

## 不均質材強度力学の構築に向けた鋼及び溶接部の微視的不均質の評価

大阪大学・工・生産科学専攻 豊田政男, 望月正人, 大畑 充

### 1. はじめに

材料や構造部に不可避免的に存在する種々の不均質性の制御は、材料・構造の性能そのものを制御することに他ならない。そのためには、巨視的・微視的な不均質の存在が、材料・構造に及ぼす影響を把握することは重要であり、しばしば性能を低下させる原因となる不均質の積極的な制御は構造や材料の性能の向上と新しい構造設計や構造材料の創成にもつながる。

このような観点から、本プロジェクトにおける研究では、材料の結晶粒オーダーのメソスコピックな不均質から、鋼構造溶接部のマクロ的な不均質までの材料・構造の持つ不均質性を力学的に取り扱う「不均質材強度力学」の工学的体系化と、構造の加工過程でもたらされる不均質性の評価シミュレーション手法を明確にすることを目的として、そのための評価指標の明確化とシミュレーション手法の確立を目指すとともに、それを用いて構造破壊性能を向上させる新しい制御方法の提案、及びそれが活きるための構造化加工などの生産のあり方についての基本コンセプトを提示することを予定している。

本報告では、不均質材強度力学体系構築を目指す本研究テーマの内、まず、基本的な観点から、

- 1) 材料の結晶粒オーダーでの強度的不均質の材料の変形・破壊発生挙動への影響評価、及び、
  - 2) 熱加工の代表例で、非定常現象である溶接現象を取り上げ、溶接熱影響がもたらす材料の組織分布評価のための相変態・組織変化を考慮した温度場・応力場・相変態連成解析の開発、
- の2つに限定して報告する。

### 2. 不均質材強度力学の構築の必要性と効果

「材料を活かす」、「材料が活きる」ためには、材料と構造化が結びついていなければならない。構造化には、「設計」と「施工」、更には造るあるいは造られた構造の「管理・保守」がある。構造が創られるということは、これらの要因が密接に連携してなされなければならない。そのためにも、図1

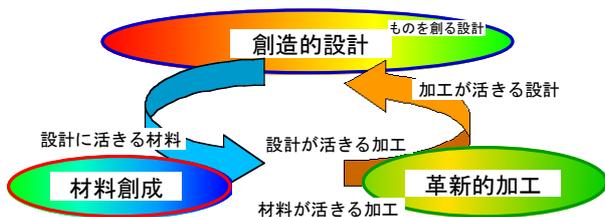


図1 モノづくりの創造サイクル

に例示するような「創造サイクル」を有機的に回すことが重要で、それによって相乗的・波及的展開への道筋が示されよう。しかし、この創造サイクルそのものが創造的な成果を挙げるためには、連携の手段が必要である。

本研究は、このような観点からの材料と構造化の連携的取り扱い（ここでは、一つの分野の評価が、他の分野の評価につながる現象を「Transferability」と定義する。図2参照。）を目指すもので、特に、対象材料として構造用鋼材を取り上げ、その延性・脆性き裂発生特性についての微視的観察に基づいて、数値解析に用いる設定条件の物理的意義を明確にした練成解析手法を開発すると共に、溶接鋼構造物の熱加工過程で生じる材料の局部的変化を取り入れた応力・歪場の数値解析が行える練成解析手法を開発し、将来的には、マクロからマイクロまで、すなわち材料から構造まで一括して一連のシステムで評価できるシステムの構築によって構造・生産設計への活用につなげる。

その検討の具体的成果としては、

- ・鋼材開発と構造設計との結びつきによる鋼材開発方向のフラクタイル化
- ・組織制御による構造性能改善への多相制御技術のフラクタイル化
- ・熱加工過程の相変態を考慮したシミュレーションの開発による組織制御加工プロセスの開発
- ・任意熱サイクル付加鋼材特性制御技術の開発による生産設計の合目的的化

などの、加工性と構造特性を考えた材料設計手法への展開、あるいは、材料特性を活かす熱加工条件の決定、材料の特性を知った構造のあり方などの設計への展開など、この研究を通じての教育によって統合的エンジニアの育成が計られることが期待される。

### 3. 二相組織鋼の破壊挙動

本報告では、まず、図2に示した Transferability 問題の流れの内、材料側で材料の組織設計の視点から、材料の強度・破壊特性が材料の微視的不均質によってどのような影響を受けるかについて、強度の異なる二相からなる鉄鋼材料を取り上げ、金属組織の morphology と劈開・延性き裂の発生限界の関係についての基本について述べる。

#### 3-1 実験・解析手法とその特徴

材料の微視的不均質の強度・破壊挙動への影響を考察するために、本研究では、硬い相と柔らかい相の2つの相からなる二相組織鋼材を取り上げ、実験対象材として、

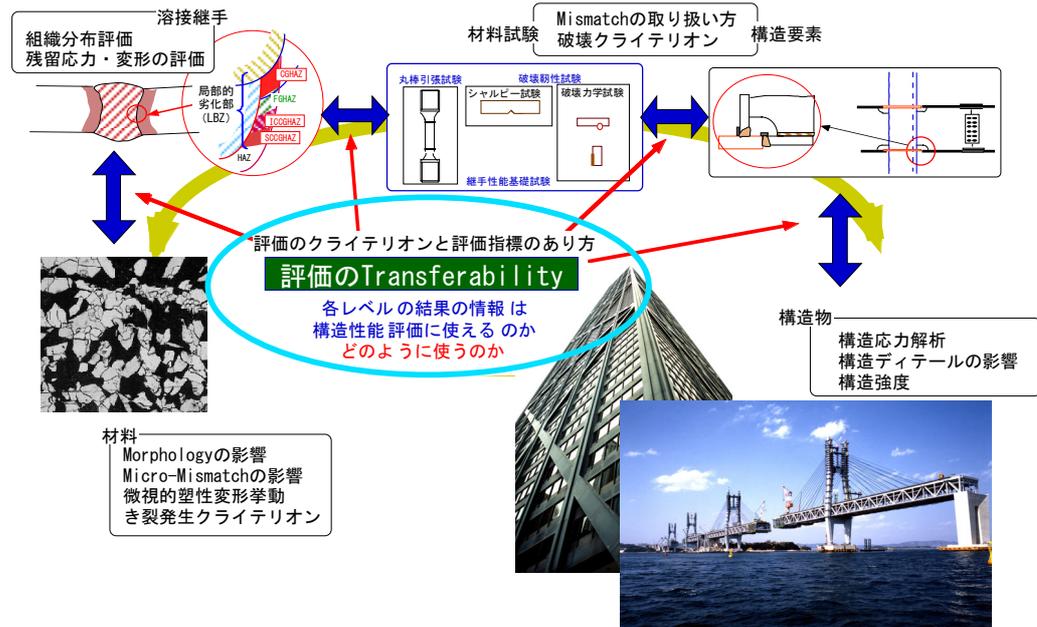


図2 材料から構造までの評価における Transferability

- 1) フェライト・ペーナイト二相鋼で、各相の強度レベルを揃えてベイナイト分率を変化させたのも、及び
- 2) フェライト・マルテンサイト二相鋼でマトリックスを入れ替えたもの、

