HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	有限要素法による中心開放型心臓代用弁の応力解析
Author(s)	菊地, 幸明; 笠井, 博; 奥野, 亮輔 他
Citation	北海道大學工學部研究報告, 164, 89-96
Issue Date	1993-05-28
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/42369
Type	departmental bulletin paper
File Information	164_89-96.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

北海道大学工学部研究報告
第164号（平成5年）

Bulletin of the Faculty of Engineering
Hokkaido University No. 164 (1993)

有限要素法による中心開放型心臓代用弁の応力解析

菊地幸明*　笠井博**
奥野亮輔***　勇田敏夫*

（平成4年12月25日受理）

Stress Analysis by FEM of a Central Opening Bileaflet Prosthetic Heart Valve

Yukiaki KIKUTA, Hiroshi KASAI, Keisuke OKUNO and Toshio YUHTA

(Received December 25, 1992)

Abstract

In this paper we described a stress analysis of our new mechanical valve. Using finite element method (FEM), an aluminum alloy (JIS A 7075-T 6) leaflet and a stainless steel (JIS SUS 430 F) leaflet stopper are estimated by the von Mises stress contours and the deformations at the static analysis.

Three dimensional solid elements are utilized to obtain simulated leaflet models, which have 0%, 9%, 11%, 13% curvatures, and a simulated leaflet stopper model. For parametric studies, leaflet constraint conditions and leaflet curvatures are used on the supposition of the closed valve.

An optimum leaflet support (using 9% curvature leaflet model) and an optimum leaflet curvature (having constraint around axis) are evaluated and the stress analysis of leaflet stopper are studied.

From the results of the leaflet stress analysis, it is shown the lowest stress on the leaflet to constraint of all leaflet edges or have 9% and 11% leaflet curvature. From the result of the leaflet stopper analysis, there is no significant stress problem at the static stress analysis.

1. まえがき

心臓代用弁の開発において，耐久性は重要な問題のひとつである。従来，心臓代用弁の耐久性は，試作された弁の加速耐久試験[1-2]によって評価されてきた。近年，このような構造物の耐久性評価において有限要素法を用いた応力解析が盛んに行われ，製品設計する際，事前に製品の破損及び破壊に関する検討が行われている。そのため，心臓代用弁の開発においても，このような応力解析による評価は，効率的な弁設計に重要な役割を果たすことが期待される[3-4]。

著者らは，従来より心臓代用弁の耐久性向上を目的として，アルミニウム基金属を用いた中心

＊　生体工学専攻　機能合成工学講座
＊＊ 北海道自動車短期大学
＊＊＊北海道教育大学岩見沢分校

開放型心臓代用弁の開発を行い，基本的な弁形状についての検討を進めてきた[5-8]。特に，本研究では汎用的な有限要素法構造解析プログラムを用いて，弁閉鎖時における弁葉支持部の静的な応力解析を行った。これより，弁葉の支持位置および曲率条件の変化によって生じる応力および変位を評価し，材料力学的な観点から最適な弁葉形状について検討を行った。

2. 解析方法

心臓代用弁閉鎖時には，水撃などにより過大な圧力が弁に負荷されることから，応力解析は弁閉鎖状態を仮定して行った。解析を試みた中心開放型心臓代用弁は，主にアルミニウム合金およびステンレスなどの延性材料を構成材料として用いている。そのため，応力解析には延性材料の破壊理論のひとつとして提案されているせん断ひずみエネルギー説を用いて行った。せん断ひずみエネルギー説は，せん断ひずみエネルギーが一定値に達すると材料の降伏が始まると仮定し，材料の破損，破壊現象を取り扱うものである。この説は，延性材料に関する実験結果との比較で理論的な解析と良く一致することが示されており，延性材料の応力解析で広く用いられている[9]。特に本研究ではせん断ひずみエネルギー説の一般的な降伏条件である von Mises の降伏条件[10]を用いて応力解析を行った。以下に，von Mises の降伏条件式を示す。ここで，σ_fは降伏応力を示し，σ_1，σ_2，σ_3は主応力である。

$$\sigma_f=\sqrt{\frac{1}{2}\{(\sigma_1-\sigma_2)^2+(\sigma_2-\sigma_3)^2+(\sigma_3-\sigma_1)^2\}}$$

