

立体織物製織技術・立体組物製組技術開発の経緯

福多 健二*
(繊維高分子材料研究所)

[要旨] 織高研で芽生えた立体織物(3D織物)は直交方式の織物から絡み組織方式の織物へと進化し、これらを複合材料の基材として用いることにより、従来の材料では得難い機械的、熱的性質を発現することができる。例えば他の手段では得難い剪断強度やアブレーション特性である。特に、絡み組織の格子状基材は建材用として有用であることが示された。更に、部材又は製品の具体的ニーズに沿って形状と物性の最適化を図るニアネットシェイプを目指して、製紐方式の組物装置を試作し、その機能を検証した。また、パラボラ面状立体織物織機[#]を考案・試作し、試織体の組織等を精査した結果、アンテナリフレクターに応用することにより熱的安定性に優れることが示された。 [#]共同研究。

1. はじめに

炭素繊維などを用いた繊維強化複合材料は高性能材料として航空機や宇宙機器の分野など先端技術分野の発展に大きく寄与している。このような繊維強化複合材料の高性能化に関連した技術の事例に、多軸方向の繊維を立体的形状の織物や組物^{注-1)}に組織し、複合材料の強化用基材^{注-2)}として活用する立体的繊維組織体、所謂、立体織物(3D織物、三次元織物)の開発、及び、立体織物の製織技術や製組技術^{注-3)}の開発がある。

注-1)、糸などを組み組織で束ねたもの、例えば組ひも。

注-2)、繊維集合体(マットや織物など)に樹脂等を含浸して一体化した場合、前者を基材、後者をマトリックスという。

注-3)、組物を作ること

筆者が繊維工業試験所** (以下、織工試)に入所した当時(昭和34年)のころの繊維関連分野の研究は、世界の化学繊維に関する技術の急速な進展に呼応して、新合成繊維の製造技術や各種合成繊維による高性能製品化技術の開発に重点がおかれていた。織工試が繊維高分子材料研究所(以下、織高研)に改組された当時は、消費科学や人間工学など生活環境に関わる課題の台頭が見られ、繊維の長所を生かした衣料用繊維製品及び工業用繊維材料の研究の重要性が従前にも増してきていた。

立体織物に関連する研究課題は、織高研に改組された直後に採択された特別研究「構造用新材料の生産技術の研究」の小項目「複合構造体の基材配向に関する研究」としてスタートした。基材の配列条件を異にするテストピースの試織を兼ねた立体的織物織製実験装置を試作し、織成機能及び基材構成にかかわる研究を加速させた。並行して共同研究や技術指導を通して研究成果の普及と応用に努めてきた。

織高研で芽生えた立体織物関連の研究は、基盤技術研究促進センターの昭和62年度新規出資対象会社として設立された(株)スリーディコンポリサーチに移行し、『立体的に最適な繊維配列を有する組織と、複雑な最終部材に一体化された構成(Near Net Shape)の

* 現在；技術士事務所 つくば繊維技研(つくば市春日4-10-17)

** 昭和44年7月に改組、繊維工業試験所より繊維高分子材料研究所に名称を変更。

立体織物を織製するためのプリファブ리케이션技術の開発、及び立体織物を各種の構造材料に適用するに際して必要な複合材料技術の開発』^{注-4)}を目標に精力的に進められ、この分野での大きな成果を挙げている¹⁾。

ここでは織高研における立体織物開発の経緯について、逸話を加え、時系列的に紹介する。なお、本稿末尾の付表に、世界における立体織物開発の歷程と(株)スリーディコンポリサーチの研究成果の概要を示した。各項目で参考にして頂ければ幸いである。

^{注-4)} (株)スリーディコンポリサーチの報告書『立体織物複合材料の研究開発』(平成6年9月)より抜粋

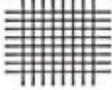
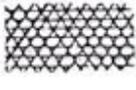
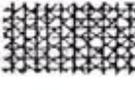
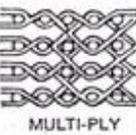
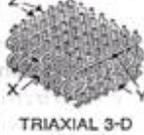
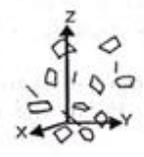
2. 織物の構成様式

立体織物の特徴は、素材である繊維の配列状態を最終製品に要求される性能に合わせて、最適化するテイラード デザイン(Tailored Design)の手法を活用できることである。このためには、繊維の配列方向を考慮した繊維組織化と所要の立体的輪郭を賦形できる製織技術が生産手段として具体化される必要がある。また、複合材料の強化用基材として活用するには、基材としての立体織物とマトリックス素材を一体化する成形技術の確立が必須である。

表1^{2) 3)}に織物組織の構成様式を示す。織物の幾何学形状を次元数(Dimension)で、織物を構成する素材(繊維または糸)の配列上の要素数^{注5)}を軸数(Axis)で表し、種々の織物を次元数と軸数に対応するよう分類した。

^{注5)} 例えば、立体織物が経糸、緯糸、垂直糸から構成されている場合の要素数は3と考える。

表1 繊維基材の構成様式 ^{2),3)}

Axis Dimension		0	1	2	3	4 -
		NON - AXIAL	MONO - AXIAL	BIAXIAL	TRIAxIAL	MULTI - AXIAL
1 D			 ROVING - YARN			
	2 D	 CHOPPED STRAND MAT	 PRE-IMPREGNATION SHEET	 PLANE WEAVE	 TRIAxIAL WEAVE 1)-3)	 MULTI-AXIAL WEAVE, KNIT
3 D	Linear Element	 3-D BRAID	 MULTI-PLY WEAVE	 TRIAxIAL 3-D WEAVE	 (MULTI-AXIAL 3-D WEAVE) 4)-n, 12)-14)	
	Plane Element	 LAMINATE TYPE	 H or I BEAM	 HONEY-COMB TYPE		

一軸方向の多数の素材(糸)が組みも(Braid)のように製組された立体組物は1軸-3次元の様式に相当する。従来の製織法によって織られ、これまでも厚手の織物として多用されているベルト織や多重織は経糸と緯糸の2軸の糸から構成された2軸-3次元様式の織物である。経糸、緯糸、垂直糸から構成される立体織物は3軸-3次元の様式に位置する(以下、立体織物を3D織物と呼称する)。

平面状織物の異方性を改善するために開発された3軸織物 (Triaxial woven fabric)⁴⁾ は3軸方向の糸が同一面内で60°に交差した平面状の組織を有し、3軸-2次元の様式に相当する。厚手の織物として前記した2軸-3次元様式の織物は、通常の織機により製織することが可能であるが、その場合の織物の厚さは20層相当までである。この様式の織物はフランスの文献では2.5次元の織物と呼称されている。2次元様式でも3次元様式でも表現できないこの種の織物にその中間を意味する2.5Dの表現を当てることは水平思考で正に巧言である。