の2つの鋼材を化学組成及び圧延条件（熱加工条件）を変化させて、目的にかなった組織のものを意図的に作成した。

これらの微視的不均質を持つ鋼材を用いて、引張試験及び破壊靱性試験を行い、強度特性及び微視的なき裂の発生が、組織形態によってどのような影響を受けるかを、破壊試験及び負荷途中での除荷試験によって詳細に観察した。これらの実験に用いた鋼材は、極端な不均質を実現したモデル材料であり、特に、微視的な強度の不均質が、脆性及び延性き裂の発生に及ぼす影響を典型的な例として把握できるようにしたところが特徴である。

更に、微視的強度の不均質が存在するときの、不均質形態（第二相の形状・分率）及び二相の強度差の微視的変形特性への影響を知る目的から、有限要素法を用いた変形解析も実施してある。

### 3-2 フェライト・マルテンサイト二相組織鋼の

#### 劈開き裂発生挙動

#### (1) フェライト・マルテンサイト二相組織鋼の作製と機械的特性

微視的な不均質形態がき裂の発生および伝ば挙動に及ぼす影響について検討するため、それぞれの相の特性は等しいままで組織体積率のみが異なる二種類のフェライトーマルテンサイト二相組織鋼を作製することを試みた。実験に用いた鋼材の化学組成を表1に示す。この鋼板に図3に示すように二相域焼入れ温度をわずかに変化させた熱処理を施し、フェライトおよびマルテンサイトのそれぞれの組織の結晶粒径や硬

表1 供試材の化学組成

| C    | Si   | Mn   | P     | S     | V     | C <sub>eq</sub> |
|------|------|------|-------|-------|-------|-----------------|
| 0.14 | 0.25 | 1.38 | 0.015 | 0.004 | 0.055 | 0.38            |

$$C_{eq} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{(Cu+Ni)}{15} + \frac{(Cr+Mo+V)}{5}$$

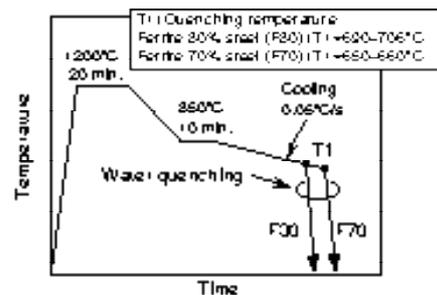
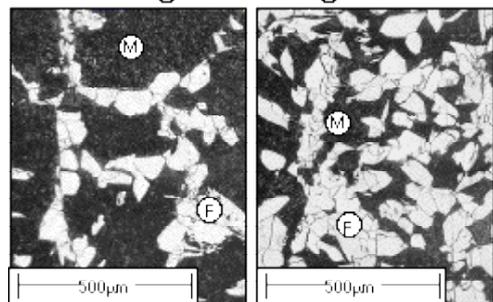


図3 二相鋼作成のための熱処理条件

(F): Ferrite phase (M): Martensite phase



(a) Ferrite 30% steel (b) Ferrite 70% steel

図4 供試二相鋼の組織写真

さなどの材質特性をほぼ等しくした状態で、体積分率のみが変化するように意図することによって、二種類の二相組織鋼を作製した。以下、ポイントカウント法による体積分率の測定結果を参考に、フェライト体積率30%を目標として焼入れた鋼材をフェライト30%鋼、フェライト体積率70%を目標とした鋼材をフェライト70%鋼と呼ぶことにする。

作製したフェライト30%鋼とフェライト70%鋼の組織例を図4に示す。写真において白く見えるのがフェライト相で、黒く見えるのがマルテンサイト相である。フェライト70%鋼の方がフェライト相が多く存在し、図3に示す熱処理により、異なる体積率を有するフェライトーマルテンサイト二相

鋼が作製できていることがわかる。フェライト 30%鋼ではマルテンサイト相に挟まれている、もしくは囲まれているフェライト相が多く存在している。一方、フェライト 70%鋼では多数の結晶粒が集まり、全体的に大きなフェライト相が形成されている。また、結晶粒径はフェライト 30%鋼、フェライト 70%鋼ともに数 10~100 μm 程度で、一般的な鉄鋼材料の結晶粒径よりかなり大きな値を示している。

両者の鋼材で各相の硬さを測定したが、いずれの材料でもそれぞれの相の硬さのばらつき範囲はほぼ等しい異なる体積率を有する二種類の二相組織鋼を作製することが確認されている。

**(2) 劈開き裂の発生および伝ば挙動**

供試材の各鋼板の板厚中央部から採取した三点曲げ CTOD 試験片（試験片厚さ B=10 mm, 試験片幅 W=20 mm, 切欠き長さが a<sub>0</sub>=10 mm (a<sub>0</sub>/W=0.5)）を用いて CTOD 試験を実施し、最終破断に至るまで負荷段階の幾つかのレベルで除荷を行って、試験片板厚中央断面を中心としてき裂先端での劈開き裂発生挙動の観察を行った。

観察の一例（フェライト 70%鋼）を図 5 に示す。劈開き微視き裂は必ずしも荷重垂直方向に開口してはならず、また、疲労予き裂先端近傍のみならず、少し離れた位置にも独立したき裂が発生している様子がうかがえる。ほとんどのき裂は疲労予き裂先端から 0.3mm 以内に発生していたが、特にフェライト 30%鋼については予き裂先端からかなり離れた位置にまで劈開き裂の芽が観察された。これは、強度の高いマルテンサイト相が多く存在すると、塑性拘束の影響が相乗することによって遠方まで高応力域が分布するためである

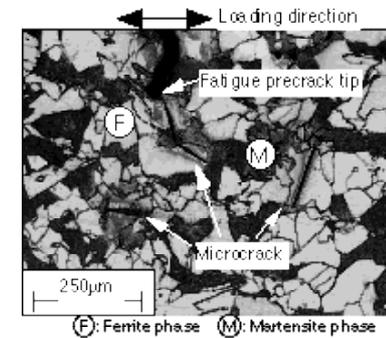


図 5 フェライト 70% 鋼におけるき裂先端近傍の劈開き裂発生状況の例

にフェライト 30%鋼については予き裂先端からかなり離れた位置にまで劈開き裂の芽が観察された。これは、強度の高いマルテンサイト相が多く存在すると、塑性拘束の影響が相乗することによって遠方まで高応力域が分布するためである

