

SUS304溶接継手のクリープ疲労強度評価法の検討

1989年1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)

SUS304溶接継手のクリープ疲労強度評価法の検討

香川裕之* 浅山 泰* 長谷部慎一*

和田雄作* 二瓶 勲*

要 旨

SUS304溶接継手のクリープ疲労強度は、母材や溶接金属単体の場合に比較して著しく低下する場合があります、かつ低下の度合いが継手ごとに大きくバラツク傾向を示している。本報告の目的は、この強度低下とそのバラツキの原因を明らかにし、SUS304溶接継手のクリープ疲労強度評価法に関する知見を得ることにある。

溶接継手の疲労（保持なし）強度は、動的応力－ひずみ関係において、母材や母材硬化部に比べより軟かい溶接金属部にひずみが集中するため、母材や溶接金属単体の場合に比較して低下することが既に報告されている。継手のクリープ疲労強度の低下も、同様のひずみ集中メカニズムに起因することを本報告で明らかにした。更に新しい知見として、(1)継手を構成する母材や溶接金属の動的応力－ひずみ関係がひずみ保持により硬化（動的ひずみ時効）したり軟化（保持軟化）したりするため、その傾向により(2)継手中の溶接金属部へのひずみ集中率が影響され、その結果(3)溶接継手のクリープ疲労強度が大きくバラツクことが明らかとなった。

* 大洗工学センター 機器構造開発部 材料開発室

Creep-Fatigue Evaluation of SUS304 Welded Joint

Hiroyuki Kagawa* Tai Asayama* Sinichi Hasebe*
Yuusaku Wada * Isao Nihei *

Abstract

Recent creep-fatigue experiment for two kinds of SUS304 welded joints revealed that creep-fatigue strength of one welded joint(A) was very low compared with that of base metal or weld metal, while the other welded joint(B) showed almost the same creep-fatigue strength as that of base metal or weld metal. An objective of this study is to clarify the reason of this experimental results.

It was often reported that fatigue (without strain holding) strength of SUS304 welded joint was lower than that of base metal or weld metal, and this lower fatigue strength was due to strain concentration in weld metal region having softer cyclic stress-strain property than base metal. It was found in this study that the lower creep-fatigue strength of the welded joint(A) was due to the same strain concentration mechanism as in the case of fatigue strength. It was also found that, in the case of welded joint(B), softening of cyclic stress-strain property of the base metal region caused by strain holding decreased the strain concentration rate in the weld metal region, and consequently led to almost the same creep-fatigue strength as that of base metal or weld metal.

* Material Development Section, Systems and Component Division, OEC/PNC

目 次

1. はじめに	1
2. SUS304溶接継手のクリープ疲労特性	3
2-1. クリープ疲労寿命	3
2-2. 動的応力-ひずみ関係	4
2-3. 応力緩和量と保持時間の関係	5
2-4. 繰返しに伴う応力挙動	6
3. クリープ疲労強度の評価	7
3-1. 溶接金属部へのひずみ集中	7
3-2. ひずみ範囲-寿命線図上の評価	9
4. まとめと今後の課題	11
謝 辞	13
参考文献	14
付 録 SUS304母材及び溶接金属の保持軟化／動的ひずみ時効挙動	16

図表リスト

表 1. 母材 A7, 溶接金属 N, 溶接継手 A7 + N の 550℃ における疲労 およびクリープ疲労データ	17
表 2. 母材 T, A8, 溶接金属 K, 溶接継手 T + K の 550℃ における疲労 およびクリープ疲労データ	18
表 3. 母材 T, A8, 溶接金属 K, 溶接継手 T + K の 500℃ における疲労 およびクリープ疲労データ	20
表 4. 母材 A7, A8, T および溶接金属 N, K の化学成分 (wt%)	21
表 5. 各材料の動的応力-ひずみ関係の定式化に際して決定された σ_p および A_0 の値	22
表 6. 計算されたひずみ集中度	23
図 1. 母材 A7, 溶接金属 N, 溶接継手 A7 + N の 550℃ における疲労および クリープ疲労強度	24
図 2. 母材 T, A8, 溶接金属 K, 溶接継手 T + K の 550℃ における疲労および クリープ疲労強度	25
図 3. 母材 T, A8, 溶接金属 K, 溶接継手 T + K の 500℃ における疲労および クリープ疲労強度	26
図 4. 母材 A7, 溶接金属 N, 溶接継手 A7 + N の 550℃ における動的応力- 歪関係	27
図 5. 母材 T, A8, 溶接金属 K, 溶接継手 T + K の 550℃ における動的応力- 歪関係	28
図 6. 母材 T, A8, 溶接金属 K, 溶接継手 T + K の 500℃ における動的応力- 歪関係	29
図 7. 母材 A7, 溶接金属 N, 溶接継手 A7 + N の 550℃ における応力緩和量と 保持時間の関係	30

図 8. 母材 T, A8, 溶接金属 K, 溶接継手 T + K の 550℃ における応力緩和量と 保持時間の関係	31
図 9. 母材 T, A8, 溶接金属 K, 溶接継手 T + K の 500℃ における応力緩和量と 保持時間の関係	32
図 10. 母材 A7, 溶接金属 N, 溶接継手 A7 + N の 550℃ における繰返しに伴う 応力挙動	33
図 11. 母材 T, A8, 溶接金属 K, 溶接継手 T + K の 550℃ における繰返しに伴う 応力挙動	34
図 12. 母材 T, A8, 溶接金属 K, 溶接継手 T + K の 500℃ における繰返しに伴う 応力挙動	35
図 13. 母材 A7 の 550℃ における動的応力緩和挙動	36
図 14. 溶接金属 N の 550℃ における動的応力緩和挙動	37
図 15. 溶接継手 A7 + N の 550℃ における動的応力緩和挙動	38
図 16. 母材 T の 550℃ における動的応力緩和挙動	39
図 17. 溶接金属 K の 550℃ における動的応力緩和挙動	40
図 18. 溶接継手 T + K の 550℃ における動的応力緩和挙動	41
図 19. 母材 T の 500℃ における動的応力緩和挙動	42
図 20. 溶接金属 K の 500℃ における動的応力緩和挙動	43
図 21. 溶接継手 T + K の 500℃ における動的応力緩和挙動	44
図 22. 溶接金属および熱影響部から成る 2 要素 1 次元モデルによる歪 集中率評価法	45
図 23. 本報告で用いた歪集中率の計算法	46
図 24. 溶接継手内での溶接金属部への歪集中を考慮して評価した疲労および クリープ疲労強度 (母材 A7, 溶接金属 N, 溶接継手 A7 + N 550℃)	47
図 25. 溶接継手内での溶接金属部への歪集中を考慮して評価した疲労および クリープ疲労強度 (母材 T, A8, 溶接金属 K, 溶接継手 T + K 550℃)	48
図 26. 溶接継手内での溶接金属部への歪集中を考慮して評価した疲労および クリープ疲労強度 (母材 T, A8, 溶接金属 K, 溶接継手 T + K 500℃)	49

付表 A - 1. 母材および溶接金属の 430-650℃における保持軟化／動的歪時効 挙動の定性的傾向	50
付表 A - 2. 母材 A1, A2, A4, A5 の化学成分 (wt%)	51
付図 A - 1. 母材 A7 の 550℃における動的応力緩和挙動	52
付図 A - 2. 溶接金属 N の 550℃における動的応力緩和挙動	53
付図 A - 3. 溶接継手 A7 + N の 550℃における動的応力緩和挙動	54
付図 A - 4. 母材 T の 550℃における動的応力緩和挙動	55
付図 A - 5. 溶接金属 K の 550℃における動的応力緩和挙動	56
付図 A - 6. 溶接継手 T + K の 550℃における動的応力緩和挙動	57
付図 A - 7. 母材 T の 500℃における動的応力緩和挙動	58
付図 A - 8. 溶接金属 K の 500℃における動的応力緩和挙動	59
付図 A - 9. 溶接継手 T + K の 500℃における動的応力緩和挙動	60

1. はじめに

SUS304溶接継手は、材料特性の視点から大別して母材部、溶接金属部及びこの両者の間に位置する母材硬化部（溶接時の熱ひずみで硬化した部分）の3領域に区分することができ、一般にこれら3領域の挙動特性に有意な差異が認められる。このため変位制御型荷重が負荷されると上記の3領域のうちの最弱部に相対的ひずみ集中を生じ、母材や溶接金属単体の場合に比較して強度低下を示す場合がある。この様に一種の複合材料である溶接継手の強度評価を行う際には、(1)各領域の単体での強度特性を把握しその差異を明確にし、次に(2)継手構造を各領域に分割したモデル化を行い継手全体としての評価を行う手法がしばしば用いられている。

母材、溶接金属及び母材硬化部の単体での疲労特性の差異を簡単にまとめると以下の通りである。

- (1) 溶接金属単体の疲労寿命は、SAW, TIG, SMAWいずれの溶接施工法においても、母材と同等である。一方母材硬化部の疲労寿命に関しては、現在のところデータが無く不明であるが、予ひずみ材のデータ等から判断して母材と同等と予想される。
- (2) 繰返し負荷に対する溶接金属の動的応力-ひずみ関係は母材より軟かい。一方、母材硬化部の動的応力-ひずみ関係は、データ数が少なく明確ではないが、母材より若干硬い傾向が示されている。

溶接継手の疲労寿命は（本報では負荷方向と溶接線が直交する横継手が溶接金属部を内部に含むゲージ長間でひずみ制御負荷される場合を考える）母材や溶接金属単体の場合に比較して低下し、かつこの疲労寿命低下が動的応力-ひずみ関係の最も軟かい溶接金属部へのひずみ集中に主として起因することが既に報告されている。^{1)~6)} ひずみ保持を伴うクリープ疲労負荷の場合にも、溶接継手の寿命は、同様のひずみ集中により母材や溶接金属に比較して低下する可能性が考えられる。しかしながらクリープ疲労負荷においては、ひずみ保持により動的応力-ひずみ関係が硬化（動的ひずみ時効）したりもしくは軟化（保持軟化）したりする場合があります。このためひずみ集中メカニズムは連続サイクル（疲労）負荷の場合より複雑なものとなる。

本報告では、SUS304溶接継手のクリープ疲労強度評価法の検討を試みた。まず第2章で、本評価の対象とした2種類のSUS304溶接継手のクリープ疲労特性を、継手を構成する母材や溶接金属単体の特性と比較して示した。次に第3章で、主として溶接金属部へのひずみ集中の観点から、溶接継手のクリープ疲労強度評価を行った結果を示した。

2. SUS304溶接継手のクリープ疲労特性

表1～表3に、本報で評価の対象とした疲労及びクリープ疲労データの一覧を示す。⁴⁾
 表1中データNo.1～17は圧延母材（符号：A7），No.18～25はN社製溶接金属（符号：N），No.26～31はA7材とN材の組合せによる継手材（符号：A7+N）の550℃における試験結果の概要をそれぞれ示している。また表2中のNo.32は鍛鋼母材（符号：T），No.60～69はK社製溶接金属（符号：K），No.70～75はT材とK材の組合せによる継手材（符号：T+K）の550℃におけるデータを示している。なおT材の550℃でのデータが1点しかないため、別ヒートの鍛鋼母材（符号：A8）もT材と同様の強度特性を示すと仮定して本報の検討にあわせて用い、そのデータを表2中のNo.33～59に示した。表3にはT材，A8材，K材，T+K材の500℃での試験結果を示した。なお表4に、母材A7，T，A8，及び溶接金属N，K材の化学成分を示す。

表1～表3に示す試験結果は、いずれもひずみ制御タイプの疲労及びクリープ疲労試験結果でありゲージ長は15～25mmである。またひずみ保持過程を除く期間のひずみ速度は全て0.1%/秒に統一されている。溶接金属及び溶接継手試験片は全て狭開先TIG溶接継手から採取されている。溶接継手試験片は全て負荷方向と溶接線方向が直交（横継手）するよう採取されており、ゲージ長に占める溶接金属部の比率は0.3～0.4程度であり、またゲージ長に占める他の領域は全て母材硬化部であると考えられる。

2-1. クリープ疲労寿命

A7，N，A7+N材の550℃における疲労及びクリープ疲労データを、ひずみ範囲と寿命の関係で図1に示す。図中黒印で示す溶接金属N材の疲労及びクリープ疲労寿命は、図中白印で示す母材A7の寿命とほぼ同一線上に示される。これに対し図中半黒印で示す溶接継手A7+N材では、疲労寿命は母材や溶接金属に比較して低下する傾向を示すものの、保持時間1時間以上のクリープ疲労寿命は母材や溶接金属とほぼ同等にプロットされている。

T，A8，K，T+K材の550℃におけるひずみ範囲と寿命の関係を図2に示す。溶接金属K材の疲労及びクリープ疲労寿命と母材A8及びT材の寿命には有意差は認められな

い。溶接継手 T + K 材の疲労寿命は、A7 + N 材の場合と同様、母材や溶接金属に比較して短寿命側に示される。一方 T + K 材のクリープ疲労寿命は、A7 + N 材とは異なり、母材や溶接金属に比較して低下しており、特に 1 時間保持の場合には連続サイクル（疲労）の場合以上の大幅な寿命低下を示している。

T, A8, K, T + K 材の 500℃ におけるひずみ範囲－寿命関係を図 3 に示す。溶接継手 T + K 材では疲労及びクリープ疲労寿命とも、母材や溶接金属に比較して短寿命側にプロットされている。特に 1 時間保持の場合には、データ点が 1 点しかないため明確ではないが、母材や溶接金属に比較して 1 桁近い寿命低下を示している。

2-2. 動的応力－ひずみ関係

A7, N, A7 + N 材の 550℃ での動的応力－ひずみ関係を図 4 に示す。図中白印で示す母材 A7 の動的応力－ひずみ関係は、保持時間が増すに従って低下し、保持軟化傾向を示している。一方図中黒印で示す溶接金属 N 材の動的応力－歪関係は、保持時間の有無にかかわらずほぼ同一線上にプロットされている。図中半黒印で示す溶接継手 A7 + N 材の動的応力－ひずみ関係は、連続サイクル（疲労）の場合には母材とほぼ同一線上に示され、保持時間 1 時間以上のクリープ疲労の場合には母材より高応力側に位置している。図中の破線と実線は、母材と溶接金属の動的応力－ひずみ関係を暫定的に定式化した結果を示している。母材 A7 の定式化は連続サイクル（疲労）データ、保持時間 0.1 時間のクリープ疲労データ、保持時間 1～10 時間のクリープ疲労データ（No.12 のデータは、応力範囲が著しく低く、かつ応力緩和挙動にも異常が認められたため、定式化に用いるデータから除外した）の 3 データ群に分けて行った。一方溶接金属 N 材では、連続サイクル（疲労）及びクリープ疲労の全データをまとめて定式化した。定式化は Ludwik タイプの(1)式を基に、パラメータ σ_p と A_0 を実験データにベストフィットする様決定することにより行った。

$$\log (\Delta \sigma - 2 \sigma_p) = A_0 + A_1 \log (\Delta \varepsilon - \Delta \sigma / E) \quad (1)$$

ここで σ_p と A_0 以外のパラメータは、母材及び溶接金属に関して策定されている基本材料特性式^{(1) (2)} の値をそのまま用いた。決定された σ_p と A_0 の値を表 5 に示す。

T, A8, K, T + K 材の 550℃ での動的応力-歪関係を図 5 に示す。母材 A8 の動的応力-ひずみ関係は、保持時間の有無にかかわらずほぼ同一線上に示される。一方溶接金属 K 材の動的応力-ひずみ関係は N 材とは異なり、保持時間の導入によって低下し保持軟化傾向を示している。母材 T 材のデータが 1 点しかないため明確ではないが、溶接継手 T + K 材の動的応力-ひずみ関係は T 材と同程度のようなものである。母材 A8 の動的応力-ひずみ関係の定式化は、連続サイクル（疲労）及びクリープ疲労の全データをまとめて、図 4 と同様の方法で行った。一方溶接金属の動的応力-ひずみ関係の定式化にあたっては、連続サイクル（疲労）と保持時間 0.1 時間のクリープ疲労データをまとめて第 1 群とし、保持時間 1 時間のクリープ疲労データを第 2 群とすることにより行った。第 1 群の定式化は図 4 と同様 σ_p と A_0 を決定することにより行ったが、第 2 群ではデータ数が少ないため、第 1 群の A_0 の値をそのまま用い σ_p のみを変えることにより行った。決定された σ_p と A_0 の値を表 5 に示す。

T, A8, K, T + K 材の 500℃ での動的応力-ひずみ関係を図 6 に示す。母材 A8 の動的応力-ひずみ関係は、保持時間が増すに従って高くなり動的ひずみ時効を示している。A8 材の動的応力-ひずみ関係の定式化は、連続サイクル（疲労）、保持時間 0.17 時間のクリープ疲労、保持時間 1 時間のクリープ疲労の 3 群に分け、図 4 と同様の方法で行った。溶接金属 K 材の動的応力-ひずみ関係の定式化は、データ点数が少ないため信頼性に乏しいが、2 データを合わせて図 4 と同様の方法で行った。決定された σ_p と A_0 の値を表 5 に示す。

2-3. 応力緩和量と保持時間の関係

母材、溶接金属と溶接継手の応力緩和挙動の差異を調べる目的で、応力緩和量と保持時間の関係を図 7～図 9 にプロットした。応力緩和量は一般的には緩和開始応力 σ_{max} が高い程大きくなるため、図の縦軸には応力緩和量を無次元化した値 $(\sigma_{max} - \sigma') / \sigma_{max}$ を用いた。ここで σ' は緩和終了応力である。応力緩和挙動を $(\sigma_{max} - \sigma') / \sigma_{max}$ で代表して表現できるかどうかについての考察は本報では行っていないが、とりあえず応力緩和挙動の差異を定性的にチェックする目的で図 7～図 9 を示した。

図7はA7, N, A7+N材の550℃での応力緩和量と保持時間の関係を, 図8はT, A8, K, T+K材の550℃での関係を, また図9はT, A8, K, T+K材の500℃での関係をそれぞれ示している。バラツキが大きく明確な結論を出すことは困難であるが, いずれの図においても母材, 溶接金属, 溶接継手の応力緩和量の間に明確な差異は認められない。

2-4. 繰返しに伴う応力挙動

母材, 溶接金属及び溶接継手の緩和開始応力 σ_{max} , 緩和終了応力 σ' と繰返し数 N との関係を, ひずみ範囲 $\Delta \epsilon = 1\%$, 保持時間 $t_H = 1$ 時間のデータで代表して図10～図12に示す。図中には同じ符号のプロットが2種類示されているが, 高応力側のプロットが σ_{max} 低応力側のプロットが σ' をそれぞれ示している。なお図中 σ_{max} と σ' のプロットは, $\frac{1}{2} N_f$ 近傍の繰返し数で打ちきっている。

母材では最初の数10サイクルから100サイクル程度で急激に繰返し硬化し, これに伴って応力緩和量が増大する傾向が認められる。一方溶接金属は繰返し軟化挙動を示し, これに伴って応力緩和量が減少する傾向を示している。これらに対し溶接継手では, 最初の数サイクル程度まで繰返し硬化し, その後ゆるやかに繰返し軟化する傾向を示している。

図10～図12に示した9データに関し, 繰返しに伴う動的応力緩和挙動の変化を図13～図21にそれぞれ示す。また図13～図21に示したのと同じ動的応力緩和データを, 時間に対して対数表示を用いてプロットした結果を付図A-1～付図A-9に示す。母材, 溶接金属及び溶接継手とも, 歪保持開始後1分以内に急激に応力緩和し(付図A-1～付図A-9を詳細に観察すると, 最初の1分間の応力緩和量のうち半分の応力緩和が歪保持開始後3秒程度以内に終了している), その後応力緩和率は次第に低下している。

3. クリープ疲労強度の評価

3-1. 溶接金属部へのひずみ集中

第2章の冒頭で述べた様に、本報の評価対象である溶接継手ではゲージ間は溶接金属と母材硬化部から成る2種材料であると考えられる。そこで、従来の方法に従い¹¹⁻⁶⁾、¹²⁾、図22に模式的に示す様に溶接継手のゲージ間を溶接金属(W)と母材硬化部(H)が直列に連結されている一次元モデルにおきかえ、溶接金属部のひずみ集中を考えることにする。ここで ℓ_w は溶接金属部の長さ ℓ_h は母材硬化部の長さ(ゲージ長 $GL = \ell_w + \ell_h$)である。図中の σ_w 、 σ_h を溶接金属及び母材硬化部の動的応力-ひずみ関係とし、試験片のゲージ間に負荷されるひずみ範囲を $\Delta \epsilon_j$ 、またこのときの応力範囲を $\Delta \sigma_j$ とする。溶接金属部と母材硬化部には同じ応力範囲 $\Delta \sigma_j$ が負荷されており、このときの溶接金属部及び母材硬化部のひずみ範囲をそれぞれ $\Delta \epsilon_w$ 、 $\Delta \epsilon_h$ とすると、

$$\ell_w \Delta \epsilon_w + \ell_h \Delta \epsilon_h = (\ell_w + \ell_h) \Delta \epsilon_j \quad (2)$$

(2)式を変形すると

$$(\Delta \epsilon_w - \Delta \epsilon_j) / (\Delta \epsilon_j - \Delta \epsilon_h) = \ell_h / \ell_w \quad (3)$$

従って図中の $BC : AB = \ell_h : \ell_w$ となるよう、溶接金属部にひずみ集中が生じる。

溶接金属部と母材硬化部の動的応力-ひずみ関係が既知であれば上記の方法に従って溶接継手内の溶接金属部へのひずみ集中を計算することができる。しかしながら緒言でも述べた様に、母材硬化部の動的応力-ひずみ関係は現在のところ明確にはされておらず、従って図22に示す方法をそのまま用いて溶接金属部へのひずみ集中率を計算することは現状では困難である。そこで本報では、図23に示す様に、溶接金属の動的応力-ひずみ関係だけから溶接金属部へのひずみ集中率を求める方法を用いた。即ち溶接継手のゲージ間に負荷されるひずみ範囲を $\Delta \epsilon_j$ としこのときの応力範囲を $\Delta \sigma_j$ とするとき、溶接金属部にも当然 $\Delta \sigma_j$ の応力範囲が負荷されているため、溶接金属の動的応力-ひずみ関係上で応力範囲 $\Delta \sigma_j$ に対応するひずみ範囲 $\Delta \epsilon_w$ が溶接金属部に生じていると考える方法である。

