

主板方向に静的荷重を受けるガセット溶接継手の疲労強度

FATIGUE OF IN-PLANE GASSET WITH STATIC LOAD IN MAIN PLATE

山田健太郎*・貝沼重信**・鈴木幹紹***・近藤明雅****

Kentaro YAMADA, Shigenobu KAINUMA, Mikitsugu SUZUKI and Akimasa KONDO

*Ph.D. 名古屋大学大学院 教授 工学研究科土木工学専攻 (〒464-01 名古屋市千種区不老町)

**工修 名古屋大学大学院 助手 工学研究科土木工学専攻 (〒464-01 名古屋市千種区不老町)

***工修 川田工業株式会社 橋梁事業部(前名古屋大学大学院)(〒114 東京都北区滝野川 1-3-1)

****工博 名城大学 教授 理工学部 土木工学科 (〒468 名古屋市天白区塩釜口 1-501)

Fatigue tests were carried out on twenty-seven in-plane welded gussets with static tensile or compressive stress applied to main plate. As-welded specimens showed longer fatigue life than stress-relieved ones due to compressive residual stresses in the end of the gusset. For the stress relieved specimens, specimens with compressive static stress had longer fatigue life than those with tensile static load, because the compressive static stress seemed to reduce the stress ranges in tension side. The same tendency was also observed in the specimens with machined gusset ends, $R=3$ mm and 10 mm. However, a few specimens exhibited fatigue crack emanating from blowholes, which was exposed to surface by machining process. In these cases no fatigue strength increment was observed, which otherwise expected.

Key Words : fatigue test, welded gusset, as-welded, stress-relieved, residual stress

1. はじめに

横構などを連結するために主部材に溶接されるガセットは、その端部に応力集中を生じ、疲労強度が問題になる。そのため、ガセットを引張フランジではなく腹板に取り付けたり、ガセット端を R 仕上げすることが行われている。

ガセット継手の疲労挙動は、主に図-1(a)に示すように、主板方向に繰返し荷重を載荷する疲労試験で検討される¹⁾⁵⁾。その結果は日本鋼構造協会(以下、JSSC と呼ぶ)の疲労設計指針⁶⁾に反映されてきた。しかしながら、ガセットには横構などからの軸力も作用するので、いわゆる 2 軸応力あるいは多軸応力が作用する場合の検討も必要となる。そこで、著者らは図-1(b)に示すように、ガセットに 98 MPa の引張あるいは圧縮の静的側方応力を導入し、主板方向に繰返し荷重を載荷する疲労試験を行った⁷⁾。試験は、溶接したまま(以下、as-welded と呼ぶ)、および残留応力除去焼きなましした(以下、stress-relieved と呼ぶ)試験体で行った。その結果、as-welded の試験体では側方応力の影響はほとんど無かったが、stress-relieved 試験体は、圧縮の側方応力によって疲労寿命が長くなった。引張の側方応力では、as-welded の試験体の疲労寿命と同じとなったことから、側方応力や残留応力を平均応力と考え、応力範囲の一部が圧縮側に入ることが疲労寿命の差につながることを示した⁷⁾。

図-1(c)に示すようにガセット方向に繰返し荷重が作用した場合の疲労強度等級は、JSSC 疲労設計指針では定められていないが、BS5400⁸⁾や国際溶接学会(以下、IIW と

呼ぶ)の疲労設計指針⁹⁾では示されている。本研究では、この継手の疲労強度等級を検証するために、疲労試験を行った。また、主板方向の静的引張または圧縮応力の影響を検討するため、側方応力を導入した試験も行った。主板方向とガセット方向では、溶接残留応力が異なることが予想されるため、残留応力の測定と解析も行った。さらに、側方応力の影響を見るために、ガセット端を R 加工したガセット溶接継手の疲労試験も行った。ここでは、ガセット端に半径 3mm あるいは 10mm の R 仕上げをした。

2. 試験体および疲労試験

2.1 試験体

供試鋼材は、板厚 9mm の普通構造用鋼材 JIS SM490A で、その化学成分と機械的性質を表-1 に示す。試験体は、 $9 \times 200 \times 900$ mm の主板の両側に $9 \times 350 \times 200$ mm のガセットを溶接することで製作した。ガセットの溶接は、レ形開先に 2 層で突合せ溶接した後、その裏面をガウジングして突合せ溶接することで、完全溶込みレ形開先溶接とした。ガセット端は、裏面溶接の際にまわしすみ肉溶接を行い、ガセット端から 20~30 mm の位置で止めた。

試験体は、溶接残留応力あるいはガセット端の止端形状が異なった 4 種類の面内ガセット溶接継手である。試験体の形状および寸法を図-2 に示す。

1) as-welded 試験体：溶接したままの試験体。

2) stress-relieved 試験体：as-welded 試験体の溶接残留応力を除去するために、約 650 °C の炉内に 4 時間放置し、

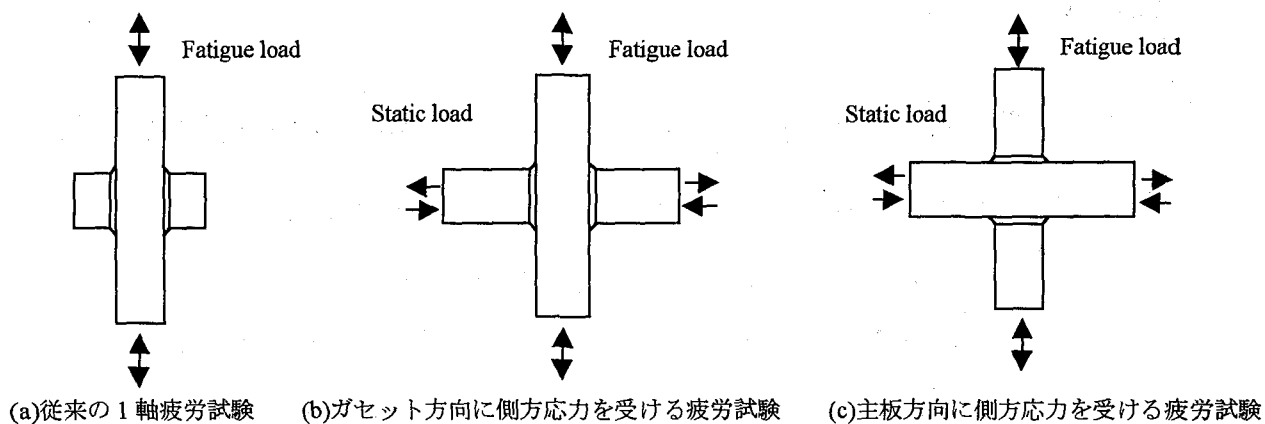


図-1 面内ガセット溶接継手の各疲労試験の載荷荷重

表-1 供試鋼材の化学成分および機械的性質

C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Cu (%)	Ni (%)	Cr (%)	yield point (MPa)	tensile strength (MPa)	elongation (%)
0.17	0.14	1.21	0.02	0.02	0.06	0.05	0.10	394	561	26