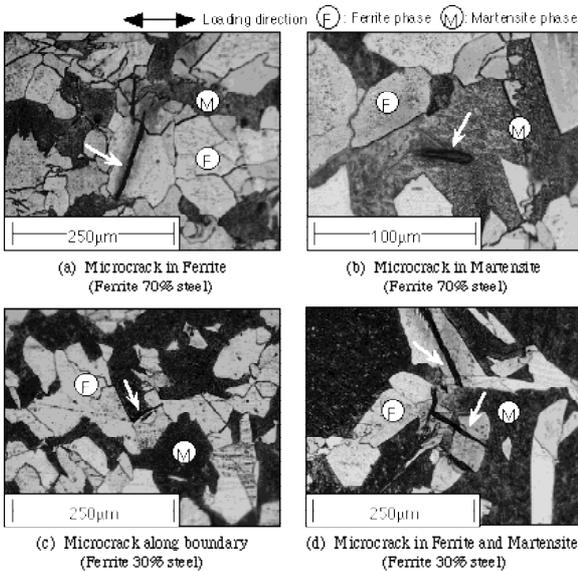


図 6 劈開き裂発生箇所の 4 つのタイプの例

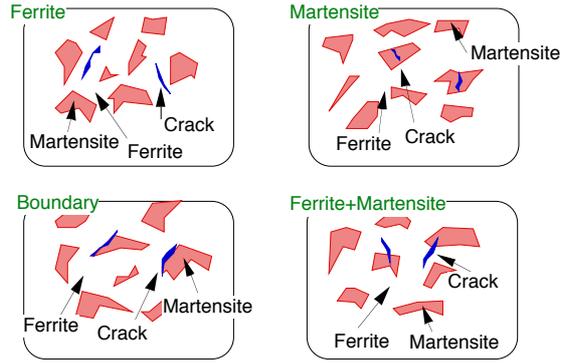


図 7 二相鋼の劈開き裂発生位置の模式図

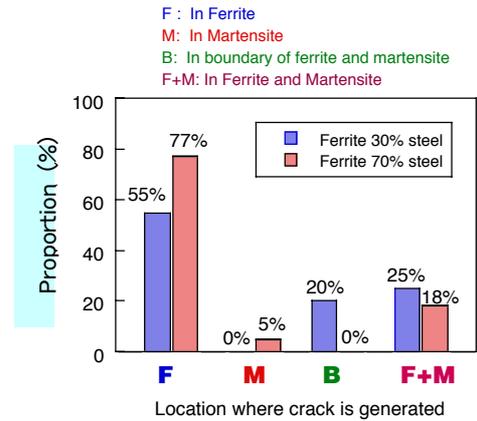


図 8 劈開き裂発生位置の割合

と考えられる。

次に、劈開き裂の発生位置を二相の不均質形態と関連させて整理すると、フェライト相内 (Ferrite)、マルテンサイト相内 (Martensite)、二相の界面 (Boundary)、二相にまたがっている状態 (Ferrite + Martensite) の四種類に分類することができた。図 6 にそれぞれのき裂の観察例を、また、き裂の発生形態を模式化した図を図 7 に示す。ここで、二相にまたがっている状態は、いずれかの相で発生したき裂がある程度進展した状態と解釈することができる。各位置におけるき裂発生の割合を図 8 に示す。フェライト 30%鋼、フェライト 70%鋼ともに、多くの劈開き裂はフェライト相内に発生していることがわかる。フェライト 30%鋼ではフェライト相内での発生確率が 55%以上となり、この値はフェライトの体積率 30%を超えている。また、フェライト 70%鋼ではフェライト相内のみならず一部のき裂はマルテンサイト相内などにも発生しているが、これらのき裂の発生は体積率に依存する単なる確率的問題だけでなく、二相の分布形態によってもたらされる微視的不均質の影響を受けていると考える。

次に、き裂の発生位置周辺の組織の不均質形態に注目して、き裂発生に及ぼす不均質形態の影響について検討した結果を図 9 示す。不均質形態として、マルテンサイト相がフェライト相を挟んだ形態 (Type A)、逆にフェライト相がマルテンサイト相を挟んだ形態 (Type B)、単独で大きなフェライト相もしくはマルテンサイト相が存在する形態 (Type C) の三タイプに分類した。この図から、フェライト 30%鋼ではマルテンサイトに挟まれたフェライト相内でのき裂が多く発生している (Type A) のに対し、フェライト 70%鋼ではそれに合わせて単独の大きなフェライト相の内部から発生しているき

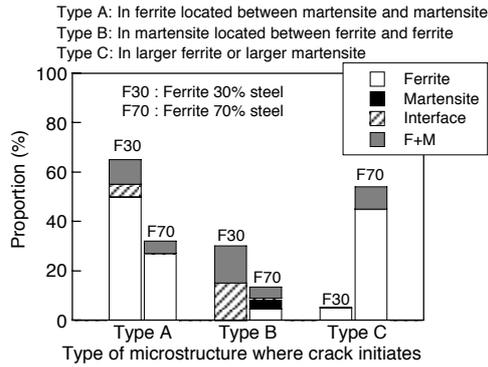


図9 不均質形態に注目した劈開き裂発生位置の分類

裂 (Type C) が多くなっていることがわかる。このような差は、フェライト相とマルテンサイト相の不均質な分布形態の違いによる応力・ひずみ分布が異なることによってもたらされていると考えられる。このことは、微小き裂の発生に及ぼす影響因子としては、二相の体積分率だけでなく、微小き裂の発生領域となる疲労予き裂先端近傍の不均質形態の違いがもたらす応力・ひずみ分布などの力学的要因を検討する必要があることが理解できる。

一方、き裂の伝播挙動について観察した一例をフェライト 30%鋼、フェライト 70%鋼それぞれについて図 10 に示す。疲労予き裂は微視的組織に関係なく直線的に進展しているのに対し、三点曲げ試験によるき裂は一部マルテンサイト相を貫通している箇所があるものの、大部分はフェライト相に沿うように伝播していることがわかる。また、伝播様式は劈開型と、延性破壊であるボイド連結型あるいは剪断型の三種類に分類でき、これらが混在してき裂が進展していることが観察された。伝播したき裂の周囲には独立した微小き裂はほとんど観察されなかったことから、初期に発生した微小き裂が連結するような形態でき裂の伝播が進行していると考えられる。また、破面観察結果などから、フェライト相内のき裂は、粒内で発生、進展している場合が多いと考えられる。一方、今回の観察結果からはき裂の伝播挙動に不均質形態の及ぼす有意な影響は見受けられなかった。