応力解析は弁葉表面に静的な圧力負荷を与えて行い，各条件での弁葉上の応力分布および変位について評価した。なお，計算はワークステーション（SONY PWS-1560）を使用して行い，解析には汎用有限要素法解析プログラム NISA II（米国 EMRC 社開発）を利用した。

3. 解析条件[11-12]

3. 1 中心開放型心臓代用弁の弁葉モデル

写真 1 に試作した中心開放型心臓代用弁の一例を示す。試作弁の弁葉には厚さ 1.0 mm の超々ジュラルミン[13-14]（JIS A 7075-T 6，弾性係数 72 GPa，ポワソン比 0.33）を使用した。写真 1 で示すように，弁葉は曲率を有した半円板状をしており，これを基に 3 次元ソリッド要素を用いて弁葉の有限要素モデルを作成した。弁葉モデルは，図 1 で示すように曲率を C 1/C 0(%)で定義

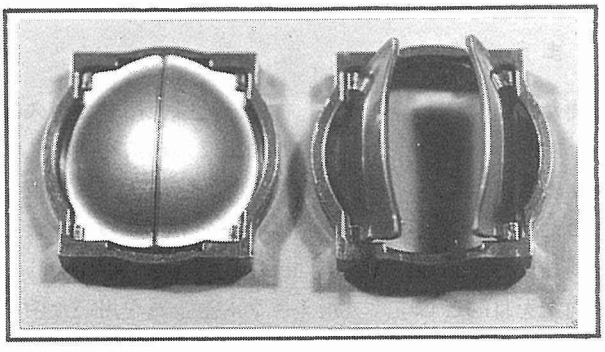


Photo. 1 Prototype of central opening prosthetic heart valve.

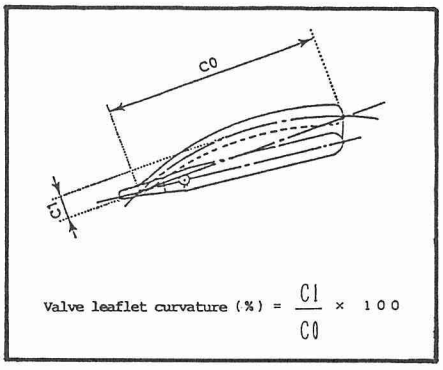


Fig. 1 Definition of valve leaflet curvature.

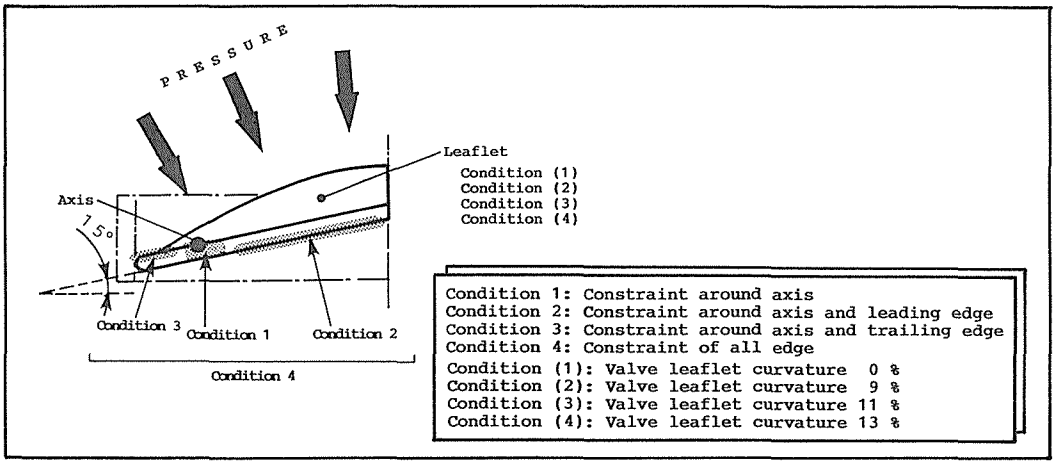


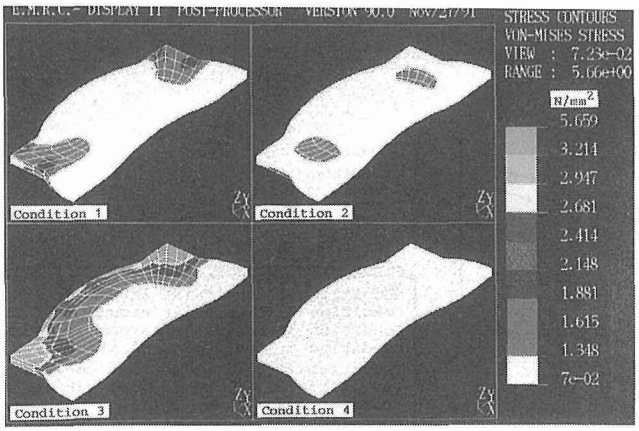
Fig. 2 Conditions of stress and displacement analysis to the leaflet.

