

アルミ合金板スポット溶接部の凝固割れと疲労強度およびその改善

高木順，森信行，藤本正男

Fatigue Strength of Spot-welded Joints of Aluminum Alloy Sheets with Solidification Cracking Nugget and Its Improvement

Jun Takagi, Nobuyuki Mori, Masao Fujimoto

要 旨

アルミニウム合金版のスポット溶接部には、凝固割れが発生し易い。しかし、スポット溶接ナゲット中心部から発生するこれら溶接欠陥の強度評価方法は確立されておらず、欠陥の継手強度への影響は明らかにされていない。

そこでまずAl - Mg系合金板を用い、欠陥を持つ溶接継手の強度評価方法を検討するため、箱形断面部材と2枚重ね試験片の曲げ疲労試験、引張疲労試験を実施した。その結果から、凝固割れが疲労き裂の起点となること、および破壊部近傍のひずみ整理による両者の強度が一致することを確かめ、その評価方法の妥当性を明らかにした。

つぎに溶接条件を厳選することにより、凝固割れの発生を低減し、継手強度の改善を試みた。その結果、欠陥を低減した溶接部の疲労強度は2～3倍上昇することを確認した。さらに、Al - Cu - Mg系、Al - Mg - Si系合金板にも適用し、同じように疲労強度が改善できることを確認した。

Abstract

Solidification cracking occasionally occurs in a spot-welded part of aluminum alloy sheet joints. The box section beam constructed by spot-welds fractured from such solidification cracking parts in the flange under cyclic bending load. It was found that the fatigue crack started from the solidification cracking and that the fatigue strength of the box section beam has the same level as that of the spot-welded double sheet specimen under cyclic tensile load. When the solidification cracking was reduced by the optimized welding condition, the fatigue strength was improved significantly. This improvement was verified for three types of aluminum alloy sheets: Al-Mg sheet, Al-Cu-Mg sheet, and Al-Mg-Si sheet.

キーワード アルミニウム合金板，スポット溶接，継手，疲労強度，凝固割れ

1. まえがき

自動車の軽量化は、燃費向上による地球環境問題への対応のみならず、車両の運動性能向上の面からも重要な項目である。軽量化には様々な手段があるが、車体構造へのアルミニウム合金板の適用は有望な候補の1つである。しかし、その適用にはいくつかの課題もあり、スポット溶接部の強

度もその中の1つである。すなわち、アルミニウム合金板のスポット溶接部には、材料特性や溶接条件によっては凝固割れがしばしば発生する¹⁾。ところが従来のスポット溶接継手の試験方法は、接合端の板部が最大応力となる負荷形式である場合がほとんどである。したがって、前述のようなナゲット内部に発生する溶接欠陥に対する強度評価についてはあまり検討されておらず、強度への

影響は明らかになっていない。

そこで、まず Al - Mg系合金板を用い、溶接ナゲットに凝固割れを持つ試験材として箱形断面部材と継手試験片の2種類につき製作し疲労試験を実施して、溶接ナゲット内部の凝固割れと疲労強度の関係について調査し、その評価方法を検討した。つぎに、溶接条件を厳選して、凝固割れを低減すれば、継手強度が改善できることを確認した。さらに、他の2種類のアリミニウム合金板 (Al - Cu - Mg系, Al - Mg - Si系) についても、同様の方法により強度改善が得られることを確かめた。

2. 試験方法

2.1 供試材および試験材

疲労試験および溶接条件の検討に用いたアルミニウム合金板は、板厚1mmのAl - Mg系 (A5032相当) で、機械的性質をTable 1に示す。試験材はハット箱形断面部材と2枚重ね継手試験片の2

Table 1 Mechanical properties of materials.