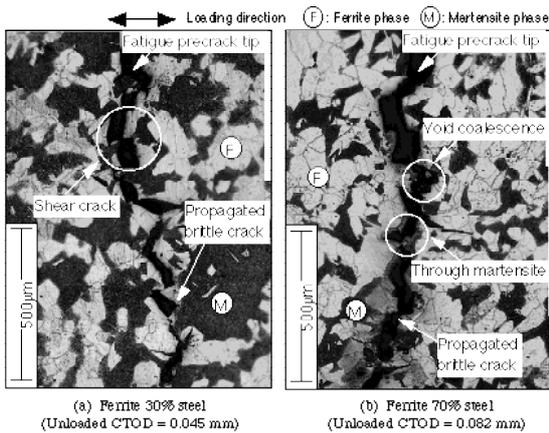


図 10 き裂の伝播経路と組織

このような観察結果からも、き裂発生挙動はミクロ的な不均質の影響、更にはその分布形態などの morphology の影響を受けるため、微視的強度不均質の局部的変形挙動への影響について明らかにすることが重要である。

### 3-2 フェライト・ベイナイト二相組織鋼の延性き裂発生挙動

#### (1) フェライト・ベイナイト二相組織鋼の製作とその特性

結晶粒オーダーで強度的不均質をもつ鋼材の延性き裂発生挙動を把握する目的から、フェライトとベイナイトの二相組織をもち、それぞれの組織の強度特性がほぼ同じで、ベイナイト分率を変えた鋼材を、組成と圧延条件を変えて作成した。

それぞれのベイナイト分率とするために用いた鋼材の化学組成を表 2 に、その機械的性質を表 3 に示す。

表 2 ベイナイト分率を変化させたフェライト・ベイナイト鋼を作成した各鋼材の化学組成

|      | Steel No. | C     | Si   | Mn   | P     | S      | Nb    | V     | sol.Al | N      | O      | Ceq  | Ar3(°C) |
|------|-----------|-------|------|------|-------|--------|-------|-------|--------|--------|--------|------|---------|
| F100 | 1         | 0.011 | 0.29 | 1.5  | 0.017 | 0.002  | 0.04  | 0.048 | 0.034  | 0.0022 | 0.0019 | 0.27 | 787     |
|      | 2         | 0.012 | 0.3  | 1.54 | 0.013 | 0.0017 | 0.04  | 0.048 | 0.038  | 0.0032 | 0.0015 | 0.28 | 783     |
| F15B | 1         | 0.038 | 0.29 | 1.5  | 0.015 | 0.004  | 0.039 | 0.045 | 0.028  | 0.0038 | 0.0014 | 0.3  | 778     |
|      | 2         | 0.038 | 0.29 | 1.53 | 0.012 | 0.0014 | 0.041 | 0.048 | 0.028  | 0.003  | 0.0021 | 0.3  | 776     |
| F30B | 1         | 0.082 | 0.28 | 1.49 | 0.014 | 0.003  | 0.039 | 0.046 | 0.027  | 0.0033 | 0.0015 | 0.34 | 765     |
|      | 2         | 0.083 | 0.29 | 1.53 | 0.011 | 0.0013 | 0.04  | 0.047 | 0.027  | 0.0031 | 0.0015 | 0.35 | 762     |
| F50B | 1         | 0.123 | 0.28 | 1.5  | 0.015 | 0.003  | 0.039 | 0.046 | 0.027  | 0.0033 | 0.0012 | 0.38 | 752     |
|      | 2         | 0.124 | 0.29 | 1.53 | 0.011 | 0.0009 | 0.04  | 0.047 | 0.032  | 0.0032 | 0.0018 | 0.39 | 749     |
| 100B | 1         | 0.207 | 0.28 | 1.48 | 0.015 | 0.003  | 0.038 | 0.046 | 0.028  | 0.0032 | 0.0013 | 0.46 | 727     |
|      | 2         | 0.255 | 0.29 | 1.52 | 0.012 | 0.0007 | 0.039 | 0.047 | 0.033  | 0.0033 | 0.0014 | 0.52 | 709     |

表 3 各種フェライト・ベイナイト鋼の機械的性質

|      | Steel No. | Direction | YS (MPa) | TS (MPa) | YR (%) | EL (%) | RA (%) | Bainite fraction (%) |
|------|-----------|-----------|----------|----------|--------|--------|--------|----------------------|
| F100 | 1         | L         | 461      | 520      | 88.7   | 30     | 86.5   | 0                    |
|      |           | C         | 493      | 547      | 90.2   | 25.4   | 84.6   |                      |
|      | 2         | L         | 473      | 534      | 88.7   | 30.8   | 87.2   | 4.1                  |
|      |           | C         | 449      | 518      | 86.8   | 33.8   | 87.9   |                      |
| F15B | 1         | L         | 456      | 601      | 75.9   | 27.7   | 76.7   | 13.6                 |
|      |           | C         | 427      | 594      | 71.9   | 33.4   | 78.6   |                      |
|      | 2         | L         | 464      | 606      | 76.5   | 28.4   | 77.6   | 13.1                 |
|      |           | C         | 435      | 596      | 73     | 32.3   | 79.8   |                      |
| F30B | 1         | L         | 473      | 740      | 63.9   | 22.3   | 72.1   | 30.6                 |
|      |           | C         | 498      | 736      | 67.7   | 25.4   | 71.5   |                      |
|      | 2         | L         | 489      | 762      | 64.2   | 22.7   | 70.6   | 36.1                 |
|      |           | C         | 464      | 747      | 62.1   | 25.5   | 65.5   |                      |
| F50B | 1         | L         | 532      | 870      | 61.1   | 23.8   | 69.7   | 49.4                 |
|      |           | C         | 590      | 821      | 71.9   | 18.4   | 71.6   |                      |
|      | 2         | L         | 548      | 794      | 69.1   | 21.3   | 78.6   | 55.4                 |
|      |           | C         | 587      | 782      | 75     | 21.5   | 74.7   |                      |
| 100B | 1         | L         | 764      | 1028     | 74.3   | 16     | 69.9   | 100                  |
|      |           | C         | 799      | 1033     | 77.3   | 13.8   | 58.5   |                      |
|      | 2         | L         | 864      | 1058     | 81.7   | 18     | 68.2   | 100                  |
|      |           | C         | 880      | 1062     | 82.9   | 13.8   | 54.9   |                      |