し，これをパラメータとして曲率0％，9％，11%，13%の4つのモデルを作成した。解析は図2で示すように15度傾斜して閉鎖している弁葉表面に外力として13.3 KPa（100 mmHg)の圧力を与えて行なった。また，弁葉の拘束位置を変化させた解析（曲率9％の弁葉モデルを使用）では，拘束条件として図2の図中でカッコなしで示した4つの条件を与えて解析を行なった。さらに，弁葉の曲率を変化させた解析（条件1の拘束条件を使用）では，弁葉の曲率条件として図2の図中でカッコをつけて示した4つの条件を与えて解析を行なった。なお，各モデルとも拘束は各節点のx，y，zおよびそれらの回転方向の計6自由度を対象として行い，軸位置にあたる部分のみy軸回転方向を除いて拘束した。

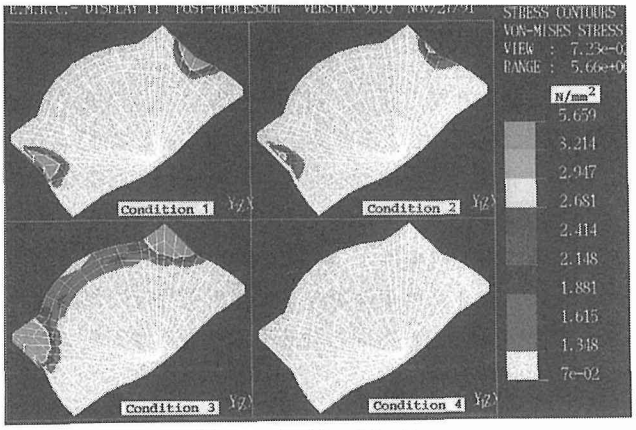
3. 2 弁閉鎖時の弁葉拘束についての検討

写真2，3に拘束位置の違いによる各弁葉の応力分布および変位結果を示す。写真2(a)(b)に示す応力解析結果より，表面および裏面とも条件3（軸位置および弁葉後縁部を拘束した条件）で軸まわりにおいて応力集中が見られる。また，写真3に示す変位分布結果より，条件3において弁尖が最も大きく変位していることが示されている。これより，条件3では応力集中および変位も大きいことから，弁の開閉によって繰り返しの曲げモーメントが作用することが考えられる。さらに，条件1（軸位置のみ拘束した条件）から条件2（軸位置および弁葉後縁部を拘束した条件）へ進むに従い弁葉の両面で応力集中が減少し，条件4（弁尖以外の弁葉全周を拘束する条件）では，他の条件と比較して応力集中が見られず，最も良好な結果が得られている。さらに，写真3で示す弁葉の変位結果から条件4で最も弁葉の変位が少ないことが分かる。これより，弁閉鎖時の弁葉拘束条件としては，弁尖以外の弁葉全周を拘束する条件が適当であることが示唆される。

しかしながら，実際の弁開閉状態について考慮すると，弁の加工精度とも関連し，常に同じ状態で弁葉が閉鎖するとは限らず，条件4で示した条件で常に弁を閉鎖させるのは困難である。したがって，少なくとも条件3で示された応力状態を避けることが賢明であると考えられる。そのため，実際には条件1あるいは条件2の状態で弁を閉鎖するのが適当であると推測される。また，弁葉材料の破壊に関して，超々ジュラルミンの耐力は513 MPa，せん断強度は337 MPaであり，写真2で示した応力解析結果より，弁葉に作用する最大の応力値は高々5.6 MPa程度であること

