

建設機械の実働負荷計測解析システム

Measurement and Analysis System of Field Load of Construction Machinery

野中寿夫* Toshio Nonaka

建設機械はその使用環境が複雑なため、類似機種の実働荷重を十分に把握して強度設計に使用し、製品の信頼性向上を図っている。本報告では、実稼動現場で効率的に計測解析を行なうためのコンピュータによるシステムについて述べる。内容は、ハードウェア、ソフトウェアの構成、システム開発に当たって考慮した点、及び油圧ショベル作業機の実働荷重の解析例について示している。本システムにより、計測解析時間の大幅な短縮とデータ処理の高精度化が可能となった。

1 緒言

近年、機械構造部材の強度評価には、コンピュータによる動的解析や有限要素法による応力解析など合理的手法が用いられ、信頼性向上、設計開発時間の短縮が図られている¹⁾。信頼性の高い建設機械の開発には図1に示す関係要因を含んだ強度評価体制が必要であり、各要因に対して詳細な検討が行なわれる。ここでは構造部材を対象としたが、他の要素についても同様と考えられる。ここに示した要因のどれかを欠いたとすれば目標品質を確保することは難しい。特に実働荷重の把握が不適切であると、いかに詳細な解析を行なっても、またいかに多くの強度試験を行なっても強度評価を誤まることになる。従来多くの機械設計では、解析精度の不足を補うため推定荷重に対して大きな安全率を用いてきた。しかし、現在では解析技術が進歩し、また製品品質の向上、省エネルギー製品化などの観点から、最適な強度設計の要求が強まっている。したがって、従来にもまして合理的設計法が必要とされている。実稼動条件下で機械に作用する荷重を正確に把握する必要性が生じてきたのは、このような背景による。建設機械はその使用環境が複雑なため負荷条件も種々変化し、

これを把握するにはかなりの困難さを伴う。しかし、全く新開発の機械は別として、大部分の機種は既に類似品が市場で稼動している。この場合、実機の使用状況を詳細に調査解析して新製品の負荷デューティを決めることが、製品に信頼性を盛り込む上で最も望ましい。このためには、種々の作業現場での系統的なデータ解析と蓄積が必要であり、コンピュータを利用した解析システムが最適と考えられる。以下、フィールドでの実働データ処理システムについて説明する。

2 フィールドでの計測解析システム

建設機械では、応力、油圧、振動計測により強度評価する場合が多い。これらは相互に影響するため、部材に作用する負荷を把握するには系統的処理が必要である。また強度、信頼性には直接関係ないが、環境対策上騒音解析を要することも多く、フィールドでの解析システムでは、これらを総合的に取り扱っている。応力頻度や振動解析には市販の解析器が用いられるが、実働荷重の解析は対象機種、負荷の種類によって異なる。したがって、解析の多様性、拡張性、機動性を考えてコンピュータによるシステムを採ることにした。初期には、データレコーダで記録し、コンピュータ室に持ち帰って再生処理する形式であった。これは繰返し処理ができるため、プログラムの開発に応じて多目的解析が行なえる利点があるが、測定現場では計測が中心になるため、測定漏れや突発的に発生する現象の解明が不十分になりがちであった。最近ではこの欠点を改良し、コンピュータを直接測定現場に移動し、オンライン処理する形式に移行している。

実働負荷計測では特殊な計測が多く、時間的制約も強いいため検出器などに種々の工夫をしている。油圧シリンダ用の長変位計や下ローラの荷重検出用薄形ロードセルなどが開発されている。また、コネクタ着脱式ブリッジヘッドにより、測定準備時間の大幅短縮も図られている。建設機械は屋外で稼動し、検出器の一部は水中に入ることもあり、水中変位計など防水にも意を用い、台風下での実測経験もある。

測定現場には電源がないことが多く、発電装置をもつマイクロバスが用いられている。図2にフィールドデータ処理用の解析機器を搭載した計測車の内部を示す。主要な機器構成を図3に、その仕様を表1に示す。計測解析機器は、運搬時の振動衝撃に弱いいため、防振台の上に固定されている。