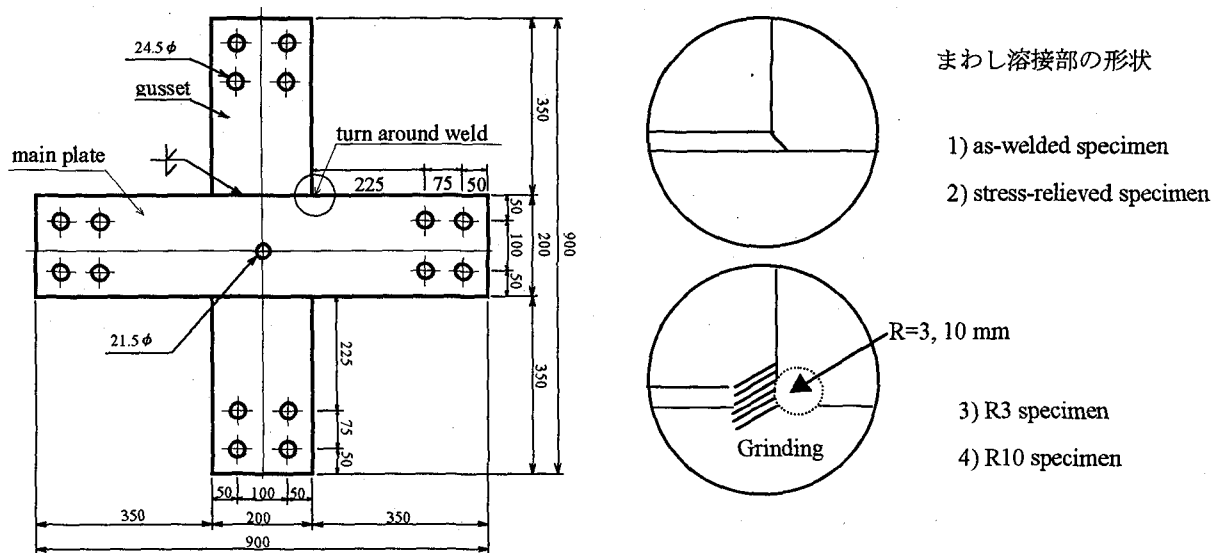


図-2 試験体の形状および寸法

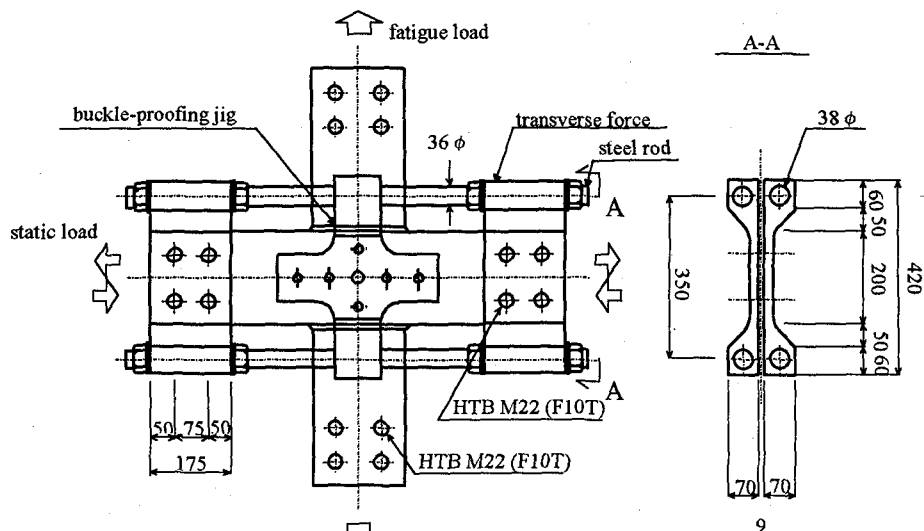


図-3 側方応力導入用の治具

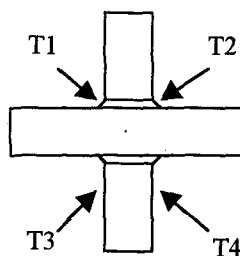
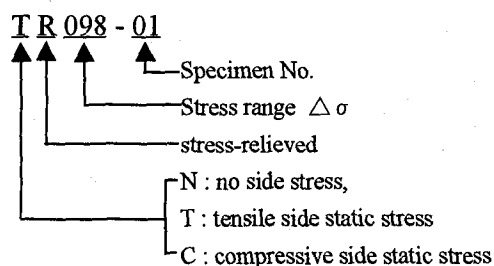
表-2 試験体の名称および試験体数

		As-welded	Stress-relieved	Stress-relieved R3	Stress-relieved R10
Static load	Compression	C×1	CR×5	R3CR×2	R10CR×2
	0	N×2	-	R3NR×2	R10NR×2
	Tension	T×2	TR×5	R3TR×2	R10TR×2

表-3 as-welded および stress-relieved 試験体の疲労試験結果

Specimen	Stress range $\Delta\sigma$ (MPa)	Static stress σ_s (MPa)	Origin of fatigue crack	Initiation life N_c ($\times 10^3$ cycles)	Fatigue life N_f ($\times 10^3$ cycles)
N098-01	98	0	T2	664	>6,950
N098-02	98	0	T4	687	-
			T2	2,000	>11,161
T098-01	98	98	T4	3,002	-
			T1	-	600
T098-02	98	98	T2	2,688	5,546
C098-01	98	-98	B	247	2,525
TR098-01	98	98	T2	94	263
TR098-02	98	98	T3	134	-
			T4	254	-
			T2	80	400
TR078-01	78	98	T3	125	-
			T4	170	-
			T4	328	900
TR059-01	59	98	T3	522	-
			T2	725	-
			-	-	>10,399
TR059-02	59	98	T3	437	1,167
CR098-01	98	-98	T4	-	580
CR098-02	98	-98	T1	128	469
			T3	282	-
CR078-01	78	-98	T4	707	1,404
CR078-02	78	-98	T4	448	884
CR059-01	59	-98	-	-	>10,453

