



破壊と安全の谷間と嶺を歩いて

Through valleys and along ridges between FRACTURE and SAFETY

北 川 英 夫*

Hideo KITAGAWA

左手にはアカデミックな課題“破壊”が高くそそり立ち、右手にはプラティカル要求“安全”が険しくそびえ立つ。その間の長い深い谷間道を昇り抜け、しだいにその左右を一眺に望む尾根伝いまで、私達の科学・技術——疲労・環境・破壊力学・信頼性、……——の歩いた道、その歴史的背景と感激、課題と方法と仲間達、そしてなによりも、私達の研究の楽しさと妙味について語る。
(昭和58・3・23、北川英夫教授東大退官記念講演)

1. はじめに

東京大学退官記念講演に当たり、この場をおかりしまして、初めに一言、皆様に私の感謝の気持を申し述べさせていただきますと存じます。ほんとうにいろいろとありがとうございました。東大には、32年在職させていただきましたが、振りかえって今、率直に、私は幸せであったとしみじみ思っております。

学術的にも価値があり、社会的にも意義があり、そうして自分自身も面白い、楽しい、好きだと思ふ仕事にめぐり合い、長い間それにずっと専念させていただいたのであります。本来はこちらからお払いしなくてはならないのに、反対に俸給をいただいて好きな研究を楽しんできたわけで、感謝のほかございません。このようなことを許し暖かくサポートして下さった生産技術研究所の皆様、東京大学の皆様を始めとした、内外の多くの皆様に対し心から御礼申し上げます。

また、私は、幸いに多くの卓抜した先輩・指導者と、多くのすぐれた共同研究者に恵まれました。これからご紹介いたしますように、今になって総括してみますと、一見、きわめて多方面のたくさん仕事をやってきたものと感じられないでもありませんが、それも、“私”の仕事ではなく“私達”の共同の仕事の成果であります。これら私達の仕事は、幸いにも、また、所内外・大学内外の極めて多くの方々物心両面からのご協力やご支援を得て何とか出来たものでありまして、心から感謝しております。

御礼のご挨拶につづきましてこれから講演に入らせていただきます。

2. 破壊とわれ目へ——契機と始動

科学・技術における私のこれまでの人生の大部分は、

* 東京大学名誉教授

一言で言えば、“われ(クラック)による破壊との対決の小史”であり、一面、われの面白さ・不思議さと論理性に魅せられての恍惚と熱中の連続の小史でもありました。それは、日本が、世界がその同じ問題に関心を持ち始め、熱中し、普遍化したその歴史と時期を同じくするものでありました。

航空機の空中爆発

(スライド省略)

これはもっとも凄惨な破壊事故の一つ、航空機の空中爆発の例であります。

墜落したコメット機の山積みになった破片の写真

(スライド省略)

空中爆発によって多数の人命を失った有名な航空機事故で、かつ疲労と破壊の研究史上も特筆すべき事故の一つは世界最初のジェット旅客機コメット号の事故であります。これはその破壊し四散した破片を集めたもので、1機が25万個の破片になったそうです。これは私達の言葉で言えば、無数のクラックがほとんど同時に縦横無尽に通過したことを示唆しています。

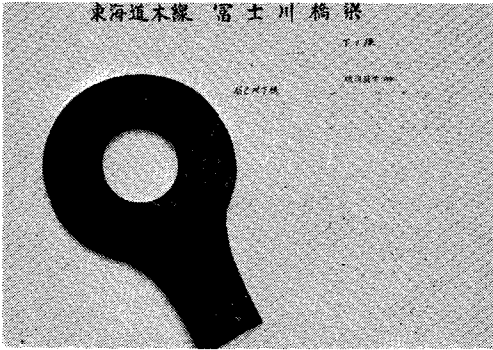
真二つに切れた船舶ワールドコンコルド号

(スライド省略)

これはぜい性破壊対策の歴史で最も有名な約1000隻に及ぶ溶接船のわれの一例で、当時世界最大のタンカーといわれたワールドコンコルド号(World Concord)ですが、普通ではなかなかきれいな鋼製の巨体が包丁で断ち割ったように真二つに切れ、われのすさまじさをまざまざと示したものです。と同時に、コメットの時とまったく違うわれのパターンで、われの多様性を示しています。



(a) 切れたアイバー



(b) アイバー破断面

図1 鉄橋の斜材アイバーの切損事故例 (西村)

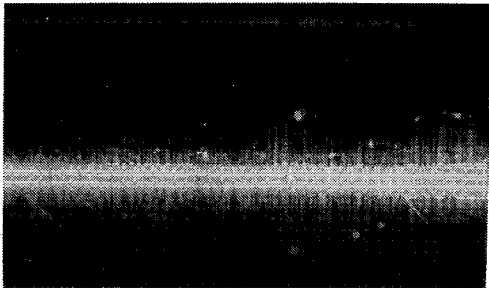


図2 腐食疲労平滑試験片の表面の腐食生成物の白点模様

図1は東海道本線富士川鉄橋のシュエドラートラスのアイバーの疲労によるわれです。幸い、この時列車は無事にこの切れた鉄橋の上を通過しましたが、もし満員の特急などが鉄橋の切断部から、次から次へと転落したかもしれないと仮想しますと、それは身の毛のよだつ光景でしょう。注目されるのは、あの粘っこい軟鋼の部材がようかんのようきれいに切れていることです。当時この破断を実験室で表現できる試験機はまわりにありませんでしたし、私にとっては後にも先にも見ることのできない破断例でありました。このわれに関係しての材料の疲労や応力解析の研究は、来たるべき東海道新幹線の安全に向けての、橋梁・レール・車軸を念頭においたその後の10年の基礎研究の契機の一つとなり、その後クレーン、自動車部品、その他多くのものの事故対策の要求もあって、しだいに疲労から腐食疲労、不安定破壊、われ目への注目、破壊力学へと発展することになりました。

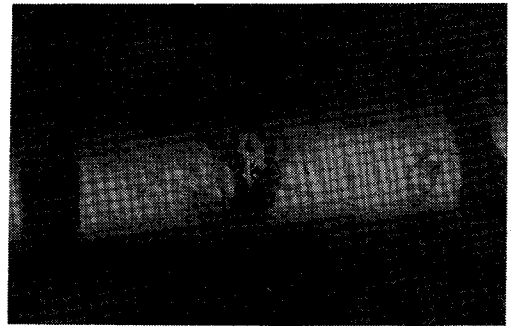


図3 錆山直下の微小表面き裂 (図2の名白点の拡大写真)

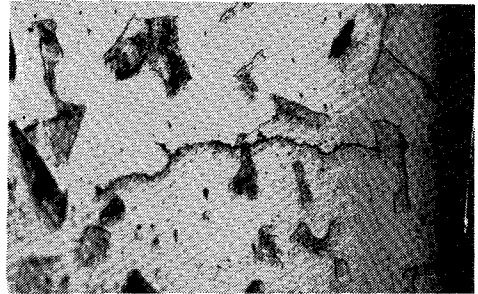


図4 微小表面き裂(図3のごときき裂)の断面(深さ0.11mm)

これらのコメット機の空中爆発、タンカー・ワールドコンコルド号の切断、そしてアリゾナ・クロンビー・リッジランドでの発電用大形回転体のあいつぐ破壊事故は、いずれもここ25年の疲労と破壊の研究の世界的大発展の契機となった象徴的事故であります。それらがそろって1954年(昭和29年)に起こったのであります。そうして先ほどの富士川鉄橋の事故が1953年(昭和28年)、それがきっかけとなった、疲労・腐食疲労・き裂の研究への私の本格的取り組みの開始がそれぞれ1955年(昭和30年)、1956年(昭和31年)、1957年(昭和32年)でありました。しかも、その1957年から1958年(昭和32年~33年)には新しいわれ目の工学、破壊力学がスタートして、10年後には世界的大潮がまき起こるのであります。このように、われへの取り組みの世界的高揚期のスタートラインで、偶然にも私はスタートできたのであります。今になってその偶然の一致を思うとき、私は何としかあわせであったことかと、しみじみと思わずにはいられません。

