



Mod. 9Cr-1Mo鋼溶接継手の強度評価法

— 第 1 報 疲労強度評価法 —

1992年2月

動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-cho, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken, 311-13, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation)

Mod. 9Cr-1Mo鋼溶接継手の強度評価法

— 第 1 報 疲労強度評価法 —

浅山 泰*, 長谷部 慎一*

一宮 正和*

要 旨

Mod. 9Cr-1Mo鋼は高速実証炉の蒸気発生器の最有力候補材料として実用化が進められており、その重要課題の一つとして溶接継手強度評価法の開発が行われている。本溶接継手は、溶接時の熱影響により母材軟化部（以下「熱影響部」という）が生じるため、同部の挙動・強度が溶接継手全体の強度に影響を及ぼす可能性がある。このため、熱影響部が軟化せず、同部が溶接継手の強度に及ぼす影響を考慮する必要のなかったSUS304溶接継手の強度評価法をそのまま適用することはできない。

本報告では、Mod. 9Cr-1Mo鋼溶接継手の疲労強度評価法を開発することを目的とし、同継手のひずみ集中のメカニズムを、母材、熱影響部、溶接金属の動的応力ひずみ関係及び疲労寿命のみに基づくモデルを用いて、FEM解析により解明し、疲労破損との対応を明らかにした。この結果、寿命初期においては熱影響部にひずみ集中が生じるが、繰返しひずみ負荷に伴い、母材が軟化するのに対し、熱影響部はほとんど軟化せず、半寿命付近で両者の硬さがほぼ等しくなると考えられるため、半寿命付近以降ではもはや熱影響部にはひずみ集中は生じず、母材においてひずみ集中が生じることが明らかになった。さらに、このひずみ集中挙動に基づき本鋼溶接継手の累積疲労損傷を評価すると、本解析を行った条件下ではすべての場合において熱影響部の疲労損傷は継手の中で最大とはならず、熱影響部で破損は生じないことが明らかとなった。疲労破損は弾性域近傍以上のひずみ範囲ではひずみ集中挙動に支配され母材で生じ、弾性域近傍以下のひずみ範囲では疲労強度に支配され溶接金属で生じる可能性があることが明らかとなった。この結果は、疲労試験結果と一致した。

本検討により、FEM解析に基づいて本溶接継手の疲労強度を評価することが可能であることが明らかとなった。この結果を応用することにより、実際の構造物の溶接継手の疲労強度も、FEM解析により合理的に評価できる。

* 機器構造開発部 材料開発室

Evaluation of Strength of Mod.9Cr-1Mo Weldments
- 1st Reprint: Evaluation of Fatigue Strength -

Tai Asayama*, Shinichi Hasebe*,
Masakazu Ichimiya*

Abstract

Mod.9Cr-1Mo steel is the material whose future utilization is expected as an advanced material of the steam generator of the Fast Breeder Reactors. A procedure for evaluation of weldment is being developed as one of the main concerns for the utilization of this material. The purpose of this report is to propose a fatigue strength evaluation method of Mod.9Cr-1Mo weldment which incorporates the effect of the heat affected zone which forms the softest portion of the weldment on the strength of the weldment.

The mechanisms of strain concentration in the weldments of Mod.9Cr-1Mo steel was analysed and fatigue fracture was evaluated in terms of strain concentration. It was shown that the maximum strain concentration occurred in the heat affected zone at the beginning of cyclic strain loading but that as a result of cyclic softening which was evident with the base metal but negligible with the heat affected zone the maximum strain concentration moved on to the base metal after half-life under the assumption that the hardness of the base metal and the heat affected zone coincide with each other at about half-life. Furthermore, based on this result, fatigue damage was evaluated. It was shown that the accumulated fatigue damage was not the maximum in the heat affected zone and that fatigue failure did not occur in the heat affected zone as far as the present analyses concerns. It was also made clear that fatigue failure occurs in the base metal due to the strain concentration at strain ranges higher than elastic region and that it occurs in the weld metal due to its inferior fatigue strength compared with the base metal.

As a result, it was clarified that the fatigue strength of Mod.9Cr-1Mo weldment is reasonably evaluated by FE-analysis, which observation is able to be applied to the analysis of structures with weldments to be evaluated.

* Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation

目 次

1. 緒 言	1
2. 解析条件	3
2.1 解析の目的	3
2.2 解析モデル	3
2.3 解析パラメータ	3
2.4 FEMモデル	4
3. 解析結果	5
3.1 ひずみ集中率の分布	5
3.2 ひずみ集中率の分布の繰り返しひずみ負荷による変化	6
3.2.1 繰り返しひずみ軟化を考慮する必要性	6
3.2.2 繰り返しひずみ軟化挙動のモデル化	6
3.2.3 繰り返しひずみ軟化を考慮したひずみ集中の評価	6
3.3 ひずみ集中の解析結果に基づく疲労損傷評価	7
3.3.1 疲労損傷評価の前提	7
3.3.2 疲労損傷評価の結果	8
3.4 2要素モデルによる評価	8
4. 評価モデルの試験結果による検証	9
4.1 評価モデル	9
4.2 評価対象	9
4.3 評価方法及び結果	9
4.4 簡易モデルによる評価	9
5. 考 察	11
6. 結 論	12
参考文献	13
謝 辞	14
付録 A-1 GLモデルによる解析と全体モデルによる解析	15

付録 A - 2	試験片内部におけるひずみ集中度の分布	16
付録 A - 3	相当ひずみの集中度の分布	17

List of Tables

Table 2.1	Condition of Analysis	18
Table 4.1	Fatigue Test Results of Mod.9Cr-1Mo Weldments	19
Table 4.2	Comparison of Fatigue Life Predicted by FEM Model and by Simplified Model	20

List of Figures

Figure 2.1	Example of Hardness Distribution	21
Figure 2.2	Dynamic Stress-Strain Curve of Weld Metal	22
Figure 2.3	Example of Mesh Division	23
Figure 3.1	Distribution of Strain Concentration	24
Figure 3.2	Hardness Distribution before and after Fatigue Test	37
Figure 3.3	Model of Cyclic Softening Behavior	38
Figure 3.4	Distribution of Strain Concentration Ratio at Various Portion of Fatigue Life	39
Figure 3.5	Fatigue Curves of Mod.9Cr-1Mo Base Metal and Weld Metal	40
Figure 3.6	Accumulation of Fatigue Damage	41
Figure 4.1	Estimation of Fatigue Life Based on the Method Proposed in this Report	42
Figure 4.2	Comparison of Fatigue Life Predicted by FEM Model and by Simplified Model	43
Figure 5.1	Dependence of Fracture Location on Strain Range	44
Figure A1.1	Mesh Division of Whole Specimen Model	45
Figure A1.2	Distribution of Strain Concentration Ratio Analysed by Whole Specimen Model	47
Figure A2.1	Distribution of Strain Concentration Ratio along the Center Axis of the Specimen	49
Figure A3.1	Distribution of Strain Concentration Ratio in terms of ASME Equivalent Strain Range	56

1. 緒 言

Mod. 9Cr-1Mo鋼は我が国の高速実証炉及び欧州のEFRの蒸気発生器の最有力候補材料である。しかし、蒸気発生器の設計上の鍵を握る同鋼溶接継手の強度評価法は未だ確立されていない〔1〕。そこで本報告では、本鋼溶接継手の疲労強度評価法を提案する。クリープ疲労強度評価法については続報で報告する予定である。

溶接継手の疲労強度評価法については、従来のSUS304溶接継手に関する研究により、母材と溶接金属の硬さ（動的応力ひずみ関係）の差に起因するひずみ集中を適切に評価することにより、疲労強度を妥当な精度で評価できることが明らかとされている。SUS304溶接継手の場合は、溶接時に生じる母材熱影響部（以後「熱影響部」という）が、母材一般部（以下「母材」という）に対して硬化するため、熱影響部は溶接継手の疲労強度の低下要因とはならず、ひずみ集中の評価に当たってもこれを考慮する必要がなかった。しかし、Mod. 9Cr-1Mo鋼溶接継手の場合は溶接金属が最も硬く、熱影響部が最も軟らかくなる。母材はこの中間の硬さである。このため、ひずみ集中の評価にあたっては、SUS304溶接継手の場合とは異なり、母材、熱影響部、溶接金属の3つの要素を考慮したモデル（以後3要素モデルという）を用いるべきであると考えられるが、実際には、わずか2～3mmに過ぎない熱影響部を省略した簡便なモデル（以後2要素モデルという）を用いて評価を行ってもよい可能性もあり、明確ではなく混乱状態にあるのが現状であった。これは以下の理由による。

一般に溶接継手のひずみ集中は、最軟部に発生する可能性が高く、疲労破壊も同部で生じると予想できる。本溶接継手の場合はその硬さ分布から考えて当然熱影響部にひずみが集中する可能性が高い。従って、硬さ分布を基準にすると、本溶接継手のひずみ集中及び疲労強度は、熱影響部を含めた3要素モデルを用いて評価する必要がある。

一方、疲労試験結果から、上述の硬さ分布にも係わらず疲労破壊はすべて母材で生じる（低ひずみ範囲では熱影響部に近づく傾向はある）ことが経験的に知られている。この結果から、理論的根拠はまったく不明確であるものの、母材と溶接金属の硬さの差に起因するひずみ集中のみを考慮すれば十分であって、破壊に関係のない熱影響部は無視して2要素モデルを用いても妥当に疲労強度を評価しうるのではないかとの推測があり得る。

以上のように、硬さ分布と疲労破壊の位置を矛盾なく説明しうる強度評価モデルがないことから、信頼するに足る疲労強度評価法が確立されないままとなっていた。本報告では、3要素モデルを用いた精緻なFEM解析を行い、硬さ分布とひずみ集中の関係を明らかにするとともに、繰返しひずみ軟化に伴う硬さ分布の変化を取り入れたひずみ集中評価モデルを開発し、これにより硬さ分布と疲労破壊の位置の両者を矛盾なく説明できることを示した。これにより、Mod. 9Cr-1Mo鋼溶接継手の疲労強度評価法を確立した。

2. 解析条件

2.1 解析の目的

Mod. 9Cr-1Mo鋼溶接継手のひずみ集中挙動を解析により明らかにする。この結果に基づき疲労破損位置を評価する。

この結果の材料試験による検証は、4章で行う。

2.2 解析モデル

材料試験片の標点間（以下GL部と言う）を解析対象とした（試験片全体をモデル化した解析については付録A-1参照）。材料試験片のGL部は、直径10mm、長さ25mmの中実丸棒である。

負荷は、GL端部に強制変位を与えた。応力ひずみ関係は、動的応力ひずみ関係（詳細は後述）を用い、設定ひずみ範囲の1/2に相当する引張変位を与えた。この時のGL各部のひずみの2倍を各部のひずみ範囲とした。

2.3 解析パラメータ

以下のパラメータを設けた。

- (1) 熱影響部の降伏応力の母材の降伏応力に対する比 0.85~0.95

母材、熱影響部、溶接金属の硬さの差を、動的応力ひずみ関係における降伏応力の比で表現する。降伏応力の比は、母材を基準として、溶接金属については溶接金属の動的応力ひずみ曲線から、熱影響部については動的応力ひずみ曲線を取得することが困難であるため、溶接継手のビッカース硬さの分布から決定した。本溶接継手のビッカース硬さ分布試験結果の例をFig. 2.1に示す。この例では、熱影響部の硬さは、母材の90%程度である。他のデータも考慮すると、本鋼の熱影響部の硬さは母材の85~95%程度であるということが出来る〔2-7〕。そこで、硬さの比が動的応力ひずみ関係における降伏応力の比と直接対応すると仮定し、熱影響部の降伏応力の母材の降伏応力に対する比 α_p をパラメータとし、 $\alpha_p = 0.85, 0.90, 0.95$ の場合について解析を行った。なお比較のため $\alpha_p = 1.0$ （熱影響部の特性が母材と一致、すなわち2

要素モデル)の解析も合わせて行った。解析に用いた熱影響部の動的応力ひずみ関係をFig. 2.2に示す。

(2) 熱影響部の長さ 0.5～3 mm

熱影響部の長さは2 mm前後のことが多いが、溶接入熱条件によって変化する。そこで本解析では熱影響部の長さをパラメータとし、0.5, 1.0, 2.0, 3.0mmの場合について解析を行った。

(3) ひずみ範囲 0.2～3.0%

FBR実証炉における供用中の負荷ひずみ範囲は0.2～0.4%程度と想定されるが、ここではより広い範囲における挙動を検討するため、0.2～3.0%の範囲のひずみ範囲について解析を行った。

(4) 溶接金属の降伏応力の母材の降伏応力に対する比 1.15

本鋼のTIG溶接の溶接金属の動的応力ひずみ曲線の平均傾向〔2-7〕から、溶接金属の降伏応力を母材の1.15倍と決定した。Fig. 2.2参照。

解析条件一覧表をTable 2.1に示す。

2.4 FEMモデル

本報告ではFEMによりひずみ集中を評価した。8節点軸対称要素QAX8を用いた。メッシュ分割は熱影響部の長さにより変化させた。メッシュ分割の例をFig. 2.3に示す。

3. 解析結果

3.1 ひずみ集中率の分布

ひずみ集中率 K_ϵ を式 (3.1) により定義した。

$$K_\epsilon = \frac{\text{局所のひずみ}}{\text{GLの平均ひずみ}} \quad (3.1)$$

ひずみ集中率は、軸ひずみの試験片表面における値について検討した。これは疲労試験の場合、破壊の原因となる疲労き裂がすべて試験片軸方向と直角方向に試験片表面から発生するという実験事実に基づく。(試験片内部におけるひずみ集中については付録 A-2 を、相当ひずみの集中については付録 A-3 を参照。)

試験片表面における軸ひずみの集中率の分布を、熱影響部の降伏応力比、熱影響部の長さ、ひずみ範囲をパラメータとして解析した結果を Fig. 3.1 に示す。結果をまとめると、次の通りである。

まず、ひずみ範囲をパラメータとして検討する。最も典型的な場合である、熱影響部の降伏応力比 = 0.90、熱影響部の長さ = 2 mm の場合 (Fig. 3.1 (7) 参照) について見ると、0.2% の場合は溶接金属・母材・熱影響部のいずれの部分も降伏していないためひずみ集中は生じない。0.3% では、熱影響部が降伏するため、熱影響部にひずみ集中が生じ始めている。この影響で、母材にも若干のひずみ分布が生じている。0.4% 以上では、母材の降伏の影響が顕著になり、最大ひずみ集中はもはや最も軟らかい熱影響部ではなく、熱影響部よりも硬い母材で生じている。これは、熱影響部がそれよりも硬い溶接金属と母材に挟まれているため、塑性拘束が生じ熱影響部の塑性変形が拘束されたためであると考えることができる。ひずみ範囲の上昇とともに、母材におけるひずみ集中は顕著になり、もはや熱影響部のひずみ集中は全体の挙動に影響を及ぼさなくなる。

次に、溶接金属・母材・熱影響部の降伏応力比がひずみ集中率の分布に及ぼす影響を検討すると、熱影響部の降伏応力比が小さいほど熱影響部のひずみ集中は大きくなり、比較的ひずみ範囲の高いところまで、熱影響部で最大ひずみ集中が生じる傾向がある。熱影響部の降伏応力が母材に近いと、熱影響部のひずみ集中は小さく、母材にひずみ集

中が生じ全体のひずみ集中挙動は母材に支配されると言える。

最後に、熱影響部の長さの影響を検討すると、熱影響部の長さが長い程、熱影響部におけるひずみ集中は大きくなる。熱影響部の長さが短いと、熱影響部のひずみ集中は、全体のひずみ集中挙動に影響を及ぼさなくなる。

3.2 ひずみ集中率の分布の繰り返しひずみ負荷による変化

3.2.1 繰り返しひずみ軟化を考慮する必要性

3.1節におけるひずみ集中率の分布の検討は、定常状態付近を想定したある特定のサイクルについて行ったが、本鋼溶接継手においては、弾性域を越えるひずみ範囲では溶接金属・熱影響部・母材がそれぞれ繰り返しひずみ軟化を示す。この軟化の程度はそれぞれ異なっているのが一般的である。このため、溶接金属・熱影響部・母材の降伏応力比は、繰り返しひずみ負荷とともに変動する。従ってひずみ集中挙動も繰り返しひずみ負荷とともに変動する。従って、溶接継手の疲労損傷を検討するためには、ある特定のサイクルのみに注目したのでは不十分であって、繰り返しひずみ負荷に伴うひずみ集中挙動の変化を考慮することが必要である。

3.2.2 繰り返しひずみ軟化挙動のモデル化

母材・溶接金属については、それぞれの疲労試験結果から繰り返しひずみ軟化挙動が得られる。これに対し、熱影響部については、疲労試験結果がないことから、何らかの方法で軟化挙動を推測しなければならない。本報告では、溶接継手の疲労試験前後の硬さ分布を比較することにより、熱影響部の軟化挙動を推測した。疲労試験前後の硬さ分布をFig. 3.2に示す。

Fig. 3.2より、母材と溶接金属は、試験後の方が軟化しているが、熱影響部についてはあまり変化せず、疲労試験後は、熱影響部と母材の硬さはほぼ一致し、もはや軟化部は存在しないことが分かる。

この結果と、母材・溶接金属の疲労試験結果から、母材・溶接金属・熱影響部の繰り返しひずみ軟化挙動をFig. 3.3に示すようにモデル化した。

3.2.3 繰り返しひずみ軟化を考慮したひずみ集中の評価

このようにモデル化すると、繰り返しひずみ軟化の進行とともに、母材・溶接金属・

熱影響部の降伏応力比が変化する。この降伏応力比の変動に基づき、ひずみ集中率の変動を評価する。この評価は3.1節で行ったひずみ集中率の評価結果を内挿することにより行う。この評価は、塑性域に入るひずみ範囲を対象とし、0.3%以上のひずみ範囲について行った。この評価結果の例をFig. 3.4に示す。n = 1サイクルにおいてはひずみ集中は熱影響部で最大となるが、その傾向はひずみサイクルの進行とともに弱まり、n = 1 / 3 N_rサイクルでは熱影響部と母材のひずみ集中がほぼ同等となる。さらにn = 1 / 2 N_rサイクル（半寿命）では、母材におけるひずみ集中が熱影響部におけるひずみ集中を上回る。このように、繰り返しひずみ軟化を考慮にいと、少なくとも0.3%以上のひずみ範囲においては、試験前の硬さ分布から予想される結果とは裏腹に、熱影響部よりも母材におけるひずみ集中が疲労破損に対して大きく寄与する可能性が示唆される。

3.3 ひずみ集中の解析結果に基づく疲労損傷評価

3.3.1 疲労損傷評価の前提

疲労損傷評価のためには、母材・溶接金属・熱影響部の疲労強度を知る必要がある。母材については、最適疲労破損式の暫定式を利用した。これは次の通りである。

$$(\log N_f)^{-1/2} = 4.3580 + 5.4201 \times \log \Delta \epsilon + 2.64047 \times (\log \Delta \epsilon)^2 + 0.440282 \times (\log \Delta \epsilon)^3 \quad (3.1)$$

ただし、N_fは疲労寿命、Δεはひずみ範囲である。溶接金属については、疲労試験結果を用いて本解析のために新たに最適疲労破損式を暫定的に次式のように定めた。

$$(\log N_f)^{-1/2} = 5.31277 + 6.6277 \times \log \Delta \epsilon + 3.1399 \times (\log \Delta \epsilon)^2 + 0.50688 \times (\log \Delta \epsilon)^3 \quad (3.2)$$

熱影響部の疲労強度についてはデータがないため、推測せざるを得ない。ここでは、母材と同等と仮定した。結局、母材・熱影響部については母材の最適疲労破損式の暫定式を、溶接金属については新たに定めた最適疲労破損式を用いた。母材及び溶接金属の最適疲労破損式及び溶接金属の疲労試験結果をFig. 3.5に示す。

3.3.2 疲労損傷評価の結果

疲労損傷評価にあたっては、3.2節で検討した繰返しひずみ軟化に伴うひずみ集中率の変化を考慮にいった。この結果、寿命の初期にはひずみ集中の大きい熱影響部の疲労損傷が大きくなるが、半寿命以降では熱影響部に代わってひずみ集中の大きくなる母材の疲労損傷が大きくなる。この結果、最終的には母材の疲労損傷が熱影響部のそれよりも早く制限値(=1.0)に達する。つまり疲労破損は母材で生じることになる。この結果の例をFig. 3.6に示す。

この検討をひずみ範囲0.3%以上の全ての解析ケースについて行くと、すべての場合に疲労破損は母材で生じることが分かる。つまり、熱影響部のひずみ集中は寿命の初期のみの現象で、寿命全体を考慮すると、溶接継手の疲労破損には寄与しないといえることができる。

なお疲労損傷の定義は次式の通りである。

$$D_r = \frac{n}{N_r} \quad (3.3)$$

ただし、 n は負荷サイクル数であり、 N_r は疲労寿命(サイクル)である。

3.4 2要素モデルによる評価

3.3節における解析結果より、Mod. 9Cr-1Mo鋼溶接継手の疲労破損は、ひずみ範囲0.3%以上の全ての場合に母材で生じ、熱影響部のひずみ集中は疲労破損には寄与しないことが明らかになった。この結果は、本鋼溶接継手の評価モデルとして、熱影響部を考慮した3要素モデルではなく、熱影響部を省略し、これを母材一般部で置き換えた2要素モデルを用いても同等の評価を行える可能性を示唆していると考えることができる。