T : fatigue cracking from turn around weld toe, B : fatigue cracking from groove weld, > : run-out



その後約 15 時間で室温まで炉冷することで焼きなましを行った試験体。

- 3) R3 試験体 : stress-relieved 試験体の溶接止端部をエンドミルにより半径 3 mm で切削加工(R 仕上げ)した試験体。なお, R 仕上げした近傍の溶接の余盛部は, ディスクグラインダーで仕上げた。
- 4) R10 試験体 : as-welded 試験体の溶接止端部をエンドミルにより半径 10 mm で R 仕上げした試験体。R 仕上げは止端半径 10 mm を確保するため, 母材側に 2 mm 削り込んだ。R 仕上げした近傍の余盛り部は, ディスクグラインダーで仕上げた。

2.2 疲労試験

疲労試験は, 動的能力 ± 980 kN のアムスラー型万能疲労試験機を用い, 繰返し速度 4.5 Hz の一定振幅荷重で行った。下限荷重は 29 kN (下限応力で 16.3 MPa)とした。主板方向の静的側方荷重は, ± 176 kN とした。この荷重は, 図-3 に示す治具を用い, 鋼棒に取り付けられた内側のナットを締付けることで+98 MPa, 外側のナットを締付けることで-98 MPa の応力を導入した。

試験体の各溶接止端部および 10 mm 内側に 0.04 mm ϕ のウレメット被覆銅線を貼付した。き裂が発生・進展するとこれらの銅線が切れ, 試験機が自動的に停止するようになっている。そこで, き裂発生寿命 N_c は止端部に貼付

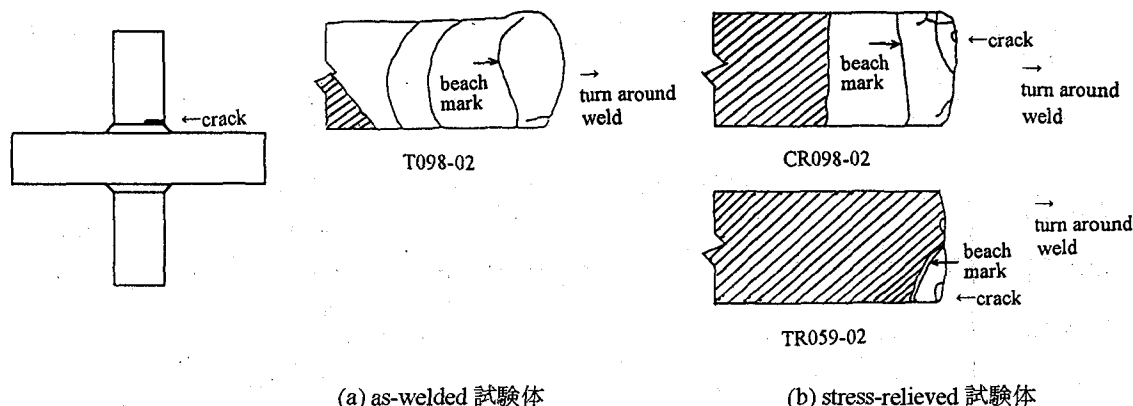


図-4 as-welded および stress-relieved 試験体のき裂破面

した銅線がき裂により切れた時の繰返し回数、破断寿命 N_f は 10 mm 内側の銅線が切れた時の繰返し回数とした。

疲労き裂の発生および進展状況を破面に残すため、ダイマーキングとビーチマーク試験を行った。まず、止端部の銅線が切れた時に速乾性のインクを止端部に塗布し、ダイマーキングを行った。その後、最大荷重を変えずに、応力振幅を 1/2 にして繰返し荷重を載荷するビーチマーク試験を 1~3 回繰り返した。なお、ビーチマークの繰返し回数は約 5 万回で、この回数は疲労寿命 N_f から除外した。

疲労試験に用いた試験体の名称および試験体数を表-2 に示す。

3. 非仕上げの試験体の疲労試験結果

3.1 疲労き裂の発生および進展状況

溶接止端部が非仕上げの as-welded および stress-relieved 試験体の疲労き裂の発生位置を表-3 に示す。as-welded 試験体の主板方向に引張の側方応力を与えた 2 体は、計 8 ヶ所の溶接止端の内 2 ヶ所のまわし溶接止端 (ガセット側) からき裂が発生し、破断寿命 N_f に至った。その代表例を図-4(a) に示す。側方応力が 0 あるいは圧縮の場合には、試験体 3 体の内 2 体がまわし溶接部の溶接止端と、ガセット端から約 30 mm 離れたグループ溶接の止端部に疲労き裂が発生した。

stress-relieved 試験体 10 体の内 8 体では、ガセット方向に側方応力を与えた場合と同様に、まわし溶接止端で半楕円あるいは 1/4 楕円形状で発生した。この代表例を図-4(b) に示す。また、2 体は 1×10^7 回の繰返し数を越えても疲労き裂が発生しなかったため、試験を打ち切った。き裂はまわし溶接止端の合計 40 ヶ所の内 15 ヶ所に発生した。その内 8 ヶ所のき裂が進展し破断寿命 N_f に至った。

3.2 破断寿命 N_f

図-5 および図-6 に as-welded および stress-relieved 試験体の S- N_f 線図を示す。図中の破線は、ガセット継手の強度等級に相当する JSSC の H 等級⁹⁾、およびガセット方向に繰返し荷重を受ける場合に相当する BS5400 の F2 等級⁹⁾ および IIW の強度等級 50⁹⁾ である。*印は、グループ溶接

の止端部から疲労き裂が発生・進展した場合を示している。

(1) as-welded 試験体

図-5 に as-welded 試験体の S- N_f 線図を示す。疲労試験は 5 体行ない、その内 1 体は突合せ溶接部に 24.7 万回でき裂が発生し、板厚方向に進展し貫通したので、253 万回で疲労試験を停止した。また、もう 1 体は、溶接止端に 200 万回でき裂が発生したが、1,100 万回を越えるまでそのき裂が進展せず、やはり試験を停止した。