図2は私の疲労と破壊の研究生活の初期に腐食疲労実験をした時の回転曲げ試験片の表面です。散布された無数の微小な白い点に気がつきました。この白い点は腐食生成物、すなわち、錆の小さな丘でした。これを削り取ると、その下の丘の下にも、図3のような小さなき裂が見つかりました。しかも私の調べたどのき裂の深さ

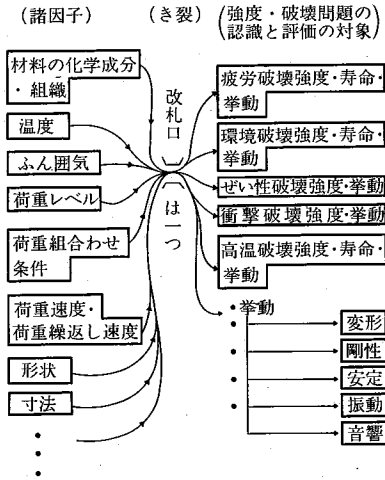


図5 き裂媒介論

も 0.11 mm 程度であり、図4がその断面です。このき裂を見た時の驚き、私の関心を引きつけて離さなかったその神秘さは今でも忘れられません。この小さなき裂が本当に、強さ 40 数キロ (kgf/mm²) の橋梁用鋼やあの硬いレール鋼を、わずかに数キロ以下の応力で切断したのでしょうか。この不規則分布表面き裂に、多くの武器を用意して、正面から取り組むには、その後長い年月がかかりました。

私はこの 1955 年～57 年のスタート期の前にも、学部学生時代に、あの破壊の確率過程論の創始者の一人平田森三先生のご指導でガラスをこわしたこともあり、溶接部破壊の“木原理論”で知られる木原博先生の下で、スポット溶接継手強度の研究を経験してしまて、われや疲労に無経験ではなく、それらの経験も、この 1957 年以後の破壊や疲労の研究生活に影響を与えたと思います。しかし、私のき裂への長いおつき合いの直接の動機は、やはり、この神秘的な微小表面き裂との出会いではなかったかと思ひます。それほど、この時受けた印象は私にとって強烈なものであったように覚えております。

私がこの疲労・腐食疲労・き裂の研究生活に入ること、発端と具体的な可能性を与えてくださり長期にわたって直接ご指導いただいたのは、まず第一に、当時私が所属しておりました岡本舜三先生であります。また、奥村敏恵先生・池田健先生・大井光四郎先生、その他多くの先生方に、側面から、暖かいご理解と支援と激励をいただきました。私のき裂への取り組み開始は、先ほど申しましたように、1957 年(昭和 34 年)頃であります。故石橋正先生は、この頃すでに疲労はもとよりき裂の研究に全力投入を始められており、その石橋先生と私との出会いが、やはりこの頃であったかと思ひますが、その後先生が 1966 年(昭和 41 年)ご生涯を終えられるまで、お

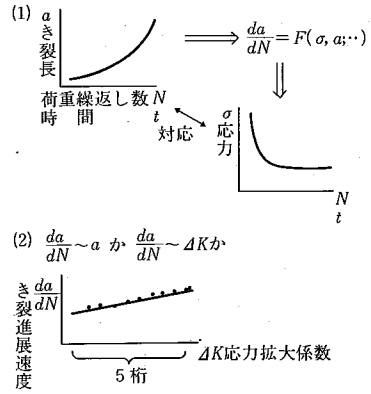


図6 破壊力学方法論採用にいたる経過

導きを受け、この研究分野における私の心の帥とさせていただきます。

後から述べますように、私はその頃もまたその後も、多種多様の構造物・機械の多種多様の強度・破壊問題に取り組む機会がありました。その多くの強度問題の扱い方を総括しての 1960 年(昭和 35 年)頃の私の一つの結論は“き裂媒介論”でありました。これを図式に要約したのが図5であります。われわれの強度・破壊問題の認識と評価の対象は、疲労破壊・環境破壊・ぜい性破壊・衝撃破壊などに対する材料や構造物の強さ・寿命、および、それらの破壊に関連しての材料・構造物の挙動の変化であります。その挙動はまた、変形・剛性・安定性や振動特性・音響特性などとして認識される等々きわめて多種多様であります。これらを総称して仮に広義の“強度”と呼びますと、この強度は、このように一見多種多様でありますので、これを全体として、総合的に把握することが、実際の安全問題の解決にとって重要であると考えたわけでありました。ところが、この広義の“強度”に対する影響因子はこれまた多種多様であります。材料の化学成分や組織、温度、ふん囲気、荷重レベル、応力比その他の荷重組合わせ条件、荷重速度または荷重繰返し速度、対象物の形状・寸法等と、無数であるといってもよいでありましょう。強度と影響因子の組合わせはきわめて多数で、これを調べるのは大変です。両者の間を、少数の、できればこの図5のように、一つの改札口を通してつなぎたい。この“改札口”に“き裂挙動”を選んではどうであろうか、というのです。これがき裂媒介論であります。すなわち、材料やふん囲気や荷重レベル等々がき裂挙動に影響し、そのき裂挙動が強さや寿命や材料全体の挙動に影響する、というように、ワン・クッションにおいて二段階的に考えるのです。この場合、現象がいかに多様であっても、特にき裂に注目するのです。き裂ならば、観測・測定・監視ができるはずであり、破壊の進行に伴う damage の変化などのように一般化された

包括的な尺度にくらべて、より具体的な定量的尺度であり、コンピュータともなじみがよくて、工學上処理しやすく、学術上も深めやすいと考えたのであります。破壊の進行過程は、そのかなりの部分を、き裂の挙動に置き代えるのであります。または、その置き代えができる場合に、き裂媒介論が使えることとなります。たとえば、従来き裂挙動で解析できなかった平滑材の疲労や環境破壊も、最近では、き裂挙動による解析が試みられるようになっておりますが、そうすればき裂媒介論の射程内に近づいてくるのであります。

このき裂挙動を使つての材料・構造物の挙動・強度・破壊の評価とは、たとえば、図6のようになります。図6の(1)に示しますような、時間 t や荷重繰返し数(繰返し回数のこと) N の増加に伴うき裂寸法 a の変化の一般的法則をたとえば $da/dN = F(\sigma, a, \dots)$ と書くことができるならば、この関係から応力 σ と N の図示しましたような関係を求める、すなわち、強度と寿命を求められることとなります。その時大事なのは、関数 F またはき裂挙動モデルをどのように定めるかであり、私自身も含めて多くの方が多くのモデルを提案したり採用したりしました。なるべく現象を正確に表現または置き代えができさえすれば、この場合のモデルとしては価値があります。破壊力学はその一つです。

疲労では現在もっともよいと思われるモデルは、破壊力学による図6の(2)のようなモデルであり、 ΔK と da/dN の関係を求めたParisらの実験データが5桁以上にわたってよく一本の直線にのりましたので、これは本物だとして採用しております。もっとよく合つて汎用性も高ければ、別に破壊力学モデルにとらわれません。これが、私が、全面的にフラクチャ・メカニストになるまでの、き裂についての約14年の遍歴の一つの結論でありました。

