

令和元年6月7日現在

機関番号：82629

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K01306

研究課題名(和文) 浅い土砂埋没時の圧迫圧力に関する実験的研究

研究課題名(英文) Experimental study on pressure of collapsed soil at bury in shallow depth

研究代表者

玉手 聡 (Tamate, Satoshi)

独立行政法人労働者健康安全機構労働安全衛生総合研究所・労働災害調査分析センター・センター長

研究者番号：10344243

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では浅い埋没を対象とした胸部保護具の開発を目的に、その必要強度と最適構造を検討した。得られた結果は次のとおりである。

まず、既往の研究から生存限界の圧迫条件を調査し、胸部の力学的モデルを仮定した。次に、人型供試体を土砂に埋没させて土圧を実測し、保護具に必要な強度条件を導いた。この条件を満足する「背部挟圧方式」の保護具を試作し、同様に実験してその効果を検証した。この方式は常時の運動しやすさと埋没時の堅固さを同時に満足させるものである。そして、実大実験からこの保護具を着用させることでたとえ土砂崩壊の生き埋めとなっても胸部以下の浅い埋没であれば圧迫を受けず人的被害は軽減されることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

自然材料が堆積した地盤の強度や構造は予測が難しく溝掘削中の土砂崩壊による労災事故が後を絶たない。過去に発生した事故の占有割合を調べると大規模工事よりもむしろ小規模掘削中に多い。特に深さ1.5m以下の浅い掘削は土止め設置を強制することが難しく、安全には自主的な対策も不可欠と言える。

そこで本研究では簡易な対策の一つとして、作業者がたとえ土砂の生き埋めとなっても人的被害を防止する保護具について検討した。その結果、常時の運動しやすさと埋没時の堅固さの両方を兼ね備えた保護具を提案することができた。したがって、本研究の成果は労災事故が多い小規模工事での人的被災を軽減する社会的意義を有すると考えられる。

研究成果の概要(英文)：This study aims to develop a chest protector for saving construction workers' lives at trench excavations. There were heavy casualties by collapsed soil even in shallow trenches. Structural requirements of the chest protector were studied for prevention of labor accidents. Main results of the study are summarized as follows.

First, maximum allowable pressure and strain in the chest of human body are estimated from the experimental records on rats and dogs in the past. Second, actual pressure of collapsed soil was measured by using a humanoid specimen in several sets of full-scale model tests. Third, the developed chest protector was composed of four parts of a cantilever beam system. Fixed beam ends were hold between a back of human body and a trench wall.

Accordingly, the developed system contributes for smooth action at usual construction works in addition to firm protection of chests from collapsed soil at trench failures.

研究分野：安全工学、土木工学、地盤工学

キーワード：労働安全 建設工事 土砂崩壊 生き埋め事故 保護具の開発 人的被害の軽減 溝掘削工事 地盤工学

1. 研究開始当初の背景

溝掘削中の土砂崩壊による労災事故が後を絶たないが、このような事故の防止には崩壊そのものが発生しないようすることが第一である。しかしながら、自然材料が堆積した地盤の強度や構造は予測が難しく人的被害も依然として発生している。

過去に発生した事故の占有割合を調べると大規模工事よりもむしろ小規模掘削中に多い。特に、深さ 1.5m 以下の浅い掘削は労働安全衛生規則等による規制の範囲外であることから土止め設置を強制しておらず、発注者もその費用を計上しない場合がある。そこで本研究では、作業者がたとえ土砂の生き埋めとなっても人的被害は防止する保護具の開発を着想するに至った。

2. 研究の目的

本研究では特に浅い埋没を対象とした胸部保護具の開発を目的に、これに必要とされる強度と構造を検討した。従来の事故防止では、土止め支保工の設置や掘削勾配の修正による崩壊防止が安全対策として講じられてきた。しかしながら、災害復旧工事のように不安定な斜面の近くで緊急的に作業を行う場合や、先に述べたように浅い溝掘削では土止めの設置が前提とされていない現状もある。しかし、崩壊が予測されないケースであっても、土はこれに反して崩壊することがある。そのため掘削工事に従事する労働者の安全には、さらに一歩進んで「崩壊を想定した対策」を講じることが必要である。