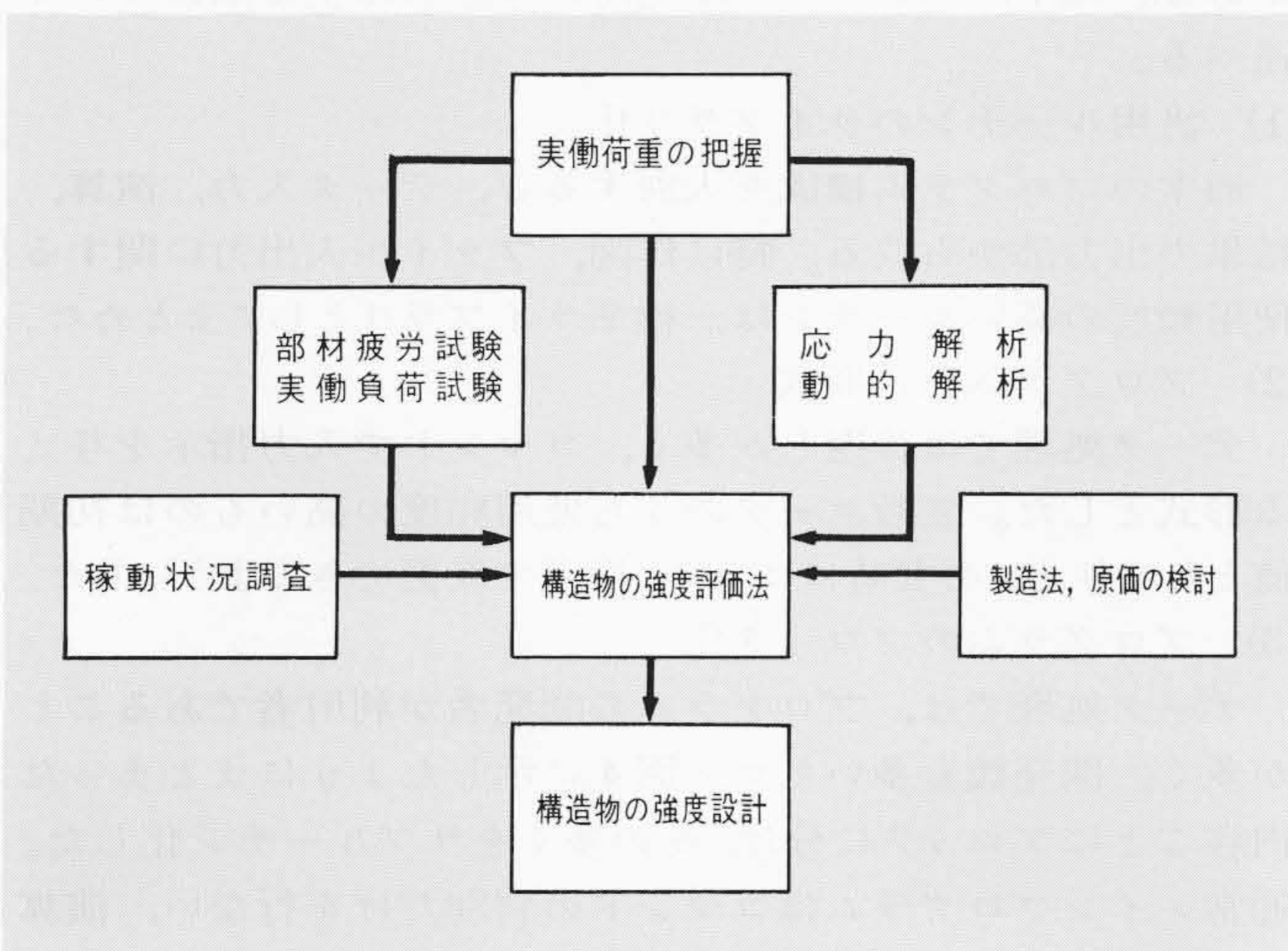


図1 構造物の強度設計の関係要因 合理的な強度設計を行なうためには、関係する要因についての検討が必要である。なかでも実働荷重を正確に把握することが重要である。

* 日立建機株式会社土浦工場

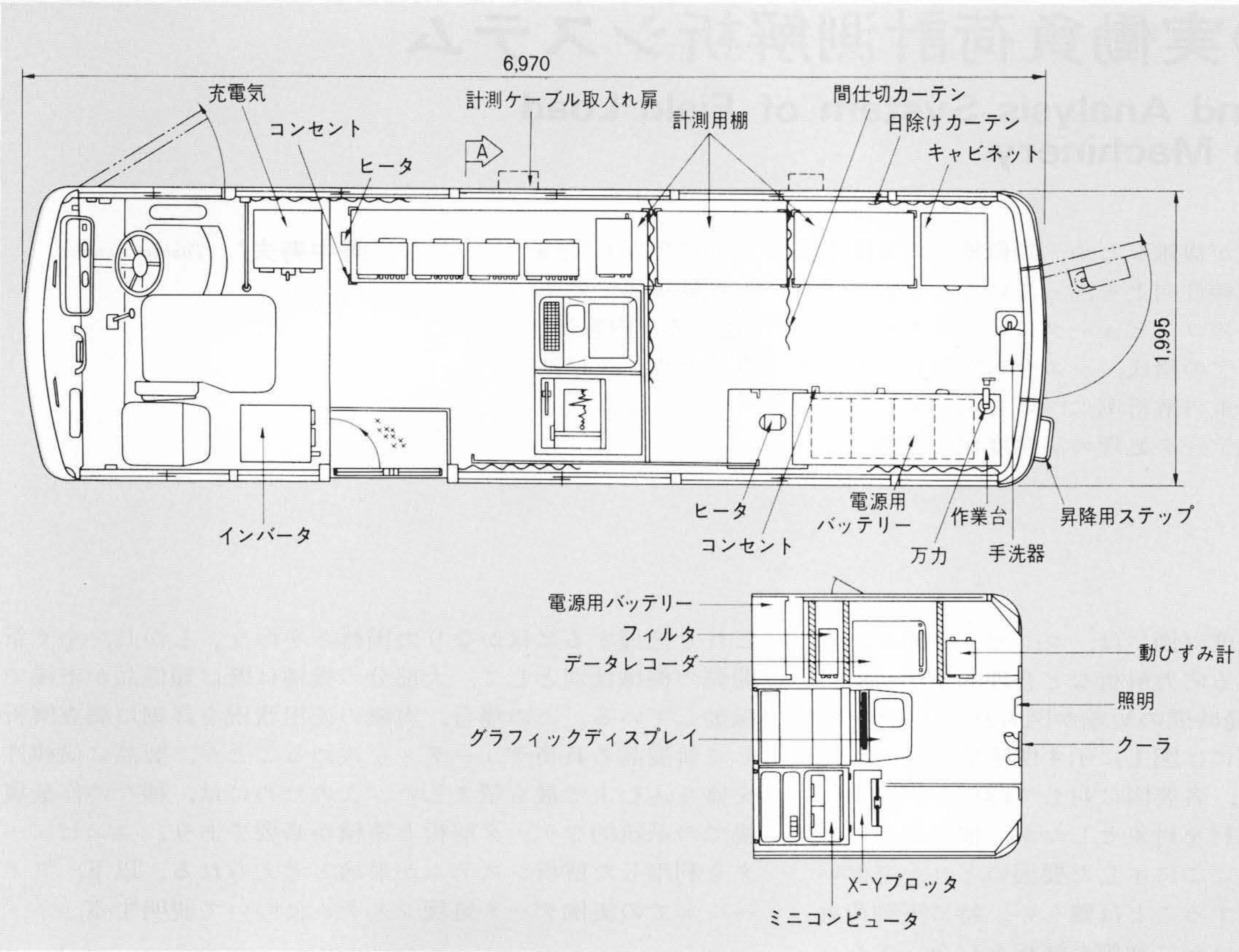


図2 実働データ解析車の機器搭載例 建設機械の稼働現場に移動し、直ちに計測解析できるように電源、コンピュータ、計測機器類をマイクロバスに搭載している。

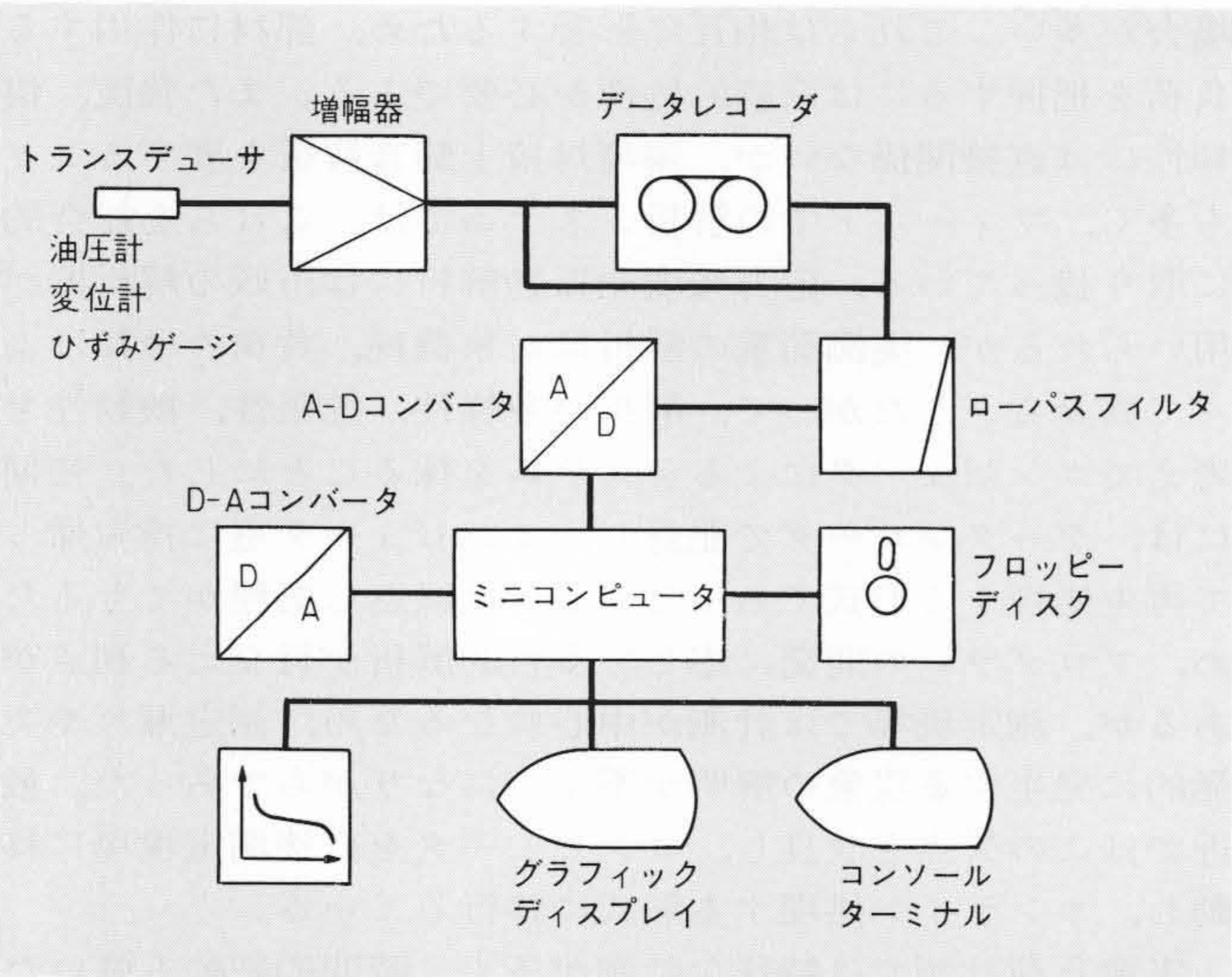


図3 データ処理システム 一般的な実働負荷に用いられるデータ処理システムの構成を示す。

表1 データ処理用機器 計測車に搭載する計測、解析機器の例を示す。このほか、振動測定用アンプやシンクロスコープなどがよく用いられる。

計 測 解 析 機 器	仕 様
ミニコンピュータ	32kワード
フロッピーディスク	256kバイト 2台
グラフィックディスプレイ	—
コンソールターミナル	—
A-Dコンバータ	16チャンネル, 12ビット
D-Aコンバータ	4チャンネル
データレコーダ	14チャンネル 2台
ストレインメータ	6チャンネル 4台
ローパスフィルタ	12チャンネル

