



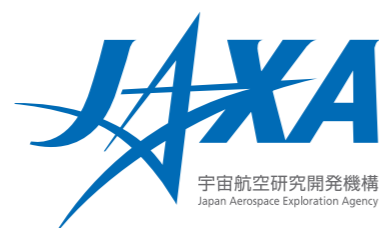
宇宙航空研究開発機構研究開発資料

宇宙航空研究開発機構研究開発資料

JAXA Research and Development Memorandum

炭素繊維複合材料に対する無孔圧縮試験方法の相互比較と
簡便な試験法（NAL-II法）の提案

小笠原 俊夫, 石川 隆司



JAXA-RM-08-010

2009年2月

宇宙航空研究開発機構
Japan Aerospace Exploration Agency

炭素繊維複合材料に対する無孔圧縮試験方法の相互比較と 簡便な試験法（NAL-II法）の提案*

小笠原 俊夫^{*1}、石川 隆司^{*2}

Evaluation of standard compressive test methods for carbon fiber composites and proposal of a simple test method (NAL- II) *

Toshio OGASAWARA ^{*1} and Takashi ISHIKAWA ^{*2}

Abstract

A specific non-hole compressive (NHC) test method for advanced composite materials has not been widely authorized even now because of the essential difficulty of NHC tests. In this study, standard test methods such as SRM-1(SACMA), Celanese (former ASTM D3410 A-method), ASTM D695, ASTM D6484 (SRM-3), ASTM D6641 (CLC), JIS K7076 (A method) were evaluated for three kinds of quasi-isotropic carbon/epoxy composites (CFRP). Furthermore, two kinds of original compressive test methods, i.e. NAL-I, II, were proposed. It was revealed that SRM-1 and ASTM D6641 (CLC) are more adequate than any other standard methods from the view point of reliability, repeatability and efficiency. It was demonstrated that the experimental results obtained by NAL-II method were similar to those by SRM-1 and ASTM D6641.

概 要

先進複合材料の無孔圧縮試験法に関しては試験自体の困難さも相俟って、特定の試験法が幅広く認知されている状況とはなっていない。本研究では、3種類の炭素繊維エポキシ複合材料擬似等方積層板を対象として、SRM1, Celanese (旧ASTM D3410), ASTM D695, ASTM D6484 (SRM3), ASTM D6641 (CLC), JIS K7076 (A法)で規定された試験法の相互比較を行った。併せてJAXA独自の方法としてNAL-I法およびNAL-II法を提案した。その結果、信頼性、再現性、効率性の観点から、SRM-1とASTM D6641(CLC法)が他の方法よりも適切であることが確認された。また、NAL-II法でもこれらの方法とほぼ同じ試験結果が得られることが実証された。

Key words: Compressive strength, carbon fiber composites, standard test method

1. はじめに

炭素繊維強化複合材料（Carbon fiber reinforced plastics; CFRP）等の先進複合材料を適用した複合材構造では、圧縮強度が設計評定となることも多く、適切な圧縮強度の評価は実用上、極めて重要である。しかしながら、引張り試験法と比較すると圧縮試験法には様々な試験規格が存在し、特定の試験法が幅広く認知されているとは必ずしも言えないのが現状である。また、圧縮試験の持つ本質的な困難さのゆえに、圧縮試験法によって圧縮強度が異なるという実験事実もあり、このことが問題をより複雑にしている。

圧縮試験の代表的な試験規格を、表1にまとめて示す。先進複合材料では有孔圧縮強度との対応から、一般的な圧縮強度を無孔圧縮強度（Non-hole compression; NHC）と呼ぶことが多いことから、本報告書では圧縮強度をNHC強度、圧縮試験をNHC試験と表記する。無孔圧縮試験法は、大きく2つの負荷様式に分類される。ひとつは試験片のグリップ部から、せん断力を介して試験片評定部に圧縮荷重を負荷する方法（端部負荷方式; Shear-loading）であり、旧ASTM D3410のA法（Celanese法）[1]、ASTM D3410 B法（IITRI法）[1,2]、ASTM D6484（SRM3-94）[3, 4]、JIS-K7076-B法（Celanese法）[5]等がこれに対応する。もうひとつは、試験片の端部を直接加圧することによって試験片に圧縮荷

* 平成20年12月24日 受付 (Received 24 December, 2008)

*1 研究開発本部 材料グループ (Advanced Materials Group, Aerospace Research and Development Directorate)

*2 理事 (Executive Director), 研究開発本部長

重を負荷する方法(せん断負荷方式; End-loading)で、ASTM-D695 [6]、SRM 1 [7]、JIS-K7076 (A法) [5]、JIS K7056 [8]がこれに対応する。また、せん断負荷と端部負荷を併用した複合負荷方式 (Combined-loading) [9]も提案されている。総じて言えば、せん断負荷方式では試験片と負荷方向の軸合わせ (アライメント) が、端部負荷方式では軸合わせに加えて端部破壊やタブ剥離も問題となる。圧縮試験では評定部の面外拘束がないことから、破壊前座屈の影響を抑制するために試験片厚さおよび幅を考慮した評定部長さを選択する必要がある。試験片を厚くする方法も考えられるが、端部負荷方式の場合は端部破壊やタブ剥離が発生し易くなるため限界がある。破断前座屈については、試験片への圧縮負荷のミスアライメントや、治具の剛性も影響を及ぼすため、これらにも留意する必要がある。評定部長さを短くすれば破断前座屈の影響は減少するが、評定部長さが5mm以下となると弾性率測定用ひずみゲージの接着が困難となるため、圧縮弾性率を測定する試験片は強度試験片とは別に用意することが求められる (例えばSRM-1)。

表1 無孔圧縮試験法の試験規格

	試験規格	試験片概寸
せん断負荷方式 Shear-loading	旧ASTM D3410 (A法, Celanese法)	6×140
	ASTM D3410 (IITRI法)	25×140~155
	ASTM D6484 (SRM 3R-94, OHC法)	38.1×304.8
	JIS-K7076 B法 (Celanese法)	6.5×134
端部負荷方式 End-loading	ASTM D695	19(12.7)×79.4
	SRM 1R-94 (BSS 7260)	15×80
	JIS K7076 A法 (SRM 1R-94)	12.5×78
	JIS K7018 方法1 (ASTM-D695)	19(13)×77
	JIS K7018 方法2 (IITRI, Celanese)	同上
	NAL-NHC-I, II法 (JAXA提案)	25×105
複合負荷方式 Combined Loading	ASTM D6641 (CLC法)	12×140
サンドイッチ曲げ	ASTM D5467	15×80

ここで無孔圧縮試験法に関する歴史的な経緯について簡単に紹介する。1975年にはじめてASTMで規格化された複合材料の圧縮試験法は、米国Celanese社によって提案されたCelanese法 (ASTM D 3410) である[1]。この方法は、分割された円錐コーンの間に試験片を挟み込んで試験を行うせん断負荷方式による試験方法である。Celanese法では試験片を治具の中心軸に対して正確に取り付けるため、タブ部の試験片厚さと平行度に高い加工精度が要求される。換言すれば、試験片の工作精度が試験結果に大きく影響することから、一般的な試験方法としては普及し難い側面もあった。1980年代になるとCelanese法の欠点を改善した方法として、Illinois Institute of Technology Research Institute (IITRI) がIITRI法という方法を提案し[10]、1987年にASTM D3410のB法として規格化された。その際に、Celanese法はASTM D3410のA法として規格としては残された。IITRI試験法は試験片に対する加工精度をCelanese法ほど要求しない点では優れていたが、治具の重量が40~50kgもあり作業性および作業効率の面では大きく劣る点が問題となっていた。その後、IITRI法の試験片寸法および治具を小型化したWyoming-modified IITRI法が提案され[11]、今日ではIITRI法よりも幅広く適用されているようである。2003年の改訂でCelanese法はASTM D5467から削除され、現行のASTM D5467-03ではIITRI法のみがASTM D5467で規定された試験法として残されている [2]。

せん断負荷方式の圧縮試験法としては、本来は有孔圧縮 (OHC) 試験法の規格であるASTM-D6484をNHC試験に適用した方法も航空業界を中心に幅広く適用されている。この試験法では、試験片へのタブ接着が不要であるため環境試験 (高温・高湿・低温等) への適用が容易であるという利点がある反面、幅38mm×長さ305mmという大きな試験片を用意する必要があり、試験コストの面での不利は否めない。なお、このOHC試験方法は米国の航空宇宙材料に関する業界団体SACMA (Suppliers of Advanced Composite Materials Association)において、SRM 3R-94 (SACMA Recommended Method, Release 1994) として規格化されていることから[4]、SRM 3という呼称も広く用いられている。

端部負荷方式に関しては、1980年代初頭にBoeing社とHercules社が、プラスチックを対象とした圧縮試験法の規格であるASTM D 695をもとに、従来はタブなしのダンベル形状であった試験片を、タブ接着した短冊状試験片とすることでCFRPに適用する試験方法を提案した。この方法は直接的にはASTM規格として制定されていないが、SACMAでは業界団体の標準的な圧縮試験方法 (SRM 1R-94) としてこの方法を採用している[7]。また、修正ASTM D695法およびBoeing (BSS 7260, Boeing Specification Support Standard)と呼ばれることもある。治具および試験片が小型であること、

安定した試験結果が得られることから、SRM 1は航空宇宙業界で幅広く普及している試験法である。SRM1ではタブ部を含めた試験片全体が圧縮負荷を受けるため、試験片と同じ弾性率(素材)のタブを適用することが規定されている。そのため、試験片のサイズは15×80mmと小さいものの、タブを含めるとこの約3倍の素材が必要となる。また強度試験と弾性率試験では異なる試験片を使用する必要があることから、実際には4倍の素材が必要である。端部負荷方式の試験では、均一な圧縮負荷を与えるために、試験片や試験機の平行度を管理することも重要である。

1990年代には、Combined Loading Compression (CLC)法という試験法がUniversity of WyomingのAdamsによって提案された[12]。この方法は、前述したShear-load とEnd-loadを組み合わせた方法であり、治具構成がシンプルで重量も5kg程度と軽いこと、タブなしの短冊試験片が使用可能なこと、強度評価と弾性率測定を同時に実施可能であるといった利点を有しており、2001年にはASTM D6641として規格化されている。

一方、日本工業規格(JIS)は、基本的には米国規格を踏襲したものである。炭素繊維強化複合材料を対象としたJIS K7076はCelanese法およびSRM1の類似規格[5]、主としてガラス繊維強化複合材料を対象としたJIS K7018はIITRI法およびASTM D695の類似規格[6]となっている。しかしながらJISとASTMでは試験片形状、評定部長さ、治具、試験条件などに若干の相違があり、試験法として完全に同一なものではないことには注意する必要がある。なお、ガラス繊維強化プラスチックの圧縮試験方法JIS K 7056は2001年に廃止され、JIS K7018に統合されている。