3. 安全と破壊の谷間から嶺へ

たとえば、この図6の(1)に示された方法論を使うなどして、き裂を考えに入れた強度評価はもとより、破壊までの時間(すなわち寿命)の予知・予測についても、さらにはき裂の動きを制御した設計までも、現在すでに一部可能または実現の道が開かれつつあります。しかし、それに到達するまでの道は長く、また時にけわしいものでした。最近(1980年)出版の「金属の割れ・破壊とその解析と防止対策」に書いた私の巻頭言の前半は、その間の事情と展望を表明したものでした。まずそれを読み上げさせていただきます。

『“割れ”それは大きな変形を伴わないでこわれる破壊の一形態である。それ故に、“割れ”“き裂”による破壊の多くは、かなり最近まで、“警告なき突然の破壊”として警戒されてきた。つまり、“割れ”は材料の破壊過程の

最後に現われる断末魔の形相として受けとられてきたのである。その後、一部の部品や部材で、かなり早い時期からき裂が現われることが関係者の認識となつてからでも、その対処の方法が明確ではなかつた。

そのせいか、設計や製造ではもとより、検査ですらも“割れ”の問題は、何となく避けて通られたかのような感がある。割れ対策が特に要求された場合には考慮の対象ともされたが、その場合でも、この“割れ”という招かれざる客の実態の出現を阻止することに主なる努力が払われていたように思われる。極端に言えば、“割れ”は明るい所で大きな声であつたと言つてはならない時代が長く続いた。“しかし今はちがう”という時期が、もう手の届く所に来つた。割れについて、あまり知らないでは通らない時代になり始めた。それは安全と保全についての最近の強い要求からばかりではない。“き裂による破壊の防止”を終極目標とする長い長い日陰の、しかしたゆまぬ地道な努力がそれを可能にしつつあるのである。私の知る範囲でも、疲労破壊で120年、疲労き裂で50年、応力腐食割れで70年、腐食疲労で60年、脆性破壊では実に100年(一説に200年)の対策と研究の歴史が今急速に実を結びつつあると言つてもよいだろう。

今、われわれは、少なくとも割れと対等に対話できる。一方的に受け身であつた時代から半歩のごとき積重ねの末、ようやく広い支持を得て各分野で割れに立ち向かうことができるようになった。今、われわれは、割れが乙女のごとく振舞うことも休眠することも知っている。どのようにあやまれば脱兎のごとき暴走になるかについても、多くの知識がある。

割れと闘うわれわれの武器も従来の材料試験や金属学、電気化学に加えて、破壊力学、フラクトグラフィ、AE、NDIなど日増しに幅広い。FRACTURE CONTROLの格調高い用語に象徴されるように、主客立場を異にして、今度はわれわれがき裂を制御しようとさえ考え始めている。制御できないまでも、き裂の知識と検査結果をもとに、破壊の時期を推定しようとするLIFE PREDICTIONや破壊事故の発生確率を求めようとするRELIABILITY ANALYSISでさえも既に射程距離に入りつつある部分もある。割れによる破壊事故防止にとどまらず、最近の研究者層の厚さを反映してか、割れの利用に向けての国際会議すら企てられた。資源開発、加工、工作、地中および海底の開発、廃棄物処理等への破壊力学の応用がそれである。』

この巻頭言の思いを含め、私達の歩いた、今なお歩きつつある道を絵で示したのが次の図7と図8であります。

まず図7をごらんください。“破壊現象の把握と解明”という学術上の関心(ACADEMIC INTERESTS)も“(構造的)安全の追求”という応用上の要求(PRACTI-

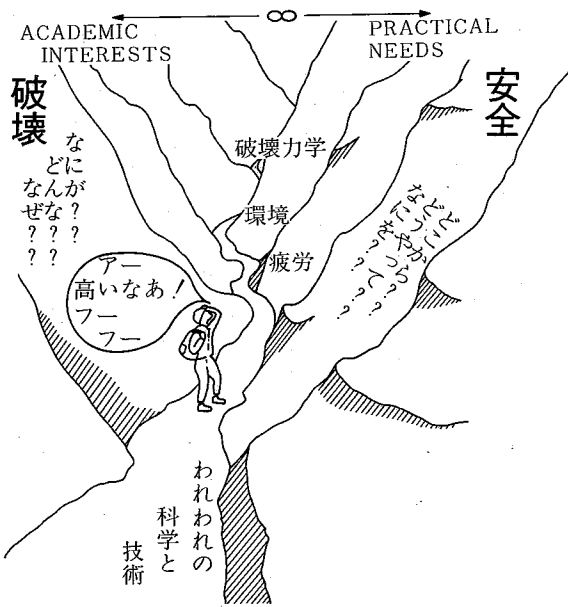


図7 破壊と安全の谷間

CAL NEEDS)も、それぞれ、踏破をめざすわれわれの前に立ちはだかる高い壁でした。

破壊の把握・解明においても、“なにが起きているか? ”、“どんな条件で? ”、“どんな法則の下で? ”、“それはなぜ? ”……等々、一つ一つ積み上げ突破しなければならぬことがいかに多かったことでしょう。安全の追求についても、“一体何をすればよいのか? ”、“実際にはどうやって? ”、“どこからいつ始めるか? ”……等々これも要解決事項が山積みでした。

一つに結合されるべき“破壊”と“安全”は、それぞれ両側の断崖のごとくそそり立ち、その距離は無限(∞)に遠く離れて互いに彼岸のかなたにあるやに見えました。

われわれの科学技術は、その見上げるばかりの、左右にそそり立つ山々の間のけわしい、細い、曲がりくねった、見通しのきかない谷間道を一步一步辿り登っていったものでした。私たち自身については、まず疲労を、次に環境破壊を、それから破壊力学、信頼性へと進めたのでありますが、それらはその長いジグザグ道を登りつめるため通った各段階の歴史的ステップであり、道程標もありました。強度・破壊と安全の統合の彼岸に到達しようというのですから、当然始めから終わりまで、応力解析と確率・統計はリュックのポケットに入れて歩きました。

図8をごらんください。このように、今はもう違うと、胸を張って言わせてください。少し誇張気味ようですが、現在のわれわれの到達段階について、私の気持を率直に表明したものであります。少なくとも、私達は今、

安全と破壊の左右の山々を横断的にまとめて一望に見下ろしながら、安全と破壊の嶺を尾根依いに足どりも軽く、かつ力強く歩いていると考えております。長い谷間の登山道を駆け足気味に歩き続けて、やっと両側が一つに見えてきたのです。当初の到達点たる LIFE PREDICTION も RELIABILITY EVALUATION も、もう、遠く、しかし確かに見えてきました。方向も、道も、距離もだいたいは分かります。FRACTURE CONTROL は、もう、あきらめや物笑いの対象ではなく、そのうち、必ずできるだろう、やってみたいと考えられる現在の理想的目的地として、われわれの道を明るく照らしています。皆さん、もう一息です。がんばって歩きましょう。

4. 研究の系譜——対象と課題と共同研究者

この長い道行きの中で、それならば私達はいったい何をしてきたのか、それについて少し具体的に回顧してみます。

表1は、“私達”の仕事の一端を年表としてお見せするものであります。

私達の研究の進め方は、多くの研究課題が並行して進められ、その間が縦にも横にも組み合わせるように組まれていて、その時どきに、どのポイントを前面に出し強調するか選ぶことが多かったかと思えます。それは主として、研究の有機性と独創性・新規性と継続性とを両立させるため、自然にでき上がった方針でした。また、それは、個々の研究者の研究活動の独自性・弧立性などの本質的機能と、グループとしての協調性・連帯性・総合性とながしかの競争原理などの副次的機能とを両立させる努力でもありました。