#### (2) 延性き裂発生限界とベイナイト分率

前述のベイナイト分率が異なる鋼材を用いて平滑材及び円周切欠き (切欠き半径  $R=1$  ないし  $2\text{mm}$ ) を持つ試験片を作成し、その引張試験を実施した。更に、延性き裂に至るボイドの発生挙動を観察するために、破断直前で除荷して、試験片内部のボイドの発生挙動についての観察も行った。

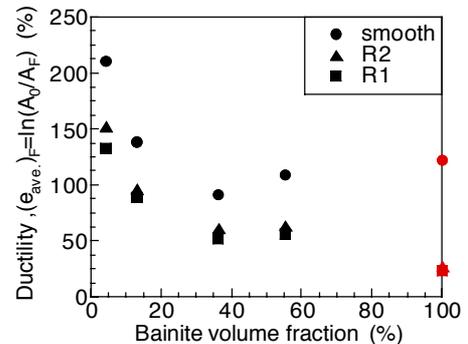
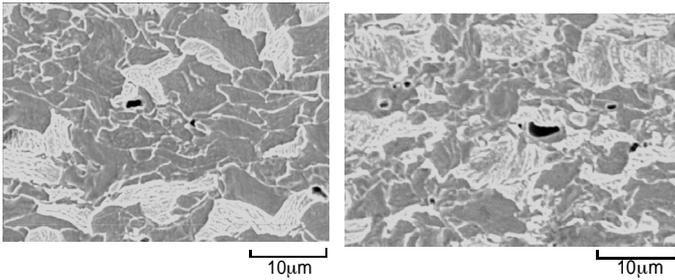


図 11 破断延性とベイナイト分率の関係



(a) バイナイト分率 30%鋼 (b) バイナイト分率 50%鋼

図 12 破断直前の状態におけるボイド発生状況

図 11 に、平滑材及び 2 種類の円周切欠き付き試験片の引張破断延性に及ぼすバイナイト分率の影響を示してある。バイナイトが少し加わると延性は大きく低下するが、30%以上になると破断延性はほとんど変化していない。一般に荷重・伸び曲線で破断直前で屈曲点が現れるが、その屈曲点での延性き裂発生点（この場合試験片中央部）での延性き裂発生限界歪も同じような傾向を示している。

### (3) フェライト・ベイナイト鋼におけるボイド発生挙動

図 12 に、破断直前で除荷した試験片でのボイドの発生状況の観察例を示してある。破断直前まで、ボイドの数はほとんど増えず、破断の極直前で微小なボイドが急速に発生して延性き裂に至ることが分かる。

図 13 は、図 12 のような観察結果を基にボイドの発生位置をバイナイト分率別に模式的に示したものである。図に示すように、ボイドの発生位置は、ほとんどがフェライト・ベイナイト境界、あるいはフェライト結晶粒界のいずれかであり、その発生位置の分率がバイナイト分率に応じて異なっている。図 14 にその割合をバイナイト分率ごとに示してあるが、図

- : Larger void nucleated due to MnS-inclusion at low applied plastic strain level
- : Micro-void nucleated after a latest plastic straining for ductile cracking

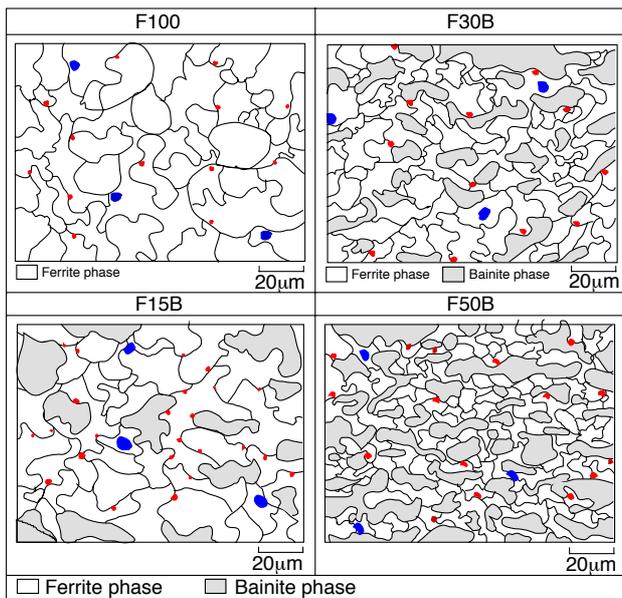


図 13 バイナイト分率が異なる二相組織鋼におけるボイド発生位置の観察に基づく組織図

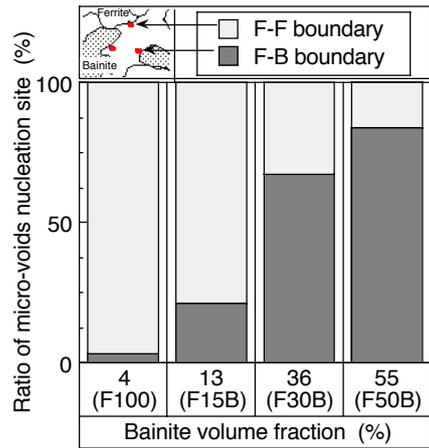


図 14 ボイド発生サイトに及ぼすバイナイト分率の影響

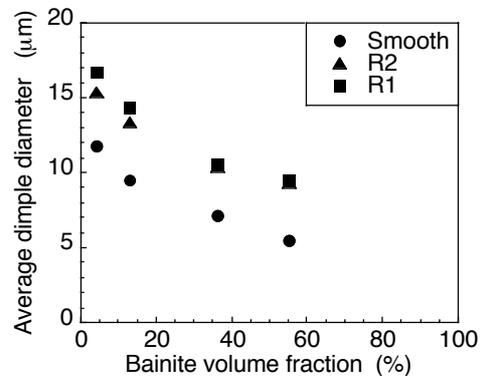


図 15 破面の平均ディンプル径に及ぼすバイナイト分率の影響

に示すように、バイナイト分率が多くなるほどフェライト・ベイナイトと境界でのボイドの発生割合が大きくなり、高強度（硬さ比でフェライトの 2 倍）のベイナイトが含まれてくると、高強度部分で転位の集積などが生じやすくなり、ボイドの発生サイトとなると共に、ボイドが発生しやすくなって延性の低下をもたらすことが分かる。この現象は、破面におけるディンプル径にも現れ、バイナイト分率が大きくなると、ボイド発生サイトが多くなることによって、ディンプル径の小さくなっていることが分かる。

このように、結晶レベルでの強度的不均質の存在は、材料の破壊挙動に影響を及ぼし、破壊性能の向上や構造破壊性能を評価するためにも、この不均質性の変形挙動への影響が評価できることと破壊は性のクライテリオンが明確化が重要である。

