りなく少なくし、万一発生してもその被害を最小限に留めることができるシステムを構築することが求められている。

## 2. 研究の目的

不整地盤上作業機械の転倒に対する安全確保システムの基盤を構築するため、(1)ハイブリッド安全シミュレータの設計開発、(2)転倒メカニズムの解明、(3)転倒現象支配因子計測方法の確立、(4)転倒安定度直接感知システムの構築、(5)人間と機械の相互作用の解明、(6)次世代転倒安全確保システムの基本原理の提案を行うことを目的とする。

## 3. 研究の方法

不整地盤上作業機械の内、クローラ式作業機械は特に安定した荷重支持力及び走行推進力を発揮できるためその役割は大きく使用頻度が高い。中でも転倒時の周辺環境への被害規模が大きいこと、つり荷の三次元的振れを伴う挙動が複雑であるため安全システムの構築が容易ではないことより解析対象は図1に示すようなクローラクレーンとする。クローラクレーンでの成果は、挙動の複雑性が少ない他の不整地盤上作業機械へ応用可能である。

2. に述べた目的を達成するため、実験解析及びシミュレーション解析を以下の方法で行う。

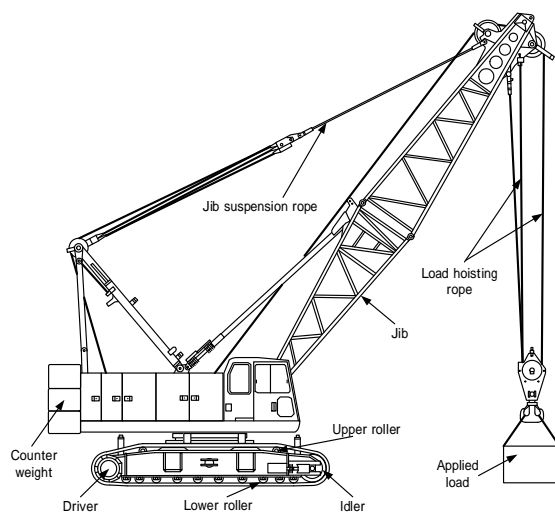


図1 クローラクレーン

## (1) 実験解析方法

### 作業機械スケールモデル実験

クローラクレーンスケールモデルを堅固なコンクリート上、軟弱な火山灰質粘性土上及び鋼板補強した火山灰質粘性土上に設置し、標準初期姿勢であるジブ起伏角にて転倒限界に対する基準荷重負荷率のもと、基本転倒メカニズムの解明に適したジブ起伏作業時におけるクレーン各部の動特性を計測解析する。

### 実機運転室実験

クレーン転倒過程における運転室の挙動及び環境を再現し、転倒限界状態を中心に一連の過程におけるクレーン運転者の運転及び生理反応特性を計測解析する。

## (2) シミュレーション解析方法

### 作業機械の動特性

上部旋回体、下部走行体よりなるクローラクレーンを、その変形及び運動特性に応じて有限要素法モデルとマルチボディダイナミクスモデルを統合してモデル化しシミュレーション解析する。

### 地盤の動特性

作業条件に依存する地盤の変形、破壊特性を考慮した弾塑性有限要素法モデルを適用してシミュレーション解析する。

## 4. 研究成果

### (1) 不整地盤モデルを含む作業機械スケールモデルシミュレータの設計開発

実験解析には実機実験が有用であることは事実であるが、安全確保が困難な上に多くの手間及び経費を要する。これらの理由から図2に示す50トン級実機の幾何学的相似比約1/4のクローラクレーンスケールモデル及びそれを設置する不整地盤モデルを設計開発した。

スケールモデルには つり荷ローブ張力、

つり荷振れ角（面内及び面外方向），ジブ起伏ロープ張力，ジブ起伏角，下部転輪荷重，アイドラ荷重，機体のピッチング角及びローリング角，タンブラ浮き量の計測システムを図2に示す対応する番号の位置に備えた。

図3には不整地盤モデルに用いた土槽を示す。土槽設計においては，有限要素法による詳細解析によって，強度を照査する以外にクレーン荷重によって生じる地盤内応力に土槽の側壁面及び底面の影響が出ないことを照査した。