各課題については、それぞれ中心となる人が最低一人

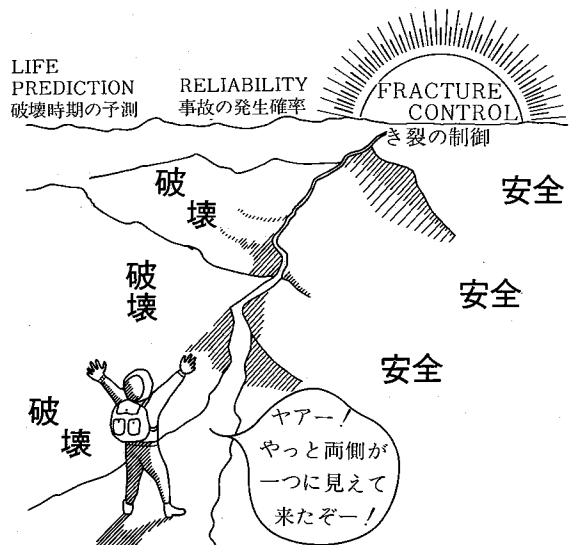


図8 破壊と安全の嶺を尾根づたいに

表1 対象と課題

研究・調査課題と方法論		関係した振動対策、老朽度評価、事故解析、安全解析、安全設計	
試験機・測定装置	(凹凸・板厚測定器)	1951 (S.26) (岡本研)	道路橋(市川橋など)
薄板の強度	(西原式改造)	52	アーチダム(ナラマタ)
衝撃強度	(動電形ランダム荷重試験機)	53	鉄道橋
座屈	(線材疲労試験機)	54	地下鉄
生体力学	(ゲージ疲労試験機)	55	姫路城
フラクトグラフィ	(X線(エレクトロン))	56	鋼巻尺
複合材料・ぜい性材料	(自転車疲労試験機)	57	レール
A E	(X線)	58	高圧タンク
	(K閥制御)	59	噴霧器
	(ダムクラックゲージ)	60	人体(骨折など)
		61	原子力圧力容器
		62	航空機
		63	圧延用ロール
		64	石油タンク
		65	原子力プラント(IGSCC)
		66	(CF)
		67	ボイラ
		68	
		69	
		70	
		71	
		72	
		73	
		74	
		75	
		76	
		77	
		78	
		79	
		80	
		81	
		82	
		83	

(): subtitle

はいるわけですが、やはり、グループの協力によって推進されたものが多いようです。

研究対象別には、構造物に関しては、初め岡本先生のもとで、道路橋・鉄道橋・発電用ダム・地下鉄・城・軌条に関係し、その後、アルミ構造物や砂防用ダムに、最近、本四連絡橋・高速道路などに関係しております。

プラント・容器・弁管類に関しては、農業用噴霧器や原子力プラント配管、LPG容器、LNGタンク、石油タンクその他の化学プラント、ペロー、ボイラー、弁などに

関係しました。

交通・輸送機械関係では、鉄道に関しては、先ほどの橋・レールのほか車軸などに、自動車に関しては、自動車通行の影響を調べるための路面凹凸、キングピンから始まり、タンクローリ、ホイール、自動車車体一般から、現在は特にスポット溶接した継手と構造に関係しております。その他自転車・航空機・船などにも一部関係しました。

その他の機器類では、回転体としての超遠心分離機、

発電用大形回転機軸を始め、圧延用ロール、クレーン、ワイヤロープ、鋼スケール、リレーその他多くのものに関係しました。

研究課題別には、まず「応力・ひずみ解析」では、当初き裂がない時の強度をまず優先して考え、次に、き裂解析へと進みましたので、応力・ひずみ解析については、使えそうな理論的・実験的諸解析法は、ほとんど関係したといつてよいように思います。そのうち、等角写像など解析的解析には、石田先生のご協力のもとに結城・薄・神原の諸氏が、変分法には石川氏が、FEM には黒田・小島・方・月森・山岡の各氏が、BEM には、木須・川端の両氏が、光弾性には、金・渡辺・久田・平野（渡辺研）、尾崎・吉岡の各氏が、X 線には松本氏が、アナログには崔（善浩）氏が、ひずみゲージには相良・小倉両氏が、特に強く関与しておられます。

材料や構造物の強度については、静的挙動はもとより疲労・環境・衝撃・座屈・不安定など各種破壊に対する強度の研究に関係しましたが、そのうち、量的には疲労破壊と環境破壊関係が多いかと思えます。

疲労については、当初平滑材で、その後しだいにき裂挙動ないし、き裂材強度の研究が多くなり、一時破壊力学の研究の中に埋没するかに見えた時もありました。しかし、最近では、主として設計に使用する平滑材強度と、主として健全性・安全性に使用する疲労き裂挙動とを統一的に把握し運用することを考えて、新幹線準備時代に研究したことのある材料表面の微小き裂問題を、新しく破壊力学的方法と組み合わせて進めてきました。疲労における平均応力・残留応力・溶接の影響には、三角・船崎・大平・方・中務・李（潑）の各氏が、不規則変動荷重には、西山・福田両氏が、多軸荷重と混合モードき裂には、岡村・川井両先生の協力を得つつ、結城・大平・角田・東郷・田辺・吉岡・村上の諸氏が寄与するところが大きかったのであります。先述の微小表面き裂は、高橋・徐・志垣・宮下・小野・川村の諸氏の成果が中心ですが、微小表面き裂は、多くの場合不規則分布き裂でもあって、かつ、干渉・合体を伴うことも多く、この特殊課題に関しては、黒田・大平・薄・宮沢・藤田（高弘）・宮下・中曾根・下平の各氏が推進力で進められました。複合材料、その中でも特に、異材境界疲労き裂の破壊力学は、崔（鎔湜）・今井・渡辺・神原・山崎の各氏が開発されました。

環境破壊・環境強度については、対象についても方法論についても多面的に研究が進められましたが、特に腐食疲労に関するものが多く、それには、堀内・九里・諸橋・佐藤（操）・藤田（茂・宏）・古作・薄・高橋・藤田（高弘）・辻・阿部・中曾根・下平の諸氏が、応力腐食われ、または遅れ破壊には、大平・小島・坂詰の各氏が、ピットには、辻・中曾根・橋本の各氏が、隙間腐食には桑原氏が関与されました。比較的最近になって（1977 年

頃から）高温環境での疲労について研究が始められましたが、結城・持田・三木・徐の各氏がその中心でありました。

破壊力学の研究は、上記の応力解析・疲労・環境破壊の研究において、その対象を無き裂材からき裂材にしだいに移すことによって進められましたが、平滑材の疲労、異材境界での疲労破壊、ステンレス鋼の SCC など、従来破壊力学が適用されていなかった対象にも適用を試みました。切削の破壊力学も林氏によって進められています。破壊力学の歴史的本命である静的荷重下のぜい破壊・延性破壊は、硬質材料やぜい性材料につきましては、下村・金・陶山の各氏が、表面き裂を入れた延性材料の破壊につきましては、中桐慈教授のご指導を受け、小倉・結城・岸の各氏が中心となって進められました。

また、AE（アコースティックエミッション）と組み合わせての破壊靱性評価や疲労き裂の成長解析につきましては、結城・大平・山腰・李（孝雄）（当時鳥飼研）・森の各氏が関与し、岸輝雄先生を含め多くの関係諸先生のお世話になりました。

