

環境対策技術としての複合材料の開発と評価

圖 子 博 昭

平成17年度 学位論文

環境対策技術としての複合材料の開発と評価

指導教員 高橋 淳 助教授

平成17年12月

東京大学

大学院工学系研究科環境海洋工学専攻

圖子博昭

Dissertation 2005

Development and Evaluation of Advanced Composite
Materials to Solve an Environmental Issue

December, 2005

Department of Environmental and Ocean Engineering

The University of Tokyo

Hiroaki ZUSHI

論 文 要 旨

論文題目 環境対策技術としての複合材料の開発と評価

氏 名 圖子 博昭

(本文) 現在, 地球は環境問題とエネルギー問題という 2 つの大きな問題をかかえている。石油消費をおさえかつ環境問題を解決するには, 全体的なエネルギー需要構造からみても運輸部門の対策が不可欠で, そのためには先進軽量複合材料による乗用車の軽量化が有効である。

日欧米で研究開発競争が進む, 樹脂系炭素繊維複合材料 (以下, CFRP) は, その超軽量性から, 高い比強度/比剛性を有する先進軽量素材である。また, 鋼等金属材料に比して疲労特性に優れている。これらのことから, CFRP はこれまで航空宇宙分野やスポーツ分野で使用されてきた。しかしながら, 従来の CFRP は軽量/高強度な反面, 地球環境に対する負荷の大きさ (製造時のエネルギー消費量), 成形速度, 価格に問題があり, 環境配慮および量産, 低コストが重要視される現代の産業ニーズに応えられず, 一般的な用途としては普及しなかった。

その中であって, 熱可塑性樹脂系炭素繊維複合材料 (以下, 熱可塑性 CFRP) は, 高い量産化適応性 (製造エネルギー消費の低減 (省エネ), 成形時間の短縮, 材料/成形コストの削減等の効果), 4R 性 (リユース・リペア・リデュース・リサイクルの可能性) が期待でき, 従来の CFRP で普及のあしかせとなっていた問題点を解決できる。

加えて, 熱可塑性 CFRP は従来の CFRP よりも軽量であり, 鉄鋼に比べおよそ 1/6 の重さであり, 強度/剛性不足をデザイン的に補ってもなお鉄鋼製品の軽量化が図れる。

しかし, これまでの熱可塑性 CFRP の研究では, 量産化適応性や 4R 性に目を向けられたものではなく, 耐熱性や衝撃吸収性に関する研究が主であり, 高品質なスーパーエンジニアリングプラスチックや特殊エンジニアリングプラスチックを母材に用いるものがほとんどであり, 汎用プラスチックの研究は少ない。その汎用プラスチックの炭素繊維強化に関する研究では, ほとんどが射出成形品 (小型・中型成形品) 粒子強化, フィラー強化, 短繊維強化の議論しかなく, 連続炭素繊維強化の汎用プラスチックに関する (少なくとも, 成形法や成形速度, リサイクル性に目を向けた) 知見はほとんどみられない。(ここまで【第 1 章】)

鉄鋼製品のうち, その日常的な使用でエネルギー消費に直接的に結びついているものは, 乗用車であろう。現在の世界の乗用車保有台数は約 5 億台であり, 本研究にもあるロジスティック関数を用いて仮に有力経済新興国である BRICs (ブラジル・ロシア

ア・インド・中国)が先進国のたどった歴史の通りに成長したらどうなるか予測すると、中国の成長だけで、世界の乗用車保有台数は倍増し、さらにその他の国々の影響も考えると、今の4~5倍の乗用車を地球は保有することになる。すると、世界のエネルギーの手当ではどう工面してゆけばいいのかが問題になるが、それを議論する前にエネルギー需給の構造分析および乗用車保有台数が増加した場合のエネルギー消費量増加の見積もりを行うことは大変重要である。(ここまで【第2章】および【第3章】)

乗用車に使用されている材料のうち、約8割が金属材料で、そのうちの8割が鉄鋼である。現在は、アルミ合金化による軽量化が検討されてきており、金属材料の構成割合は変わってきているが、構造の適材適所に役割に合った金属を使用しても、乗用車が金属材料でつくられている限りは、大きな軽量化は望めない。本研究では、乗用車の実際の構造へ熱可塑性CFRPが適用されていった場合に、どれほどの軽量化率がのぞめるか具体的に示しており、この検討によって、抜本的な乗用車軽量化実現のためには、大物成形品までカバーできる連続炭素繊維強化の熱可塑性CFRPが必要であることがわかった。(【第4章】)