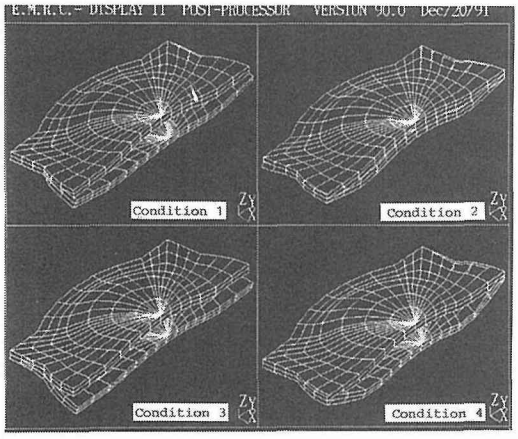


(a) Front side of leaflet

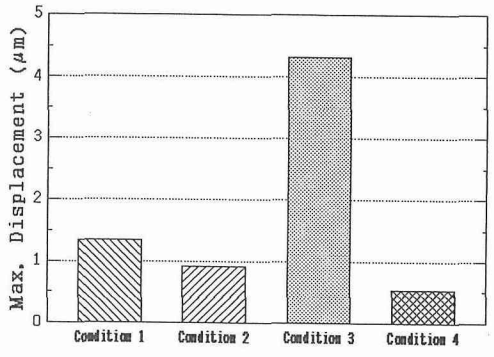


(b) Back side of leaflet

Photo. 2 Comparison of von-mises stress contours of the leaflet to the constraint conditions under a static pressure.



(a) Superimposed deformation of leaflets



(b) Maximum displacement of leaflets

Photo. 3 Comparison of displacement of the leaflet to the constrain conditions under a static pressure.

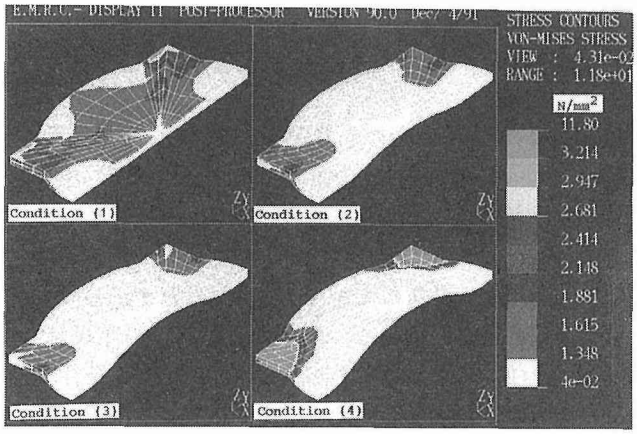
から破壊等の問題はないと思われる。

3. 3 弁葉の曲率についての検討

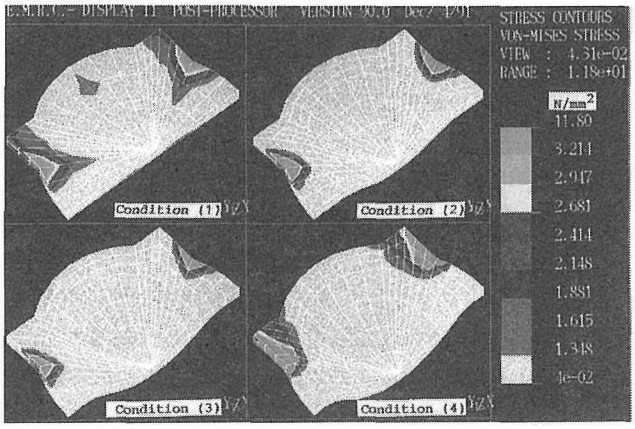
写真4，5に，曲率の異なった各弁葉での応力分布および変位結果を示す。写真4(a)に示す弁葉表側での応力解析結果より，条件(4)（弁葉の曲率13%の条件）で，最も軸まわりでの応力集中が見られる。条件(1)（弁葉の曲率0%の条件）では，条件(4)と比較して大きな応力集中は見られないが，応力分布が弁葉全体にわたって生じている。条件(2)（弁葉の曲率9%の条件）と条件(3)（弁葉の曲率11%の条件）では応力分布に大きな変化は見られず，共に条件(1)および条件(4)で得られた結果よりも良好な状態が示されている。写真4(b)に示す弁葉裏側での応力解析結果より，応力集中は条件(4)および条件(1)の順で広い分布が見られ，条件(2)と条件(3)でほとんど差が見られないことが分かる。また，写真5に示す各弁葉での変位結果より，条件(1)で最も大きな変位が示されており，他の条件では変位に差異がないことがわかる。これらの結果より，条件(4)の弁葉では軸まわりにおいて応力集中が示され，条件(1)の弁葉では弁尖部分での変位が大きく曲げ戻しの繰り返し応力が作用することが考えられる。そのため，弁葉の曲率については条件(2)の曲率9%あるいは条件(3)の曲率11%の弁葉が適当であると考えられる。