図-5 に白抜きで示す主板上に繰返し荷重を載荷した試験データは、BS5400 および IIW-50 等級を下回っているが、JSSC の H 等級は満足している。ガセットに繰返し荷重を載荷した as-welded 試験体は、 N_f がそれより長くなり、BS5400 の F2 等級程度となっている。また、側方応力による疲労寿命の差はほとんど見られない。これは、主板上に繰返し荷重を載荷した場合、as-welded 試験体ではガセット端に 200MPa を越える高い引張残留応力が発生しており、側方応力の正負の影響を受けないためである。ただし、全体的に N_f のばらつきが大きい。例えば、側方応力 0 の N 試験体が最も長寿命側になっており、側方応力+98MPa の T 試験体の N_f は大きくばらついている。

今回の as-welded 試験体では、次のような点の特筆される。すなわち、応力集中の最も高い溶接止端でなく、それより低い突合せ溶接部からき裂が発生したものがあつた。また、溶接止端から発生したき裂が停止した。このような結果を考えると、as-welded の試験体には後述するように止端部に高い圧縮残留応力が存在していたことが類推できる。

(2) stress-relieved 試験体

stress-relieved 試験体の S- N_f 線図を図-6 に示す。側方応力+98 MPa を与えた 5 体では、 $\Delta\sigma=59$ MPa で試験した 1 体が 1,000 万回を越えてもき裂が発生しなかったが、他の 4 体は、長さ 200 mm のガセット溶接継手に相当する N_f ¹⁾⁻⁵⁾ を示した。stress-relieved 試験体では、残留応力の影響が少なくなっており、ガセットの長さ起因する応力

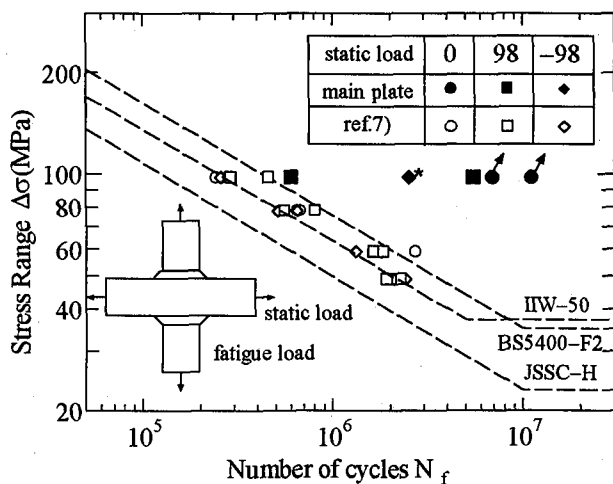


図-5 as-welded 試験体の N_f

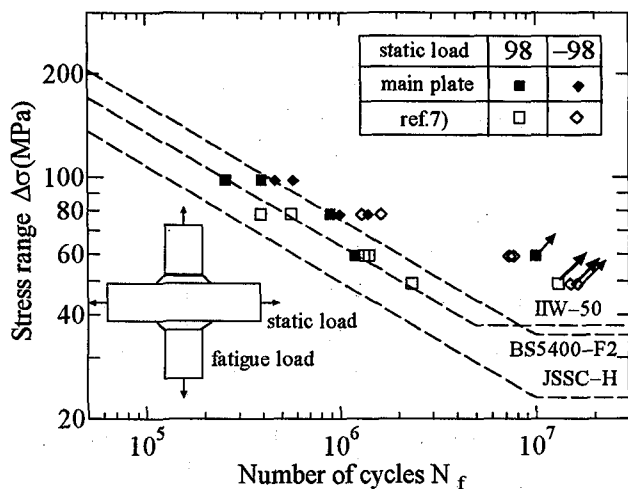


図-6 stress-relieved 試験体の N_f

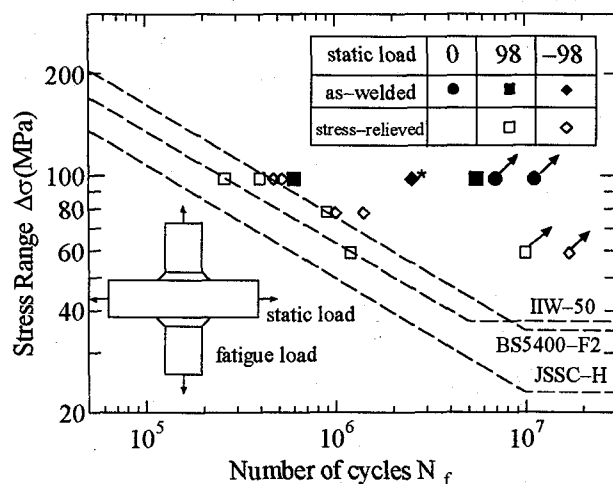


図-7 as-welded および stress-relieved 試験体の N_f

集中の影響のみがあらわれる。また、側方応力により平均応力が増加したのみで、有効応力範囲が変化していないため、結果的に主板方向に疲労荷重を受けたガセット継手の疲労強度と同等になったと考えられる。

主板に-98 MPa の側方応力を与えた場合は、+98 MPa の場合に比べ長寿命側にある。この傾向は主板方向に繰返し荷重を載荷した試験結果と同様である。すなわち、圧縮の側方応力が疲労き裂発生点となるガセット端の溶接止端の応力振幅を圧縮側に移行させ、有効応力範囲を小さくする。その結果、応力範囲の一部が圧縮応力となり、疲労寿命が長くなったものと考えられる。

今回の as-welded 試験体と stress-relieved 試験体の試験結果を図-7 に示す。側方応力が+98 MPa の場合、as-welded 試験体の N_f は stress-relieved 試験体に比べ、1 体は若干長く、もう 1 体は 10 倍以上長い N_f となっている。また、側方応力が-98 MPa の場合には、6 倍程度 N_f が長くなっている。前回の主板方向に疲労荷重を与えたガセット継手では、ガセット端は引張残留応力場であった。今回は、stress-relieved 試験体に比べ as-welded 試験体の N_f が長寿命側にあることから、止端部近傍に圧縮の溶接残留応力