### 3-3 二相組織鋼のき裂発生に及ぼす微視的不均質形態の影響に関する解析的検討

#### (1) 解析方法：三点曲げ試験片モデルと微視的モデル

体積分率の異なるフェライト・マルテンサイト二相組織鋼のき裂の発生に及ぼす微視的不均質形態の影響について検討するために、三点曲げ試験片の疲労予き裂先端近傍における応力状態を境界条件とした微視的モデルの応力解析を行った。そのプロセスは、図 16 に示すように、まず、実際の三点曲げ試験片における疲労予き裂先端近傍での多軸応力状態

を大変形弾塑性有限要素解析により求め、得られた微小き裂の発生領域での応力状態を境界条件として二相の不均質形態を考慮した微視的モデルを用いて解析を行った。

ここで対象としている図5に示したフェライト・マルテンサイト二相組織鋼の不均質性

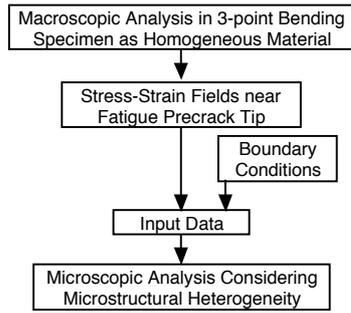


図16 解析プロセス

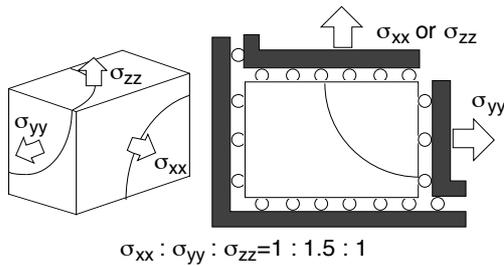


図18 境界条件

をモデル化して解析を行い、図17に基本的な微視的モデルを示す。このような微視的モデルを用いて3点曲げCTOD試験片のき裂先端近傍の応力条件を境界条件とする図18のような条件で解析した。

上記の解析結果を基に3.1でのフェライト・マルテンサイ

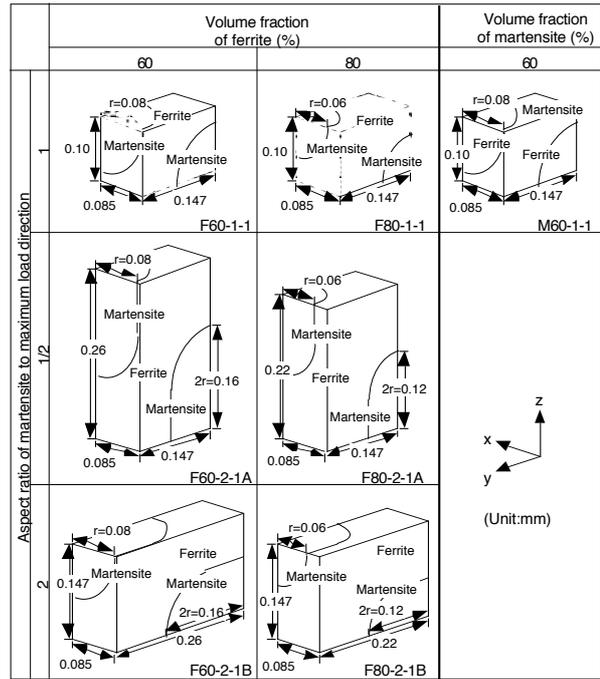
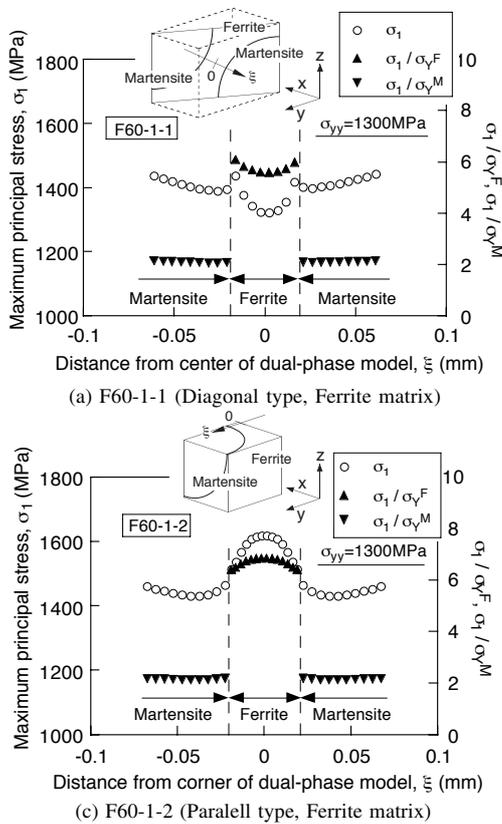


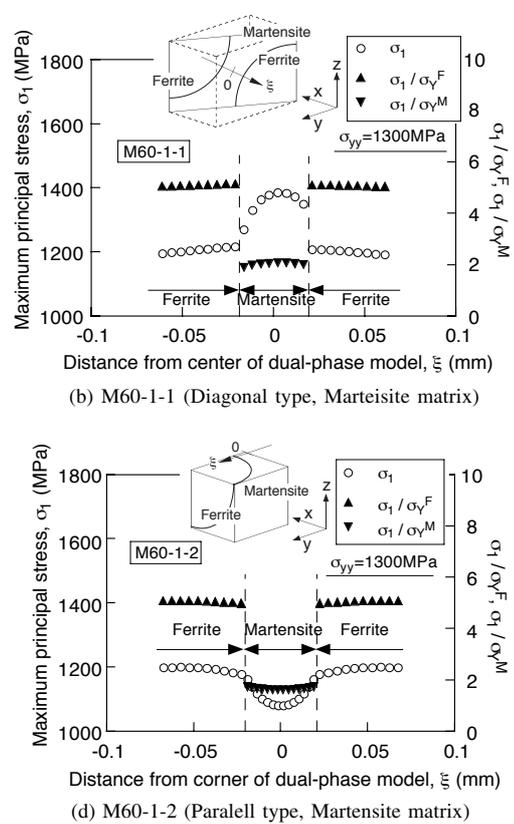
図17 微視的不均質を持つモデルの例 (Diagonal配置の場合)

ト二相鋼の劈開き裂発生に関する実験結果の説明、更には他の因子の影響について把握可能かどうかについて、すなわち、材料から性能評価へのTransferabilityについて以下に検討している。次にその考察の一例を示す。



(a) F60-1-1 (Diagonal type, Ferrite matrix)