実際の技術開発では、熱可塑性樹脂として、汎用性にとみ、熱可塑性の中で一番軽量かつ、リサイクル容易なオレフィン系ポリマーである、ポリプロピレンを用いた。しかしながら、ポリプロピレンは非極性の樹脂で、そのまま複合すると炭素繊維との界面接着特性の悪さから、所定の力学特性を得られないというのが常識で、ゆえに炭素繊維強化ポリプロピレンは構造材料としてみた場合に現実的ではないとされてきた。本研究では、無水マレイン基導入によるポリプロピレンの極性化、結晶化度制御や、繊維の湿式解繊および改質などの成形技術的な工夫をはかり、この力学特性の改善に努めた。評価は、3点曲げ試験、アイゾット衝撃試験および引張疲労試験により連続繊維強化一方向材の基本的特性を取得することで行った。また同時に、ILSS試験およびDNS試験による層間せん断強度やAE法による破壊挙動の計測、SEMによる破面観察等を通じて、界面接着特性の定量的評価および定性的考察も加えた。その結果、本手法で開発された炭素繊維強化ポリプロピレンは、乗用車構造へ適用可能な物性まであと一歩のところまで改善できたことを確認した。(【第5章】)

次に本材料のリサイクル性を調べた。4種類の熱可塑性樹脂(ポリプロピレン、ポリアクリロニトリルブタジエンスチレン、ポリエチレンテレフタレート、ポリカーボネート)で、リサイクル材を想定した不連続繊維強化の熱可塑性CFRPを作製し、それを破砕、混練し、コンパウンドをプレス成形することで評価した。評価には、3点曲げ試験が採用された。ポリプロピレンは総合的に判断して、CFRPリサイクルに適したマトリックスであると結論づけられた。つぎに、不連続炭素繊維強化ポリプロピレンについてその基本的特性を、3点曲げ試験、アイゾット衝撃試験、引張疲労試験を通じて取得した。理論的には、第5章で示されたフレッシュ材の1/3程度の強度、弾性率が発現するはずであるが、その半分、1/6程度しか発現しなかった。原因としては、その成形法(特に

混練により繊維が折損、湾曲することによる影響)にあると考えられる。また、本研究であらたに見出された補強リペア法についても検討を行った。損傷を受けた材料として、この1/6程度しか発現しなかったリサイクル材を用いた。炭素繊維強化ポリプロピレンの薄いシートを部材の両スキんにヒートフュージョンにより貼り付けるこの補強法によって、力学特性は改善されることがわかり、また、全面に貼り付けることで、変形でストックされた静的なひずみエネルギーをうまく開放させることにつながることをわかり、衝撃時のエネルギー吸収特性に対しても同様の効果が期待できる。(【第6章】)

実際に、本材料が、効率的段階的に乗用車に導入されたときの効果を、IEAの予測データに基づくもの、本研究室で推奨する途上国モーターゼーションの効果を入れたロジスティック予測データに基づくものとの比較した。この効果予測から、軽量化は即効的な対策であり、約4割の省エネが期待できると予想され、早急に本技術を先進国で推進、開発し、途上国へ流動的に伝えてゆくことの有効性が示された。さらに、WTW分析を用い、パワープラントが変化した場合の乗用車のエネルギー消費量の低減によるシミュレーションも行い、約8割の省エネを達成することができ、本車体軽量化技術はこれらの技術と協調していくべきであると結論付けられた。(【第7章】)

論文要旨	i
目 次	iv
図表番号	x
実施試験一覧	xvii
第1章 序 論	1
1-1 研究の背景	1
1-1-1 地球温暖化（環境問題）	1
1-1-2 石油依存型社会の終焉（エネルギー問題）	2
1-1-3 B R I C s の成長	6
1-1-3-1 PPP（購買力平価）-GDP（国内総生産）による比較	6
1-1-3-2 PPP-GNI（国民総所得）による比較	11
1-2 本研究の目的	14
1-3 熱可塑性CFRPに関する従来研究	15
1-4 本論文の構成	16
第1章で引用した文献等	19
第2章 材料の環境配慮と4R	20
2-1 緒 言	20
2-2 人類のあゆみ	20
2-2-1 産業革命	20
2-2-2 プラザ合意	22
2-2-3 現況（石油価格の高騰）	23
2-2-4 環境問題は「環」	25
2-3 エネルギー消費構造分析	25
2-3-1 世界における地域ごとの一人当たりエネルギー需給	25
2-3-2 部門別消費エネルギー	27
2-3-2-1 部門別・エネルギー源別消費エネルギー	27
2-3-2-2 部門ごとの省エネポテンシャルと難易度	27
2-4 注目される有力新興国B R I C s の成長	30
2-4-1 GDPの推移	31