3 ソフトウェア

コンピュータによるデータ処理では、ソフトウェアの開発体制は特に重要である。研究の場合は定型的処理よりも非定型的処理の比重が高く、プログラム開発ができないと処理自体もできないことがある。時間的制約が多いので、プログラム開発工数の短縮を考えたシステム構築が必要である。ハードウェア選択時に、演算時間、メモリ容量についての検討のほかに、プログラム開発の容易化の工夫を含めソフトウェア開発のサポート体制が整っているかを十分検討しておく必要がある。以下、本システム開発時に考慮した主な点について述べる。

(1) 汎用ルーチンのライブラリ化

通常のプログラム構成を大別すると、データ入力、演算、結果の出力部から成る。特に作図、ファイル入出力に関する使用頻度の高いルーチンは、標準ライブラリとしてまとめた。

(2) プログラム実行形式

データ処理では繰返しが多く、コマンドで入力指示を与える形式とした。変数データのうち使用頻度の高いものは初期値として与え、必要時にコマンド指示で変更できるようにした。

(3) プログラムのブロック化

データ処理では、プログラムの開発者が利用者であることが多く、開発数も多いため、図4に示したようにまとまった内容ごとにブロックに分け、その多くをサブルーチン化した。通常メインプログラムはコマンドの判別だけを行ない、演算実行部はサブルーチンとしてオーバレイ構成とした。これによりプログラムの追加、修正、削除が容易になり、開発工数が大幅に低減した。

標準ライブラリの有効利用により、プログラムステップ数で30～50%低減、工数的にはデバッグ時間を含めて $\frac{1}{5}$ ～ $\frac{1}{10}$ に短縮することができた。

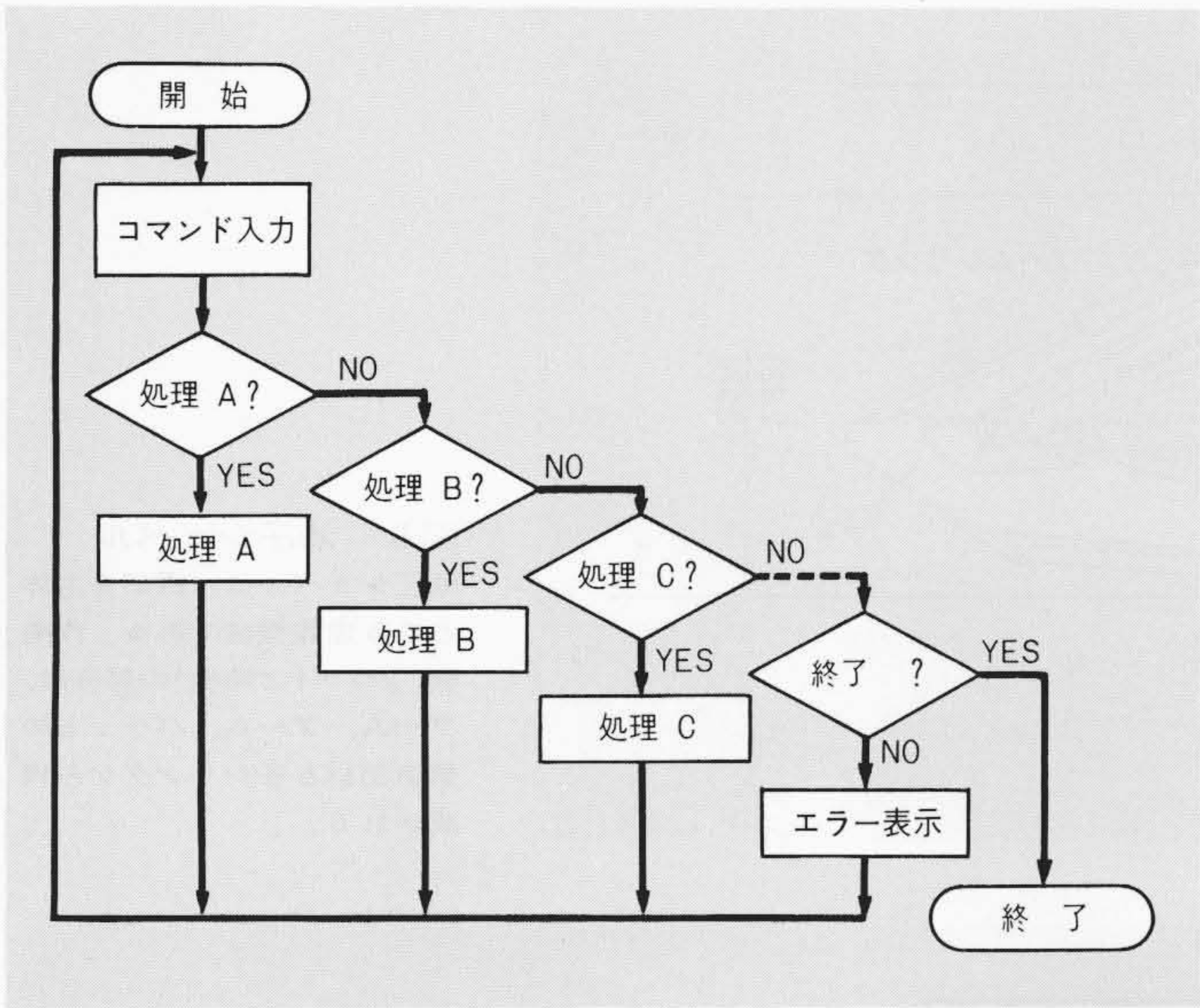


図4 データ処理プログラムのフローチャート プログラムは処理内容ごとにブロックに分け、その多くをサブルーチン化しオーバーレイ構成にすることにより、追加、修正、削除が容易になる。

次に実働荷重用のプログラムを紹介する。主なプログラムを表2に示す。フィールドでのデータ処理は種々の解析が要求されるので、汎用的処理はオーバーレイ構成で1本のプログラムとしてまとめている。主要な機能を簡単に説明する。

(1) データのサンプリング

汎用的に使うため、信号数、サンプリング時間、データ総数、較正値の大きさ、ファイルの作成など種々の条件選択ができる。サンプリング時に最大、最小、平均値を算出する機

表2 データ処理用プログラム フィールドでのデータ処理は、種々の解析を能率良く行なう必要があり、用途の多いものはオーバーレイ構成で1本のプログラムにまとめられている。

No.	プログラム	備考
1. フィールドデータ解析プログラム	データサンプリング ピーク値サンプリング 最大値検出と前後データのサンプリング 簡易データ処理(最大、最小、平均値) インターバルヒストグラム ピーク値頻度処理 レインフロー頻度処理	サンプルレート最高50μs 1～16信号同時処理 ディスクファイル作成
	高速フーリエ変換 振幅スペクトラム オートパワースペクトラム クロスパワースペクトラム 自己相関関数 相互相関関数 コヒーレンス関数 伝達関数 位 相	データ点数：1,024点 最高周波数：10,000Hz ウィンドウ：ハミング
2. 実働プログラム関連	油圧ショベルフロントの実働荷重解析 油圧ショベル部材応力解析 掘削軌跡解析 疲労被害算出と寿命予測 負荷状態の相関性解析	フロントに作用する実働荷重の大きさ、方向、掘削姿勢の解析 試験条件と実働の相関性

能をもたせたものもあり、較正時の異常値検出、応力測定による簡易強度評価に用いられる。また、ピーク値のサンプリング機能もある。突発的に発生する衝撃値などの解析を行なうため、最大(最小)値前後のデータを記憶することもできる。

(2) 頻度解析

建設機械の負荷は不規則変動であり、強度評価を行なうためには発生頻度の把握が必要である。本システムではピーク値計数、レインフロー計数、時間頻度計数などを用いており、いずれも16チャンネルまでの任意の信号を同時に処理できる。

(3) 周波数分析、コヒーレンス関数

油圧シリンダや配管系の負荷には、振動に起因するものが多く、高速フーリエ変換による周波数分析やコヒーレンス関数などの演算処理が用いられている²⁾。

(4) ファイルの作成

データの蓄積、多目的解析には、原データ、処理結果の記憶が必要である。本プログラムでは、サンプリングデータだけでなくほとんどの演算結果をディスクファイルとして保存できるようになっている。

(5) 作画機能

原信号や結果を確認するために作画表示は、データ処理の必需機能である。本システムでは、グラフィック、プロッタ両機器用ルーチンの共用化を図っており、前者で確認、検討を迅速に行ない、後者で必要な結果だけ作画するように使い分けている。