現象の本質的解明と安全への寄与のためには、避けられないものとして、確率・統計的手法を順次導入しました。き裂成長の確率的特性の解析は、山田氏・豊平氏、不規則分布き裂の二次元画像処理と寿命の確率評価は、薄・藤田（高弘）・中曾根の各氏、き裂成長と非破壊検査を考えた破壊過程の信頼性解析は久田氏、ピット分布による不規則凹凸面の二次元フーリエ解析は辻・久田両氏の開発によるところが大きいのであります。

その他、アルミ材料の強度は、長谷川氏が、ワイヤロープは、飯田氏が主となって研究が行われました。

以上の諸研究の推進には、常勤・非常勤を問わず研究室職員の方々がいずれもその全部に直接・間接に貢献しておられることはいうまでもありません。

私達は、多様な対象に対処するため、表 1 に示すものを含めて、各種の新しい試験機・試験装置・測定装置を開発し運転してきましたが、この面については、特に職員の方々のご苦労が大きかったものと思います。

5. 破壊力学の推進

私は、1969 年(昭 44)から 1970 年(昭 45)に川井教授のご紹介で、当時疲労の破壊力学の中心人物だったポール・パリス(P. Paris)教授に招かれ、リーハイ(Lehigh)大学の客員教授として渡米しました。と同時に ICF-1 以来の友人で、かつ堀教授のご紹介もいただいて、当時延性材料の破壊力学で第一人者だったフランク・マクリントック(F. McClintock)教授に招かれて、マサチューセッツ工科大学(MIT)にも籍を置きました。正確には招かれて暫くたって行ったと言えるでしょう。昭和 43 年は学園紛争の年で、昭和 44 年初頭、7 学部学生代表団との確

認書や、いわゆる安田城の攻防戦の終結を見届けて、ようやく出発しました。今思うと、少なくとも研究に関しては、半ば放心状態で米国に降り立ったのではないかと想像されます。

その1969~70年は、時あたかもリーハイ大学は、G. Irwin, P. Paris, G. C. Sih, R. D. Stout, R. Wei, R. Hertzberg, F. Erdogan, A. W. Pense, R. Roberts, J. D. Landes, J. Rice, J. E. Srawley 等、非常勤も含めると、当時の実践派破壊力学の中心人物達が集ってケンを競い、正にけんらん豪華で、前にも後にも空前の破壊力学の世界的メッカであり、リーハイの第二の黄金時代でありました。同時に破壊力学の過熱の時代でもありました。しかしながら、当時のリーハイ大学は、MIT とともに、学園紛争の嵐の真只中でもあり、日本の学園紛争後の私自身の個人的事情もあってか、在米中はまだ破壊力学と密着できず、この間の米国での私の疲労やき裂に関する講義や講演には、破壊力学を入れませんでした。

帰国後、冷却期間を経、空間的にも距離を置いて破壊力学を眺め、自分の従来のクライテリオンや方法論とも比較しつつ、米英における破壊力学の使える部分と使えない部分を整理し直して、自分なりの納得できる破壊力学、自分のものとしての破壊力学を構成して、先ほど述べましたようにフラクチャ・メカニストとなりました。

この頃になりますと、私も世界の破壊力学全体の前途の展望について責任を感じるようになりました。この問題についての若干のトピックスを、うろ覚えですが、何かのお役にとお伝えしておきます。

- i) 1970年頃、展望能力の豊かな P. Paris とのベツレームでの話し合い；当面または、近い将来に重要な破壊力学の戦略的(?)課題は、(a)延性材料に使える破壊靱性、(b)低 ΔK_{TH} における da/dN (特に ΔK_{TH})、である。
- ii) 同じ頃、破壊力学の創始者 G. Irwin とのベツレームかメリーランドでの話し合い；現段階とこれからの行き方は、(a)破壊力学の基本線はこれで合意できる。(b)しかし実際に使えるためには精密化が必要で、これがこれからの仕事であるが、それは第2世代のフラクチャ・メカニストによって達成されるであろう。
- iii) 1978年頃、Paris と再びセントルイスで；非破壊検査の難しい個所の安全設計にき裂成長を、 da/dN は $S-N$ との関係で使う。たとえば航空機で。

これらの話には、多分に偶然らしい面も感じますが、いかに特徴的であるかは、当時の破壊力学を知る方には、直ぐお分かりかと思えます。

1970年頃は、き裂の安定成長を考えた破壊靱性試験法 E399 の準備がすでに終わり、さらに高靱性を考えて次の J_{IC} への準備も活発でした。そうして、原子力プラントへの採用が1972年です。私達が破面の塑性変形などを調べるため X 線フラクトグラフィを初めて提案したのもこ

の頃です。

新しい ΔK_{TH} 決定法が開発され、私達が10数種類の材料について ΔK_{TH} を求め、その法則性を指摘したり、西谷先生と ΔK_{TH} 推定法の提案をしたのも、この頃だったと思います。

き裂モデルの精密化は多くの方々により今も活発に進行中ですが、私達としては、まずき裂間干渉から始め、き裂の分岐・屈折、不規則分布き裂の合体、不均質材中き裂、三次元成長(表面き裂)、き裂の確率成長、弾塑性き裂などと順次仕事を進めました。そのき裂モデルの精密化の各種方法と、その各精密化した破壊力学の適用対象とを整理して示したのが図9であります。

1978年、破壊力学を全面採用した damage tolerance design の米国内準備が終わり、国際的にも、その権威の承認を求めつつあった時で、fracture control design や life prediction が各所でプランまたは話題にのり始めた時であります。私達自身は1960年までに、き裂成長から疲労寿命や疲労強度を計算で求めることを提案し、経験もしていたのですが、社会一般でそれを認められる時期を待っていたことになります。最近航空機の、そして、今回、本四連絡橋の設計にそれが採用になり、世界最大のフラクチャコントロールデザインドストラクチャの実現に到りましたことは、感慨を禁じ得ません。しかし、待っている間に、微小表面き裂や不規則分布き裂、混合モードき裂、腐食疲労き裂、高温き裂、弾塑性き裂、異材境界き裂、閉口き裂など、実際のき裂に近づける準備がかなり進みましたので、無駄な待機ではありませんでした。

以上は、新しい工学的的方法論としての破壊力学の世界的見地に立っての進め方の問題ですが、このほかに、私達は、日本で破壊力学をどう進めるべきかについての固有の問題についても強く責任を感じました。

1970年頃の時点では、破壊力学では、日本は約10年出遅れていました。破壊力学の開発・発展を強く必要とする大事故や特別の軍事要求や国の威信をかけた宇宙開発競争が、以前の日本には少なかったらしいことは、それ自体はたいへん幸せなことであるかもしれません。しかし今は違います。破壊力学を必要とするような材料・工作法で作った要注意構造物が日本で急増の傾向にあるように見えます。急速にこの遅れをうめ、破壊力学への需要に答える必要があり、そのため、まず、何をなすべきでありましょうか？

この質問への当時の答は、“層を厚くしよう！”でした。それはやがて、質の向上を伴うことを信じていました。そのための具体的方策は、次のようなものでした。

- (i) 破壊力学の研究グループの常時活動を活発に。
- (ii) 破壊力学の国内シンポジウムを。
- (iii) 普及活動を活発に。そのために、従来の破壊力

ANALYSIS OR APPROACH	material nonlinearity problem	indeterminate crack problem	geometric nonlinearity problem	two-dimensional stochastic process	three-dimensional crack problem
REFINED CRACK MODEL	crack with remarkable plastic deformation	crack with reaction force on crack surfaces	non-linear shaped crack	closely distributed random cracks	crack with non-linear crack front