図23に示す方法を用いて、溶接継手の疲労及びクリープ疲労試験におけるひずみ集中率(溶接金属部のひずみ範囲 $\Delta \epsilon_w$ /溶接継手のゲージ間ひずみ範囲 $\Delta \epsilon_j$)を計算した

結果を表 6 に示す。ここで溶接金属の動的応力－ひずみ関係は表 5 に示す A_0 と σ_p を用いて計算しており、表 6 中のデータ No.26～31 には表 5 中のケース D を、データ No.70～72 にはケース F を、データ No.73～75 にはケース G を、またデータ No.104～108 にはケース K をそれぞれ使用している。

表 6 より、550℃では同じ継手タイプ、保持時間で比較すると、ひずみ範囲が小さい程ひずみ集中率が高くなる傾向が認められる。次に A7+N 材、550℃でのひずみ集中率を同等のひずみ範囲 $\Delta \epsilon = 1\%$ で比較すると、保持時間が $0 \rightarrow 1 \rightarrow 3$ 時間と増すに従ってひずみ集中率は $1.79 \rightarrow 1.49 \rightarrow 1.46$ と低下する傾向を示している。一方 T+K 材 550℃ではひずみ範囲 $\Delta \epsilon = 1\%$ で比較すると保持時間が $0 \rightarrow 1 \rightarrow 3$ 時間と増すに従ってひずみ集中率は $1.75 \rightarrow 1.79 \rightarrow 2.27$ に、またひずみ範囲 $\Delta \epsilon = 0.5\%$ で比較すると保持時間が $0 \rightarrow 0.1 \rightarrow 1$ 時間と増すに従ってひずみ集中率が $2.12 \rightarrow 1.86 \rightarrow 2.63$ とおおむね増加する傾向を示している。

図 4 から明らかな様に、母材 A7 の動的応力－ひずみ関係は保持時間が長くなるに従って低下し溶接金属 N 材の動的応力－ひずみ関係に漸近する傾向を示している。A7 材の母材硬化部も同様の保持軟化傾向を示すと仮定すると、保持時間の増大に伴う溶接金属部と母材硬化部の動的応力－ひずみ関係の漸近が表 6 に示す溶接継手 A7+N 材（550℃）における保持時間の増大に伴うひずみ集中の低下に起因し、さらには図 1 に示す保持時間の導入に伴う寿命低下の減少に起因すると考えられる。一方図 5 より、母材 A8 の動的応力－ひずみ関係は保持時間が増してもほとんど変化しないが、溶接金属 K 材では保持時間の導入により動的応力－ひずみ関係が低下し A8 材と K 材の動的応力－ひずみ関係の差異が保持時間の導入により拡大する傾向が認められる。T 材の母材硬化部も母材 A8 と同様の傾向を示すと仮定すると、保持時間の増大に伴う溶接金属と母材硬化部の動的応力－ひずみ関係の差異の拡大が表 6 に示す溶接継手 T+K 材（550℃）における保持時間の増大に伴うひずみ集中の増加に起因し、更には図 2 に示す保持時間の増大に伴う寿命低下の増大に起因すると考えることができる。

3-2. ひずみ範囲-寿命線図上の評価

溶接継手における溶接金属部へのひずみ集中を考慮して、図1～図3に示すひずみ範囲 $\Delta \varepsilon$ - 寿命 N_f 関係を再プロットした結果を図24～図26に示す。図24～図26のプロットのうち、母材と溶接金属に関しては図1～図3のプロットと全く同じであるが、溶接継手のデータに関しては図1～図3のひずみ範囲に表6に示すひずみ集中率を乗じた値を縦軸のひずみ範囲としてプロットしている。

図24に示すA7+N材の550℃でのプロットでは、同じ保持時間で比較すると、図中半黒印で示す溶接継手の寿命は白印で示す母材及び黒印で示す溶接金属の寿命とほぼ同一線上に示された。また図25に示す550℃での溶接継手T+K材の寿命も、母材や溶接金属とほぼ同一線上にプロットされた。図26に示すT+K材の500℃でのプロットでは、データNo.105（図中半黒丸印：寿命781回）及びデータNo.108（図中半黒菱形印：寿命142回）の2データが母材や溶接金属の寿命に比較して明らかに短寿命側に示された。図6に示す溶接金属K材の動的応力-ひずみ関係はわずか2点のデータから定式化されており、特にデータNo.105のひずみ集中率を計算するのに必要な60～70kgf/mm²程度の応力範囲に対応する動的応力-ひずみ関係は極めて信頼性に乏しい。このためNo.105に関して求められたひずみ集中率は極めて精度が悪く、この点のプロットは図26から除外する方が適切であると考えられる。一方データNo.108のひずみ集中率を計算するのに必要な50kgf/mm²程度の応力範囲に対応する溶接金属の動的応力-ひずみ関係は、No.108と同一保持時間の溶接金属データ（No.103）が存在することから、比較的信頼性が高い。図4～図6からわかる様に、溶接継手の動的応力-ひずみ関係は通常溶接金属よりかなり高応力側に位置している。ところがNo.108の動的応力-歪プロットは溶接金属とほぼ同一線上に位置しており、他の溶接継手データと比較すると異常に低い応力範囲を示している。このためNo.108ではひずみ集中率が1に近い低い値を示し、図26中母材や溶接金属に比較して極端に短寿命側にプロットされたと考えられる。データNo.108が低応力範囲、短寿命を示した原因として溶接欠陥の存在が考えられるが、試験片の破面観察の結果溶接欠陥の存在は認められずまたき裂も溶接金属中を正常に進展していることが確認された。現在のところデータNo.108が極端な短寿命と示した原因は明確ではなく、今後の課題としたい。

図24～図26より、データNo.108を除くと、溶接継手の疲労及びクリープ疲労強度はひずみ集中率を考慮に入れることにより合理的に評価できることが明らかとなった。また、クリープ疲労におけるひずみ集中率の計算に際しては、溶接金属の動的応力－ひずみ関係に及ぼすひずみ保持の影響を正しく評価することが重要であることが明らかとなった。

4. まとめと今後の課題

溶接継手のクリープ疲労強度を、継手内の溶接金属部へのひずみ集中の観点から評価した。その結果、

(1) 溶接金属部へのひずみ集中を考慮に入れば、溶接継手のクリープ疲労強度が母材や溶接金属とほぼ同等に評価できること、

(2) 溶接金属部へのひずみ集中が、継手を構成する母材（母材硬化部）と溶接金属の保持時間効果をも含めた動的応力－ひずみ関係の差異に起因すること、

が明らかとなった。ひずみ保持を伴わない疲労負荷の場合には、これまでに得られている全てのデータで、溶接継手の寿命が母材や溶接金属に比較して短寿命側にプロットされる傾向が示されている。これに対してクリープ疲労負荷では、550℃におけるA7+N材のように、保持時間が増すに従って母材と溶接金属の動的応力－ひずみ関係が接近するような組合せの溶接継手では、溶接継手のクリープ疲労寿命が母材や溶接金属とほぼ同等となることが示された。逆に550℃におけるT+K材のように、保持時間の増大に伴って母材と溶接金属の動的応力－ひずみ関係の差異が拡大するような組合せの溶接継手では、そのクリープ疲労寿命の低下は、疲労負荷の場合に比較して更に増大する傾向を示した。このように溶接継手のクリープ疲労強度は、母材と溶接金属の組合せが異なると著しい差異を示す可能性がある。以上の知見から、

(3) 継手を構成する母材と溶接金属をうまく組合せることにより、ひずみ集中率が小さくクリープ疲労強度の優れた溶接継手が開発できる可能性が示唆される。

本報告で評価対象としたクリープ疲労データの負荷条件はひずみ範囲0.5%以上、ひずみ保持時間6時間以下であり、この様な条件下ではクリープ損傷よりも疲労損傷の方が優勢である。これに対して実機炉容器の負荷荷重はより低ひずみ範囲、長保持時間であり、疲労損傷よりもクリープ損傷の方が優勢となる。この様なクリープ損傷支配型の負荷が溶接継手に加えられた場合には、ひずみ保持中の弾性追従によるひずみ範囲の増加やクリープ損傷の増加の可能性を考慮にいれる必要がある。本報告ではこの様な問題に対する検討は行っておらず、今後の課題としてとりくみ、次報で報告することとしたい。

なお付録に、これまでに得られているSUS304母材および溶接金属の保持軟化／動的ひずみ時効挙動を定性的に示した。

謝 辞

本研究は、構造工学室と定期的に検討の場をもちながら行われた。有益な助言をいただいた永田主研，谷川副主研，霜越研究員，根岸氏の各位に感謝します。

参考文献

- 1) 飯田主査, 「高速炉高温機器の溶接部強度特性評価のための試験研究」, 日本溶接協会原子力研究委員会, ESJ小委員会昭和55年度委託研究成果報告書, 動力炉・核燃料開発事業団, PNC SJ225 80-06, 1980.
- 2) 飯田主査, 「高速炉高温機器の溶接部強度特性評価のための試験研究(Ⅱ)」, 日本溶接協会原子力研究委員会, ESJ小委員会昭和56年度委託研究成果報告書, 動力炉・核燃料開発事業団, PNC SJ225 81-10, 1981.
- 3) 飯田主査, 「高速炉高温機器の溶接部強度特性評価のための試験研究(Ⅲ)」, 日本溶接協会原子力研究委員会, ESJ小委員会昭和57年度委託研究成果報告書, 動力炉・核燃料開発事業団, PNC SJ225 82-04, 1982.
- 4) 三菱重工㈱, 「SUS304のTIG溶接継手の高温強度評価試験(Ⅰ)」, 委託研究成果報告書, 動力炉・核燃料開発事業団, PNC SJ222 84-04, 1984.
- 5) 三菱重工㈱, 「SUS304のTIG溶接継手の高温強度評価試験(Ⅱ)」, 委託研究成果報告書, 動力炉・核燃料開発事業団, PNC SJ222 85-02, 1985.
- 6) 三菱重工㈱, 「SUS304のTIG溶接継手の高温強度試験」, 委託研究成果報告書, 動力炉・核燃料開発事業団, PNC SJ2216 86-003, 1986.
- 7) 富士電機㈱, 「SUS304板材及び鍛造材の高温強度試験」, 委託研究成果報告書, 動力炉・核燃料開発事業団, PNC SJ203 84-04, 1984.
- 8) 富士電機㈱, 「SUS304板材及び鍛造材の高温強度試験(Ⅱ)」, 委託研究成果報告書, 動力炉・核燃料開発事業団, PNC SJ203 85-02, 1985.
- 9) 富士電機㈱, 「SUS304鍛造材の高温強度試験」, 委託研究成果報告書, 動力炉・核燃料開発事業団, PNC SJ2070 86-001, 1986.
- 10) 富士電機㈱, 「SUS304鍛造材の高温強度試験(Ⅱ)」, 委託研究成果報告書, 動力炉・核燃料開発事業団, PNC SJ2068 87-001, 1987.
- 11) 「高速原型炉高温構造設計方針材料強度基準等」, 動力炉・核燃料開発事業団, PNC N241 84-08(2), 1984.

- 12) 「高速原型炉高温構造設計基準材料強度基準等の高度化に関する検討報告（１）」，
動力炉・核燃料開発事業団，PNC SN9410 88-105，1988.

付 録 SUS304母材及び溶接金属の保持軟化／ 動的ひずみ時効挙動

表A-1に、7種類の母材と2種類の溶接金属の430-650℃における保持軟化／動的ひずみ時効挙動の定性的傾向を示す。また、A1, A2, A4, A5材の化学成分を表A-2に示す（他の5鋼種の化学成分は表4に既に示した）。図A-1中、「保持軟化」はひずみ保持の導入もしくはひずみ速度の低下により動的応力-ひずみ関係が低下した場合を、「動的ひずみ時効」は動的応力-ひずみ関係が上昇した場合をそれぞれ示している。また「保持効果なし」は、ひずみ保持の導入もしくはひずみ速度の低下によっても動的応力-ひずみ関係がほとんど変化しなかった場合を示している。

9種類の材料とも、500-550℃の間に保持効果の無い温度が存在し、この温度より低温側では動的ひずみ時効を示し、高温側では保持軟化を示す傾向が認められる。表A-1からは、保持軟化と動的ひずみ時効の境界温度と母材／溶接金属の差もしくは板材／鍛鋼品の差との間に明確な相関は認められず、保持軟化／動的ひずみ時効挙動に影響を及ぼす因子の検討は今後の課題としたい。

表 1. 母材A7, 溶接金属N, 溶接継手A7+Nの550℃における疲労および
クリープ疲労データ

データ NO.	供試材	保持時間 t_H (hour)	歪 範 囲 $\Delta \varepsilon$ (%)	破 断 寿 命 N_f (CYCLE)
1	母 材 (A7)	0	1.50	924
2			1.00	1443
3			0.80	3985
4			0.70	5356
5			0.60	8506
6			0.50	31885
7		0.1	1.52	502
8			1.02	839
9			1.01	1170
10			0.97	1038
11			0.71	2096
12		1	1.52	304
13			1.02	507
14			0.70	688
15			0.69	1102
16		10	1.48	186
17			1.01	315
18	溶接金属 (N)	0	1.55	1022
19			1.23	1964
20			1.03	2490
21			0.82	5750
22			0.62	10184
23		1	1.04	440
24			0.99	388
25		6	1.04	238
26	継 手 (A7+N)	0	1.49	594
27			1.00	1150
28			0.79	2070
29			0.60	3350
30		1	1.05	369
31		3	1.05	215

表 2. 母材 T, A8, 溶接金属 K, 溶接継手 T + K の 550℃ における疲労および
クリープ疲労データ

データ NO.	供試材	保持時間 t_H (hour)	歪 範 囲 $\Delta \epsilon$ (%)	破 断 寿 命 N_f (CYCLE)
32	母材 (T)	1	1.00	863
33	母 材 (A8)	0	0.49	19065
34			0.79	4932
35			1.00	2519
36			1.20	1915
37			1.48	909
38			0.49	16182
39			0.79	5760
40			1.00	2854
41			1.21	2359
42			1.51	1187
43			0.49	18541
44			0.79	5692
45			1.00	3773
46			1.20	2370
47			1.48	1475
48		0.17	1.00	941
49			1.50	571
50			1.00	1206
51			1.50	603
52			1.00	589
53			1.48	284
54		1	1.00	482
55			1.50	255
56			1.00	674
57			1.46	312
58			0.98	336
59			1.48	168

60	溶接金属 (K)	0	1.52	1443
61			1.22	2080
62			1.02	2330
63			0.81	5226
64			0.51	12004
65			1.00	2299
66			0.50	15188
67		0.1	0.50	3252
68		1	1.00	349
69			1.02	581
70	継手 (T+K)	0	0.50	3666
71			1.01	1037
72		0.1	0.49	1386
73		1	0.98	126
74			0.46	275
75		3	0.97	70

表 3. 母材 T, A8, 溶接金属 K, 溶接継手 T + K の 500℃ における疲労および
クリープ疲労データ

データ NO.	供試材	保持時間 t_H (hour)	歪 範 囲 $\Delta \varepsilon$ (%)	破 断 寿 命 N_f (CYCLE)
76	母 材 (T)	0	0.51	20830
77			1.02	2874
78		1	1.00	1068
79	母 材 (A8)	0	0.49	15769
80			0.78	7296
81			0.98	4442
82			1.19	3092
83			1.49	2585
84			0.50	22516
85			0.79	7228
86			1.02	4365
87			1.20	2996
88			1.46	2396
89			0.49	27450
90			0.78	6236
91			0.99	3614
92			1.19	3237
93			1.48	2210
94		0.17	1.00	3505
95			1.49	1479
96			0.99	3263
97			1.50	1721
98		1	1.00	1281
99			1.50	671
100			1.01	1457
101			1.48	662
102	溶接金属	0.1	0.50	8789
103	(K)	1	1.00	778
104	継 手 (T+K)	0	0.50	8925
105			1.01	781
106		0.1	0.48	7414
107			0.49	3440
108		1	0.97	142

表 4. 母材A7, A8, Tおよび溶接金属N, Kの化学成分 (wt%)

符号	製造法	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Co
A7	板材	0.05	0.60	0.87	0.026	0.002	8.94	18.59	
A8	鍛造材	0.07	0.84	1.97	0.009	0.007	9.75	18.27	0.10
T	鍛造材	0.053	0.57	1.54	0.024	0.003	9.91	18.04	

符号		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	V	Ti	Co	N	フェライト量
N	ワイヤ	0.051	0.26	2.35	0.021	0.004	10.68	20.11	0.10	0.03	0.02	0.02	5.4
	溶接金属	0.047	0.33	1.96	0.025	0.005	10.2	19.7	0.12	0.013	0.058	0.027	5.7
K	ワイヤ	0.058	0.41	1.48	0.003	0.002	10.43	19.81	0.004	<0.002		0.026	6.5

表 5. 各材料の動的応力-ひずみ関係の定式化に際して決定された σ_p および A_0 の値

ケース	材料	温度 (C)	t_H (h r)	A_0	σ_F (kgf/mm ²)
A	母材 (A7)	550	0	2.42	11.5
B			0.1	2.41	10.1
C			1-10	2.25	12.0
D	溶接金属 (N)		0-6	2.36	8.3
E	母材 (A8)	550	0-1	2.34	14.2
F	溶接金属 (K)		0-0.1	2.32	9.0
G			1	2.32	6.5
H	母材 (A8)	500	0	2.46	11.1
I			0.17	2.00	26.2
J			1	1.90	29.2
K	溶接金属 (K)		0.1-1	2.54	6.6

表 6. 計算されたひずみ集中度

データNo	継手タイプ	温度 (C)	t_H (hr)	歪範囲 (%)	歪集中度
26	A7+N	550	0	1.49	1.51
27				1.00	1.79
28				0.79	1.81
29				0.60	1.87
30			1	1.05	1.49
31			3	1.05	1.46
70	T+K	550	0	0.50	2.12
71				1.01	1.75
72			0.1	0.49	1.86
73			1	0.98	1.79
74				0.46	2.63
75			3	0.97	2.27
104	T+K	500	0	0.50	1.64
105				1.01	1.73
106			0.1	0.48	1.14
107				0.49	1.64
108			1	0.97	1.05