これらのプログラムは、データのサンプリング、頻度分析など高速性を必要とする部分はアセンブラで、他はフォートラン言語で組み開発の能率化を図っている。

4 実働荷重の解析

油圧ショベルの解析事例について報告する。油圧ショベルは図5に示すような外観をもち、掘削作業を主な用途とする建設機械である。作業効率を上げるため、車体上部(上部旋回体)は足回り(下部走行体)に対して左右自由にエンドレスに旋回できる。車体には油圧シリンダで操作される作業機(以下、フロントと略称)が装着されており、土砂の掘削、積込みを行なう。以下、フロントに作用する実働荷重の解析について述べる。負荷は、フロントの姿勢と油圧シリンダ力から演算によって求めることができる。すなわち、ブーム、アーム、バケット3種のシリンダ変位からフロントの姿勢が、またシリンダのロッド側、ボトム側の油圧力に関する計6信号からシリンダ力が求まる。次に、これらの情報量から部材を結合している各ピン位置での荷重の大きさと方向を求めることができる。このように多数の信号から荷重を算出するので、いずれか一つの信号が不良であると解析そのものが成り立たなくなってしまうことにデータ処理の難しさがある。図6はブーム部材の各ピンとシリンダに作用する荷重の解析例である。この解析は、演算時間が多少かかるため、汎用プログラムで0.1秒間隔でサンプリングしたデータファイルを用い、別途開発したプログラムにより処理している。計算で求めた荷重から部材の断面の応力を算出し、同位置にはり付けたひずみゲージの出力結果と比較したのが図7である。明らかに良い相関性があり、本方式により正しく負荷評価ができることを示している。図8には、実作業時のバケット爪先端の軌跡を示す。同図と荷重の大きさ、方向を照合することにより、作業状況をいっそう明確に把握できる。なお本解析は、フロントの長手方向荷重を対象としているが、実際には掘削時には偏荷重やバケットが旋回で横衝突するときの荷重

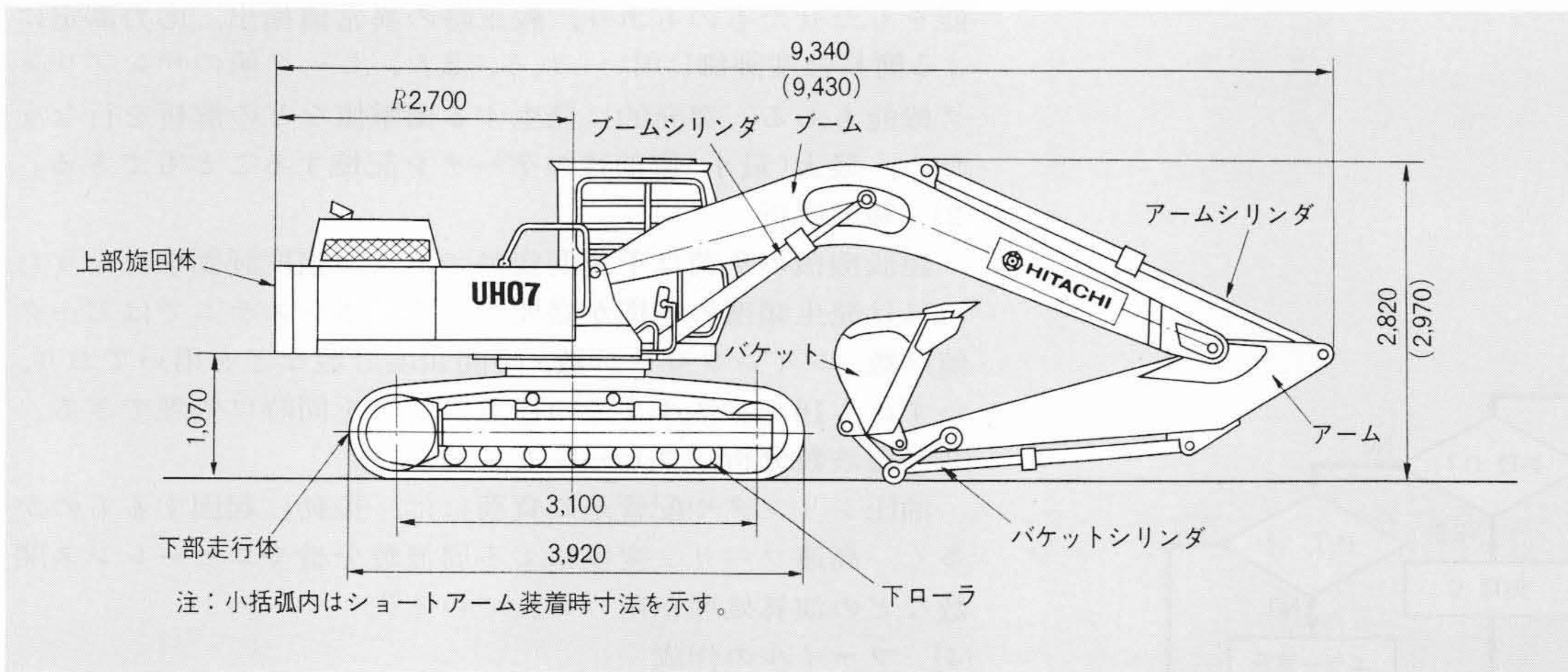


図5 油圧ショベル
油圧ショベルは、掘削を主体とする建設機械である。作業機(フロントと略称)の部分は、ブーム、アーム、バケットの構造部材と各シリンダから構成される。

