MSDRD による高強度鋼の確率疲労特性に関する統計解析*

岡田 憲司^{*1}, 西川 出^{*2}, 酒井 達雄^{*3}
久世 佳弘^{*4}, 西島 敏^{*5}, 菅田 淳^{*6}Statistical Analysis of Fatigue Properties
of High Strength Steels Based on MSDRDKenji OKADA, Izuru NISHIKAWA, Tatsuo SAKAI,
Yoshihiro KUSE, Satoshi NISHIJIMA and Atsushi SUGETA

A large-scale database MSDRD on mechanical properties of structural materials such as metals, composites and ceramics were constructed by The Research Group for Statistical Aspects of Materials Strength. In the previous paper, fatigue data of structural steels in a wide range of strength level were analysed from a statistical view point and it was reported that distribution characteristics of the fatigue life were distinctly affected by the strength level. Thus, main target of this work was focused on fatigue data of high strength steels compiled in the above database and statistical fatigue properties were analysed in particular attention to the effect of heat treatment conditions. It was finally found that the distribution pattern of the fatigue life for high strength steels was classified into single-mode and mixed-mode Weibull distributions depending on the strength level governed by the tempering temperature.

Key Words: Fatigue, Statistical Analysis, Reliability, High Strength Steel, Database, Heat-Treatment, Mixed-Mode Weibull Distribution, $P-S-N$ characteristics

1. 緒 言

材料強度確率モデル研究会により構築された材料強度信頼性データベース(MSDRD: Materials Strength Database for Reliability Design of Machines and Structures)^{(1)~(3)}をもとに、著者らは先に広範な強度レベルの機械構造用鋼の確率疲労特性を解析した。その結果、強度レベルに依存して、疲労寿命の分布特性が傾向的に変化し、強度レベルが上ると単一分布で表示できず、混合ワイブル分布に従う特徴を呈することが明らかになった⁽⁴⁾。したがって、本報では特に引張強度が 800 MPa 以上の高強度鋼に限定し、本データベース MSDRD に収録された当該データ全件を対象に確率疲労特性を詳細に解析して、強度レベルと熱処理条件により機械構造用鋼の確率疲労

特性が大きく変化する全体像を明らかにした。

2. 確率疲労特性の解析法

2・1 広範な応力域における基本 $S-N$ 特性

金属材料の疲労特性については片対数あるいは両対数座標上での $S-N$ 曲線を基礎とする取扱いが定着しているが、広範な応力域にわたる $S-N$ 曲線は、単純な関数で表示することができない。これまで $S-N$ 曲線の数学的表式については傾斜部と耐久限度付近の水平部をいかに解析的にうまく表示するかが主要な論点であった⁽⁵⁾。しかし、鉄鋼材料の耐久限度は比較的明りょうに現れるが、非鉄金属については明確な耐久限度が現れないことが多い。耐久限度の明確な鉄鋼材料であっても、 10^7 回を越える長寿命域では $S-N$ 曲線が再び下降するような結果が多数報告されている^{(6)~(8)}。一方、逆に負荷応力が著しく高くなると $S-N$ 曲線の傾斜部はそのまま上方に延長されることなく、一般に短寿命側に大きく外れる傾向が広く認められている。

鉄鋼材料の疲労特性に関する以上の一般的特徴を模式的に示すと図 1 のようになる。すなわち、 $S-N$ 曲線は短寿命域の低こう配部①から傾斜部②に移行し、耐久限度付近で水平部③が現れ、さらに鋼種によっては長寿命域で新たな傾斜部④を呈することになる。以

* 原稿受付 1997 年 4 月 9 日。

^{*1} 正員、高松工業高等専門学校 (☎ 761-8058 高松市勅使町 355)。^{*2} 正員、大阪大学基礎工学部 (☎ 560-8531 豊中市待兼山町 1-3)。^{*3} 正員、立命館大学理工学部 (☎ 525-8577 草津市野路東 1-1-1)。^{*4} 立命館大学大学院。^{*5} 正員、金属材料技術研究所 (☎ 305-0047 つくば市千現 1-2-1)。^{*6} 正員、大阪大学工学部 (☎ 565-0871 吹田市山田丘 2-1)。

