

紫綬褒章を受章して



特別寄稿

久保 司 郎*

On the Occasion of Receiving the Medal with Purple Ribbon

Key Words : Fracture Mechanics, High Temperature
Inverse Problem, Crack Identification

1. はじめに

この度は思いもかけず、平成24年秋の褒賞 紫綬褒章受章者の一人に選ばれ、身に余る光栄と存じます。この受章は、これまで行ってきた、高温におけるき裂の進展に関わる高温破壊力学、ならびに結果から原因を推定し、き裂の非破壊評価に応用できる逆問題解析に関する研究が評価されたものと思います。

以下では、まずこれらの研究についてお話しします。

2. 高温破壊力学の構築

構造物やその要素の健全性を確保するためには、劣化を力学的に明らかにし、それを把握することが必要です。劣化の典型的なものは、き裂です。小生が研究をはじめた頃は、き裂の挙動を扱う破壊力学が急速に発展していた時期で、破壊力学がき裂の発生条件の評価や、疲労き裂進展に適用されていました。き裂の先端では、単位面積あたりの力を表す応力が無限大になる。すなわち特異になるという困難があります。当時は、線形弾性の場合の応力特異場の係数である応力拡大係数を用いてき裂の評価を行おうとするものが、大勢を占めていました。

この頃は、高温条件下でもき裂を取り扱おうとする動きが出始め、それこそ高温破壊力学の黎明期に

ありました。高温では時間的に変形が進行するクリープ現象があり、き裂発生や疲労き裂進展に対する破壊力学をそのまま拡張して適用することには疑問がありました。高温条件下のクリープき裂に対しても線形弾性破壊力学の応用が広まり、クリープき裂進展速度の整理に線形弾性応力拡大係数が適用されていました。その結果はNature誌にも掲載されています。その後、クリープき裂進展速度の支配力学量として何が適当であるかについて世界的に議論が展開されていきました。

そこで、非線形性を考慮できるものとして急速に注目を集めていたJ積分を参照して、クリープ条件下のき裂問題に適用できるようにした、クリープJ積分、 J^* (当初は修正J積分と呼んでいました)を提案しました。クリープJ積分の提案により、クリープのように一定荷重や一定応力の下でも変形やひずみが進行する場合に対し、き裂の力学的環境を評価することができるようになりました。このクリープJ積分は、特にクリープのように非線形性が強い問題に適していました。なお、2年ほど遅れて米国で提案された同様の力学量は、 C^* 積分と名付けられています。

き裂先端近傍の応力や変位速度がクリープJ積分によって表されることを用い、クリープ損傷の蓄積を考慮して、クリープき裂進展速度を与える理論式を導きました。この結果、クリープき裂進展速度はクリープJ積分に依存し、条件によっては、き裂進展に履歴の影響が入ることが明らかになりました。

クリープJ積分、 J^* は、図1のき裂先端を囲む経路 Γ に対する次式の線積分により定義されています。

$$J^* = \int_{\Gamma} [W^* dy - T_i (\partial u_i / \partial x) d\Gamma]$$

ここに、 W^* は応力 σ をひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ で積分した



*Shiro KUBO

1948年6月生
大阪大学工学研究科産業機械工学専攻
博士課程修了(1976年)
現在、大阪大学 大学院工学研究科 機械工学専攻 教授 工学博士 破壊力学
TEL: 06-6879-7304
FAX: 06-6879-4491
E-mail: kubo@mech.eng.osaka-u.ac.jp

もの、 T_i は経路上で作用する表面力、 \dot{u}_i は変位速度です。

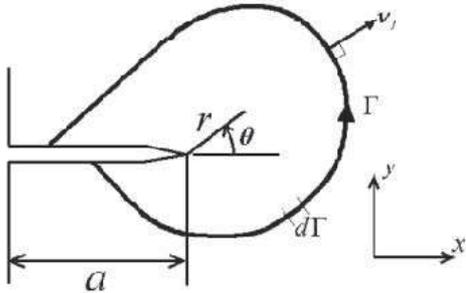


図1 クリープJ積分の積分経路

この式からわかるように、クリープJ積分、 J^* を、定義式のまま評価することは困難であり、もしできても非常に面倒であるという欠点がありました。このため、クリープき裂成長実験を行なってもそれを J^* で整理し、線形弾性の応力拡大係数との優劣を評価することができていませんでした。

そこで、深いき裂を有する試験片ではクリープ変形が未破断部に集中することを用いて、クリープJ積分を変位速度の実験値から簡単に評価することができる、簡便評価式を提案しました。この簡便式により、修正J積分を用いたクリープき裂進展速度の整理が大きく進みました。その後の世界の多くの研究機関により実施された実験結果から、線形弾性の応力拡大係数ではクリープき裂成長速度を統一的に整理することはできないこと、クリープJ積分を用いれば荷重条件や試験片によらず、クリープき裂成長速度が整理できることがわかりました。