そこで本研究では、土砂生き埋め事故の問題について頭部より下の胴体部分が浅く埋没した状況での生命保護を目的に、圧迫を軽減するための胸部保護具の必要強度とその構造について検討することとした。

3. 研究の方法

本研究は「胸部保護具」という新たな安全器具を開発しその使用を提案しようとする実践的な研究であり、その内容は大きく2つの柱で計画した。一つは、土砂に埋没した際に働く最大圧力と胸部の許容たわみの関係を明らかにし、保護具の必要性能である強度と変形係数を決定することである。もう一つは、この必要性能を備えた保護具を試作し、その軽減効果を実験的に検証することである。

保護具の要求性能については、既往の人間工学的な知見を文献調査し、胸部の許容たわみと限界圧力の関係を推定することとした。また、その性能の実験的検証では実大規模の斜面崩壊を再現し、これに人型供試体を埋没させ土砂圧力を実測した。

4. 研究成果

4. 1 人体胸部の圧迫限界の推定

本節では既往の研究から人体胸部の圧迫限界を推定し、保護具に必要な性能を仮定する。

(1) 胸部の圧迫限界

Furuya と久米がラットと犬に対して行った荷重の載荷実験から両動物に共通して体重の3倍の荷重が胸部に作用すると死亡の危険が高くなり、5倍を超えると短時間のうちに死亡することが示された。この動物実験の結果を人間に当てはめて試算すると、例えば、体重 600N(約 60kg) のケースではその3倍の 1.8kN が限界荷重(F_l)となる。胸部の投影面積(A_b)を $0.09\text{m}^2(0.3\text{m}\times 0.3\text{m})$ 程度と仮定して圧迫限界(P_l)は 20kN/m^2 と推定した。

(2) 胸部の限界たわみ

Kroell らは人体の傷害度を無傷から死亡までの6段階で定義し、傷害度と胸部たわみ度 s/D の関係を示した。具体的には s/D が 0.20 以下では無傷だが 0.50 以上では死亡するものである。

(3) 胸部の圧縮形数

圧迫限界 P_l と死亡たわみ度 s/D_6 の2つの限界条件を用いて圧縮形数 k_a を推定した。 P_l は 20kN/m^2 、 s/D_6 は 0.50 とし P と s/D の間に比例関係を仮定して k_a の値を求めると 40kN/m^2 とわかった。

4. 2 土砂生き埋めの模擬実験

(1) 実大実験モデル

本研究では胸部保護具の装着による圧迫の軽減効果を調べるために実大規模の土砂崩壊を再現した。本実験に使用した土試料は関東ロームである。土砂埋没実験の概要を図1に示す。本実験では高さ 4m、幅 4m、最大奥行き 8.2m を有する当研究所の土砂ピット内に実験模型を作製した。その作製方法はまず、土試料(関東ローム)を図内の「盛土1(締固め)」の破線に示す高さ 3m に建設機械で盛土する。なお、端部の角度は約 35 度である。盛土後は約 12 時間自重で締固めて強度増加させた。図内に締固め圧力 p_c の分布を示す。 p_c は深さ z に対して直線的に増加し式(1)の比例関係を有する。

$$p_c = \gamma_t \cdot z \quad (1) \quad c = 0.2 \cdot p_c \quad (2) \quad h_c = \frac{4c}{\gamma_t} \quad (3)$$