が存在することが考えられる。

4. R 仕上げした試験体の疲労試験結果

4.1 疲労き裂の発生および進展状況

stress-relieved 試験体の止端部に R 仕上げした R3 試験体 6 体および R10 試験体 6 体の疲労試験結果を表-4 に示す。R3 試験体 6 体の計 24 ヶ所の R 仕上げ部の内 13 ヶ所からき裂が発生した。破面には図-8 に示すように半楕円あるいは 1/4 楕円のき裂が見られる。同一試験体ではほぼ同じ繰返し回数で 2 または 3 ヶ所にき裂が発生した。これは、R 仕上げを機械的に行うことで、各止端部の応力集中係数がほぼ等しくなったことが原因と考えられる。また、R3CR098-02 試験体は、3 ヶ所からき裂が発生した。その内 1 ヶ所では R 仕上げによりブローホールが表面に出てきたため、この欠陥を起点として疲労き裂が発生・進展した。R3TR098-01 試験体は、R 部の表面近傍にブローホールが存在していた。

R10 試験体については、6 体の内 4 体は R 部に半楕円あるいは 1/4 楕円き裂が発生し、それが進展する挙動を示した。しかし、R 仕上げにより内在するブローホールが表面欠陥となった 2 体は、そこを起点として疲労き裂が発生した。

4.2 破断寿命 N_f

図-9~12 に R3 および R10 試験体の S- N_f 線図を示す。図中の破線は、前述した JSSC、BS5400 および IIW の各強度等級を示しており、実線は stress-relieved 試験体の平均値と平均 $\pm 2s$ (s : 標準偏差) の回帰直線を示している。*印は、溶接内部のブローホールが R 仕上げによって表面欠陥となり、そこを起点としてき裂が発生した場合を示している。また、+印は R 部の表面近傍にブローホールが存在していた場合を示している。

(1) R3 試験体

図-9 に R3 試験体および stress-relieved 試験体の S- N_f 線図を示す。R3 試験体の疲労試験は、側方応力が 0, +98 MPa, -98 MPa について、それぞれ 2 体行なった。側方応力が

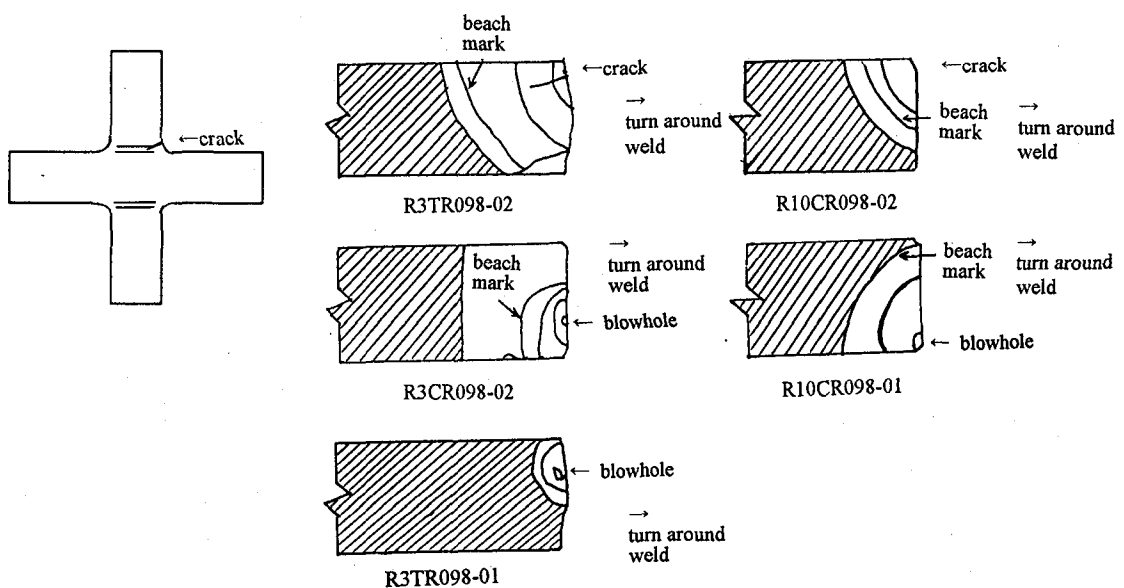
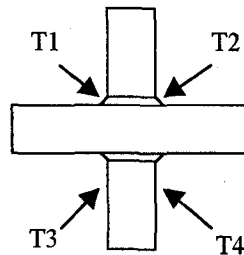
表-4 R3 および R10 試験体の疲労試験結果

Specimen	Stress range $\Delta \sigma$ (MPa)	Static stress σ_s (MPa)	Origin of fatigue crack	Initiation life N_c ($\times 10^3$ cycles)	Fatigue life N_f ($\times 10^3$ cycles)
R3NR098-01	98	0	T2	325	587
			T3	318	-
			T4	325	-
R3NR098-02	98	0	T2	377	721
			T4	377	-
			T3	380	-
R3TR098-01	98	98	T4 or BH	134	388
			T2	324	-
R3TR098-02	98	98	T1	262	462
			T4	362	-
			T2	397	-
R3CR098-01	98	-98	T1	964	-
			T3	-	1,857
R3CR098-02	98	-98	BH(T1 side)	560	744
			T3	560	-
			T4	619	-
R10NR098-01	98	0	T1	644	-
			T3	689	873
			T4	844	1,023
R10NR098-02	98	0			
R10TR098-01	98	98	BH(T1 side)	93	234
R10TR098-02	98	98	T4	441	691
R10CR098-01	98	-98	BH(T3 side)	472	829
R10CR098-02	98	-98	T3	2,600	3,500

BH : fatigue cracking from blowhole

R3 T R 098 - 01

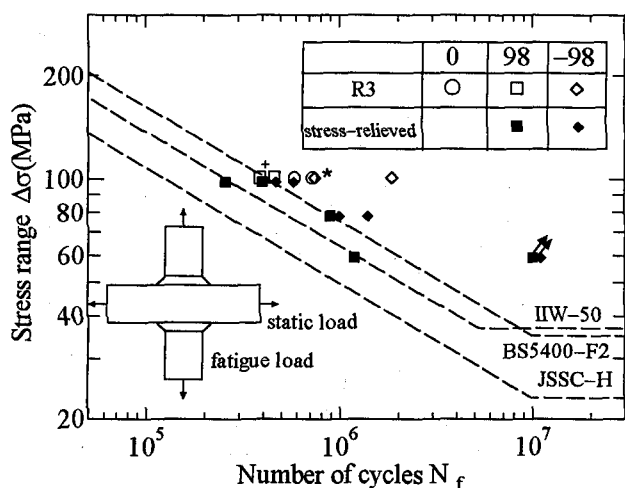
- ↑ specimen No.
- ↑ stress range $\Delta \sigma$
- ↑ stress-relieved
- ↑ N : no side stress
- ↑ T : tensile side static stress
- ↑ C : compressive side static stress
- ↑ radius of rounded weld toe