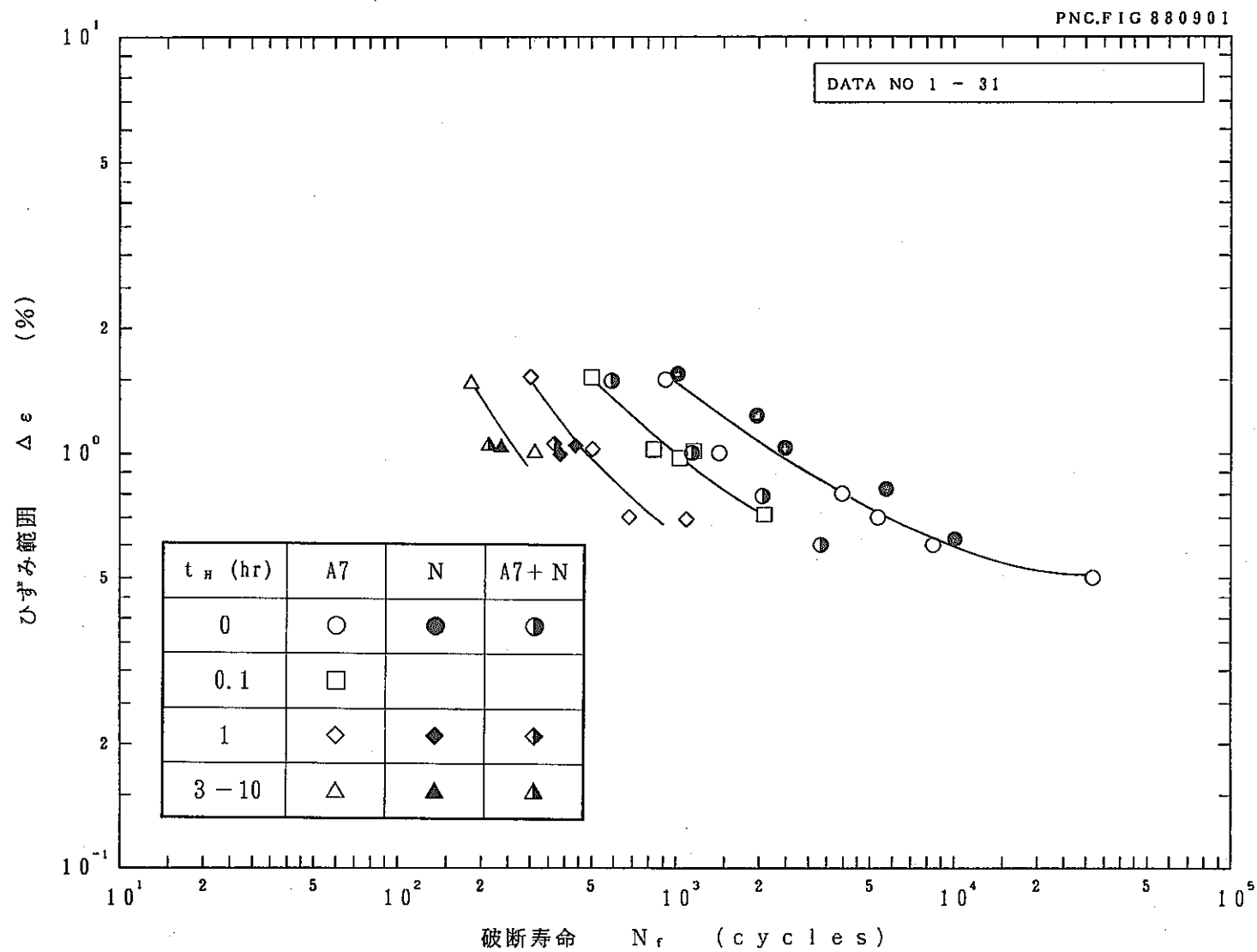


図1. 母材A7, 溶接金属N, 溶接継手A7+Nの550℃における疲労およびクリープ疲労強度

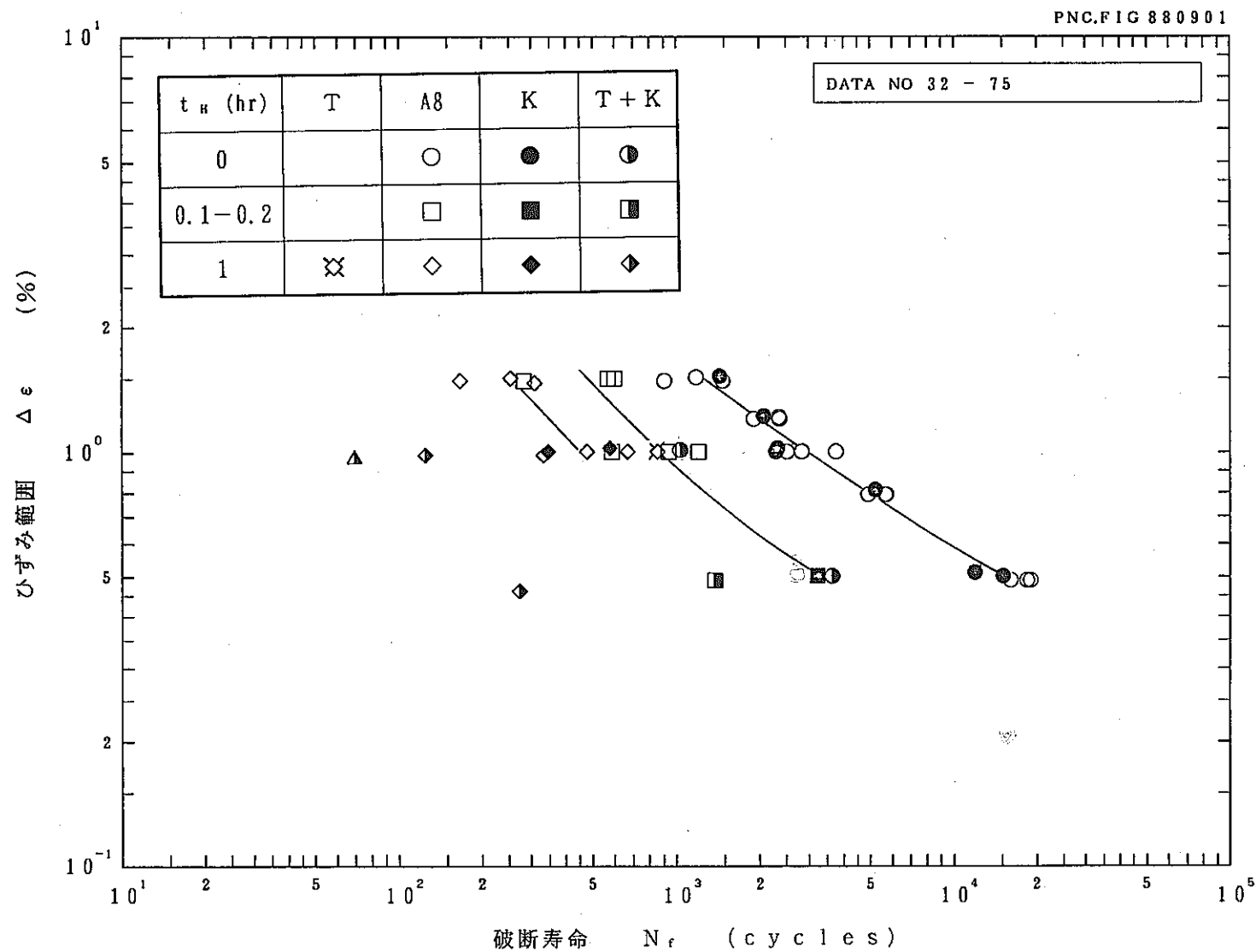


図2. 母材T, A8, 溶接金属K, 溶接継手T+Kの550℃における疲労およびクリープ疲労強度

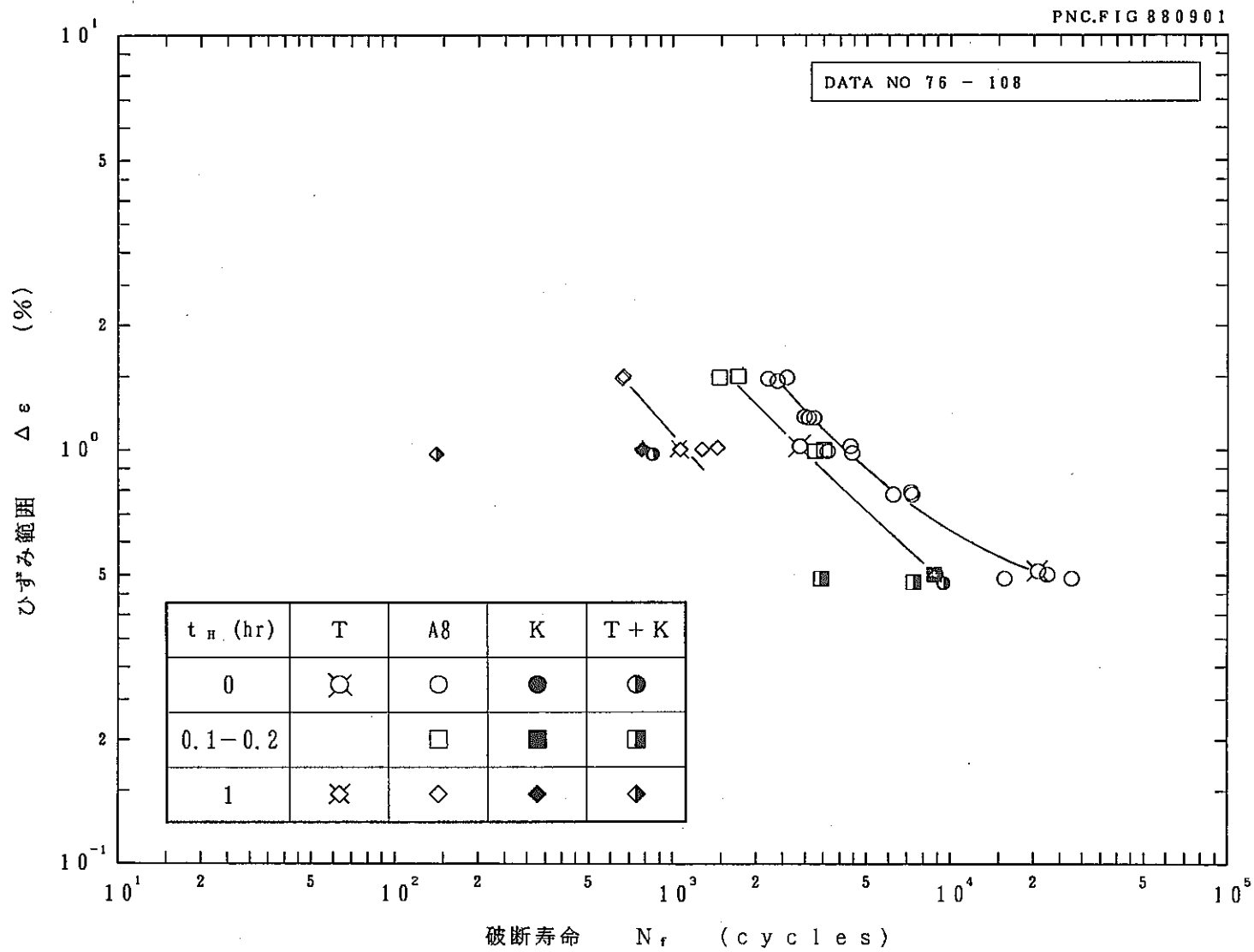


図3. 母材T, A8, 溶接金属K, 溶接継手T+Kの500℃における疲労およびクリープ疲労強度

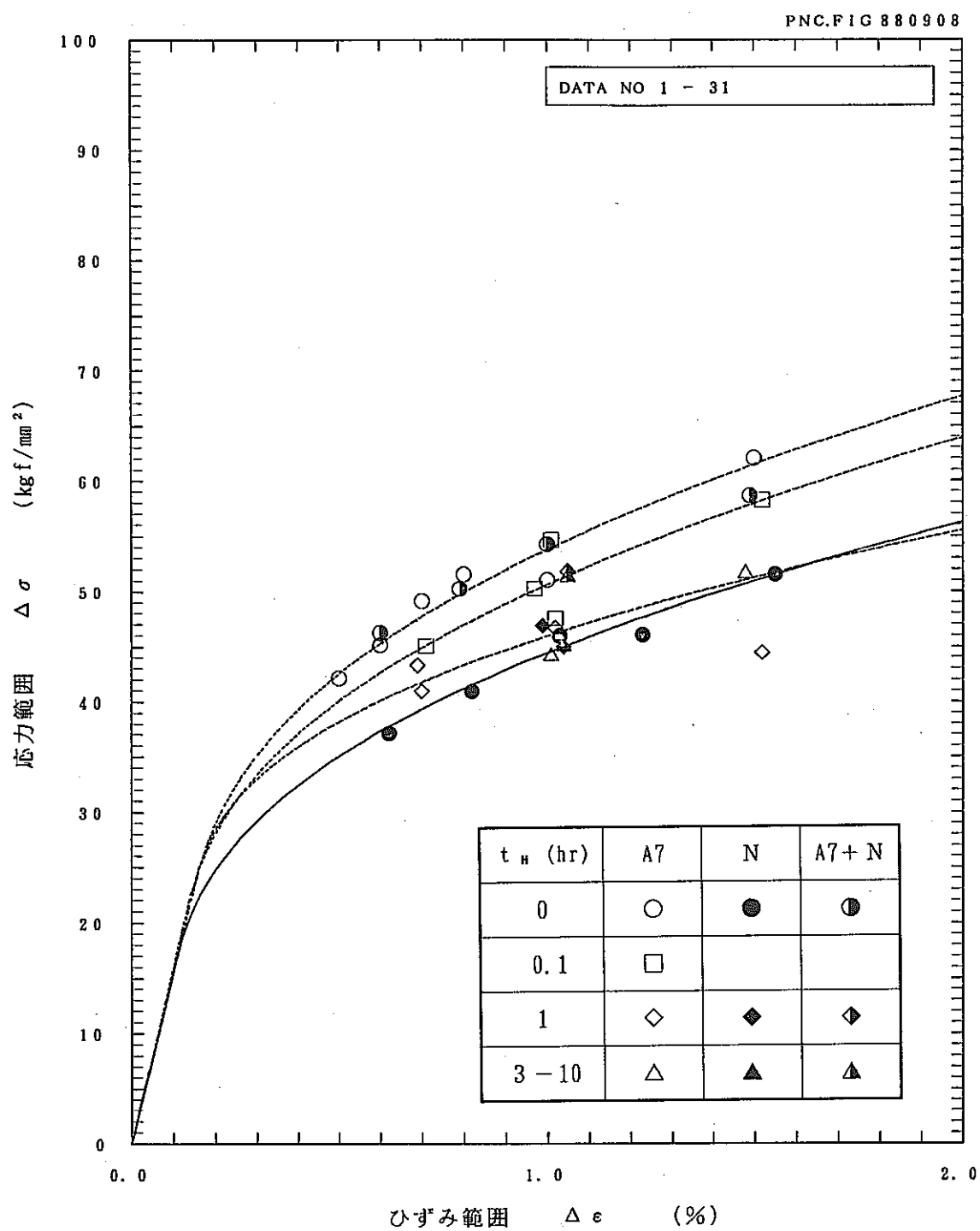


図4. 母材A7, 溶接金属N, 溶接継手A7+Nの550℃における動的応力-歪関係

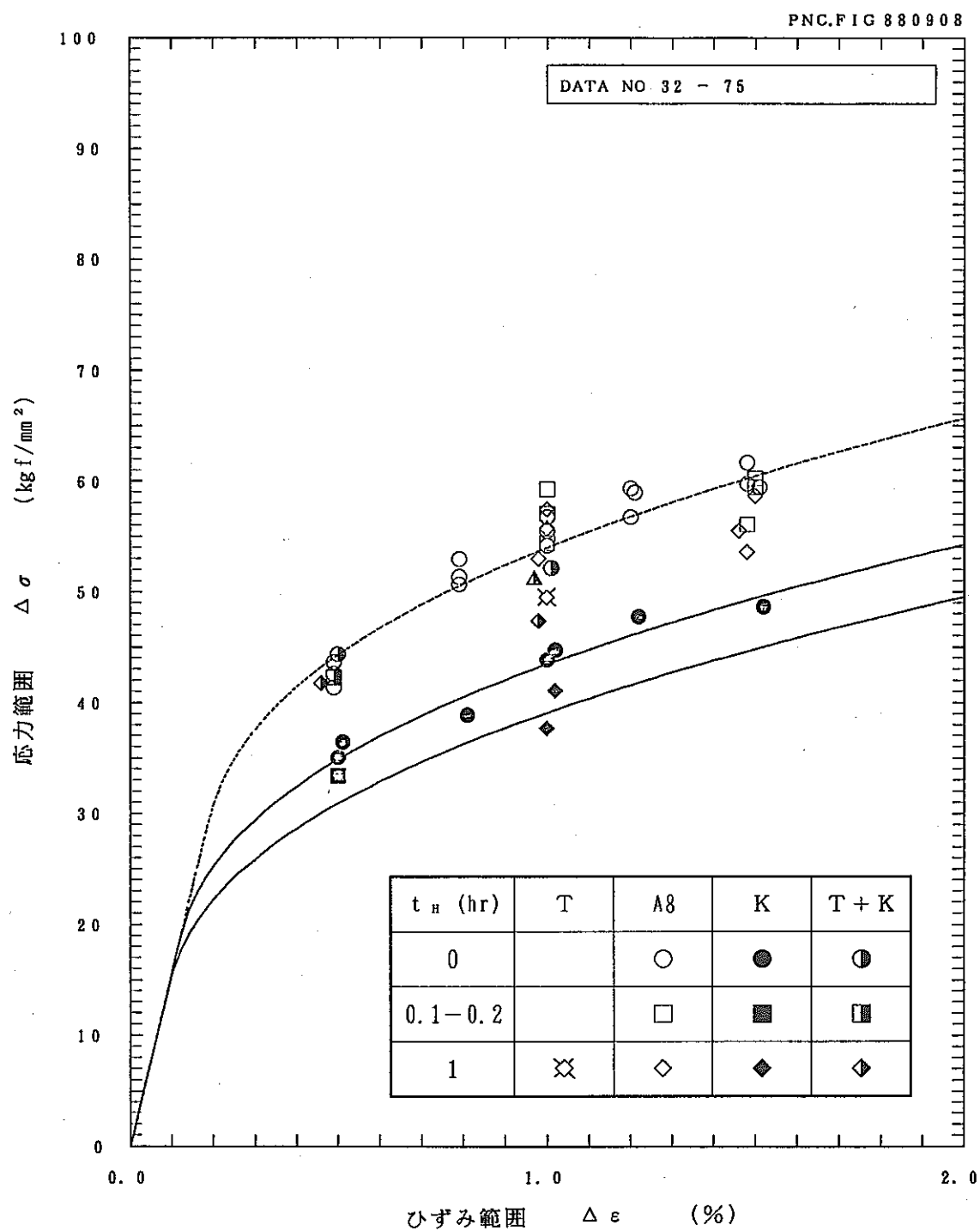


図5. 母材T, A8, 溶接金属K, 溶接継手T+Kの550℃における動的応力-歪関係

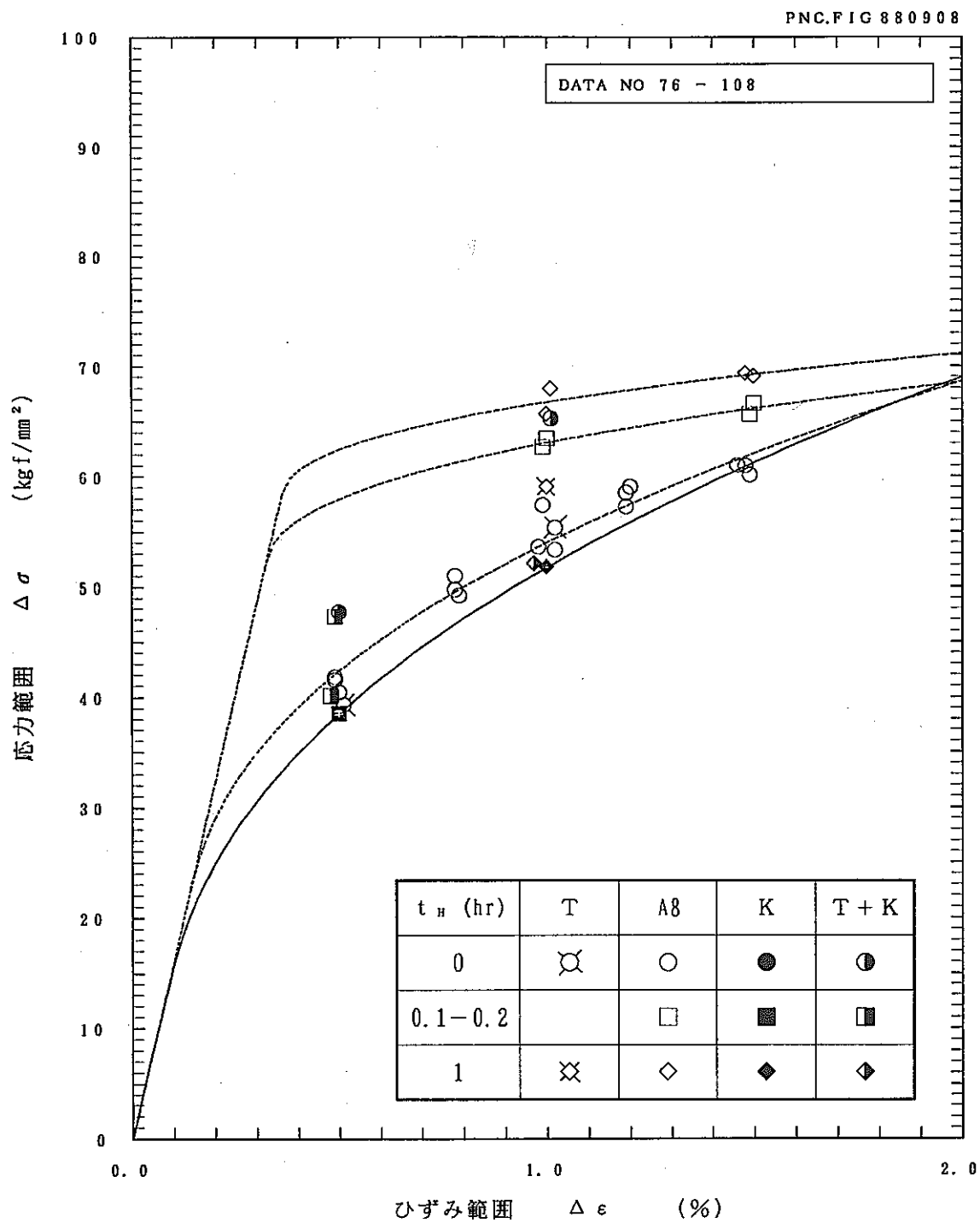