このように米国では種々のNHC試験方法が提案されているが、FAAが監修しているCMH-17 (Composite material handbook; 旧 MIL-HDBK-17)で推奨されている方法は、一方向材に対してはASTM D3410、ASTM D6484、SRM1、積層材に対してはASTM D3410、ASTM D6484である[13]。しかしながらASTM D6484およびSRM1は、ASTMで正式に規格化されたNHC試験法ではなく、またASTM D3410 (IITRI法)は作業性に劣ることからあまり普及していない。近年では、ASTM D6641(CLC法)が普及しつつあるものの、圧縮試験法に関しては確たる試験法が幅広く認知されている状況にはないというのが現状であろう。

本研究は以上述べてきたような背景を鑑みて行われたもので、CFRP疑似等方積層材を対象として圧縮試験法の相互比較(横並び評価)を実施し、得られた試験結果を客観的に評価することを目的としている。対象とした試験規格は、SRM1, ASTM D3410 (Celanese), ASTM D695, ASTM D6484 (OHC), ASTM D6641 (CLC), JIS K7076 (A法)である。これらの方に加え、旧航空宇宙技術研究所(NAL)時代から検討されてきたJAXA独自の試験法(NAL-NHC-IおよびII法)についても併せて評価し、試験法としての技術課題について整理する。

2. 実験方法

2.1 供試材料

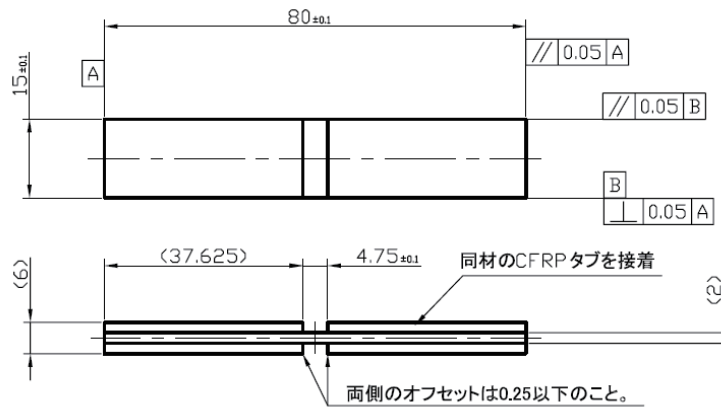
実験に使用した炭素繊維/エポキシ複合材は、IM600/#133(東邦テナックス)、T800/3633(東レ)、およびT800/3900-2(東レ)の3種類である。このうちIM600/133は2バッチについて評価を行ったので、それぞれ(1)、(2)と表記する。積層構成は、いずれも[45/0/-45/90]2Sの16ply疑似等方積層、公称板厚は、IM600/133とT800/3633は2.4mm、T800H/3900-2は3.0mmとなっている。なお、これらの材料の基礎特性については、JAXAが提供している先進複合材データベースにて閲覧することが可能である。

2.2 試験方法

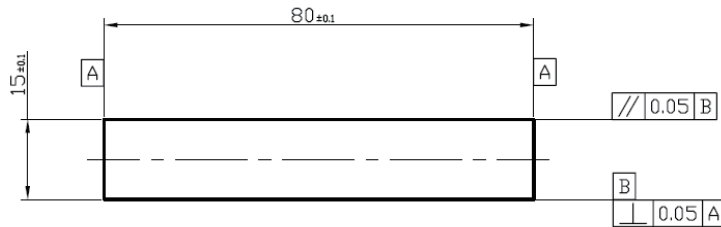
圧縮試験方法・対象材料および試験片数の一覧を表2に、試験片形状と治具写真を図1および図2に示す。圧縮試験にはネジ駆動式材料試験機(インストロン4482型または5880型、ロードセル容量100kN)を使用し、室温大気中(温度約25℃、湿度約50%)にて各規格に準拠した試験条件下で試験を実施した。

表2 試験方法・対象材料および試験片数

試験方法	試験片形状 (mm)			タブ材料	材料 (試験片数)			
	長さ	幅	評価部長さ		IM600 /133 (1)	IM600 /133 (2)	T800H /3633	T800H /3900-2
SRM 1-R94 (強度測定)	80	15	4.75	CFRP	6	6	6	6
SRM 1-R94 (弾性率測定)	80	15	(12.7)	なし	6			
旧ASTM-D3410 (Celanese, GL=12)	140	6	12	GFRP		6		
旧ASTM-D3410 (Celanese, GL=5)	140	6	5	GFRP	10	6		10
ASTM D6484 (SRM3)	304.8	38.1	25.4	なし	5	4		
ASTM D6641 (CLC法)	140	12	12.7	なし	6			
ASTM-D695 (ダンベル)	79.4	12.7	(12.7)	なし	6			
JIS-K7076 (A法, SRM1類似)	78	12.5	8	CFRP	5			
NAL-NHC-I	105	25	12.7	なし	11	5	16	17
NAL-NHC-II	80	15	10	なし	6	5	5	5

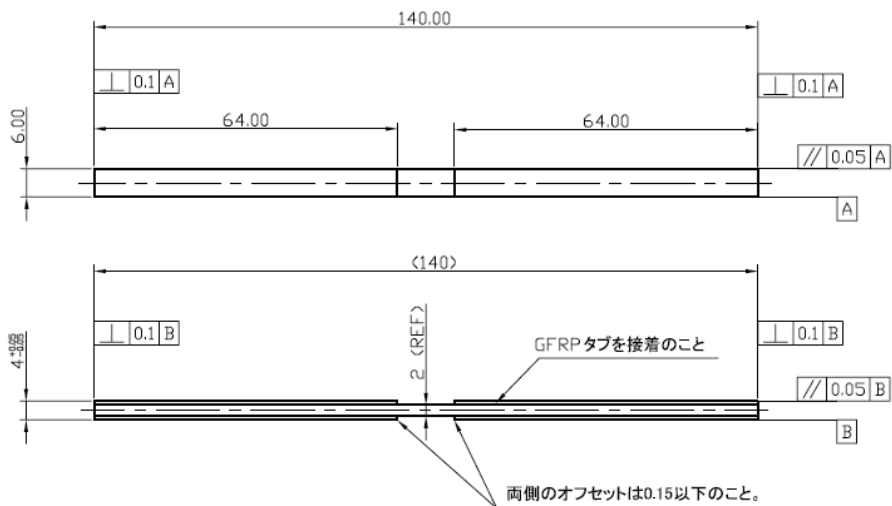


(1) SRM 1R-94 (強度用)

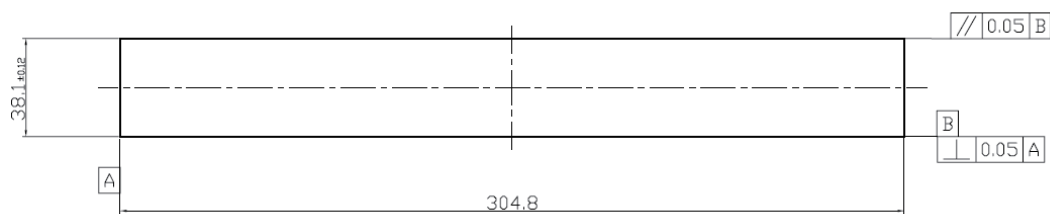


(2) SRM 1R-94 (弾性率測定用)

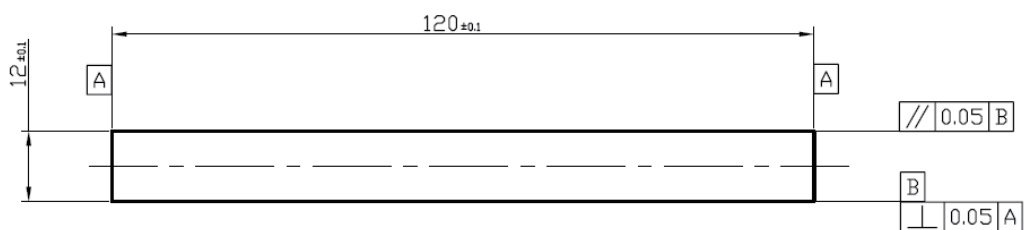
図1 試験片形状 (1)



(3) Celanese法（旧ASTM D3410 A法, GL=12 mm）

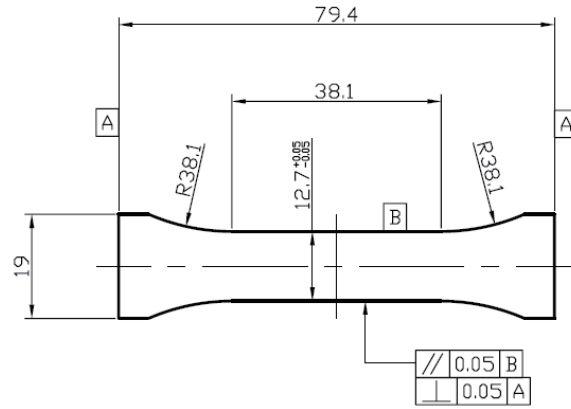


(4) ASTM D6484（SRM3R-94、OHC）

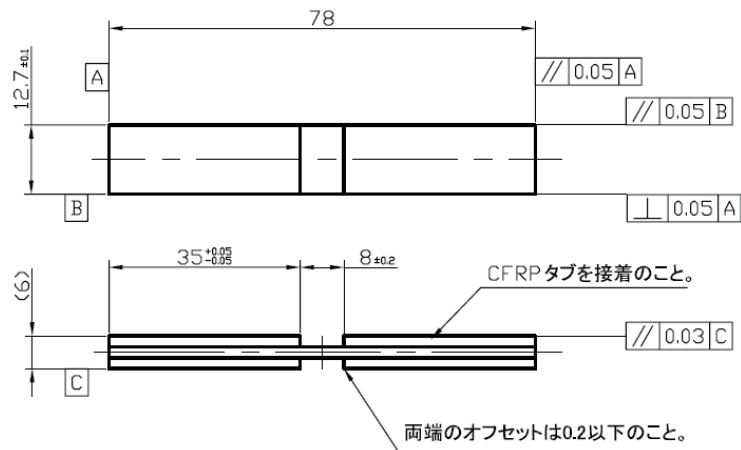


(5) ASTM D6641 (CLC法)

図1 試験片形状 (2)