2-4-2	人口推移予測	33
2-4-3	エネルギー消費推移予測	36
2-4-3-1	IEAによるエネルギー消費推移予測	36
2-4-3-2	IPCCによるエネルギー消費推移予測	39
2-5	乗用車保有台数の成長（「成長の限界」に学ぶ）	41
2-6	現在の乗用車に関連する環境・省エネ技術開発	42
2-6-1	内燃機関を改善する技術	42
2-6-1-1	乗用車の内燃機関の効率向上	42
2-6-1-2	内燃機関の効率の考え方	42
2-6-1-3	原動機別エネルギー効率とCO ₂ 排出量	42
2-6-1-4	普及の展望	44
2-6-2	乗用車軽量化技術	45
2-7	材料4Rについて	49
2-8	新材料に求められる要求項目	50
2-9	熱可塑性CFRPという選択	51
2-10	ポリプロピレンについて	52
2-11	結 言	53
第2章で引用した文献等		54
第3章 有力新興国・中国のモーターゼーション		56
3-1	結 言	56
3-2	成長の基本形（ロジスティック曲線）	56
3-3	関連統計量分析	57
3-3-1	日本の統計量へのロジスティック関数のあてはめ	57
3-3-2	予想成長曲線	59
3-4	成長に伴CO ₂ 排出量およびエネルギー消費量の増加	61
3-5	対策案	64
3-6	必須な技術開発の整理	64
3-7	結 言	65
第3章で引用した文献等		66
第4章 乗用車の軽量化		67
4-1	結 言	67
4-2	乗用車という製品	67
4-3	乗用車の構造部材と強度部材（各構造指標について）	68
4-4	連続繊維強化と短繊維強化	71

4-5	乗用車へのFRP適用段階（パーツからフルモノコックまで）	74
4-5-1	乗用車車体構造の変遷	74
4-5-2	車体アルミ化の変遷	74
4-5-3	さらなる軽量化を目指して	76
4-6	軽量基礎素材の比強度・比剛性の比較	79
4-7	乗用車の環境配慮の検討（LCA）	79
4-8	炭素繊維強化ポリプロピレンへの期待	80
4-9	結 言	86
	第4章で引用した文献等	88
	第5章 CFRPPフレッシュ0°材の開発と力学特性評価	89
5-1	緒 言	89
5-2	アイソタクチックポリプロピレンについて	93
5-3	CFRPPフレッシュ0°材の高性能化（5つの工夫）	96
5-3-1	わずか0.3mm厚の極薄CFRPPシートの開発	96
5-3-2	無水マレイン酸添加によるマトリックスの変性	100
5-3-3	湿式解繊法による解繊と表面改質 （サイジングトリートメントの除去）	103
5-3-4	高MFR（高流動性）PPの使用	103
5-3-5	結晶化制御による接着性の改善	105
5-4	3点曲げ試験およびアイゾット衝撃試験	110
5-4-1	試 料	110
5-4-2	成 形	110
5-4-3	アニーリング条件	113
5-4-4	評価項目	113
5-4-4-1	MFRの違いと炭素繊維解繊の影響	113
5-4-4-2	加工条件とアニーリングの影響	113
5-4-5	試 験	115
5-4-5-1	3点曲げ試験	115
5-4-5-2	アイゾット衝撃試験	115
5-4-6	結 果	115
5-4-6-1	MFRとサイジングトリートメントの影響	115
5-4-6-2	加工条件の影響	119
5-5	引張疲労試験	120
5-5-1	複合材料の疲労特性	120
5-5-2	試 料	121

5-5-3	成 形	121
5-5-4	試 験	122
5-5-5	結 果	124
5-5-6	考 察	125
5-6	結 言	126
第5章で引用した文献等		128
第6章	CFRPの4R技術開発と力学特性評価	130
6-1	緒 言	130
6-2	リサイクルの必要性	131
6-3	熱硬化性CFRPと熱可塑性CFRPの想定されるリサイクルパス	132
6-3-1	熱硬化性CFRPを再利用する	132
6-3-2	熱可塑性CFRPを再利用する	133
6-4	リサイクル手法の検討	135
6-5	ブレードスクリュ混練法 (ラボプラストミルによる コンパウンドの作製)	135
6-6	リサイクルに適したマトリックスの検討	138
6-6-1	試 料	138
6-6-2	成 形	139
6-6-3	試 験	139
6-6-4	結 果	140
6-6-5	考 察	140
6-6-6	ま と め	141
6-7	不連続繊維強化CF/PPの力学特性評価	144
6-7-1	試 料	144
6-7-2	成 形	145
6-7-3	試 験	145
6-7-4	結 果	146
6-7-5	考 察	148
6-8	一方向CF/PPシート補強ハイブリッドCFRPの力学特性評価	148
6-8-1	試 料	149
6-8-2	成 形	150
6-8-3	試 験	150
6-8-4	結 果	151
6-8-4-1	引張試験	151
6-8-4-2	3点曲げ試験	151

