

炭素鋼平滑試験片の平面曲げ疲労過程における
複数き裂の空間分布*

(応力振幅および繰返し数依存性)

石原 外美*¹, 塩沢 和章*¹
宮尾 嘉寿*¹, 神島 裕児*²Study on Variations of Spatial Distributions of Cracks During Fatigue
Process of an Unnotched Carbon Steel SpecimenSotomi ISHIHARA, Kazuaki SHIOZAWA,
Kazyu MIYAO, and Yuji KAMISHIMA

In order to investigate variations of spatial distributions of cracks observed on the unnotched specimen surface during the fatigue process, plane bending fatigue tests were performed on carbon steel JIS, SS 41 in laboratory air and a sodium chloride aqueous solution. Two methods, developed by Morishita and Ono in the field of mathematical ecology, were used in analyzing the spatial distributions of cracks. The following results were obtained. The spatial distributions of cracks are influenced by both stress amplitude and stress cycling. In the high stress amplitude region, the distributions are nearly random, while in the low stress amplitude region, the distributions have clumps indicating nonrandom distribution. This result was common to both fatigue in air and corrosion fatigue. With increasing stress cycling, the spatial distributions of cracks approach random distributions in the high stress amplitude region, while in the low stress amplitude region, the distributions show a strong tendency to have two kinds of clumps whose sizes are $1/4 \text{ mm}^2$ and 8 mm^2 .

Key Words: Fatigue, Corrosion Fatigue, Statistical Treatment, Spatial Distribution, Carbon Steel, Stress Amplitude, Stress Cycling

1. 結 言

金属材料の腐食疲労過程においては、寿命の初期より多数のき裂が発生し、これらの複数き裂の干渉、合体を経て破壊に至ることが知られている⁽¹⁾⁽²⁾。これらの複数き裂の干渉、合体挙動は複数き裂の空間的分布特性に大きく影響されるから⁽³⁾、複数き裂の空間分布特性に関する研究は重要と考えられる。また、き裂の空間的分布特性を把握することはき裂発生メカニズムを明確にする上でも重要と考えられるが、これまでほとんど行われていない⁽¹⁾⁽⁴⁾のが現状である。

本研究では、数理生態学において、区画法の一方方法として用いられている森下の集中度指数⁽⁵⁾と小野の距離法⁽⁶⁾を用いて、炭素鋼 SS 41 平滑材の 3% 食塩水中および大気中の平面曲げ疲労過程のき裂の空間分布特性を調査し、き裂の分布特性に及ぼす応力振幅並びに繰返し数の影響について種々考察した。

2. 空間分布を表す方法

2.1 区画法 点の空間分布パターンを解析する

上で、ランダム分布であるか否かを判断することはそのような解析の第一歩と考えられる。ランダム分布とは点が有限領域内でどの地点にも同一の確率で出現したものを指し、点間に相互作用が全く働かないことに相当する。

図 1 に模式図を示すように、空間を等面積に分割し各区間に含まれる点の数を数えることに依って点の空間分布を調べる方法に区画法がある。森下の集中度指数⁽⁵⁾は区画法において点の配置がランダム分布からどの程度隔たっているかを計測する集中度指数であり、式(1)で定義される。

$$I\delta = \frac{\sum_{i=1}^m \{x_i(x_i - 1)\}}{T(T-1)} \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 x_i は一つの区画内にある個体数、 m は観察回数 (区画法)、また T は $T = \sum_{i=1}^m x_i$ である。

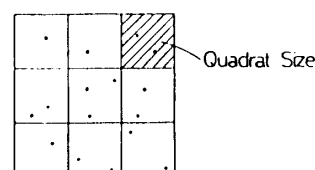


図 1 区画法

* 原稿受付 平成元年 8 月 25 日。

*¹ 正員、富山大学工学部 (〒930 富山市五福 3190)。*² 学生員、富山大学大学院。

区画の大きさ (Quadrat Size : 以降 QS と略) に対する $I\delta$ の変化から、空間的分布パターンの詳細な構造を知ることができる。 $I\delta$ による空間分布パターン例⁽⁵⁾⁽¹⁰⁾を図2に示す。(a)図は分布がランダム分布であることを示しており、(b)図は一様分布であることを示している。また、図(c)、(d)は分布内にかたまりがあることを示しており、(c)図はそのかたまりの大きさが比較的小さく、(d)は比較的大きいものであることを示している。