図6. 母材T, A8, 溶接金属K, 溶接継手T+Kの500℃における動的応力-歪関係

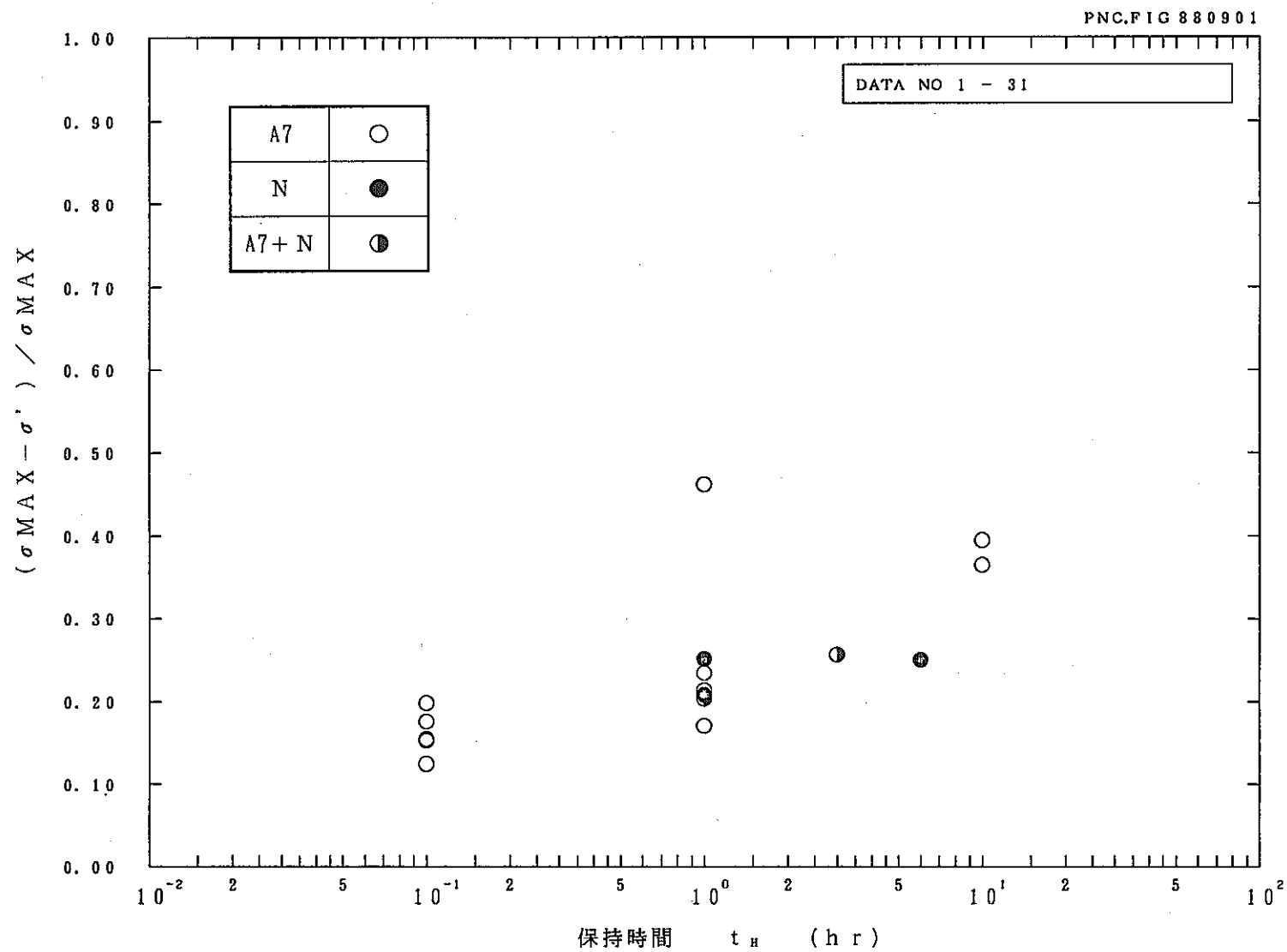


図7. 母材A7, 溶接金属N, 溶接継手A7+Nの550℃における応力緩和量と保持時間の関係

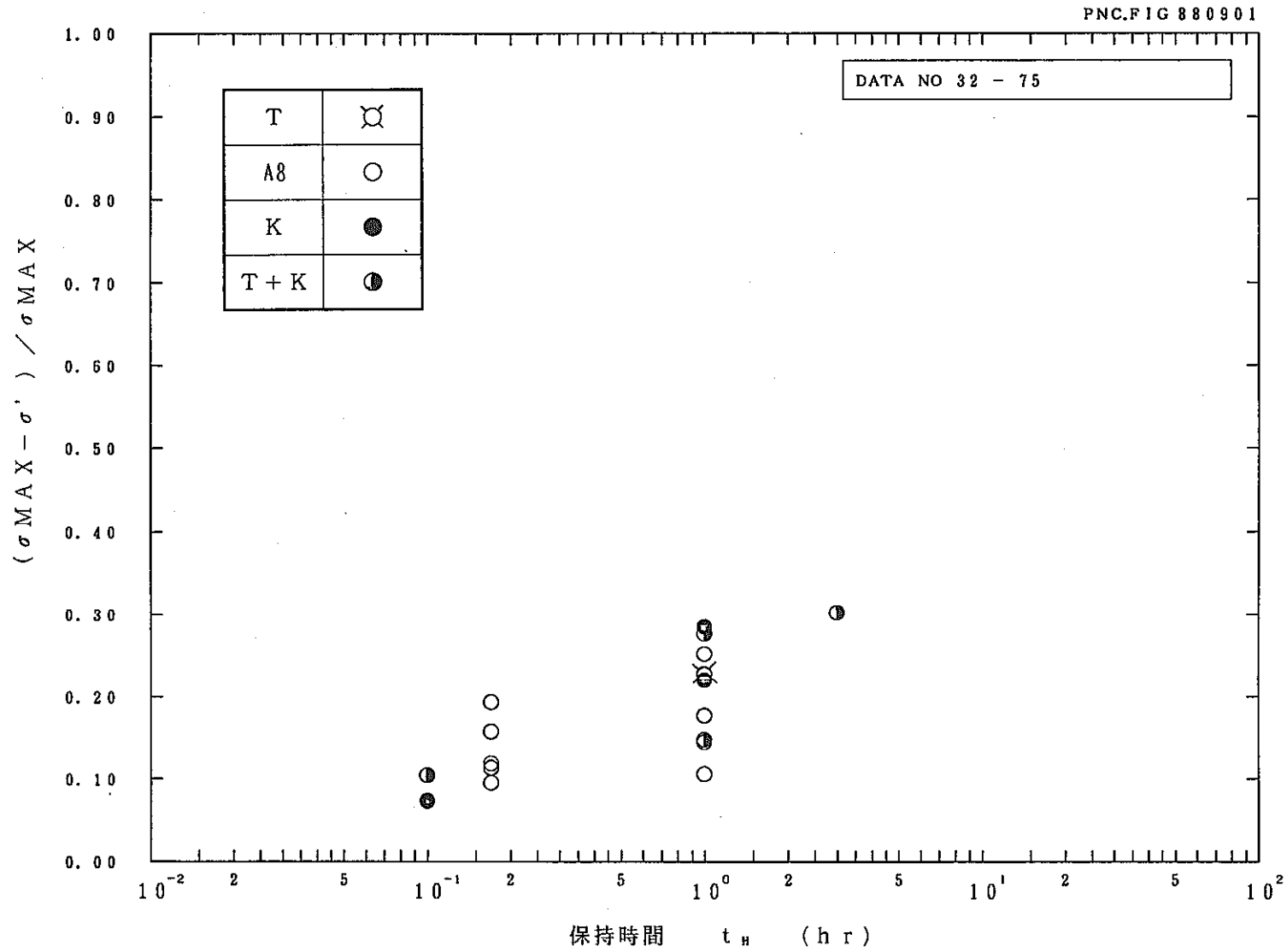


図8. 母材T, A8, 溶接金属K, 溶接継手T+Kの550℃における応力緩和量と保持時間の関係

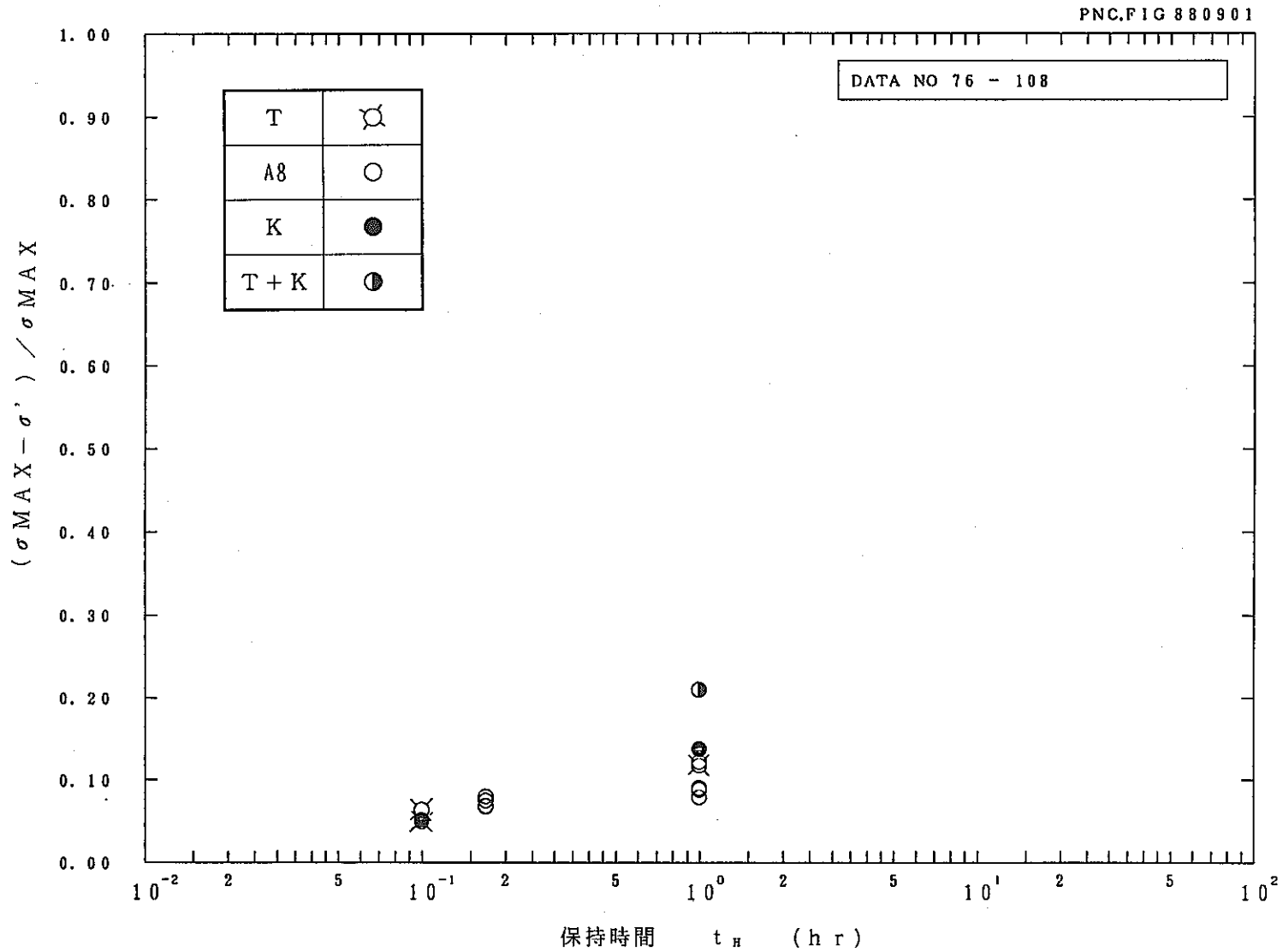


図9. 母材T, A8, 溶接金属K, 溶接継手T+Kの500℃における応力緩和量と保持時間の関係

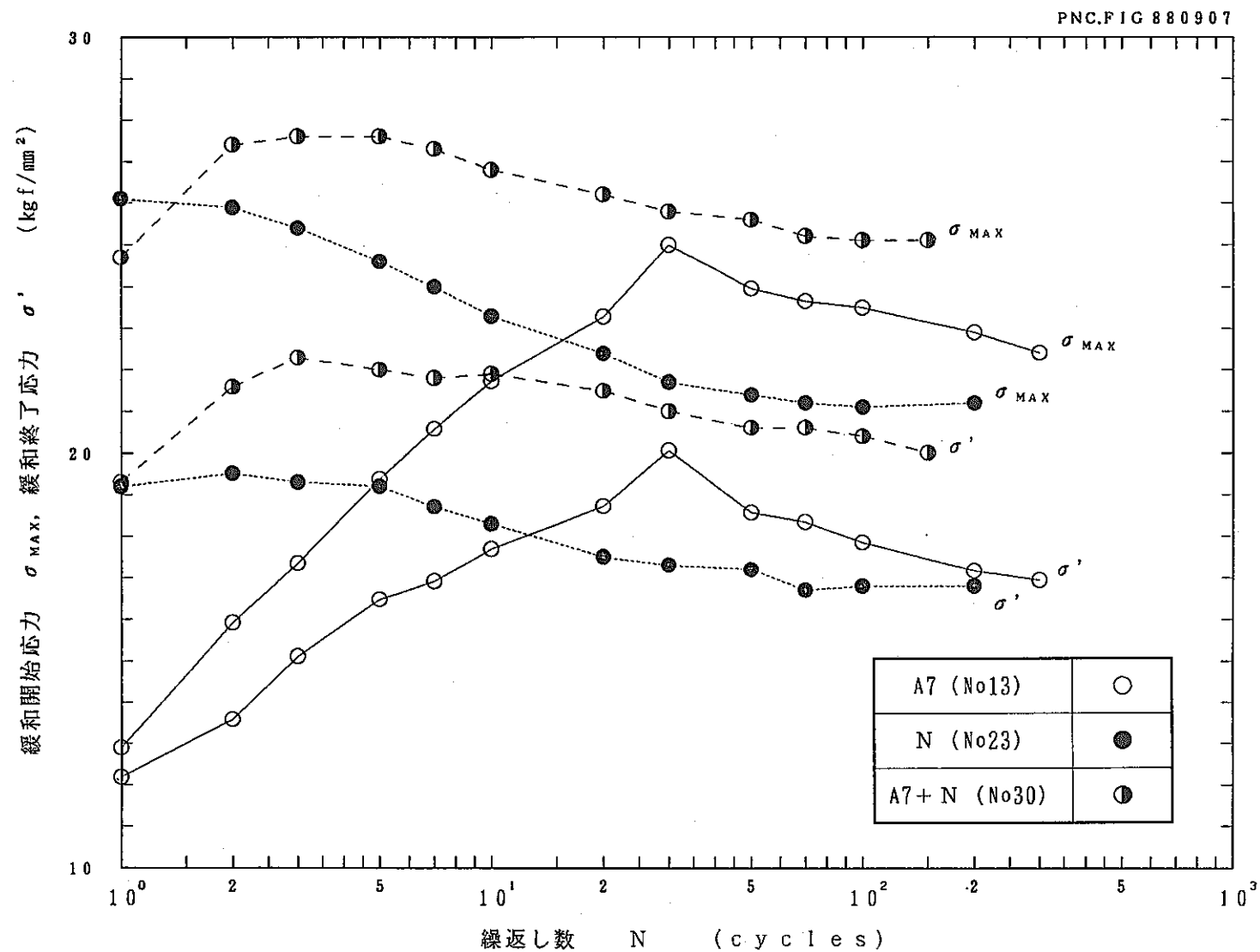


図10. 母材A7, 溶接金属N, 溶接継手A7 + Nの550℃における繰返しに伴う応力挙動

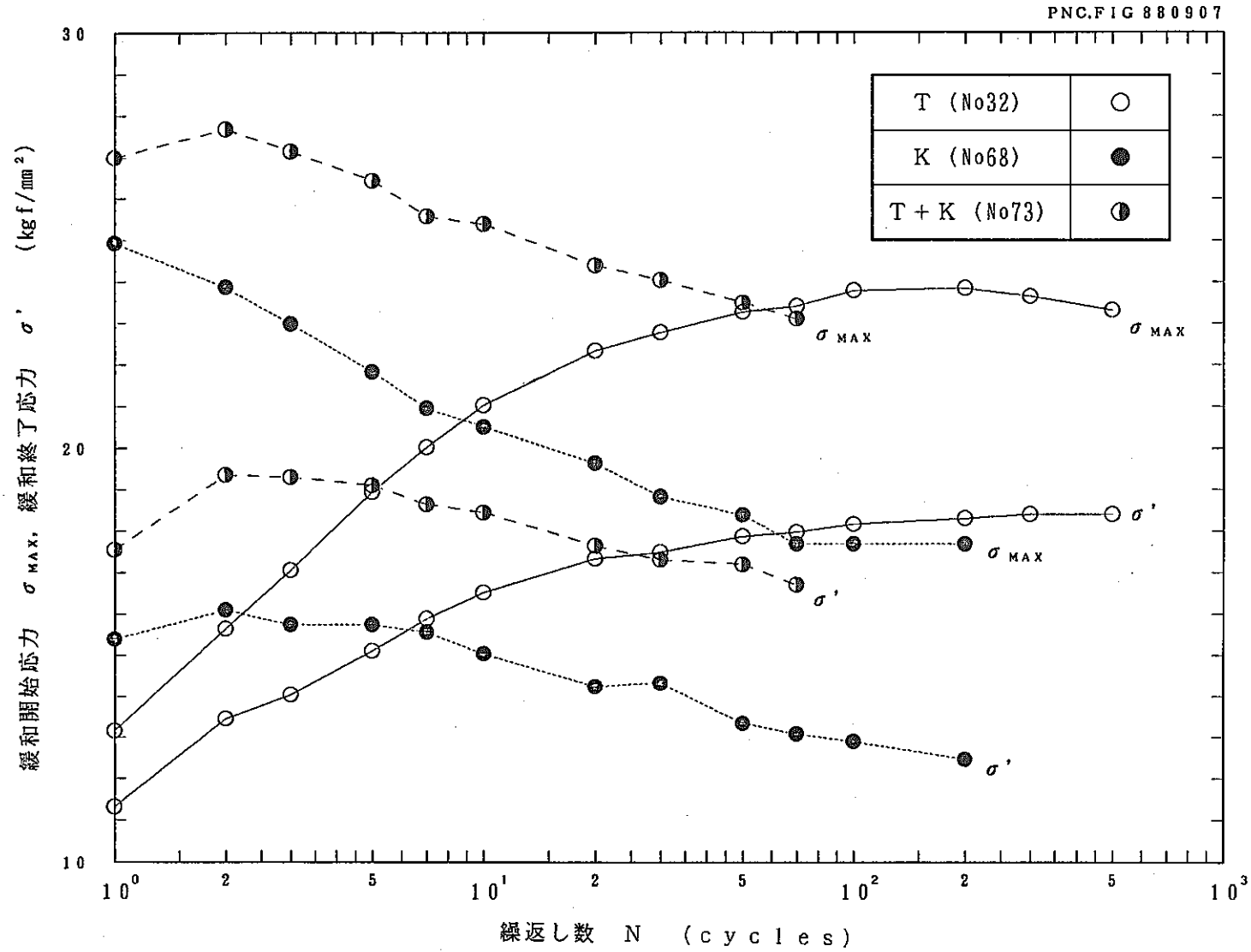


図11. 母材T, A8, 溶接金属K, 溶接継手T+Kの550℃における繰返しに伴う応力挙動