GIVEN PROBLEMS FOR PASSIVE ANALYSES

(1) crack in a given plate (with uncertain boundary conditions)	○	○							○	
(2) bent, curved or branched crack path			○							○
(3) cracking or crack growth at or near bonded or welded part		○	○			○	○	○	○	○
(4) cracking including the interactions of randomly distributed cracks			○	○						○
(5) failure by statistically expected crack with or without NDI					○	○				○
(6) very small crack and crack growth in the early stage	○				○	○			○	
(7) SCC of stainless steels and non-ferrous alloys	○		○	○	○	○	○		○	
(8) corrosion fatigue of high toughness steels		○			○	○			○	○
(9) cracking in the second mode or mixed modes state		○	○				○		○	
(10) hysteresis effects on fatigue crack growth	○	○							○	
(11) fracture of concrete, rock and cast iron		○	○	○	○	○	○		○	○
(12) fracture or crack growth under biaxial loading	○		○	○					○	
(13) speed or temperature effect on crack growth	○			○				○		
(14) stress ratio effect on fatigue crack growth	○	○							○	
(15) crack growth in low cycle fatigue	○				○	○				○
(16) thickness effect and corner crack	○				○	○				
(17) fracture under out of plane bending	○	○				○				
(18) plating, cladding, lamination of material				○	○	○	○			
(19) micro-structural aspect of fracture	○		○	○	○	○	○			
(20) creep or high temperature fatigue cracking	○		○	○	○	○				
(21) pitting corrosion and crevice corrosion	○				○	○	○		○	
(22) fracture of composite	○				○	○	○	○	○	○
(23) residual stress effect	○	○				○			○	
(24) crack initiation at notch root and retardation	○	○			○	○	○		○	
(25) fracture under compression or shear		○	○			○			○	

ANALYSIS OR APPROACH	discontinuous media crack problem	quasi-singularity problem	artificial setting of outer boundary conditions	reliability approach in fracture mechanics
REFINED CRACK MODEL	boundary crossing or interface crack	crack-like notch or cracked notch	crack with crack tip panel	expected (statistically existing) cracks

図9 き裂モデルの精密化とその適用対象

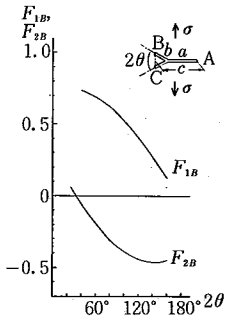


図10 分岐したき裂の K_I と K_{II} は分岐角により変わる

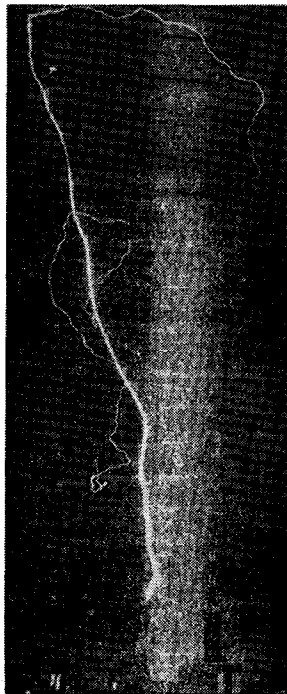


図11 いなづまの分岐立体角が 30° に近い例 (朝日新聞より)

学の成果の整理とテキストの準備を。

(iv) 試験法の標準化を。

そのことは、(iv)以外は直ちに実行されました。(i)については、東京地区ではすでに宮本、石田、国尾、岡村の諸先生と私などのグループがあり、研究委員会なども持っていましたし、一足先輩の木原、金沢、町田の諸先生を中心とする造船、溶接の破壊力学グループとも連絡がとれていました。

(ii)については、米国では1967年からすでに年1回のシンポジウムを続けていて、その論文の発表雑誌として、1968年から Engineering Fracture Mechanics を発行していましたが、日本では上記のグループが中心となって1971年に機械学会主催の第1回破壊力学シンポジウムを箱根でにぎやかに開き、私がおの執行委員長をつとめさせていただきました。その同じ1971年には、造船学会主催および日本学術会議主催の破壊力学シンポジウムがそれぞれ行われました。

(iii)については、全国各地の学会・大学・会社による講演会・講習会が続々と開かれ、私自身も全国を歩き回り、破壊力学は驚くべき速度で拡がってゆきましたが、それに使った資料なども含めて、宮本・石田・岡村・町田諸先生と日刊工業で作ったテキストは、たちまち飛ぶように無くなる勢いでした。その頃、米国ではまだ適当な教育用テキストが発行されておらず、私見では、普及

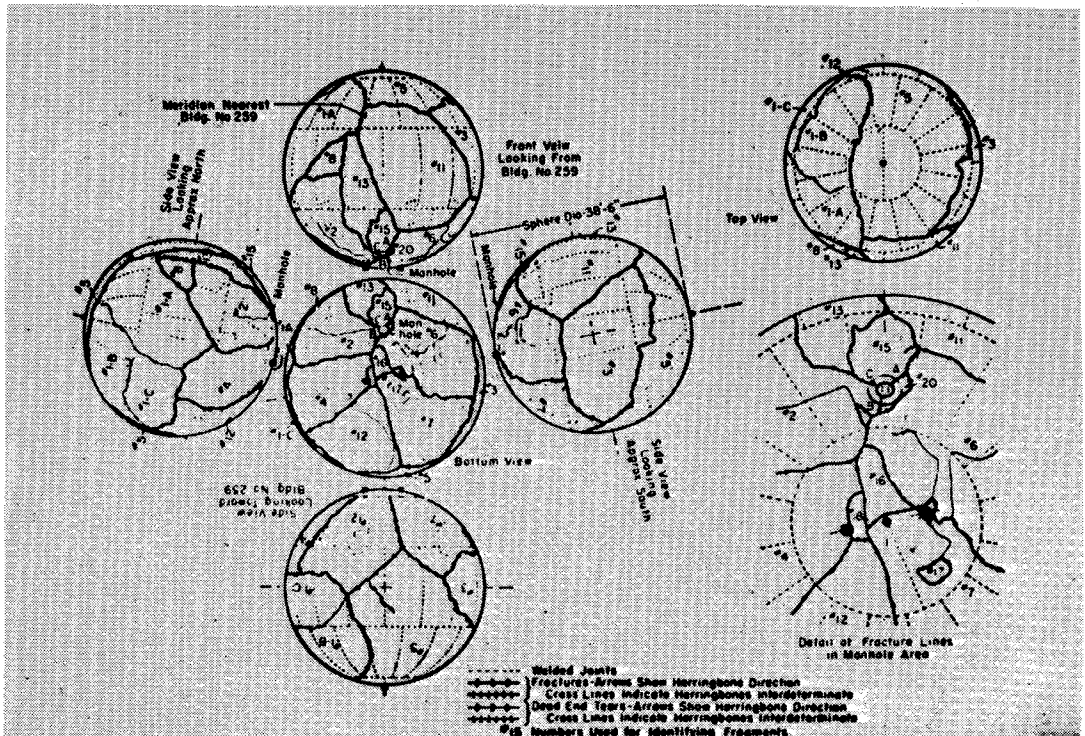


図12 球形水素タンクのわれ (M. E. Shank, ASTM STP 158 より)

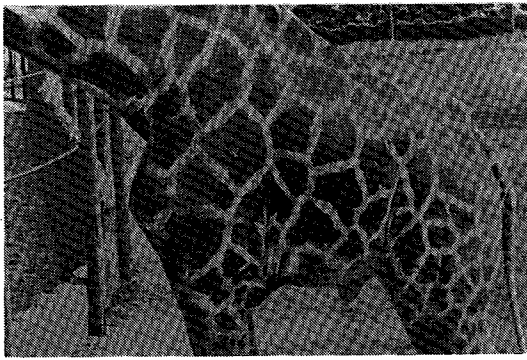


図13 きりんのまだら模様 (平田森三先生による)