6-8-4-3 曲げ疲労試験	153
6-8-5 考 察	154
6-9 結 言	155
第6章で引用した文献等	157
第7章 効果試算	158
7-1 緒 言	158
7-2 IEAの公表データをもとにした効果予測	158
7-3 ロジスティック関数による予測にもとづく予測	161
7-4 軽量化とパワープラント技術革新の相乗効果	164
7-4-1 WTW (Well to Wheel) 分析の取り込み	164
7-4-2 WTW分析も反映した予測例 (中国および世界について)	165
7-5 結 言	167
第7章で引用した文献等	169
第8章 結 論	170
補 遺 A	
定性的な結晶化度上昇確認のためのXRD (X線回折装置) による分析	173
A-1 はじめに	173
A-2 PP単体のXRD分析	173
A-3 フレッシュ0°材のXRD分析	174
A-4 おわりに	174
補遺Aで引用した文献等	177
補 遺 B	
ペレタイズを主眼とした射出成形用スクリーレス混練装置の開発	178
B-1 はじめに	178
B-2 スクリータイプ混練機による検討	179
B-3 ノンスクリー・スタンドタイプ混練機の開発	180
B-4 新提案の混練機による混練試験結果	184
B-5 おわりに	184
補遺Bで引用した文献等	184

補 遺 C

連続繊維強化ポリプロピレン0°材の層間せん断強度	185
C-1 はじめに	185
C-2 ショートビーム法による3点曲げ破壊特性	186
C-3 ILS S試験（見かけの層間せん断強度）	189
C-4 DNS試験（目違い切欠き圧縮せん断強度）	191
C-5 おわりに	193
補遺Cで引用した文献等	194

補 遺 D

AE法による引張破壊挙動の計測	195
D-1 はじめに	195
D-2 AE法とは	195
D-3 AE法によるCFRPPの引張破壊挙動	195
D-4 SEM（電子顕微鏡）による破面観察	198
D-5 おわりに	200
補遺Dで引用した文献等	200
添付資料： AE計測のデータ集	201

謝 辞	205
論文目録	206

LIST FOR FIGURES AND TABLES

Chapter 1	
Fig. 1.1	<i>Contribution of green house gases (GHG) to global warming.</i>
Fig. 1.2	<i>Construction of primary energy consumption in the world.</i>
Fig. 1.3	<i>Evolution of total primary energy supply by IEA.</i>
Fig. 1.4	<i>Evolution of final energy consumption by sector.</i>
Fig. 1.5	<i>Sectional final energy consumption.</i>
Fig. 1.6	<i>Reserve-production ratio and geographical distribution of energy resources (Oil, Natural Gas and Coal).</i>
Fig. 1.7	<i>Changing of Gross Domestic Product calculated using atlas method (GDP) and GDP calculated using purchasing power parities (PPP-GDP) in each country.</i>
Fig. 1.8	<i>Comparison of present conditions by Gross Domestic Product calculated using purchasing power parities in each country.</i>
-a	<i>Population</i>
-b	<i>Surface Area</i>
-c	<i>Forest Area</i>
-d	<i>Primary Energy Use per capita</i>
-e	<i>CO₂ emission per capita</i>
Fig. 1.9	<i>Comparison with Gross National Income calculated using atlas method (GNI) and per capita and GNI calculated using purchasing power parities (PPP-GNI) in each country.</i>
Fig. 1.10	<i>Comparison of present conditions by Gross National Income calculated using purchasing power parities per capita in each country.</i>
-a	<i>Population</i>
-b	<i>Primary Energy Use per capita</i>
-c	<i>CO₂ emission per capita</i>
Table 1.1	<i>Correspondence with each chapter and my research achievements.</i>
Chapter 2	
Fig. 2.1	<i>Carbon dioxide concentration in the atmosphere.</i>
Fig. 2.2	<i>World industrial production.</i>
Fig. 2.3	<i>Changing of oil costs.</i>
Fig. 2.4	<i>Changing of long term oil costs (US\$/barrel and JPY/litter base).</i>