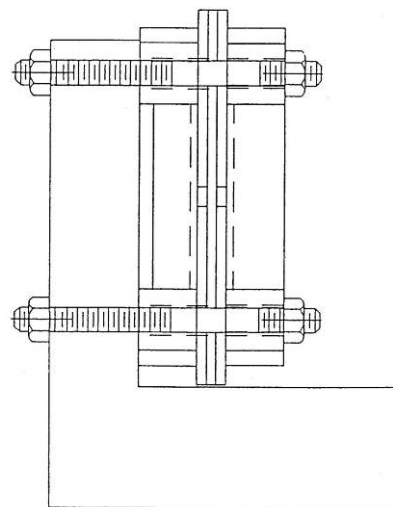
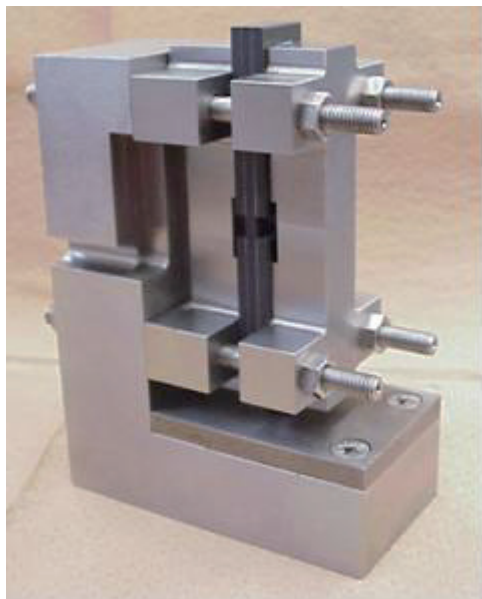


(6) ASTM D695

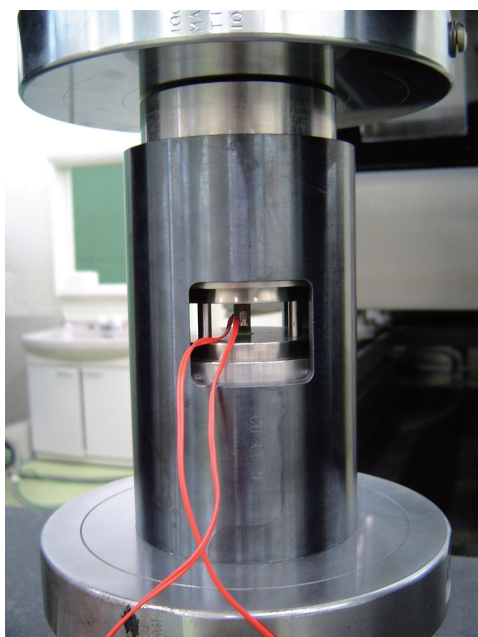


(7) JIS-K7076 (A法)

図1 試験片形状 (3)

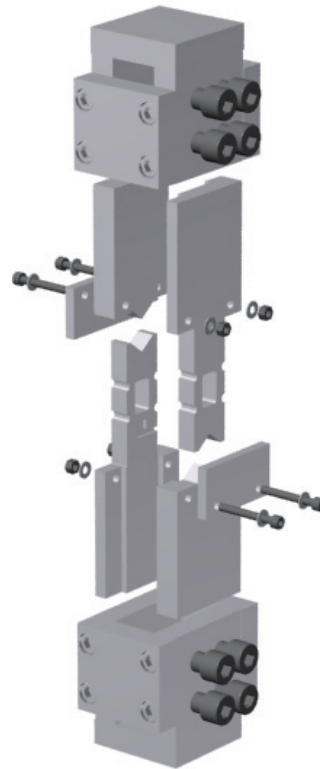


(1) SRM 1R-94

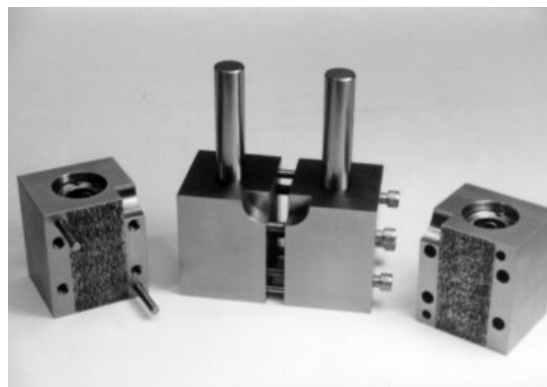
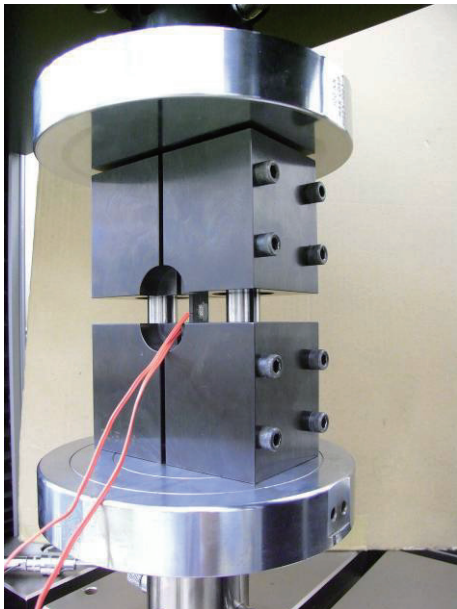


(2) Celanese法（旧ASTM D3410 A法）

図2 治具の写真（1）

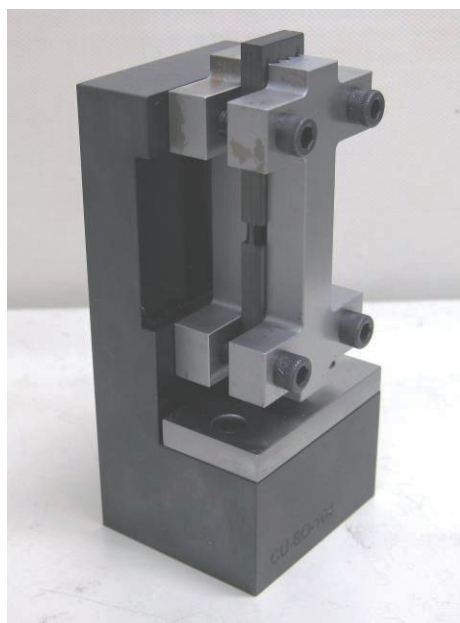


(3) ASTM D6484 (SRM3R-94、OHC)

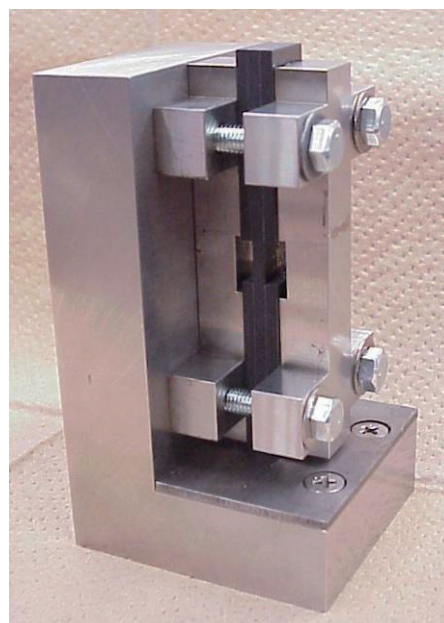


(4) ASTM D6641 (CLC法)

図2 治具の写真(2)



(5) ASTM D695



(6) JIS-K7076 (A法)

図2 治具の写真(3)

2.3 NAL-NHC法

NAL-NHC-IおよびII法はいずれも旧航空宇宙技術研究所（NAL）時代に筆者らが提案した試験方法であり、タブを接着しない短冊状試験片に対してASTM D695のような端部負荷方式による圧縮試験を行うことを特徴としている。NAL-NHC-I法（以下NAL-I法）は基本的にはASTM D695を修正した方法である[14]。短冊試験片（幅25mm、長さ105mm）の上下端部に図3に示すような端部破壊防止治具を取り付け、これをASTM D695と同様のキ型の面外変形拘束治具で挟み込むことによって試験を行う。端部破壊防止治具はタブの役割を担っており、荷重は端部負荷によって負荷される。面外変形拘束治具の試験片の評価部には、必要以上に面外変形を拘束しない目的で、試験片長手方向に沿って長さ10mmのざぐり加工が施してあり、これが評価部長さとなる。ざぐり部は、弾性率測定用ひずみゲージの貼付とリード線の取り出しにも使用できるため、強度試験と弾性率測定試験を同時に実施することが可能である。面外変形拘束治具のボルト締め付けトルクは、ASTM D695やSRM 1と同様に約0.1Nm程度（手締め程度）である。

NAL-NHC-II法（以下NAL-II法）は、NAL-NHC-I法における端部破壊の抑制と、軸合わせ精度の改良を施した試験方法である[15,16]。図4に示すように、軸合わせにはCelanese法と同様に円筒を使用している。リテーナを介して試験片に円柱形状の試験片固定治具を取り付けた後、これを円筒にセットして端部負荷によって圧縮荷重を負荷する。試験片固定治具を取り付ける際に、治具の軸合わせが必要であるので、位置決め治具を用いて試験片を試験片固定治具に装着する。円筒には固体潤滑剤が銅合金に埋め込まれた無給油リニアブッシュが圧入されており、試験片固定治具との摩擦が極力少なくなるように工夫されている。治具の図面を付録3に示す。

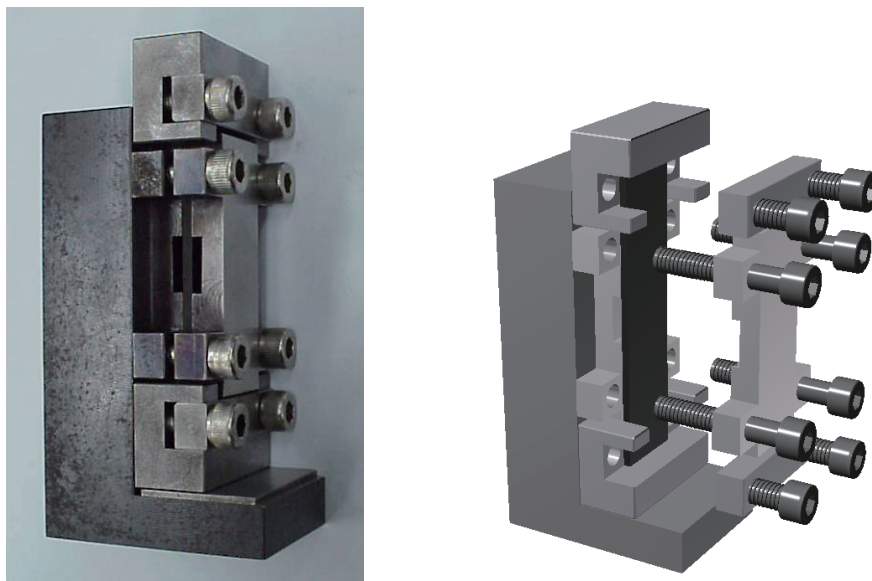


図3 NAL-NHC-I法 (NAL-I法) の試験治具



図4 NAL-NHC-II法 (NAL-II法) の治具写真

3. 実験結果と考察

3.1 試験法の相互比較

強度の測定結果を表3に、代表的な試験結果を図5の棒グラフで示す。図5におけるエラーバーは±標準偏差を意味している。また参考のため、すべての試験結果を付録1に、また典型的な破断後の試験片写真を付録2に掲載した。規格化されている試験法の中では、全体を通してSRM1が最も安定した試験結果を与えており、得られる圧縮強度も高めの値となっている。SRM1は評定部長さが4.75mmと他の方法よりも短いため破断前の座屈（曲げ変形）の影響が小さく、これが試験結果のばらつきを抑えることに大きく寄与したと思われる。