表1には、筆者の篤い思いがある。3D織物に造詣の深いDr. Frank K. Ko^{注6)}と3D織物の現状・将来について意見交換を行った折り、本表に大きな関心を示され、出版計画中の文献³⁾に参考資料として引用したい旨の提案があり、他のデータと共に採用していただいた経緯がある。このことを機に、多くのご指導を得ることになり感謝している次第である。

^{注6)} Dr. Frank K. Ko : Drexel University (Philadelphia, USA) の教授

3. 最初の3D織物

織工試に入所の当時は特別研究「繊維の複合紡績技術に関する研究」の小項目「精紡装置の機能向上」を担当し、当時、夢の紡績法と云われていたオープンエンド精紡装置^{注7)}の開発に傾注していた。学窓を出て以来、研究内容が繊維加工(紡織)に係る性能向上のための繊維配列化であったことから、次期の新テーマ候補として、立体的繊維配列による『寝具の性能向上』を考え、その一研究要素として、3D織物の布団とその製織法を検討したことが、立体織物及びその製織法の構想を描いた切っ掛けとなった。その意図は多孔質の織物で空気を着る寝具の開発であり、冒頭に記した3D織物開発の分野とは全く無縁の発想であった。



図1 最初の3D織物試作例

寝具は人生のほぼ1/3を世話になる重要な生活用品であり、快眠を得るための性能向上の努力がなされているが、古来、布を袋状に仕立てて中に綿や羽毛を詰めた布団が多用されている。繊維を立体的に組織することによる快眠性の発現と部位の着脱が可能な機能寝具を考えた次第である。図1にテーマの検討に供した3D織物の試作例を示す。なお、本テーマの実行には、睡眠テストをはじめとする評価に福祉部門や医療部門との協働など未

整理の課題が多く、テーマの提案は保留した。睡眠医学が国際的に重視されている昨今、再検討の機会があるテーマと考えている。

注-7) 紡績における最終工程の装置。従来のリング精紡法とは原理を異にし、空気流の作用を活用して繊維束を細くし、撚りを加えて糸を形成するオープンエンド方式の新精紡法。

4. 3軸-3D織物及び製織装置

3軸-3D織物の製織についての日本で最初の特許は、英国から出願された特公昭51-14624⁴⁾に見出される。図2に装置の概要を示す。本装置は従来の織機の主機構である開口、緯糸挿入、箆打ちを活かし、水平方向に通る基礎経糸(X-軸)、水平方向に通る緯糸(Y-軸)、垂直方向に通る結着経糸(Z-軸)の3種の糸に次記の動作を与えて、3軸方向の各糸が直交して組織された直交組織の3軸-3D織物を製織する。

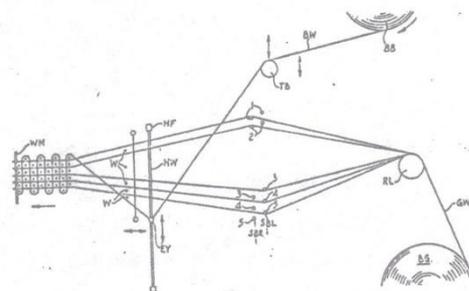


図2 装置例 (カート・グリーン)

- ① 多層に配置された基礎経糸の一段目を開口する。
- ② ①で開口された織口に一本の緯糸を、シャトル等を用いて経糸の全幅にわたって往復、配置する。①②の動作を順次基礎経糸の各段について繰り返す
- ③ ②で配置された水平方向の経糸と緯糸に直交するよう結着経糸を緯糸群に織り込み緯糸群の上面と下面で折り返し配置する。

この機構により製織される織物のZ軸方向の段数は20段前後と推測される。また、Z軸方向の糸間隔を所要の値に規正する機構が無いなど、厚手の立体織物の製織には課題が多い。

織高研における3D織物関連の本格的な研究は、技術開発に位置付けられて計画された前記特別研究の小項目「複合構造体用の基材配向の研究」で始動した。

4-1. 3軸-3D織物製織の開発装置

研究に用いる繊維素材には、当初、ガラス繊維のロービング^{注8)}を使用し、これを製織した3D織物と一体化するマトリックスにはエポキシ樹脂を選定した。

注-8) ロービング；綿などの短繊維または化学繊維の長い繊維を、撚りの無い状態で、束状に集めた比較的太い糸状の集合体。粗糸とも云う。

前項に記載した寝具用3D織物作成時にまとめた製織機構の構想をガラスロービングの製織が可能のように改め、複合材料基材仕様の3D織物製織装置を試作した。試作装置は製織条件やマトリックスとの複合化条件の選定、及び複合材料の物性試験用の試料の製作に供した。図3-1、図3-2に試作装置^{5),6),7),8)}の主要部略解図を示す。

図3-2において、経糸 y, y, \dots, y は板状の箆^{オサ}(タテ糸のガイド)1に縦・横方向に等間隔に配列された多数の孔を通して、装置本体(図3-1)の経糸支持具2、3に緊張した状態

で両端を支持される。この経糸群に対して緯糸 x 、 $x \cdots x$ を織り込む緯糸挿入具 6 と

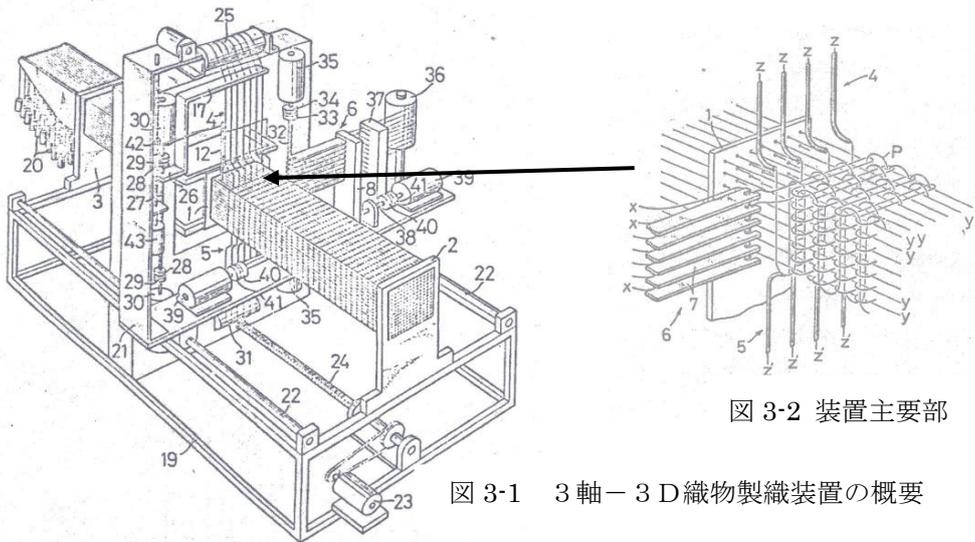


図 3-1 3軸-3D織物製織装置の概要

垂直糸 z 、 $z \cdots z$ を織り込む垂直糸挿入具 5 が水平方向と垂直方向から作用し、3軸組織の3D織物を製織する。箄1、緯糸挿入具6及び垂直糸挿入具5はそれぞれの動作機構等を支持するキャリア21に支持されている。キャリア21は経糸群の張設方向に移動可能に機能しており、緯糸群及び垂直糸群の打ち込みが可能なるよう機能する。