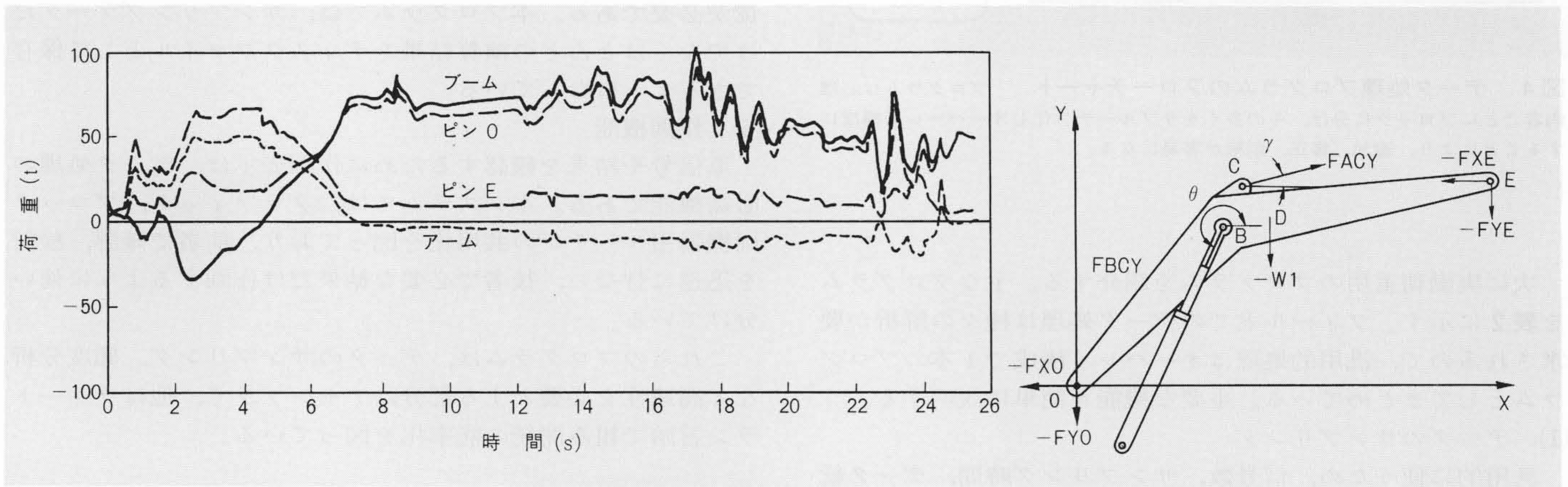


図6 ブームに作用する実働荷重 シリンダ油圧力とシリンダ変位の実測値から演算処理した、ピン荷重とシリンダ力を示す。

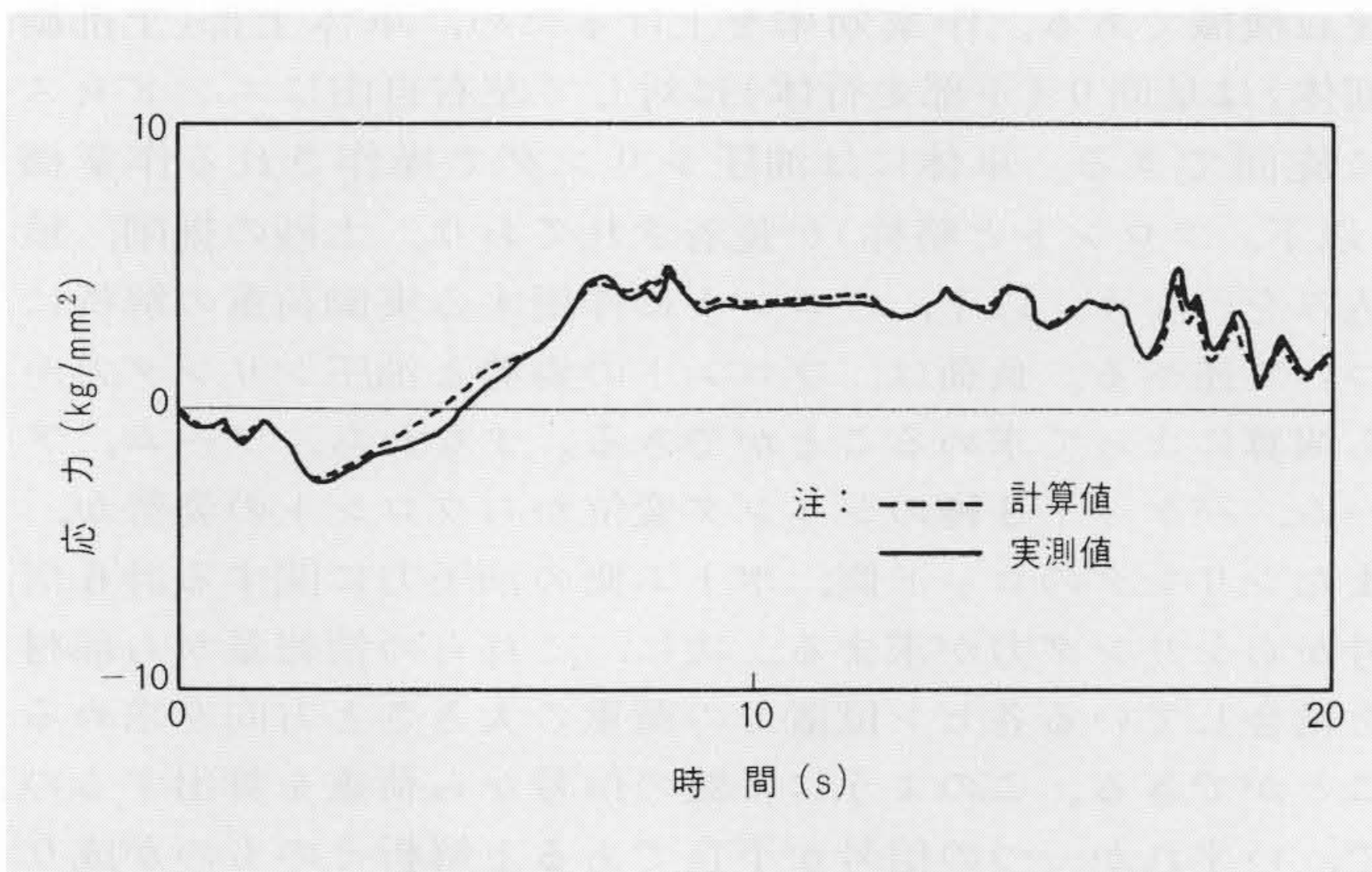


図7 ブームに作用する応力の実測値と計算値 実働荷重から算出した応力値と実測値との比較を示す。両者は非常に良い相関性を示している。

が作用する。これらは、部材各部にはり付けたひずみゲージの出力から得られる情報に基づいて評価できる。構造物の疲労強度を評価するには、応力頻度を知る必要があるが、これは前述のフィールドデータ解析プログラムでリアルタイムに求めることができる。図9は作業条件の厳しい現場で、ダンプトラック1台に土砂を積み込むごとに、レインフロー法で分析した結果を示している。同図には数台のダンプへの積み込み分を合わせて表示した。作業条件が軽いと、この分布はほとんどばらつかないが、条件が厳しいと同図に見られるよう

に、1回ごとに分布が異なっている。同図の曲線は平均値を示すが、この線の折れ曲り点から高応力側の部分は、主として基本的な掘削積込み作業に対応している。軽掘削では、この折れ曲り点の頻度は増加する。また折れ線の低荷重側は、掘削時の車体の揺れなどに起因するものである。応力頻度が明確になれば部材が受ける疲労被害についての評価を行なうことができる。作業現場ごとに算出した頻度から修正マイナ則で疲労被害を求めて比較すると図10のようになる。各条件ごとに最大応力幅は異なるので、これを基準とした応力幅比とその疲労被害の割合とで表わしている。軽作業ほど応力幅比が高く、かつ疲労被害の割合が大きい位置で曲がっており、基本掘削作業の占める割合が強いことを示している。基本掘削作業の負荷はモデル化した掘削作業サイクルから決められるので、作業条件と寿命までの基本掘削の作業回数を決めれば、次のように部材の許容応力を決めることができる。作業の疲労被害を D_s 、寿命までの掘削回数を n_s とし、部材の許容応力幅を $\Delta\sigma_s$ 、材料の寿命までの繰返し数を N_s とすれば、材料のS-N曲線から応力幅 $\Delta\sigma$ と繰返し数 N との関係は、