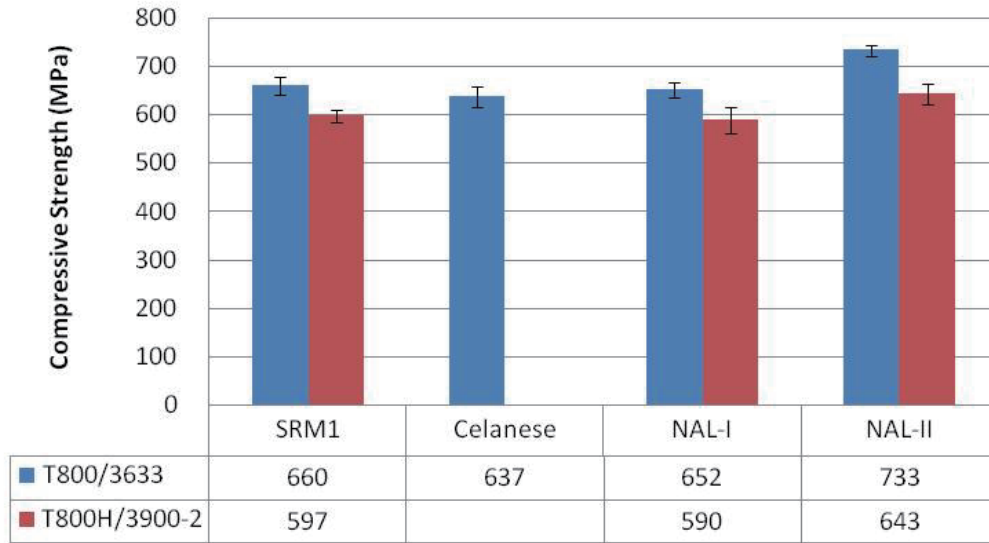
SRM1やJIS-K7076のようなタブ接着試験片に対する端部負荷試験では、試験中のタブ剥がれの影響が懸念される。今回もJIS-K7076で多数のタブ剥がれが生じ、結果としてばらつきが大きく、強度も低めの値となった。一つの原因として、SRM1で指定されている試験治具と比較してJIS-K7076やASTM-D695で推奨されている試験治具の面外変形抑制治具の取り付け剛性が低いため、タブ部の面外拘束が十分でなく端部負荷によって面外拘束治具が弾性変形し、結果としてタブの剥がれを引き起こした可能性がある。ダンベル形状の試験片を用いたASTM-D695では、多くの試験片がR部と平行部の境付近から破壊しており、圧縮強度もSRM1と比較すると低めの値となった。また、タブ無しの試験片を用いたSACMA-SRM1試験（弾性率測定用）では、すべての試験片が端部で破壊した。以上のことから、端部負荷法としてはSRM1が最も妥当であることが確認された。

表3 試験結果の一覧（括弧内は標準偏差）

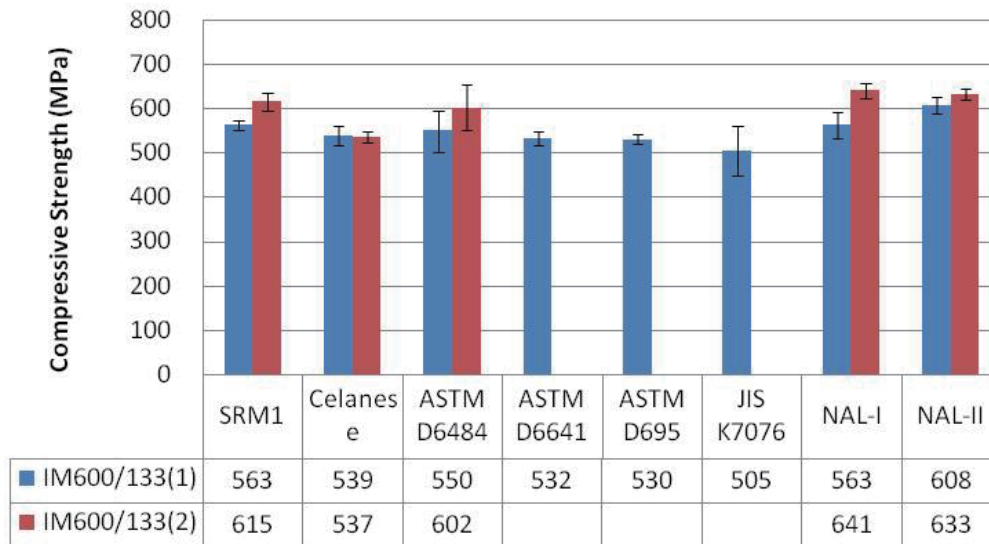
試験方法	材料			
	IM600/133(1)	IM600/133(2)	T800H/3900-2	T800H/3633
SRM 1(強度測定)	563 (11.3)	615 (20.1)	597 (12.6)	660 (18.3)
SRM 1(弾性率測定)	430 (30.8)			
Celanese法(GL=12)	539 (21.5)	536 (28.5)		637 (20.9)
Celanese法(GL=5)		537 (12.0)		
ASTM D6484(SRM3)	550 (46.9)			
ASTM D6641 (CLC法)	532 (15.6)			
ASTM-D695	530 (11.0)			
JIS-K7076 (A法)	521 (45.2)			
NAL-NHC-I	561 (29.9)	641 (16.5)	590 (27.3)	652 (16.4)
NAL-NHC-II	608 (17.7)	633 (13.6)	643 (22.3)	733 (10.9)

せん断負荷方式では、Celanese法（旧ASTM D3410）、SRM3法（ASTM D6484）、およびCLC法（ASTM D6641）ともに、SRM1と比較すると得られた強度は低めであった。Celanese法の試験片はSRM1と比較すると相対的に破断前座屈の影響を受けやすい傾向にあり、これが強度に影響を及ぼした可能性もある。実際、後述するようにCelanese法では荷重とともに表裏のひずみに差が生じ易い傾向にあることが観察された。

SRM3では他の試験法と比較すると試験結果のばらつきが比較的大きい傾向が見られた。SRM3は、本来、大型の油圧チャックで治具を固定し、200kN容量の油圧試験機などを用いて試験を行う方式である。大型油圧試験機が使用できない場合は、図2に示すように治具の上下に大型の金具を取り付け、プラテンで圧縮することによって試験を実施しても良いこととなっている（method 2）。有孔圧縮試験の場合は孔周りでの応力集中により試験治具の軸合わせに対して過度な注意を払う必要はないが、無孔圧縮試験では治具の片あたりなどに起因するミスアライメントの影響が試験結果に影響した可能性もある。試験片寸法が他の試験法よりも著しく大きいという状況も鑑みると、標準試験法としてはあまり適していないと思われる。



(a) IM600/133(1), IM600/133(2)



(b) T800H/3633, T800H/3900-2

図5 圧縮試験結果 (エラーバーは標準偏差)

以上を総括すると、ばらつきの小さい試験結果が得られるのはSRM1とCLC法であり、このうち破断前座屈の影響が比較的少ない強度値を得たい場合は評定部長さの短いSRM1が適している。ただし、SRM1では同材をタブとするタブ接着が必要であること、弾性率測定用に別の試験片が必要であることが難点である。更に言えば、SRM1は単なる米国の業界団体規格に過ぎず、ASTMやJISでは規格化されていない。一方のCLC法は、タブ接着が不要で、弾性率の同時測定が可能であり、ばらつきの少ない良好な試験結果を得ることができる。ただし、RM1と比較すると強度が若干低めとなる傾向があることについては留意する必要がある。

3.2 NAL-I法

NAL-I法では、いずれの材料においてもSRM1と同程度の試験結果が得られている。しかしながら、一部の試験片では端部破壊防止治具と座屈防止治具の隙間部での破壊や、端部破壊が発生し、試験の安定性という観点では課題を残した。特に、T800H/3900-2では試験片が厚いこともあって16本中8本の試験片に端部破壊が発生した。そこで端部破壊防止治具の効果を改善するため、簡単な実験と計算による検討を実施した。はじめに端部破壊防止治具を固定する2本のボルトの軸力を超音波軸力計によって測定し、端部固定治具による試験片

の締め付け力を測定した。また、この治具と同程度の表面粗さの鋼と、CFRP試験片との静止および動摩擦係数を測定し、それぞれ0.11および0.1という値を求めた。これらの実験結果をもとに、図6に示すモデルを対象とした有限要素解析（FEA）を行い、評定部での圧縮応力と、試験片端部近傍での負荷方向圧縮応力との関係を調べた。対象材料はIM600/133、試験片厚さは2mmである。

計算結果を図7に示す。ここで横軸は評定部での軸方向の圧縮応力、縦軸は試験片端部における軸方向の圧縮応力である。端部破壊防止治具により試験片端部における圧縮応力は大きく低減しているが、試験片の締め付け荷重が小さくなるとその効果が小さくなることわかる。端部破壊防止治具を使用しない場合の端部での破壊応力が384MPaであったことから、例えばボルト締め付けトルクが14 Nmの場合、評定部の圧縮応力が約600 MPaを越えると端部破壊の可能性が現れる。すなわち、今回の実験条件では、治具による端部破壊防止効果が必ずしも十分ではなく、条件によっては端部破壊が生じる可能性がある。端部破壊を抑制するためには、端部破壊防止治具を取り付ける際のボルト径や本数、ボルト締め付けトルク、接触部の摩擦係数などを再検討することが効果的である。