Material	Yield strength MPa	Tensile strength MPa	Elongation %
A5032	124	280	33
A2024	75	185	20
A6061	55	125	25

種類で形状をFig. 1に、それらの溶接条件もFig. 1中に示す。溶接部材はハット形断面材と平板により構成される箱形断面部材 (以後、溶接部材と呼ぶ) で、長手中央のフランジ面の上下2点が試験部である。2枚重ね継手試験片 (以後、2枚重ね試験片と呼ぶ) は、平滑試験片を2枚重ねて中央を1点スポット溶接したものである。用いた溶接機は単相交流式である。ナゲット径を断面で観察したところ、約6.5mmであった。Fig. 2にX線により観察した凝固割れの発生状況を示す。

2.2 試験方法

溶接部材にはこの試験のために製作した4点曲

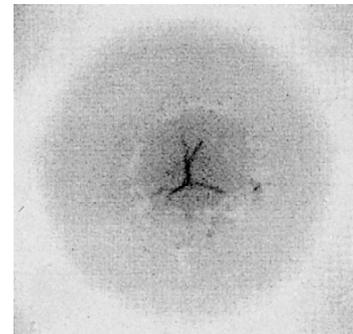
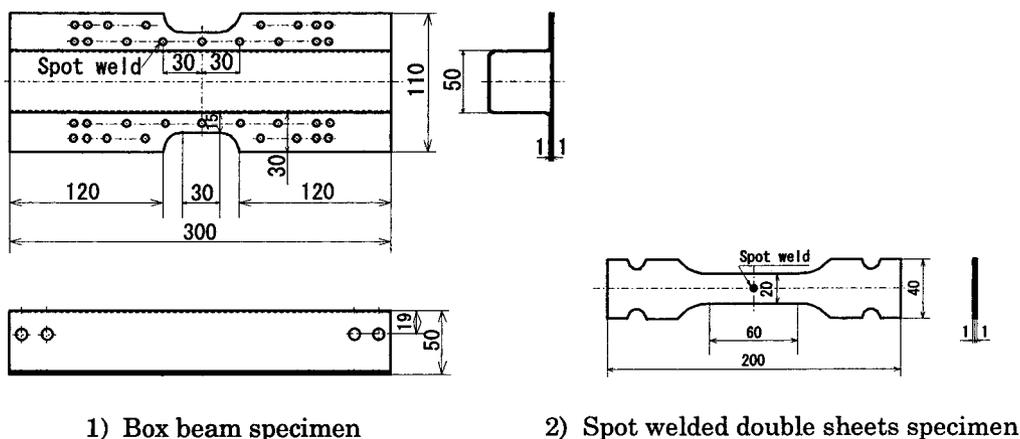


Fig. 2 Typical solidification cracking of spot-welded nugget by X-ray micrograph.



Welding condition (conventional)

Electrode	Cu-Cr $\phi 16 \times 6A(40R)$
Welding current kA	26
Welding time cycles	6
Welding force N	2940

Fig. 1 Fatigue test specimens and welding condition of those specimens.

げ疲労試験装置により，フランジ面内（平板の面内）に繰返し曲げ荷重を加えた。試験条件は定変位で，試験周波数は5Hzとした。

2枚重ね試験片の疲労試験は電気油圧式疲労試験機を用い，部分片振り引張り荷重を負加した。荷重条件は定荷重で，試験周波数は50Hzとした。溶接部材，2枚重ね試験片それぞれの試験対象溶接部には，Fig. 3に示す位置にひずみゲージを貼付し，試験中に溶接部近傍のひずみを測定した。

破断繰返し数は，疲労クラックが溶接圧痕径と同程度に成長した時点とした。

3. 結果と考察

Fig. 4に，溶接部材のモーメント範囲 ΔM - 破断

繰返し数 N_f 線図と，疲労破壊の状況を示す。破壊は，部材の長手中央のスポット溶接部における凝固割れから始まり，長手方向に対しほぼ直角に進展した。

Fig. 5に2枚重ね試験片の荷重範囲 ΔL - 破断繰返し数 N_f 線図と，疲労破壊の状況を示す。破壊

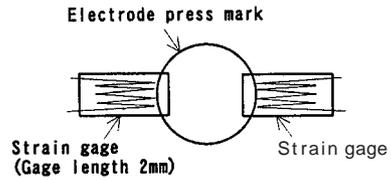


Fig. 3 Position of strain gages installed.