上記の箄部に改良を加えた経糸開口方法⁹⁾により、緯糸と垂直糸が経糸に対して蛇行して絡むように交差した絡み組織の3軸-3D織物の製織も可能にした。直交組織の3軸-3D織物及び絡み組織の3軸-3D織物の繊維束(糸やロービングなど)の配列状態を図4の(a)、(b)に示す。直交組織は繊維束が真直ぐな状態で交差しており、高密度の織物が得

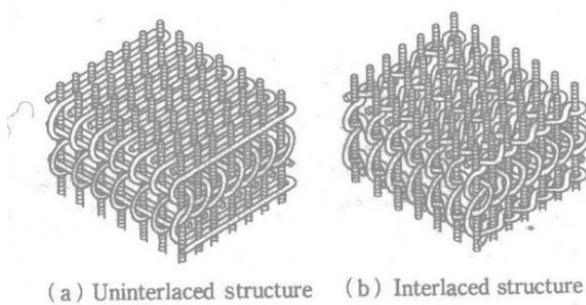


図 4 3軸-3D織物の組織例



図 5 つくば万博出展の感謝状

られる。絡み組織の織物は繊維束の間隔が比較的に大きく荒い目の組織であっても、その製織中やマトリックスとの一体化に際し、繊維束の配列が乱れることなく、最終製品の形状や要求性能に応じた繊維束の配列が得やすい。

試作した3軸-3D織物の一部は国際科学技術博覧会(つくば万博:1985)への政府出品物として展示された。小型の展示品ではあったが、将来の夢を託した当時の思いが甦る。

図5に、出展事業に対する感謝状を示す。

3軸-3D織物を構成するロービングのみに樹脂を含浸させて、ロービング間の空間が多孔部となるように成形した格子状組織の3D複合材料の概念図^{10),11),12)}を図6に、その成形例を図7¹³⁾に示す。

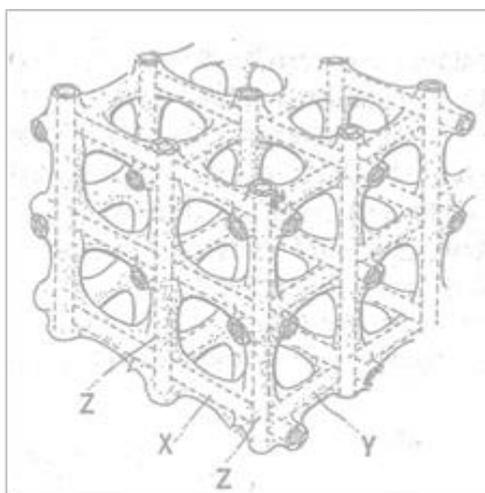


図6 格子状多孔複合材料の概念図

絡み組織の試料(3軸-3D織物)に樹脂を含浸した格子状多孔型複合材料と試料の全域に樹脂を充填した全充填型3D織物複合材料について、比曲げ強度を測定した実験では、格子状多孔型複合材料は全充填型の複合材料の降伏点に相当する負荷のもとでも破壊の発生は無く、除重により元の形状に戻る変形回復を示し、繰り返し負荷を加えることができるなど柔構造的挙動を示すことが認められた¹⁴⁾。

絡み組織の3軸-3D織物複合材料はロービング等素材の補強効率が大きいことに加えて、素材の配列を製品に要求される応力状態に応じて設定でき、部材の軽量化を図れる利点がある。この特徴を活かした建築用のセメント系3D織物複合材料が外装カーテンウォールとして実用に供されている¹⁵⁾。

1960年の当初、PAN系炭素繊維^{注9)}の生産が東レによる工業化により大きく進展したことを機に、繊維強化複合材料の関連技術は高性能化と多様化を指向して、大きく舵を切ることとなった。

注9) 工業技術院大阪工業技術試験所の進藤昭男氏による発明(1961)

織高研においても炭素繊維仕様の3D織物製織装置の研究に重点を移し、炭素繊維を損なうことなく高密度に製織することが可能な機構及び部品の設計とその機能の検証に専念した。

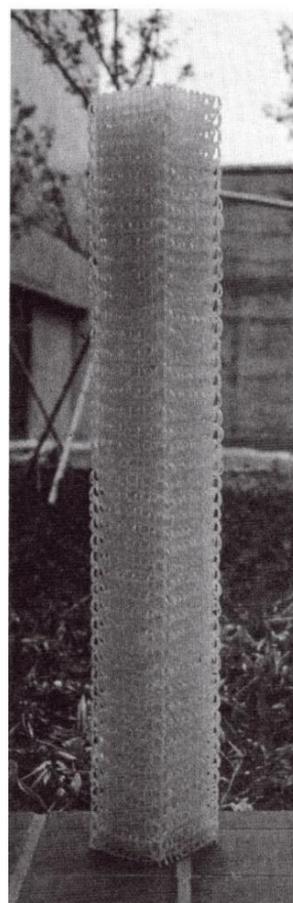


図7 格子状立体複合材料の成形例

時を遇わせて、共同研究「新素材三次元組織体製作技術の研究」が企業3社^{注10)}の協力のもとにスタートした。本共同研究は炭素繊維からなる3D織物の自動製織及び3D織物と樹脂との複合化による材料形成と材料の特性評価を課題として進められた。

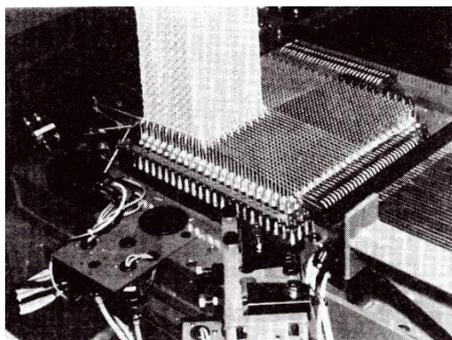


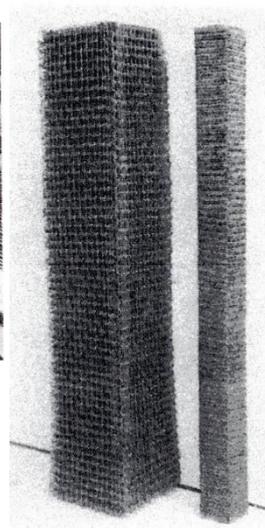
図8 3軸-3D織物自動織機の外観

注10) (株)有沢製作所、三菱電機(株)、(株)豊田自動織機

図8に自動製織装置(試作)の要部^{17)、18)}を示す。装置は垂直糸列間に経糸・緯糸を交互に挿入するレピア法式の挿入機構、経糸及び緯糸の垂直方向の配列密度を高めるための箆打ち機構並びに製織状態検出機構からなり^{18)~22)}、数次の試織実験を経て繊維体積含有率Vfが40%の高密度3D織物の自動製織を可能にした。図9に自動製織による炭素繊維仕様の3軸-3D織物を例示する。