(c) F60-1-2 (Parallel type, Ferrite matrix)



(b) M60-1-1 (Diagonal type, Martensite matrix)

(d) M60-1-2 (Parallel type, Martensite matrix)

図19 フェライト・マルテンサイト各相の最大守応力分布に及ぼす不均質形態の影響

## (2) き裂発生相に関する考察への解析の活用

3.1 の実験結果で、劈開き裂がフェライト相に集中して発生していたことを検討するため、四種類の微視的モデルを用いた解析結果を比較する。用いたモデルは図 17 中に示す F60-1-1, M60-1-1, F60-1-2, M60-1-2 で、母地となっている材料、第二相の最大負荷方向に対する分布形態が異なる。なお、き裂の発生は劈開き裂であったため、ここでは最大主応力 $\sigma_1$ を用いて整理した。図 19 に、マクロモデルにおけるき裂発生時に相当する最大負荷方向の応力 $\sigma_{yy} = 1300$  MPa 時の各モデルにおける球体の第二相の中心点を結ぶ線、x 線上での最大主応力 $\sigma_1$ 、ならびにそれを各相の降伏応力で除して無次元化した値 $\sigma_1^F/\sigma_Y^F$ 、 $\sigma_1^M/\sigma_Y^M$ を示す。母地がフェライト相である F60-1-1, F60-1-2 はマルテンサイト相が母地である M60-1-1, M60-1-2 に比べて各相の応力が高くなっている。これは、等しい負荷応力レベルでは母材がフェライト相のモデルの方が変形量が大きく、ひずみが大きくなったことに起因する応力上昇と考えられる。また、母材がフェライト相でマルテンサイト相の分布が最大負荷方向に対し平行になると、フェライト相の応力はさらに高くなる。ここで、フェライト相のき裂発生について考えると、二相の強度が異なるため、応力値そのものによる比較はできない。そこで、応力を各相の降伏応力で除して無次元化した値で比較すると、どのモデルにおいてもフェライト相内の応力の方がマルテンサイト相の数倍程度の値を示している。すなわち、各相の強度レベルからみた応力の負担量はフェライト相の方が格段に大きいといえる。どのような不均質形態に対しても降伏応力に対する応力分布の比がマルテンサイト相に比べて明らかに大きいフェライト相で微小き裂が優先的に発生したと考えられる。

本解析はモデル化されたものであるが、適切なモデル化と評価指標の活用が、材料開発手段として有効になることを示している。

## 4. 溶接熱履歴とそれによってもたらされる組織分布の解析手法の開発

図 2 に示した Transferability の充実には、構造部位の材料特性を評価できることが重要である。特に、鉄鋼などの金属系構造物材料の接合には溶接プロセスが用いられる場合が多いが、溶接による局所的な入熱によって温度、マイクロ組織、応力・ひずみは不均質形態をともなう複雑な挙動を示し、構造物の性能に大きく影響を及ぼす。そこで、溶接熱履歴に基づく不均質塑性挙動を評価するため、材料の多重熱履歴による組織変化(変態挙動)を取り入れた解析手法を開発し、溶接部に存在する材料不均質変化の定量的把握を、温度場・組織場・応力場の観点から試み、Transferable な評価シミュレーション完成への基礎的検討の方向について解説し、更に結果の代表例について示す。

### 4.1 相変態・組織変化を考慮した温度場・組織場・応力場の連成解析

材料が熱的プロセスを受けるとき、温度場、組織場、応力場はそれぞれ独立には存在せず、互いに連成し合うことによって影響を及ぼす。すなわち、図 20 に示すように、まず温度場が変化すると熱応力が応力場の変化をもたらす。生じた応力は仕事をしますが、その一部は熱となって温度場を攪乱する。また、温度変化は相変態による組織の変化をもたらすが、その結果として潜熱が発生する。さらに相変化が生じることによって比体積が変化するため、ひずみや変態応力が発生し、

その反対として応力の存在が変態挙動に影響を及ぼす。

これらの関係を連続体力学の範疇でモデル化し、数値シミュレーションを可能にするため、マイクロ組織が混在している状態における物性は、各組織の物性と体積分率による混合則によって表現できるとした。これにより、材料の力学状態を決定する応力-ひずみ関係(構成式)、温度場を決める熱伝導方程式、組織変化の速度式を連成させた解析を行うことができる。

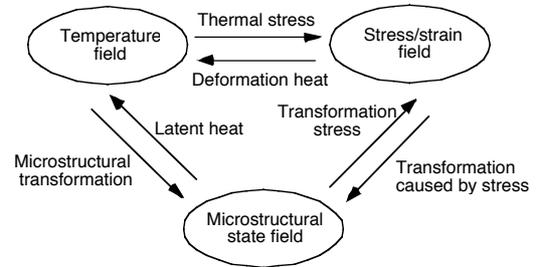


図 20 温度・組織・応力/歪場の練成

### 4.2 相変態の取り扱い方

溶接中に発生する相変態を数値シミュレーションで表現するため、Johnson-Mehl-Avrami 則や Koistinen-Marburger 則を拡張した非等温変態型の反応速度式を用いることによって、非定常過渡現象である溶接や熱処理時のマイクロ組織の変態挙動を求められるようにした。一例として、フェライト・パーライトがオーステナイトに変態する際の加熱速度と相分率の変化挙動の関係を模式的に図 21 に示す。このような形で加熱(冷却)速度に応じた反応速度式を与えることによって、溶接などの熱加工プロセス中における温度場・応力場・相変態連成解析が可能になる。

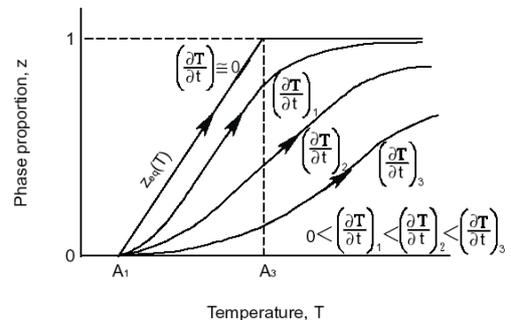


図 21 相変態に伴う加熱速度と相分率の変化挙動の関係

### 4.3 溶接継手部の組織変化のシミュレーション解析例

温度場・組織場・応力場の連成解析の具体例として、建築鉄骨構造物の柱梁仕口接合部を対象として入熱量やバス間温度に代表される溶接条件、特に溶接積層法により強度や靱性などの機械的性質がどのように変化するかについてシミュレーションできることを実証した結果について示す。