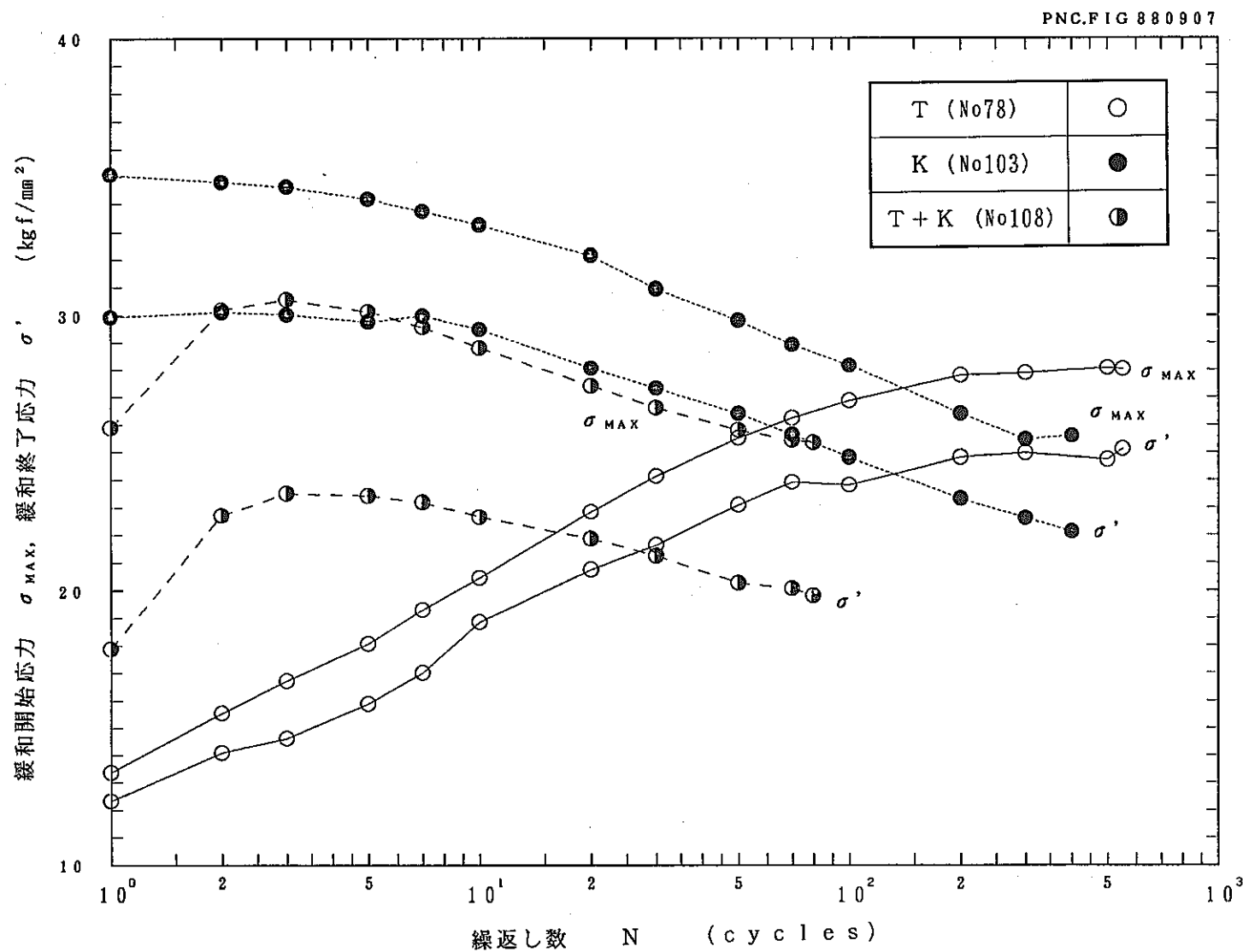


図12. 母材 T, A8, 溶接金属 K, 溶接継手 T + K の500℃における繰返しに伴う応力挙動

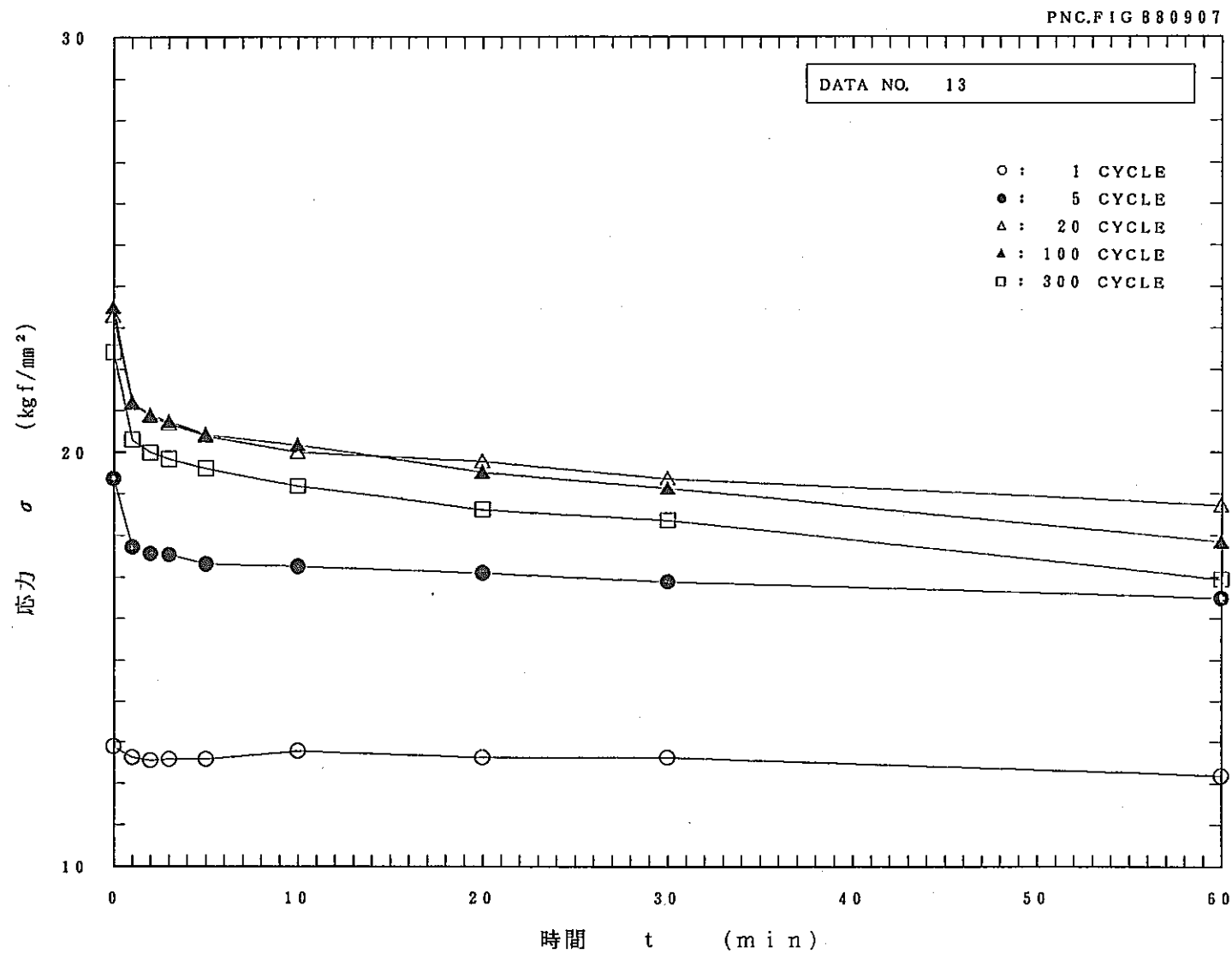


図13. 母材A7の550℃における動的応力緩和挙動

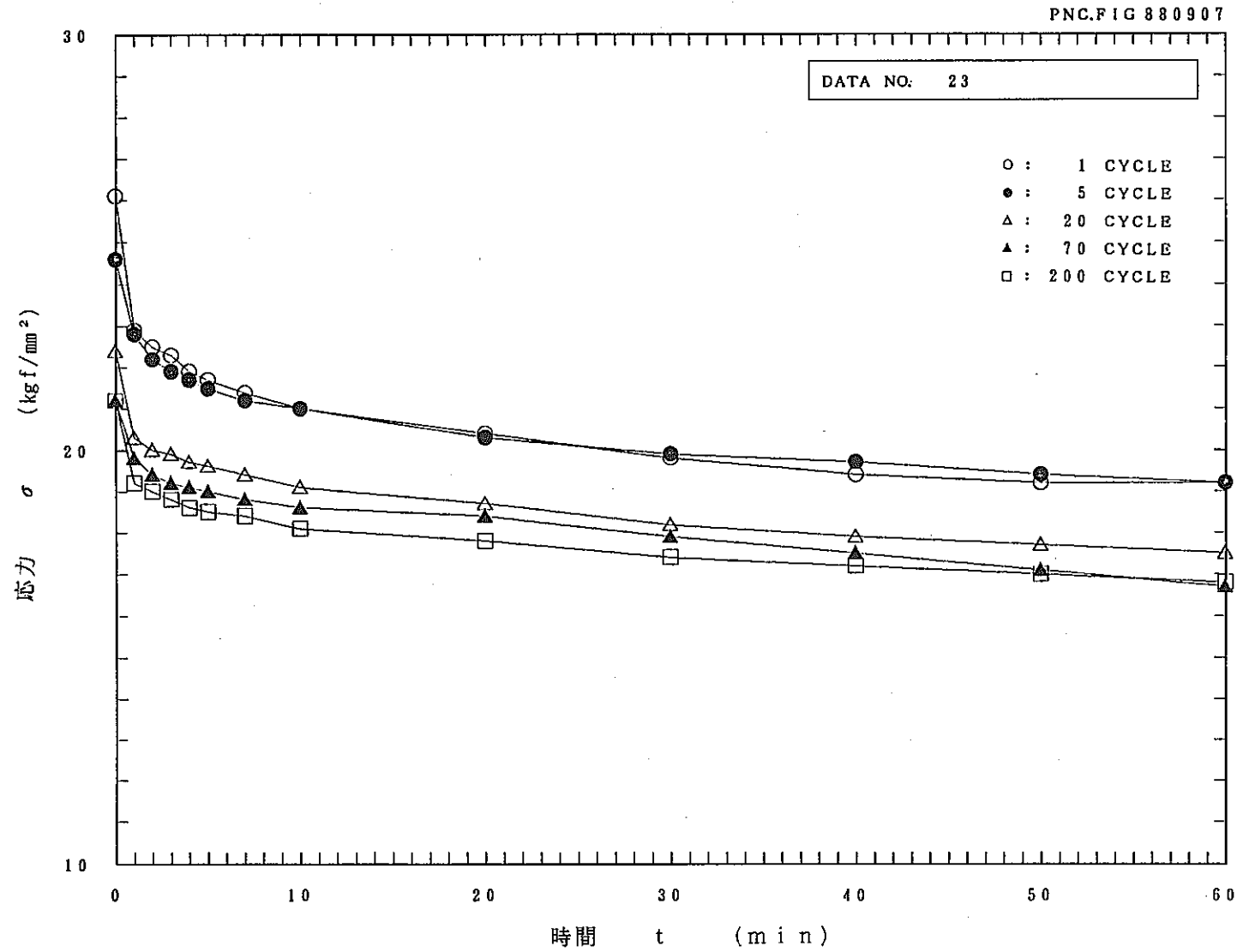


図14. 溶接金属Nの550℃における動的応力緩和挙動

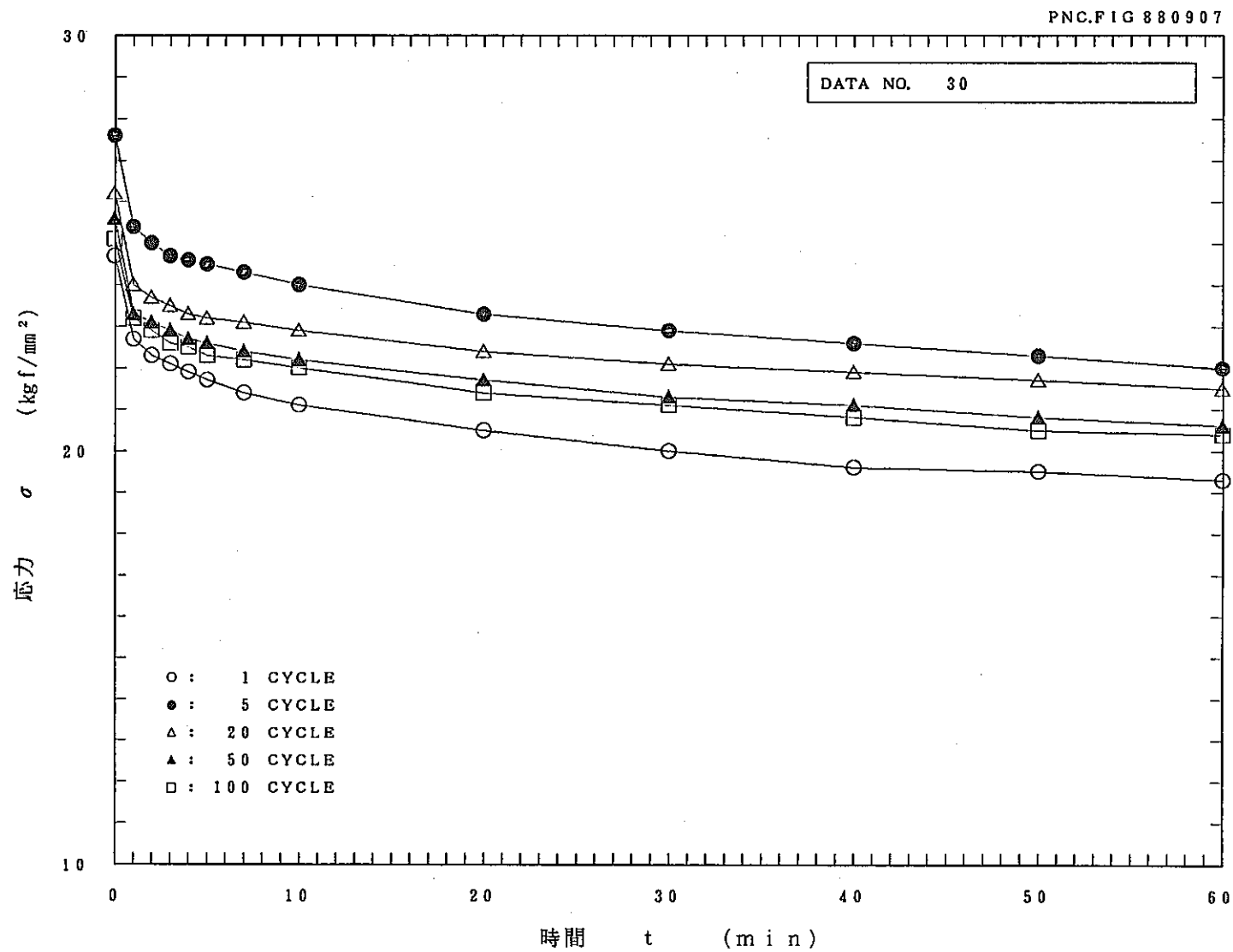


図15. 溶接継手A7+Nの550℃における動的応力緩和挙動

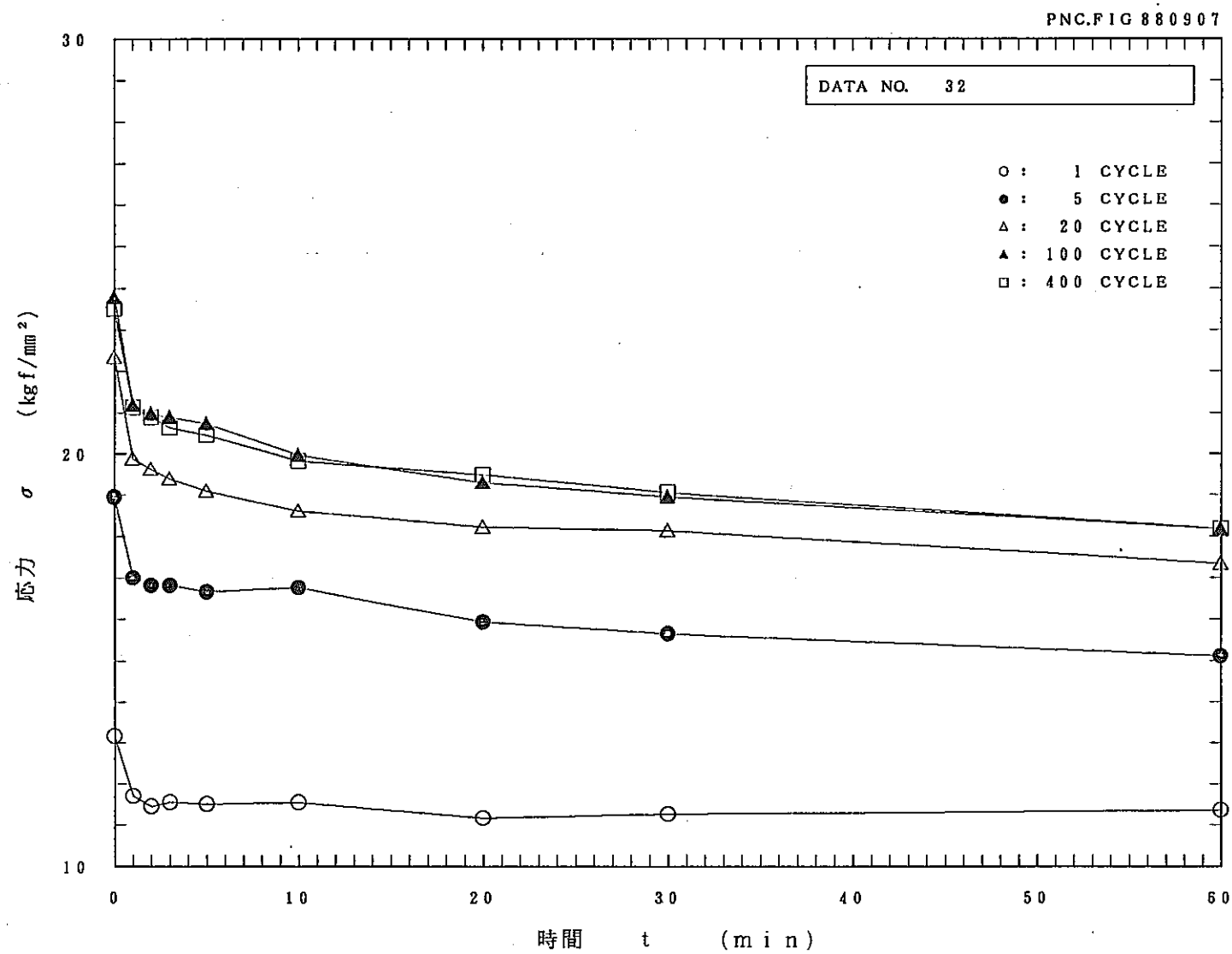


図16. 母材 T の550℃における動的応力緩和挙動

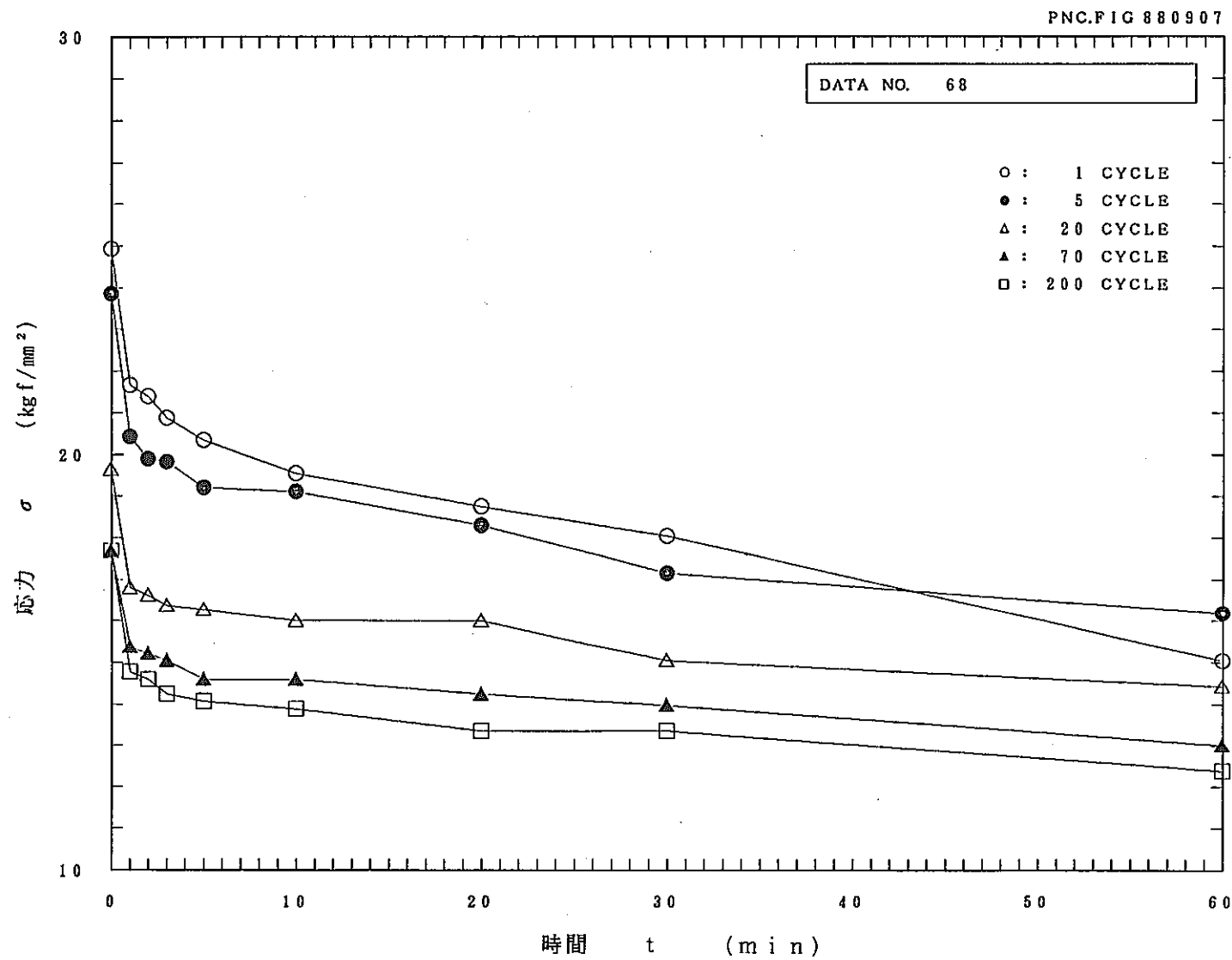


図17. 溶接金属Kの550℃における動的応力緩和挙動

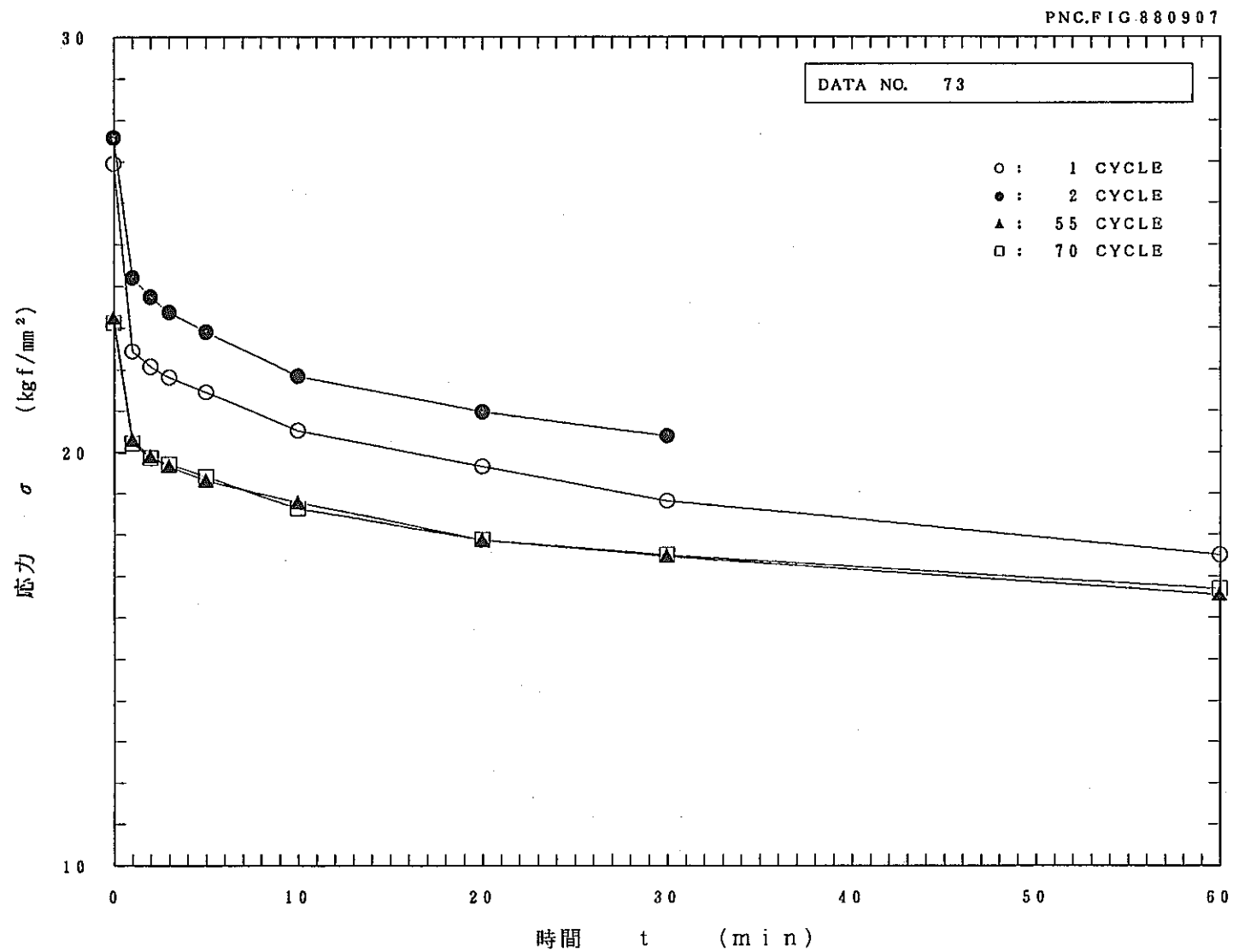