この可能性の検証は次章で行う。

4. 評価モデルの試験結果による検証

4.1 評価モデル

3.4節の評価結果に基づき、ここでは3章で用いたモデルの熱影響部を母材一般部で置き換えた2要素モデルにより評価を行う。

4.2 評価対象

Mod. 9Cr-1Mo鋼溶接継手の疲労試験結果を評価対象とする。試験結果の一覧表をTable 4.1に示す〔2〕。

4.3 評価方法及び結果

予測疲労寿命と実測疲労寿命の比較結果をFig. 4.1に示す。ほぼ全てのデータをfactor of 3程度の精度で評価することができた。

寿命評価結果が全般にやや保守的な評価となっているのは、疲労損傷の評価に用いた母材の最適疲労破損式（暫定式）がやや保守的に策定されているためであると推測できる。

4.4 簡易モデルによる評価

これまでの検討から、Mod. 9Cr-1Mo鋼溶接継手の疲労強度は、母材と溶接金属の2要素モデルを用いてFEM解析を行うことにより妥当な精度で予測できることが明らかになった。実用的には、手数がかかるFEM解析によらずに簡易な方法でFEMと同等の精度で予測を行えることが望ましい。そこで、本節では、簡易2要素モデルで同継手の疲労強度を予測し、予測結果をFEM解析と比較検討した。

簡易2要素モデルは、FEM解析に用いたのと同じモデル（Fig. 2.3参照）を用い、軸方向に一様応力分布を仮定することにより、動的応力ひずみ関係（Fig. 2.2に示す）から母材及び溶接金属のひずみを求めるものである〔1〕。

簡易2要素モデルによる予測寿命と、FEM解析による予測寿命の比較結果をTable 4.2及びFig. 4.2に示す。これより、簡易2要素モデルの予測精度は、FEM解析と同

等であることが分かる。

結論として、本鋼溶接継手の疲労寿命の評価は、簡易2要素モデルで行いえることが明らかとなった。

5. 考 察

Mod. 9Cr-1Mo鋼溶接継手に関するひずみ集中のメカニズムを解析により解明し、疲労破損との対応を明らかにした。この結果、寿命初期においては溶接時の熱影響により生じた母材軟化部（以下「熱影響部」という）にひずみ集中が生じるものの、繰り返しひずみ負荷に伴い、母材が軟化するのに対し、熱影響部はほとんど軟化せず、半寿命付近で両者の硬さがほぼ等しくなると考えられるため、半寿命付近以降ではもはや熱影響部にはひずみ集中は生じず、母材においてひずみ集中が生じることが明らかになった。さらに、このひずみ集中挙動に基づき本鋼溶接継手の累積疲労損傷を評価すると、本解析を行った条件下ではすべての場合において母材で最も早く疲労損傷が制限値に達すること、すなわち母材で疲労破損が生じることが明らかとなった。この結果は、疲労試験結果と一致した。

さらにこの解析の課程で、FEM解析により、ひずみ集中が常に最軟部（熱影響部）に生じるとは限らず、熱影響部の降伏応力、長さ及び溶接継手の負荷ひずみ範囲によっては、熱影響部よりも硬い母材により大きなひずみ集中が生じることが明らかとなった。これは塑性拘束により熱影響部の塑性変形が拘束されたことによると本報告では判断できる。ただし、その理論的根拠は必ずしも十分ではなく、さらに理論的検討を行うことが望ましい。

また、溶接金属・母材・熱影響部のすべてが弾性域をでないような低ひずみ範囲で疲労試験を行った場合を考えると、硬さ（動的応力ひずみ関係）の差による力学的なひずみ集中は生じないため、疲労強度の最弱部で破断が生じると考えなければならない。この場合は、Fig. 3.5より、溶接金属で疲労破損が生じることになる。簡易2要素モデルを用いて溶接継手の母材及び溶接金属部の疲労寿命を求めると（Fig. 5.1参照）、 $\Delta \epsilon_t = 0.28\%$ 以上では母材破断となるが、 $\Delta \epsilon_t = 0.28\%$ 以下では溶接金属破断となる。ただし現状ではこれを検証すべき低ひずみ範囲の疲労試験結果がないため、溶接継手の高サイクル疲労試験を行い、破断位置を確認する必要がある。

6. 結 論

Mod. 9Cr-1Mo鋼溶接継手の疲労強度評価法を提案した。母材と溶接金属からなる2要素モデルを用いてひずみ集中を解析することにより、疲労破損の位置、疲労寿命とも妥当に予測することが可能である。

参 考 文 献

1. 興石他, 「Mod. 9Cr-1Mo鋼溶接継手の疲労・クリープ疲労強度評価方法の検討」, PNC SN9410 90-171。
2. バブコック日立, 委託研究成果報告書, 「Mod. 9Cr-1Mo鍛鋼品溶接部の高温強度試験(Ⅱ)」, PNC SJ9124 89-006。
3. 川崎重工, 委託研究成果報告書, 「9Cr系鋼溶接継手の高温強度試験(Ⅲ)」, PNC SJ9055 90-001。
4. 東芝, 委託研究成果報告書, 「9Cr系鋼溶接継手のナトリウム中短時間強度試験(Ⅱ)」, PNC SJ9164 88-002。
5. バブコック日立, 委託研究成果報告書, PNC SJ9124 88-003。
6. 三菱重工, 委託研究成果報告書, PNC SJ9216 90-003。
7. バブコック日立, 委託研究成果報告書, PNC SJ9124 88-002。

謝 辞

本研究の主要部分をなすFEM解析の実施において多大なる協力をいただいた常陽産業(株)加藤猛彦氏に謝意を表します。

付録 A - 1 GLモデルによる解析と全体モデルによる解析

実際の材料試験では、試験片の端部に強制変位が加えられるが、本解析で用いたGLモデルでは、GLの端部に強制変位を加えることになる。GLモデルの妥当性を検証するため、試験片全体をメッシュ分割したモデルでひずみ集中を解析し、そのGL部分におけるひずみ集中率の分布が、GLモデルから得られたひずみ集中率の分布と有意差を示さないことを明らかにした。

代表的な条件に対する全体モデルの解析結果をFig. A 1. 1 (a)に示す。比較すべきGLモデルの解析結果をFig. A 1. 1 (b)に示す。

付録 A - 2 試験片内部におけるひずみ集中率の分布

試験片中心部における軸ひずみの集中率の分布を検討し、試験片表面における軸ひずみ集中率の分布と比較検討した。

代表的な条件に対する解析結果を Fig. A 2.1 (a) に示す。Fig. A 2.1 (b) に示す試験片表面におけるひずみ集中率の分布と比較すると、試験片中心の方が試験片表面よりもひずみ集中率が高いことがわかる。これは、溶接継手特有の現象であり、母材では生じない。これは、負荷方向の冶金的不連続（硬さ分布）により生じると判断できる。

このように FEM 解析では、試験片中心部で最大のひずみ集中が生じるにも係わらず、実際の疲労試験では、疲労き裂はすべて試験片表面から生じる。この食い違いの原因は、以下のように推測することができる。

実際の疲労試験でも、FEM 解析結果と同様に、試験片中心部で最大のひずみ集中が生じるが、試験片表面に生じる突き出し、入り込みによるひずみ集中、さらに表面酸化によるひずみ集中が生じ、これらのひずみ集中が試験片表面における疲労き裂の発生を加速するため、試験片表面で内部よりも早くき裂が発生する。ただし、この推測には定量的な裏付けは現状では得られていない。また、この推測に基づくと、酸化の生じない真空環境中で溶接継手の疲労試験を行うと、試験片内部で最初に疲労き裂が生じる可能性があることになる。

付録 A - 3 相当ひずみの集中率の分布

疲労き裂は負荷方向（試験片軸方向）と直角に生じるため、疲労破損の解析には、軸ひずみの集中率を解析するのが妥当であると判断できるが、参考のため、試験片表面における相当ひずみ（ASME code型の相当ひずみ範囲）の分布を検討した。

代表的な条件についての解析結果をFig. A 3.1 (a)に示す。Fig. A 3.1 (b)に示す軸ひずみの集中率の分布と比較すると、軸ひずみと相当ひずみで集中率の分布に大きな差のないことが分かる。

Table 2.1 Condition of Analysis

ケース	モデル	降伏応力比			熱影響部の長さ mm	溶接継手 ひずみ範囲 %	備考	
		溶接金属	母材	熱影響部				
1	3要素モデル	1.15	1.0	0.85	0.5	0.2 0.3 0.4 0.5 0.7 1.0 2.0 3.0		
2				0.90				
3				0.95				
4		1.15	1.0	0.85	1.0			
5				0.90				
6				0.95				
7		1.15	1.0	0.85	2.0			注1
8				0.90				注2
9				0.95				注2
10		1.15	1.0	0.85	3.0			
11				0.90				
12				0.95				
13		1.30	1.0	0.85	2.0			注3
14	2要素モデル	1.15	1.0	-	0			

注1 試験片全体モデルによる解析も実施

注2 試験片中心軸におけるひずみ分布の解析も実施

注3 相当ひずみの集中率と軸ひずみの集中率の比較解析のみ実施

Table 4.1 Fatigue Test Results of Mod.9Cr-1Mo Weldments

試験片番号	ひずみ速度 (%/sec)	ひずみ範囲 (%)	寿命 (cycles)	破断位置	参考文献
HB4038	0.1	0.4	11800	母材	SJ9124- 89-006
HB4039		0.5	6400		
HB4040		0.7	2350		
HB4041		1.0	1148		
HB4042		1.2	850		
MTF02	0.01	1.0	1393		PNC 内部 実施
MTF01	0.1	0.35	74960		
MTF03		0.5	13998		
MTF04		1.0	1475		

Table 4.2 Comparison of Fatigue Life Predicted
by FEM Model and by Simplified Model

温度：550

ひずみ範囲 (%)	疲 労 寿 命		
	実験値	F E M	簡易解析
0.35	74960	27499	31903
0.4	13800	11025	11358
0.5	13998	3991	4234
0.5	6400	3991	4234
0.7	2350	1915	1915
1.0	1148	1025	1045
1.01	1475	1025	1045
1.01	1393	1025	1045
1.2	850	740	756

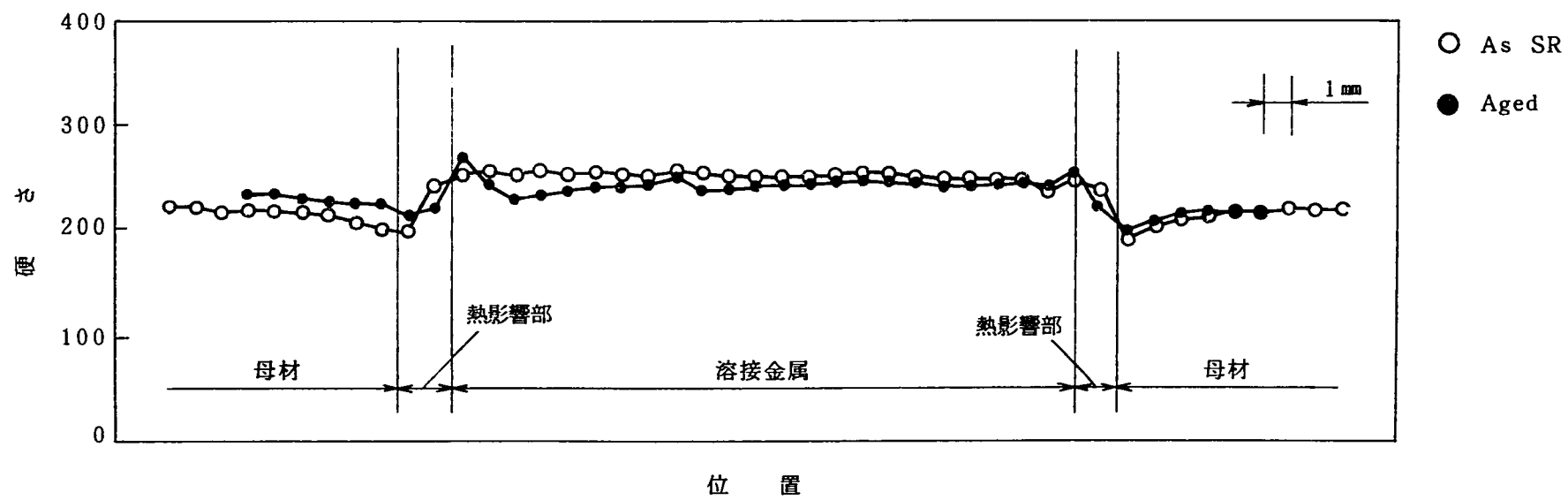


Fig. 2.1 Example of Hardness Distribution

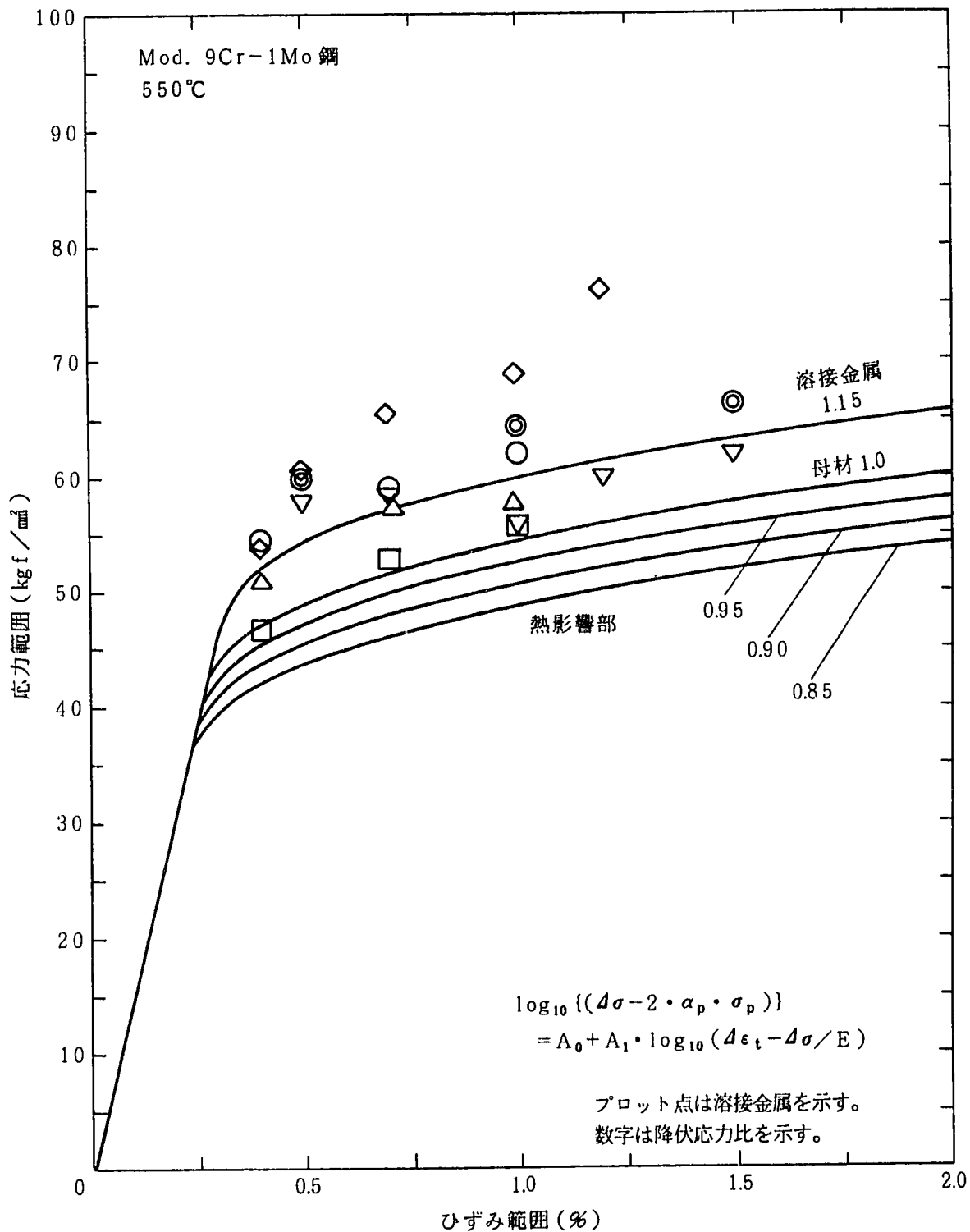


Fig. 2.2 Dynamic Stress-Strain Curve of Weld Metal

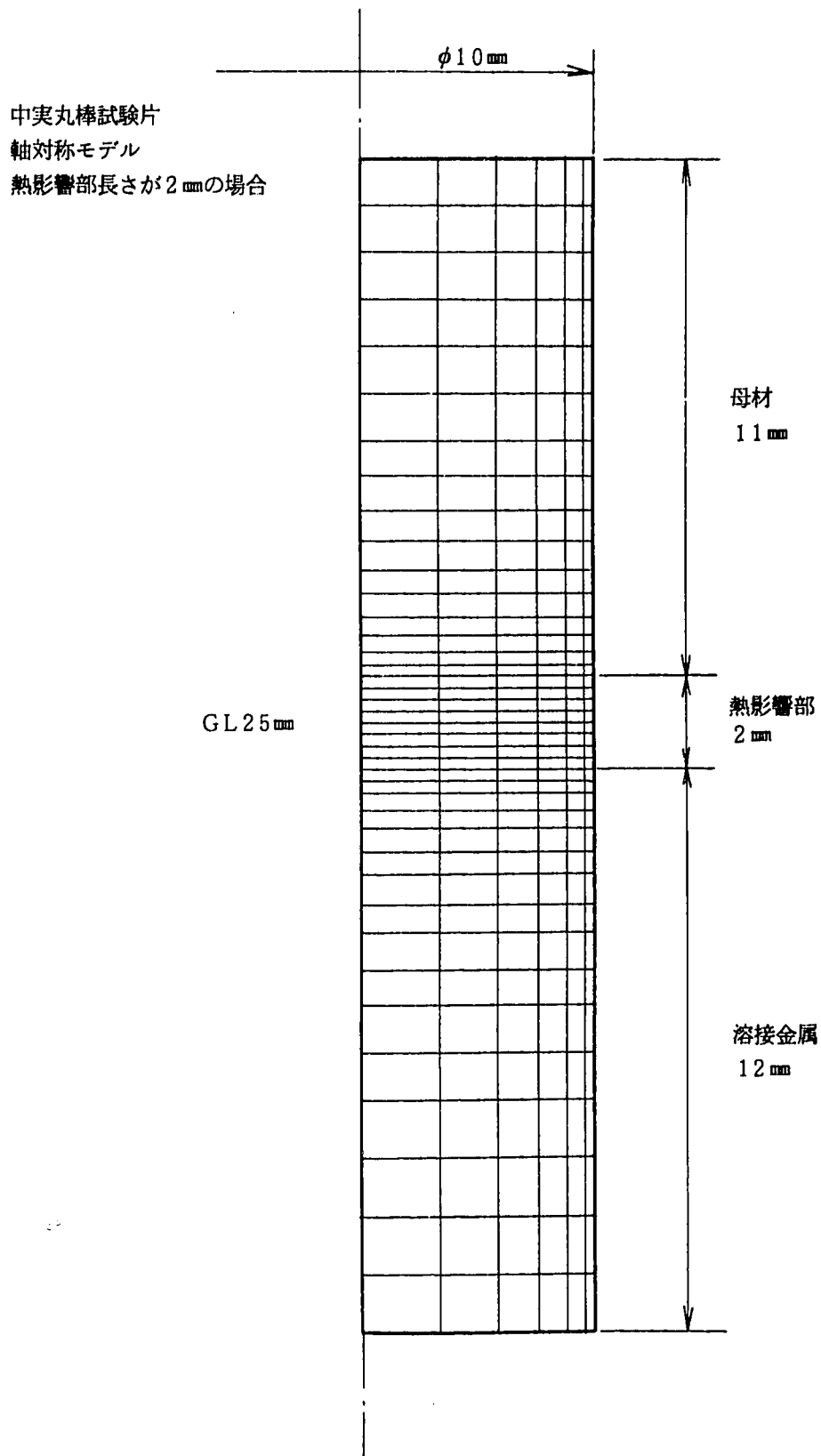


Fig. 2.3 Example of Mesh Division

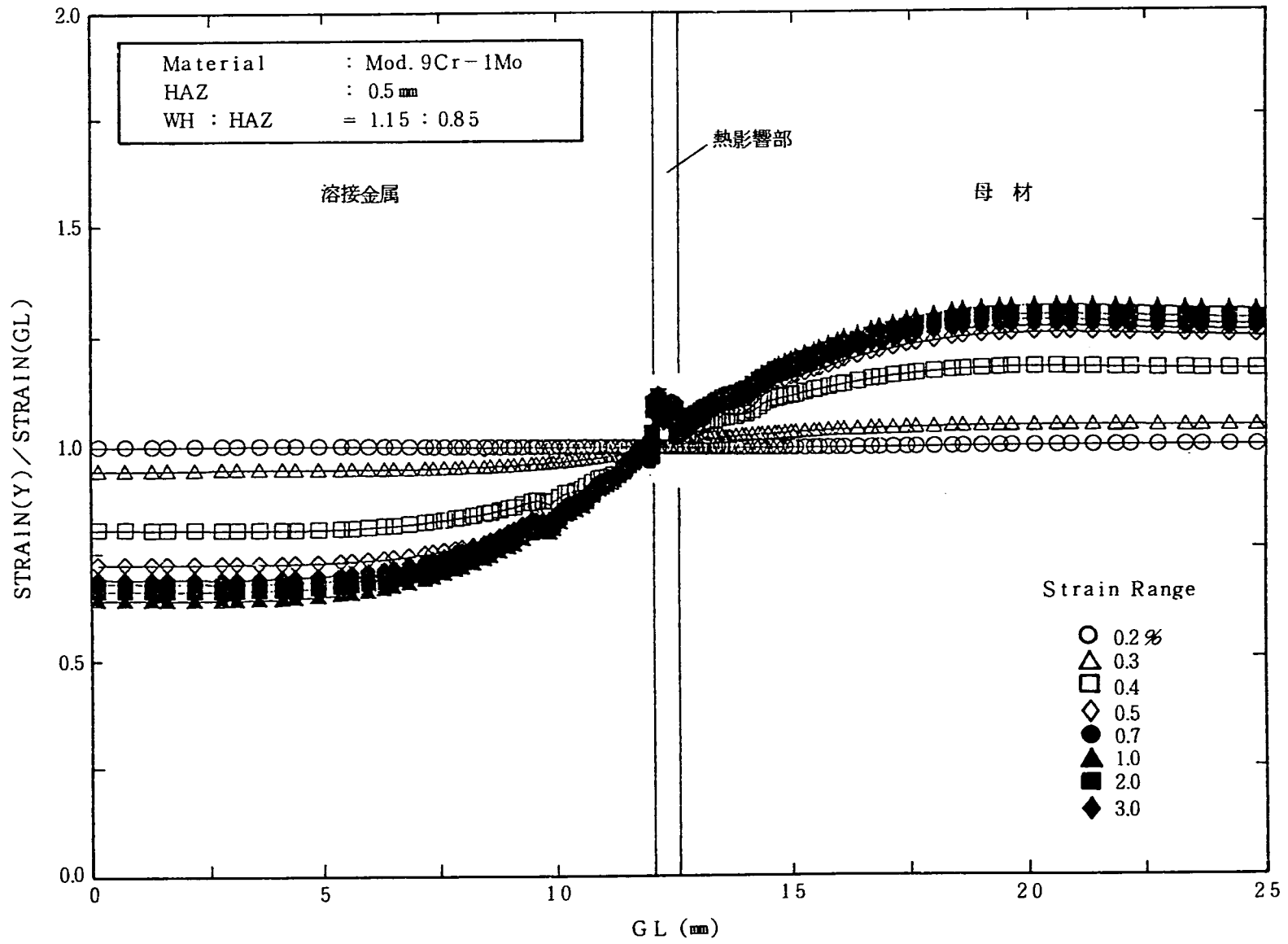


Fig. 3. 1 (1) Distribution of Strain Concentration(1)