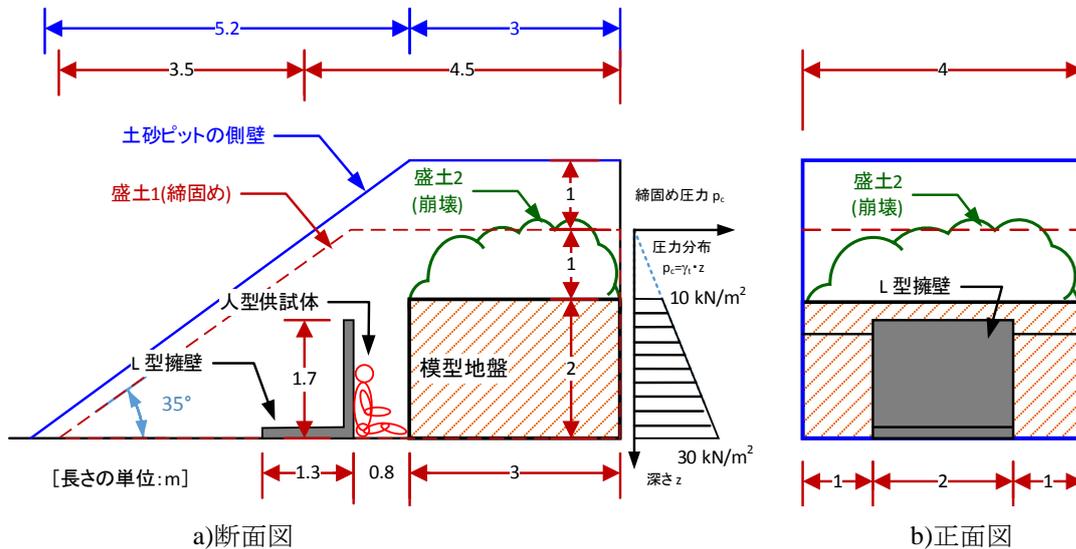
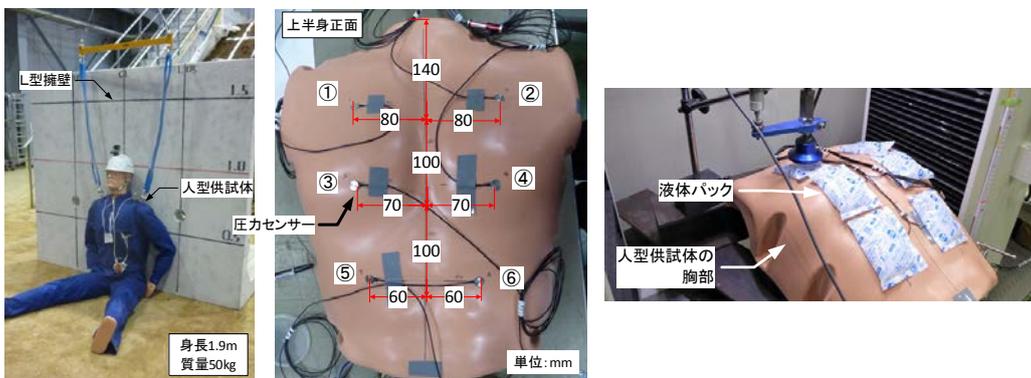


図1 土砂生き埋めの実大模型実験の方法



a) L型擁壁前に設置した人型供試体 b)胸部の圧力センサー c)液体パックによる間接計測
図2 人型供試体(左)と胸部での圧力計測(中)と液体パック(右)

ここで、 γ_t は土の単位体積重量であり、本土試料である関東ロームは約 10kN/m^3 である。また、土の粘着力 c と p_c の間には式(2)の関係があることを一軸圧縮試験から確認した。

締固め終了後、建設機械で掘削して模型地盤に成形した。その手順は上部から掘削して最後に左側面の鉛直壁を形成させるものであった。模型地盤は高さ 2m 、幅 4m 、奥行き 3m である。したがって、模型地盤は過圧密な状態であるため鉛直壁は見かけの粘着力によって自立する。この粘着力は表層で 2kN/m^2 、底部で 6kN/m^2 程度と推定される。また、式(3)は土の内部摩擦角がゼロの鉛直な壁の限界自立高さ h_c を示す。

土圧が最大となって安定上最も不利となる底部について先の値を代入すると h_c は 2.4m と求まる。したがって、模型地盤の初期高さに対する限界高さの比は $1.2(=2.4/2)$ の安定状態であったと言える。幅 2m 、高さ 1.7m のL型擁壁を模型地盤の壁部から 0.8m の位置に設置した。擁壁は図1のb)のように模型地盤の正面に対して中央に設置させ幅 0.8m 、深さ 2.0m の溝部を再現した。この溝部分に後述する人型供試体を設置して埋没実験はおこなった。