図18. 溶接継手 T + K の550℃における動的応力緩和挙動

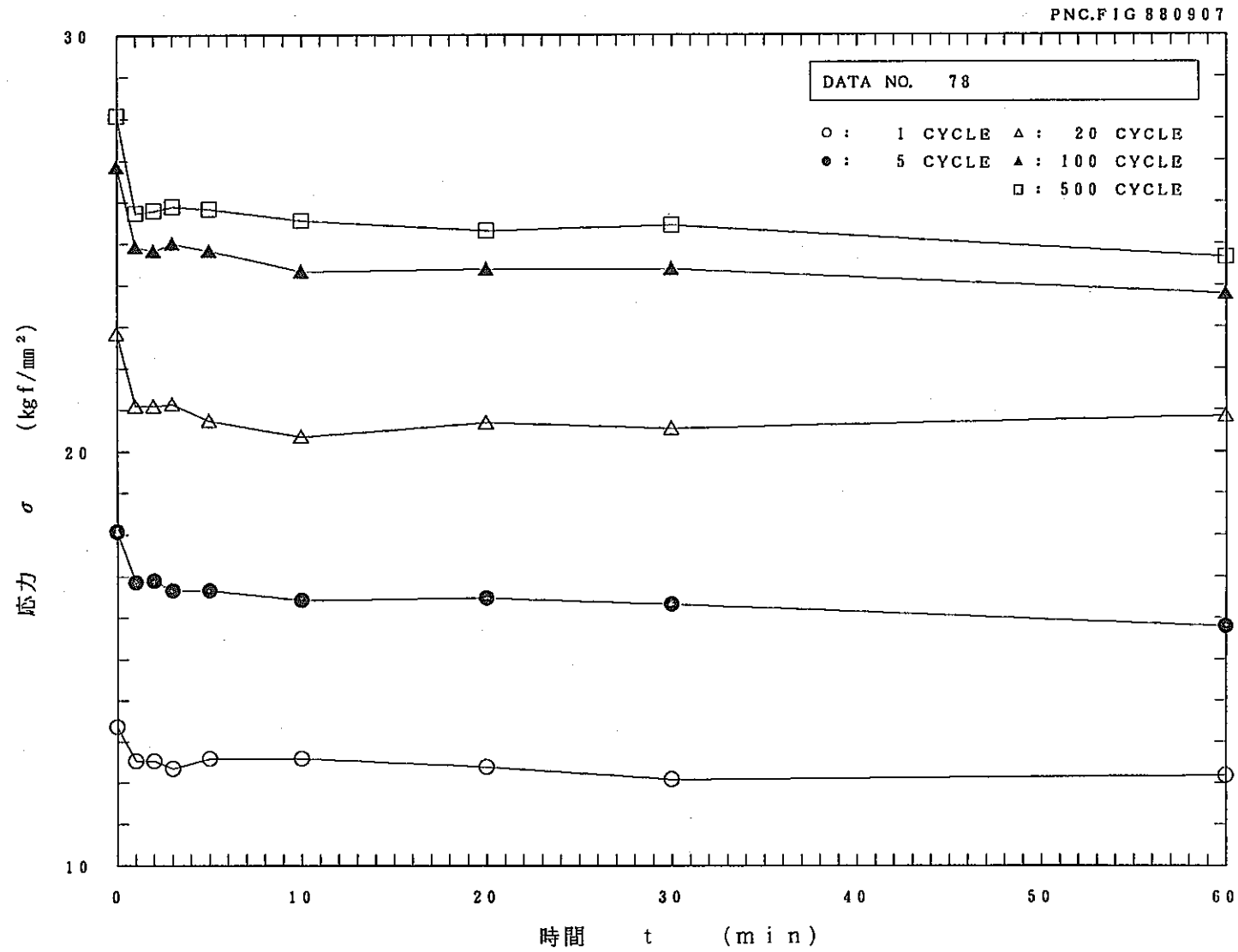


図19. 母材Tの500℃における動的応力緩和挙動

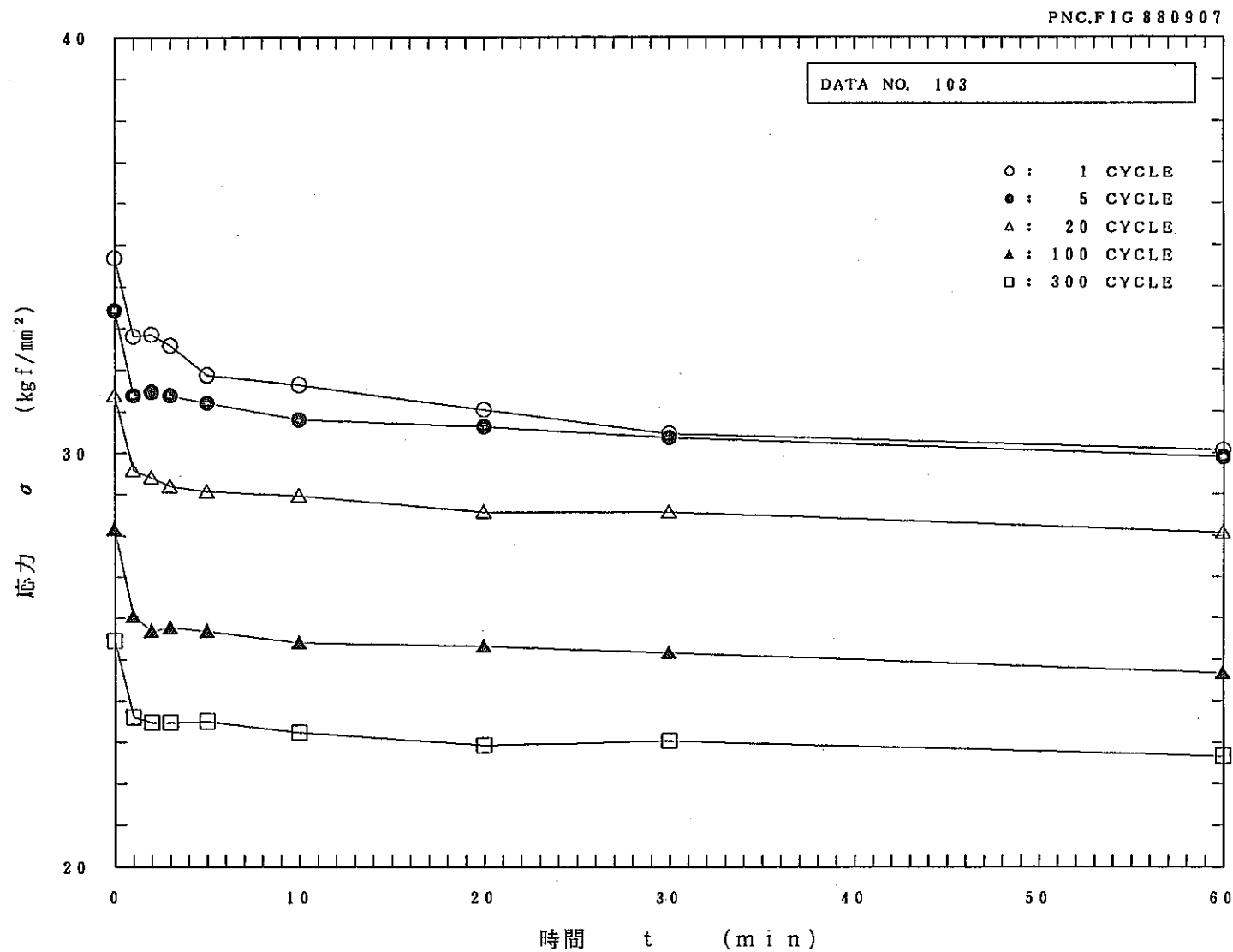


図20. 溶接金属Kの500℃における動的応力緩和挙動

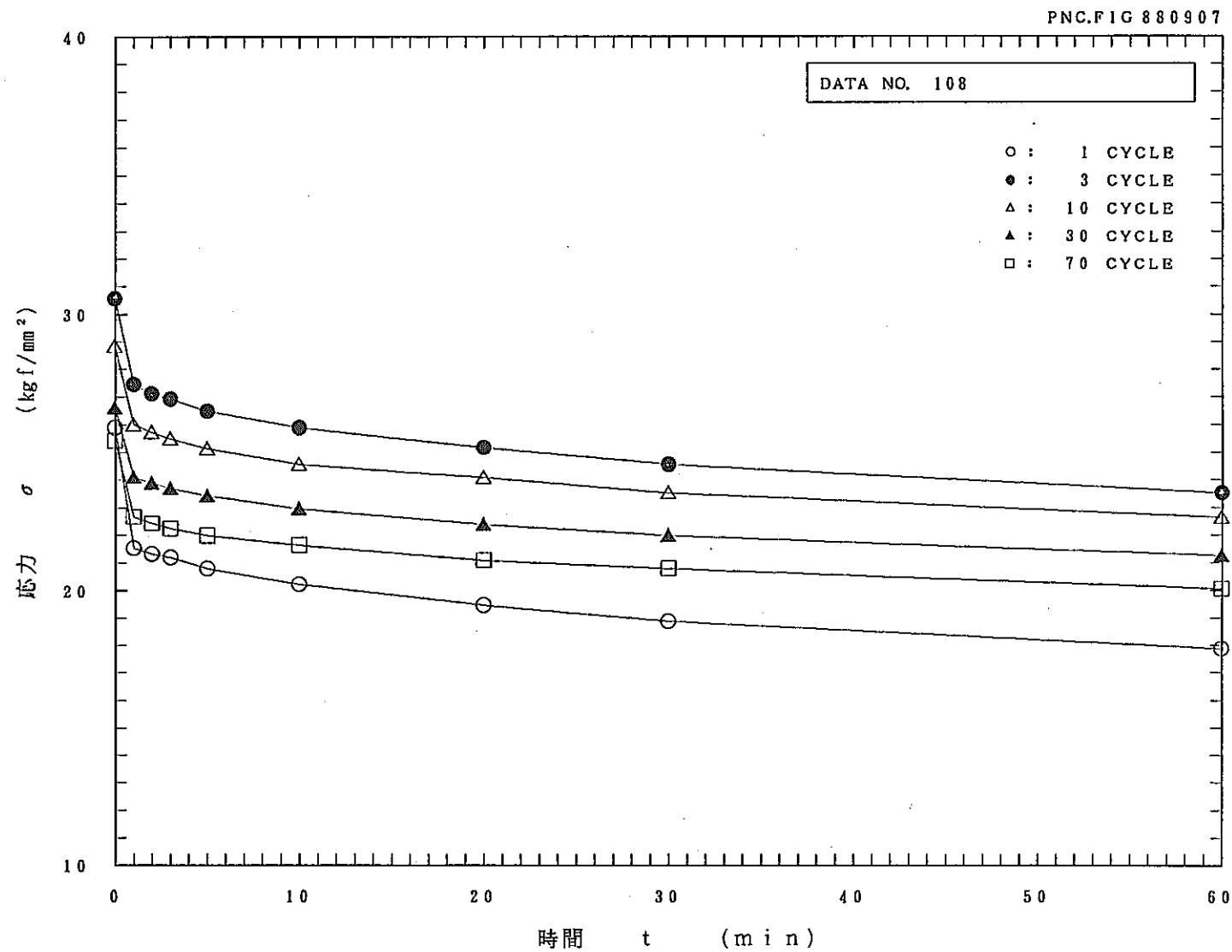


図21. 溶接継手 T + K の500℃における動的応力緩和挙動

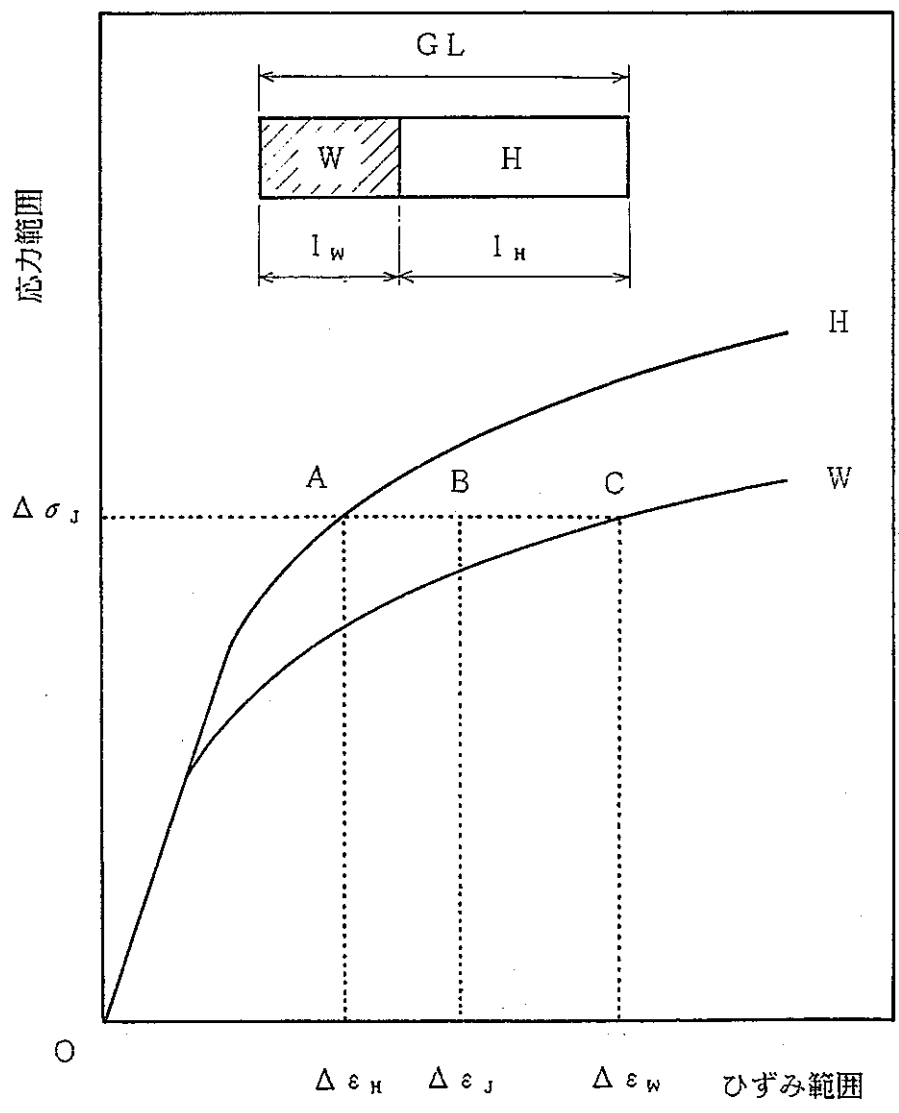


図22. 溶接金属および熱影響部から成る2要素1次元モデルによる歪集中率評価法

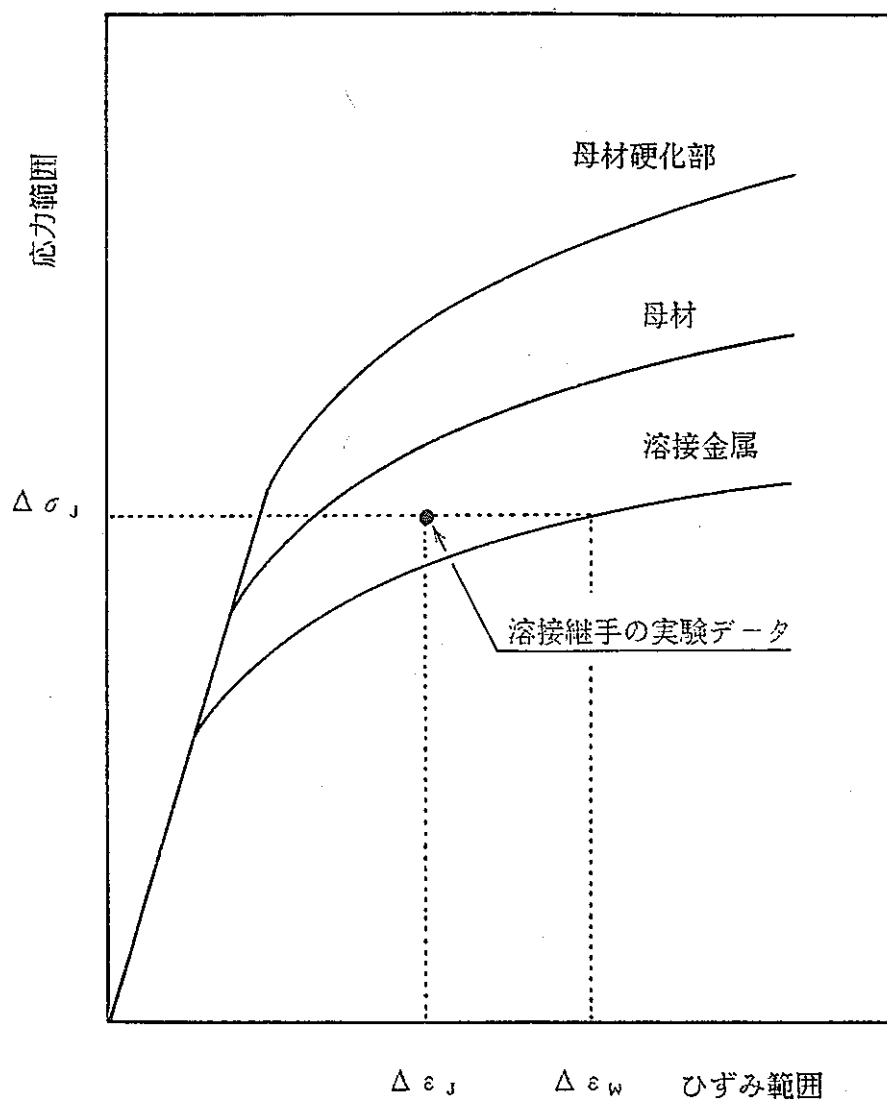


図23. 本報告で用いた歪集中率の計算法

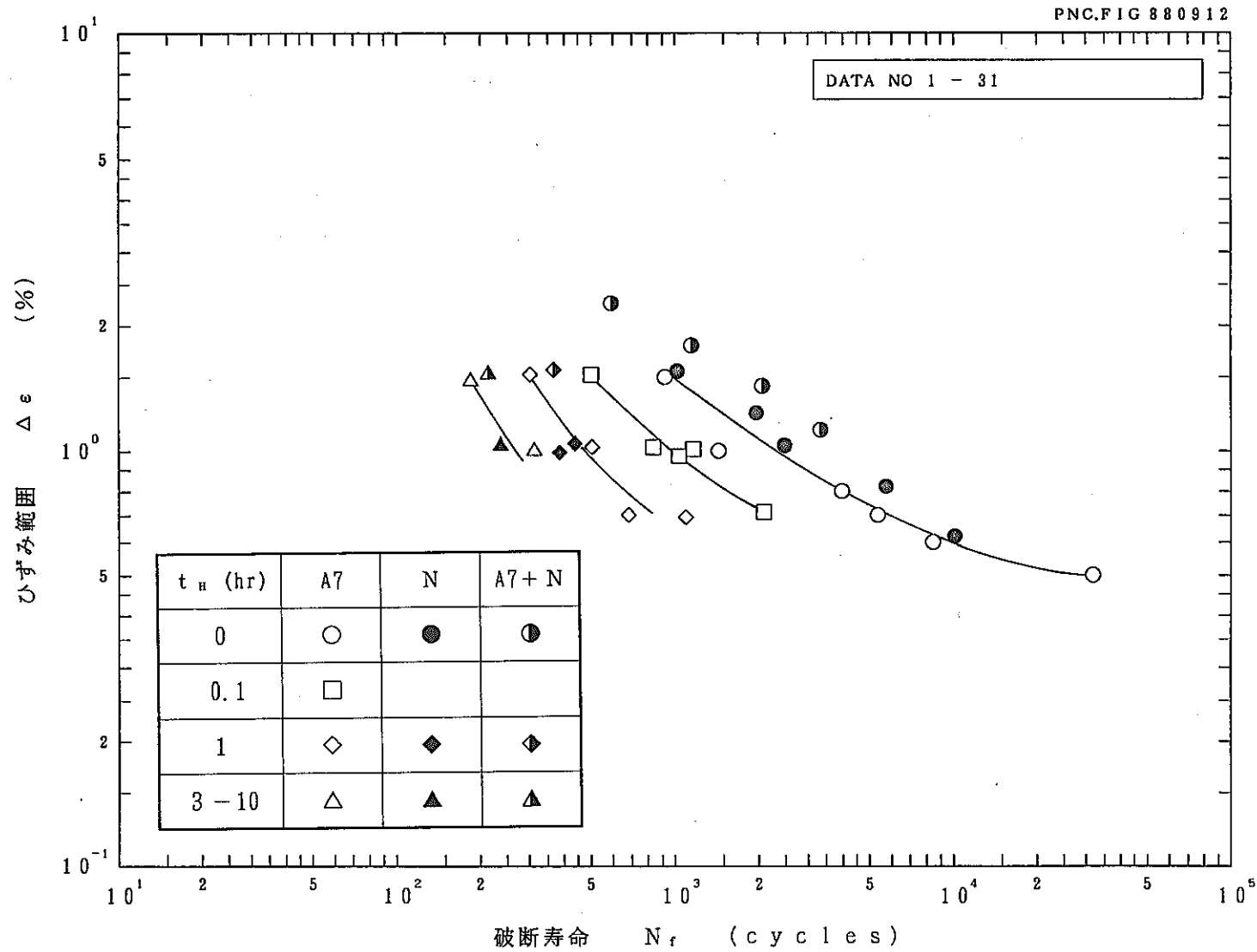


図24. 溶接継手内での溶接金属部への歪集中を考慮して評価した疲労およびクリープ疲労強度

(母材A7, 溶接金属N, 溶接継手A7+N 550℃)