3. 4 弁葉ストッパーの応力解析

弁葉ストッパーは弁開閉を制御する重要な部品であり，最も応力集中が懸念される場所である。弁葉同様，解析モデルは3次元ソリッド要素を用いて作成を行い，材料にはステンレス[15]（JIS-SUS 430 F，弾性係数200 GPa，ポワソン比0.3と仮定)を使用した。弁葉ストッパーは，弁座側に固定する直方体部分と弁葉を挟んで弁の開閉をコントロールする2つの突起部分で構成されている。解析は，直方体の4側面を固定して突起部内側に圧力を負荷する条件で行った。弁葉ストッパーに作用する圧力として，生体内で生じる最大圧力差26.6 KPa (200 mmHg) が弁葉表面に作用した状態を仮定し，これより弁葉との接触面積を計算して，2.0 MPa を負荷として弁葉の接触部分に与えた。写真6に，弁葉ストッパーにおける応力分布および変位結果を示す。写真6(a)に示す応力解析結果より，弁葉ストッパーの2つの突起部外側で応力集中が見られる。また，写真6(b)に示す変位結果より，変形は突起部が外側に開いた状態になることが示されており，この部分で圧縮応力が作用することが示唆される。しかしながら，突起部分に作用する最大圧縮応力は約42 MPa であり，ステンレスの耐力（380 MPa）と比較すると約9分の1にあたることがわかる。したがって，負荷条件としてストッパーに過剰な圧力を与えたことも考慮すると，弁閉鎖時に弁葉ストッパーで弾性破損が発生する可能性は低いものと考えられる。また，弁葉ストッパーの変形も高々1 μm 程度であることから，弁開閉に大きな影響は与えないものと考えられる。

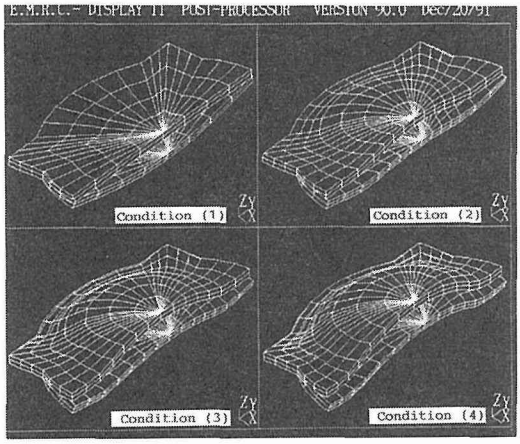


(a) Superimposed deformation of leaflets

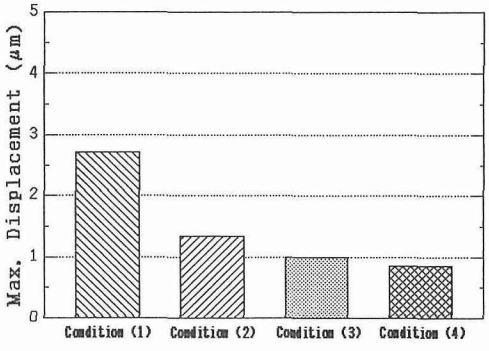


(b) Maximum displacement of leaflets

Photo. 4 Comparison of von-mises stress contours of the leaflet to the valve curvature under a static pressure.