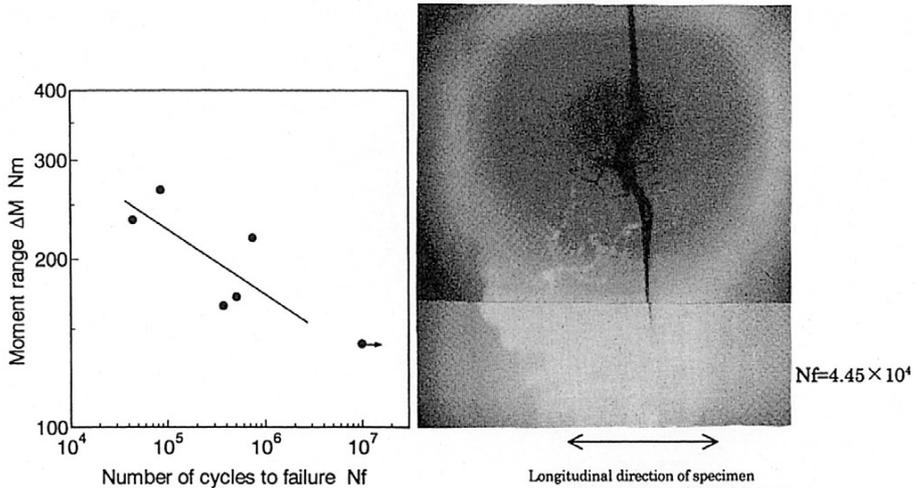


Fig. 4 ΔM - N_f relation and typical fatigue failure of box beam specimen.

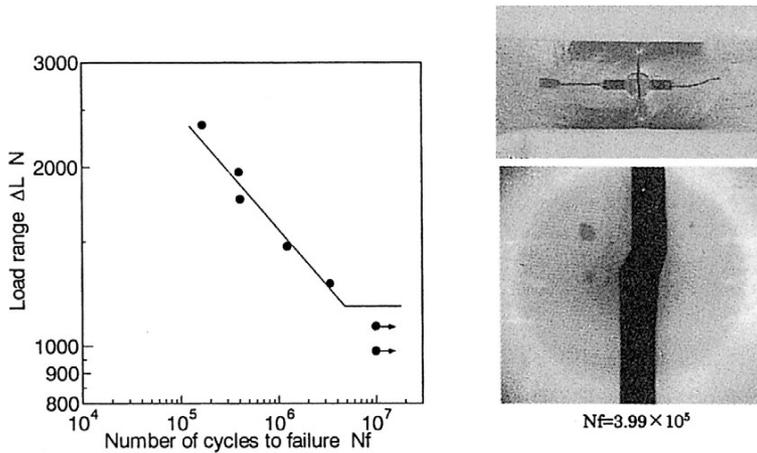


Fig. 5 ΔL - N_f relation and typical fatigue failure of spot-welded double sheets specimen.

は凝固割れから始まり，疲労クラックは試験片の長手方向に対しほぼ直角に進展した。

Fig. 6に繰返し数 1×10^3 回で測定されたひずみ範囲 $\Delta\varepsilon$ と破断繰返し数 N_f の関係を，溶接部材と2枚重ね試験片について比較する。Fig. 6では両者の強度はよい対応を示している。これらの結果から，溶接ナゲット内部に凝固割れをもつ部材の疲労寿命は，溶接部近傍のひずみを介して2枚重ね試験片の疲労寿命により推定できると思われる。

4. 疲労強度の改善

4.1 Al - Mg系合金板

つぎに，破壊の起点となった凝固割れを低減することにより疲労強度の改善を試みた。一般にアルミニウム合金板のスポット溶接では凝固割れの対策として，溶接主電流に加えて後熱電流を付加する事が推奨されている²⁾。そこでまずAl - Mg系合金板を用いて，後熱の条件を種々検討して凝

固割れを低減し得る溶接条件を選定した。

Fig. 7に凝固割れを低減した最適な溶接条件（以下，割れ低減条件）による溶接部を，X線による観察と断面マクロ観察により示す。割れ低減条件による溶接部は，X線では割れはほとんど確認できないが，断面マクロ観察ではナゲット中心付近の板表面に若干の割れが認められる程度である。この割れ低減条件による連続打点数と引張りせん断強さの関係をFig. 8に示す。Fig. 8では600回の溶接後も初期の約80%の強さを保持していた。また，並行して行った連続打点数と割れの発生関係でも，X線観察では600回弱まで凝固割れは認められなかった。従って，割れ低減条件は電極寿命の観点からも実用的な条件と思われる。

Fig. 9に割れ低減条件による2枚重ね試験片の荷重範囲 ΔL - 破断繰返し数 N_f 線図を，従来条件の結果（Fig. 5）と比較して示す。Fig. 9では割れ低減溶接条件により，溶接部の疲労強度は大幅に改善された。なお，割れ低減条件による試験片の破

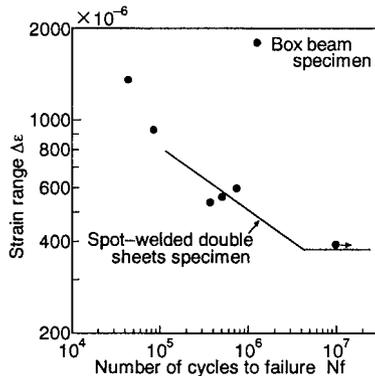


Fig. 6 Comparison of fatigue strength between two types of specimen.