(2) 土砂崩壊の再現方法

ドラグ・ショベルを用いて土試料を模型地盤の天端に盛土した(図1内の「盛土2(崩壊)」の部分)。バケット2杯分の土試料を一つの盛土段階と定義し、均等に分散させた。盛土高さは段階毎にレーザー変位計で計測した。

盛土作業では5分のインターバルを設けて段階的に荷重を載荷した。崩壊は概ね第16段階の盛土後に再現され、溝壁部分がブロック状の崩土が落下した。

(3) 人型供試体

埋没時の圧力を図2に示す人型供試体で計測した。この人型供試体は米国 Simulaid社製の「Randy 9000」⁵⁾をベースに作製したものであり、元はレスキュー訓練用のマネキンである。図2のa)は人型供試体の背面をL型擁壁で支持するように設置した様子である。これは埋没実験前の初期状態であり、その後、上半身部分(胸部)に作用した土砂の圧力を計測した。なお、本計測には、胸部に土砂を直接作用させた「実験A」と、後述する保護具で軽減した後の圧力を計測した「実験B」の2つがある。

図2のb)は圧力センサーの配置を示し、6個の圧力センサーが3行2列に配置されている。この圧力計測では独自に考案した方法を用いた。その方法は胸部に作用する土圧を各部位で平均化して計測するものである。図2のc)に示す液体パックを表面に取り付け、圧力はこれを介して間接的に計測した。その理由は表面形状が複雑な人型供試体では小型のセンサーでなければ表面にできないためであった。しかしながら、受圧面積の減少は計測値が土との接触状態に強く依存する問題を生じさせる。すなわち、実際の土圧と計測値の間に誤差を生じやすい。この問題を解決するために本研究では液体パックによる間接計測法を考案した。

4) 浅い土砂埋没時における作用土圧の推定 (実験A)

埋没深さが概ね0.8m以下で再現された実験Aから、部位(胸、腹)毎の p_h を埋没深さ z で整理すると p_h は急激な崩壊では衝撃的な圧力(以下、衝撃圧力という)の作用に続いて残留圧力に推移す傾向が見られた。一方、緩慢な崩壊では衝撃圧力と残留圧力の差は小さいことがわかった。また、両ケースに共通して p_h と z に比例関係は見られない。むしろ残留圧力には衝撃圧力と連動して増減する傾向が見られ、さらに両圧力の比は最大で約8倍であった。実験Aから p_h の上限としては残留値が概ね 17kN/m^2 、ピーク値は 40kN/m^2 であった。これに胸部の受圧面積を 0.09m^2 と仮定すると衝撃荷重は 3.6kN 、残留荷重は 1.5kN 程度と推定された。

5) 胸部保護に必要な構造強度

作業者が土砂に浅く埋没した状態での作用圧力を先の残留値の上限である 17kN/m^2 を仮定し、保護具の必要強度を推定する。この推定では、先のKroellらが示したAIS=1(軽傷)以下とする。

AIS=1に対応するたわみ度は $0.25(=s/D_1)$ である。 17kN/m^2 の設定圧力 P_0 が作用した時に s/D を 0.25 以下とするために必要な保護具の強度を試算した。その結果、圧迫軽減に必要な保護具の圧縮強度 P_b は 7kN/m^2 以上、圧縮形数 k_b については 28kN/m^2 以上と導かれた。保護具はこの強度条件を満足するよう製作した。なお、ここで用いた作用圧力は実験から得られた土圧の残留値であり、静的な圧力に対して検討したものである。そのため崩壊初期の土塊の落下による衝撃的な作用は考慮されておらず別途検討が必要である。

4. 3 軽減保護具の構造と効果

(1) 背部挟圧方式によるフレーム固定の検討

図3は第一段の検討に試作した保護具の断面を示す。本保護具は左右対象に独立した構造を有しており、その形状は概略コの字型を呈している。本試作では汎用の塩ビパイプを使用して第一段の検討用の簡易モデルを製作し、基本的な抵抗機序を確認した。片側一組の外側寸法は厚さ 360mm 、前幅 200mm 、後ろ幅 185mm であり、その内側においては保護具と胴体胸部の厚み方向の間に 50mm 以上の隙間を有する。これは着脱をしやすく、また装着時には活動がしやすくなるよう考案したものである。