この J^* は、もともとクリープ変形が十分進行し、弾性変形の影響が小さい場合を想定しています。しかし、一般には負荷初期の弾性変形が大きい状態からクリープ変形が支配的な状態へと遷移する過程も重要です。この初期の状態を小規模クリープと名付けました。この小規模クリープ状態に対して、き裂先端近傍ではクリープJ積分、 J^* が定義できることがわかりました。さらに非線形弾性と対比させ、ある近似を入れると、 J^* に関する微分方程式が得られました。これを解いたところ、き裂先端近傍の J^* は応力拡大係数の自乗に比例し、負荷時間に反比例するという式が得られました。この式は、負荷の瞬間には J^* が無限大になるという一見奇妙な現

象を予想しています。この式の有効性は有限要素解析により確かめられました。

荷重変動があるときには、疲労によるき裂進展とクリープによるものが重畳し、相互作用が生じると言われていました。系統的な実験の結果、クリープ・疲労重畳下のき裂進展が繰り返し数に依存する疲労型のき裂進展と時間に依存するクリープ型のき裂進展に大別でき、後者はクリープJ積分により支配されることがわかりました。これらの特性から、疲労型とクリープ型のどちらのき裂進展が支配的になるかという条件を示すことができました。また、クリープ変形が顕著な条件下でも疲労き裂進展が生じなくなる疲労下限界が存在することを実験的に示すことができました。

これらの成果は、高温破壊力学の支柱を構成しています。

3. 機械工学における逆解析の導入と応用

き裂の挙動を定量的に評価できたとき、構造物の健全性評価には、き裂の寸法を定量的に求める必要があります。結果から原因を求める逆問題解析は、このき裂同定に使えるのではないかと考えました。

き裂が存在する物体に電流を流した時に物体表面の電気ポテンシャル分布に変化が表れます。電気ポテンシャル分布からき裂を同定する方法に対し、境界要素法の基礎に観測値からき裂の位置や寸法を推定する逆解析手法を構築し、これを電気ポテンシャルCT法と名付けました。同定の一意性に関する理論的考察を行い、種々の方向から電流を入れたときの応答を境界要素法による計算結果と照合することにより、斜めのき裂などの同定ができることがわかりました。

電気ポテンシャルCT法は、電流負荷が必要な能動的な手法ですが、負荷を受けている構造物の表面にピエゾフィルムを用いると、物体に通電しなくても電気ポテンシャル分布が表れます。これに逆解析を適用することにより、き裂の位置と寸法を客観的に推定する受動型電気ポテンシャルCT法を提案しました。さらに、ピエゾフィルムとマトリックス状の電極よりスマートレイヤを構成し、スマートレイヤに能動的に電氣的パルスを与えて超音波を発振させ、き裂などによる反射波を同じくスマートレイヤで受信する、能動型パルスエコー法を提案しました。こ

これらの手法の有効性は実験的にも確認できています。

構造物に疲労き裂が発生・進展するとき、熱弾性効果により引張下では僅かに温度が降下し、圧縮下では温度が上昇します。橋梁上を車両が通過した際の熱弾性温度変動分布を測定できれば疲労き裂の検出が可能となります。そこで、画像データの一部を参照信号とし、また定量化のため逆解析を導入して、遠隔から高感度で橋梁の疲労き裂を検出できる自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィ法を提案しました。き裂の成長速度を与える応力拡大係数の変化を実測することにも成功しています。また、日照によるコンクリート表面の温度変化を、解析結果と比較し、逆解析により剥離を同定する手法を提案しました。この手法の特徴は、遠隔計測や大きな物の計測、さらには成長き裂と停止き裂の判別が可能なことにあります。

さらに、逆問題を大きく捉えてその枠組みを明らかにすることにより、逆問題の分類を行いました。分類の結果、支配方程式逆問題のような、新たな逆

問題の存在が明らかとなりました。支配方程式逆問題に対する逆解析手法も提案しています。また、境界観測から内部のソース項を決定論的に求める随伴境界積分法などの特徴のある逆解析手法も提案しています。

これらの研究を契機に、機械工学分野で逆問題解析が展開していきました。

4. おわりに

以上の研究は、大阪大学名誉教授 大路西嗣先生、小倉敬二先生のご指導、研究室の皆様のご協力なくしては語れません。関連分野の他大学・研究機関の皆様にも大変お世話になりました。今回の受章では、小生を含むグループの研究とこれらの研究分野が認められたものと存じます。ご協力・ご支援いただきました方々に厚く御礼申し上げます。

また、地味なこれらの分野に光をあて、評価いただきました方々に、この場を借りて厚く御礼申し上げます。