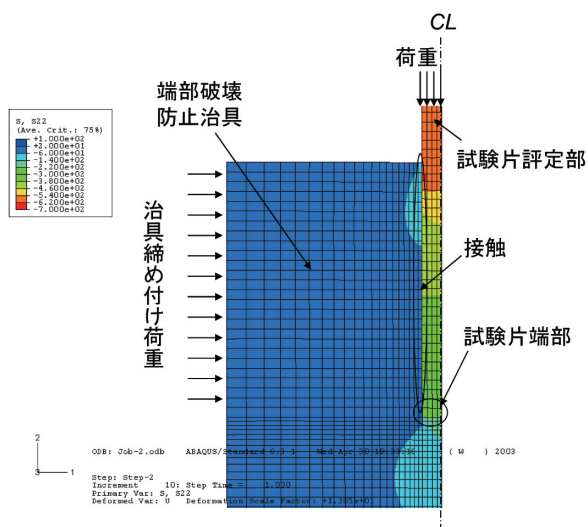


図6 端部破壊防止治具のFEM解析モデル

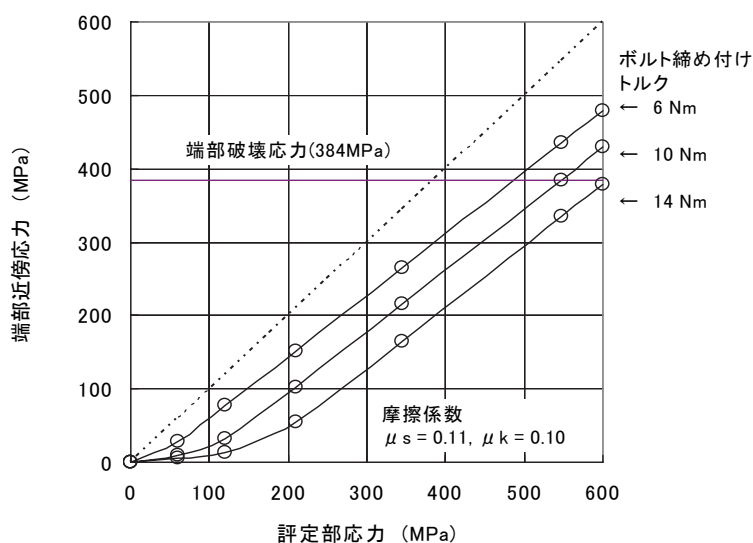


図7 試験片評定部と端部近傍の応力 (治具締め付けトルクの影響)

3.3 NAL-II法

NAL-I法の試験結果は概ね良好で、平均値、標準偏差ともにSRM-1と同程度の値が得られたが、いくつかの試験片では評定部外での破壊が発生した。このうち試験片端部破壊については前節で述べたような治具の改良により防止できる可能性があるが、端部破壊防止治具と座屈防止治具の隙間部での破壊を防止することは容易ではない。そこでNAL-I法における問題点を踏まえ、これを改良した新しい試験方法（NAL-II法）を考案した。前述したようにNAL-II法はリテーナを介して試験片に円柱形状の試験片固定治具を取り付けた後、これを円筒スリーブにセットして端部負荷によって圧縮荷重を負荷する。表3および図5に示すとおり、NAL-II法では、すべての試験片が評点間で破壊し、強度のばらつきは少なく、試験状況は良好であった。しかしながら、ゲージ長さが10mmとSRM-1よりも長いにもかかわらず、得られた強度はSRM-1と比較して0～10%程度高い値となっており、試験結果の妥当性を検証する必要性が示唆された。

NAL-II法の治具は軸合わせに円筒スリーブを使用しており、スリーブの内径公差はF7 (+0.03～+0.06mm)、試験片固定治具の外径公差はe7 (-0.05～-0.075mm)としている。想定している最大荷重(50kN)における試験片固定治具の径方向の弾性変形量は最大でも0.002mmである。すなわち、最大荷重でもスリーブ/試験片固定治具間に顕著な接触が生じないようなクリアランスを設定してある。しかしながら試験片取り付け時のアライメント誤差などにより、クリアランスが限りなく小さくなる可能性も否定できない。そこで最悪のケースとして、クリアランスがゼロの場合に発生する摩擦力について、FEM解析によって見積りを行った。対象としたのは、外径50mm×長さ40mmの試験片固定治具が、外径72mm・内径50mmのスリーブに勘合されているモデルである。その結果、試験片固定治具に50kNの荷重を負荷した際に発生するスリーブ/試験片固定治具間の接触面圧は1.25MPaと計算された。NAL-II治具に使用している無給油ブッシュの摩擦係数は0.05～0.1程度であることから、軸方向摩擦力は大きく見積もっても上下あわせて1.5kNとなる。以上のことから、円筒と試験片固定治具との摩擦が試験結果に及ぼす影響は、試験中に顕著な偏芯などが生じない限り、最悪の場合でも最大荷重の3%程度であると推定される。

図8に各試験法で得られたIM600/133の典型的な応力ひずみ線図を示す。Celanese法を除けば、SRM-1、CLC法、NAL-I法、NAL-II法によって得られた応力ひずみ線図は、いずれもほぼ一致し、ひずみ0.1～0.3%の範囲で弾性率を測定する場合にはいずれの方法でも問題のないことがわかった。しかしながら、破断に至るまでの試験片表裏におけるひずみの一致という観点から見るとCLC法が断然に優れており、Celanese法およびNAL-IIでは表裏でひずみの差が広がる傾向（座屈変形が発生する傾向）を示すことがわかった。Celanese法における曲げ変形は試験片のわずかな仕上げ精度の誤差に起因するものと思われる。一方、NAL-IIでは試験片固定治具の剛性が表裏で非対称であることが影響している可能性がある。

NAL-II法では、リテーナを介して4本のボルト（M5）で試験片を固定治具に固定する。試験結果を見ると、ほぼすべての試験片において荷重が約12～13 kNを越えた付近からリテーナ側の圧縮ひずみが小さくなる傾向を示すことがわかった。このことは、図9に示すように圧縮荷重の増大とともに試験片を固定するボルトが弾性変形することによって試験片の固定支持が弱くなり、結果として若干の座屈（曲げ変形）が発生している可能性を示唆している。この変形が顕著になると上下の試験片固定治具の偏芯による横荷重が生じ、結果として円筒と試験片固定治具との摩擦が上記で想定した以上に増大してしまう可能性がある。ただし図8に示すようにCLC法の破断強度までは応力ひずみ線図が完全に一致していることから、この現象が最終的な圧縮強度に及ぼす影響については現時点では不明である。NAL-II法における試験片の座屈変形を抑制するためには、試験片を試験片固定治具に対してより剛に取り付けることが必要であり、リテーナの剛性向上、ボルト径の変更（M5→M8）、ボルト固定トルクの管理、試験片幅の変更（15mm→12mm）などの対策が効果的であろう。

NAL-II法は治具の構造が単純で、治具の製作費も10～15万円程度と他の治具と比較して廉価である。治具重量も5kg程度であるため取り扱い性にも優れる。試験片のセットに必要な時間は1本あたり数分であり、作業性も良い。試験片形状は、幅15×80mmと小さく、タブ接着が不要で、弾性率測定と強度測定を同時に実施できるという利点もある。高荷重域での曲げ変形を改善できれば、標準試験法としての可能性も期待できるものと考えられる。

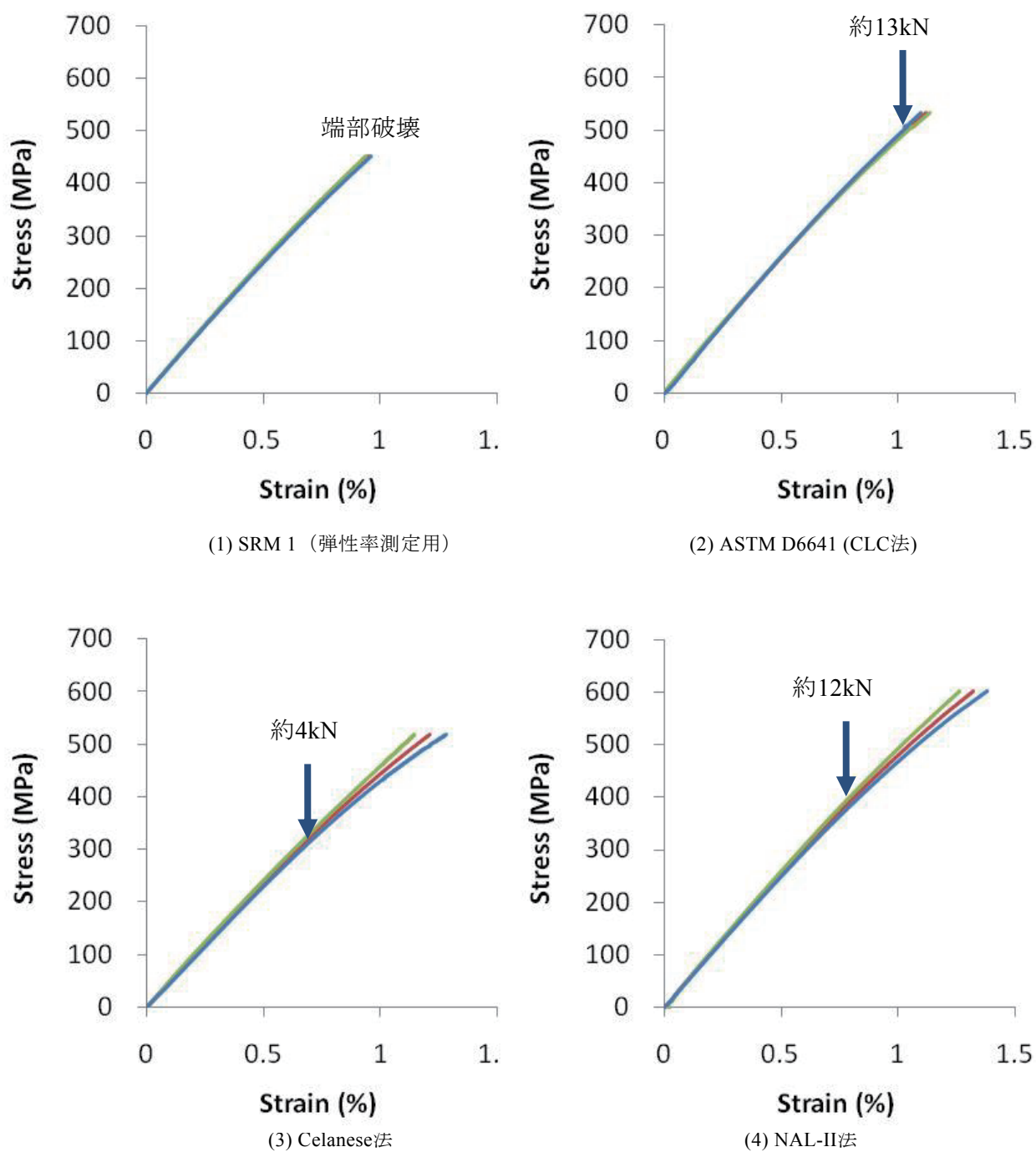
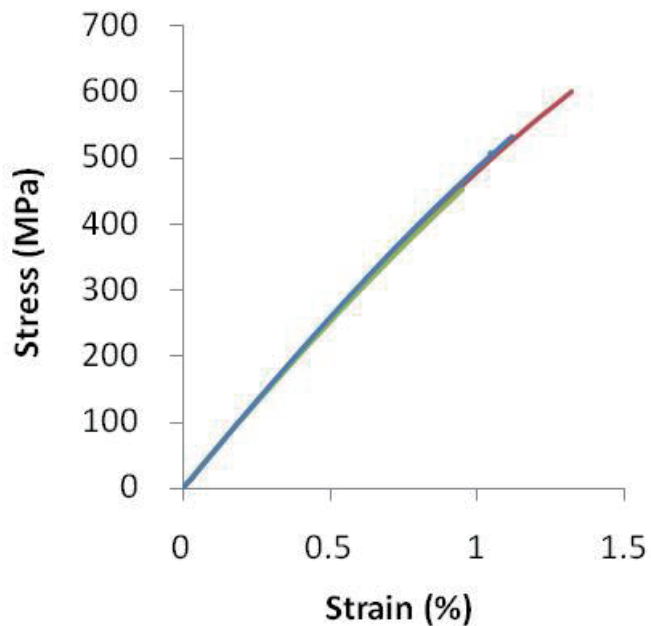