この試作物の特徴的な部分はその土圧に対する抵抗機序にある。具体的には図3内に破線で示した背面側であり、保護具の背面フレームを背部と地山(溝壁)で挟む構造としたことである(以下、「背部挟圧方式」と呼ぶ)。機能的には「常時」において、体を拘束せずに自由な活動を可能にする一方で、土砂に埋没した「被災時」には堅固さが発揮されて上半身を保護するものとした。その理由は、フレームを左右独立させた構造としたことと、保護具と上半身の間に隙間を多く設けたためである。また、被災時の具体的な抵抗機序については、図3のように

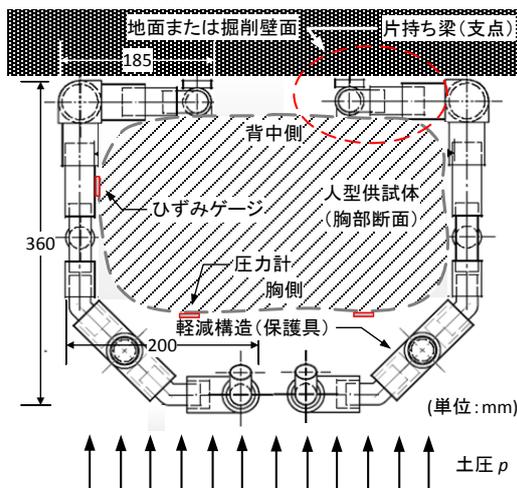


図3 背中と地山で保持する背部挟圧方式



写真1 人型供試体に装着した胸部保護具



写真2 崩壊した土砂が保護具を装着した人型供試体に衝突する様子

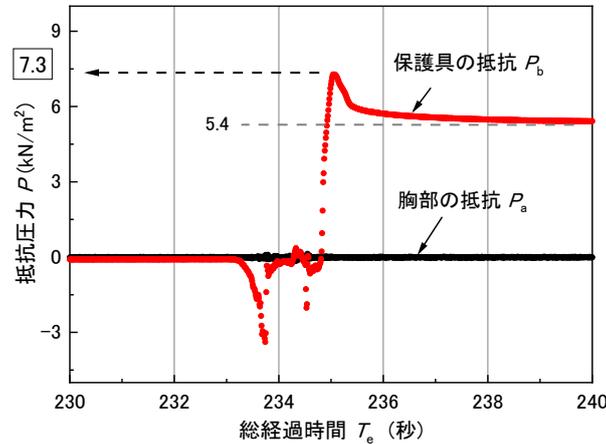


図4 崩壊土砂の衝突時における保護具と胸部の圧力応答

装着者が土砂に押されて壁に押しつけられると、フレームの背面側部分が背部と地山に挟まれることにある。この挟まれた部分は片持ち梁の固定端のように機能するため、保護具は安定した固定状態が確保される。その結果、固定端以外のフレームが作用土圧に対して安定した状態で曲げ変形して土圧に抵抗する。したがって、常時は自由度が高く被災時には堅固となって上半身を保護する。

試作した保護具は写真1のように安全ベストに縫合して一体化させ、人型供試体に装着させた様子である。実験Bではこのフレーム側面にはひずみゲージを貼り付けて抵抗圧力を計測した。先に述べたとおり、人型供試体の胸部表面には圧力センサーを配置し人体側に伝わった圧力を計測した。写真2は実際に土砂に埋没させた実験の様子を示す。模擬溝内に着座させて設置した人型供試体に崩壊土砂が正面から勢いよく衝突し、胴体は土砂と壁に挟まれている。図4はその際に計測した2つの抵抗圧力の推移を示す。一つは保護具側で分担した抵抗圧力 P_b であり、もう一つは人型供試体の胸部まで伝わった値、すなわち胸部の抵抗圧力 P_a である。経過時間 T_e が 233 秒付近から P_b の反応に変化が現れ 235 秒付近でピーク (7.3kPa) を示している。ピーク後、 P_b は減少し値は 5.4kPa に収束した。一方、 P_a は全く増減を示していない。すなわち、今回のケースでは埋没深さが約 0.7m の浅いケースであったが崩壊土砂の土圧が全て保護具によって支持され、胸部には圧力が全く伝わっておらず圧迫は防止された。