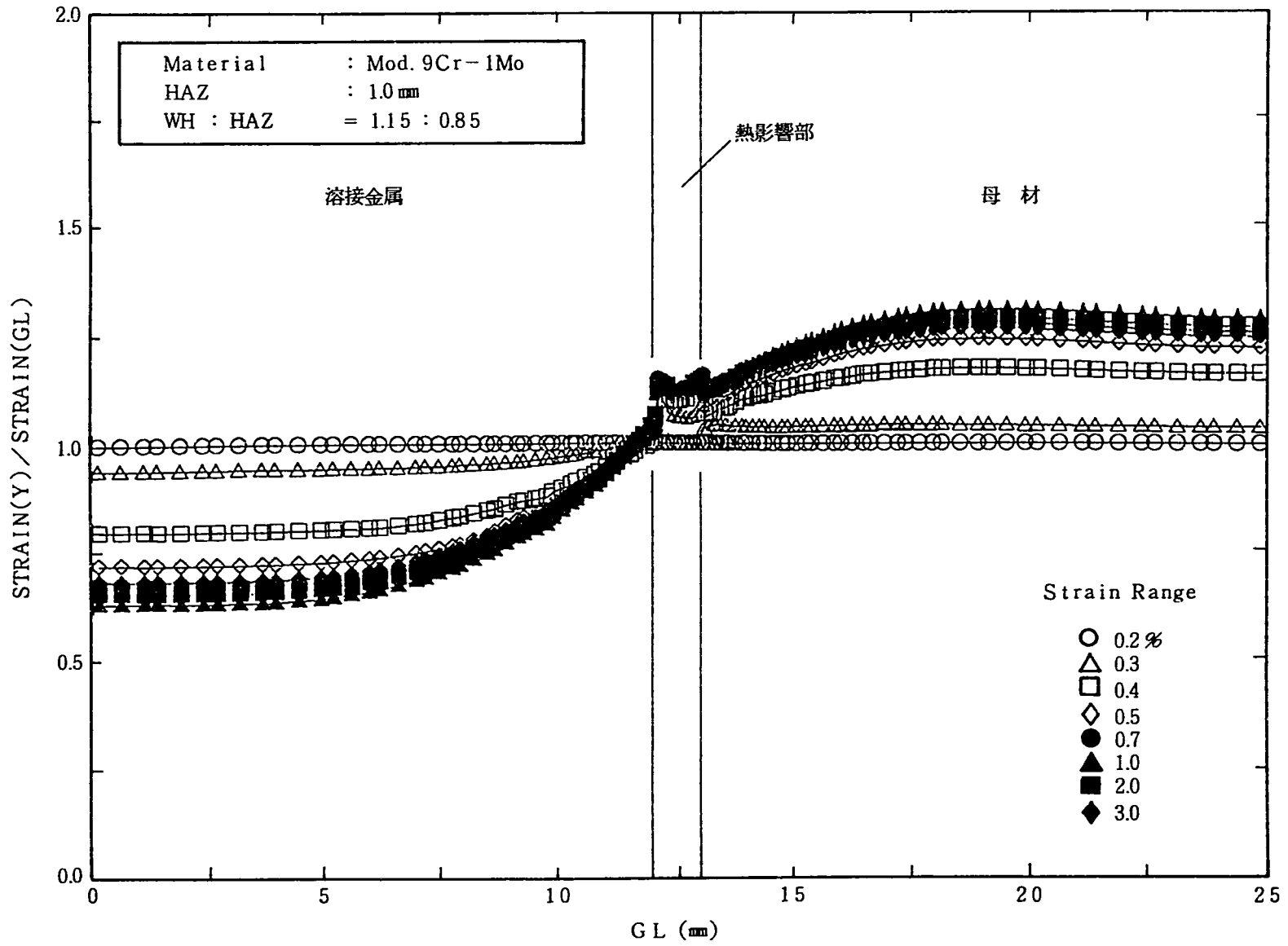


Fig. 3.1 (2) Distribution of Strain Concentration(2)

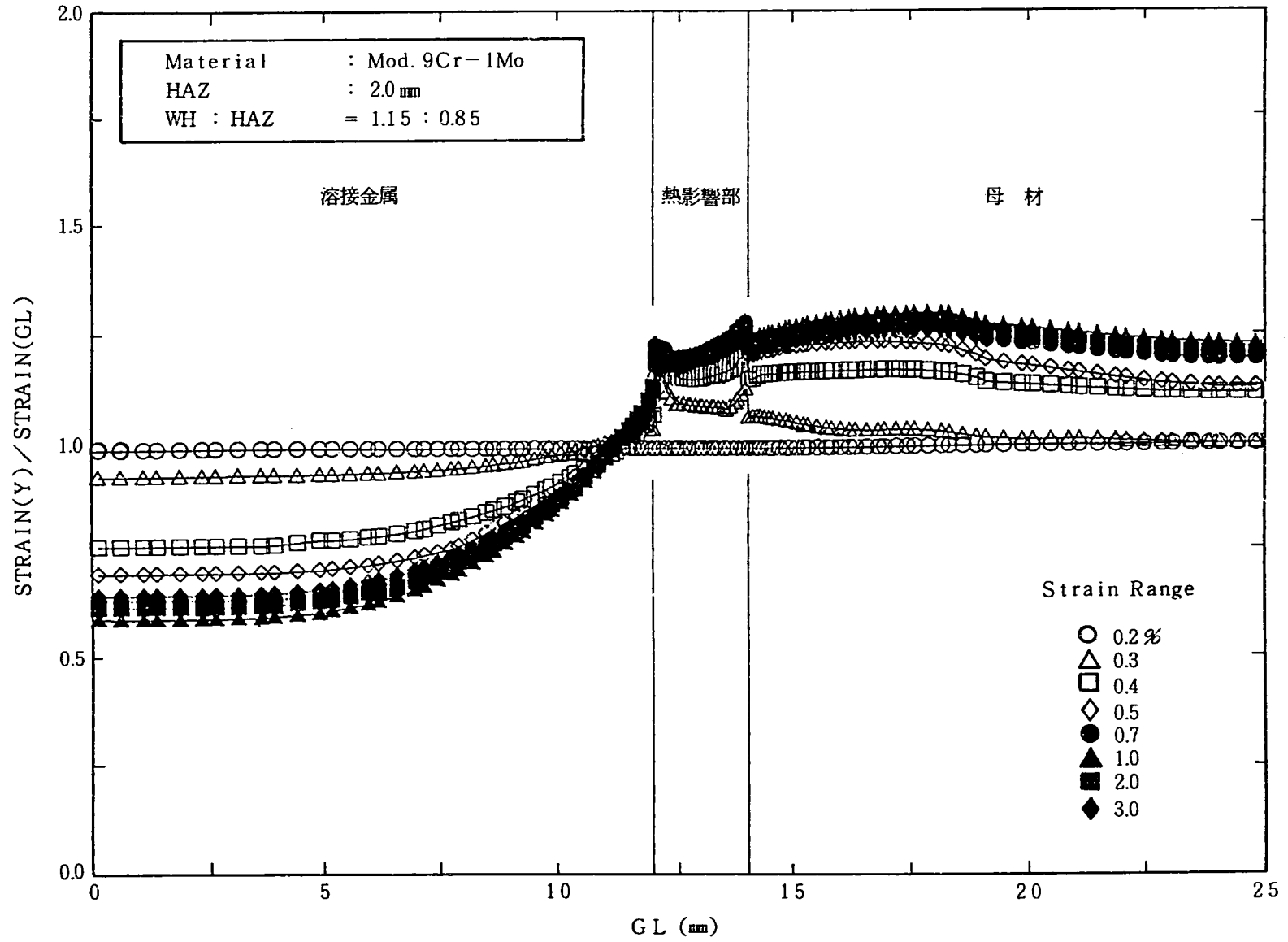


Fig. 3.1 (3) Distribution of Strain Concentration(3)

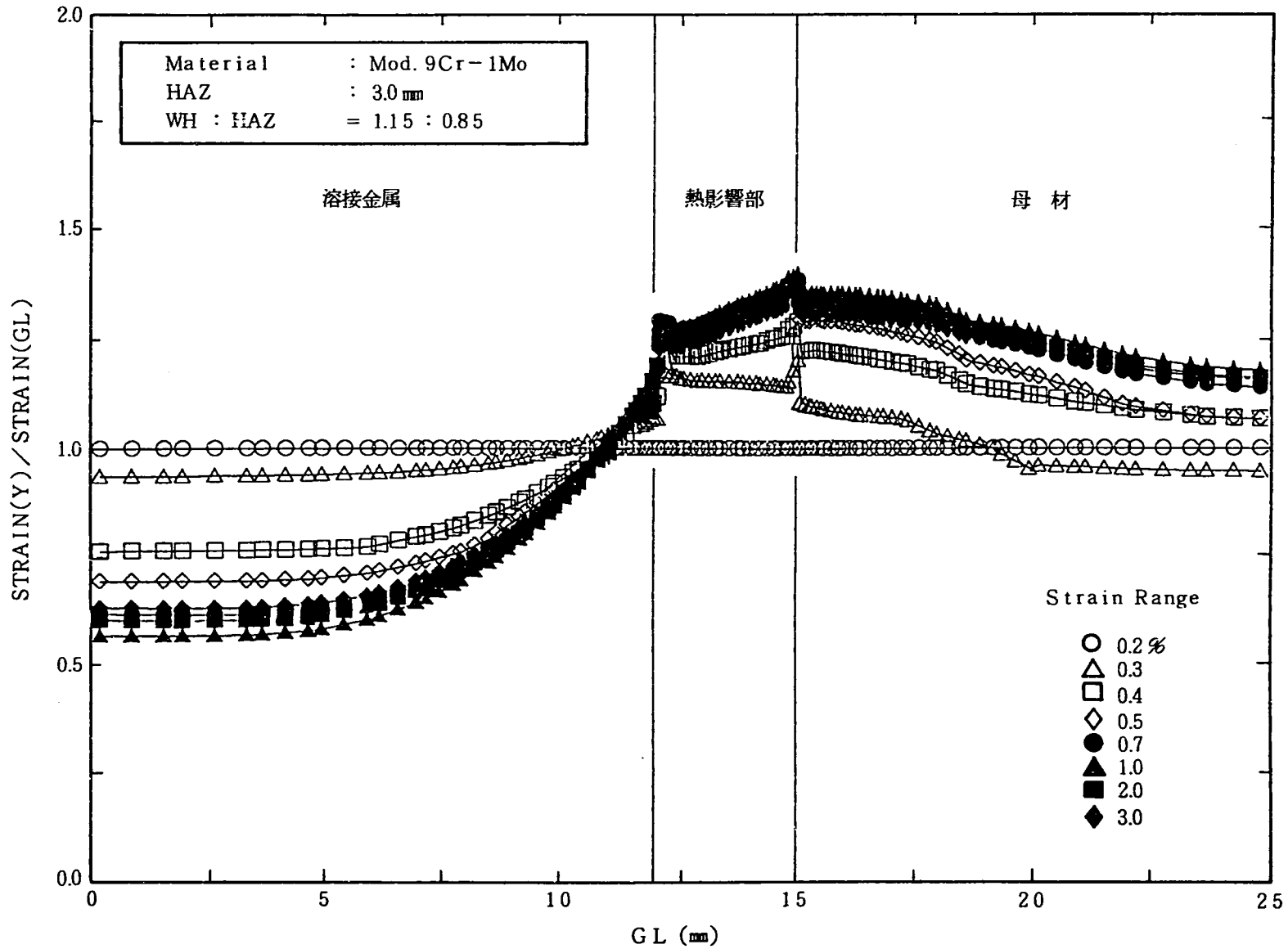


Fig. 3.1 (4) Distribution of Strain Concentration(4)

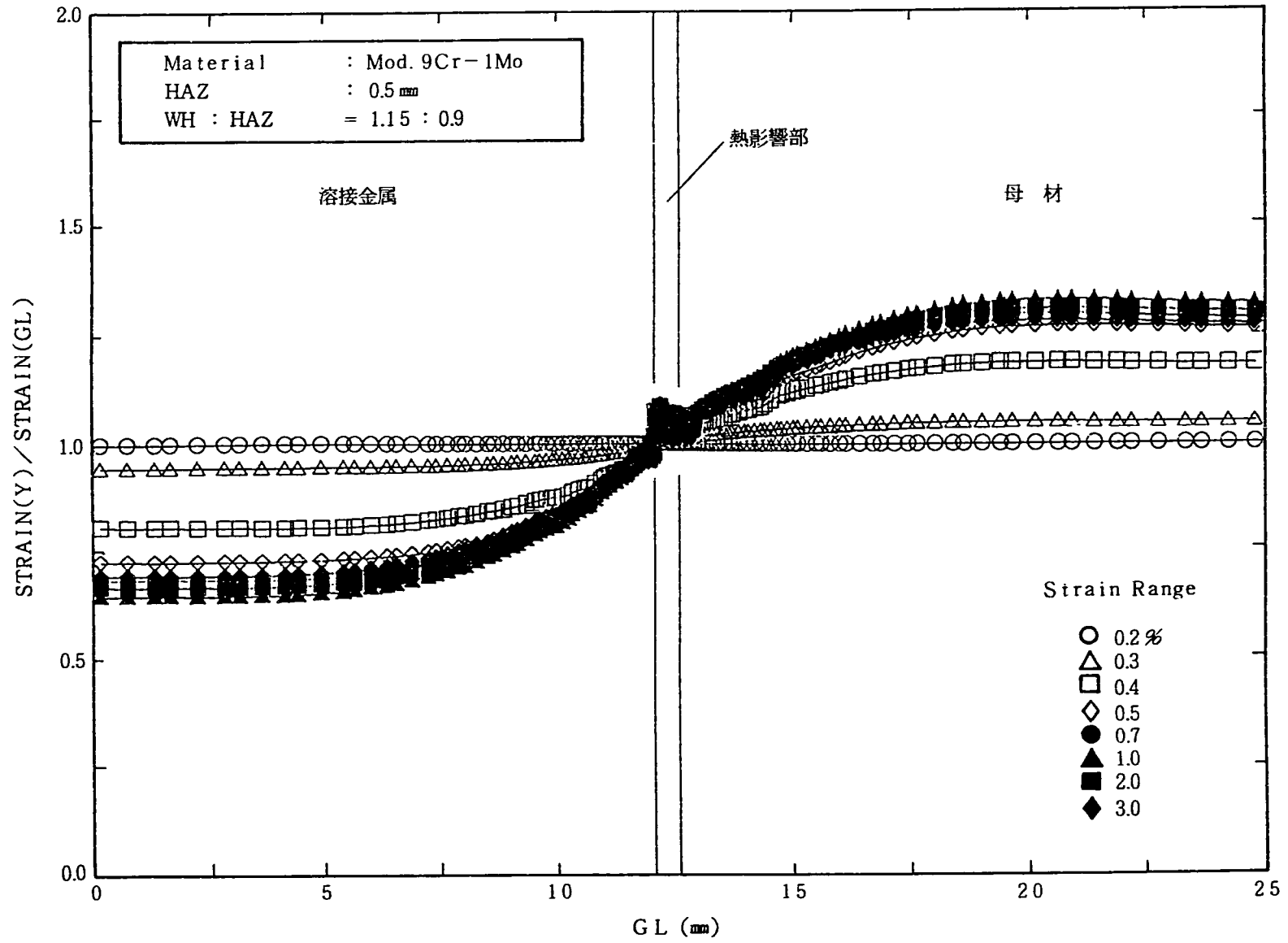


Fig. 3.1 (5) Distribution of Strain Concentration(5)

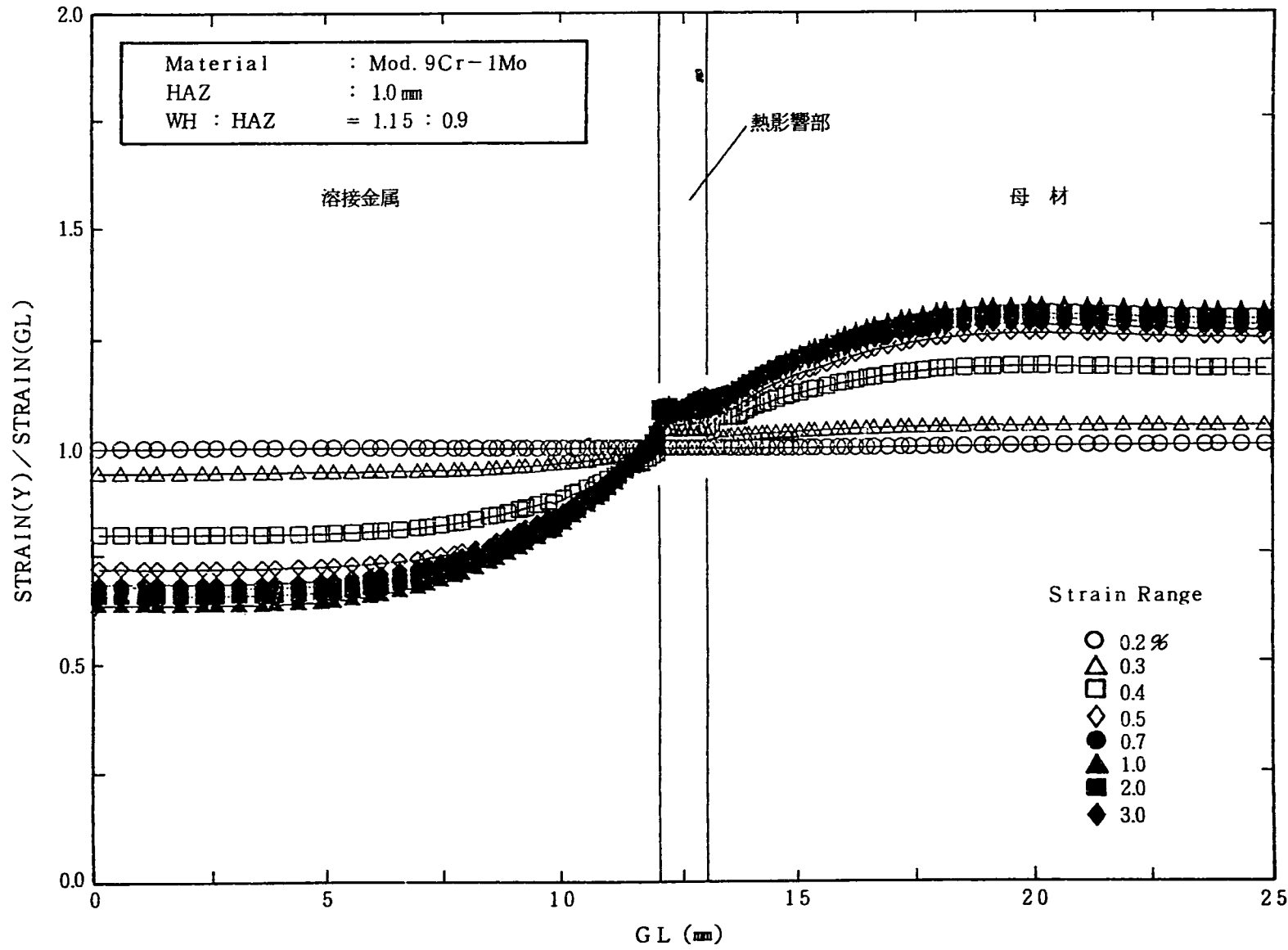


Fig. 3.1 (6) Distribution of Strain Concentration(6)