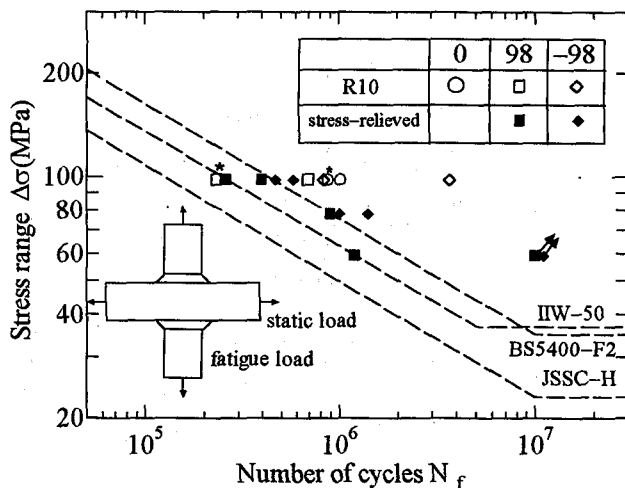
(a) R3 試験体

(b) R10 試験体

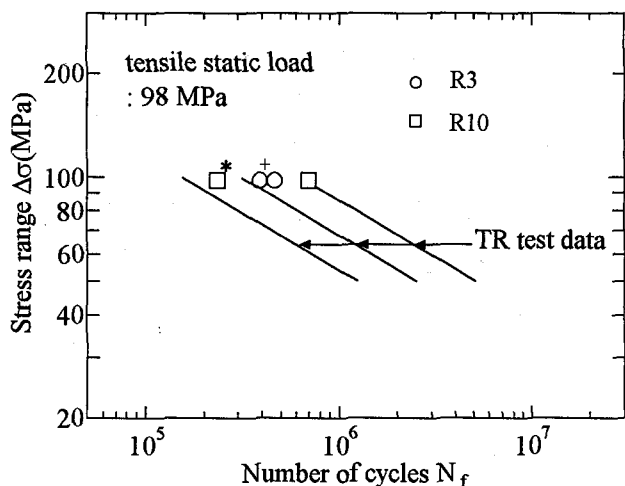
図-8 R3 および R10 試験体のき裂破面



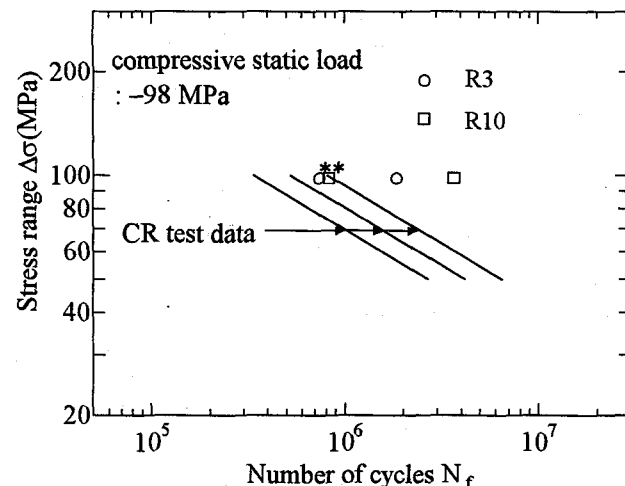
* : Fatigue crack emanated from blowhole.
+ : Blowhole existed at fracture surface.
図-9 R3 および stress-relieved 試験体の N_f



* : Fatigue crack emanated from blowhole.
図-10 R10 および stress-relieved 試験体の N_f



* : Fatigue crack emanated from blowhole.
+ : Blowhole existed at fracture surface.
図-11 R3 および R10 試験体の破断寿命 N_f
(側方応力が 98MPa)



* : Fatigue crack emanated from blowhole.
図-12 R3 および R10 試験体の破断寿命 N_f
(側方応力が -98MPa)

-98MPa の 1 体は、ブローホールを起点としてき裂が発生し、74 万回で N_f に至った。もう 1 体の試験体の N_f は、186 万回であった。R 部に表面欠陥があった試験体を除けば、側方応力が -98 MPa の場合は +98 MPa の場合に比べて、 N_f が 4 倍以上長くなっている。また、側方応力が 0 の場合には、+98 MPa の場合に比べて N_f が 1.5 倍程度長くなっている。

側方応力が +98 MPa の R3TR098-01 試験体の N_f は、stress-relieved 試験体より若干寿命が短くなっている。これは、ブローホールが R 部の表面近くに存在していたためと考えられる。なお、このブローホールから疲労き裂が発生したかどうかは、疲労破面からは確認できなかった。一方、側方応力が -98 MPa の場合には、 N_f が約 4 倍長くなっている。ガセット溶接継手の stress-relieved 試験体は前述したように JSSC 疲労設計指針の H 等級程度となっているが、溶接止端部に半径 3mm の R 仕上げによって、 N_f は若干向上し、IIW-50 程度となっている。ただし、実

構造物では、ガセット端を実験に用いたような R=3 mm に加工することは一般的でない。ここで示した疲労強度等級は参考程度にとどめておく。

(2) R10 試験体

R10 試験体および stress-relieved 試験体の S- N_f 線図を図-10 に示す。R10 試験体についても 0, +98 MPa, -98 MPa の側方応力に対して各 2 体、計 6 体の疲労試験を行った。この内、+98 MPa, -98 MPa で試験した各 1 体は、R 仕上げしたことにより溶接内部のブローホールが表面欠陥となった。疲労き裂はこの表面欠陥から発生・進展した。これらの試験体の N_f は、+98 MPa の場合は 23 万回、-98 MPa の場合は 83 万回であった。表面欠陥が無い試験体の N_f は、+98 MPa の場合は 69 万回、-98 MPa の場合は 350 万回であり、表面欠陥により N_f が低下したことがわかる。R10 試験体で、表面欠陥を有する試験体のデータを除けば、側方応力が +98 MPa の場合に比べて、-98 MPa の場合には N_f が約 5 倍長くなっている。同様に表面欠陥がある