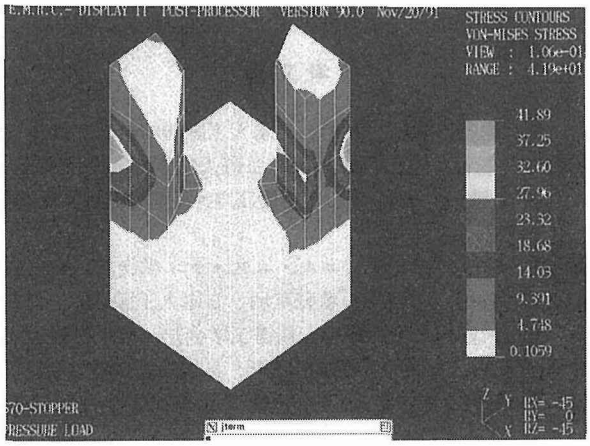


(a) Front side of leaflet

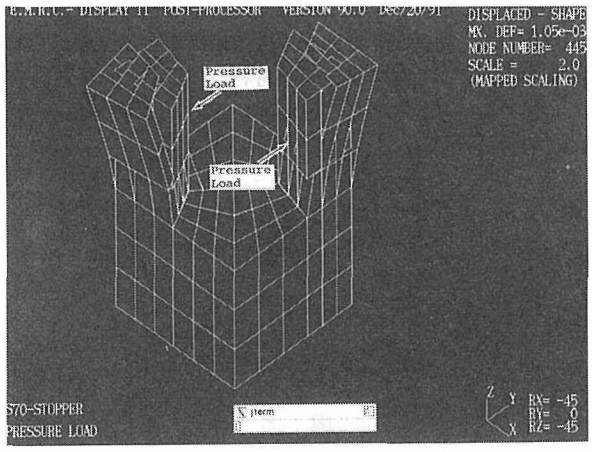


(b) Back side of leaflet

Photo. 5 Comparison of displacement of the leaflet to the constrain conditions under a static pressure.



(a) Von-mises stress contour of leaflet stopper



(b) Superimposed deformation of leaflet stopper

Photo. 6 Von-mises stress contour and deformation of leaflet stopper

4. ま と め

本研究では，有限要素法を用いて中心開放型心臓代用弁の弁葉および弁葉ストッパーに作用する応力解析を行い，弁開発における耐久性評価について材料力学的な観点から検討を行なった。以下に，得られた結果をまとめる。

1) 弁閉鎖時における弁葉の拘束位置および曲率に関する応力解析より，次のような結論が得られた。

a. 弁葉の軸まわりと弁葉後縁部を拘束することで，弁葉上に高い応力集中が見られる。

b. 弁尖を除く，弁葉全周を拘束することで弁葉上の応力集中は最も小さくなる。

c. 弁葉の曲率 13%で最も応力集中が観察され，曲率 0 %で変位が最も大きくなる。

d. 弁葉の曲率については，曲率 9 %あるいは 11%で最も応力集中が小さい。

2) 静的な応力解析範囲で，弁葉ストッパーは十分な強度を持っており，弁の開閉にも支障をき

たさないことが示唆された。

参考文献

1) 菊田幸明，勇田敏夫，下岡聡行，三田村好矩：日本人工臓器学会誌，20（1991），3，p.986-989
2) 菊田幸明，勇田敏夫，下岡聡行，三田村好矩：北海道大学工学部研究報告，152（1990），p.79-86
3) 菊田幸明，下岡聡行，勇田敏夫，上野時宏：精密工学会秋季大会学術講演会論文集，（1990）p.1077-1078
4) 菊田幸明，勇田敏夫，五十嵐悟，笠井博：エル・エス・ティ学会誌，4（1992），3，p.627-630
5) 菊田幸明，勇田敏夫，三田村好矩，下岡聡行，境野英朋：日本人工臓器学会誌，18（1989），2，p.715-718
6) 菊田幸明，勇田敏夫，三田村好矩，下岡聡行：精密工学会誌，57（1991），5，p.837-843
7) 菊田幸明，阿部　潤，勇田敏夫，下岡聡行，三田村好矩：日本人工臓器学会誌，21（1992），3，p.620-624
8) 菊田幸明，阿部　潤，下岡聡行，勇田敏夫，三田村好矩：精密工学会春季大会学術講演会論，文集，（1992），p.979-982
9) 葉山益次郎：大学課程　塑性学と塑性加工（第2版），（1982），p.25，オーム社
10) 平　修二：現代　材料力学，（1970），p.155，オーム社，
11) 笠井博，菊田幸明，勇田敏夫：精密工学会北海道支部大会学術講演会論文集，（1991），p.43-44
12) 笠井博，菊田幸明，勇田敏夫：精密工学会春季大会学術講演会論文集，（1992），p.985-986
13) 日本機械学会編：機械工学便覧Ｂ4材料学，工業材料，（1984），p.75，丸善
14) 軽金属協会編：アルミニウムハンドブック，（1963），p.230，朝倉書店，
15) 長谷川正義：ステンレス鋼便，（1973），p.415，日刊工業新聞