$I\delta$ -QS 線図において分布パターンがランダム分布とはみなせないようなかたまりをもつ時、そのかたまりの大きさが明確に現れない。そこで、森下は図3に模式図を示すように $I\delta(s)/I\delta(2s)$ -QS 線図を用いてかたまりの大きさを解析する方法を提案している⁽⁵⁾⁽¹⁰⁾。ここに $I\delta(s)$ は $QS=s$ の時の $I\delta$ であり、 $I\delta(2s)$ は $QS=2s$ の時の $I\delta$ である。ここに s は任意の区画の大きさである。 $I\delta(s)/I\delta(2s)$ -QS 線図においてピークがあれば、それがかたまりの大きさとなる⁽⁵⁾⁽¹⁰⁾。

しかしながら、以上述べた森下の集中度指数 $I\delta$ は付録に示すように観察回数、点密度の影響を受けるから、本報のき裂の空間分布の調査では、これらの影響をシミュレーションにより補正(付録参照)し、除外した新指数 I_B を用いることにする。

2.2 距離法 距離法とは、検査面積内に散布した任意の点から最も近い点を選び、それらの距離を求め、解析する方法である。小野⁽⁶⁾は点と点の間に反発作用が働く時、その作用は最近接距離に最も強く反映されるであろうとの考察から、最近接距離 R に基づ

き計算される次の関数を提案している。ここに λ は点の密度である。

$$Q(R) = \frac{\exp(-\pi\lambda R^2) - \exp\{-\pi\lambda(R+\Delta R)^2\}}{f(R)} \dots\dots\dots(2)$$

上式の分子は点間の相互作用のない場合に期待されるポアソン分布において、 R が $(R, R+\Delta R)$ に入る確率を示し、分母の $f(R)$ は実際の測定データ R の確率分布を示している。

本論文では式(2)そのものではなく式(2)の分母、分子を直接比較する方法を用いることにする。

3. 試験片および実験方法

用いた試験片素材は一般構造用圧延鋼材 SS 41 である。その化学成分および機械的性質を表1および表2に示す。試験片形状および寸法を図4に示す。疲労過程の試験片中央部 10×10 mm のレプリカを連続的に採取し、得られたレプリカを約30倍程度に拡大することにより、き裂の空間座標を測定した。その他実験方法の詳細は既報⁽⁷⁾に述べているので記述を略する。

4. 疲労き裂の空間分布の解析結果

4.1 大気中疲労

4.1.1 森下の集中度指数による解析 大気中疲

表 1 供試材の化学成分

C	Si	Mn	P	S
0.16	0.01	0.42	0.019	0.02

表 2 供試材の機械的性質

Yield strength σ_y MPa	Tensile strength σ_b MPa	Elongation ϵ_f %
175	328	71.1

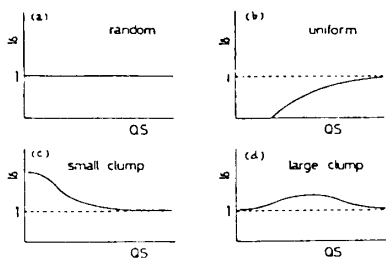


図 2 $I\delta$ による点の分布パターン例

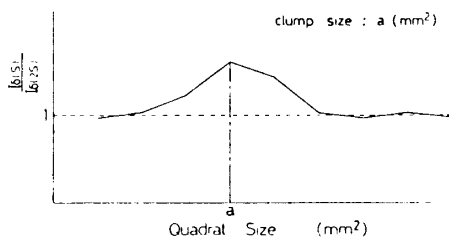


図 3 森下の集中度指数による点のかたまりの大きさの解析⁽⁵⁾⁽¹⁰⁾

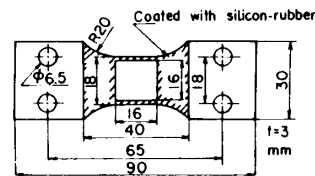


図 4 試験片形状および寸法

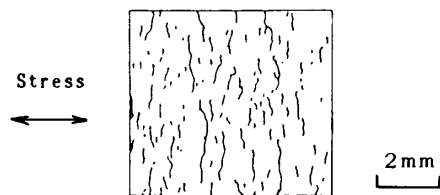


図 5 き裂の空間配置の一例

労過程のき裂発生位置の空間分布特性を前章で述べた補正した森下の集中度指数 I_B によって解析した。図5はレプリカ上に採取されたき裂の空間配置の一例を示したものである。き裂の中央点をき裂位置と決めその座標を調査した。