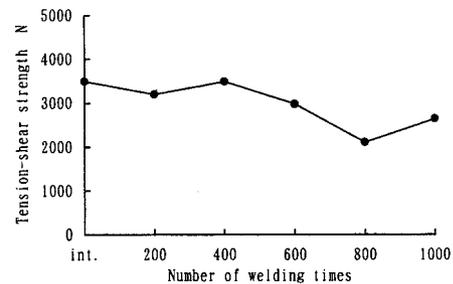


Fig. 8 Relation of tension-shear strength to number of welding times.

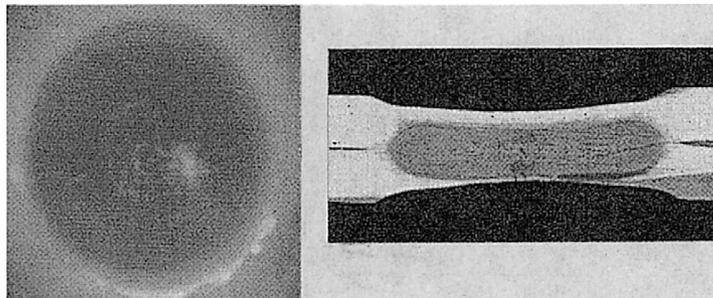


Fig. 7 Observation of spot-welded nugget.

壊位置は、Fig. 5と同様、溶接圧痕の中央部であった。

ここで後熱を付加したことに起因する材料強度の違いが生じているかどうかを、硬さ測定により調査した。Table 2に硬さ測定の結果を示す。いずれの溶接条件においても、母材の硬さと溶接部の硬さに大差はなく、ナゲット部の強度は母材と変わらないものと考えられる。

Fig. 10に、割れ低減条件による2枚重ね試験片

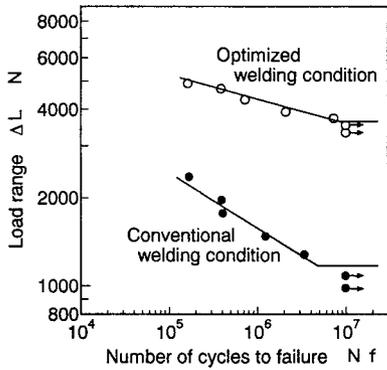


Fig. 9 ΔL-Nf relations of spot-welded double sheets specimen.

Table 2 Hardness of welding part (Hv).

Welding condition	Center of nugget section	Surface of electrode mark	Base metal
Optimized	77	75	76
Conventional	77	73	

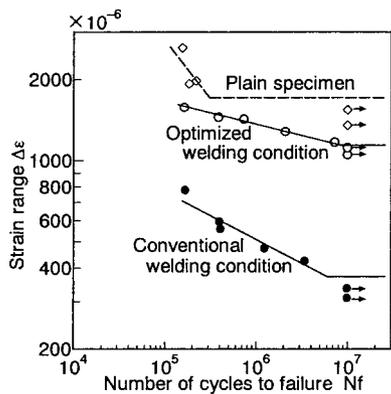


Fig. 10 Δε-Nf relations of spot-welded double sheets specimen.