図8 応力ひずみ線図の例 (IM600/133(1))



(5) SRM1, ASTM D6641, NAL-IIの結果 (表裏の平均値)
 (緑 : SRM1, 青 : ASTM D6641, 赤 : NAL-II)

図8 応力ひずみ線図の例 (IM600/133(1))

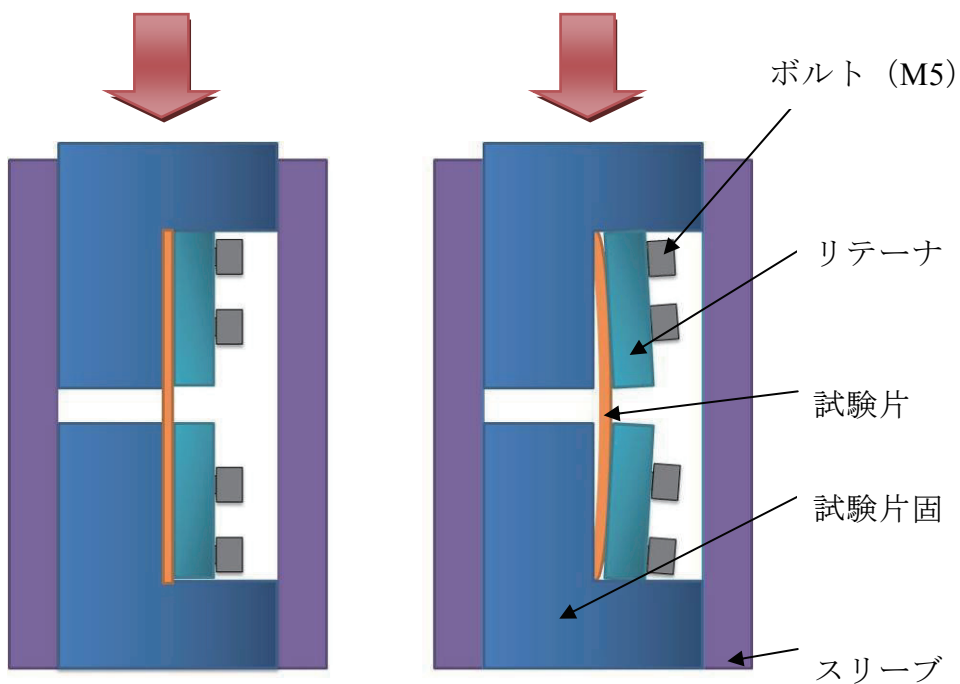


図9 NAL-II試験治具における曲げ変形の可能性 (模式図)

4. まとめ

本研究では3種類のCFRP疑似等方積層材を対象として圧縮試験法の相互比較を行った。また、比較的簡便な圧縮試験方法として、NAL-NHC-I(NAL-I)法およびNAL-NHC-II(NAL-II)法を提案し、その評価を行った。得られた結果を以下に総括する。

1. 安定した試験結果が得られるのは、SRM1とASTM D6144(CLC法)である。ASTM D6144は、タブ接着が不要で、弾性率の同時測定が可能であり、ばらつきの少ない良好な試験結果を得ることができる。また、試験片表裏のひずみが破断まで一致することに関しては秀逸である。なお、圧縮強度についてはSRM1と比較すると若干低めとなる傾向がある。
2. ASTM D3410 (Celanese), ASTM D695, ASTM D6484 (OHC), JIS K7076 (A法)は、SRM1およびASTM D6144(CLC法)法と比較すると、試験の安定性、試験コスト、試験効率などの面での課題が多く、積極的にこれらの試験法を選択する理由は見当たらない。
3. SRM1のタブ接着を省略したNAL-NHC-I法は、概ね妥当な試験結果が得られたものの、一部の試験片では端部破壊防止治具と座屈防止治具の隙間部での破壊や、端部での破壊が発生し、試験の安定性という観点からは課題が多い。
4. NAL-NHC-II法は、SRM1法とASTM D6144 (CLC法)の利点を併せ持っており、CFRP疑似等方積層板の圧縮試験方法として有望である。ただし、SRM1と同様に荷重の増大とともに試験片に曲げ変形が生じる傾向があり、標準試験法として提案するためには更なる改良が必要である。

参考文献

- 1) ASTM Standard D 3410-95, Standard Test Method for Compressive Properties of Polymer Matrix Composite Materials with Unsupported Gage Section by Shear Loading, ASTM International, 1995.
- 2) ASTM Standard D 3410-03, Standard Test Method for Compressive Properties of Polymer Matrix Composite Materials with Unsupported Gage Section by Shear Loading, ASTM International, 2003.
- 3) ASTM Standard D 6484-04, Standard Test Method for Open-Hole Compressive Strength of Polymer Matrix Composite Laminates, ASTM International, 2004.
- 4) SACMA Recommended Method, Open-Hole Compression Properties of Oriented Fiber-Resin Composites, SRM 3R-94, Suppliers of Advanced Composite Materials Association (SACMA), 1994.
- 5) 炭素繊維強化プラスチックの面内圧縮試験方法、JIS-K7076: 1991、日本工業規格
- 6) ASTM Standard D 695-02a, "Compressive Properties of Rigid Plastics," ASTM International, 2002 (first issued in 1942).
- 7) SACMA Recommended Method for Compressive Properties of Oriented Fiber-Resin Composites, SRM 1R-94, Suppliers of Advanced Composite Materials Association (SACMA), 1994.
- 8) 繊維強化プラスチック 積層板の面内圧縮特性の求め方、JIS K7018: 1999、日本工業規格
- 9) ASTM Standard D 6641-01, "Determining the Compressive Properties of Polymer Matrix Composite Laminates Using A combined Loading Compression (CLC) Test Fixture," ASTM International, W. Conshohocken, Pa., 2001 (first issued in 2001).
- 10) K. E. Hofer, Jr., P. N. Rao, A New Static Compression Fixture for Advanced Composite Materials, Journal of Testing and Evaluation, Vol. F, No. 4, July 1977, pp. 289-283.
- 11) D. F. Adams and E. M. Odom, Influence of Test Fixture Configuration on the Measured Compressive Strength of a Composite Material, Journal of Composites Technology and Research, Vol. 13, No. 1, 1991, pp. 36-40.
- 12) D. F. Adams, J. S. Welsh, The Wyoming Combined Loading Compression (CLC) Test Method, Journal of Composites Technology & Research, Vol. 19, No. 3, 1997, pp. 123-133.
- 13) Composite Materials Handbook, MIL-HDBK-17 E, Technomic Publishing Co., Lancaster, (2000)
- 14) 小笠原俊夫、石川隆司、松嶋正道、山田健、邊吾一、CFRP積層板に対する無孔圧縮試験法の相互比較、第45回構造強度に関する講演会講演集(2003)、日本航空宇宙学会、pp239-241.
- 15) 小笠原俊夫、石川隆司、CFRP積層板に対する無孔圧縮試験法の相互比較(第2法)、第46回構造強度に関する講演会(2004)、日本航空宇宙学会、pp146-148.

- 16) T. Ogasawara, Y. Ishida, R. Yokota, T. Watanabe, T. Aoi, and J. Goto, Processing and properties of carbon fiber / Triple-A polyimide composites fabricated from imide oligomer dry prepreg, *Composites: Part A*, 38 (2007), p 1296-1303.

謝 辞

本研究に関わる強度試験の実施に対して多大なるご助力を賜りました石川島ジェットサービス(株) 藤嶋基氏、山崎隆氏、市川雅章氏、元日本大学生産工学部大学院生 山田健氏、元韓国海洋大学校大学院生 嚴琇炫氏、元ミシガン大学学生 中根梢氏に深く感謝致します。

付録1 全試験結果

IM600/133 (1)