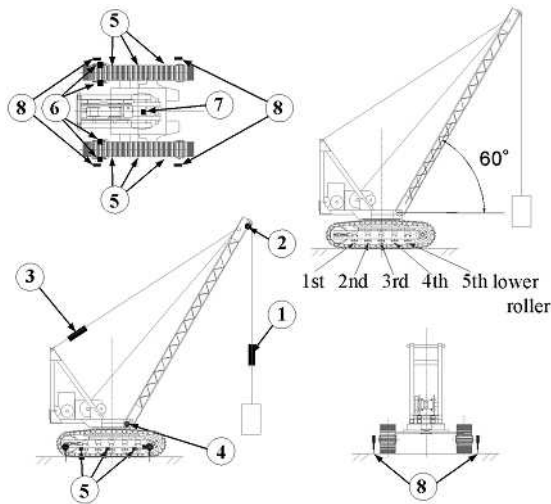


図2 クローラークレーンスケールモデル



図3 不整地盤モデル用土槽

## (2) 実機運転室シミュレータの設計開発

図4に示す画像音響システム及び6自由度モーション機構を備えた実機運転室シミュレータを設計開発した。スケールモデル実験にて計測した実機運転室相当位置における画像情報及び挙動情報より，クレーン転倒過程における運転室状況が再現される。運転者の運転・生理反応特性として，運転操作レバ

ーの操作特性，危険感知タイミング及び運転者の心拍数の計測システムを備えた。実験後には被験者へSD尺度法を用いた感性評価を実施し，シミュレータの特性を調整して完成度を向上させた。

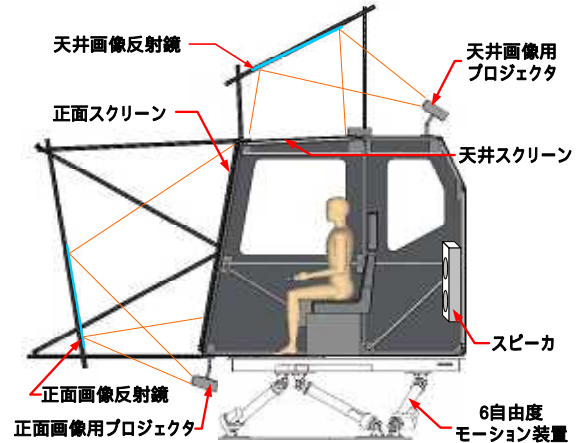


図4 実機運転室シミュレータ

## (3) パーチャルシミュレータの開発 FEM 及び MBD 統合型作業機械シミュレータ

図5に示すクローラークレーンの有限要素法（FEM）シミュレーションモデルにおいて，下部走行体の解析精度向上のため図6に示すマルチボディダイナミクス（MBD）モデルを統合するシミュレータの基盤を構築した。

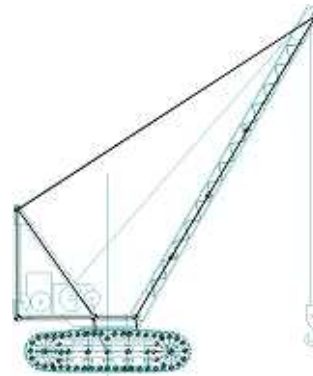


図5 クローラークレーンのFEMシミュレーションモデル

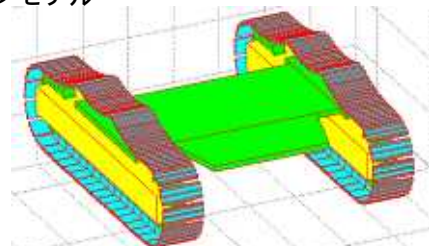


図6 下部走行体のMBDシミュレーションモデル

### FEM 地盤挙動シミュレータ

図7に示すような鋼板補強不整地盤モデルに図8に示すようなクローラからの荷重を負荷できる弾塑性有限要素法解析を可能とした。図9に解析結果の一例を示す。実験解析が困難なクレーン作業時における複雑な地盤挙動を解析し、地盤上のクレーン挙動解析時に用いることができる。