図6は応力振幅 176, 147, 127 MPa に対して得られた I_B と QS 関係を示したものである。図6(a)より、高応力域 176 MPa では、 I_B は QS によらずほぼ 1 であるから、一定の寿命比においてき裂はランダムに発生する傾向を示しているが、147, 127 MPa と応力振幅の低下するに伴い、 I_B は 1 より遠ざかることから、き裂は局所的にかたまりあるいは一様に発生する傾向のあることがわかる。応力繰返し数依存性についてみると、高応力域では、き裂の空間分布特性の繰返し数依存性が認められないのに対し、低応力 127 MPa

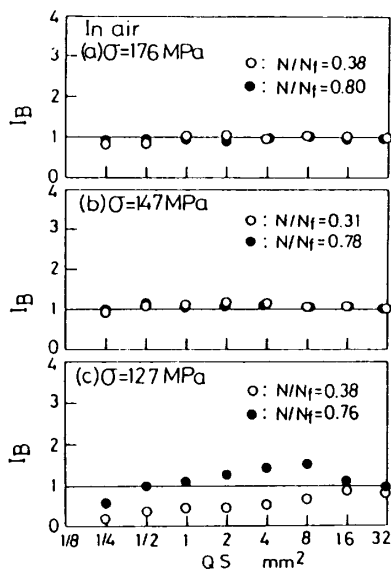


図6 大気中疲労過程における I_B -QS 関係

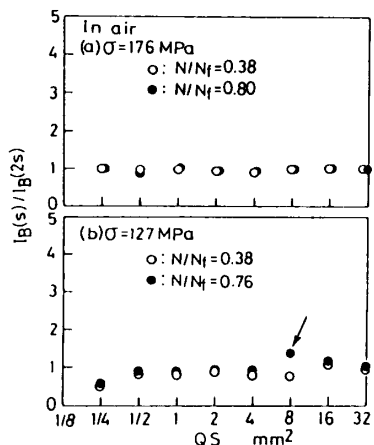


図7 大気中疲労過程における $I_B(s)/I_B(2s)$ -QS 関係

では明確な応力繰返し数依存性がある。すなわち寿命の初期の様な分布状態から寿命後期のかたまりを有する分布形へと変化している。

図7は分布のかたまりの大きさを調査するために、図6より大気中疲労過程の $I_B(s)/I_B(2s)$ -QS 関係を求めた結果を示している。(a)図よりわかるように、高応力域では $I_B(s)/I_B(2s)$ -QS 関係に明確なピークが観察されず、き裂の空間分布にはかたまりが存在しないことを示している。一方、(b)図の低応力域 127 MPa では、図中に矢印で示すように寿命比 $N/N_f=0.76$ でピークが認められることからき裂の空間分布にはかたまりが存在し、その大きさは 8 mm^2 であることがわかる。

4.1.2 距離法による解析結果 図8(a), (b)は大気中疲労における応力振幅 176 MPa の寿命比 80% の時点並びに応力振幅 127 MPa の寿命比 76% の時点のき裂間の最短距離 R の分布を 3 母数ワイブル分布で近似し、破線で示したものである。図中には、点間にお互いに相互作用がない場合に理論的に予測されるポアソン分布の曲線も併せて示している。

これらの図より、低応力域 127 MPa では、実線のポアソン分布と破線の実験結果の分布とはかなり異なっており、き裂の空間分布はランダム分布とは異なることを示しているが、高応力域 176 MPa では、 0.4 mm 以下の R の微小領域を除いて実験で得られた R の分布とポアソン分布の曲線はほぼ一致し、き裂の空間分布はランダム分布に近いものと考えられる。なお、 R の微小領域で実験結果がポアソン分布と異なるのは、き裂は一定の方法を有し、この寸法より近接して他のき裂が生じることは物理的に不可能であるためである。以上の距離法による結果は図6の森下の集中度指数を用いて得られた結果と良く合致している。