上は負荷応力と疲労寿命の関係を決定論的に与えるものであるが、応力が与えられても疲労寿命は一般に大きなばらつきを伴うので、機械構造物の安全設計や信頼性解析のためには、図1のS-N曲線の統計的変動特性を定量的に把握する必要がある。

2・2 疲労寿命分布の解析法 基本的な解析法は前報⁽⁴⁾と同様であり、2・2節ではその要点のみを簡潔に述べることにする。3母数ワイブル分布の密度関数と分布関数は、それぞれ次式で与えられる。

$$f(N) = \frac{a}{b} \left(\frac{N-c}{b} \right)^{a-1} \exp \left\{ - \left(\frac{N-c}{b} \right)^a \right\} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$F(N) = 1 - \exp \left\{ - \left(\frac{N-c}{b} \right)^a \right\} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに a は形状母数、 b は尺度母数、 c は位置母数を示す。

なお、耐久限度付近の低応力域では、十分な応力繰返しの後でも破壊しない試験片が現れるが、このような応力域での疲労寿命分布については、著者らの一人が別報⁽⁹⁾で提案した次の表式を用いる。

$$f(N) = f_{ks}(N) + F_0 \delta(N - N_d) \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに $f_{ks}(N)$ は有限寿命域での確率密度、 F_0 は非破壊確率を表し、 $\delta(N)$ はデルタ関数で超長寿命 N_d において積分値1をとる。また、

$$F_{ks} = \int_c^\infty f_{ks}(N) dN \quad \dots\dots\dots (4)$$

は飽和破壊確率を与え、 $F_{ks} = 1 - F_0$ である。この F_{ks} により、式(3)の右辺第1項を標準化し、 $f_{ks}^*(N) = f_{ks}(N)/F_{ks}$ として、この $f_{ks}^*(N)$ を通常の3母数ワイブル分布で表示する。このとき、疲労寿命の分布関数は次式で与えられる。

$$F(N) = F_{ks} \left[1 - \exp \left\{ - \left(\frac{N-c}{b} \right)^a \right\} \right] \quad \dots\dots\dots (5)$$

もちろん、全試験片が破断するような高応力域では、 $F_0 = 0$ 、すなわち、 $F_{ks} = 1$ となり、従来のワイブル分布と同一の表式になる。式(5)中のパラメータ $a, b,$

c, F_{ks} については、著者らの一人が提案した相関係数法^{(10)~(12)}を用いて容易に推定することができる。

さて、2・1節では単一分布を前提とする取扱いを示したが、材種や応力域などの試験条件によっては、有限寿命域においても疲労寿命の分布特性を単一分布で表示することは困難な場合がある。このような疲労特性に対してこれまでに提案されたいくつかのモデル^{(13)~(16)}を総合的にまとめた模式図が図2である。図中の実線(斜線)は位置母数の応力依存性を示し、破線は寿命中央値と応力の関係を図示したものである。

このようにS-N特性は基本的に①~④なる4成分から構成され、各成分の生起確率 p_i ($i=1, 2, 3, 4$) が応力に依存して変化すると考えるのが前報同様、本解析法の基本的視点である。このとき混合分布による疲労寿命の分布関数は次式で与えられる。

$$F(N) = \sum_{i=1}^4 p_i F_i(N), \quad \sum_{i=1}^4 p_i = 1 \quad \dots\dots\dots (6)$$

ただし、ここではワイブル分布を前提としているので

$$F_i(N) = 1 - \exp \left\{ - \left(\frac{N-c_i}{b_i} \right)^{a_i} \right\} \quad \dots\dots\dots (7)$$

である。なお、混合分布による取扱いでは超長寿命域での寿命成分を④の成分と考えることに対応させると、長寿命打ち切りデータは便宜上すべて成分④に属するデータとなる。このとき成分①、②、③については $F_0 = 0, F_{ks} = 1$ と考えればよい。他方、成分④については $N = 10^9$ 以上の超長寿命域を対象とした疲労試験を実施して調べる必要があり、今後の大きな課題と考える。