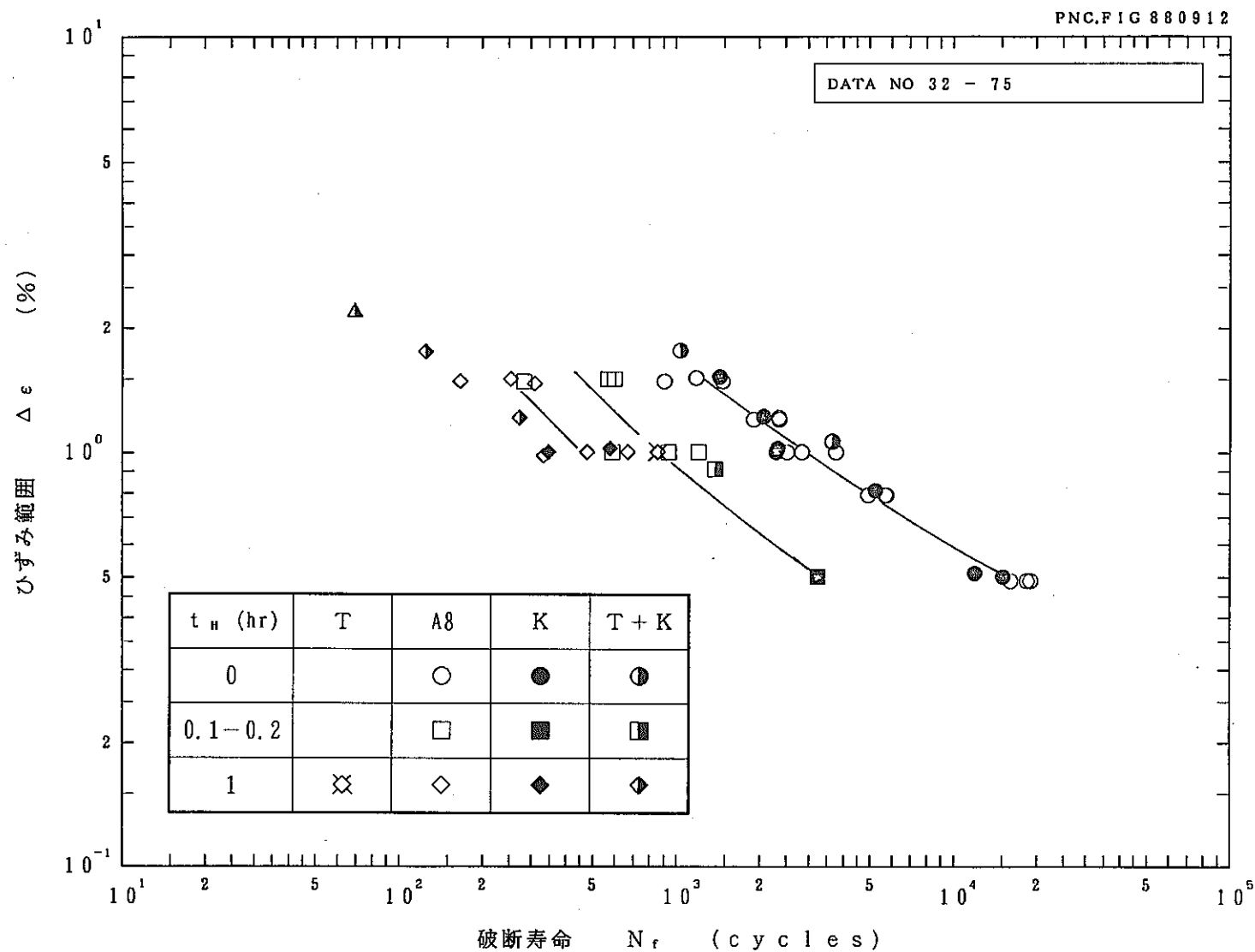


図25. 溶接継手内での溶接金属部への歪集中を考慮して評価した疲労およびクリープ疲労強度

(母材 T, A8, 溶接金属 K, 溶接継手 T + K 550℃)

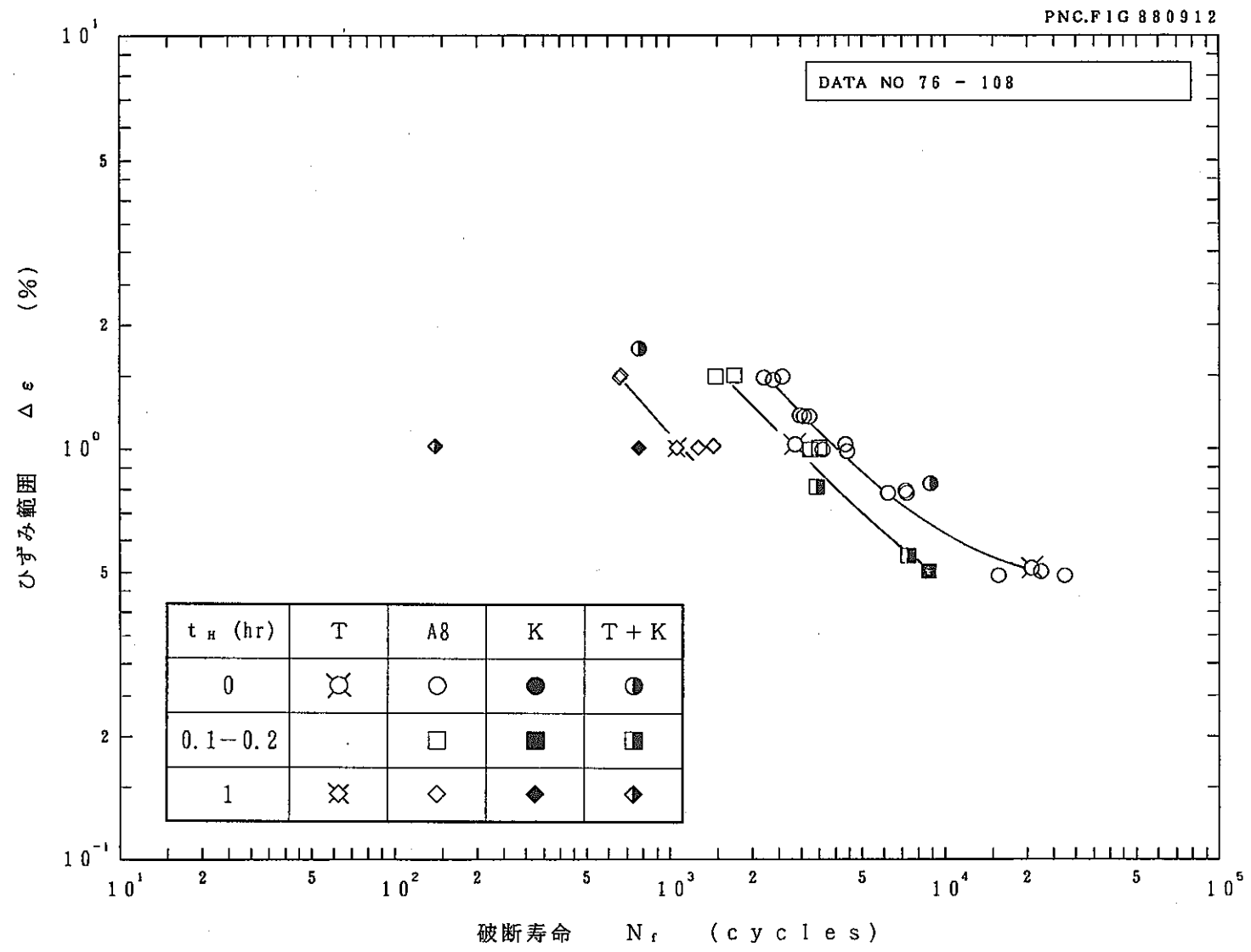


図26. 溶接継手内での溶接金属部への歪集中を考慮して評価した疲労およびクリープ疲労強度

(母材 T, A8, 溶接金属 K, 溶接継手 T + K 500℃)

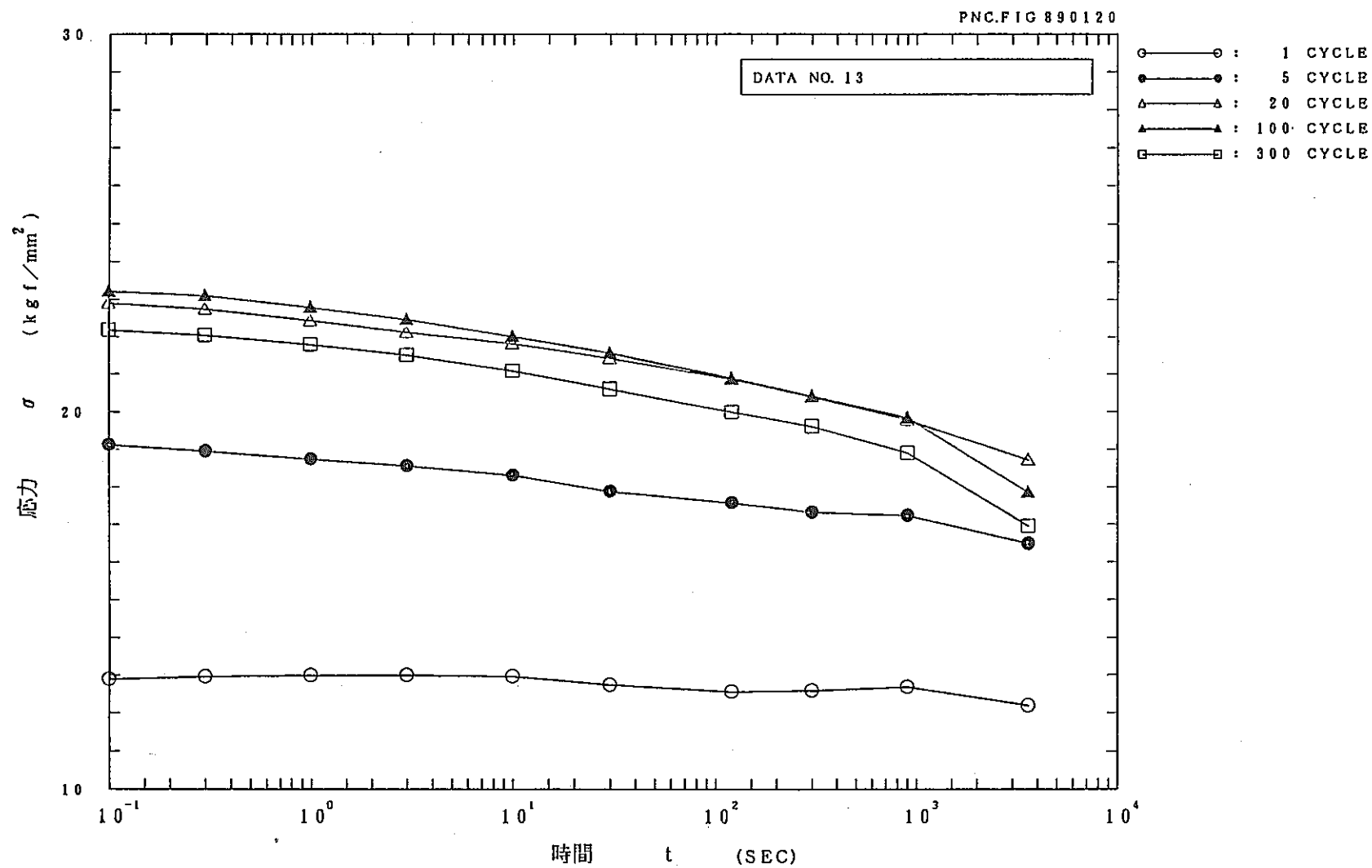
付表 A - 1. 母材および溶接金属の430C - 650Cにおける保持軟化／

動的歪時効挙動の定性的傾向

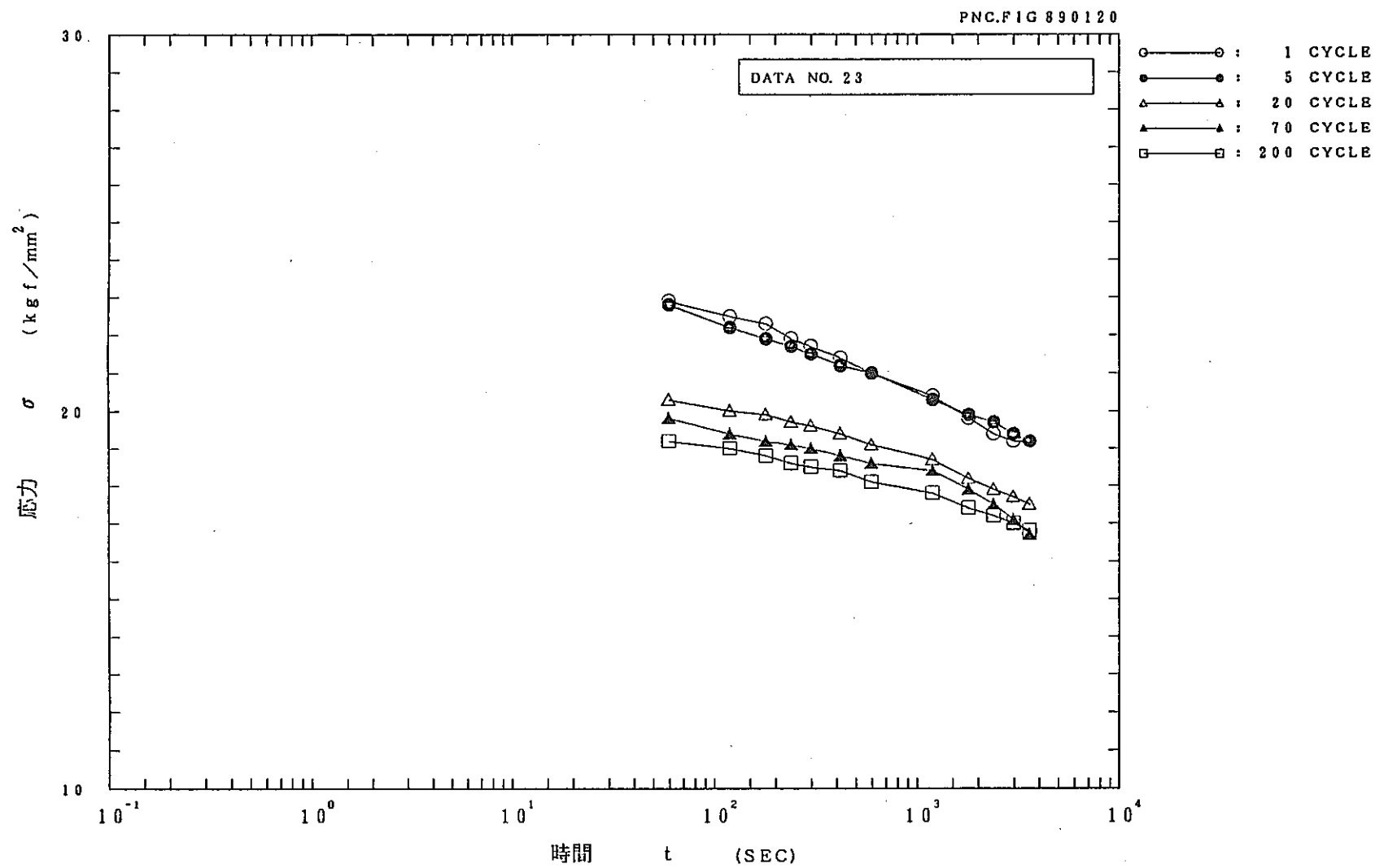
ヒート	製造法	430-450C	500C	550C	600C	650C
A1	板材	動的歪時効	——	保持軟化	——	——
A2	鍛鋼材	——	——	保持軟化	——	——
A4	板材	——	保持効果なし	保持効果なし	保持軟化	——
A5	鍛鋼材	——	動的歪時効	保持効果なし	——	——
A7	板材	動的歪時効	——	保持軟化	——	保持軟化
A8	鍛鋼材	——	動的歪時効	保持効果なし	——	——
T	鍛鋼材	——	動的歪時効	——	保持軟化	——
N	溶接金属	——	——	保持効果なし	——	——
K	溶接金属	——	——	保持軟化	——	——

付表 A - 2. 母材 A1, A2, A4, A5 の化学成分 (wt%)

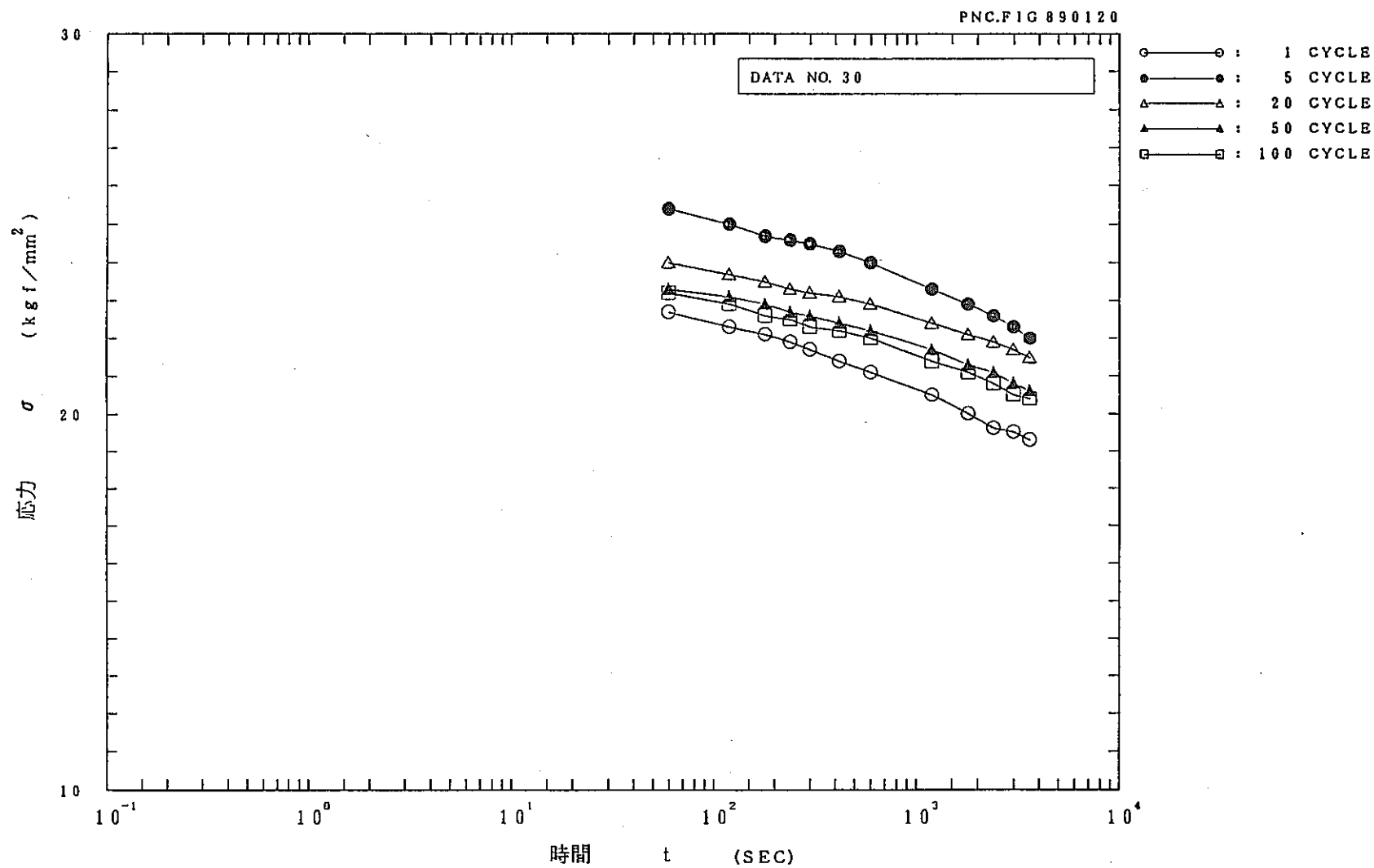
符号	製造法	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Co
A1	板材	0.05	0.57	0.98	0.026	0.006	9.20	18.35	0.16
A2	鍛造材	0.08	0.78	1.49	0.019	0.008	10.4	19.64	0.07
A4	板材	0.05	0.58	1.00	0.028	0.003	9.10	18.45	0.07
A5	鍛造材	0.069	0.53	1.47	0.021	0.003	9.29	18.27	0.05