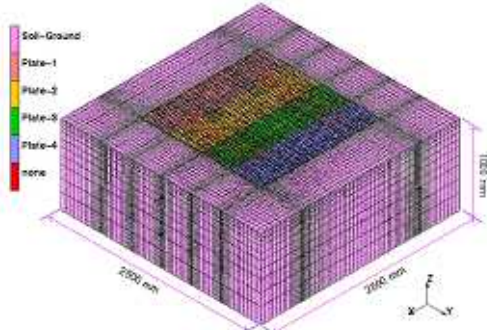


図7 鋼板補強不整地盤モデル

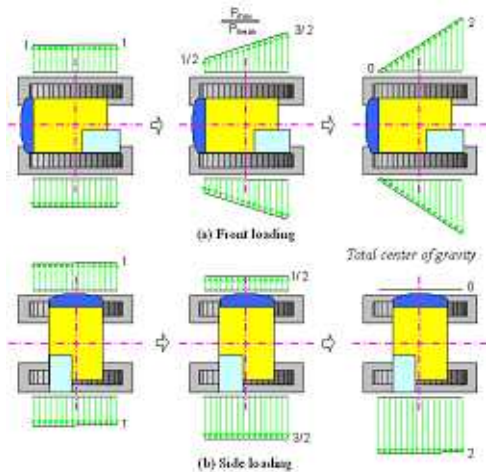


図8 クローラ荷重の負荷条件

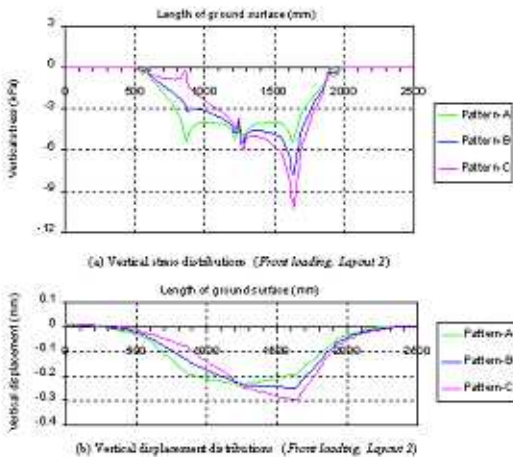


図9 鋼板下の垂直応力及び垂直変位分布の解析結果例

### (4) ハイブリッド安全シミュレータの設計開発

図10に全体構成を示す「不整地盤モデルを含むスケールモデルシミュレータ」及び「6自由度モーション機構にて運動制御される実機運転室シミュレータ」よりなるリアルシミュレータにバーチャルシミュレータを統合するハイブリッド安全シミュレータの基盤を設計開発した。

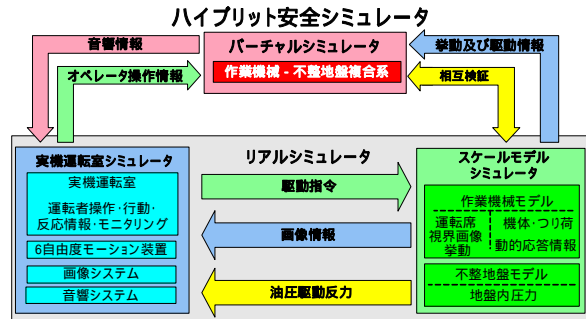


図10 ハイブリッド安全シミュレータの全体構成

### (5) 設計開発したシミュレータによる作業機械転倒メカニズム及び運転者の運転・生理反応特性の解明

#### 転倒メカニズム

図11に一例としてコンクリート上における斜め前方振りジブ伏せ実験で得られたクレーン各部の挙動及び荷重の時間変化を示す。図中の  $t_{lim}$  は転倒限界状態に到達したとみなされた時刻を示す。

図11(a)に示すようにジブはほぼ一定の角速度で伏せた場合である。同図にはジブを含む鉛直面内のつり荷振れ角の時間変化を示しているが、つり荷がわずかに振り子振動するのみであり、ジブ面外方向のつり荷振れ角も面内方向と比べ無視できる程度であった。