$$\Delta\sigma^\alpha \cdot N = c \quad \dots\dots\dots(1)$$

と表わされる。ここで α は曲線のこう配、 c は定数である。(1)式から、

$$\Delta\sigma_s^\alpha \cdot N_s = c \quad \dots\dots\dots(2)$$

となる。また直線被害法則によれば、基本掘削作業の疲労被害は、

$$D_s = n_s / N_s \quad \dots\dots\dots(3)$$

であるから、(2)、(3)式から許容応力は、

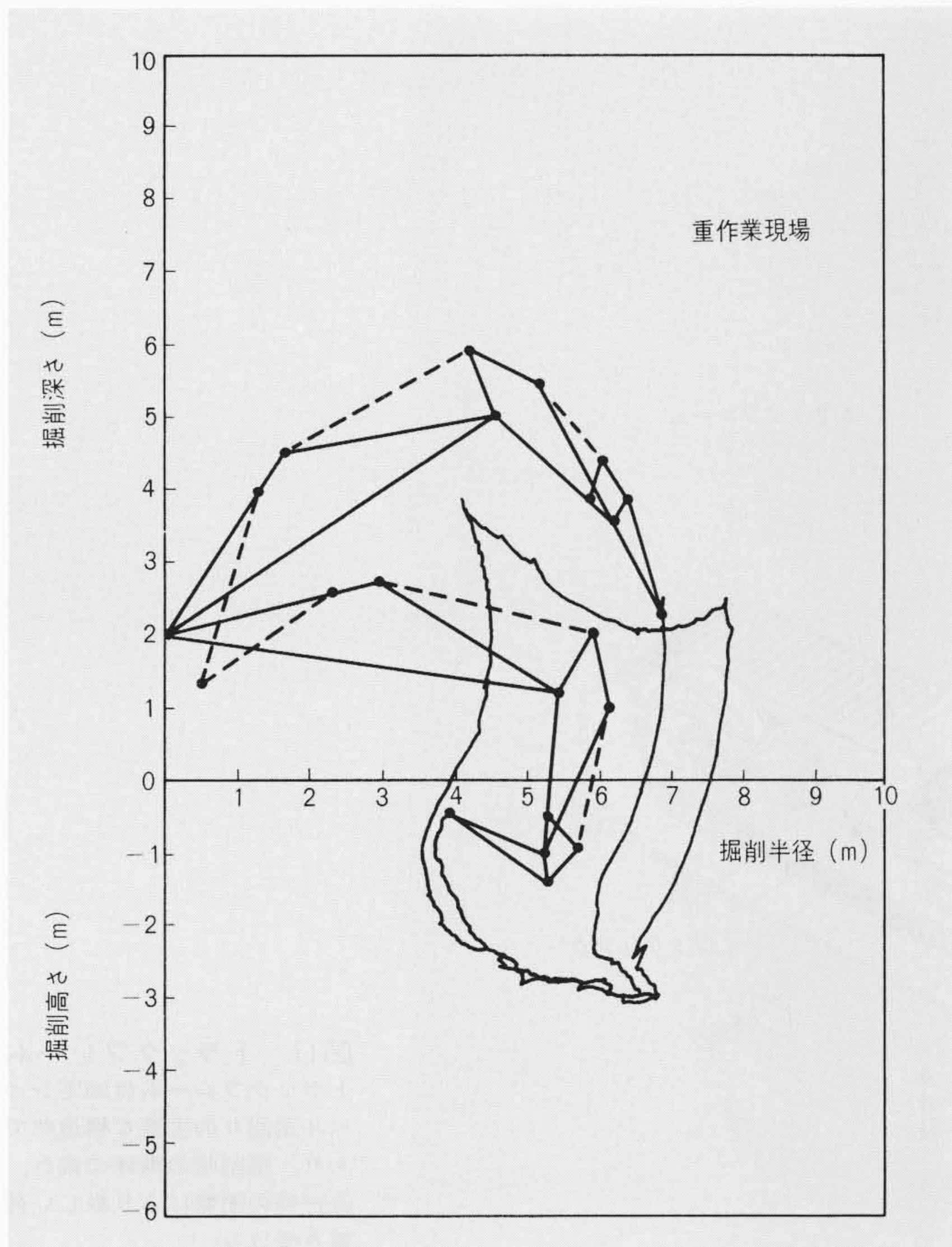


図8 掘削軌跡 掘削時のバケット爪先端の軌跡を示す。荷重の方向と大きさと合わせて、実働負荷の状況が明確に分かる。図の黒点は各部材結合部のピン位置、点線がシリンダを示す。

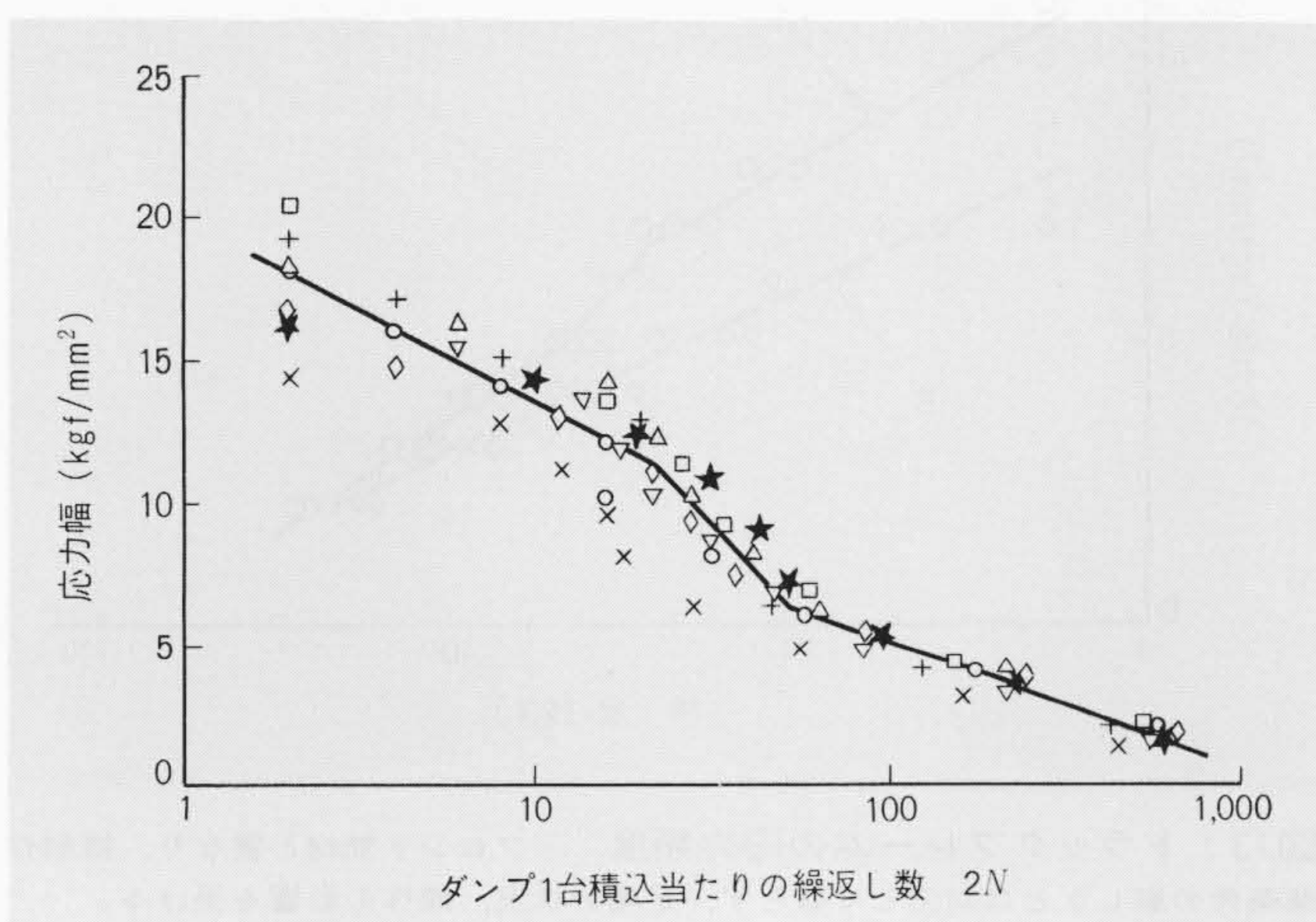


図9 応力頻度分布 ダンプトラック1台に土砂を積み込むごとに処理した応力頻度分布を示す。

$$\Delta\sigma_s = \left(\frac{c \cdot D_s}{n_s} \right)^{1/\alpha}$$

として求めることができる。

以上、油圧ショベルのフロントに作用する実働荷重の特性について述べたが、次に、同様な重要強度部材であるトラックフレームに作用する実働荷重の特徴について簡単に説明する。トラックフレームは図11に示すような足回りの構造物で常時上部車体の負荷を受けるとともに、走行時や掘削作業時には地面からの反力をトラックリンク、下ローラを介して受