#### 4.3.1 対象試験体および解析方法

数値解析の対象形状としては、図 22 に示すように建築鉄骨の柱梁仕口接合部の梁フランジ溶接部を簡略化した突合せ溶接継手とした。構成材料となる 490MPa 級鋼の連続冷却変態図を、図 23 に示すようにフェライト、ベイナイト、マルテンサイト、オーステナイトの 4 相で表現し、各冷却速度におけるそれぞれの相分率を考慮することによって、解析モデルの各位置・各時刻における相分率と混合則による物性を

用いて計算を進めた。また、得られた溶接プロセス中における各相の相分率から、化学組成と 700℃における冷却速度をパラメータとする実験式により各相におけるビッカース硬さの推定を行った。さらに、各位置での温度履歴・組織履歴を用いて応力場の大変形弾塑性解析を行い、溶接継手の残留変形を評価した。

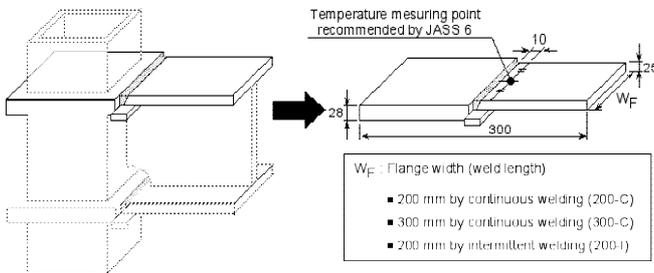


図 22 解析の対象とした柱梁仕口部溶接継手

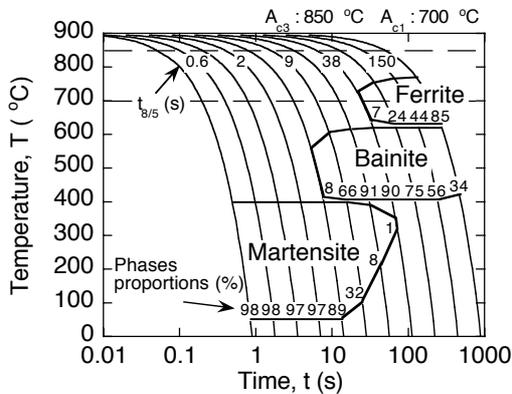


図 23 解析に用いた材料の CCT 図

#### 4.3.2 解析対象とした溶接パスの積層方法

溶接パスの積層方法については、実際の建築鉄骨柱・梁接合部の溶接条件を参考にしつつ、系統的な整理ができるように決定した。すなわち、

- (i) 一方向連続溶接：パス間温度に関係なく、連続して一方向に積層する場合
- (ii) 折り返し連続溶接：建築鉄骨溶接において一部で採用されている溶接として、パス間温度に関係なく、梁端部で折り返して連続的に積層する場合
- (iii) 管理溶接：日本建築学会鉄骨工事技術指針 (JASS 6) の推奨条件を遵守し、フランジ中央の開先端部から 10 mm の位置におけるパス間温度が 350℃になるように管理して一方向に積層溶接した場合

#### 4.3.3 ミクロ組織分布に及ぼす積層手順の影響

それぞれの積層手順による解析を行って得られた組織分布の一例として、折り返し連続溶接タイプおよびパス間温度管理溶接タイプの溶接終了後におけるベイナイト組織分率を図 24 に示す。溶接線方向中央部での断面について示している。この図から、溶接金属部のベイナイト分率は、折り返し連続溶接タイプでは 70 % 程度であるのに対し、管理溶接タイプでは 90 % 以上となっている。これらの差は、積層手順の違いによって温度履歴やパス間温度が異なることに起因すると考えられる。すなわち、パス間温度の違いによって溶接部の入熱条件や冷却特性が異なり、その結果、溶接部や熱影

響部のミクロ組織、さらには硬さ、すなわち強度にも違いが生じてくると予想される。

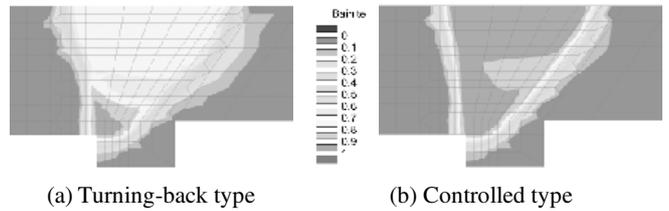


図 24 多層溶接部のベイナイト相分率の分布

#### 4.3.4 溶接金属の硬さに及ぼす積層手順の影響

溶接パスの積層手順を変化させた 3 種類の溶接タイプでビッカース硬さにどのような違いがあるかを最終層側について比較した結果を図 25 に示す。この図から、溶接条件の違いによってビッカース硬さに対応する強度差が生じていることがわかる。過度なパス間温度によって継手強度が低下している現象がシミュレートできているといえる。ここで、溶接金属部では最高加熱温度は溶接条件に関係がないため、冷却速度により溶接金属の組織や強度が決定される。

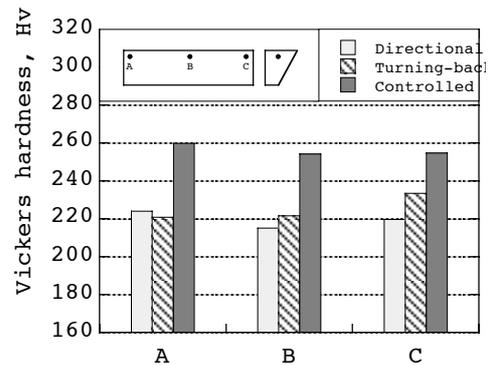


図 25 多層溶接継手の溶接金属硬さに及ぼす積層法の影響

#### 4.4 解析手法の適用性

上述の解析例のように、溶接熱影響がもたらす材料の組織分布評価のための相変態・組織変化を考慮した温度場・組織場・応力場の連成解析によって、構造物の溶接部における微視的不均質を考慮した強度力学体系の基本が構築できた。今後、解析手法のさらなる高度化と、それに基づいた継手強度や破壊性能の実験的検討から、組織分布を持つ継手部の性能向上のための施工条件のあり方を提示すると共に、鋼材そのものの性質にも還って、新しい溶接用鋼板や溶接材料の開発へつなげる。

#### 5. おわりに

本報では、本 COE プロジェクトでの分担課題である不均質材強度力学の構築に向けて基礎的な検討の幾つかを解説してある。材料から溶接鋼構造までの評価シミュレーション確立のためには、強度・破壊を決める現象の適切な把握とそのクライテリアの明確化と、解析手法の開発が不可欠であり、本報告に例示するような手法の更なる展開によって材料が活かされる構造・設計のための「不均質材強度力学」構築に向けた検討を続ける。

(文献省略)