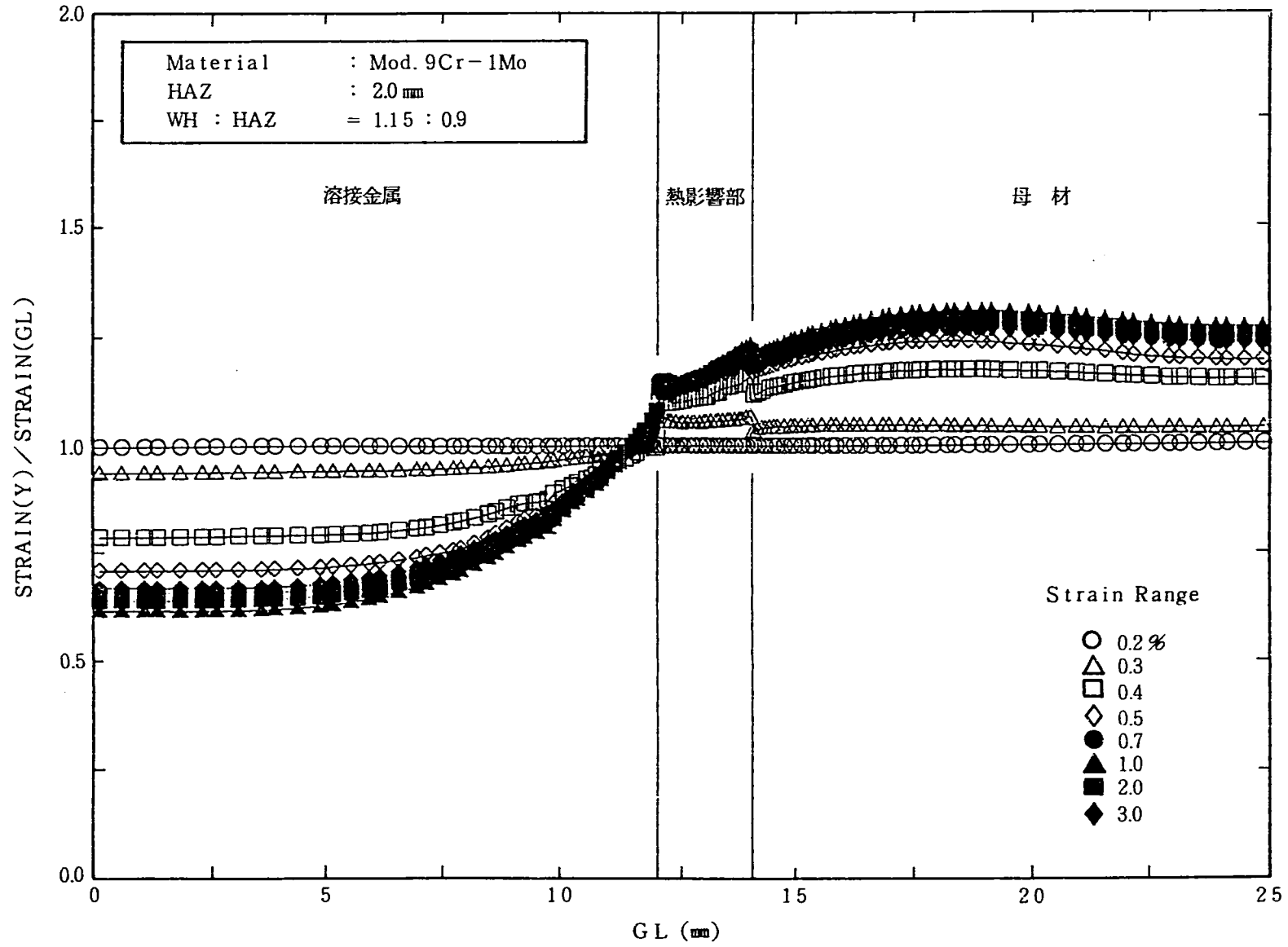


Fig. 3.1 (7) Distribution of Strain Concentration(7)

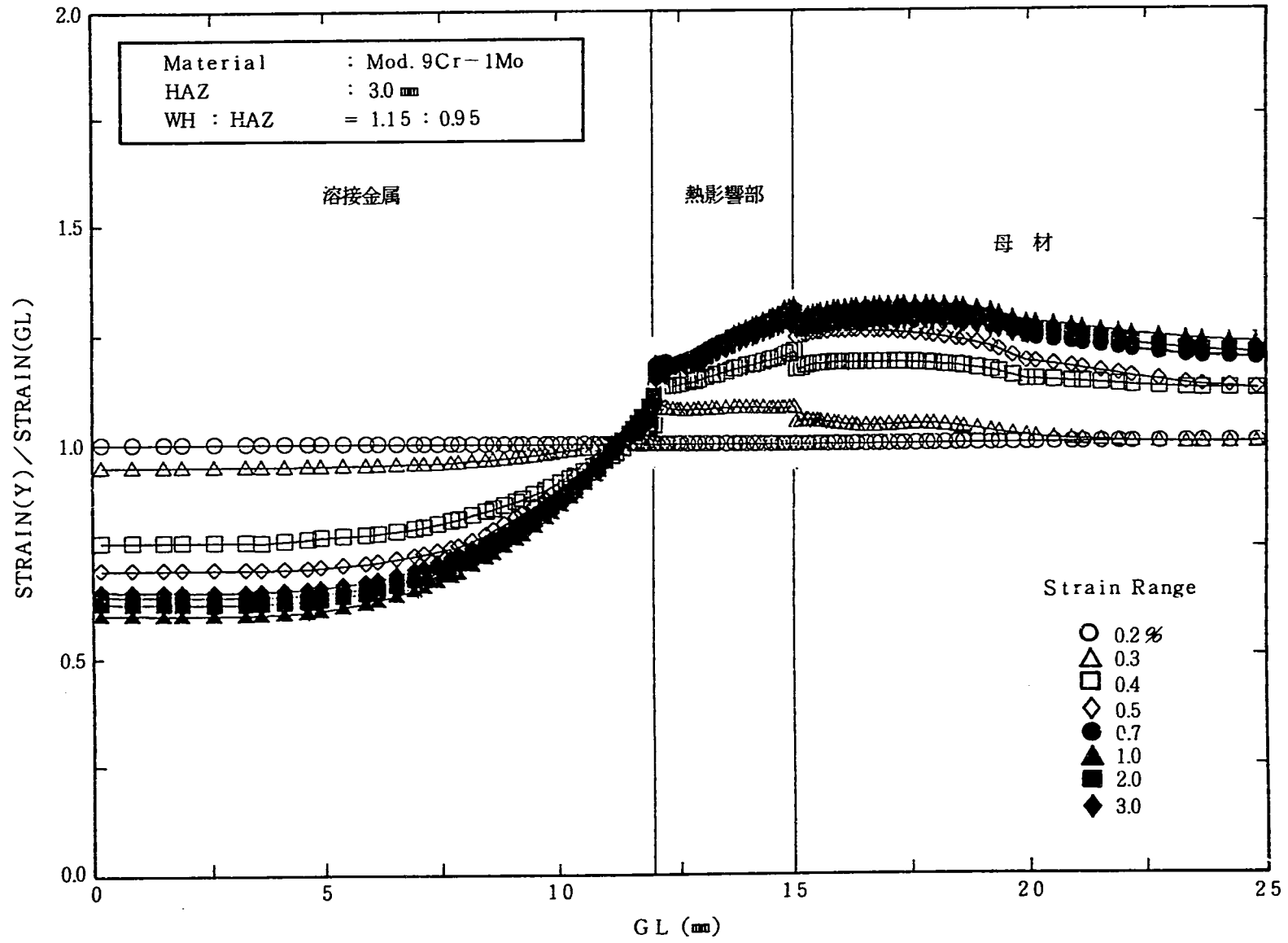


Fig. 3.1 (8) Distribution of Strain Concentration(8)

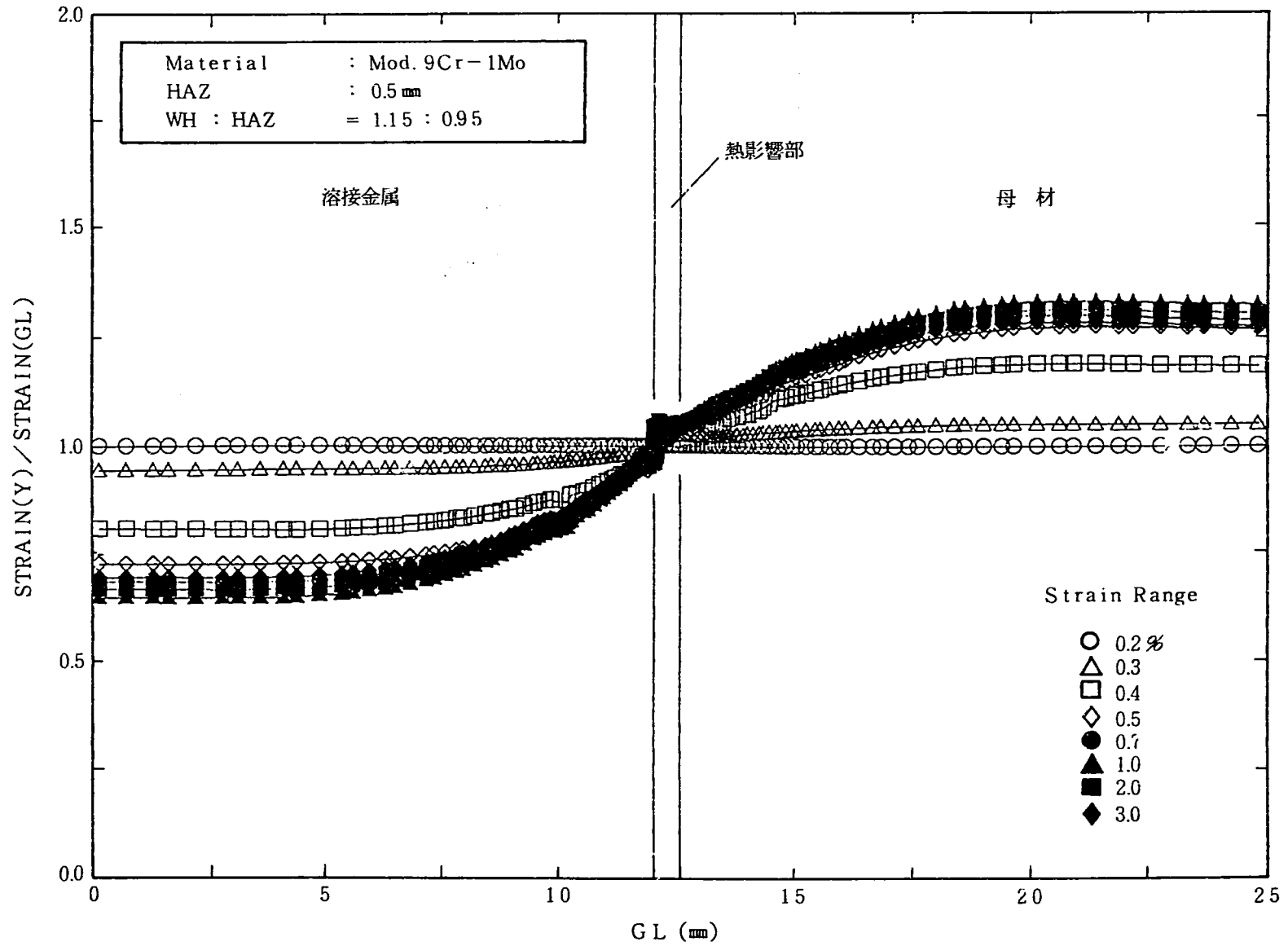


Fig. 3.1 (9) Distribution of Strain Concentration(9)

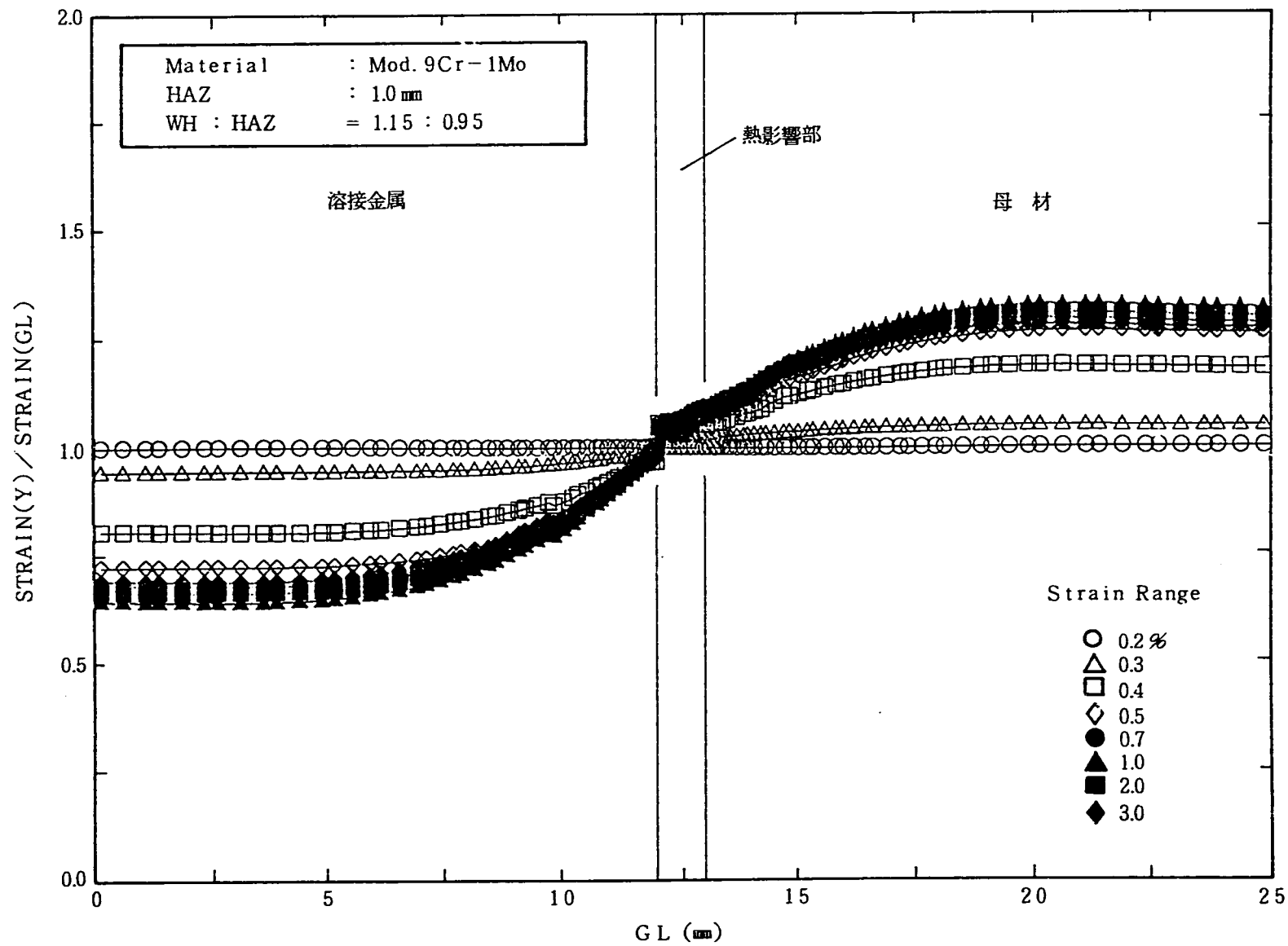


Fig. 3.100 Distribution of Strain Concentration

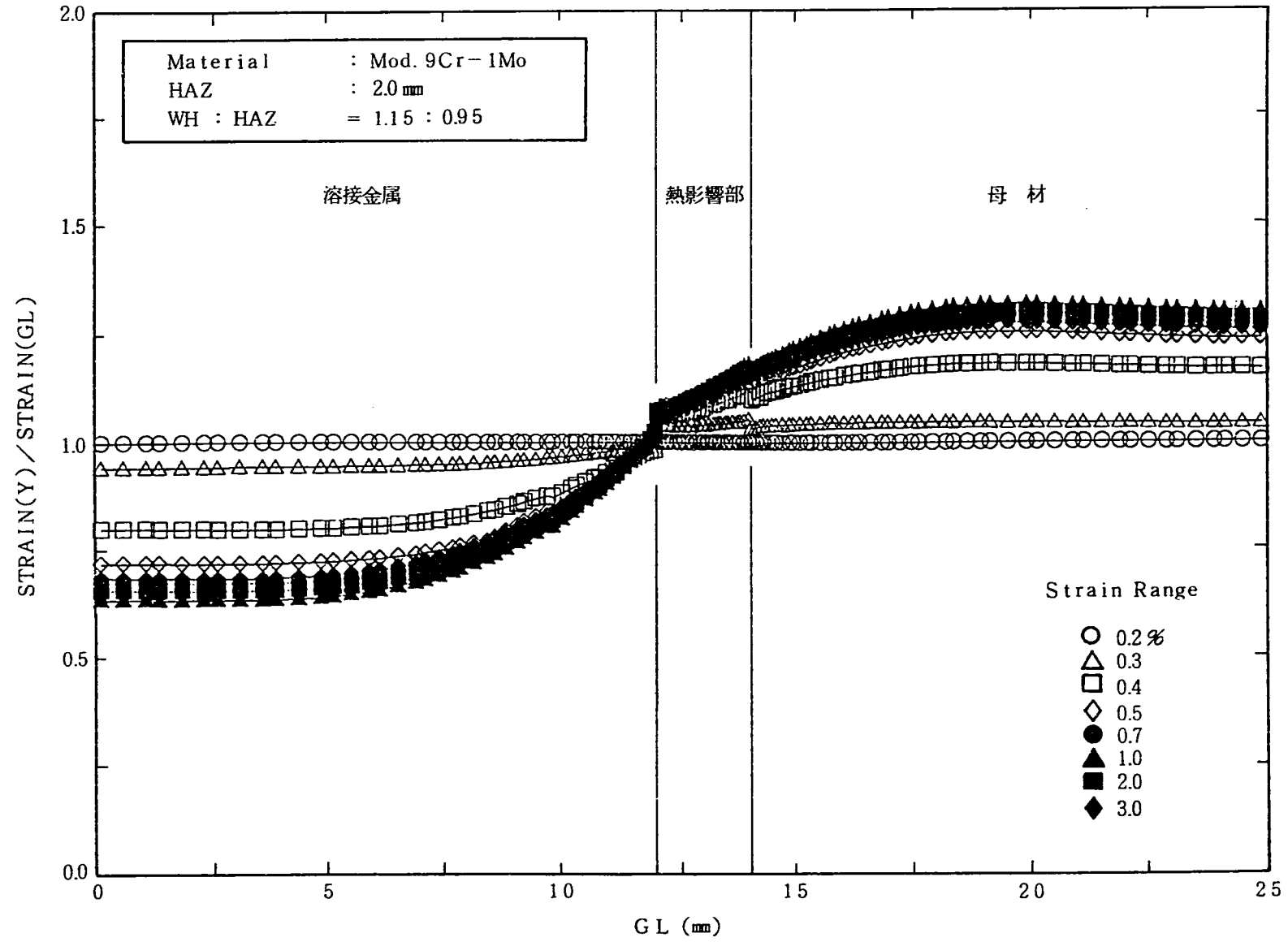


Fig. 3.1 (1) Distribution of Strain Concentration (1)