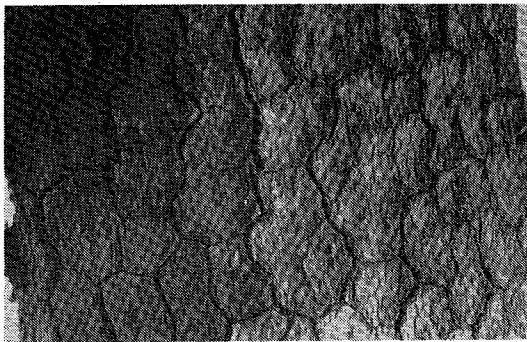
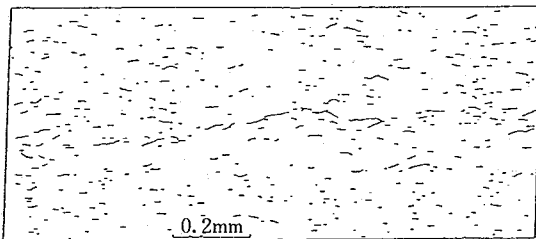


図14 三保の松原の羽衣の松の幹のわれ目



$N=82.7 \times 10^4$ $N/N_i=0.877$

図15 疲労により鋼表面に発生した微小分布き裂の例(徐)

用の適当なテキストの欠如は、世界的にまだ解決されておりません。

(iv)については、造船・溶接グループでは臨界 COD について作業が進んでおりました。機械学会では、回転体の破壊に関する研究分科会で J まで含めて、試験法の検討もいたしました。J_{ic} 試験法についてはその後も検討が続けられ後に機械学会で新しい規準が出されました。

層を厚くすることは、基本的に大事なことだと私は思っていますが、そのためには、

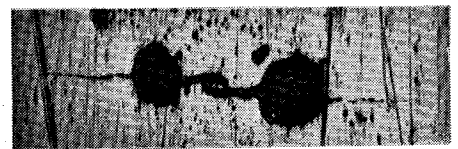
(a) 生産に当面直結しなくても安全のため喜んで仕事をする人を大事にすることにつとめました。

(b) 同じ目的で仕事をする人——すなわちこの時点で破壊力学に専念する人は、そのスタートの遅い早いであっても、これはすべて同志感をもって接しました。

(c) “分かりよい楽しい破壊力学を！！”
“それをまた役に立つ破壊力学に！！”
が大事かと感じ、それを実行するよう努めております。

6. 楽しく役に立つ破壊力学を

例 1) き裂形態論+2軸・混合モード+異材境界き裂
分岐したき裂の応力拡大係数 K_I は、図 10 のように、分岐の挟角が約 30° で最大となり、 K_{II} はこの時 0 となります。実際のクラックも、そのような時に伸びやすいようです。図 11 のように、いなづまも同様に分岐します。2軸応力ではこの 30° がもっと大きくなります。等方応力では図 12 のような亀甲状のサッカーボールのような模様も得られます。平田先生の御本“きりんのまだら”によれば、図 13 のようにきりんのまだらが、やはりその



100 μ

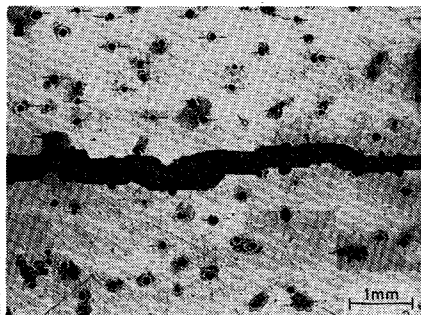


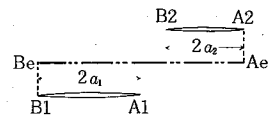
図16 (a) 分布き裂の合体によるステンレス鋼の破断
図16 (b) 分布ピットから発生した分布き裂の合体による破断例

図16 (c) き裂の合体過程

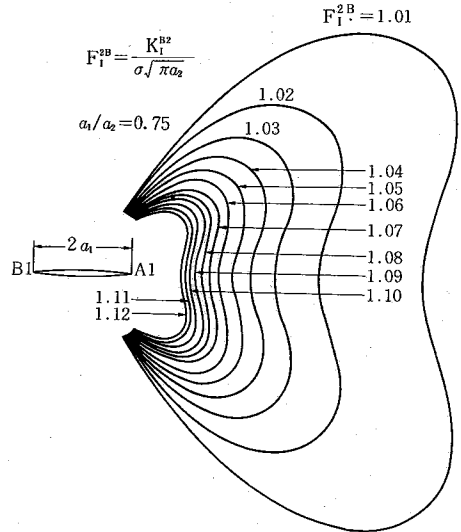
等方性クラックです。このわれ目模様は、干上がった水田表面の模様も、図14の三保の松原の羽衣の松の幹もまったく同じです。 K_{II} が存在すると、馬の手綱を引くと同様にき裂は曲がります。ここに“屈折の力学”が存在します。それならば、たとえば K_{II} と K_I の比などを制御すれば、クラックを任意の向きに進めることができるはずで、“クラックで一筆書きでCrackと書かせる”のが私の夢でしたが、退官までには遂に果たせませんでした。クラックでCrackと書くことができるならば、き裂の方向を転換してもとの方向にもどすことができるはずで、き裂は真直に進むから、部材を切断して危険です。少し進んでから、くるっと向きを変えてもどつてしまえば材料の破断は一応はまねがれます。電離層で反射する電波のように“き裂を追い返せ！”これが私の第2の夢です。同様に、き裂の進路を任意に制御できるならば、材料の加工や資源の開発に直ちに役立ちます。瞬時に25万個になったコメント号を思い出して下さい。ここに“生産の破壊力学”があり、これは第3の夢です。

例2) 不規則分布微小き裂の発生・成長・干渉・合体による破壊過程の統計的シミュレーションと画像処理

平滑表面での疲労破壊や環境破壊では、微小な分布き裂が図15のように発生します。多い時は、毎平方cm当たり数百個以上にも達しますので、図16(a),(b),(c)のように、き裂間に干渉、合体が起きて破壊を加速するようですが、その加速を支配する因子に、き裂の位置・寸法の分布など確率量が入りますので、一種の確率過程となります。したがって、たとえば図17のような破壊力学による解析と、乱数を使ったモンテカルロ法的手法とによる破壊過程のシミュレーションがたとえば図18の



(a)



(b)

図17 (a)(b) き裂1にき裂2が接近した時のB2端のKの増加率とB2端位置の関係

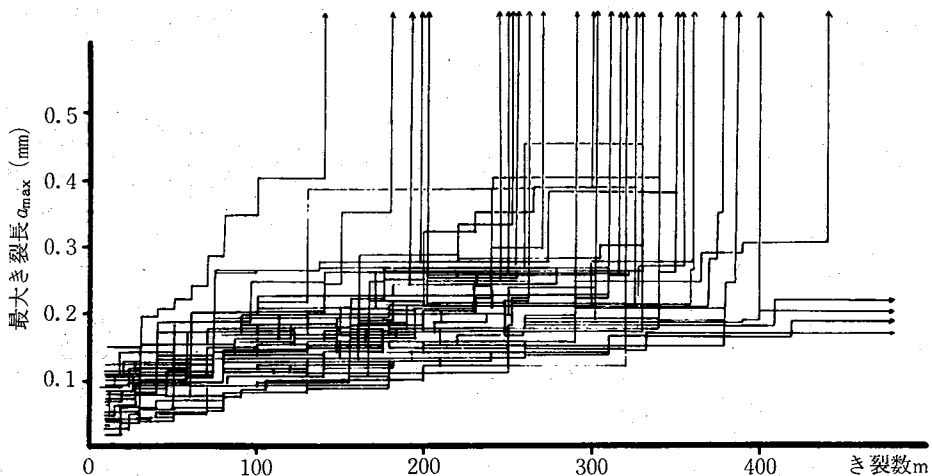


図18 き裂の順次発生と合体による不連続な最大き裂長の増加(1本の折線が1試行)(mはき裂数)