また、3D織物の高密度化、製織速度の高速化、及び織物寸法の大型化など実用装置を指向した装置設計上の有用な資料が得られた。

3D織物を基材とした複合材料においては、材料を構成する組織上のユニット(最小単位)は従来の一次元状及び二次元状織物を素材とした複合材料にして比して大きい。その物性評価に要するテストピースは評価上、多くのユニット数を含む形状であることが必要であり、加えて、測定法に準拠した形状に加工することにより形成される加工面の影響(周辺効果)を加味する必要があることから、テストピースは必然的に大型となる。本研究で試作



L: 直交組織 (Low density)
R: 絡み組織 (High density)

図9 3軸組織立体織物

[Essay] 困炉裏端

卒論のとき“真空ラインを作れない者は、優れた化学者にはなれない”と喝を入れられ、ガラス細工に苦勞した思いがある。機械系の技術者にとっての「真空ライン」は製図と工作であろうか。構想のみで実体がない装置(又は部品)の図面と物が完成した時の感激は格別である。

紡績工場の研究室勤務時に覚えた工作技術が特殊機械の開発に役立っている。新興都市つくばには、一品料理に近い工作の依頼先が少ない。自分で作らなければ遠方の町工場に依頼することになり費用と時間が嵩む。そこで、「昔取った杵柄」ならぬ旋盤・フライス盤を用いた自前の工作となる。自前の工作の方にムダ時間が多いと思われるが、工作中に“新奇”な構想が生まれるなど利とするものも多くある。

困炉裏の灰を均して画いた図がナスカの地上絵に重なるような感じである。

された各装置は実用機を指向したプロトタイプである一方、新材料創出に必須の材料試験用サンプルを得るための重要な試料作製装置でもある。

4-2. 3軸-3D織物の物性の研究^{23), 24)}

3D織物の構成条件が複合材料の力学的性質に及ぼす影響についての研究の一環として、「ロービングの繊維集束数と複合材料の力学的性質の関係」及び「3D織物の組織状況がアブレーション性能^{注11)}に及ぼす効果」を求めた。成果の概要を次に示す。

^{注11)} 空力加熱により生じた熱を遮蔽部分へ吸収させることによって除去すること。熱を吸収することによる蒸発、昇華等の過程において物理的、化学的反応で強固な耐熱・遮蔽層が生ずる。

4-2-1. ロービングの繊維集束数と複合材料の力学的性質の関係

高密度に製織した3軸-3D織物の基材に樹脂を含浸して成形した3D織物方式複合材料(繊維充填率 Vf: 52.6%)と、これと繊維充填率が同程度になるよう面状織物を積層した基材に樹脂を含浸した積層方式複合材料について、材料試験(引張強度、曲げ強度、圧縮強度)を行った。その結果得られた力学的特性に及ぼす複合効果を纏め次記する。

(1) 3D織物の基材としての複合効果は大きく、機械的強度及び弾性率は繊維充填率が同程度の積層方式複合材料のそれに匹敵する値を示す。

(2) 特に、剪断強度^{注12)}において特異な大きさが得られる。

^{注12)} 剪断試験としてショートビーム法、圧縮法を試行した。ショートビーム法ではその変形は曲げ試験の挙動に近く、測定は困難であった。圧縮剪断試験では試験体(試料)に設けたノッチ部の空間が閉ざされ剪断破壊に至らなかった。ノッチ部の空間が閉ざされた時点の値を比較値としたが、3D織物方式複合材料の実際の剪断力は判定値以上である。

(3) 3D織物を基材とした樹脂複合材料の機械的強度及び弾性率は、織物を構成するロービングの繊維本数(集束数 f 値)が3,000f~24,000fの範囲では、3,000fの試料において最も大きく、繊維充填率 Vf が同じ試料でも集束数 f 値が大きくなるほど低下する。

4-2-2. 3D織物の組織状況がアブレーション性能に及ぼす効果

航空宇宙分野においては、例えば、宇宙船の大気圏突入時の高温から船内を守る材料やロケットの燃焼ガスを導くノズルスカートのように、主要部構造を高温から防御するアブレーション性能を発現する材料が重視されている。

炭素繊維を直交組織及び絡み組織に製織した3軸-3D織物にフェノール樹脂を充填して成形した複合材料をアブレーション試験の試料に使用した。酸素・アセチレン燃焼炎(理論燃焼温度 3,000℃)を試料の裁断面に対して放射角 35° で放射した。

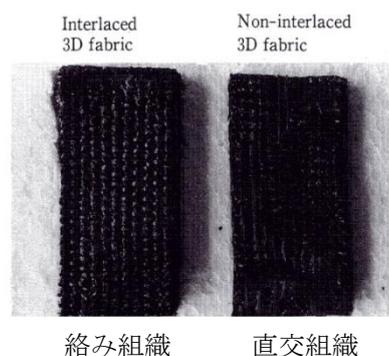


図10 3軸-3D織物を基材とした複合材料のアブレーション効果の比較²⁴⁾

試料面から火炎ノズルの先端までの距離を 70mm~160mm、火炎放射時間を 1 分~2 分間に變化させ、試験体表面の形状變化を觀察した。その結果¹³⁾を次に示す。また、アブレーション実験前後の火炎放射面の状況を図 10 に示す。

- (1) 放射距離 160mm の放射では放射時間 60sec までは直交組織及び絡み組織の基材に變化は殆どなく、アブレーションに対する両基材の差は認められない。120sec までの放射によって、直交組織の基材は表面の広い範囲で纖維が消失し、凹部を形成する。一方、絡み組織の試験体には變化が認められなかった。
- (2) 放射距離 70mm の場合の経過觀察では、60sec までの放射によって直交組織のものには凹部を生じたが、絡み組織の試験体には變化を生じなかった。放射時間が 90sec 以後において、絡み組織の試験体にも凹部を生じたが、その面積は直交組織の試料の凹部の面積に比して小さく、絡み組織の 3 軸-3D 織物を基材とした複合材料は優れたアブレーション性能を示した。

5. ニアネットシェイプの 3D 纖維組織体 (織物・組物)

工業用材料の多くは平板、柱状などの素材から所要の形状と寸法に裁断・切断された中間部材を、最終部品または最終製品に仕上げて使用される。上述した 3 軸-3D 織物の多くも、従来のように中間部材作成の工程を経て最終部品または最終製品に加工されてきた。