3. 確率疲労特性の統計解析結果

前述の材料強度信頼性データベース(MSDRD)をもとに引張強さが800 MPa以上の高強度鋼を検索したところ、材種と熱処理条件の組合せで表1に示す14

Fig. 1 Schematic S-N relationship

Fig. 2 Schematic S-N relationship combined with fatigue life distribution

Table 1 List of material file codes and fitted distribution forms

Material	Data file in MSDRD (Author)	Tensile strength σ_s (MPa)	Heat treatment	Fitted distribution
S45C (W1)	0370023.WTL Nishijima, S	811	845°C 30min AC, 845°C 30min WQ, 600°C 60min WC	Single mode
S45C (W2)	0070200.WTL Nishijima, S	1361	845°C 30min AC, 845°C 30min WQ, 350°C 60min WC	Mixed mode
S45C (K1)	0370025.WTL Nishijima, S	825	845°C 30min AC, 850°C 30min WQ, 600°C 60min WC	Single mode
SCM435 (S1)	0370029.WTL Nishijima, S	983	850°C 30min AC, 850°C 30min WQ, 600°C 30min WC	Single mode
SCM435 (V1)	0370028.WTL Nishijima, S	1018	870°C 30min AC, 850°C 30min WQ, 600°C 30min WC	Single mode
SCM435 (D1)	0370030.WTL Nishijima, S	1042	850°C 30min AC, 850°C 30min WQ, 600°C 30min WC	Single mode
SCM435 (D2)	0070210.WTL Nishijima, S	1373	850°C 30min AC, 850°C 30min WQ, 450°C 60min WC	Mixed mode
SCM435 (D3)	0070212.WTL Nishijima, S	1756	850°C 30min AC, 850°C 30min WQ, 300°C 60min WC	Mixed mode
35CD4 (1600MPa) (SCM435)	0070105.WTL Bastenaire	1603	850°C 1hr WQ, 400°C 5hr AC	Mixed mode
SCM440	0090002.WTL Tanaka, T	948	880°C 1hr WQ, 630°C 2hr OC	Single mode
SCM439 (Q1)	0070220.WTL Nishijima, S	974	850°C 30min AC, 850°C 30min WQ, 630°C 60min WC	Single mode
SCM439 (Q2)	0070222.WTL Nishijima, S	1466	850°C 30min AC, 850°C 30min WQ, 400°C 60min WC	Mixed mode
SCM439 (Q3)	0070224.WTL Nishijima, S	1890	850°C 30min AC, 850°C 30min WQ, 200°C 60min WC	Mixed mode
XC100 (SK3)	0070103.WTL Bastenaire	1070	800°C 30min WQ, 580°C 30min AC	Single mode

シリーズの統計的疲労試験結果を得た。表1には引張強さの数値を示すとともに、各シリーズごとにMSDRD中のデータファイル名を併記した。なお、試験条件としては田中らの砂時計形試験片による片持回転曲げ疲労試験以外は直径8mm程度の平滑試験片による均一回転曲げ疲労試験である。さらに、後述の解析により確認された適合分布形、すなわち、単一分布と混合分布のいずれに適合するかを最右欄に示した。

3・1 S45C鋼の解析結果 機械構造用炭素鋼 S45C に対する金属材料技術研究所の実験結果⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾のうち、600°C焼戻し材のW1材とK1材および350°C焼戻し材のW2材に対するS-N線図と疲労寿命分布を、それぞれ図3、4および図5に示した。図3・図4の各(b)のワイブル確率紙に描かれた実線は、単一ワイブル分布として相関係数法で推定された母数 a, b, c と F_{ks} をもとに式(5)で与えられる疲労寿命の分布関数を示す。また、図3・図4の(a)図の曲線群は各(b)図の分布曲線をもとに、各応力で破壊確率 $F=0.01, 0.10, 0.50, 0.90, 0.99$ を与える繰返し数を折れ線で結んだP-S-N曲線である。図3、4より、比較

(a) P-S-N diagram

(b) Fatigue life distributions

Fig. 3 Analytical results of S45C(W1) steel

(a) P-S-N diagram

(b) Fatigue life distributions

Fig. 4 Analytical results of S45C(K1) steel

の高温で焼戻し処理した W1 材と K1 材については疲労寿命分布が単一分布によく適合することがわかる。

一方、同じ S45C 鋼でも 350°C で焼戻し処理をされた W2 材にあっては、図 5 に示すように、かなり広い応力域にわたり、比較的短寿命の成分と比較的長寿命の成分に分離され、 $10^6 \sim 10^7$ の寿命域で破断する試験片が著しく少ない特徴が認められる。これは S-N 曲