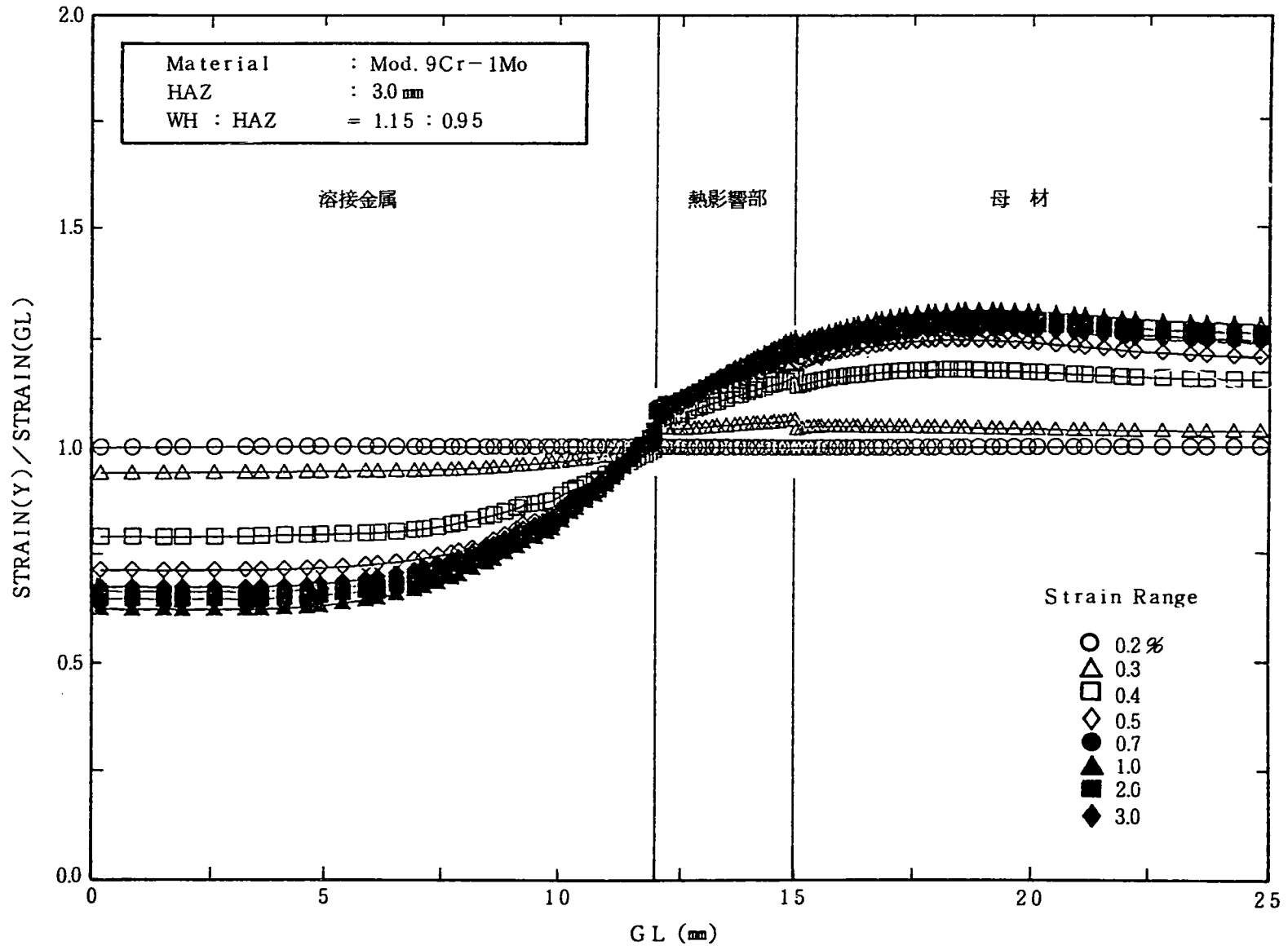


Fig. 3.1 02 Distribution of Strain Concentration 02

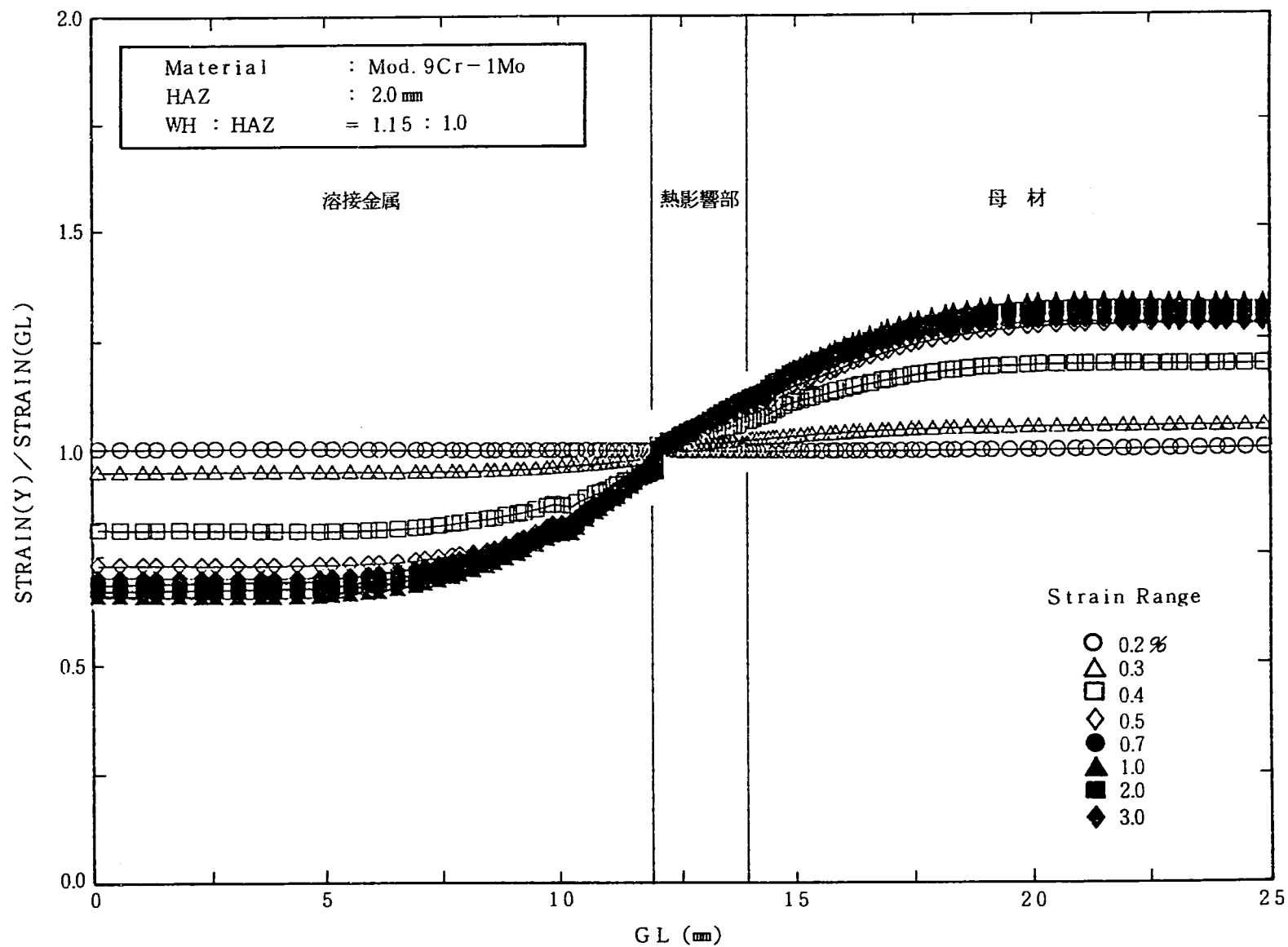


Fig. 3.1 (3) Distribution of Strain Concentration(3)

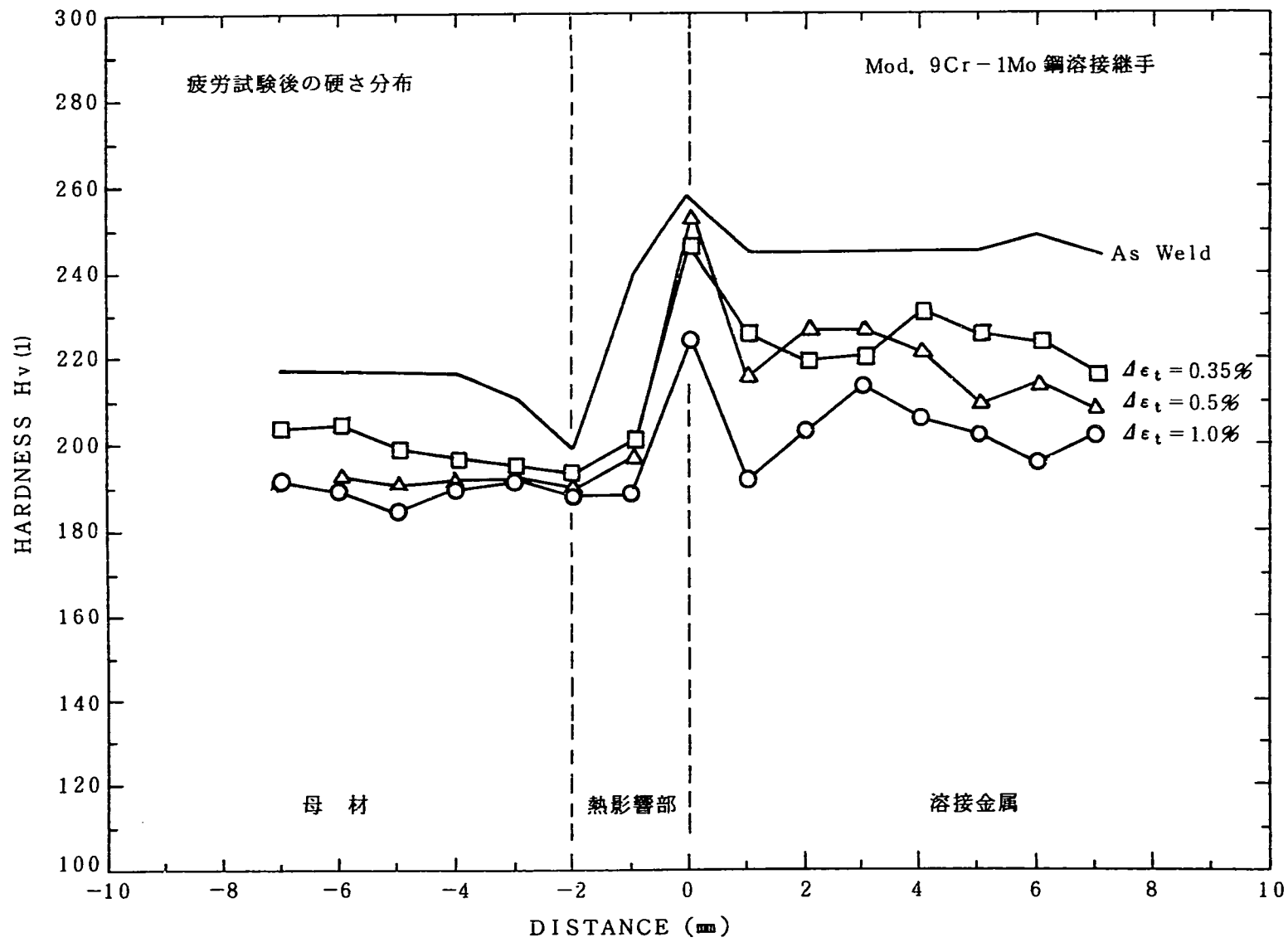


Fig. 3.2 Hardness Distribution before and after Fatigue Test

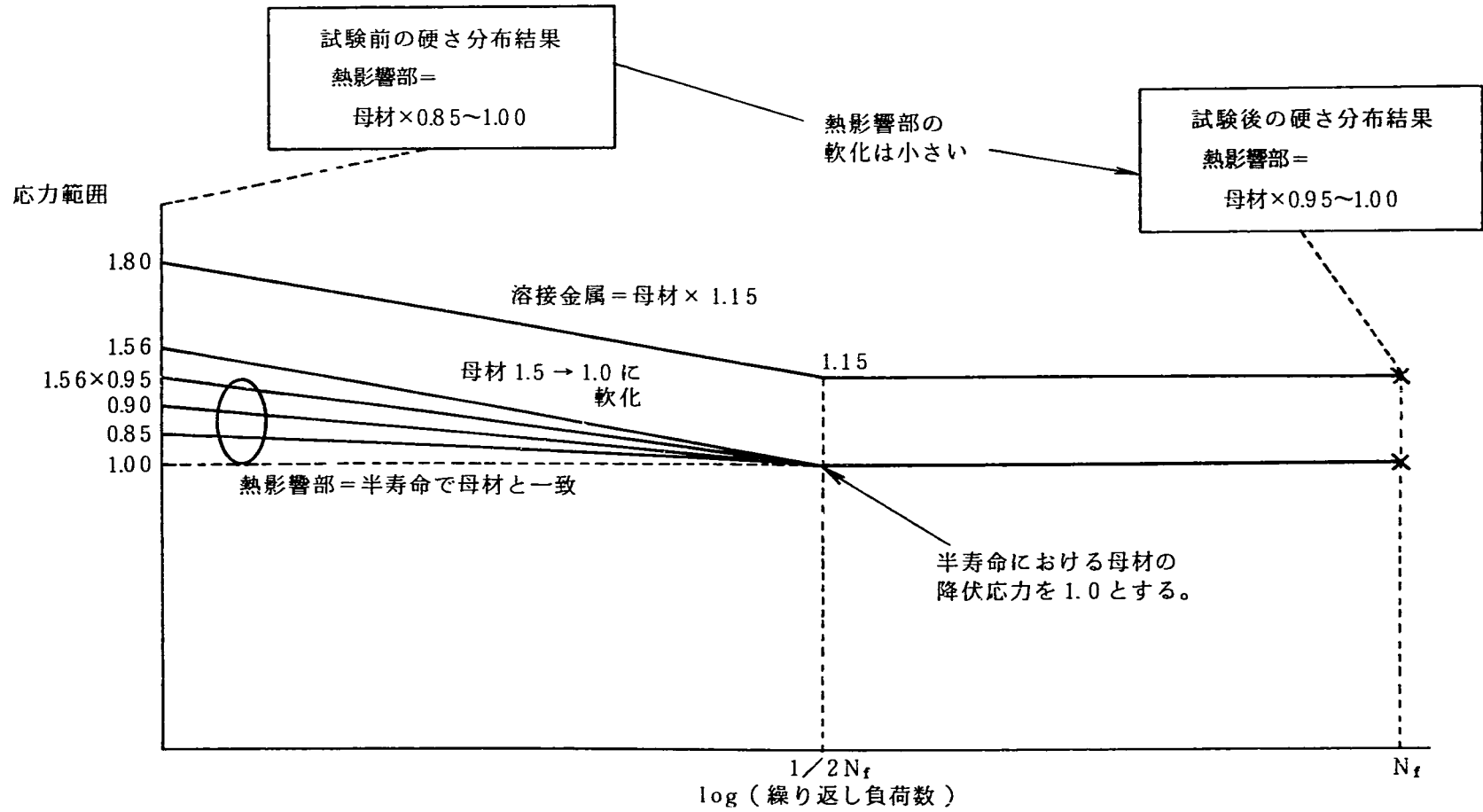


Fig. 3.3 Model of Cyclic Softening Behavior

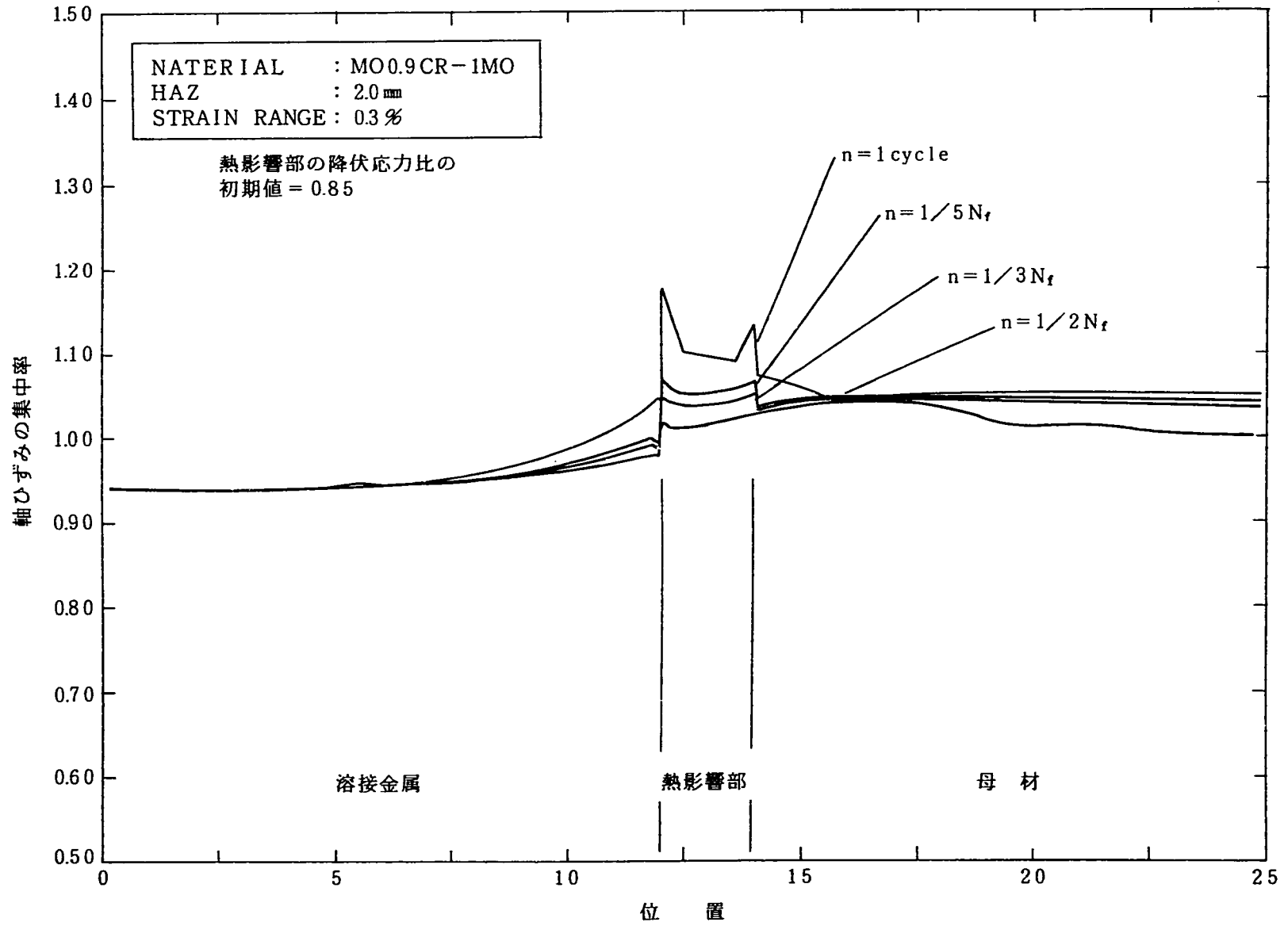


Fig. 3.4 Distribution of Strain Concentration Ratio at Various Portion of Fatigue Life