の繰返し数 1×10^3 回のひずみ範囲 $\Delta\varepsilon$ - 破断繰返し数 N_f 線図を、従来条件の結果、および平滑材の結果と比較して示す。割れ低減条件による溶接部の強度上昇は、素材の強度にかなり近づいていることが分かる。

Table 3に、Fig. 9から時間強度を読みとって整理した結果を示すが、割れ低減条件による溶接部は従来条件に比べ、 1×10^5 回時間強度での2倍から耐久限での3倍まで、高破断繰返し数になるに従って強度改善率は増加した。

つぎに、割れ低減条件による溶接部材の4点曲げ疲労試験を実施した。割れ低減条件による溶接部材の破壊は、溶接圧痕の中央を起点としていた。疲労試験の結果を、従来条件と比較してFig. 11に示す。従来条件に対する強度改善率は2枚重ね試験片の場合よりやや小さいが、溶接部材においても割れ低減条件による強度改善が確かめられた。なお、強度の改善率がやや小さかった理由として、溶接部材のスポット溶接条件（オフセット電極使用）に、2枚重ね試験片における割れ低減溶接条件（ストレート電極使用）をそのまま適用したため、最適な割れ低減条件から若干はずれ、

Table 3 Comparison of fatigue strength (Strain range).

Welding condition	At 10^5 cycles	At 10^6 cycles	Endurance limit
Optimized ($\Delta\varepsilon_{opt}$)	1650	1360	1140
Conventional ($\Delta\varepsilon_{conv}$)	820	510	357
Ratio ($\Delta\varepsilon_{opt} / \Delta\varepsilon_{conv}$)	2.0	2.7	3.0

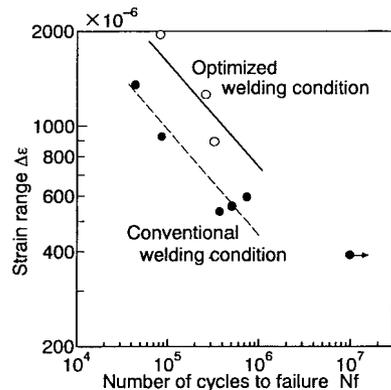


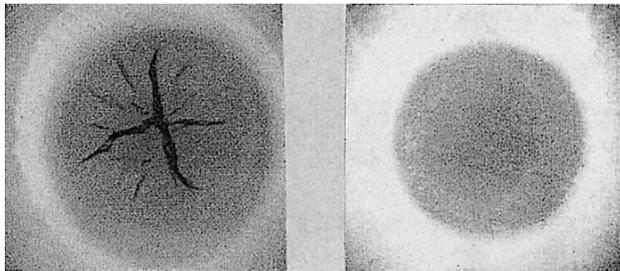
Fig. 11 Δε-Nf relations of box beam specimen.

微少な凝固割れが発生していた可能性が考えられる。

4.2 Al - Cu - Mg系, Al - Mg - Si系合金板

これまではAl - Mg系について検討を進めてきたが, 他の種類のアルミニウム合金板についても同様の方法により疲労強度の改善ができるかどうかを調査する。他のアルミニウム合金板としては, 高強度であるが溶接凝固割れが生じ易いAl - Cu - Mg系 (A2024) と, 耐食性が良好でありボデー構造への採用が有望であるAl - Mg - Si系 (A6061) とした。それらの合金板について, 溶接後熱条件により凝固割れを低減し継手強度の改善を図る本方法が, 同様に適用できるかどうかを試みた。この場合, 疲労試験は2枚重ね試験片についてのみ行った。

Al - Cu - Mg系について, 従来条件と割れ低減条件による溶接部のX線観察をFig. 12に, 疲労強度の比較をFig. 13に示す。



1) Conventional welding condition 2) Optimized welding condition

Fig. 12 X-ray micrographs of spot-welded nugget of Al-Cu-Mg alloy.

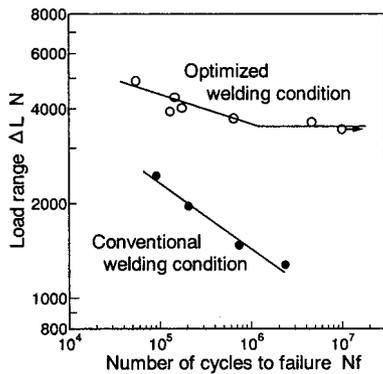


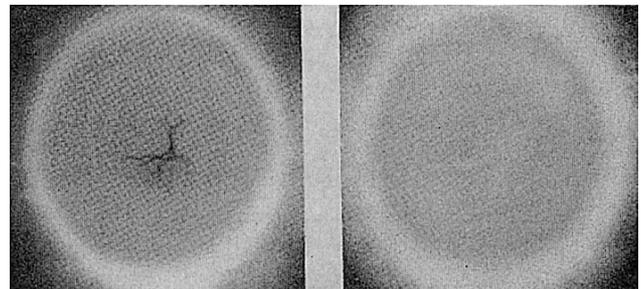
Fig. 13 ΔL - N_f relations of spot-welded double sheets specimen of Al-Cu-Mg alloy.