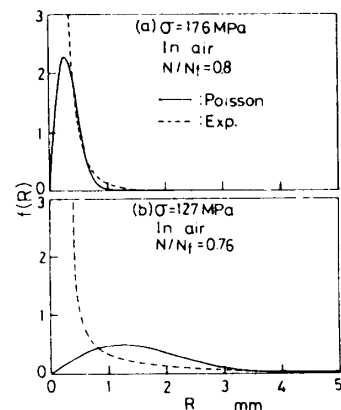


図8 距離法による大気中疲労過程のき裂の空間分布の解析

4.2 腐食疲労

4.2.1 森下の集中度指数による解析 図9は腐食疲労における応力振幅 147, 118, 98, 88 MPa に対する I_B -QS 関係を示したものである。また、図10はこれらの図に対応する $I_B(s)/I_B(2s)$ -QS 関係を示したものである。図9の I_B -QS 関係において、応力振幅依存性についてみると、大気中疲労と同様に、高応力域ではき裂の空間分布はランダムであるのに対し、低応力域 (88 MPa, 98 MPa) ではき裂はかたまって発生する傾向が見られる。図10によれば、図中に矢印で示すようにそのかたまりの大きさは約 $1/4 \text{ mm}^2$ の小さいかたまりと約 8 mm^2 の大きいかたまりの2種類であることがわかる。

次に I_B -QS 関係における繰返し数依存性についてみると、一般に高応力域では、応力繰返しによってその分布形の変化が顕著でないのに対し、低応力振幅域ではき裂の空間分布の応力繰返し数依存性は明確に観察される。このような傾向は図6の大気中疲労の傾向と類似している。また、応力振幅 147, 118 MPa の高応力域では、わずかであるが寿命比の増加とともに I_B は徐々に1に近づくことから、繰返し数の増加に伴いき裂の空間分布は徐々にランダム分布に近づく傾向が認められる。一方、 $\sigma=98, 88 \text{ MPa}$ の低応力域では、高応力域とは逆に寿命比の増加とともに I_B は1から遠ざかることから、繰返し数の増加に伴いき裂の空間分布は徐々に局所的にかたまる傾向が認められる。このような傾向は図6の大気中疲労における $\sigma=127 \text{ MPa}$ の実験傾向と類似している。

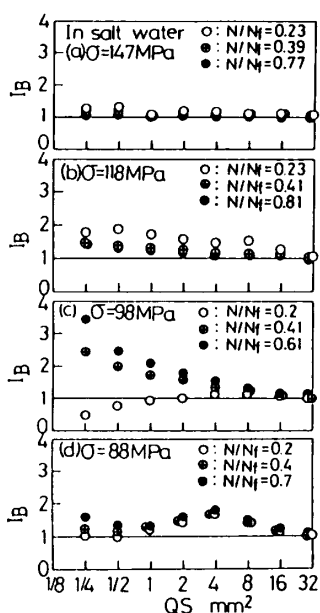


図9 腐食疲労過程における I_B -QS 関係

4.2.2 距離法による解析 図11(a), (b)は腐食疲労における高応力振幅域 147 MPa の寿命比 77% の時点および低応力振幅域 88 MPa の寿命比 70% におけるき裂間の最短距離 R の分布を3母数ワイブル分布で近似し破線で示したものである。図中にはき裂の発生場所にお互いの相互作用が存在しない場合に予想されるポアソン分布も併せて示した。図11(b)より、低応力域 88 MPa では、実験で得られた R の分布はポアソン分布とは異なり、き裂の空間分布はランダム分布とは異なることを示している。一方、高応力振幅 147 MPa では、実験で得られた R の分布は R の小さな領域を除いてポアソン分布とほぼ一致することから、き裂の空間分布はランダムな分布に近いものと考えられる。以上の距離法による結果は図9の森下の集中度指数を用いて得られた結果と同一の傾向を示している。