Fig. 2.5	<i>Amount of total primary energy supply and final energy consumption in each sector per capita.</i>
Fig. 2.6	<i>Energy consumption rate in each sectors in the world.</i>
Fig. 2.7	<i>Construction of energy consumption in Japanese transport sector.</i>
Fig. 2.8	<i>Shift of energy consumption in Japanese each sectors.</i>
Fig. 2.9	<i>Gross National Income per capita in BRICs, Japan and United States, and World Average of GNI per capita.</i>
Fig. 2.10	<i>Shift of GDP in BRICs.</i>
Fig. 2.11	<i>Comparison of energy efficiency with advanced nations and China.</i>
Fig. 2.12	<i>Shift of World population.</i>
Fig. 2.13	<i>History of World population.</i>
Fig. 2.14	<i>Prediction of World population growth.</i>
Fig. 2.15	<i>Growth in more, less developed countries.</i>
Fig. 2.16	<i>Prediction of energy consumption in each area by IEA.</i>
Fig. 2.17	<i>Prediction of energy resources construction in each sector by IEA.</i>
Fig. 2.18	<i>Prediction of energy consumption in major 4 scenarios by IPCC.</i>
Fig. 2.19	<i>Fuel efficiency performance by fuel cycle (about energy consumption).</i>
Fig. 2.20	<i>CO₂ emission by fuel cycle.</i>
Fig. 2.21	<i>Steel market conditions in Japan.</i>
Fig. 2.22	<i>Steel production and consumption in the World.</i>
Fig. 2.23	<i>World aluminum market conditions.</i>
Table 2.1	<i>Example of research and development on engine technology.</i>
Table 2.2	<i>Comparison of the performance with high-density polyethylene and isotactic polypropylene.</i>
Chapter 3	
Fig. 3.1	<i>Shape of logistic function, $f(t)$.</i>
Fig. 3.2	<i>Shift of the number of automobiles in U. S., Japan, Italy and France per 1,000 people.</i>
Fig. 3.3	<i>Logistic approximation for Japanese statistics data.</i>
Fig. 3.4	<i>Relationship of GDP per capita, number of automobile per 1,000 people and population density in each countries.</i>
Fig. 3.5	<i>Prediction of the number of automobiles per 1,000 people in China.</i>
Fig. 3.6	<i>Prediction of Chinese motorization.</i>
Fig. 3.7	<i>Prediction of the amount of annual CO₂ emission by the automobiles</i>

	<i>in China.</i>
Fig. 3.8	<i>Prediction of the annual energy consumption growth due to increasing automobiles in China.</i>
Table 3.1	<i>Prediction of Chinese population growth by U.N.</i>
Table 3.2	<i>Result of logistic approximation to the number of automobile statistics in each countries.</i>
<hr/>	
Chapter 4	
Fig. 4.1	<i>Energy consumption construction of automobile.</i>
Fig. 4.2	<i>Photograph of Ferrari 360 Modena and it's space frame structures.</i>
Fig. 4.3	<i>Suggestion for lightening automobile fabrication by using carbon fiber reinforced thermoplastic.</i>
Fig. 4.4	<i>Comparison of each structural materials with the specific strength and the specific rigidity.</i>
Fig. 4.5	<i>Influence and comparison of the structural index related the flexural stiffness by the fiber volume fraction of each CFRTPs.</i>
Fig. 4.6	<i>Influence and comparison of the weight ratio of CFRTP and Steel panel by the fiber volume fraction of each CFRTPs.</i>
Fig. 4.7	<i>Influence and comparison of the thickness ratio of CFRTP and Steel panel by the fiber volume fraction of each CFRTPs.</i>
Fig. 4.8	<i>Lightweight steps of a passenger vehicle by using CFRP.</i>
Fig. 4.9	<i>Changing to the reduction of life cycle energy consumption of a passenger vehicle, in case of lightening the passenger vehicle by using CFRTPS and CFRTP.</i>
Table 4.1	<i>Structural indexes on each materials.</i>
Table 4.2	<i>Major Fabrication Process of Fiber Reinforced Plastics.</i>
Table 4.3	<i>Fabrication process limitation.</i>
Table 4.4	<i>Principal considerations for using each processes (remove COM).</i>
Table 4.5	<i>Fabrication of composite products by using continuous fiber and discontinuous fiber.</i>
<hr/>	
Chapter 5	
Fig. 5.1	<i>Comparison of energy intensity with Steel, CFRP and CFRPP products.</i>
Fig. 5.2	<i>Chemical structure of propylene and polypropylene.</i>
Fig. 5.3	<i>Structural pattern of polypropylene.</i>
Fig. 5.4	<i>Molding method of thin CFRPP sheet.</i>