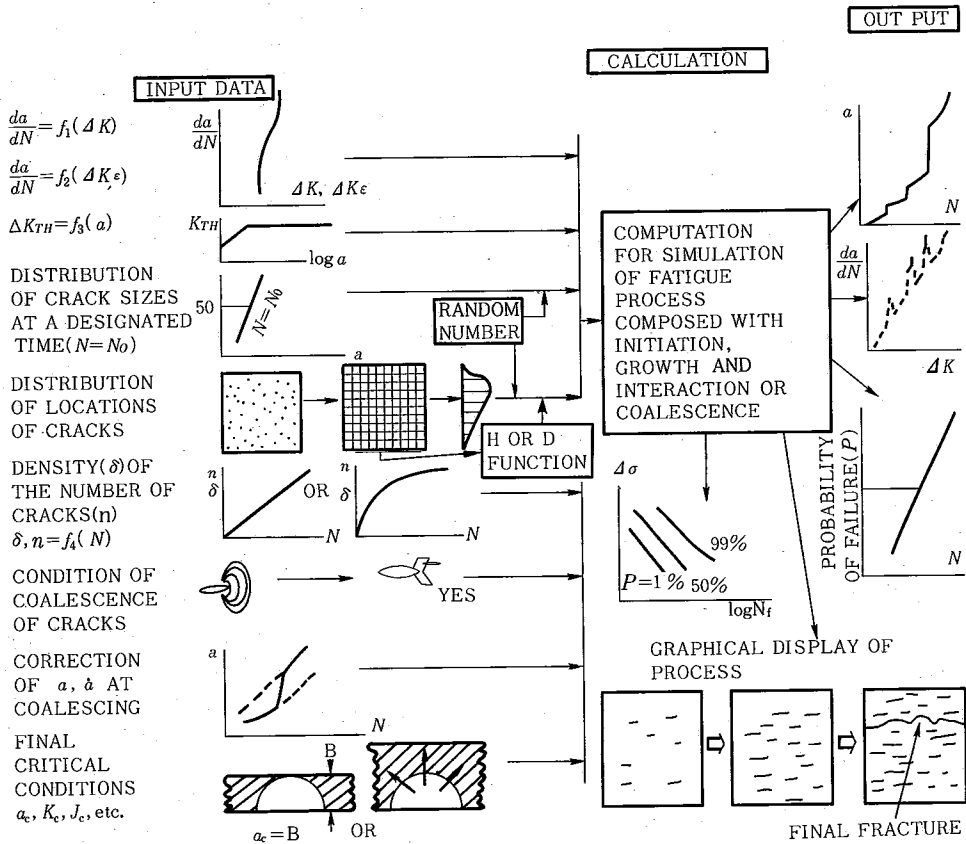


図19 不規則分布き裂の成長・干渉・合体による破壊過程の解析方法

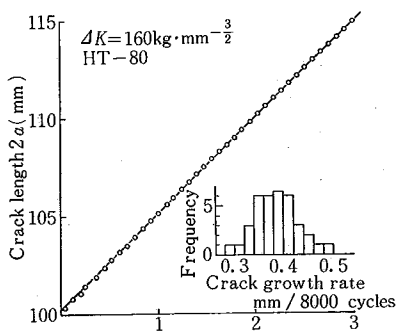


図20 き裂成長速度が一定になるような K 制御の例

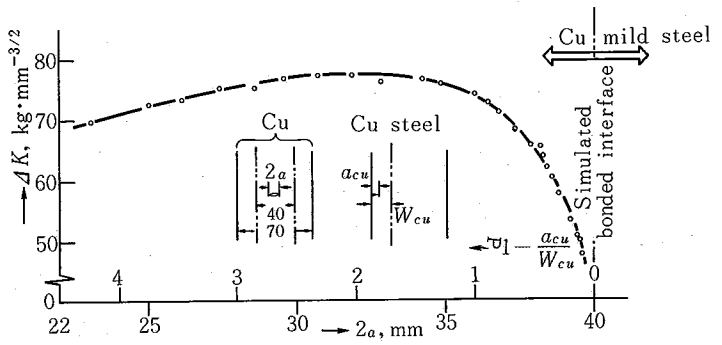


図21 銅から鋼への異材境界で K が急低下した例

ようにでき、寿命予測や破損確率の推定などができます。全体の手順を図19に示します。また、この分布き裂は、表面レプリカを使えば実構造物からもデータがとれるので残り寿命の推定などの可能性を与えます。

例3) き裂成長速度のコントロール

き裂成長速度は応力拡大係数 K や ΔK の関数となります。したがって、荷重や形状や残留応力をうまく使っ

て K の変化を制御すれば、き裂進展速度を制御できます。 K 制御疲労試験機を開発してこれを実証しました。図20のような速度一定制御はいうまでもなく、停止や遅延等もできますので、これが現場で完全にできた時はフラクチャ・コントロール・デザインができる時です。また、材料面からのき裂成長速度コントロールもあり、現在可能な方法としては、複合材料の異材境界や分散材な

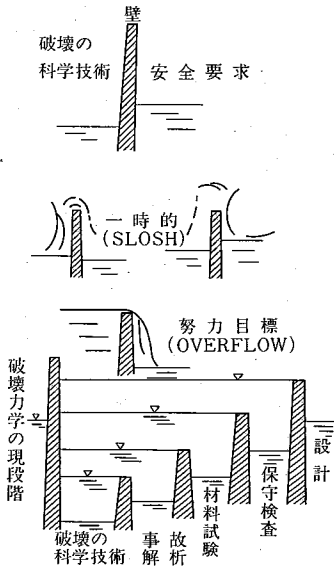


図22 破壊力学の現段階と努力目標

どでき裂を分岐・屈折させたり図21のように K を急低下させる、接着剤などによる人口くさびをき裂に入れて K の振幅 ΔK を下げる、圧縮残留応力を適当に分布するなどはすでに経験済みです。

7. 破壊力学の現段階と将来

図22に破壊力学の現状をシミュレートしてみました。

表2 破壊力学の現段階の展望と努力目標

適用分野の拡大：自動車・鉄道・コンクリート・有機材料、一般機械、APC-SCC、核融合、硬質材、薄板構造、高温設計、スポット溶接、耐震設計、衝撃強度。
他の諸方法との：画像処理、AE、BEM、実験応力ひずみ相互協力 析、信頼性工学、NDI。
異なった角度で：直接生産への応用、平滑材・無き裂材への発展 の適用、特異性の不明確な問題へも。

すなわち、破壊の科学技術の水準が上がれば、破壊と安全の間の壁をオーバーフローし安全要求を満たします。一時的に波立って壁を超えることもありましようが、それは好ましくありません。われわれの努力目標は何と言っても安定絶対量として、科学技術のポテンシャルが高いことで、これが継続的安全には必要でしょう。その目で見ると、現状では、一番下の図において、事故解析と材料試験はすでに可能となり、保守・検査の可能性を実現しつつある段階であり、最終的には設計に使える要件を満たすようになるででありましよう。

現段階の展望と努力目標を表2に整理し、新分野への適用、他の方法との協力、本来とは異なった角度での新しい発展について例示します。

長い間どうもありがとうございました。

(1983年11月21日受理)