一方、ニアネットシェイプ(最終部材形状) 3D 纖維組織体は具体的ニーズに基づいて、纖維状素材を設計通りの状態に賦形した織物・組物であり、最適設計に沿って樹脂等のマトリックスと複合化され最終製品に成形される。

1980 年代に入り、ニアネットシェイプを指向した 3D 纖維組織体の開発例²⁵⁾が散見されるようになってきた。織高研がかかわったニアネットシェイプ関連の開発事例として、ボビンキャリア方式による 3D 組物機構及びパラボラ状 3D 織物について次記する。

5-1. 3D 組物製紐機構 (ボビンキャリア方式)

組ひも (braid) などの製紐動作^{せいちゅう}を基本にして、X、Y、Z 方向または円周方向など多方向に纖維(糸やロービング)が配列し、且つ配列密度の變更と凹凸面の形成が可能な機構の検討を行い、新機構²⁶⁾をまとめた。その基本的動作と主要部の概要を図 11 に示す。ボビンキャリア 1 は垂直方向糸 (z 糸) の挿通孔 3 を有するキャリア軸 2、並びに Z 糸に直交し平面に配列される経方向及び緯方向の糸 (X 糸、Y 糸) を収容したボビン 5 の軸 6 の把持と開放を可能にしたキャリア腕 4 から構成され、そのキャリア腕 4 はキャリア軸 2 の周りを回転でき、且つ、前後左右の回転位置 I、II、III、IV において、対向する他のキャリアとの間でボビン 5 を受渡し

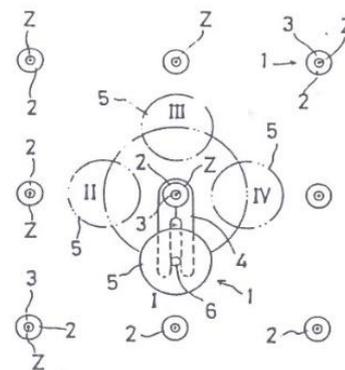
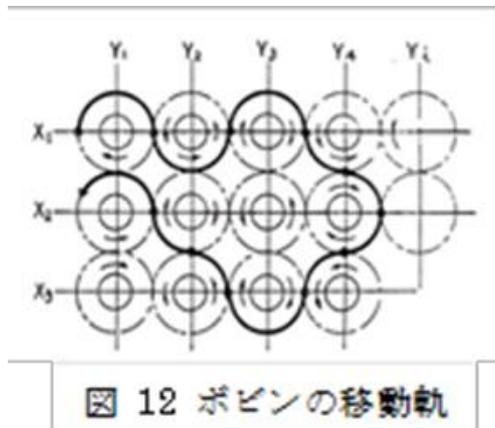


図 11 ボビンキャリア方式の織製動作概要

するように構成されている。キャリアによるボビンの移動に応じて、ボビンから解^{かい}舒^{じょ}された糸が Z 系列間に付設される。ボビン移動の軌跡の例を図 12 に示す。図 13²⁷⁾ に試作した主要部の外観を示す。ボビンキャリア方式の試作装置を使用し、I 型、L 型、環状(円形、角型)の断面形状を賦形するための基本動作(ボビンに所要の走行経路を与えるための動作)について実験を行い、本機構による多様な断面形成機能を確認した。



ローターとキャリアの複数組をまとめた複数基の製紐ユニットを一軸状に対向するよう又は多軸上に移動可能なよう一体化した製紐マルチヘッド機構とし、個々の製紐ユニットを製品(複雑形状を有する繊維組織体)の形状に対応するよう移動・分離・合体させる装置が考えられる。図 14 に製紐マルチヘッド機構の概要を示す。

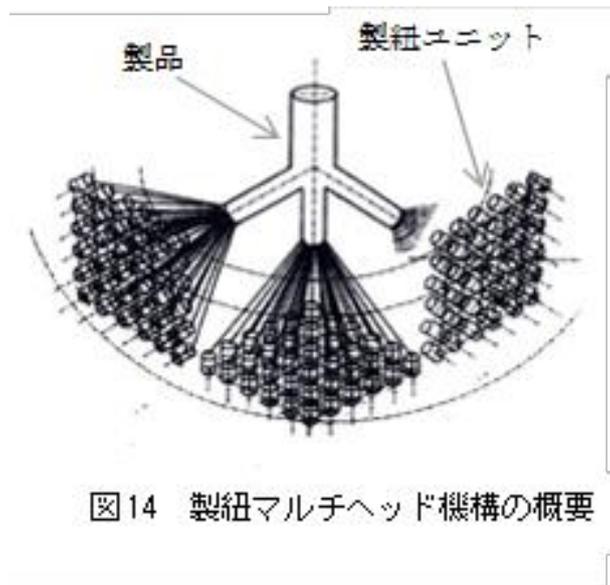


図14 製紐マルチヘッド機構の概要

3D組物の製紐は基本的に複合材料など製品の具体的ニーズに基づいて、その組織と形状(形と大きさ)が一義的に定められる。従って、装置は必然的に特定のニーズを満たす専用機となり、通常の加工機が身上とする多様性の一面が失われがちである。製紐マルチヘッド機構の開発は製紐装置が有する上記のような“負”の機能解消の視点からも重要である。

5-2. パラボラ状3D織物^{28)~33)}

ニアネットシェイプ立体織物の具体的開発事例として、パラボラ状3D織物の試織及び装置試作例^{17), 28), 29)}を示す。以下の研究は三菱電機(株)との共同研究で実施した。

図15にパラボラ状織物の形状と糸配列を示す。織物は中心から放射状に配列した放射

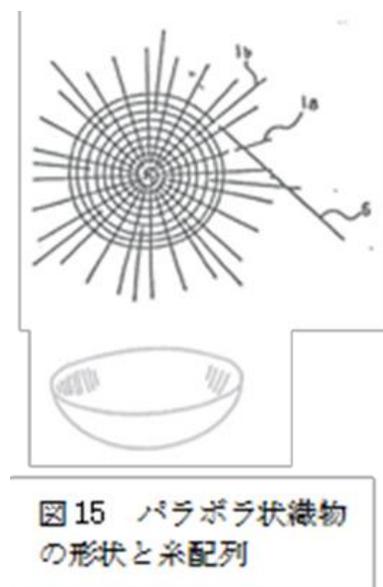


図15 パラボラ状織物の形状と糸配列

方向 1 a, 1b と円周状に配列する円周方向糸 6 から構成される。放射方向糸と円周方向糸は織成動作の進行に合わせて上下の位置を変える球面状金型(モールド)に沿って製織され球面形状に賦形される。