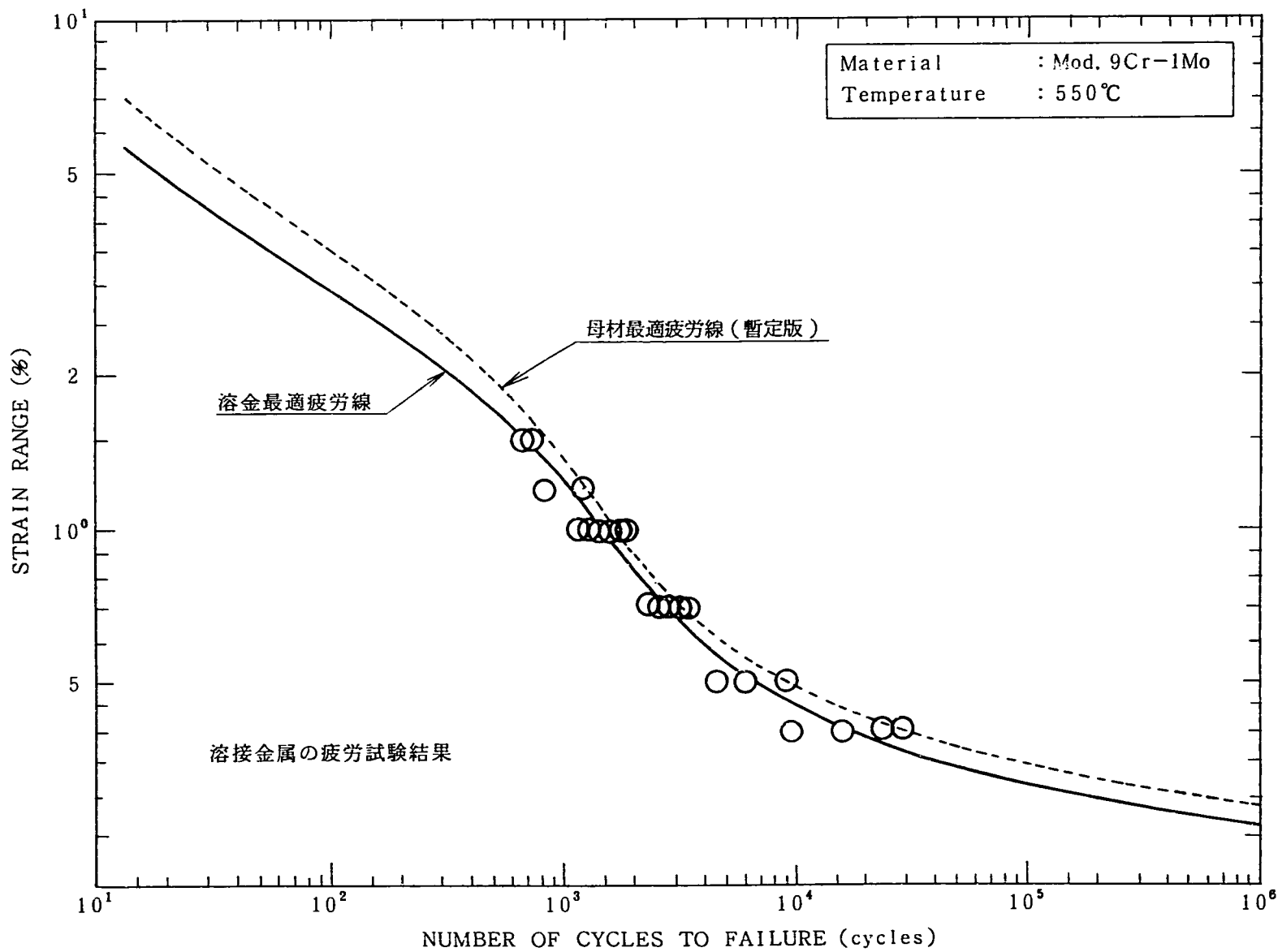


Fig. 3.5 Fatigue Curves of Mod.9Cr-1Mo Base Metal and Weld Metal

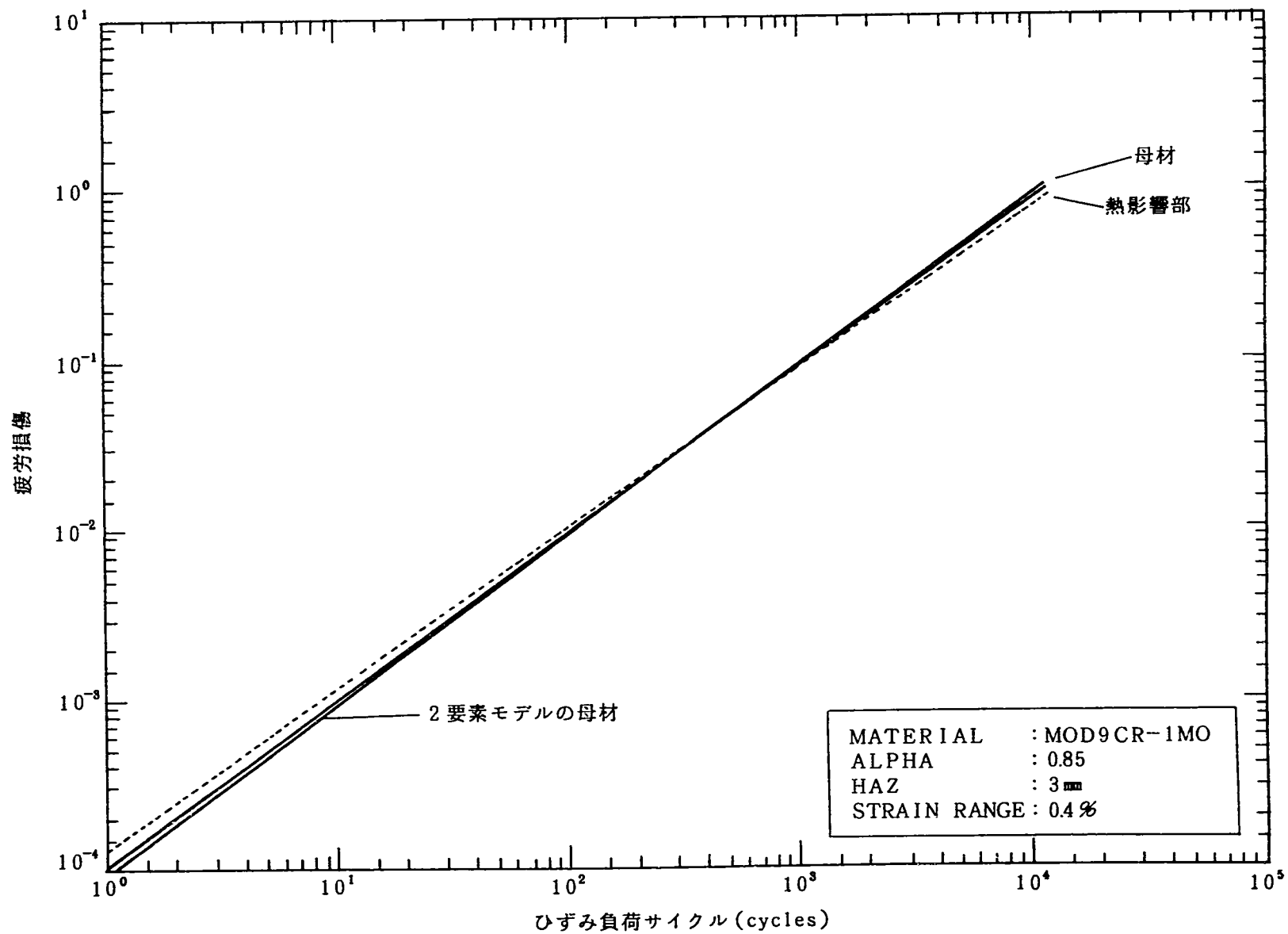
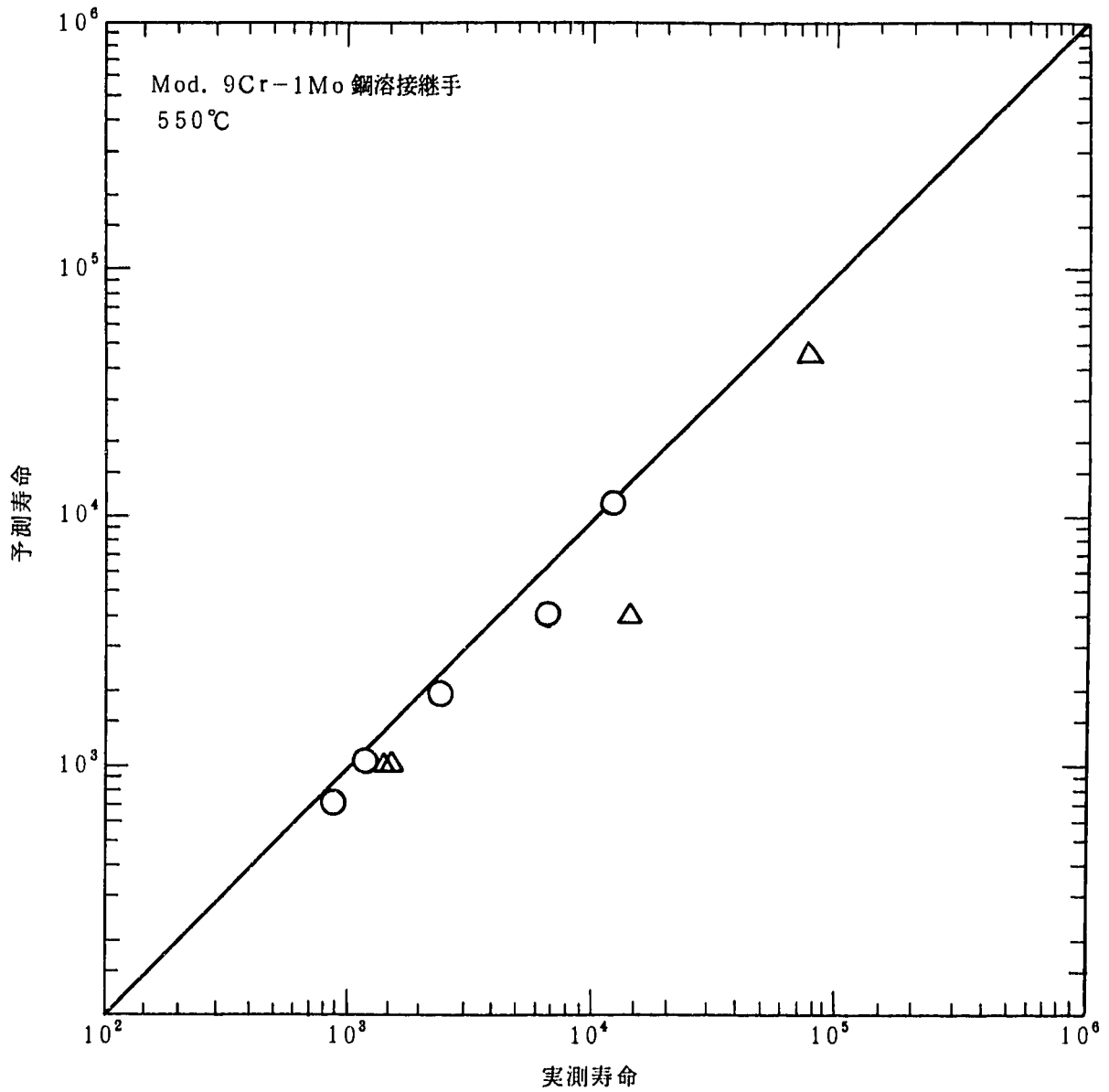


Fig. 3.6 Accumulation of Fatigue Damage



PNC TN9410 92-148

Fig. 4.1 Estimation of Fatigue Life Based on the Method Proposed in this Report

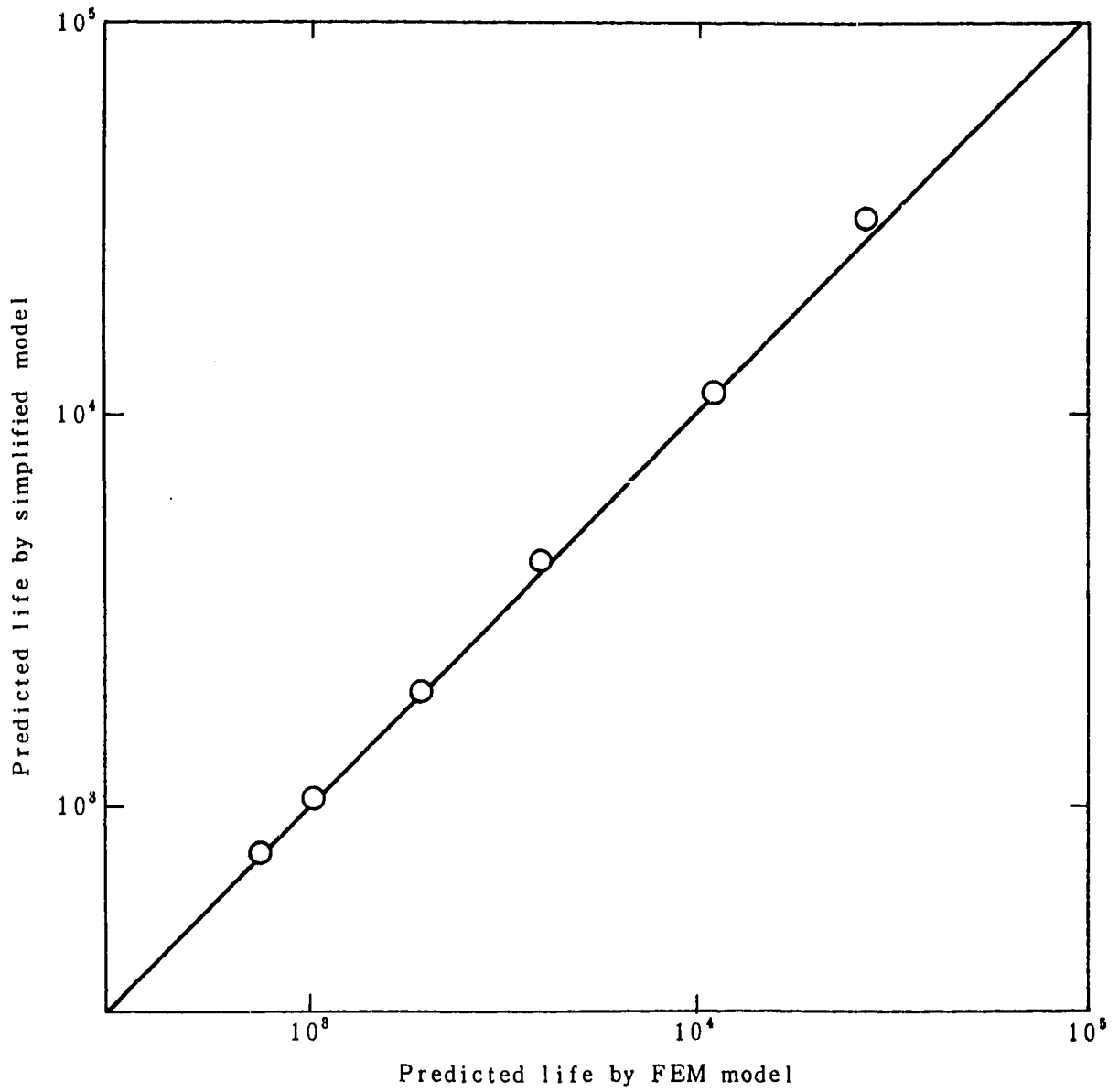


Fig. 4.2 Comparison of Fatigue Life Predicted by FEM Model and by Simplified Model

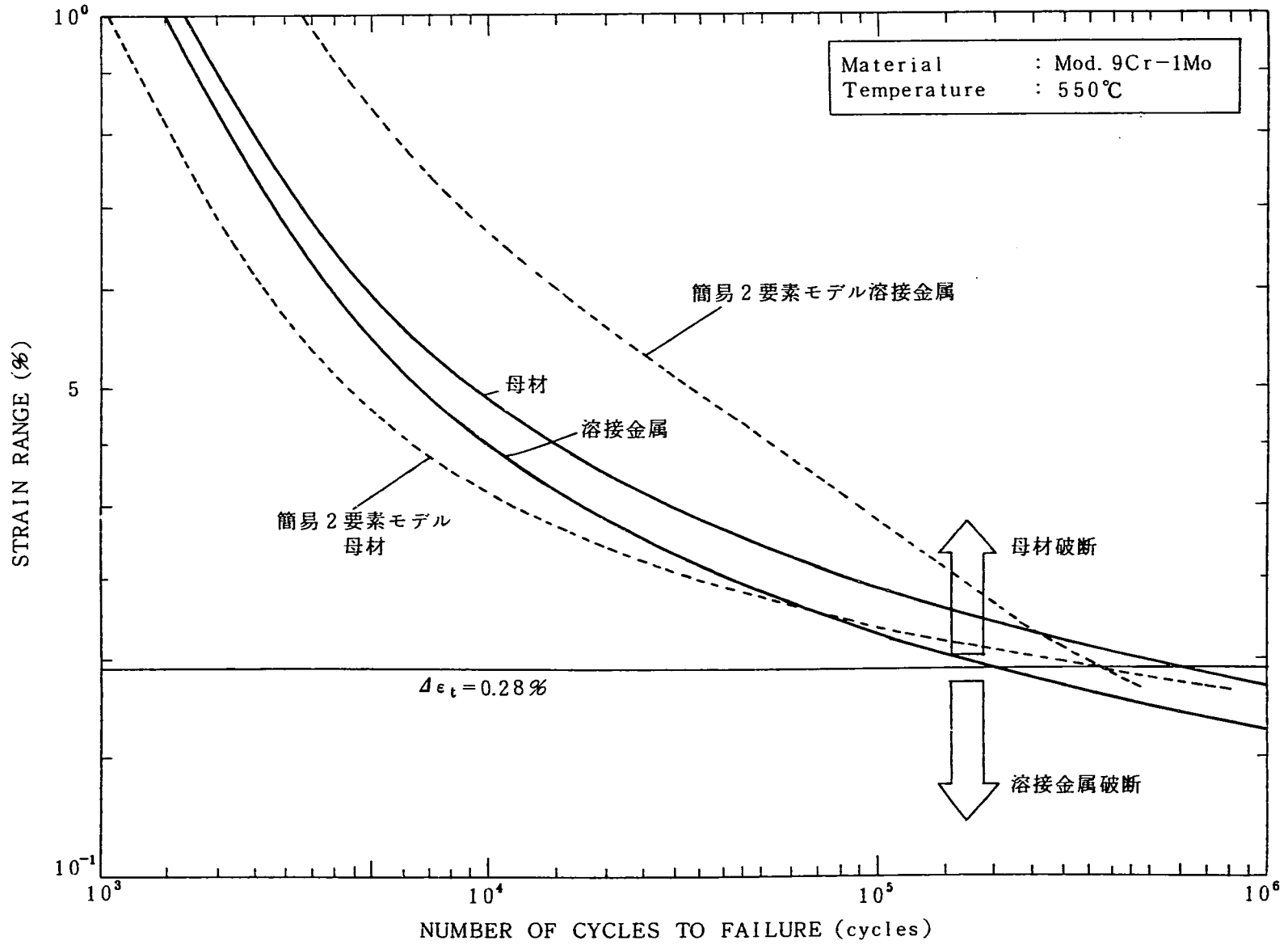
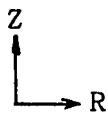
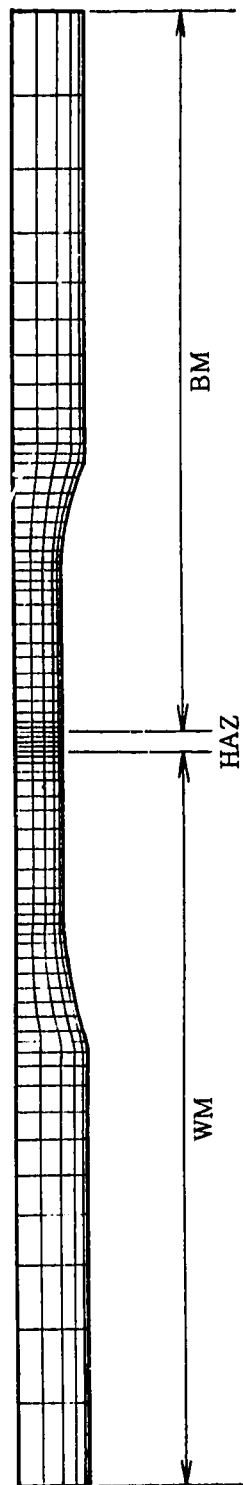


Fig. 5.1 Dependence of Fracture Location on Strain Range

HAZ長さ : 2 m
使用要素 : 8 節点軸対称モデル
降伏応力比
BM : 1.0
HAZ : 0.85
WM : 1.15

全長 150 mm
GL 25 mm



GEOM. SCALE  20.0000

Fig. A1. 1 (1) Mesh Division of Whole Specimen Model(1)

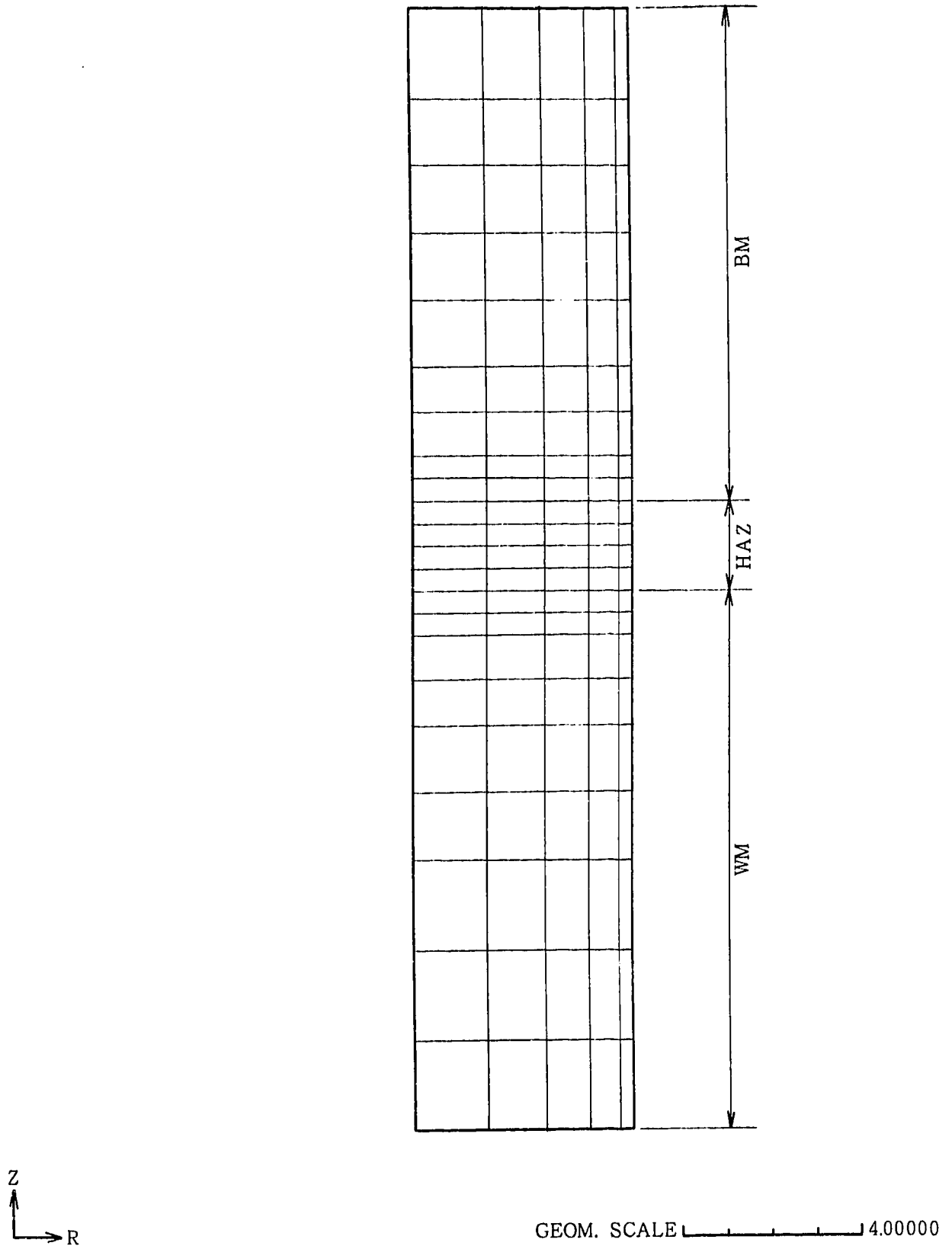


Fig.A1.1(2) Mesh Division of whole Specimen Model(2)