試験方法、治具	幅 (mm)	厚さ (mm)	断面積 (mm ²)	荷重 (kN)	強度 (MPa)		弾性率 (GPa)		破壊部位
SACMA SRM-1 タブ接着 ざぐり無し	15.0	2.35	35.2	19.4	551.0	563.1			評定部
	15.0	2.35	35.3	20.2	573.3	11.3			評定部
	15.0	2.36	35.4	19.5	551.0				評定部
	15.0	2.36	35.3	20.0	567.1				評定部
	15.0	2.35	35.2	20.2	573.1				評定部
SACMA SRM-1 タブ無し ざぐり有り	15.0	2.36	35.3	13.6	383.4	429.5	48.7	51.0	端部
	15.0	2.36	35.3	16.0	452.5	30.8	50.7	1.4	端部
	15.0	2.36	35.4	15.9	448.6		51.3		端部
	15.0	2.36	35.3	16.0	452.2		50.5		端部
	15.0	2.36	35.3	14.0	397.5		52.9		端部
	15.0	2.36	35.4	15.7	442.7		51.6		端部
NHC-Q1, D3410-A (GL=12)	6.1	2.38	14.5	7.7	530.9	539.2	43.4	43.5	評定部
	6.1	2.40	14.6	7.6	519.2	21.5	43.7	0.4	評定部
	6.1	2.37	14.4	8.2	566.2		43.7		評定部
	6.1	2.38	14.5	7.8	536.1		44.0		評定部
	6.1	2.38	14.5	7.6	526.5		43.4		評定部
	6.1	2.37	14.5	8.3	571.0		43.5		評定部
	6.1	2.37	14.4	8.1	559.7		42.5		評定部
	6.1	2.36	14.4	7.7	533.6		43.8		評定部
JIS K7076 ざぐり無し タブ接着	12.7	2.37	30.0	14.7	488.6	520.8	48.1	48.8	評定部
	12.7	2.36	29.9	14.2	474.9	45.2	49.1	0.4	下部タブ部分
	12.7	2.36	30.0	15.1	502.5		48.9		評定部
	12.7	2.37	30.0	17.1	569.6		48.9		上部タブ部分
	12.7	2.37	30.0	17.1	568.7		48.9		評定部
ASTM D695 タブ無し ざぐり有り	12.7	2.36	30.0	16.1	538.6	530.2	49.9	50.4	評定部とRの境目
	12.7	2.36	30.0	15.8	526.2	11.0	50.5	0.3	評定部
	12.7	2.36	29.9	15.6	520.6		50.1		評定部とRの境目
	12.7	2.36	29.9	16.3	544.3		50.8		評定部とRの境目
	12.7	2.36	30.0	15.5	516.0		50.6		評定部とRの境目
	12.7	2.37	30.0	16.1	535.6		50.5		評定部とRの境目
ASTM D695 タブ無し ざぐり無し	12.7	2.36	30.0	16.4	545.3	563.7			評定部とRの境目
	12.7	2.35	29.9	17.5	586.1	19.4			評定部とRの境目
	12.7	2.36	29.9	17.6	588.8				評定部とRの境目
	12.7	2.36	30.0	16.8	558.1				評定部とRの境目
	12.7	2.36	29.9	16.7	558.9				評定部
	12.7	2.36	29.9	16.3	544.9				評定部とRの境目
ASTM-D6641 (CLC)	12.1	2.31	27.8	15.2	546.6	531.9	52.7	52.5	評定部
	12.1	2.32	28.1	14.6	519.5	15.6	51.2	0.9	評定部
	12.1	2.32	28.0	15.1	539.9		52.7		評定部
	12.1	2.27	27.4	15.0	548.5		53.9		評定部
	12.1	2.29	27.6	14.1	509.8		52.1		評定部
	12.1	2.33	28.1	14.8	527.0		52.3		評定部
ASTM D6484 (SRM3)	38.1	2.27	86.7	41.0	473.3	549.7	54.8	54.2	評定部
	38.1	2.24	85.4	45.1	527.8	46.9	55.1	0.8	評定部
	38.1	2.29	87.3	52.1	597.3		54.4		評定部
	38.1	2.31	88.0	52.9	600.5		53.6		評定部
	38.1	2.31	87.9	48.3	549.5		53.2		評定部

試験方法、治具	幅(mm)	厚さ(mm)	断面積(mm ²)	荷重(kN)	強度 (MPa)		弾性率 (GPa)		破壊部位
NAL-I	25.4	2.37	60.1	35.5	593.4	560.6	46.4	47.5	治具の隙間
	25.4	2.37	60.2	29.4	488.1	29.9	48.5	2.0	治具の隙間
	25.4	2.37	60.2	32.2	535.2		47.1		評定部
	25.4	2.37	60.2	33.8	560.9		46.3		評定部
	25.4	2.37	60.2	34.8	577.8		50.7		評定部
	25.4	2.37	60.2	35.5	589.4		46.3		評定部
	25.4	2.37	60.2	33.9	561.7				治具の隙間
	25.4	2.38	60.4	34.5	571.7		47.7		治具の隙間
	25.4	2.36	60.0	34.7	579.0		48.4		評定部
	25.4	2.37	60.1	34.1	567.9		47.0		治具の隙間
25.5	2.39	60.9	33.3	541.9	46.8		端部		
NAL-II	15.0	2.32	34.8	20.2	580.6	608.0	52.1	51.1	評定部
	15.0	2.33	35.0	21.9	624.9	17.7	50.9	0.5	評定部
	15.1	2.31	34.8	20.9	600.4		50.8		評定部
	15.1	2.32	34.9	21.1	603.0		51.3		評定部
	15.1	2.31	34.9	21.3	610.3		51.0		評定部
	15.1	2.31	34.8	21.9	628.8		50.6		評定部

IM600/133 (2)

試験方法、治具	幅(mm)	厚さ(mm)	断面積(mm ²)	荷重(kN)	強度 (MPa)		弾性率 (GPa)		破壊部位
SRM1	15.0	2.28	34.2	20.7	605.3	615.0			評定部
	15.0	2.29	34.3	20.2	588.9	20.1			評定部
	15.0	2.29	34.4	20.9	607.0				評定部
	15.0	2.29	34.3	21.6	629.6				評定部
	15.0	2.24	33.7	21.8	646.0				評定部
	15.0	2.27	34.1	20.9	613.1				評定部
NHC-Q1, D3410-A (GL=12)	6.0	2.30	13.8	7.6	549.6		535.8	48.8	48.7
	6.0	2.30	13.8	6.7	481.4	28.5	47.6	0.7	評定部
	6.0	2.30	13.8	7.4	533.9		48.9		評定部
	6.0	2.30	13.8	7.8	562.2		49.6		評定部
	6.0	2.30	13.8	7.4	537.1		48.3		評定部
	6.0	2.30	13.8	7.6	550.5		48.8		評定部
NHC-Q1, D3410-A (GL=5)	6.0	2.30	13.9	7.3	526.5		536.5		
	6.0	2.30	13.8	7.6	547.5	12.0			評定部
	6.0	2.30	13.8	7.7	554.1				評定部
	6.0	2.30	13.8	7.4	536.3				評定部
	6.0	2.30	13.8	7.3	530.7				評定部
	6.0	2.30	13.8	7.2	524.2				評定部
ASTM D6484 (SRM3)	38.1	2.29	87.2	53.8	617.1		602.3	50.9	49.2
	38.0	2.29	87.3	58.0	664.2	51.6	46.5	2.1	評定部
	38.1	2.29	87.1	47.2	541.6		48.4		評定部
	38.1	2.27	86.2	50.5	586.1		50.8		評定部
NAL-I ざぐり有	25.4	2.33	59.3	36.1	619.8		641.0		46.5
	25.4	2.28	57.9	37.6	649.6	16.5	48.1	1.1	治具の隙間
	25.4	2.26	57.4	38.1	662.5		47.4		治具の隙間
	25.4	2.29	58.3	36.8	630.7		46.0		評定部
	25.4	2.30	58.3	37.4	642.2		45.5		評定部
NAL-II	15.0	2.33	34.9	21.5	615.7		632.8		51.1
	15.0	2.30	34.6	22.1	638.5	13.6	50.1	0.7	治具の隙間
	15.0	2.30	34.5	22.5	651.3		51.4		治具の隙間
	15.0	2.33	35.0	22.2	634.3		51.6		評定部
	15.0	2.32	34.7	21.7	624.1		50.3		治具の隙間





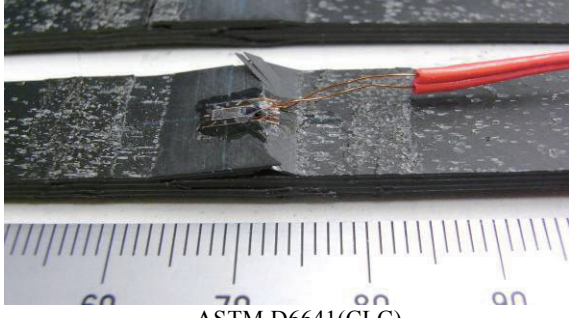



T800H/3900-2

試験方法、治具	幅 (mm)	厚さ (mm)	断面積 (mm ²)	荷重 (kN)	強度 (MPa)		弾性率 (GPa)		破壊部位
SRM1	15.0	3.01	45.2	27.5	608.2	596.6			評定部
	15.0	3.03	45.4	26.7	588.9	12.6			評定部
	15.0	3.03	45.5	27.0	594.3				評定部
	15.0	3.04	45.6	26.5	582.0				評定部
	15.0	3.05	45.6	28.1	615.4				評定部
	15.0	3.04	45.5	26.9	591.1				評定部
NAL-I	15.0	3.04	45.5	25.8	567.3	589.8	50.7	51.1	評定部
	15.0	3.04	45.5	26.1	573.6	27.3		0.9	評定部
	15.0	3.04	45.5	25.6	563.0		53.1		評定部
	15.0	3.04	45.5	26.9	592.1		51.3		端部
	15.0	3.03	45.4	27.2	599.3				端部
	15.0	3.03	45.5	27.7	608.2		51.7		端部
	15.0	3.04	45.6	27.7	608.4		50.4		端部
	15.0	3.05	45.6	24.7	541.5		50.7		端部
	15.0	3.04	45.5	25.9	568.9		51.3		評定部
	15.0	3.04	45.5	28.1	617.2		50.2		評定部
	15.0	3.04	45.5	28.2	620.2		50.4		評定部
	15.0	3.04	45.5	27.4	601.7		51.1		端部
	15.0	3.04	45.5	28.1	618.7				端部
	15.0	3.04	45.5	28.3	621.7				端部
	15.0	3.04	45.5	27.0	594.6				評定部
	15.0	3.04	45.5	24.6	540.1				評定部
NAL-II	15.0	3.04	45.5	28.6	628.8	643.2	52.0	51.4	評定部
	15.0	3.04	45.5	29.1	638.7	22.3	52.3	0.7	評定部
	15.0	3.04	45.6	28.1	616.5		50.5		評定部
	15.0	3.03	45.5	30.2	665.0		51.4		評定部
	15.0	3.03	45.5	30.3	667.0		51.0		評定部