図 16 に試作装置の概要を示す。図において、1 は金型の中央から放射方向に張設された多数の放射方向糸、3 は放射方向糸の糸端を固定しているスピンドルであり、スピンドルは放射方向糸の配列面を介して上下に配置されているスピンドルチャック 2 に開放・保持が可能のように支持されている。織物組織に対応するようスピンドルチャックを上下することにより放射方向糸による開口部を形成する。回転アーム 5 に取り付けられたボビン 7 に収容されている円周方向糸 6 は回転アームが回転することにより放射方向糸の開口部内に付置される。

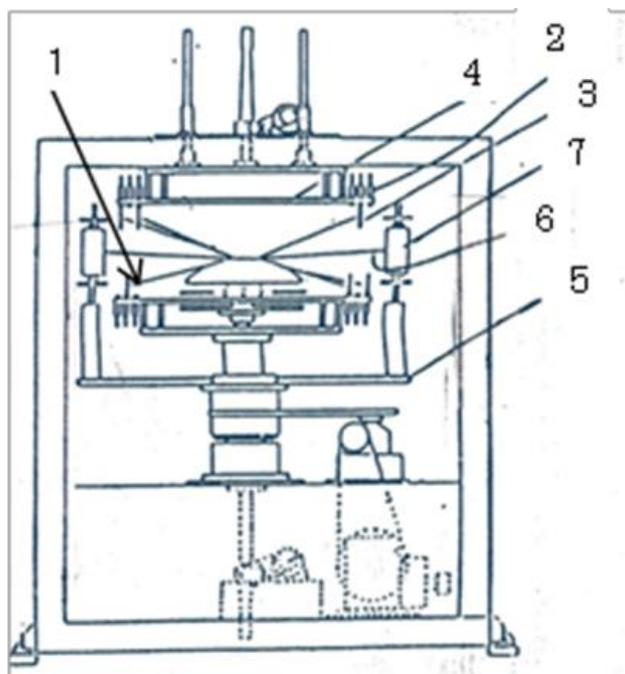


図 16 パラボラ織機の機構

試作装置には箆打ち機構を備えていない。したがって円周方向の糸の配列密度は製織時に糸(ロービング)に与えられる張力に大きく依存する。本装置で所要の糸配列密度と均一性を有する織物を製織するには、製織の進行に合わせた糸の張力管理(制御)を行うことが必須である。本装置による試織実験により、試織過程における糸張力と糸配列密度の関係など製織機能解明の有益な資料を得ることができた。また織物周縁部(所謂、耳部)の処理など製織機能改良上の知見が得られた。図 17 に炭素繊維ロービング(12Kf)を製織したパラボラ状織物の試織例を示す。

この研究では共同研究先の専門的力が大きく発揮された。特に繊維配列が熱膨張率の分布に及ぼす影響の解析では、パラボラ状3D織物を用いて成形した場合の熱膨張率のバラツキは平面織物を用いて成形した場合に比し遙かに小さいことを明らかにするなど、この種の材料開発上の貴重な資料が得られている。図18¹⁷⁾にカーボン繊維のパラボラ状3D織物を作成し、モールド上でエポキシ樹脂を含浸・硬化した成形品(CFRP)を示す。

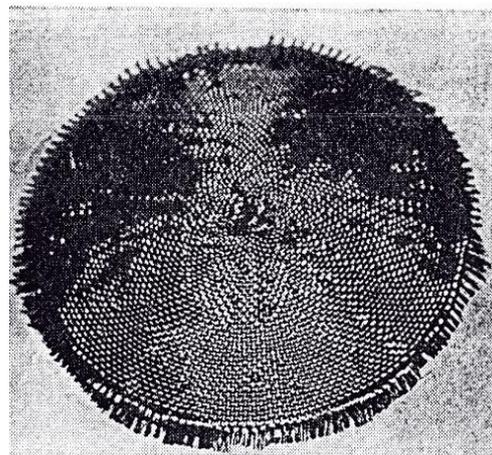


図17 パラボラ状織物の試織例

6. 結びに代えて

本研究の実施に当たっては、多方面からご助言や直言が届いた。3D織物発祥の「所」との声望を頂くほど早期に研究を立ち上げたが、応用開拓のスピードが十分でないことのご指摘^{注13)}があった。この様な刺激も糧に変え、目標達成に努めた。企業との共同研究を組織し、開発・実用化に向けた研究路線を強化した。また、企業への技術指導を通して、これまでに蓄積した技術の開示を

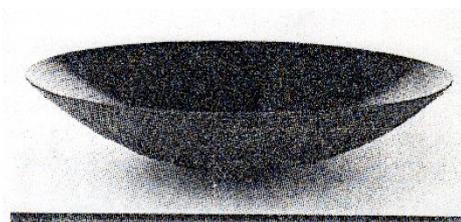


図18 パラボラ状織物を用いた CFRP

積極的に進めた。その効果は3D織機の自動化、パラボラ織機の開発、絡み組織3D織物の建材用基材など、製品化・市場化への活路を開く成果として実った。機を得て、織高研で芽生えた3D織物関連の研究は(株)スリーディコンポリサーチに移行し、冒頭に記したブリファブリケーション技術開発及び複合材料技術開発の課題解決に当たることになった。

3D織物や組物の製作、特に組物の製紐には、最終製品の要求性能に応じた繊維配列のための組織化に加えて、最終製品に合った立体的賦形を直接得ることが求められている。ロータキャリア方式を用いたマルチヘッダー機構はこの要求にこたえる有望な手段と考えられる。(株)スリーディコンポリサーチの開発による立体布織機(付図2参照)は世界に誇れる多様な製紐機能を有している。この装置に搭載のローターキャリアユニット方式をマルチヘッダーの製紐機構に活用することにより、材料設計に沿った繊維配列と形状賦形が可能な3D組物装置の真の姿が現れると考えられる。