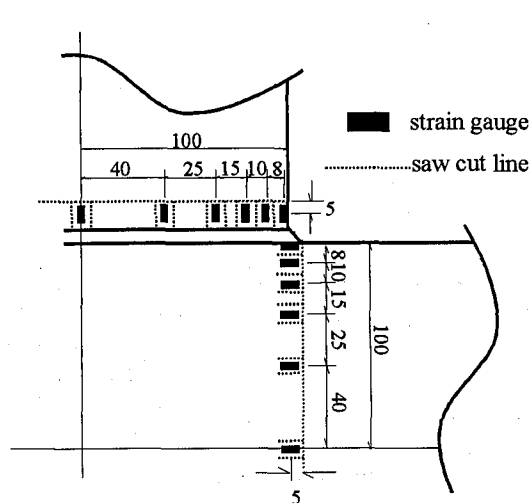


図-13 ゲージ貼付位置

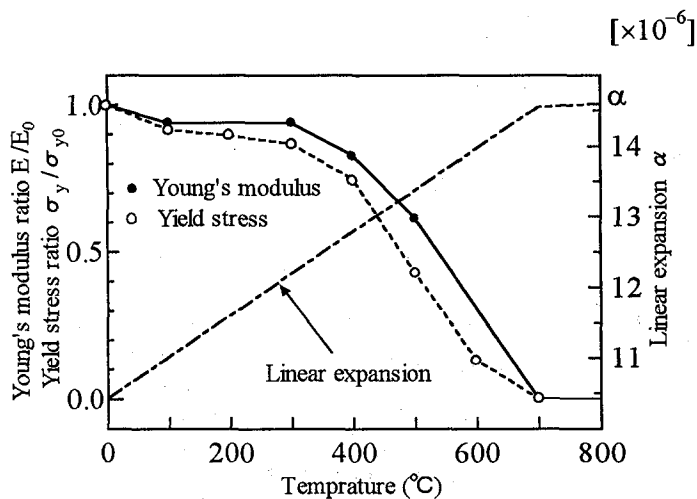
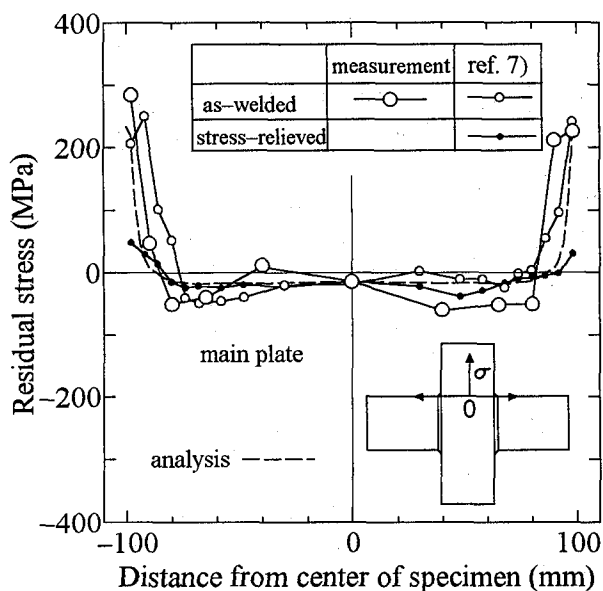
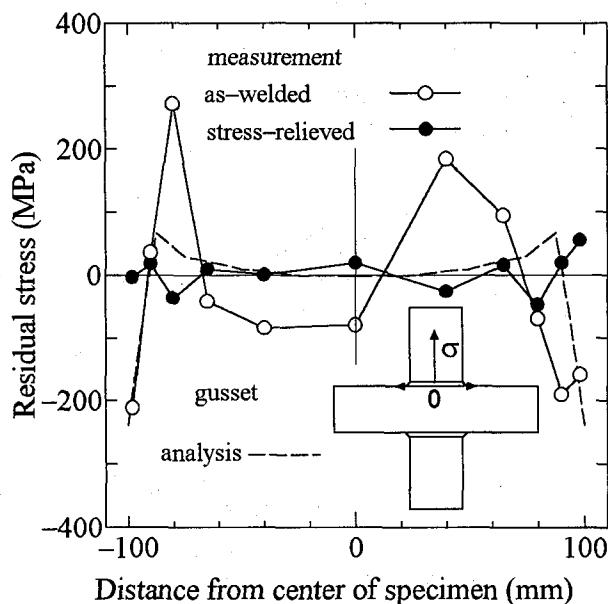


図-14 鋼材の材料定数の温度依存性



(a) 主板方向



(b) ガセット方向

図-15 溶接残留応力分布の測定結果および解析結果

試験体を除けば、stress-relieved 試験体の N_f に比べ、止端部を R10 に仕上げることで、 N_f は側方応力が +98 MPa の場合 1.5~2 倍程度、-98 MPa の場合 6~7 倍程度向上している。

図-11 に +98 MPa の側方応力を载荷した場合の R3 試験体と R10 試験体の N_f を示す。ブローホールが表面欠陥となった R10 試験体の N_f は、R3 試験体の 1/2 程度に短くなっている。表面欠陥がない場合は、R10 試験体の N_f は R3 試験体に比べ、1.5 倍程度長くなっている。また、R3 試験体の N_f は stress-relieved 試験体の平均値と同程度となっている。

図-12 は側方応力-98 MPa を与えた場合の R3 試験体と R10 試験体の N_f を示している。ブローホールが表面に現れた場合、止端部の R 仕上げる半径によらず N_f は同程度となっている。表面欠陥が無い場合、R10 試験体の N_f は、R3 試験体の約 2 倍疲労寿命が長くなっている。これは、

側方応力が +98 MPa の場合と同程度で、R=3 mm から 10 mm と大きくなり、その分応力集中係数が小さくなって疲労寿命が長くなった。

5. 溶接残留応力の測定と解析

前述したように、溶接残留応力がガセット溶接継手の疲労寿命に影響を及ぼしていると考えられるため、この継手の主板方向およびガセット方向の残留応力の測定およびその解析を行った。

5.1 残留応力の測定

残留応力の測定は、as-welded 試験体 2 体および stress-relieved 試験体 1 体を用い、図-13 に示すように 1 軸のひずみゲージ(ゲージ長: 1mm)を主板およびガセットの片面に貼付して、切断法によって行った。切断には幅 1mm のバンドソーを用い、図-13 に示す点線に沿って低速で切断した。