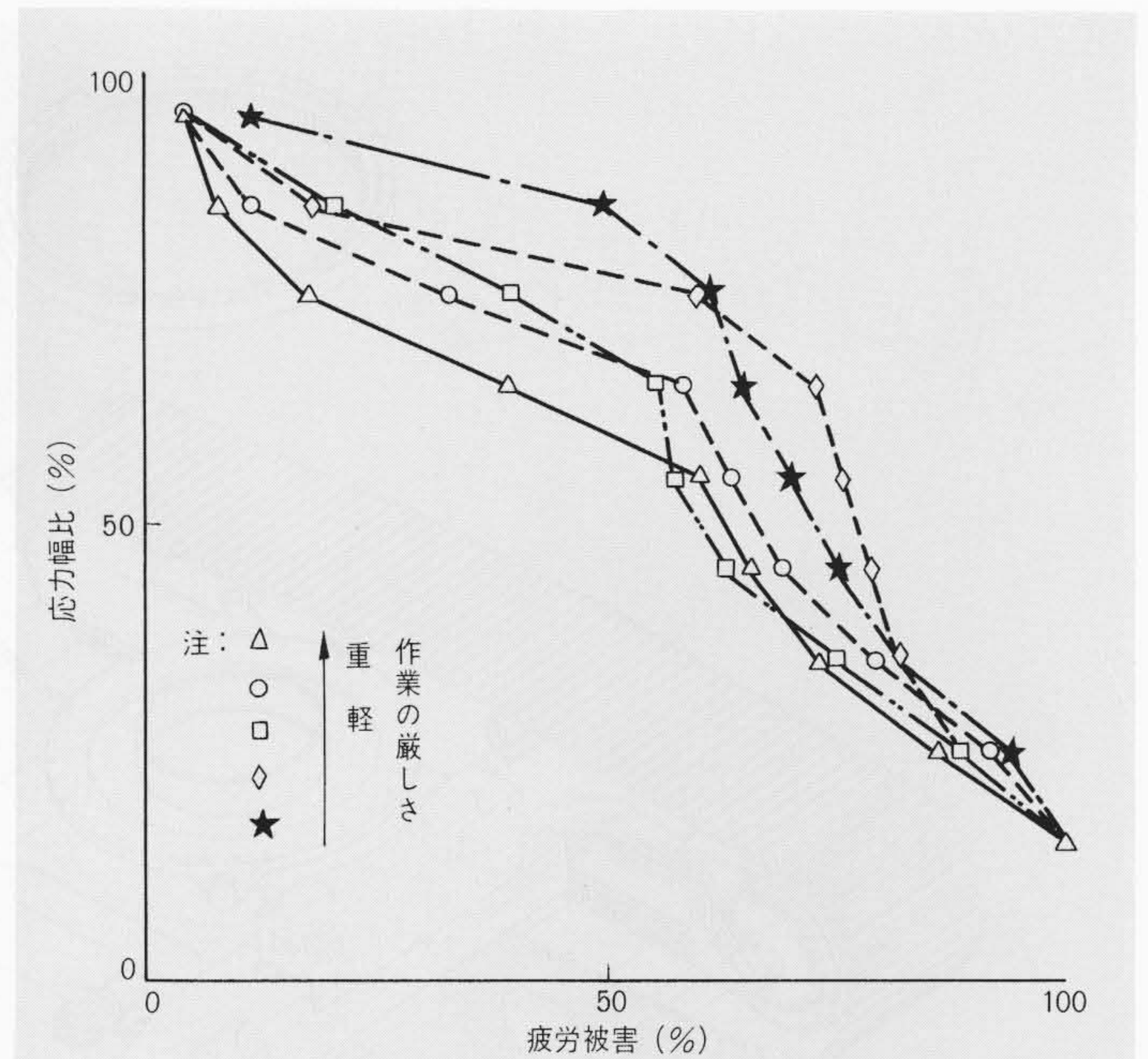


図10 実作業時の疲労被害 掘削作業の程度と疲労被害の関係を示す。一般に軽掘削ほど高応力幅の占める被害が多く、すなわち変動が比較的小さいことを示している。

ける。特に走行時には、地面の凹凸や、玉石などの障害物乗り越えにより衝撃的に大きな荷重を受ける。また掘削時には、掘削に直接起因する負荷のほか、車体の揺れによる荷重変動が作用する。そこで、掘削時でトラックフレームが受ける実働荷重を、フロント部材に加わる負荷変動と比較してみることとする。図12は、掘削作業時にダンプ1台に土砂を積み込むごとに発生するアームの応力状況を整理したものである。同図でAと表示したものは、掘削作業条件としては軽い現場での測定結果であり、またBと表示したものは、より厳しい現場での応力分布である。厳しい現場では作用する応力値も大きく、また頻度も多くなっており、部材の受ける疲労被害が大きいことを示している。これに対してトラックフレームの受ける応力状況を同様に整理してみると、図13に示すようにアームの場合とは明らかに逆の挙動を示しており、掘削作業条件での厳しさが、そのままトラックフレームの負荷条件の厳しさとはなっていないことが分かる。更に、測定データを種々解析したところ、このような応力の挙動は車体の揺れの状況に強く影響されていることが判明した。車体の揺れは、足場の状況、走行速度とともに車体の操作性、安定性の影響を強く受けるため、トラックフレームに加わる負荷を軽減するためには、これらの面で検討を加えることも必要である³⁾。

これらの解析で明らかにされた負荷デューティは、新製品開発時の強度設計に取り入れられ、CAD(計算機利用設計)を用いた合理的設計により信頼性の高い建設機械を作り出す不可欠な要素となっている。日立建機株式会社では、広くネット化された直営サービス部門の多くのフィールドデータに加え既にマイクロコンピュータによる油圧ポンプの故障診断や構造部材の超音波探傷などにより、実機の稼動機能の推移を詳細に管理して適切なサービスを行なっているが、製品品質を更に向上させるため今後とも実働データの豊富な蓄積が必要と考えている。