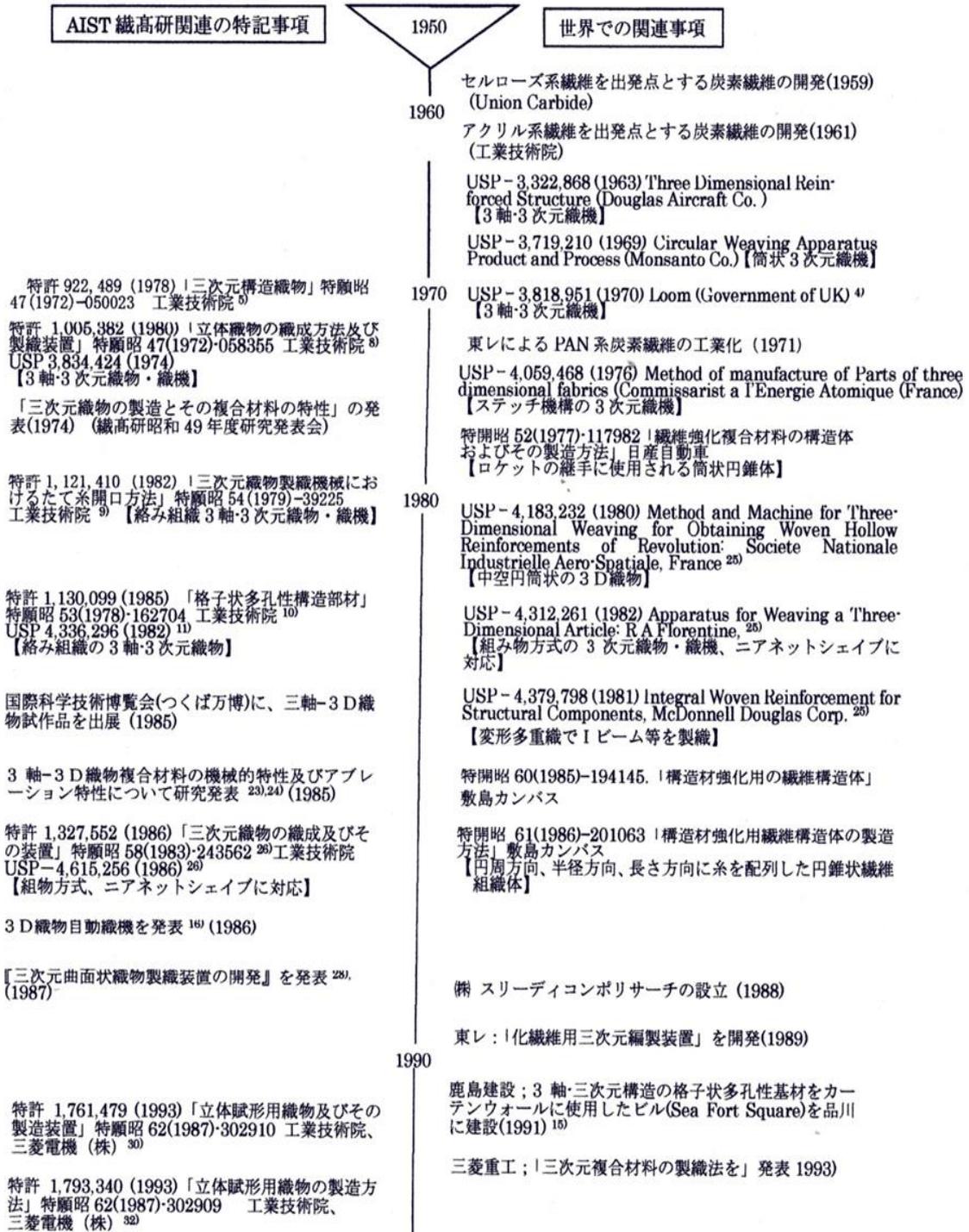
3D織物・組物を基材とする複合材料は繊維とその組織及びマトリックスを選定することにより、宇宙・航空機器、陸上輸送機器、陸上・海洋構造物、更にはエネルギー関連機器など、広範囲な産業機器の分野における技術革新のトリガーとなることを期待する次第である。

^{注13)}「複合材料の設計を支援する織物技術」日経ニューマテリアル No. 80 (1990) PP. 98-105.

[付表 1]

3 D織物・組物及び装置関連技術開発の軌跡

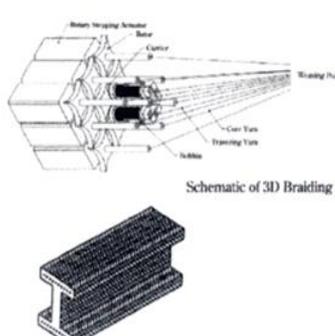
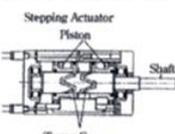
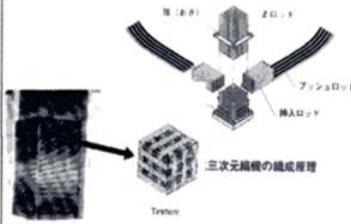
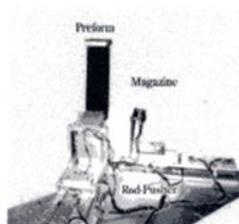
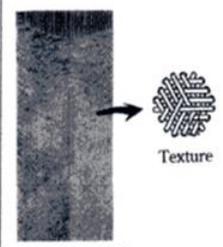
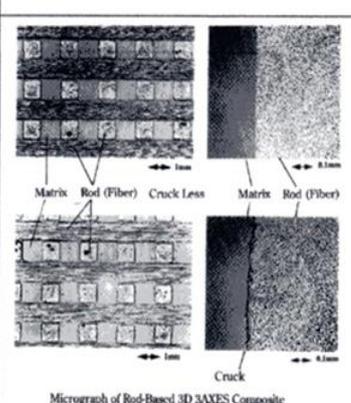
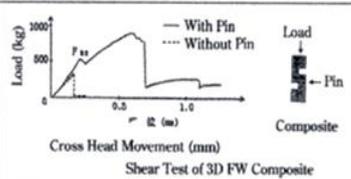
[表中の補注(小さな数字)は本文の参考文献を参照のこと]



【付表2】

株式会社スリーディコンポリサーチ*の研究成果の概要

*1988年3月設立～1994年9月解散；この間の特許出願92件、学会発表49件、研究報告140件

	主な成果の概要		装置例
立体 布 織 機	 <p>Schematic of 3D Braiding</p>	<p>生紐部に配置した多数のローターが互いに隣のローターをガイドとして交互に逆方向に回転し、ローター間に挟まれたキャリア上の糸が立体形状に製紐される。製紐途中の組物の断面形状の変化も可能で、複雑な形状と高いVfを実現。</p> <p>【ロータリーステッピングアクチュエータ】 ローターを定角、左右可逆で高速に回転させる空気圧縮器</p> 	 <p>自動3D編み機</p>
三軸 3 次元 織 機	 <p>3D 3AXES Preform</p>	<p>繊維を樹脂で成形固化したロッドを直交3軸の組織体に織りあげる。マガジン内に収納したロッドプッシャーを使って多数同時に差し込むことにより効率よくブロック状のプリフォームが得られる。</p>	 <p>3D 3AXES Weaving Equipment</p>
四軸 3 次元 織 機	 <p>3D 4AXES Preform</p>	<p>ロッド方式の織機で直交4軸の組織のブロック状のプリフォームが得られる。Vfは50%程度が可能。</p>	 <p>3D 4AXES Weaving Equipment</p>
無欠 陥 成 形 技 術	 <p>Micrograph of Rod-Based 3D 3AXES Composite</p>	<p>三次元組織で拘束された厚肉の織物は樹脂の含浸が難しく、成形した複合材料にポイドを作り、また高い残留応力は繊維と樹脂の界面にクラックを生じて欠陥の原因となる。</p> <p>プリフォームの含浸抵抗、成形過程の樹脂の膨張・収縮問題を詳しく調べ、各プリフォームに適した無欠陥成形技術と大型成形装置を開発した。</p>	
物性 評価 と 解 析	 <p>Shear Test of 3D FW Composite</p>	<p>大型成形品で三次元織物複合材料の物性を測定した例は殆どない。</p> <p>上記のような方法で成形したサンプルを使って測定法を検討し、物性を評価した。機械的、熱的特性を測定し組織と物性の関係を解析した。左図；三次元フィラメントワインディングの基材*を用いた複合材料の例</p>	<p>*三次元フィラメントワインディングの基材：通常的方式でマンドレル上に繊維を巻き付け、これに樹脂成型したロッドを放射状に所要の間隔で差し込んだ三次元基材 (Vf:50%程度)。</p>