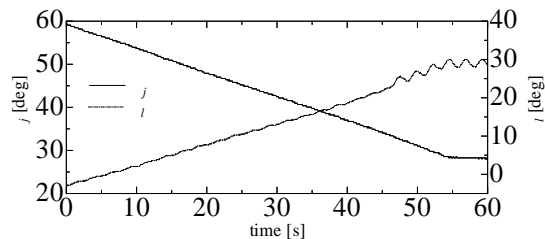
図11(b)に示す機体のピッチング及びローリング方向の傾斜角  $\rho$ 、 $r$  は、転倒限界状態時刻  $t_{lim}$  に達するまで大きな変化はみられない。なお、斜め方向振りでは最終的にはピッチングにより転倒に至った。同図に示すタンブラ浮き量は、クレーンを上方から見て転倒支点側に相対する側すなわち反転倒支点

側において、その値の変化を上述した機体傾斜角の場合よりも早期の段階に見出せるが変化は大きくはない。

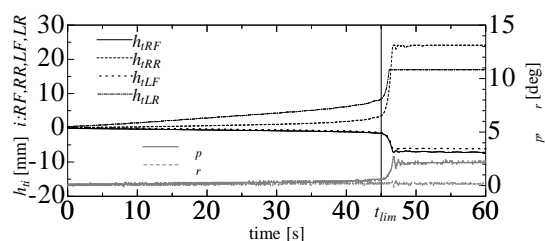
図 11(c)に示す下部転輪荷重は、つり荷に最も近い下部転輪すなわち右側第 1 転輪の荷重がジブ伏せとともに時間に対しほぼ線形的に大きく増加している。コンクリートのような堅固地盤上ではクローラ接地反力を支持しない転輪も存在するため、例えば、左側第 5 転輪のように反転倒支点側の転輪荷重が必ずしも減少するわけではない。

図 11(d)に示すアイドル荷重は、転倒限界状態に到達したとみなされる時刻  $t_{lim}$  に対し早期に変化が見られるが大きくはない。

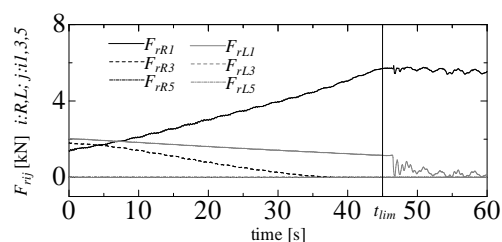
コンクリート上以外の地盤上での結果も総合して考察すると、下部転輪荷重の時間変化を計測することによる転倒予兆の早期検知が有効と考えられる。



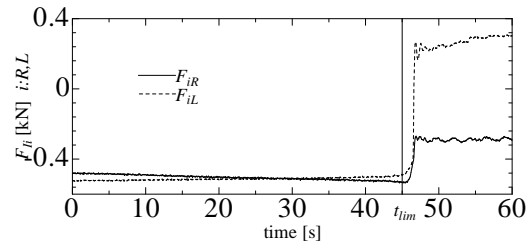
(a)ジブ起伏角  $j$  及びつり荷ロープ面内振れ角  $i$



(b)タンブラ浮き量  $h_{ij}$ 、機体ピッチング角  $p$  及びローリング角  $r$



(c) 下部転輪荷重  $F_{rij}$



(d)アイドル荷重  $F_{ii}$

図 11 コンクリート上、斜め前方づりにてジブ伏せ作業する場合のクレーン各部動特性

### 運転者の運転・生理反応特性

図 12 及び図 13 に一例として火山灰質粘性土上前方づり及び側方づりにてジブ伏せ作業する場合に実機運転室シミュレータによる実験より得られた運転者心拍数の時間変化を運転室 3 軸方向加速度の時間変化とともにそれぞれ示す。運転者の心拍数は転倒が発生した後に大きく変化している。この特徴は特に、図 14 のような側方づりの場合に顕著である。