5. 考 察

5.1 き裂の空間分布特性に及ぼす応力振幅の影響

4章で示したように、大気中疲労並びに腐食疲労の高応力域では、き裂の空間分布はランダムな分布にな

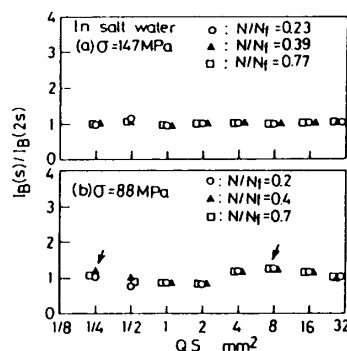


図10 腐食疲労過程の $I_B(s)/I_B(2s)$ -QS 関係

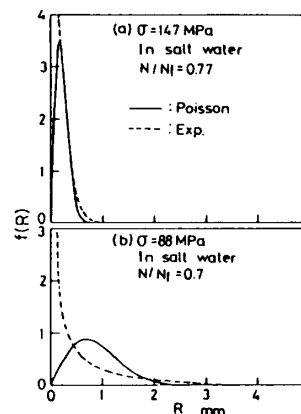


図11 距離法による腐食疲労過程のき裂の空間分布の解析

るのに対し、低応力域のそれは局所的にかたまる傾向を示した。本節ではこの理由を考察する。

5・1・1 大気中疲労過程 大気中疲労過程の多結晶金属材料の疲労き裂の発生は、次のような過程をたどる⁽⁸⁾。繰返し応力によって試験片表面には局所的すべり域が発生する。これが固執すべり帯へと発達し、すべり帯内部の不可逆的すべりの蓄積を経てき裂発生に至る。

応力振幅が比較的高い場合のき裂発生過程は、組織敏感性よりは、主として負荷される応力、ひずみの大きさ等のマクロ的な力学的因子により決定され、き裂の核となる結晶のすべりは高密度に、かつ試験片表面にランダムに発生すると推察される。一方、応力振幅が低い場合のき裂発生挙動は、上記マクロ的な力学的因子の影響よりは、介在物等の欠陥部やすべりやすい結晶方位を有する結晶等に集中する等の組織敏感性を示すため、き裂密度が低くなる。低応力域では、このような少数のすべりやき裂の発生している部分の応力集中によりこれらの周辺にすべりが発生しやすくなることによって、き裂の分布はより局所的にかたまる傾向を呈すると考えられる。

5・1・2 腐食疲労過程 腐食疲労では、前項の大気中疲労におけるような試験片表面の固執すべり帯からのき裂発生機構に加えて電気化学的なき裂発生機構が存在する。すなわち、試験片表面のすべり部と非すべり部は電気化学的に分極し、すべり部はアノード溶解され⁽⁹⁾腐食ピットを形成する。このような電気化学的アノード溶解によりすべり部には高密度の腐食ピットが発生する。また、すべり箇所以外にも、極低応力域では介在物とマトリックス等の間に局所的電池が形成され、これはピット生成箇所になる場合もある。これらのピットには、応力集中あるいはピット内部の強酸化等により、き裂が発生することが知られている⁽⁹⁾。

したがって腐食疲労では、大気中疲労に比較して相対的にき裂発生が早められ、またその密度も増加する。極低応力域を除いて腐食疲労のき裂発生も基本的にはすべり発生に関係することを考慮すれば、腐食疲労過程のき裂の空間分布特性の応力振幅依存性、すなわち高応力域ではランダム分布、低応力域では局所的にかたまる分布形を有する理由は大気中疲労過程の場合と同様に説明できる。しかし、以下の例に示すように、腐食疲労低応力域では電気化学的な腐食ピット誘発作用の存在を考慮する必要がある。

腐食疲労低応力域においては、大気中疲労に比較してき裂はより局所的に集中する傾向が明らかに認められる。このかたまりの大きさは図10によれば2種類存

在し、小さいものはほぼ $1/4\text{ mm}^2$ であり、大きいものは約 8 mm^2 であることがわかる。腐食作用が少ないと判断される大気中疲労の低応力域では約 8 mm^2 の大きなかたまりのみが認められることから、小さなかたまりの生成原因は微小領域での電気化学的要因により、また大きなかたまりの生成は大気中疲労と同様に応力集中によるものと考えられる。

5・2 き裂の空間分布特性に及ぼす応力繰返し数の影響 大気中疲労の高応力域ではき裂の空間分布に及ぼす応力繰返し数の影響は明確でないが、腐食疲労の高応力域では、わずかであるが、応力繰返しに伴ってき裂の空間分布は徐々にランダム分布に近づくことを実験結果は示している。この理由は次のように考えることができる。