線に見かけの耐久限度が現れるが、 10^7 回を越える長寿命域で再び S-N 曲線が低下する現象に対応するものである。したがって、このような場合の疲労寿命分布は単一分布として表示することは困難であり、短寿命成分と長寿命成分の混合分布による解析が推奨されることになる。なお、本研究では寿命分布を支配する各母数値の応力レベル依存性についても前報⁽⁴⁾と同様に解析しているが、本報では単一分布形と混合分布

(a) P-S-N diagram

(b) Fatigue life distributions

Fig. 5 Analytical results of S45C(W2) steel

(a) P-S-N diagram

(b) Fatigue life distributions

Fig. 6 Analytical results of SCM435(S1) steel

(a) P-S-N diagram

(b) Fatigue life distributions

Fig. 7 Analytical results of SCM435(V1) steel

の適合性の吟味が主眼であり、紙面の都合上、母数の応力レベル依存性については割愛する。

3・2 SCM 鋼の解析結果 SCM 435 鋼に対する金属材料技術研究所の実験結果⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾の中から 600°C で焼戻された S1 材, V1 材, D1 材について, S-N 線図と疲労寿命分布を同様に図示したのが図 6, 7 および図 8 である。図中の実線は図(a), (b)とも単一ワイブル分布による解析結果で, このような高温焼戻

し材については疲労寿命分布がいずれも単一分布によく適合することがわかる。

これに対して, SCM 435 鋼について比較的低温で焼戻し処理を施した D2 材(450°C 焼戻し)および D3 材(300°C 焼戻し)について, S-N 線図と疲労寿命分布を同様に図示したのが図 9 および図 10 である。いずれの材種についても S-N 線図における寿命のばらつき範囲が応力に依存して複雑に変動しており, とくに

(a) P-S-N diagram

(b) Fatigue life distributions

Fig. 8 Analytical results of SCM435(D1) steel

(a) P-S-N diagram

(b) Fatigue life distributions

Fig. 9 Analytical results of SCM435(D2) steel

(a) P-S-N diagram

(b) Fatigue life distributions

Fig. 10 Analytical results of SCM435(D3) steel

$\sigma=800$ MPa 付近の応力域で、 $F=0.01$ および $F=0.10$ の $S-N$ 曲線が逆方向に傾斜する奇異な現象が現れている。通常の耐久限度付近の低応力域において、クロムモリブデン鋼(SCM 435)や機械構造用炭素鋼(S50C)に対し、このような特異な現象がしばしば報告されており^{(6)(18)~(21)}、著者らはこれを例外的な実験結果とは考えていない。すなわち、本報で試みているように複数の破壊メカニズムが混在し、各メカニズムに対応する寿命成分の生起確率が応力に依存して、複雑に変動することに起因する現象と現段階では考えている。

以上のような $S-N$ データの特徴的な分布特性に伴い、疲労寿命分布もワイブル確率紙上で一見不規則な分布特性を呈する。図中の実線は 3・1 節に示した混合分布を用いて解析した $P-S-N$ 曲線と疲労寿命分布であり、いずれも実験結果の複雑な変動特性をよく表示している。すなわち、 600°C 程度以上の高温焼戻し材については疲労寿命分布は単一ワイブル分布で表示できるが、それより低い温度で焼戻した場合は、複数の成分からなる混合ワイブル分布による表示や解析が望ましいことがわかった。

(a) $P-S-N$ diagram

(b) Fatigue life distributions

Fig. 11 Analytical results 35CD4(750 MPa) steel

3・3 35CD4 鋼 [SCM435 相当材] の解析結果

Bastenaire ら⁽²²⁾⁽²³⁾が行った 35CD4 鋼(SCM435 相当材) [750 MPa 級] は焼入れ後、1 h で 650°C の高温焼戻し処理を施した鋼種であるが、 $\sigma_B=752$ MPa < 800 MPa であるため、表 1 には掲載されていないが、比較のため $S-N$ 線図と疲労寿命分布を図示したのが図 11 である。図から応力レベルによらず寿命分布が単一ワイブル分布によく従う特徴がある。これに対し、同材の 1 600 MPa 級は、焼入れ後、 400°C 、5 h の低温焼戻し処理を施したものであり、本材の $S-N$ 線図と疲労寿命分布を図示したのが図 12 である。図 12 から、やはり、ここでも 600°C 程度以上の焼戻し材については単一ワイブル分布でよく表示されるが、低温焼戻し材の疲労寿命分布に対して混合形ワイブル分布の適合性が確認される。