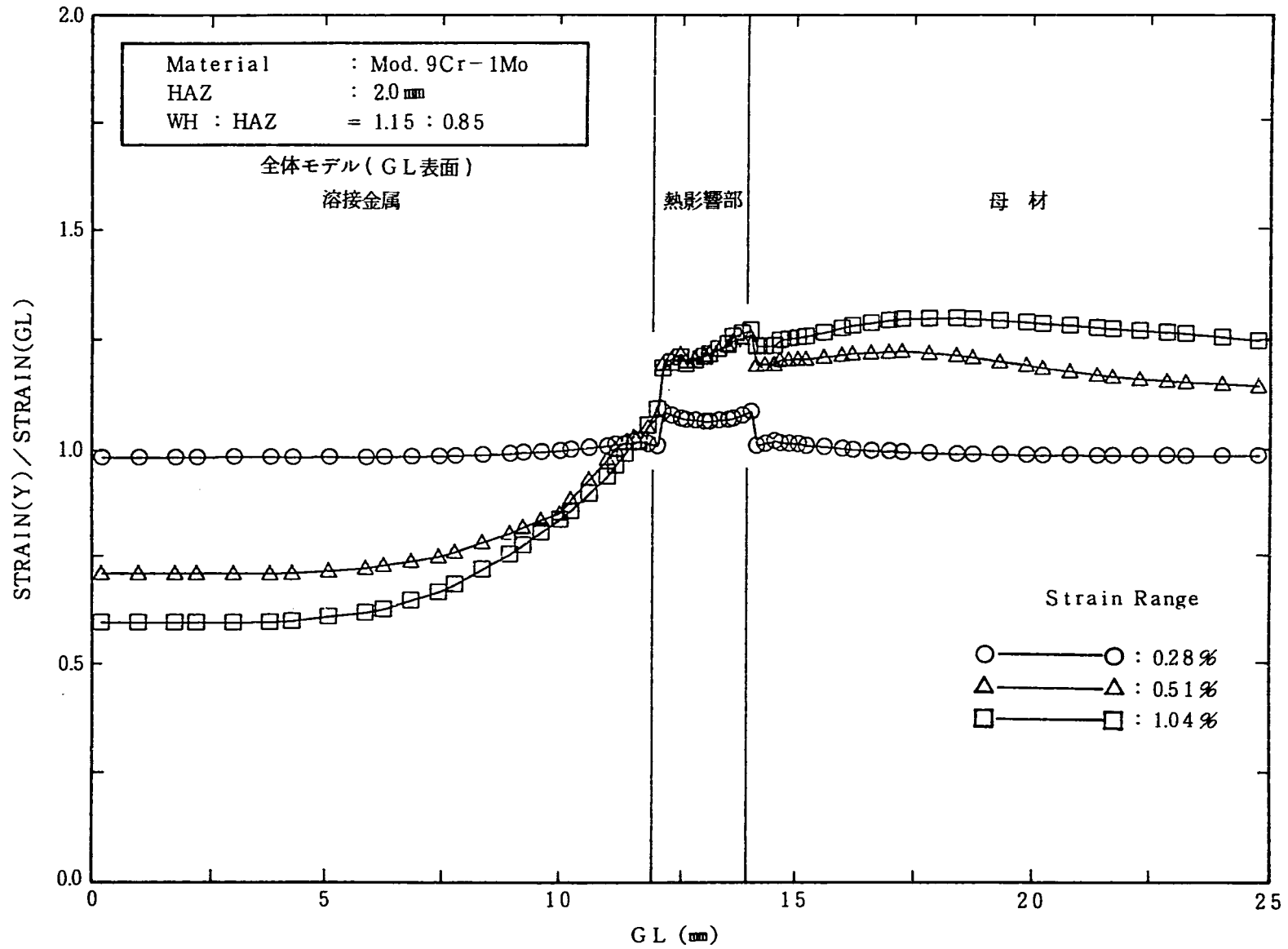


Fig. A1.2 (1) Distribution of Strain Concentration Ratio Analysed by Whole Specimen Model(1)

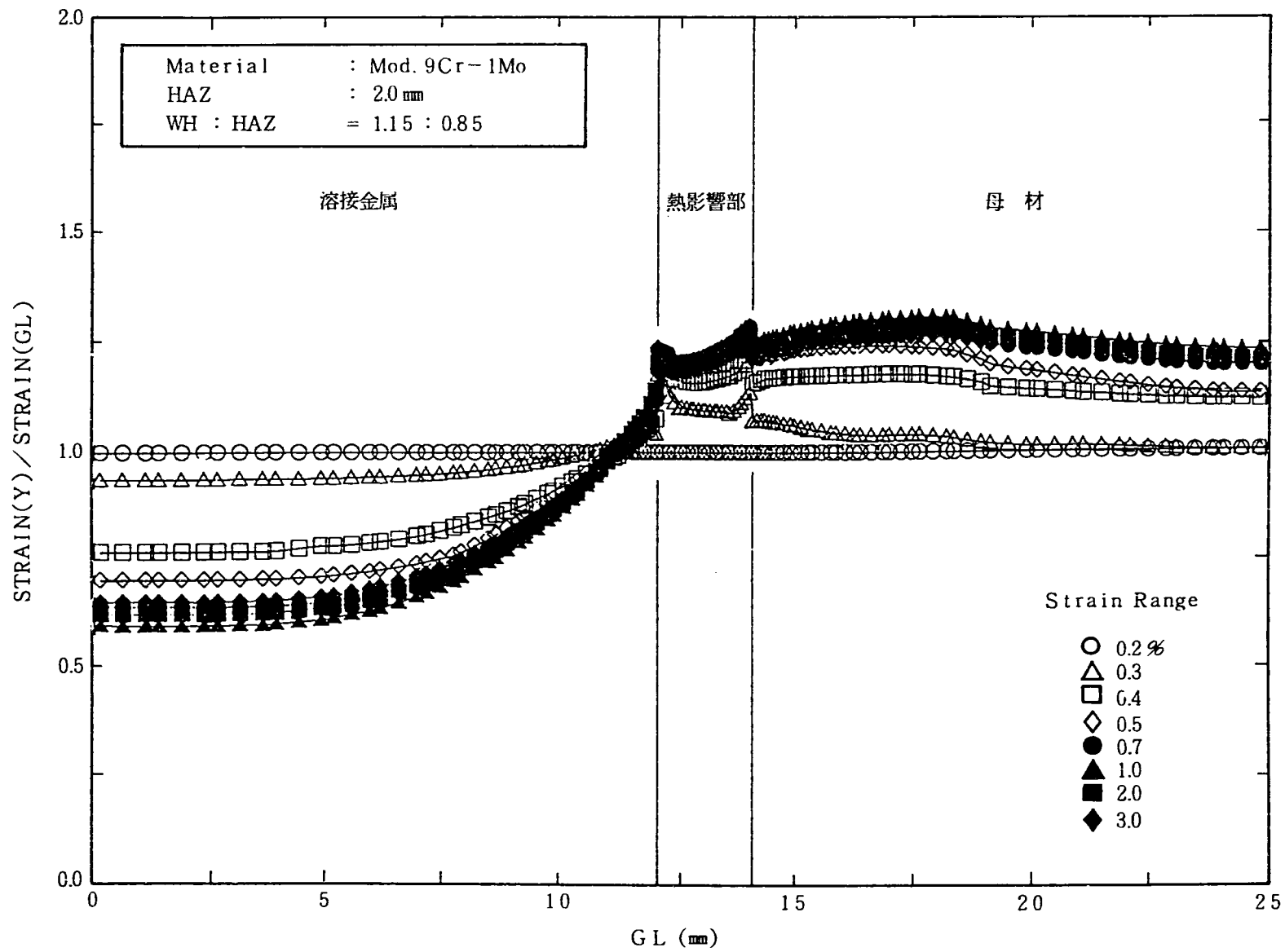


Fig.A1.2(2) Distribution of Strain Concentration Ratio Analysed by GL Model(2)

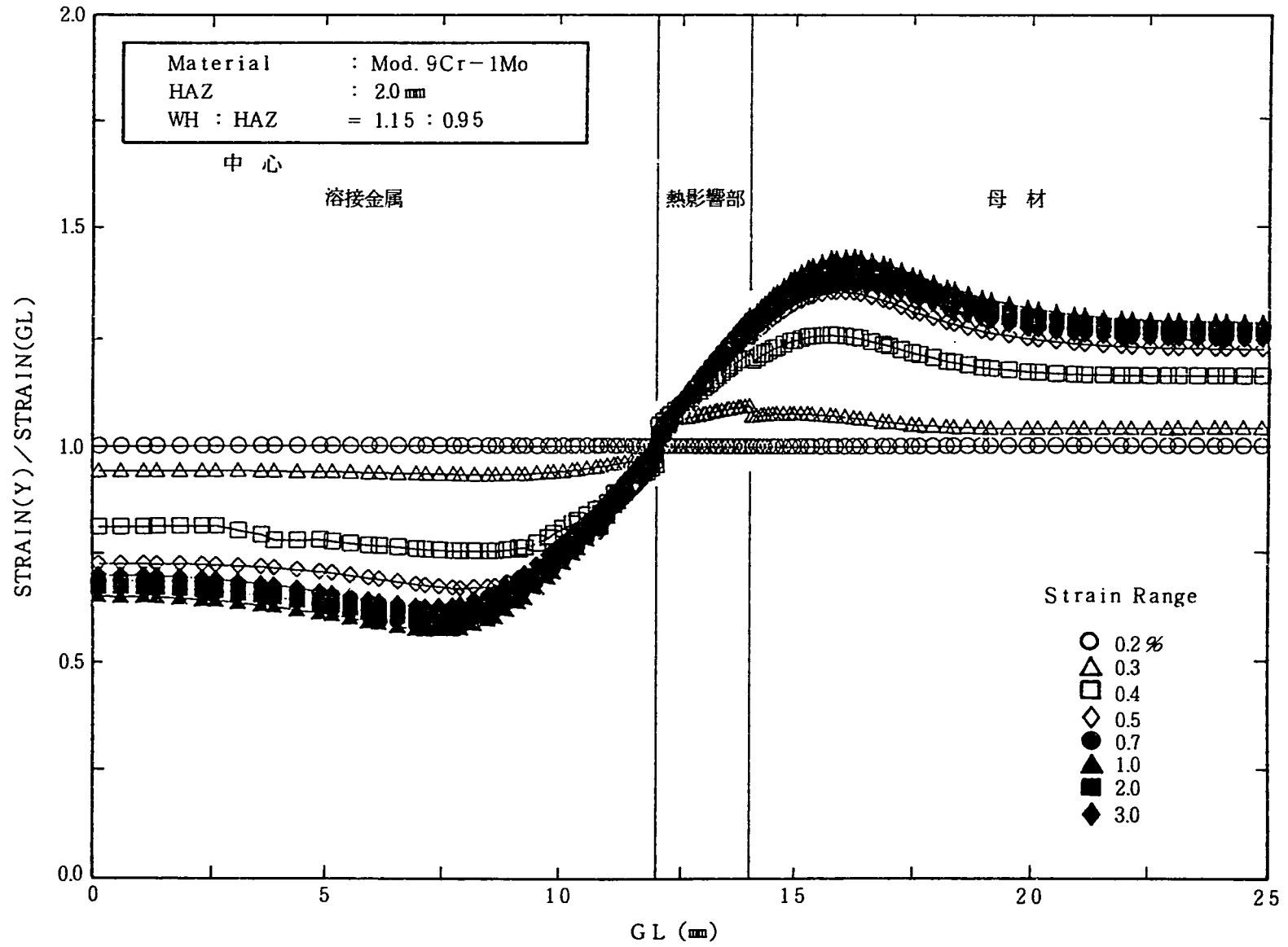


Fig.A2.1(1) Distribution of Strain Concentration Ratio along the Center Axis of the Specimen

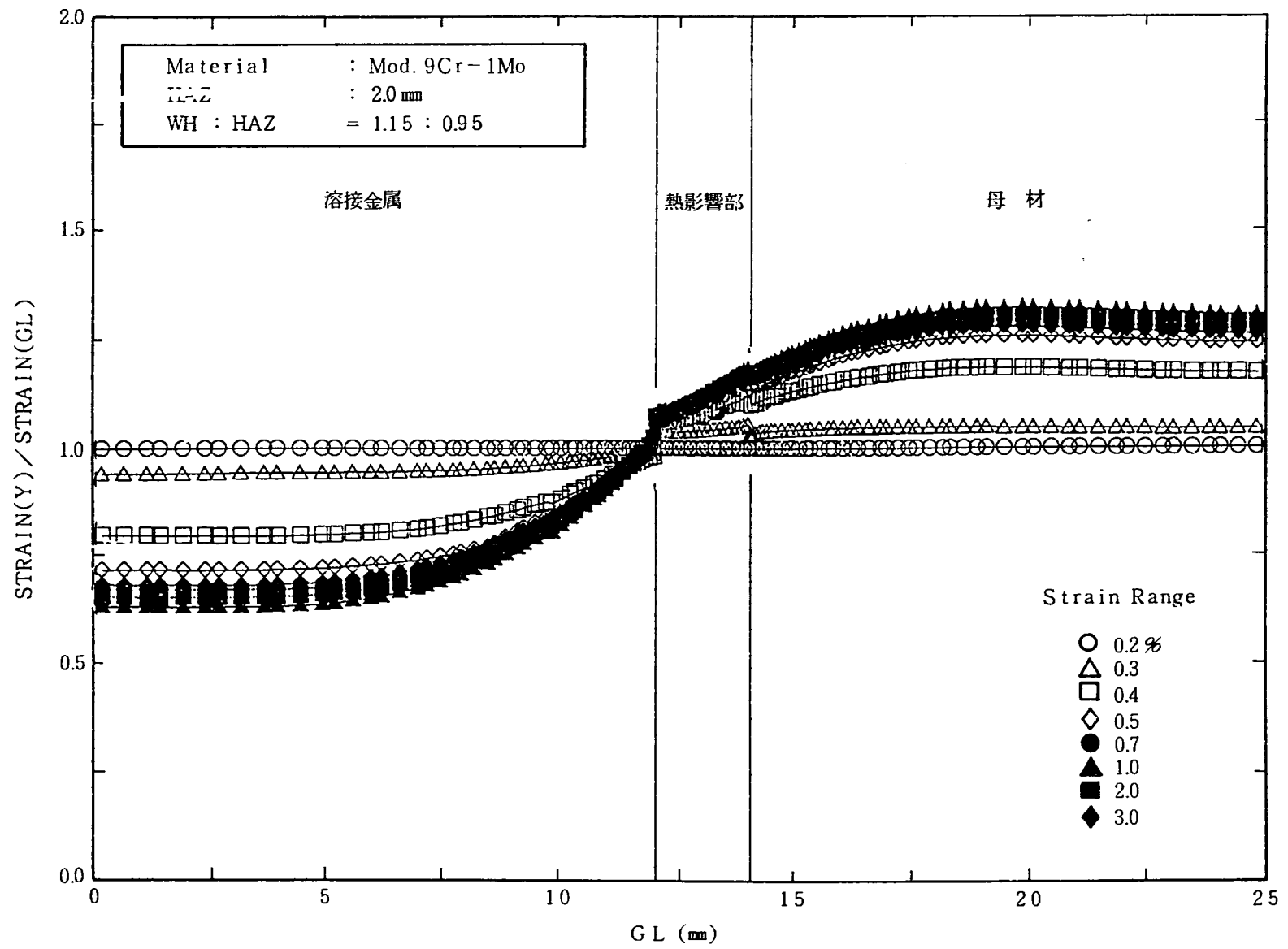


Fig.A2.1(2) Distribution of Strain Concentration Ratio at the Surface of the Specimen under the Same Condition

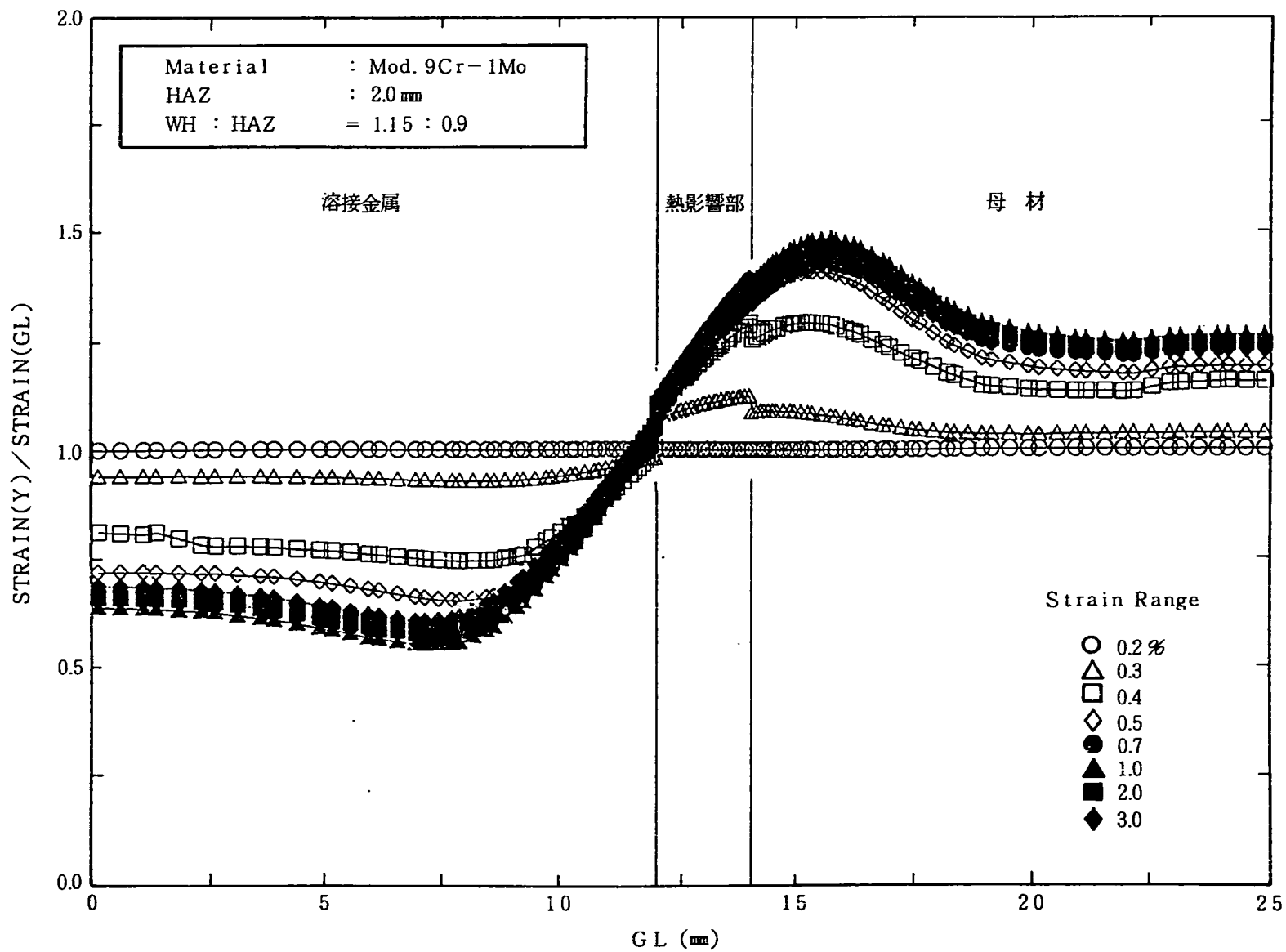


Fig.A 2.1 (3) Distribution of Strain Concentration Ratio along the Center Axis of the Specimen

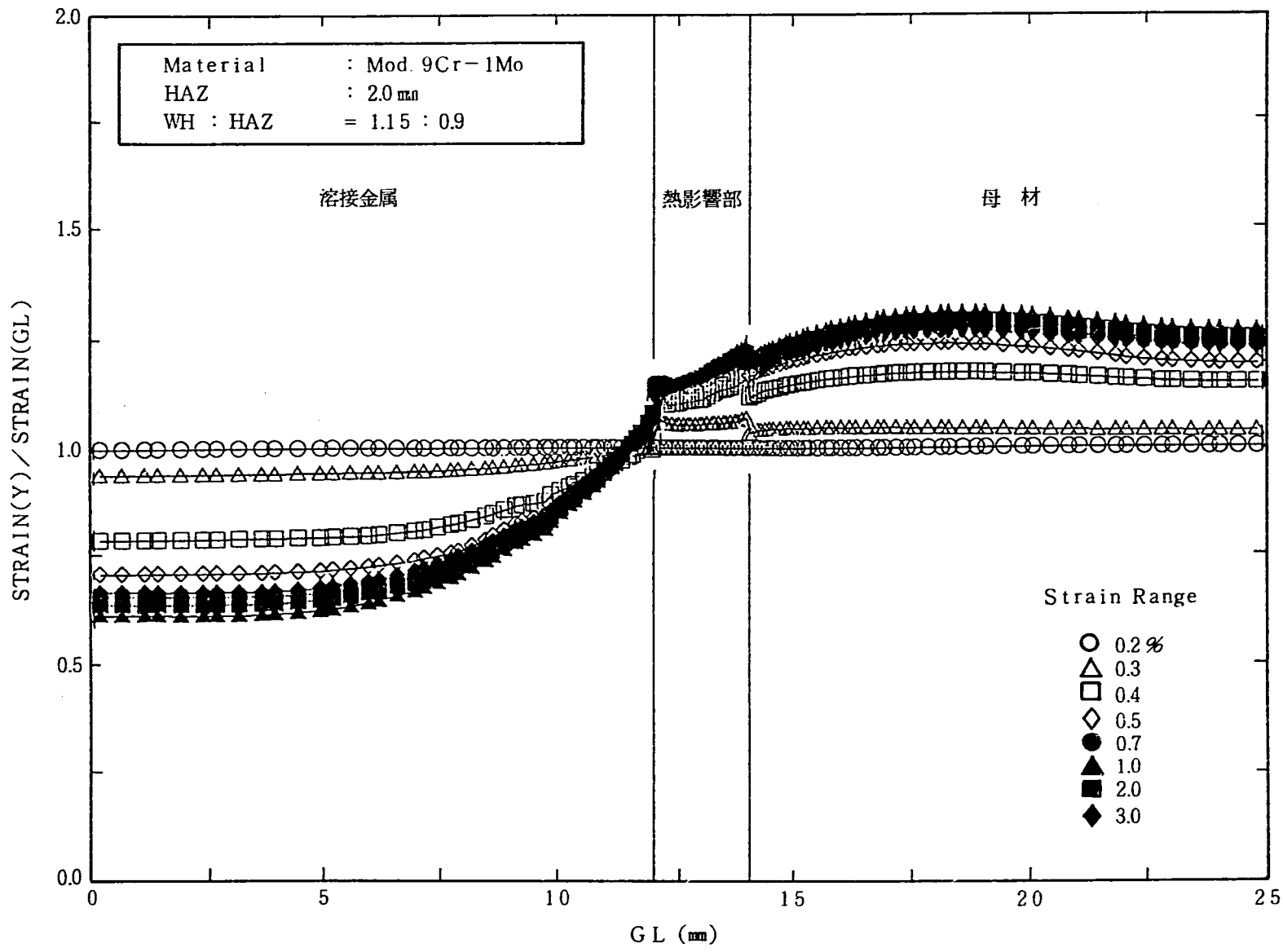


Fig.A2.1(4) Distribution of Strain Concentration Ratio at the Surface of the Specimen under the Same Condition