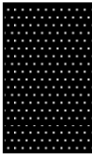
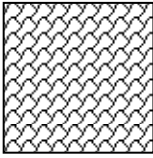
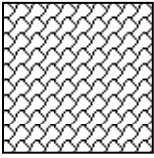
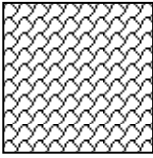
Fig. 5.5-1	<i>Photograph of STEP 1 to STEP 2 process in the molding.</i>
Fig. 5.5-2	<i>Photograph of STEP 3 to FINISH in the molding.</i>
Fig. 5.6	<i>Possible interfacial bonding after maleic anhydride modification.</i>
Fig. 5.7	<i>Observation on the fracture surfaces of each samples molded by the different process condition using SEM.</i>
Fig. 5.8-1	<i>Observation on the sectional surface of unidirectional CFRPP using Laser Microscope, VK-8500 (Keyence corporation). MFR of i-PP is 30 g/10min.</i>
Fig. 5.8-2	<i>Observation on the sectional surface of unidirectional CFRPP using Laser Microscope, VK-8500 (Keyence corporation). MFR of i-PP is 7 g/10min.</i>
Fig. 5.9	<i>Development of relative crystallinity with time for isothermal crystallization.</i>
Fig. 5.10	<i>Prediction of crystallization occurring around fiber.</i>
Fig. 5.11	<i>Crystallization around the mono filament of carbon fibers molded by different cooling condition. MFR of i-PP is 30. Molding temp. is 230 centigrade.</i>
Fig. 5.12	<i>Molding of each specimens.</i>
Fig. 5.13	<i>Two difference types of molding process (P-t-T) diagram.</i>
Fig. 5.14	<i>Typical load-deflection curves.</i>
Fig. 5.15	<i>Flexural properties and impact property of each specimens.</i>
Fig. 5.16	<i>Fibrous kinks on surface of UD2 specimen.</i>
Fig. 5.17	<i>Four fatigue damage phenomena of thermoplastics matrix composite.</i>
Fig. 5.18	<i>High cycle molding P-t-T diagram.</i>
Fig. 5.19	<i>Fatigue testing Method.</i>
Fig. 5.20	<i>Fatigue behavior and fracture characteristic of CFRPP.</i>
Fig. 5.21	<i>Characteristic of fatigue failure about CFRPP composites.</i>
Table 5.1	<i>Profile of olefinic thermoplastics.</i>
Table 5.2	<i>Material properties of unidirectional CFRPP.</i>
Table 5.3	<i>Molding condition of each specimens.</i>
Table 5.4	<i>Material properties of unidirectional CFRPP.</i>
Table 5.5	<i>Fatigue testing condition.</i>
Chapter 6	
Fig. 6.1	<i>Recycle path of CFRP and CFRPP using PP resin.</i>
Fig. 6.2	<i>Recycling vision of thermoplastics matrix composites for</i>

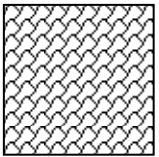
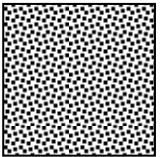
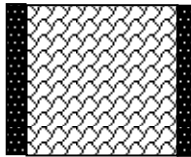
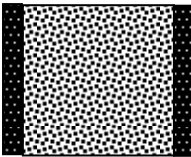
	<i>automotive applications.</i>
Fig. 6.3	<i>Remolding process of CFRTF and CFRP in just 3.5 hours.</i>
Fig. 6.4	<i>Photograph of shredding machine, "GOOD CUTTER".</i>
Fig. 6.5	<i>Photograph of mixing machine, "LABO PLAST MILL model 10C100".</i>
Fig. 6.6	<i>Shredded Carbon Fiber Reinforced Thermoplastic.</i>
Fig. 6.7	<i>Flexural properties of recycled CF/i-PP at $V_f=15\%$ (upper) and $V_f=30\%$ (lower).</i>
Fig. 6.8	<i>Flexural properties of recycled CF/ABS.</i>
Fig. 6.9	<i>Flexural properties of recycled CF/PC.</i>
Fig. 6.10	<i>Flexural properties of recycled CF/PET.</i>
Fig. 6.11	<i>Flexural properties of discontinuous CF/PP composites.</i>
Fig. 6.12	<i>Izod behavior of discontinuous CF/PP composites.</i>
Fig. 6.13	<i>Tensile fatigue behaviors of discontinuous CF/PP(R4) and CFRP/PP.</i>
Fig. 6.14	<i>Load-displacement curves of CFRPP(CF/PP) and R-CFRPP(R-CFRP/PP).</i>
Fig. 6.15	<i>Flexural behavior of CFRPP hybrid.</i>
Fig. 6.16	<i>Flexural fatigue behavior of CF/PP and CFRP/PP composite.</i>
Table 6.1	<i>Material properties.</i>
Table 6.2	<i>Molding conditions.</i>
Table 6.3	<i>Material properties of polypropylene.</i>
Table 6.4	<i>Material properties of carbon fiber.</i>
Table 6.5	<i>Contents of specimens.</i>
Table 6.6	<i>Material properties.</i>
Table 6.7	<i>Tensile properties of hybrid CF/PP and hybrid CFRP/PP.</i>
Chapter 7	
Fig. 7.1	<i>Prediction of the energy consumption growth by automobiles in more developed countries and saving potential of the consumption by introduced ultra lightweight automobiles using CFRP (with ref. IEA statistics).</i>
Fig. 7.2	<i>Prediction of the energy consumption growth by automobiles in less developed countries and saving potential of the consumption by introduced ultra lightweight automobiles using CFRP (with ref. IEA statistics).</i>
Fig. 7.3	<i>Prediction of the energy consumption growth by automobiles in the World and saving potential of the consumption by introduced ultra lightweight automobiles using CFRP (with ref. IEA statistics).</i>