3・4 SNCM439(Q2 材)の解析結果 SNCM439 鋼⁽¹⁸⁾の 630°C 焼戻し材である Q1 材について $S-N$ 線図と疲労寿命分布を同様に示したのが図 13 である。図中の実線から Q1 材の確率疲労特性が、ほぼ単一分布で表示されることがわかる。

(a) $P-S-N$ diagram

(b) Fatigue life distributions

Fig. 12 Analytical results of 35CD4(1 600 MPa) steel

これに対して比較的低温で焼戻し処理を施した Q2 材について S-N 線図と疲労寿命分布を図示したのが図 14 である。S-N 線図における寿命のばらつき範囲が応力に依存して複雑に変動しており、 $F=0.50$ に対応する中央 S-N 曲線には明りょうな二段折れ曲り現象が認められる。これに伴い、特に中応力域の疲労寿命分布がワイブル確率紙上で一見不規則な分布特性を呈する傾向がある。図中の実線は 2・2 節の混合分布を用いて解析した P-S-N 曲線と疲労寿命分布であり、いずれも実験結果の複雑な変動特性をよく表示している。

なお、表 1 の最下段に示した XC100 鋼(SK3 相当材)についてはすでに詳細な解析結果を前報に報告しており、広範な応力域にわたり本材の疲労寿命分布が単一ワイブル分布でよく表示できることが確認されている。

以上、3 章で示した高強度鋼の確率疲労特性に関する一連の解析結果から、金属材料の強度レベルと熱処理条件をもとに確率疲労特性に関する特徴的傾向を、ここで可能な限り簡潔に把握してみたい。

すなわち、第一に引張強さが 800 MPa 以上の高強

度鋼の疲労寿命分布について、単一ワイブル分布に従う場合と、二つ以上の成分からなる混合ワイブル分布に従う場合に大別される傾向がある。第二にこの特徴に関し、熱処理条件の中から特に機械的性質を支配する焼戻し温度に着目して、分布形の変化を調べたところ、種々の鋼種にわたり 600°C 程度以上の焼戻し材では単一ワイブル分布に従い、それ以下の温度で焼戻した場合(焼入れのままを含む)は混合分布に従うことがわかった。

本報の高強度鋼に対する焼入れのまま(低温焼戻しを含む)の微視組織はマルテンサイトやベイナイトになっており、極めて硬くて脆い組織である。一般に硬度が高いほど、材料欠陥に対する破壊感度が高くなる。したがって、低温焼戻し材では欠陥の感度が高く、材料に欠陥が含まれていると、これが起点となって早期に破壊し、欠陥がなければ本来の強度をもつので長寿命を呈する。それゆえ、欠陥による破壊と欠陥によらない破壊の二つの母集団から構成され、混合分布になると考えられる。これに対し、高温焼戻し材については適度の延性を備えており、欠陥の感度も低下するのでこれら二つの区別がなくなり、単一分布でよく表

(a) P-S-N diagram

(b) Fatigue life distributions

Fig. 13 Analytical results of SNCM439(Q1) steel

(a) P-S-N diagram

(b) Fatigue life distributions

Fig. 14 Analytical results of SNCM439(Q2) steel

示されると考えられる。

以上は脆性材と延性材を単的に比較したものであるが、実際の金属材料に関するき裂発生源やき裂進展形態は単一でなく、そのため各々の疲労破壊機構に対応する $S-N$ 特性が重合することになる。先に図2に示した①～④の各 $S-N$ 成分は原理的にはこのような個々の疲労破壊機構に対応する $S-N$ 特性を与えると考えることができる。そして、応力レベルに依存して各成分が現れる生起確率が変化すると考えるのが、本報の基本的視点である。

したがって、全試験片の破面解析を行って各成分を分離することなどが有効と考えられる。しかし、本研究は国内外の文献をもとに作成されたデータベース・MSDRDをもとに検索・解析されたもので、原典を参照したが破面解析を含めき裂発生源やき裂進展形態の区別に関する記載はほとんどなく、①～④の $S-N$ 成分の物理的意味を明らかにすることはできなかった。