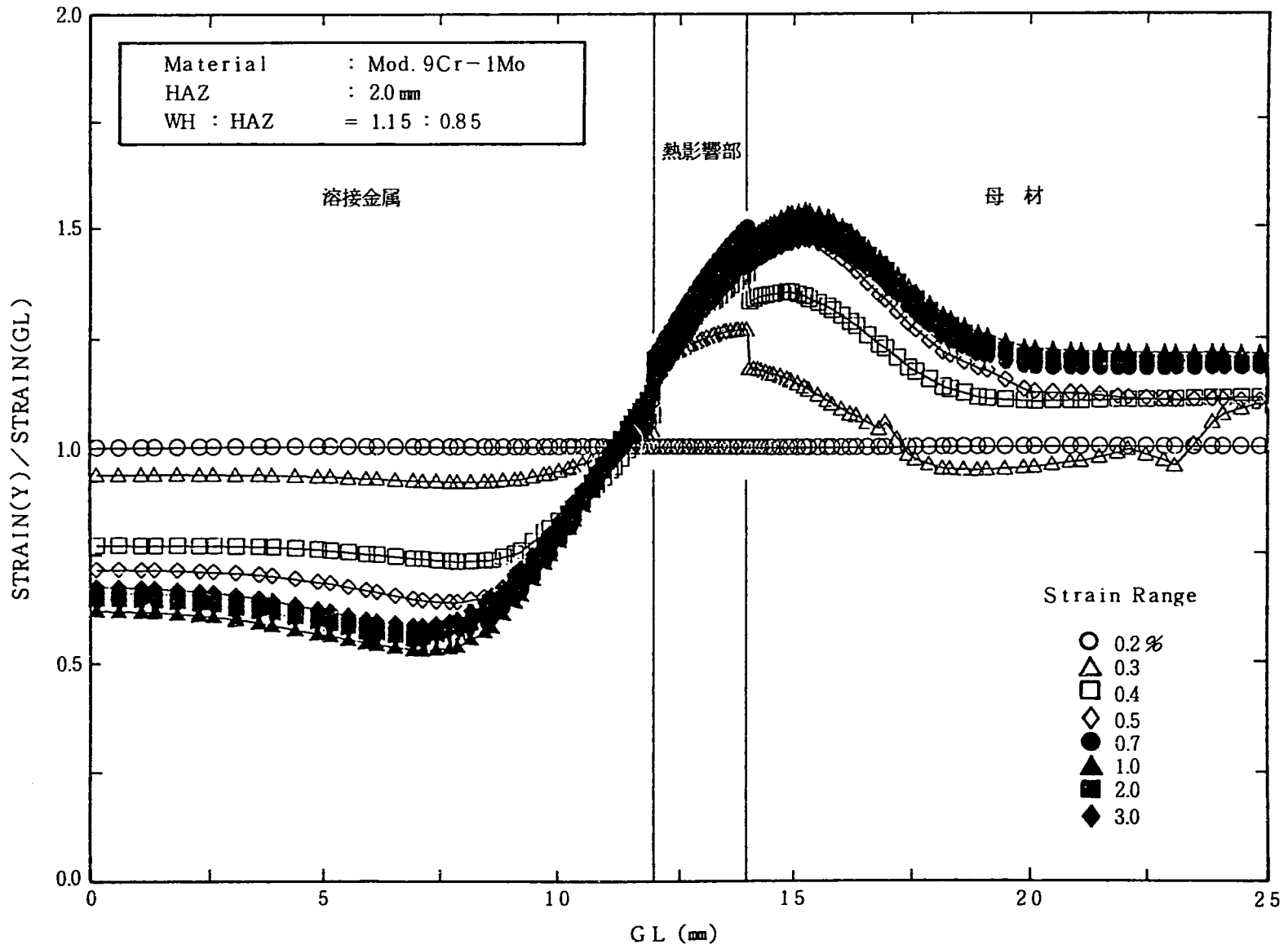


Fig.A2.1(5) Distribution of Strain Concentration Ratio along the Center Axis of the Specimen

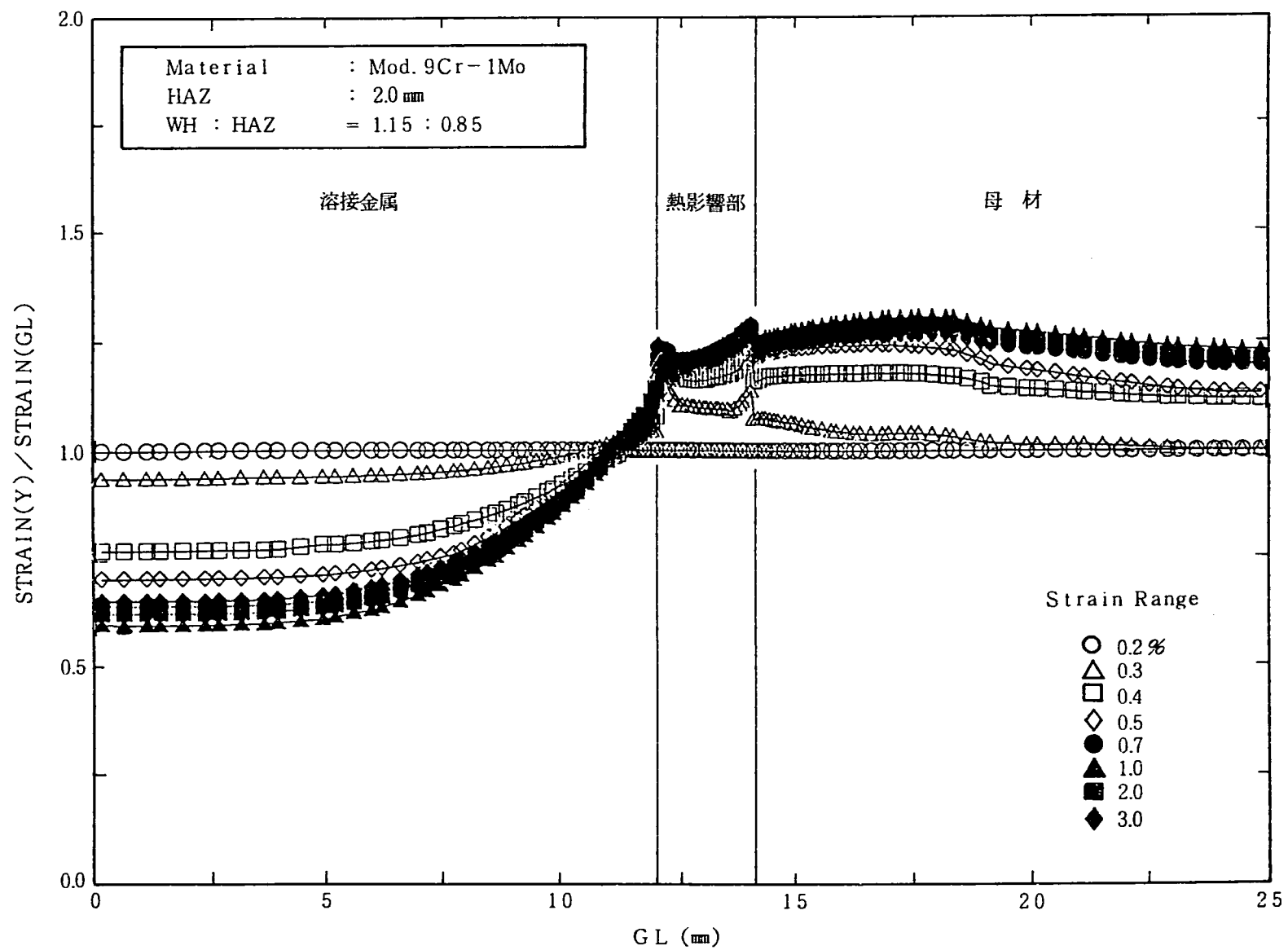


Fig.A2.1(6) Distribution of Strain Concentration Ratio at the Surface of the Specimen under the Same Condition

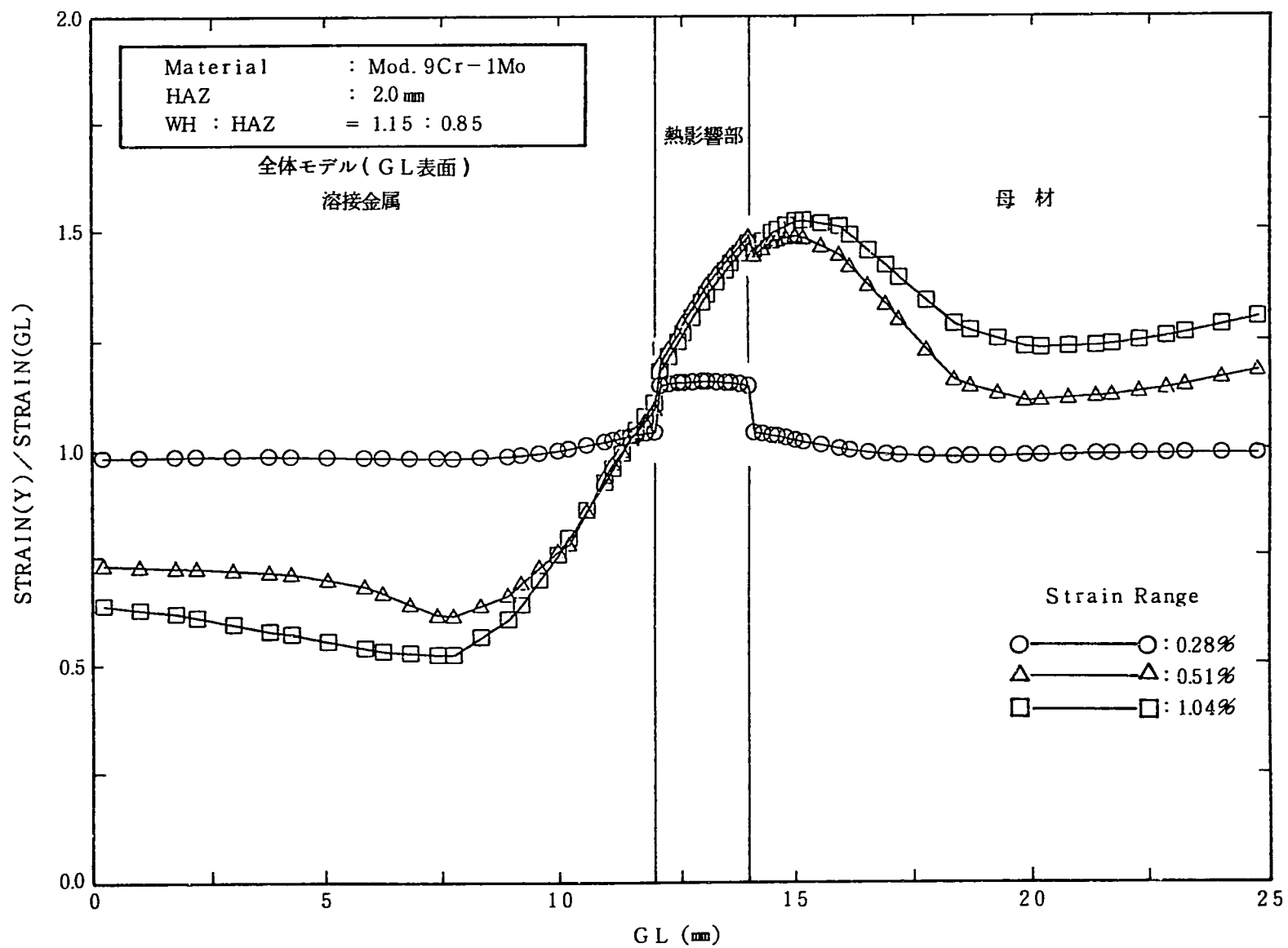


Fig. A.2.1 (6) Distribution of Strain Concentration Ratio along the Center Axis of the Specimen Analysed by Whole Specimen Mode

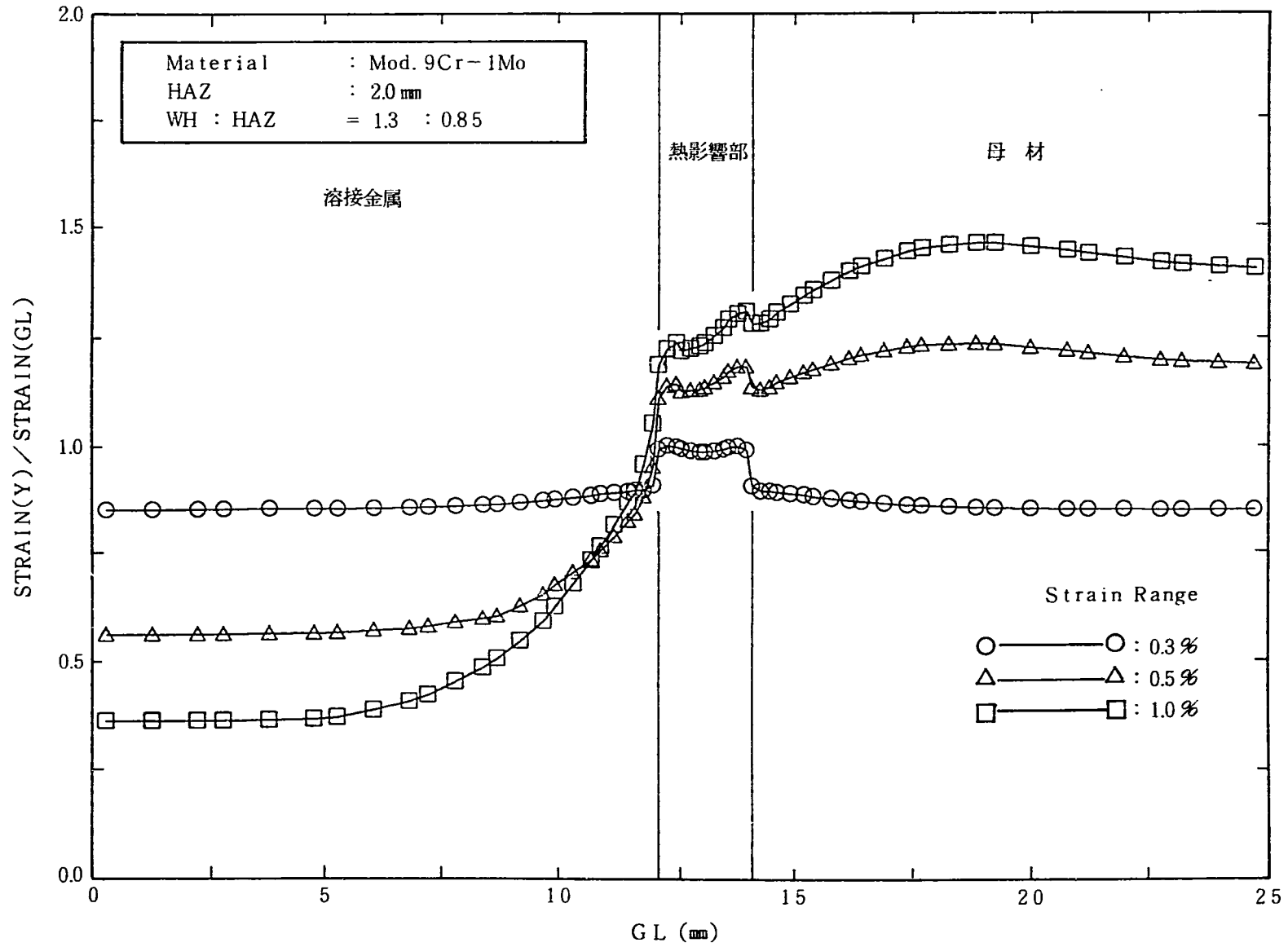


Fig. A3.1 (1) Distribution of Strain Concentration Ratio in terms of the ASME Equivalent Strain Range

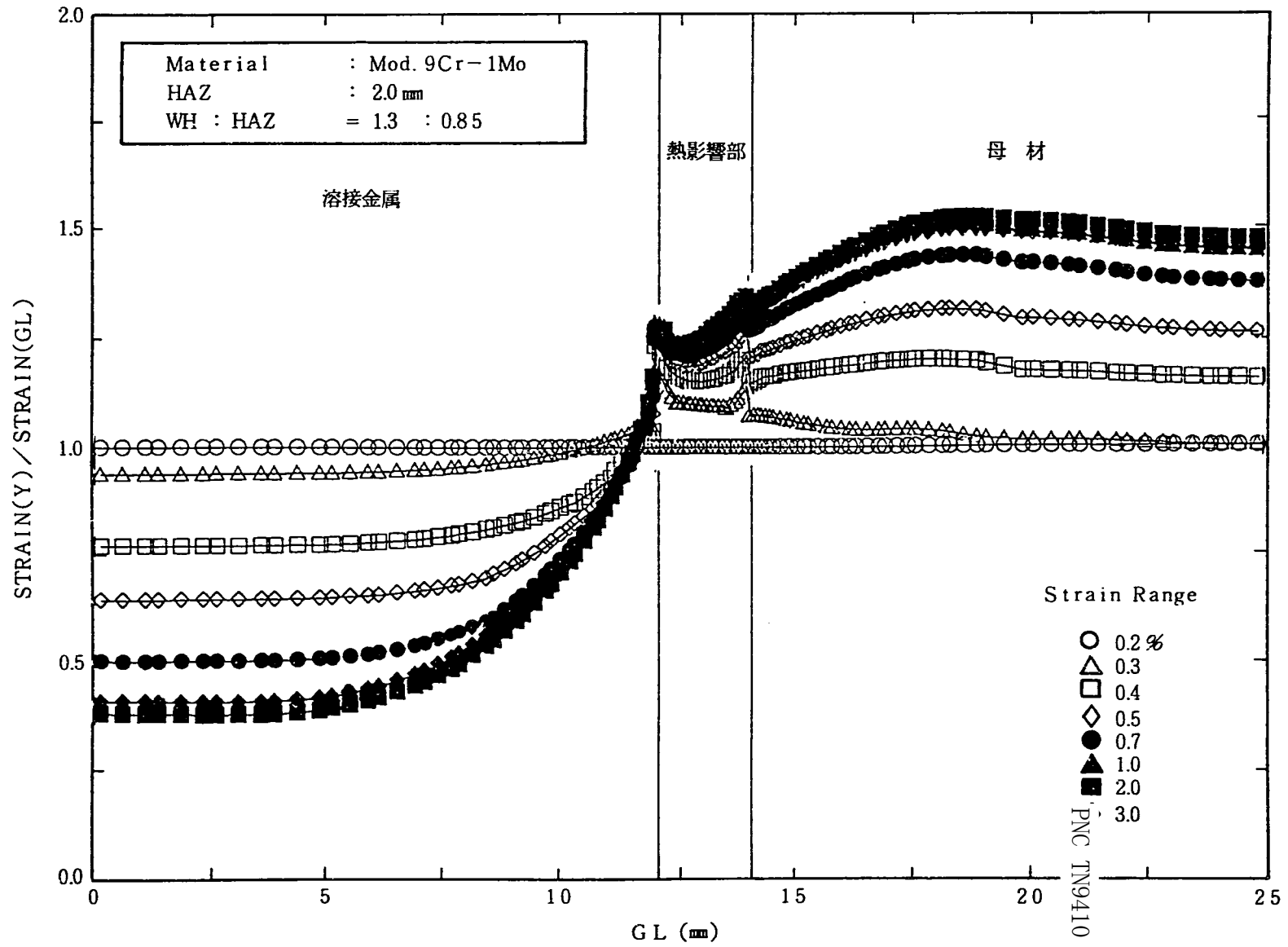


Fig.A3.1(2) Distribution of Strain Concentration Ratio in terms of Axis Strain under the Same Condition