Fig. 7.4	<i>Prediction of the energy consumption growth by automobiles in more developed countries and saving potential of the consumption by introduced ultra lightweight automobiles using CFRP (with logistic function method).</i>
Fig. 7.5	<i>Prediction of the energy consumption growth by automobiles in less developed countries and saving potential of the consumption by introduced ultra lightweight automobiles using CFRP (with logistic function method).</i>
Fig. 7.6	<i>Prediction of the energy consumption growth by automobiles in the World and saving potential of the consumption by introduced ultra lightweight automobiles using CFRP (with logistic function method).</i>
Fig. 7.7	<i>Prediction gap between referred of IEA statistics and logistic function method.</i>
Fig. 7.8	<i>Well to Wheel energy consumption.</i>
Fig. 7.9	<i>Well to Wheel CO₂ emission.</i>
Fig. 7.10	<i>Well to Wheel energy consumption in China.</i>
Fig. 7.11	<i>Prediction of number of automobiles in China.</i>
Fig. 7.12	<i>Prediction of energy consumption growth by automobile and effect of energy saving both a combination of lightweight and novel power plant technology in China.</i>
Fig. 7.13	<i>Prediction of energy consumption growth by automobile and effect of energy saving both a combination of lightweight and novel power plant technology in the World.</i>
Table 7.1	<i>Simulation conditions.</i>
<hr/>	
Appendix A	
Fig. A1	<i>XRD patterns of isotactic polypropylene and CFRPP samples.</i>
Table A1	<i>Condition of each samples for XRD.</i>
Table A2	<i>Assignment of XRD peaks of the α and γ crystalline phase of i-PP.</i>
Table A3	<i>Check list for x-ray intensity peak shift of each samples.</i>
<hr/>	
Appendix B	
Fig. B1	<i>Observation of performed discontinuous carbon fiber reinforced polycarbonate for palletize to injection molded recycling.</i>
Fig. B2	<i>Illustration of developed novel non-screw mixing machine.</i>

Fig. B3	<i>Overview of novel non-screw mixing machine.</i>
Table B1	<i>Condition and result of mixing test using conventional mixing machine.</i>
Table B2	<i>Condition and result of mixing test using novel non-screw mixing machine.</i>
<hr/>	
Appendix C	
Fig. C1	<i>Relationship between shear strength and l/h.</i>
Fig. C2	<i>Comparison of interlaminar Shear Strength of CFRPP and CFRP.</i>
Fig. C3	<i>Result of double notch shear test.</i>
Table C1	<i>Difference between molding conditions UD1 and UD8.</i>
Table C2	<i>Interlaminar shear strength of a specimen by short beam method.</i>
Table C3	<i>Deference of fracture appearance by changing l/h.</i>
Table C4	<i>ILSS by MIL standard B.</i>
Table C5	<i>In-plane shear strength of a specimen by double notch shear (DNS) test.</i>
Table C6	<i>Fracture appearance of development (UD8) and current (UD1) CFRPP.</i>
Table C7	<i>In-plane shear strength by MIL standard B.</i>
<hr/>	
Appendix D	
Fig. D1	<i>Difference of fracture appearance by AE method (amplitude).</i>
Fig. D2	<i>Difference of fracture appearance by AE method (Energy and Events).</i>
Table D1	<i>Composition of composites.</i>
Table D2	<i>Observation of fracture surface (shear) by SEM.</i>
Table D3	<i>Observation of fracture surface (tension load direction) by SEM.</i>
Table D4	<i>Failure conditions of CFRP and CFRPP in static tension test.</i>