5.2 残留応力の解析

解析モデルは、試験体と同じ寸法とし、まわし溶接部は止端半径 ρ を 0mm, 止端角 θ を 45° としてモデル化した。解析モデルには、試験体の対称性および継手の板厚方向への放熱を考慮し、試験体の 1/8 を解析した。要素は 8 節点のソリッド要素であり、最小要素寸法は $2 \times 6 \times 2$ mm である。ここでは、溶接部を 700°C まで瞬間的に熱した状態を初期条件として熱伝導解析を行い、この解析から得られた温度分布を熱荷重として与え、熱弾塑性解析を行った。これらの熱伝導解析および弾塑性応力解析を繰返し行い、モデル全体が室温 15°C まで低下したときの応力を求め、これを溶接残留応力とした。なお、解析には汎用有限要素解析プログラム MARC を用いた。解析に用いた鋼材の材料定数の温度依存性は図-14 に示すように仮定した。

5.3 測定結果および解析結果

図-15 に as-welded 試験体の残留応力の測定結果および解析結果を示す。図の縦軸は残留応力であり、横軸は試験体の板幅中央からの距離である。図-15(a) は主板方向の残留応力分布を示している。as-welded 試験体には、主板の溶接止端部に降伏点の 60~70% に相当する 250~300MPa の高い引張残留応力が生じている。引張残留応力が生じている領域は止端部から 10mm 程度であり、その他の領域では 50MPa 以下の大きさの残留応力場となっている。解析結果は測定結果と良く一致していることから、熱弾塑性解析を行うことで、主板方向の残留応力を評価することが可能と言える。

図-15(b) にガセット方向の残留応力分布を示す。as-welded 試験体には、ガセット両端近傍に約 200MPa の圧縮残留応力が生じており、両端から 10~30mm の領域で 200~300MPa の引張残留応力に転じている。また、板幅中央部でも 100MPa 程度の圧縮残留応力が生じている。この場合も残留応力の解析結果は、ガセット端の測定結果を良く表している。ただし、板厚中央部では、実測値が正負と反転するような値を示している。これは、まわし溶接をガセット端から 20~30mm の所で止めていたことの影響で、解析ではこのことを考慮していないためと思われる。

前述したように、as-welded 試験体では、ガセット端に高い応力集中があるが、それより低い突合せ溶接部から疲労き裂が発生したり、溶接止端から発生したき裂が停留したものがある。さらに、疲労寿命が stress-relieved 試験体より長寿命側にあった。これらは、ガセット端近傍の高い圧縮残留応力が影響したものと考えられる。

stress-relieved 試験体については、焼きなましによりガセット端の高い圧縮残留応力やガセット端部から 10~30mm の高い引張残留応力が 50~50MPa に減少している。したがって、前述のように圧縮残留応力の影響が無くなるため、その疲労強度は主板方向に繰返し荷重を載荷した疲労試験結果⁷⁾とほぼ一致したと言える。

6. まとめ

本研究では、面内ガセット溶接継手の主板方向に側方応力を与えて、ガセット方向に疲労荷重を作用させる疲労試験を行った。また、ガセット端を R ($R=3$ mm と 10 mm) 仕上げした試験体を用いて疲労試験を行った。さらに、残留応力の測定およびその熱弾塑性解析を行って、疲労寿命に及ぼす影響を検討した。

本研究で得られた主な結果を以下に示す。

- 1) as-welded 試験体のガセット方向に繰返し荷重を載荷した場合、主板方向の側方応力 ± 98 MPa によらず、その疲労強度は stress-relieve 試験体よりも高い。これは、ガセット端に高い圧縮残留応力が存在し、この部分からの疲労き裂発生をおさえるためである。
- 2) stress-relieved 試験体の主板方向に -98 MPa の側方応力を与えると、疲労強度は側方応力がない場合に比べ向上する。+98 MPa の側方応力を与えた場合には、ほとんど疲労強度に影響を及ぼさない。
- 3) 溶接止端部を R 仕上げした試験体についても、2) で示したような傾向を示した。
- 4) $R=3$ mm に仕上げた試験体に比べ、 $R=10$ mm に仕上げた試験体は、応力集中係数が低くなった分だけ、疲労寿命が向上した。なお、ここで用いた試験体は焼きなましにより、溶接残留応力が ± 50 MPa より小さい値になっていた。
- 5) 本実験では、R 仕上げすることによって溶接内部に存在しているブローホールが表面欠陥となり、これを起点に疲労き裂が発生・進展したケースがあった。このときの疲労強度はブローホールが表面に出ていない場合に比べて低下する。

謝 辞

本実験を遂行するにあたって、(株)創建の熊田篤敬氏(研究当時:名古屋大学工学部土木工学科)に御協力を頂いた。また、試験体はトピー工業(株)豊橋製造所に製作して頂いた。ここに記して、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 山田健太郎, 三ツ木幸子, 近藤明雅: ガセット溶接部材の疲れ強さと設計基準, 構造工学論文集, Vol.32A, pp.25-33, 1986.
- 2) 山田健太郎, 酒井吉永, 菊池洋一: ガセットを溶接した引張部材の疲れ強さとストップホールの効果, 土木学会論文報告集, No.341, pp.129-136, 1984.
- 3) 三ツ木幸子, 大野貴史, 山田健太郎: 過荷重を受けた応力集中のある部材の疲れ特性, 土木学会論文集, No.368/I-5, pp.293-300, 1986.
- 4) 山田健太郎, 森野真之, 聖生守雄, 安波博道: サンドイッチ制振鋼板溶接継手の疲労特性, 土木学会論文集, No.489/I-27, pp.147-156, 1994.
- 5) 山田健太郎, 重富寿: 長寿命域での低荷重振幅の疲れ試験, 構造工学論文集, Vol.35A, pp.961-968, 1989.

- 6) 日本鋼構造協会：鋼構造物の疲労設計指針・同解説，技報堂，1993.
- 7) 山田健太郎，岡戸直樹，田中寿志，近藤明雅：側方に静的荷重を受けたガセット継手の疲労強度，土木学会論文集，No.549/I-37，pp.33-42，1996.
- 8) British Standards Institution: Steel Concrete and Composite Bridges, BS5400, Part 10, 1980.
- 9) International Institute of Welding: Recommendation on Fatigue of Welded Components, IIW Document XIII-1539-96/XV-845-96, 1996.

(1997年9月26日受付)