Al - Mg - Si系について同様の比較をFig. 14, 15に示す。

Fig. 12のAl - Cu - Mg系では, 従来条件による溶接部にはかなり顕著な凝固割れが発生している。しかし, 後熱条件の検討によりX線による観察では割れがほとんど認められない程度になったが, 割れを低減する条件範囲は狭かった。また, Fig.14のAl - Mg - Si系は, 従来条件による溶接部の凝固割れも小さく, 割れを低減する後熱条件の範囲も比較的広く, 溶接性は良好と言える。これらの材質についても割れ低減条件による溶接部は, Al - Mg系同様, 従来条件の溶接部に比べ2倍~3倍の強度改善を示した。

5. まとめ

Al合金板のスポット溶接部に発生する凝固割れの疲労強度への影響を明らかにするため, Al -



1) Conventional welding condition 2) Optimized welding condition

Fig. 14 X-ray micrographs of spot-welded nugget of Al-Mg-Si alloy.

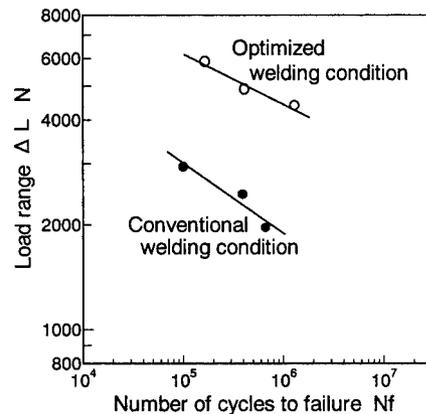


Fig. 15 ΔL - N_f relations of spot-welded double sheets specimen of Al-Mg-Si alloy.

Mg系合金板により，溶接部材と2枚重ね継手試験片の疲労強度の対比を行い，試験片による強度推定の可能性を検討した。つぎに割れを低減する溶接条件の検討を行い，溶接部の強度の改善を部材と試験片により確かめた。さらに，同様の方法がAl - Cu - Mg系合金板，Al - Mg - Si系合金板にも適用できるかを調査した。結果をまとめると次のようである。

1．溶接部材の4点曲げ疲労試験および2枚重ね試験片の引張り疲労試験は，いずれも，従来危険視されていなかった溶接凝固割れからき裂が進展し，破壊に至った。

2．溶接部近傍のひずみによる整理の結果から，2枚重ね試験片の引張り疲労強度を基にして，部材のフランジスポット溶接部が面内繰返し荷重を受ける場合の，疲労寿命推定が可能であることが分かった。

3．後熱電流を付加した最適化溶接条件により凝固割れを低減させた溶接部の疲労強度は，従来条件による溶接部に比べて，2枚重ね試験片の引張り疲労試験では2～3倍，溶接部材でもかなりの強度改善を得ることができた。

4．以上，Al - Mg系合金板で検討したスポット溶接部の凝固割れ低減による継手強度の改善が，他のアルミニウム合金板にも適用できるかどうかを，Al - Cu - Mg系とAl - Mg - Si系について，2枚重ね試験片の疲労試験による調査を実施した。その結果，それらのアルミニウム合金板でも同様の疲労強度改善が認められることが分かった。

参考文献

- 1) 小林真人, ほか: シンポジウム「自動車構造の寿命評価技術と耐疲労設計」前刷, (1994), 49～58, 自動車技術会
- 2) 日本溶接学会, スポット溶接作業標準 WES 7302, (1979)

著者紹介



高木 順 Jun Takagi

生年：1947年。

所属：機械力学研究室。

分野：構造の振動騒音計測・強度試験。



森 信行 Nobuyuki Mori

生年：1950年。

所属：機械力学研究室。

分野：構造・機構の運動・振動。

学会等：日本機械学会，自動車技術会会員。

工学博士。



藤本 正男 Masao Fujimoto

生年：1938年。

所属：材料1部。

分野：構造強度，構造解析，接合に関する研究。

学会等：日本機械学会，自動車技術会会員。

自動車技術会功労賞(1997)受賞。

工学博士。