参考文献

- 1) 福多健二：日本複合材料学会誌, Vol.21 No.2 (1995), pp. 51-60
- 2) 福多健二、小野岡竜三、青木栄次、長塚惟宏； 日本繊維機械学会 第13回繊維工学研究シンポジウム (1984)
- 3) Tsu-Wei Chou and Frank K. Ko. Textile Structural Composites. P.133
ELSEVIER (1989)
- 4) U.S. Patent 3,818,951(1970)：“Loom”, Kurt Greenwood, England, assignor to The Secretary of State for Defence, U.K. 特願昭 45(1970)-104968、特公昭 51(1976)-14624
- 5) 特許 922489(1978)「三次元構造織物」特願昭 47(1972)-050023 工業技術院
- 6) 特許 933637(1978)「三次元織物の織成形用糸ガイド」特願昭 48(1973)-057571 工業技術院
- 7) 特許 933639(1978)「三次元織物の製織装置」特願昭 48(1973)-059095 工業技術院
- 8) 特許 1,005,382 (1980)「立体織物の織成方法及び製織装置」特願昭 47(1972)-058355 工業技術院
U.S. Patent-3,834,424 (1974): AIST
- 9) 特許 1,121,410 (1982)「三次元織物製織機械におけるたて糸開口方法」特願昭 54(1979)-39225 工業技術院
- 1 0) 特許 1,130,099 (1983)「格子状多孔性構造部材」特願昭 53(1978)-162704 工業技術院
- 1 1) U.S. Patent-4,336,296 (1982) “Three-Dimensionally Latticed Flexible-Structure Composite” AIST
- 1 2) 特許 1,730,158 (1993)「絡み組織三次元織物及びその製織方法」特願昭 62(1987)-181946 工業技術院、(株)有沢製作所
- 1 3) 福多健二：TRIGGER 第3巻 第6号 通巻19号 (1986) p.62-63
- 1 4) 福多健二：強化プラスチック、Vol.26 No.11 (1980) pp.473-482
- 1 5) 秋浜繁幸、末永龍夫、中川裕章、谷口可一、依田和久：日本複合材料学会誌 Vol.18 No.1 (1992) pp.45-47
- 1 6) 福多健二、多田義雄、穴原明司、村山邦彦：「3D織物自動製織装置の開発」第2回先端材料技術シンポジウム論文集 (1986), pp. 32-35
- 1 7) 村山邦彦、八田博志：日本複合材料学会誌、Vol.15 No.1 (1989) pp.10-17
- 1 8) 特許 2,071,882 (1996)「三次元構造織物」特願昭 62 (1987)-199274 工業技術院
- 1 9) 特許 2,507,877 (1996)「三次元織物の耳形成装置」特願昭 62(1987)-069474 工業技術院
- 2 0) 特許 2,507,878 (1996)「三次元織機の耳糸挿入方法」特願昭 62(1987)-200342 工業技術院
- 2 1) 特許 2,507,879 (1996)「三次元織機の箆打ち装置」特願昭 62(1987)-200343 工業技術院
- 2 2) 特許 2,071,879 (1996)「三次元織機の開口装置」特願昭 62(1987)-030824 工業技術院
- 2 3) 福多健二、北野武(他)：「三次元織物の組織と複合効果」昭和60年度繊維高分子材料研究所研究発表会資料 No.152(1985) pp.87-98
- 2 4) 福多健二(牧 廣)：次世代複合材料技術ハンドブック 日本規格協会 (1990) pp.134-150
- 2 5) 例えば、U.S. Patent 4,183,232(1980)：Societe Nationale Industrielle Aero-Spatiale、U.S. Patent 4,312,261 (1980)：Robert A. Florentine、U.S. Patent 4,379,798 (1981)：Mc Donnell Douglas Corporation
- 2 6) 特許 1,327,552 (1986)「三次元織物の織成方法及びその装置」特願昭 58(1983)-243562 工業技術院、
特許 1,389519 (1987)「三次元繊維組織体の織成方法及びその装置」特願昭 59(1984)-056547 工業技術院、

- U.S. Patent 4,615,256 (1986) “Method for Formation of Three-Dimensional Woven Fabric and Apparatus Therefor.” AIST
- 27) 福多健二：第4回次世代産業基盤技術シンポジウム 金属・複合材料技術予稿集 (1986) pp.221-230
- 28) 福多健二、村山邦彦、八田博志：「三次元曲面状織物製織装置の開発」第11回繊維連合研究発表会 研究発表論文集(1987) pp.105-106
- 29) 八田博志、広嶋 登、村山邦彦、福多健二：「立体形状布複合材料の熱機械的特性」第3回先端材料技術シンポジウム 論文集 (1987), pp.32-35
- 30) 特許 1,761,479 (1993) 「立体賦形用織物及びその製造方法」特願昭 62(1987)-302910 工業技術院、三菱電機 (株)
- 31) U.S. Patent 5,070,914 (1991) “Triaxial Fabric of Interlaced Oblique Yarns” Mitsubishi Denki Kabushiki Kaisha & AIST
- 32) 特許 1,793,340 (1993) 「立体賦形用織物及びその製造方法」特願昭 62(1987)-302909 工業技術院、三菱電機 (株)
- 33) U.S. Patent 4,938,270 (1990) “Spherical Cloth weaving Machine with Shuttle Chucks” Mitsubishi Denki Kabushiki Kaisha & AIST

著者略歴

- 学 歴： 福井大学工学部 紡織学科卒業 (1954年)
- 職 歴： 石川繊維株式会社 金沢工場研究室勤務 (1954年) ~ 退社 (1958年)
通産省 工業技術院 繊維工業試験所(織高研の前身)に入所 (1958年)
~ 退所 (1988年) この間、主として繊維加工(紡織)に係る革新装置の開発に従事
株式会社スリーディコンポリサーチに入社 (1988年) ~ 退社 (1994年)
技術士事務所 つくば繊維技研 (代表) (1994年 ~)
- 表 彰： 市村賞受賞[アイディア賞] (1973年)
科学技術長官賞受賞 (1982年)
先端材料技術協会(SAMPE Japan) 功績賞受賞(2002年)

受理日：2016年4月30日