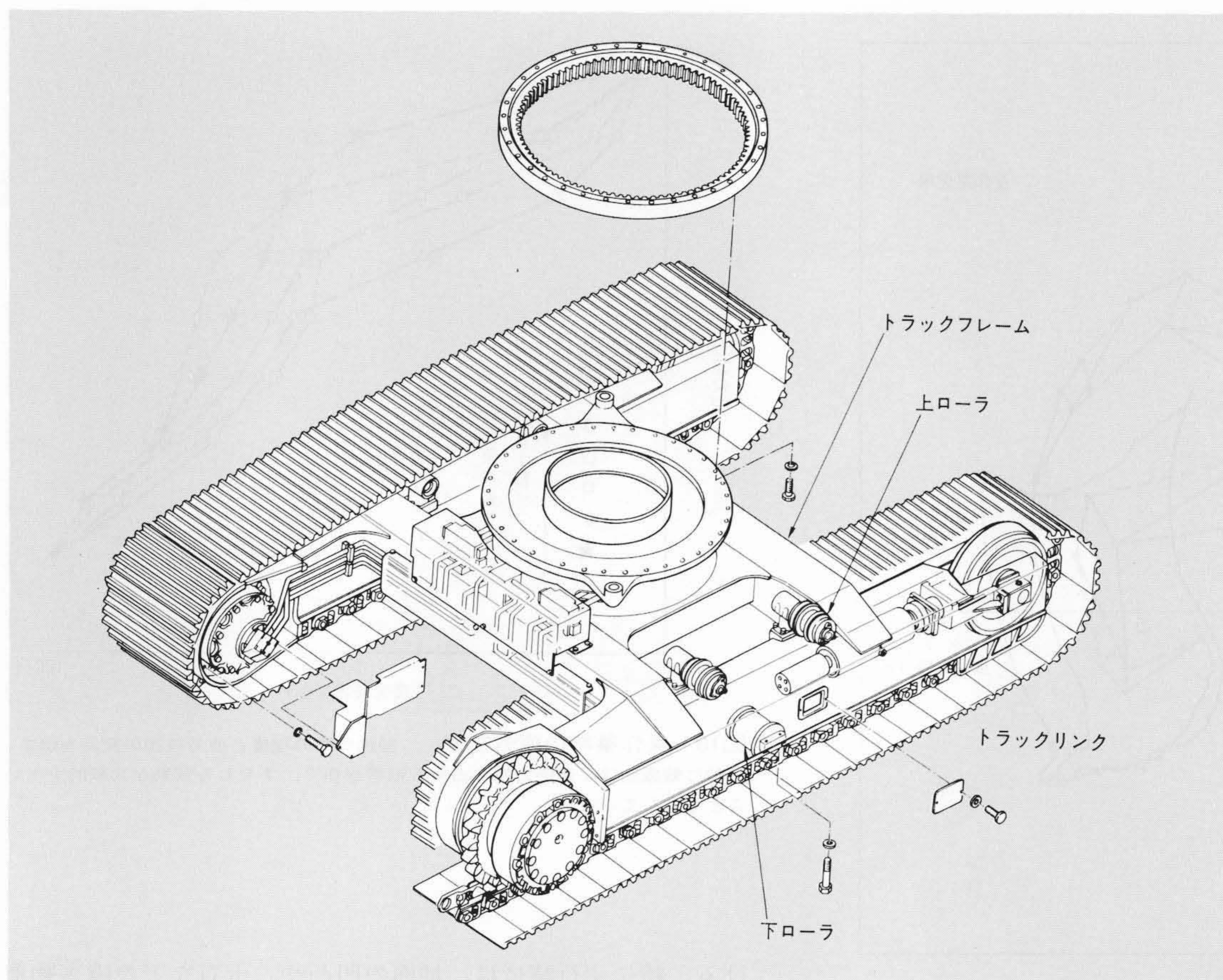


図11 トラックフレーム
トラックフレームは油圧ショベル足回りの主要な構造物であり、掘削時の車体の揺れ、走行時の衝撃により厳しい荷重を受ける。

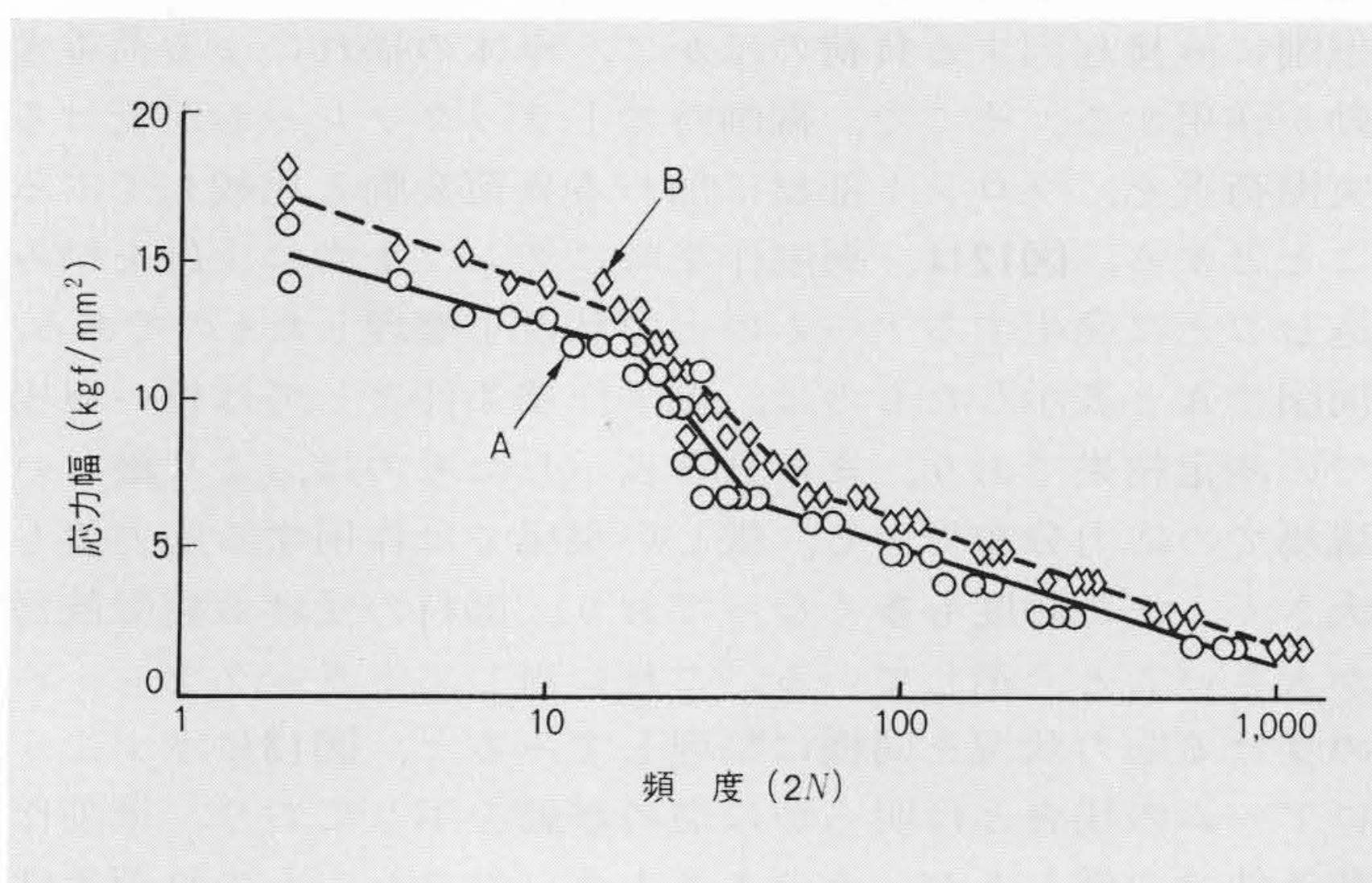


図12 ダンプ1台積み込み当たりのアームの応力頻度 掘削作業条件の軽い現場Aと厳しい現場Bとの応力頻度分布の比較を示す。

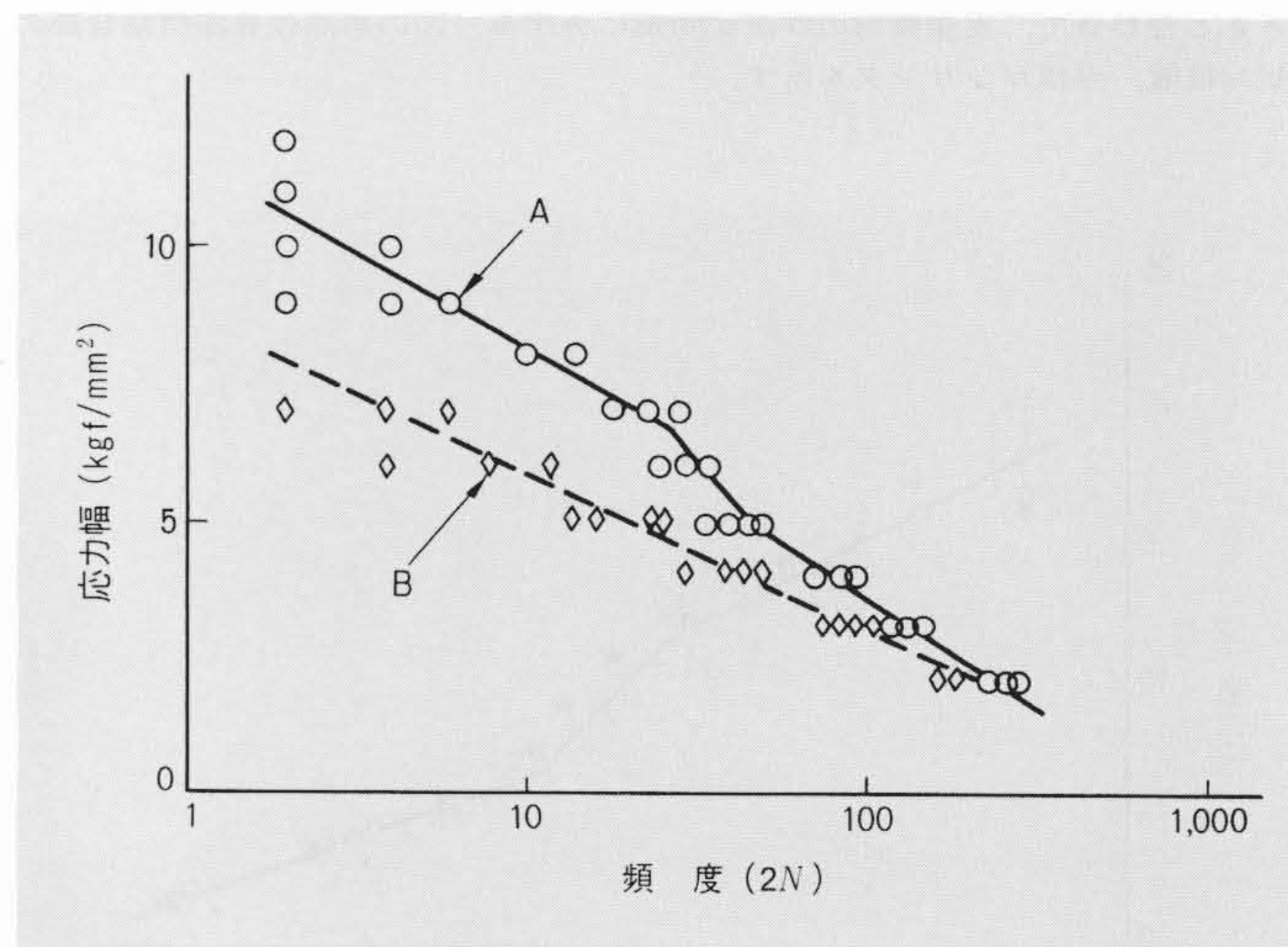


図13 トラックフレームの応力頻度 フロント部材と異なり、掘削作業条件の厳しさとは対応しておらず、足場の状況、操作の影響を受ける。

5 結 言

建設機械の実働負荷解析システムの開発によって、次の点が明らかになった。

- (1) 複雑な負荷にさらされる建設機械の実働荷重の解析には、コンピュータによるオンラインフィールドデータ処理が最も適しており、処理時間も大幅に短縮された。
- (2) ソフトウェアをブロック化、標準化し、更にライブラリ化することにより、プログラム開発工数を大幅に低減することができた。
- (3) 汎用フィールドデータ解析プログラムにより、建設機械の実働負荷を精度良く把握できることが分かった。

以上述べた解析システムは、ボルト締結に関する研究⁴⁾など

多くの実験解析にも利用されており、今後なお活用範囲の拡大発展が期待されている。

参考文献

- 1) 大野, 外: 油圧ショベルの実働荷重と強度設計, 建設機械, 16-6, 31~36 (昭55-6)
- 2) 野中, 外: 低騒音・振動対策事例(6)油圧ショベル, 油空圧化設計, 15-4, 39~42 (昭52-4)
- 3) 野中, 外: 油圧ショベル動的安定性の解析, 機械学会日立地方講演論文集, 58~60 (昭52-9)
- 4) 野中, 外: ボルト締付け時の挙動, 日本機械学会論文集(C編), 47, 421, 1178~1186 (昭56-9)