高応力域の場合、試験片表面に発生したすべり、き裂または腐来ピットは最初から比較的ランダムでかつ高密度に発生するので、これらの発生部は繰返し応力による被害をそれぞれほぼ均等に分担し、特定の箇所の応力集中等によりき裂はかたまって発生しにくい。また、これらの発生箇所では、き裂発生前に負荷される高い応力振幅がき裂発生後局部的に解放され、その場所でのすべりはその後生じにくく、あらたなすべりは、すべり帯やき裂が存在しない他の箇所に移動していく。以上の理由により応力繰返しに伴ってき裂はよりランダムな空間分布に近づくものと考えられる。

一方、大気中疲労の低応力域並びに腐食疲労低応力域では、応力繰返し数の増加とともにき裂発生箇所はより顕著にかたまる傾向を実験結果は示しており、高応力域の傾向とは逆の傾向を有する。これはすべり、き裂、腐食ピットの発生が組織敏感性を示し、密度が比較的低いことに関連すると思われる。このような場合、き裂発生による局部的応力解放作用の影響よりは、先在すべり、ピット、き裂発生部近傍の応力集中または電気化学的分極の局部的集中の影響（腐食疲労）が強くなり、あらかじめ発生しているすべり帯や腐食ピット周辺はすべりや腐食ピットが発生しやすく、き裂は繰返し数の増加とともにますます局所的に集中するものと考えられる。

6. 結 言

一般構造用炭素鋼 SS 41 材を用いて、大気中並びに3%食塩水中にて平面曲げ疲労試験を行い、疲労過程において平滑材表面に発生する微小表面き裂の空間分布特性を調査した。き裂の空間分布特性の調査に当たって、数理生態学分野で用いられている森下の集中度指数並びに小野の距離法を採用した。得られた結

果を要約すれば以下ようになる。

(1) き裂の空間分布を表す指標として森下の集中度指数 $I\delta$ を採用したところ、 $I\delta$ は観察回数、点密度、区画内の平均点密度の影響を受けることが判明した。き裂の空間分布の解析に当たってこれらの影響を受けないよう補正した結果は、小野の距離法による結果と定性的に良い一致を示した。

(2) 大気中疲労過程のき裂の空間的分布は、低応力域では、き裂は局所的にかたまる傾向を示すが、高応力域では、き裂の空間分布はランダムな分布になる。また、き裂の空間分布特性に及ぼす繰返し数の影響についてみると、高応力域では繰返し数依存性は顕著に認められないが、低応力域では、応力繰返しに伴いき裂は局所的に集中する傾向が認められた。

(3) 腐食疲労過程のき裂の空間分布特性は、大気中疲労とほぼ同様に、低応力域では、き裂は局所的にかたまる傾向を示すが、高応力域では、き裂の空間分布はランダムな分布になる。繰返し数依存性についてみると、高応力域ではわずかであるが繰返し数の増加に伴いき裂の空間分布はランダム分布に近づく傾向が認められる。一方、低応力域では、繰返し数の増加によってき裂の空間分布は明らかに局所的に集中する傾向を示し、そのかたまりの大きさは小さいものはほぼ $1/4 \text{ mm}^2$ であり、大きいものはほぼ 8 mm^2 であることがわかった。

(4) 上述の大気中および腐食疲労過程のき裂の空間分布特性の繰返し数依存性はすべり帯、腐食ピット、き裂等の密度とこれらの寿命初期の空間分布に関連し説明し得る。すなわち、寿命初期のすべり帯、腐食ピット、き裂等が高密度で比較的ランダムな場合、き裂空間分布のよりランダム化が、低密度の場合には、力学的な応力集中あるいは電気化学的な分極によるき裂の空間分布の局所的な集中作用があると推察された。