この点については現在、「材料強度確率モデル研究会」の共同研究として、高強度鋼の長寿命確率疲労特性に関するラウンドロビンテストが計画されており、広範な応力域における $P-S-N$ 特性の物理的意味の解明が進ちよくしている。したがって、本報で解析された機械構造用鋼の複雑な確率疲労特性の物理的意味の考察については、この共同研究の成果を待ちたいと考える。

4. 結 言

材料強度信頼性データベース(MSDRD)をもとに引張強さが800 MPa以上の高強度鋼に関する疲労強度データを検索し、広範な応力域にわたる確率疲労特性を解析した。本研究で得られた結論を要約すれば以下のとおりである。

(1) 種々の高強度鋼の確率疲労特性について定量的な $P-S-N$ 特性を解析した。これらの結果は機械・構造物の信頼性設計や安全性評価の基礎データを与えるものである。

(2) 高強度鋼の疲労寿命分布は単一ワイブル分布に従う場合と、二つ以上の成分から構成される混合ワイブル分布に従う場合に大別される特徴がある。

(3) 上記の特徴について熱処理条件のうち特に機

械的性質を支配する焼戻し温度と分布形の関係調べた結果、種々の鋼種にわたり600°C程度以上の焼戻し材では単一ワイブル分布に従い、それ以下の温度で焼戻した場合(焼入れのままを含む)は混合ワイブル分布に従うことがわかった。

なお、本報の主題は高強度鋼の確率疲労特性に関する実験事実の定量的解析にあり、そのような疲労現象の物理的解明については、データベースの統計解析という研究手段から大きな制約がある。この点については別途、著者ら全員を含む研究組織による大形共同研究を計画しており、今後の重要な課題と考えている。

文 献

- (1) 酒井達雄, 機講論, No. 940-27(1994-7), 100-105.
- (2) 酒井達雄, 機講論, No. 95-1(1995-3), 218-219.
- (3) 菅田淳・西川出・酒井達雄, 日本材料学会第19回材料講習会前刷集, (1996-12), 77-86.
- (4) 西川出・岡田憲司・酒井達雄・後藤真宏・西島敏, 機論, 62-595, A(1996), 632-639.
- (5) 西島敏, 機論, 46-412(1980), 1303-1313.
- (6) 田中道七・藤井勉, 材料, 22-243(1973), 1090-1096.
- (7) Gal'perin, M. Y., *Zavodskaya Laboratoriya*, 33-9(1967), 1123-1125.
- (8) 江村秀樹・浅見克敏, 機論, 55-509, A(1989), 45-50.
- (9) 酒井達雄・田中道七, 材料, 30-339(1981), 1211-1217.
- (10) 酒井達雄・田中道七, 材料, 29-316(1981), 17-23.
- (11) Sakai, T. and Tanaka, T., *Proc. FATIGUE84*, 2(1984), 1125-1137.
- (12) 星出敏彦・酒井達雄・境田彰芳, 機械の研究, 48-11(1996), 1190-1194.
- (13) 材料強度確率モデル研究会編, 材料強度の統計的性質, (1992), 58, 養賢堂.
- (14) Swanson, S. R., *Can. Aero. Jnl.*, 6(1960), 221-223.
- (15) Cicci, F., *UTIAS Tech. Note*, No. 73(1964), 1-16.
- (16) Korbacher, G. K., *Exp. Mech.*, 11(1971), 540-547.
- (17) Nishijima, S., ほか8名, *Trans. NRIM*, 19-3(1977), 119-132.
- (18) Nishijima, S., ほか9名, *Trans. NRIM*, 19-6(1977), 327-343.
- (19) 文献(13)の98ページ.
- (20) 田中道七・岩谷隆史・酒井達雄, 材料, 32-360(1983), 1038-1043.
- (21) 田中道七・岩谷隆史・酒井達雄, 材料, 35-391(1986), 421-426.
- (22) Bastenaire, F. A., Pomey, G. and Rabbe, P., *Memoires Scientifiques Rev. Metallurg.*, LXVIII, N° 10, (1971), 645-664.
- (23) Bastenaire, F. A., *IRSID MC*, 71-459 FB/MT(1971), 1-23.