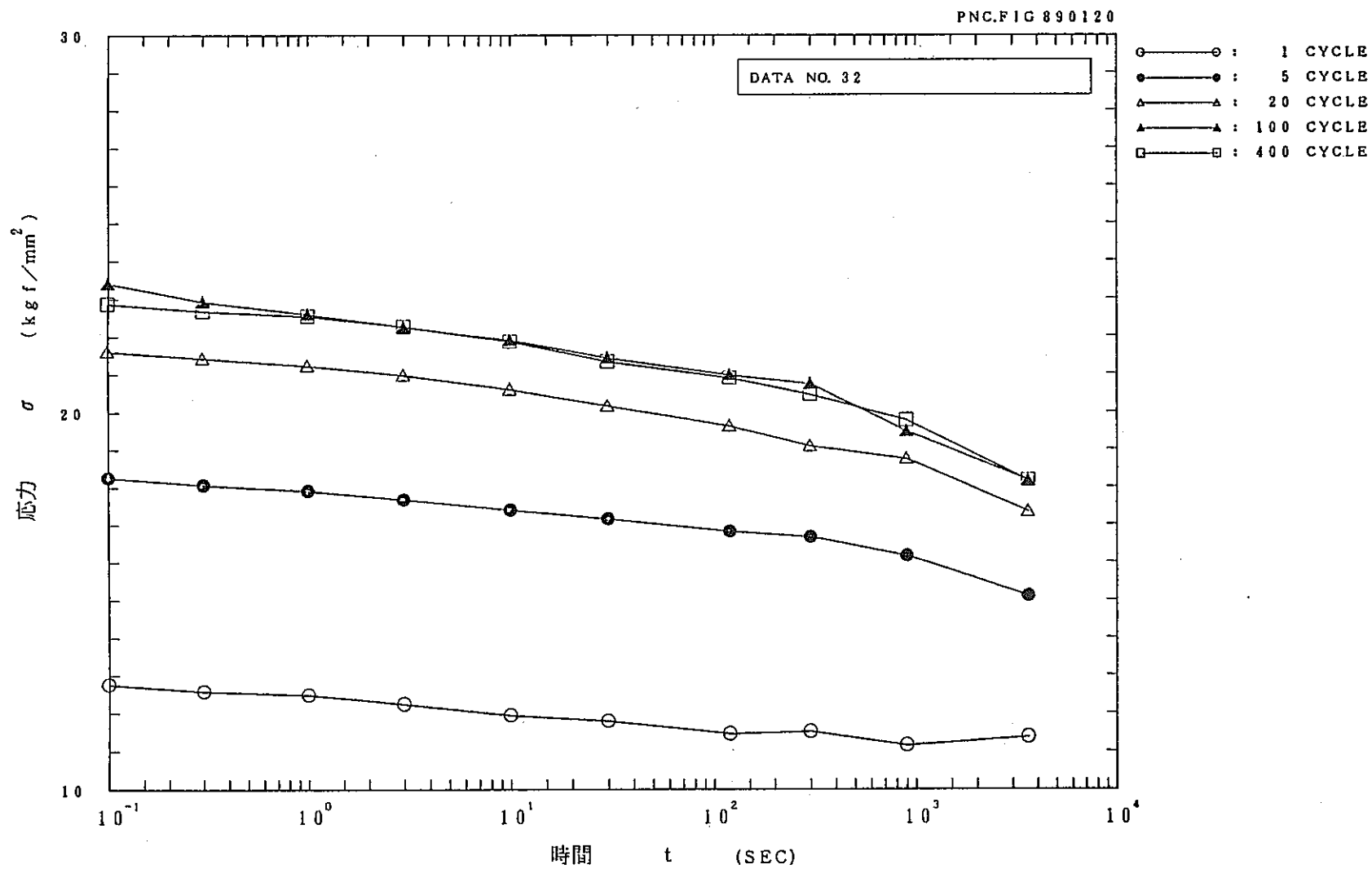
付図A-1. 母材A7の550℃における動的応力緩和挙動



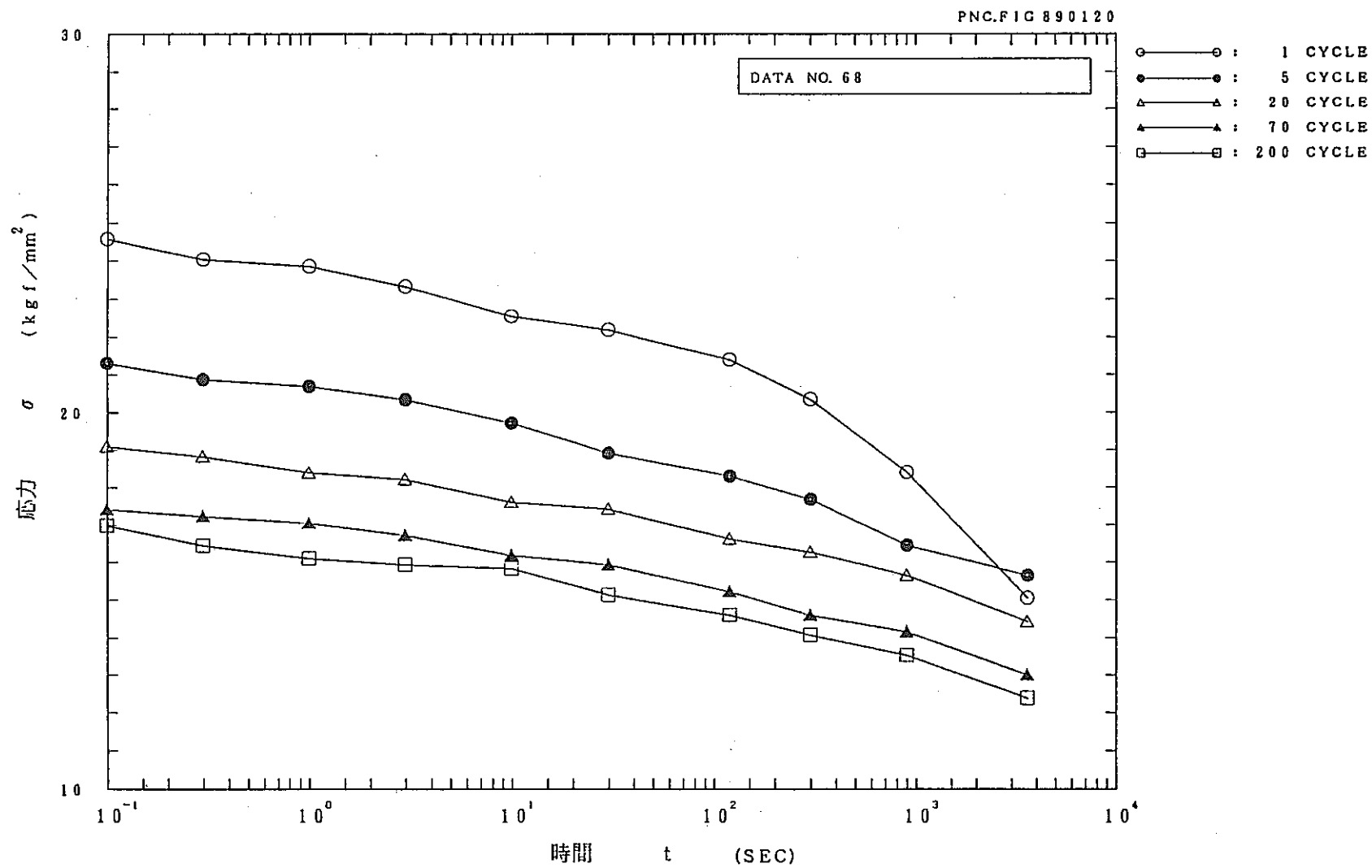
付図A-2. 溶接金属Nの550℃における動的応力緩和挙動



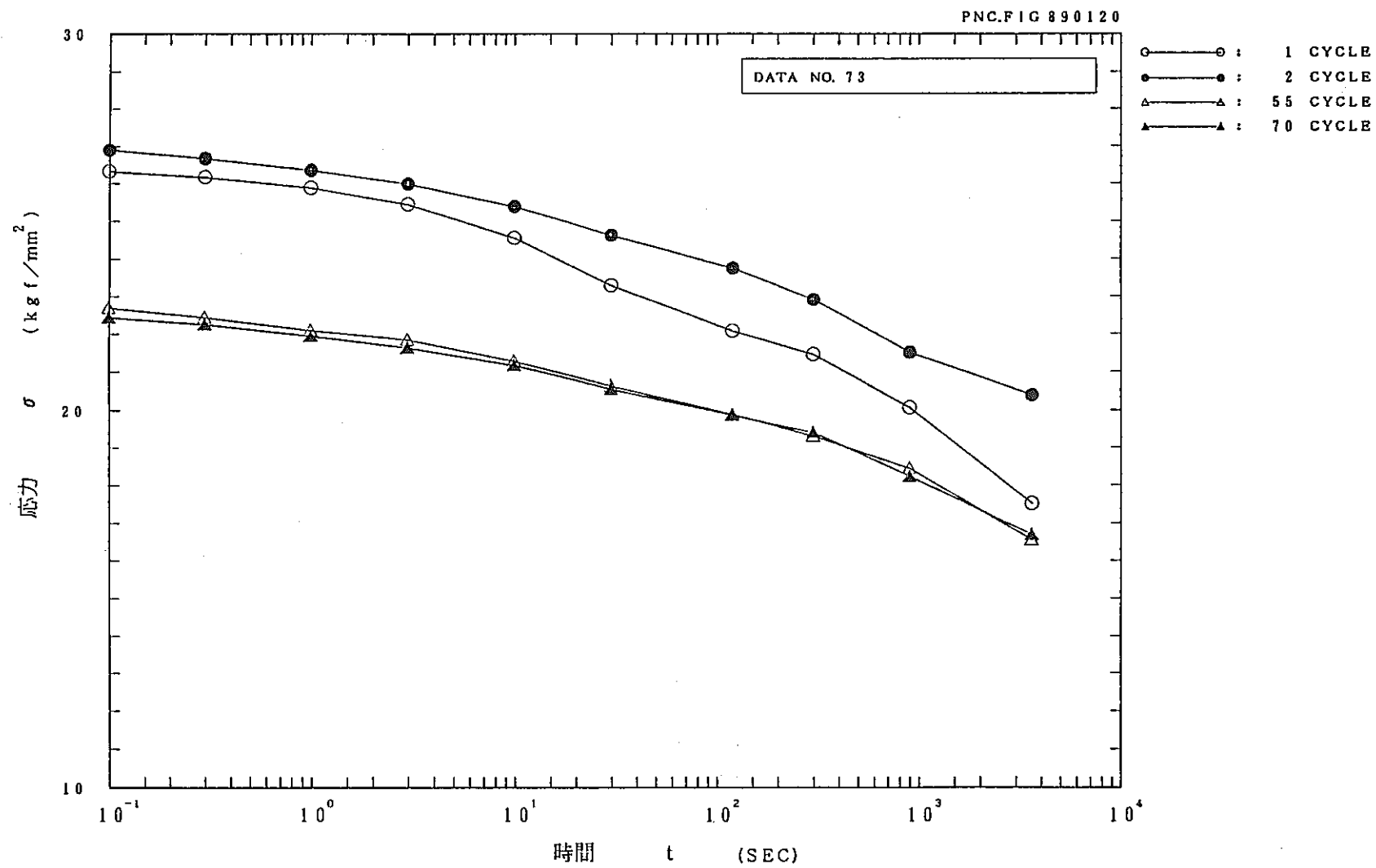
付図A-3. 溶接継手A7+Nの550℃における動的応力緩和挙動



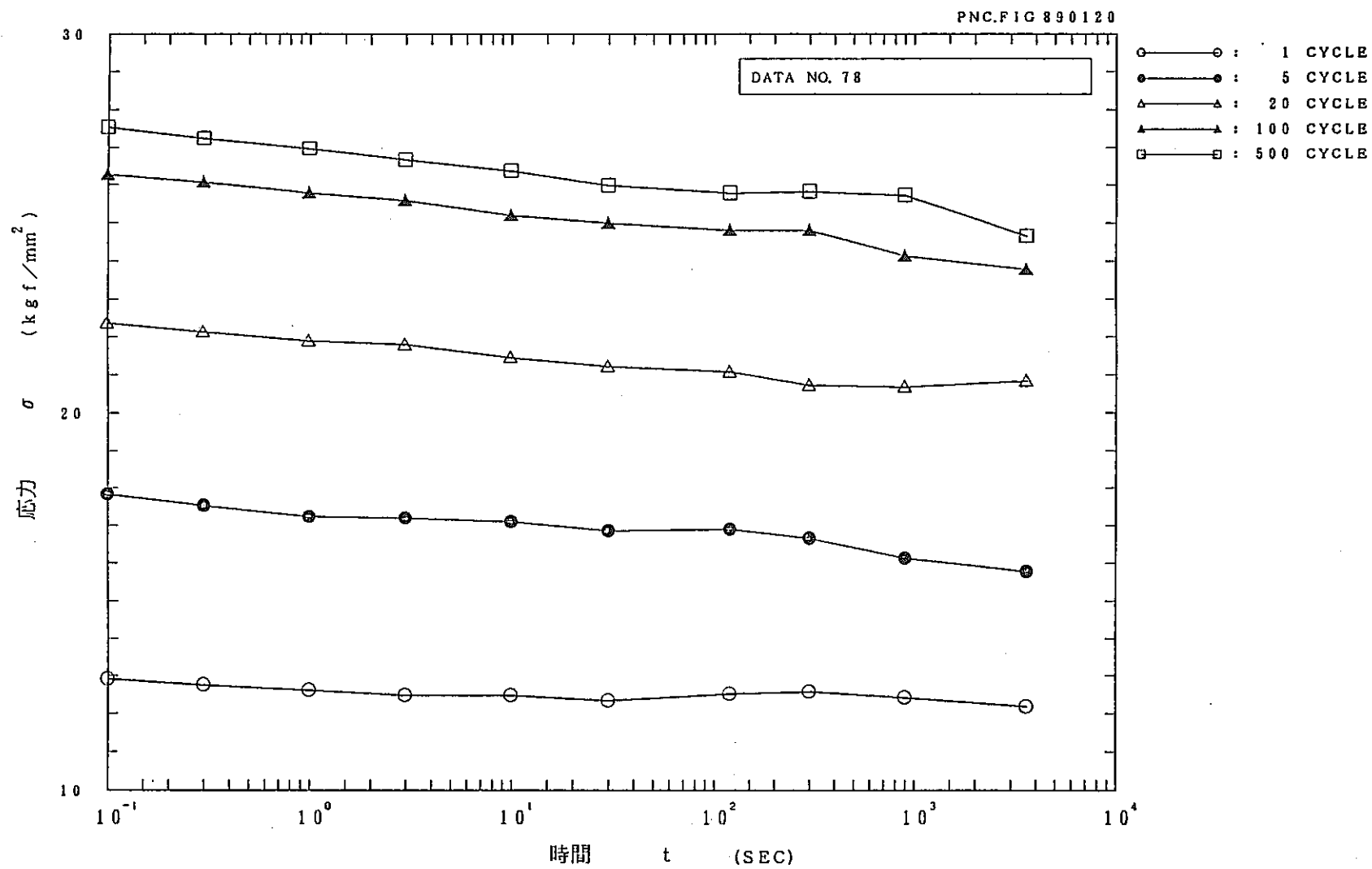
付図A-4. 母材Tの550℃における動的応力緩和挙動



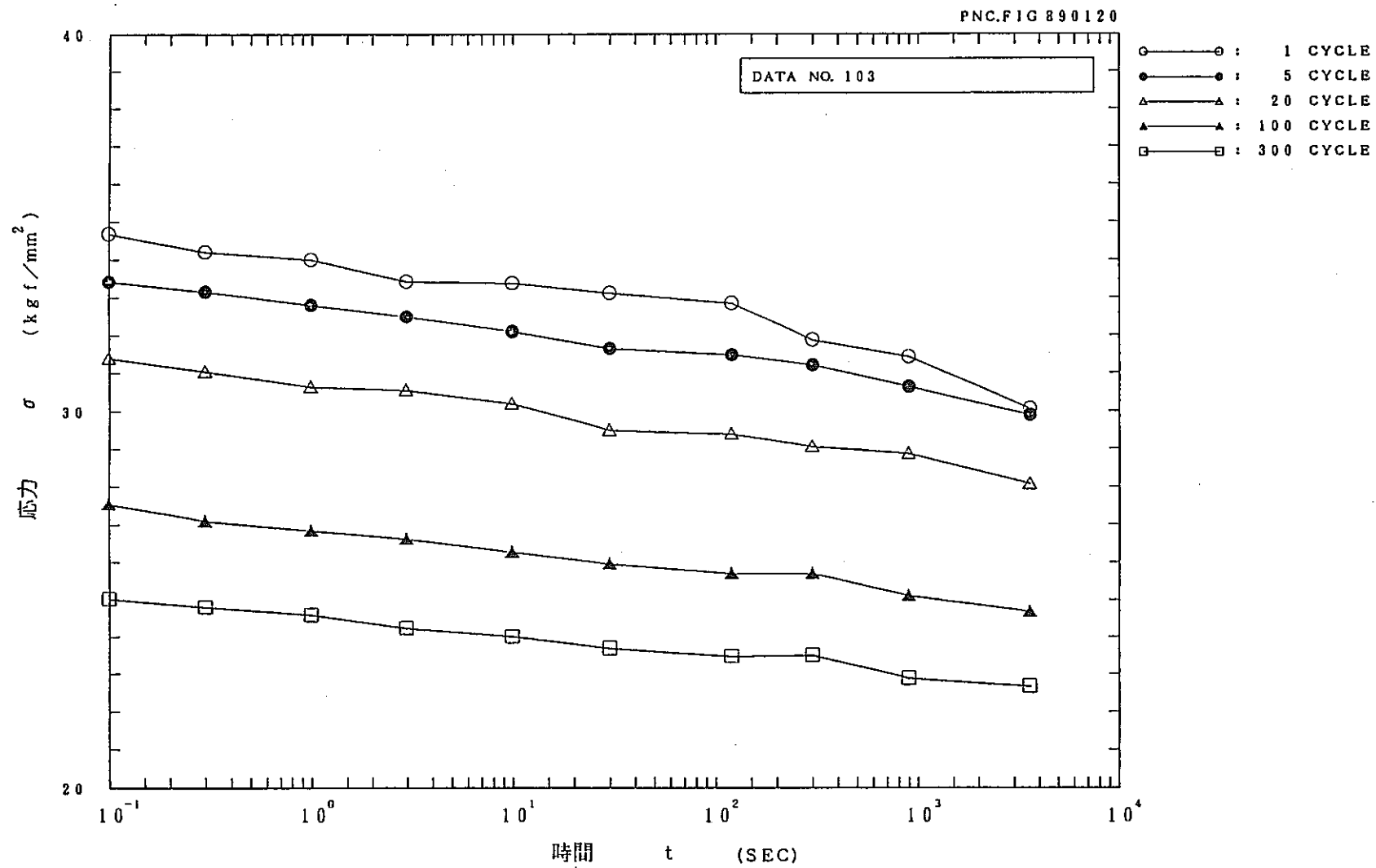
付図A-5. 溶接金属Kの550℃における動的応力緩和挙動



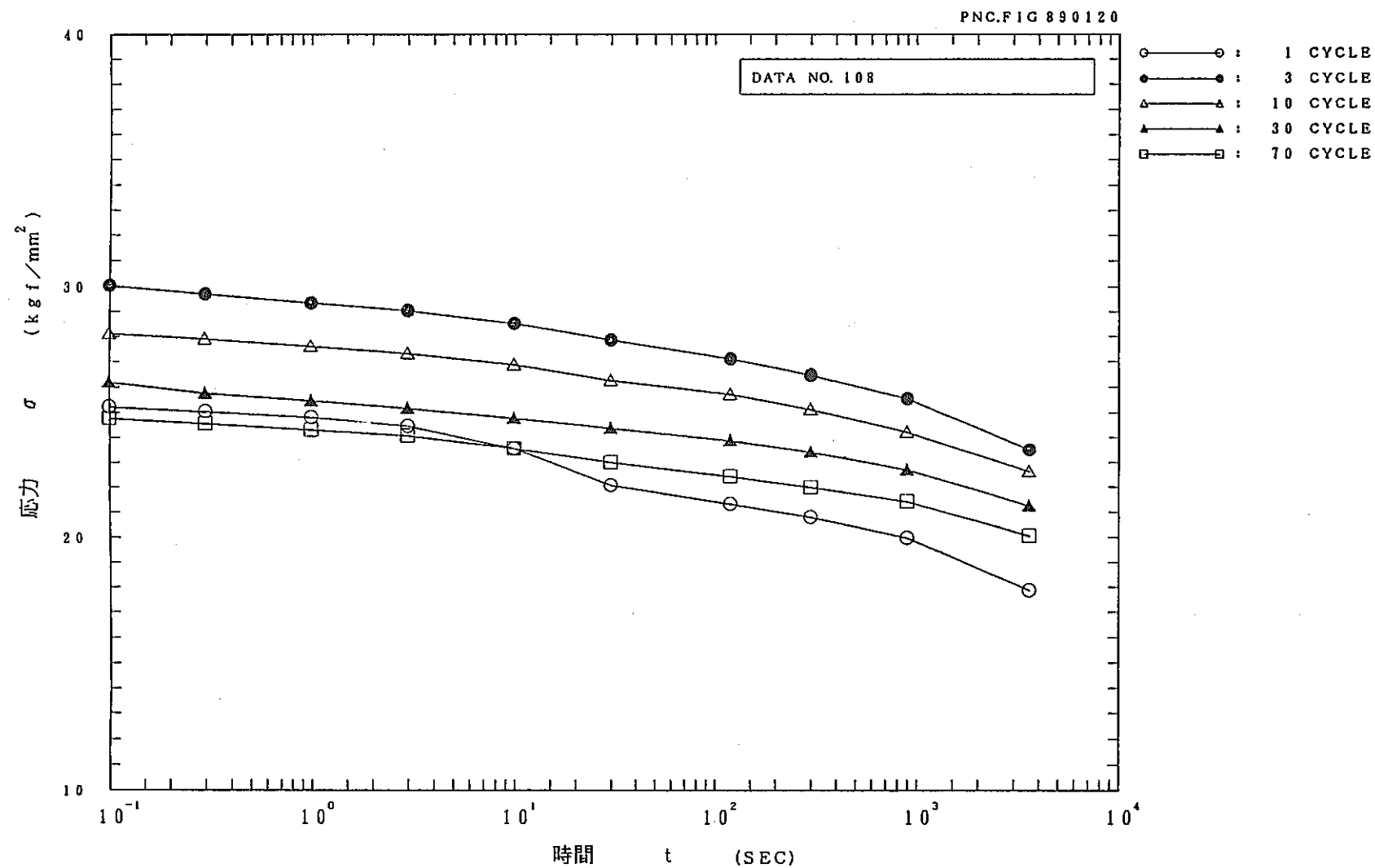
付図A-6. 溶接継手T+Kの550℃における動的応力緩和挙動



付図A-7. 母材Tの500℃における動的応力緩和挙動



付図A-8. 溶接金属Kの500℃における動的応力緩和挙動



付図A-9. 溶接継手T+Kの500℃における動的応力緩和挙動