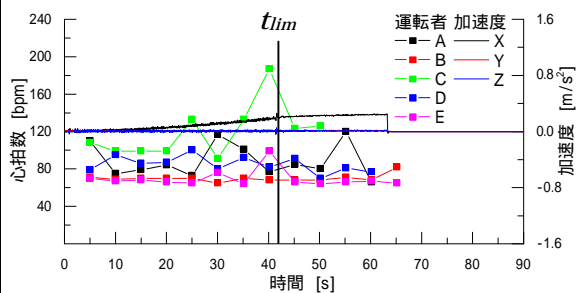


図 12 火山灰質粘性土上、前方づりにてジブ伏せ作業する場合の運転者の生理反応特性

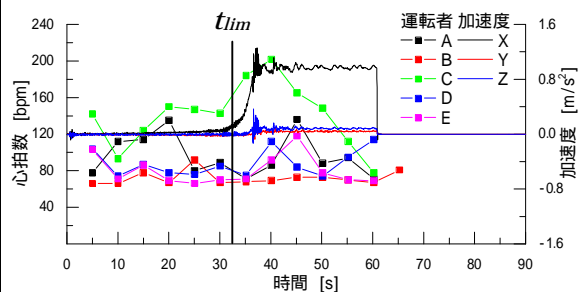


図 13 火山灰質粘性土上、側方づりにてジブ伏せ作業する場合の運転者の生理反応特性

### (6) 不整地盤上作業機械の転倒安全確保システムの基本原理の提案

側方づりの場合に顕著であるが、運転者は

作業機械の転倒につながる挙動を感知しにくく、危険回避のためのレバー操作も現れにくい。また、心拍数のような生理反応も現れにくい。転倒につながる運転者の反射的な運転操作を誘発することなく、運転者に違和感も与えにくい状態で作業機械の転倒を回避する運転支援型転倒回避装置が不可欠である。以下に示す3つのサブシステムを及び、及び、または3つ全てを統合して用いる転倒安全確保システムが有用であると考えられる。

#### 下部転輪荷重計測による転倒予兆早期検知システム

下部転輪荷重計測及びその荷重率算出により転倒予兆を早期検知し、運転者及び周囲作業者に通知するシステムである。本システム運用時には転倒を感知していない運転者の「システムの誤作動との誤認」及び「転倒予兆通知の恐怖による急激な運転操作」を防ぐことが重要である。

#### 平衡錘制御による能動的転倒回避システム

平衡錘制御により反転倒モーメントを能動的に増加させることで転倒を回避するシステムである。に述べた荷重率をフィードバックしながら転倒限界状態からの復帰を図る。

#### ジャイロ装置による受動的転倒回避システム

ジャイロ装置によって作業機械傾斜時に反転倒モーメントを受動的に得るシステムである。

このような統合システムの最適化を図ることにより転倒安全確保システムを実用化できるものと思われる。

### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 1件)

Bogie Mechanism on the Dynamic Behavior of Crawler-type Construction Machines in Traveling on Firm Grounds with Continuous Bumps, ABE,M., NAKAGAWA,C., NAKAMURA,S., Journal of System Design and Dynamics, Vol.1, No.1, 27-38, 2007. (査読有)

[学会発表](計 2件)

クローラクレーン起伏作業時の動的転倒安定性(斜め前方づり及び側方づりの場合), 阿部雅二郎, 上田慶彦, 道具学, 望月拓也, 日本機械学会第17回交通・物流部門大会講演会論文集, No.08-53, 261-264, 2008. (査読無)

ジブ起伏作業時におけるクローラクレーンの転倒安定性に関する動的基礎実験解析(堅固地盤上前方づりの場合) 上田慶彦, 阿部雅二郎, 伊藤恵美, 日本機械学会北陸信越支部第45期講演会論文集, No.087-1, 145-146, 2008. (査読無)

### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

阿部 雅二郎 (ABE MASAJIRO)

長岡技術科学大学・その他の研究科・准教授  
研究者番号: 60212552

(2) 研究分担者

仲川 力 (NAKAGAWA CHIKARA)

舞鶴工業高等専門学校・電子制御工学科・准教授  
研究者番号: 70249811

(3) 連携研究者

丸山 暉彦 (MARUYAMA TERUHIKO)

長岡技術科学大学・工学部・教授  
研究者番号: 30016646

中村 和男 (NAKAMURA KAZUO)

長岡技術科学大学・工学部・教授  
研究者番号: 40272869

杉本 光隆 (SUGIMOTO MITSUTAKA)

長岡技術科学大学・工学部・教授  
研究者番号: 50196755