本論文で述べた複数き裂の空間分布特性は、複数き裂間の干渉・合体挙動に影響し、ひいては合体による急速破壊もしくは応力緩和による寿命増加作用等を通

じて、疲労寿命と寿命のばらつきに影響を与えることが予想される。この問題は今後定量的に明らかにする必要がある。

付録 モンテカルロシミュレーション による $I\delta$ の補正

図 12 はコンピュータにより、正方形の検査面積内にランダムな点の空間分布を発生させ、得られた $I\delta$ -QS 線図の一例を示したものである。図よりわかるように空間分布がランダム分布であるにもかかわらず、点密度が低い場合には $I\delta$ は QS により変化し必ずしも図 2 (a) に示したタイプにならない。図 13 は点密度を $0.1/\text{mm}^2$ にとり、 $I\delta$ と観察回数 QN の関係を一例として示したものである。 \bar{x} は単位区画当たりの平均の点の数であり、 \bar{x} を 0.075 一定として計算している。図より $I\delta$ は観察回数 QN の増加によって徐々に減少し、臨界観察回数 QN_c 以上では一定値 $I\delta_0$ になることがわかる。

したがって、式(1)より $I\delta$ 値を計算した場合、き裂の空間分布がランダムであっても、 $I\delta$ は観察回数や点密度の影響を受け必ずしも 1 にならず、誤った結論に至る恐れがある。

そこであらかじめランダムであることがわかっている空間分布を対象として、観察領域の重複を許し観察回数、点密度並びに区画内の平均の点の数 \bar{x} 等のパラメータを種々変化させてシミュレーションを行った。そして QN_c と $I\delta_0$ に及ぼす点密度と区画内の平均の点の数 \bar{x} の関係を調査し、これらの関係を多項式近似した。

次に点の空間配置の解析に当たって、点密度並びに区画内の平均の点の数 \bar{x} に対応した観察回数 QN_c を上述の多項式近似式を用いて決定し、解析結果に観察回数の影響が入らないように QN_c 回の測定を行った。また、点の空間分布がランダムである場合には、森下指数が点密度並びに区画内の平均の点の数 \bar{x} に依らず常に 1 になるように、上述の多項式近似された $I\delta_0$

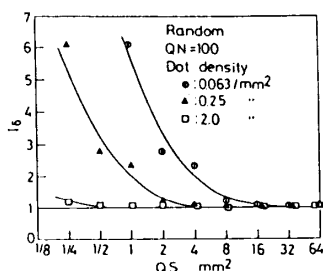


図 12 シミュレーションによる $I\delta$ -QS 線図の一例

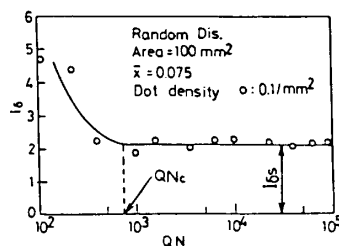


図 13 $I\delta$ と観察回数 QN の関係

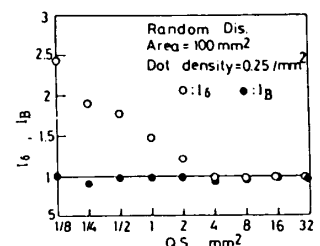


図 14 補正後の $I\delta$ -QS 関係の一例

を用いて補正した $[I_B = I\delta/I\delta_s]$ 。図 14 は点の空間分布がランダムの場合に対する補正前の $I\delta$ - QS 関係と補正後の I_B - QS 関係を示したものである。補正前は空間分布がランダムであるにもかかわらず、 $I\delta=1$ にならず図 2 (a) に示した結果と一致しないのに対し、補正後は $I_B=1$ となり図 2 (a) と合致する。

文 献

(1) Kitagawa, H., ほか 2 名, *ASTM Spec. Tech. Publ.*, 642

(1978), 98.

(2) Baxa, M. S., ほか 2 名, *Met. Trans.*, A (1978), 1141.

(3) 石原・ほか 2 名, *機論*, 55-514, A (1989), 1275.

(4) 石原・ほか 2 名, *機論*, 55-515, A (1989), 1487.

(5) 森下, *動物の社会*, (1976), 21, 共立出版.

(6) Ono, Y., *Mem. Fac. Sci. Kyushu Univ.*, E (1965), 1.

(7) 石原・ほか 2 名, *機論*, 50-454, A (1984), 1123.

(8) 中沢・小林, *固体の強度*, (1976), 210, 共立出版.

(9) 遠藤・駒井, *金属の腐食疲労と強度設計*, (1982), 21, 養賢堂.

(10) Morisita, M., *Mem. Fac. Sci. Kyushu Univ.*, 2-4, E (1959), 215.