4. 4 本研究の結論

本研究では、浅い溝内で生き埋めとなった際に胸部圧迫を軽減するための保護構造について検討した。その結果、明らかになった事項を以下に整理する。

- (1) 既往の研究から動物の生存限界の圧迫条件を調査し、胸部の力学的モデルを仮定した。具体的には死亡限界の圧力は 20kN/m²、たわみは 0.5、圧縮係数は 40kN/m² と導かれた。
- (2) 土砂崩壊に人型供試体を深さ 0.8m 程度で埋没させて土圧を計測したところ、衝撃的な最大値は 40kN/m²、残留値は 17kN/m² であった。胸部の水平投影面積を 0.09m² と仮定すると最大荷重は 3.6kN である。
- (3) 残留圧力の 17kN/m² に対して胸部と保護具を並列バネモデルで仮定し、たわみ 0.1(軽傷)以下で抵抗させる場合に必要強度条件を試算した。その結果、保護具の圧縮強度は 7kN/m² 以上、圧縮係数は 28kN/m² 以上は必要との結果が導かれた。ただし、ここでは衝撃を考慮していない。
- (4) 胸部保護具を試作してその効果を実験的に調査した。まず、胸部保護具の試作では、常時

の運動しやすさと埋没時の堅固さを満足させるために「背部挟圧方式」を考案した。これは上半身の背中和地山(溝壁)で保護具の背面側フレームを挟圧支持することで固定点を設ける手法である。

- (5) 保護効果の検証では、深さ 0.7m 程度の浅い埋没に対して保護具は全土圧を支持し、人体への圧迫は完全に遮断された。また、別に行った実験では約 1.1m の深い埋没が再現されたが保護具は全荷重 3.45kN を支持した。しかしながら、深い埋没では人型供試体と保護具の隙間(えり元)から土砂が流入するため、一部の部位で圧力は上昇することも明らかとなった。

以上より、開発した保護具を着用していればたとえ土砂崩壊の生き埋めとなっても胸部以下の浅い埋没であれば圧迫を受けず人的被害は軽減できることが明らかとなった。特に保護具に内蔵させるフレームの構造と配置を工夫することで「常時」の作業性は損なわず、「埋没時」に堅固さを発揮できることがわかった。今後は実用化に向けて材料と構造に関する応用的な検証が必要と考える。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

Satoshi Tamate, Tomohito Hori(2018) A combined study of centrifuge and full scale models on detection of threat of failure in trench excavations. International Conference on Physical Modelling in Geotechnics, Physical Modelling in Geotechnics, Vol. 2, pp. 1463 - 1468. CRC Press.

〔学会発表〕(計 5 件)

- 1) 玉手聡、堀智仁(2016) 人型供試体を用いた土砂埋没時の圧力計測. 日本学術会議, 安全工学シンポジウム 2016 講演予稿集, pp. 452 - 455.
- 2) 玉手聡、堀智仁(2016) 土砂生き埋め時の作用圧力に関する実大模型実験. 第 37 回バイオメカニズム学術講演会講演予稿集, pp. 213 - 216.
- 3) 玉手聡、堀智仁(2017) 建設業における労働災害と土砂崩壊災害の傾向. 日本学術会議, 安全工学シンポジウム 2017 講演予稿集, pp. 400 - 403.
- 4) 玉手聡、堀智仁(2018) 土砂崩壊による胸部圧迫の計源保護具に関する実験的考察. 日本学術会議, 安全工学シンポジウム 2018 講演予稿集, pp. 360 - 363.
- 5) 玉手聡、堀智仁(2018) 溝肩付近における崩壊予兆の簡易計測実験. 第 53 回地盤工学研究発表会講演概要集 DVD, pp. 2107 - 2108.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等 (計 0 件)

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：堀 智仁

ローマ字氏名：Hori, Tomohito

所属研究機関名：独立行政法人労働者健康安全機構 労働安全衛生総合研究所

部局名：建設安全研究グループ

職名：主任研究員

研究者番号 (8 桁)：2 0 5 0 8 6 3 4

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：なし

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。