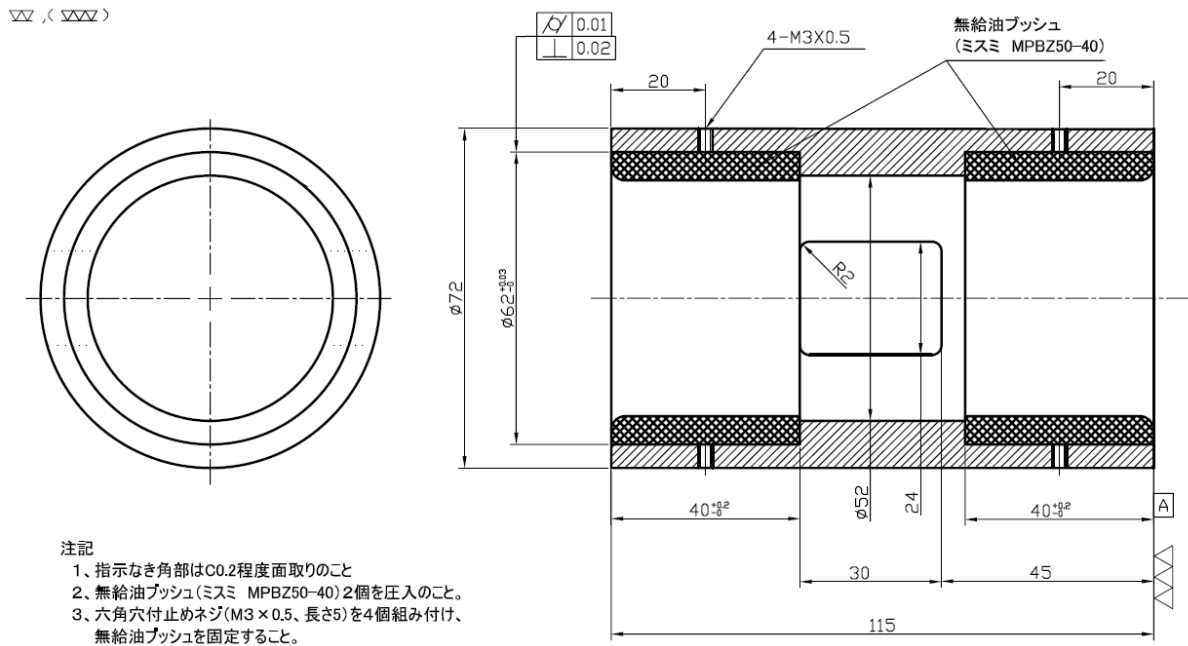
(4) T800H/3633

試験方法、治具	幅 (mm)	厚さ (mm)	断面積 (mm ²)	荷重 (kN)	強度 (MPa)		弾性率 (GPa)		破壊部位
SACMA SRM-1 タブ有り ざぐり無し	15.0	2.28	34.2	22.0	644.4	659.9			評定部
	15.0	2.27	34.2	22.8	667.4	18.3			評定部
	15.0	2.27	34.2	22.6	661.0				評定部
	15.0	2.28	34.3	23.5	687.3				評定部
	15.0	2.28	34.2	21.8	635.3				評定部
	15.1	2.28	34.3	22.7	663.9				評定部
Celanese	6.1	2.32	14.1	8.8	622.9	637.3	44.3	43.6	評定部
	6.1	2.31	14.1	9.2	656.6	20.9	43.6	0.5	評定部
	6.1	2.32	14.1	9.3	660.9		43.5		評定部
	6.1	2.33	14.1	9.2	649.2		43.4		評定部
	6.1	2.32	14.1	9.3	655.3		43.0		評定部
	6.1	2.33	14.2	8.7	612.2		44.0		評定部
	6.1	2.34	14.2	9.1	641.9		43.3		評定部
	6.1	2.34	14.3	8.5	598.5		44.2		評定部
	6.1	2.35	14.3	9.0	628.7		43.7		評定部
	6.1	2.35	14.3	9.3	646.9		42.9		評定部
NAL-I	25.4	2.29	58.1	37.2	641.3	652.2	48.1	49.8	評定部
	25.4	2.28	58.1	35.9	618.4	16.4	49.7	3.7	評定部
	25.4	2.28	57.9	37.2	642.6		48.3		治具の隙間
	25.4	2.28	58.0	37.5	646.0		46.7		評定部
	25.4	2.28	57.9	37.6	649.7		48.5		評定部
	25.4	2.28	57.8	37.5	648.1		49.1		評定部
	25.4	2.28	58.0	38.5	664.0				評定部
	25.4	2.28	58.0	37.4	645.2		49.6		評定部
	25.4	2.28	58.0	36.2	623.7		44.8		評定部
	25.4	2.27	57.5	38.1	662.2		60.4		評定部
	25.4	2.27	57.7	36.9	639.5		52.6		評定部
	25.4	2.27	57.7	38.1	660.6		49.6		評定部
	25.4	2.27	57.7	39.0	674.6		47.8		評定部
	25.4	2.27	57.6	38.4	666.2		54.1		評定部
	25.4	2.27	57.6	38.5	669.4		52.6		評定部
	25.4	2.27	57.7	38.9	673.9		47.5		評定部
	25.4	2.27	57.6	38.1	661.4		46.8		評定部
NAL-II	15.1	2.28	34.3	25.0	727.1	733.3	51.8	52.6	評定部
	15.1	2.28	34.3	24.8	721.3	10.9	52.6	0.5	評定部
	15.1	2.28	34.3	25.6	747.4		53.1		評定部
	15.1	2.28	34.4	25.0	729.1		52.8		評定部
	15.1	2.28	34.4	25.5	741.7		52.6		評定部

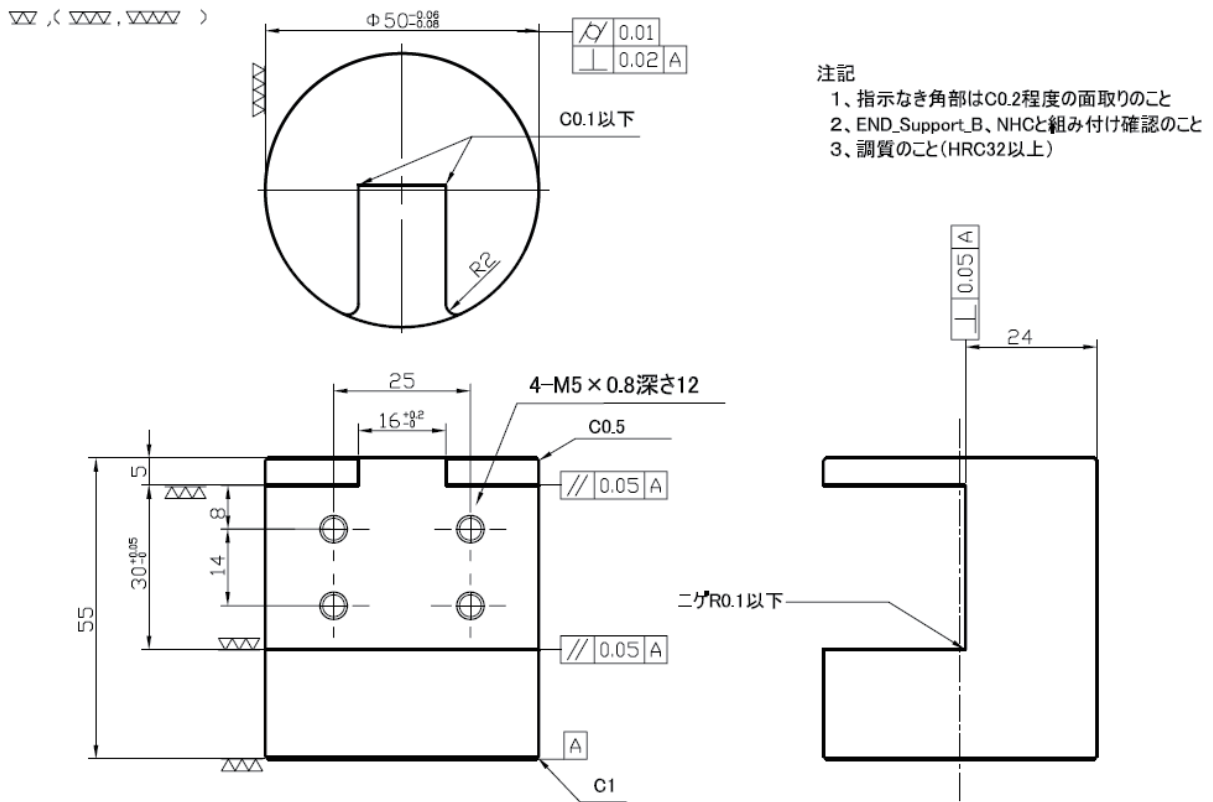
付録2 破断後の試験片（例）

	
<p>SRM1（強度試験用）</p>	<p>SRM1（弾性率測定用）</p>
	
<p>ASTM D3410 (Celanese)</p>	<p>ASTM D6484(SRM3)</p>
	
<p>ASTM D6641(CLC)</p>	<p>ASTM D695</p>
	
<p>JIS-K7076</p>	<p>NAL-II</p>

付録3 NAL-NHC-II法の治具図面

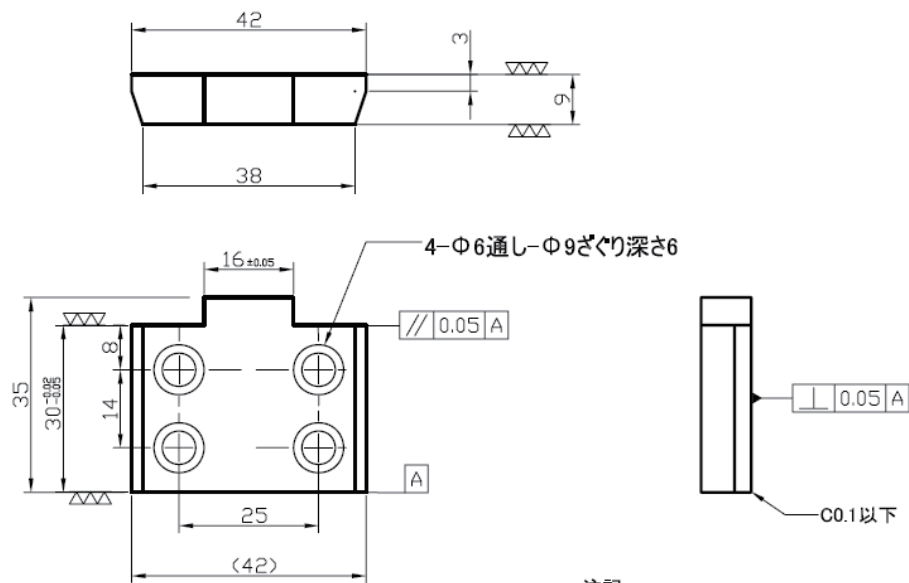


(1) スリーブ



(2) 試験片固定治具

▽▽ , (▽▽▽)



注記

- 1、指示なき角部はC0.2程度面取りのこと
- 2、END_Support_A、NHCと組み付け確認のこと
- 3、六角穴付ボルト(M5長さ20)4本を組み付けのこと
- 4、調質のこと(HRC32以上)

(3)リテーナ