Mechanical Testing List

Specimen Code	Construction	Remarks	Experimental evaluation	Test	Chapter
UD		Polypropylene reinforced with unidirectional continuous carbon fibers	<ol style="list-style-type: none"> 1. Static strength and modulus 2. Izod impact strength 3. Tensile behavior 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Three point bending test 2. Izod impact test 3. Tensile fatigue test 4. ILSS by short beam method 5. DNS test 6. AE test 7. Observation by SEM 	5 App. C App. D
CF/PP (R)		Polypropylene reinforced with random-directional discontinuous carbon fibers	<ol style="list-style-type: none"> 1. Static strength and modulus 2. Izod impact strength 3. Tensile behavior 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Three point bending test 2. Izod impact test 3. Tensile fatigue test 	6
CF/ABS		Acrylonitrile butadiene styrene reinforced with random-directional discontinuous carbon fibers	<ol style="list-style-type: none"> 1. Static strength and modulus 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Three point bending test 	6
CF/PC		Polycarbonate reinforced with random-directional discontinuous carbon fibers	<ol style="list-style-type: none"> 1. Static strength and modulus 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Three point bending test 	6

CF/PET		Polyethylene terephthalate reinforced with random-directional discontinuous carbon fibers	1. Static strength and modulus flexural strength and Young's modulus	1. Three point bending test	6
CFRP/PP		Polypropylene reinforced with recycled CFRP (CF/Epoxy) pieces	1. Static strength and modulus flexural strength and Young's modulus 2. Tensile behavior fatigue	1. Three point bending test 2. Tensile fatigue test	6
HY-CF/PP		Repaired and reinforced specimen of CF/PP	1. Static tensile strength and Young's modulus 2. Static strength and modulus flexural strength and Young's modulus 3. Flexural behavior fatigue	1. Static tension test 2. Three point bending test 3. Three point bending fatigue test	6
HY-CFRP/PP		Repaired and reinforced specimen of CFRP/PP	1. Static tensile strength and Young's modulus 2. Static strength and modulus flexural strength and Young's modulus 3. Flexural behavior fatigue	1. Static tension test 2. Three point bending test 3. Three point bending fatigue test	6

第1章 序 論

1-1 本研究の背景

1-1-1 地球温暖化^{1)~4)}

地球温暖化問題への国際的な対応としては、まず、1992年に国連気候変動枠組条約（UNFCCC）が採択され、同条約は1994年に発効した。この中では「気候系に対して危険な人為的干渉を及ぼすこととならない水準において大気中の温室効果ガスの濃度を安定化させる」という究極的な目標が掲げられている。

さらに、京都議定書（Kyoto Protocol）は、UNFCCCにおける温暖化防止行動をより具体的なものとするため、先進国の温室効果ガス排出量について、法的拘束力のある数値約束を各国毎に設定したもので、1997年に京都で開かれた国連気候変動枠組条約第3回締約国会議（COP3）において採択された。それは、2005年2月16日に、ロシアが最後の批准国になる形で発効された。

京都議定書では、対象となる温室効果ガスとして、二酸化炭素（CO₂）、メタン（CH₄）、一酸化二窒素（N₂O）、代替フロン等3ガス（HFCs、PFCs、SF₆）の6種類を規定するとともに、同議定書の附属書Iに記載された先進国等（附属書I国）が、それぞれ基準年（原則として1990年。ただし代替フロン等3ガスについては1995年を基準年とすることもできる。）比の温室効果ガス削減約束を設定され、第一約束期間（2008年から2012年）の1年当たりの平均排出量において、その約束を達成することとされている。Fig. 1.1に温室効果ガスごとの温暖化寄与度を示す。これから分かるとおり、CO₂が6割近くと支配的で、これは主に石油由来である。主な国・地域の削減約束は、日本が-6%、アメリカが-7%、EUは-8%、そしてロシアが±0%などとなっている。

2000年の気候変動枠組条約第6回締約国会議（COP6：オランダ・ハーグ）では、京都議定書の具体的実施ルールを決定することを予定していた。同議定書発効の条件を整える上でも重要な会議であり、各国精力的な交渉を重ねたにも関わらず、十分な合意をみるに至らなかった。

第7回締結国会議（COP7：モロッコ・マラケシュ）において、京都議定書の運用ルールが合意された。森林によるCO₂の吸収量の算入ルールについて定められ、我が国では1300万炭素トン（1990年総排出量比3.9%）が算入の上限になった。

2004年11月にロシアのプーチン大統領が京都議定書批准法案にサインしたことにより、京都議定書の発行要件は満たされこの2月にも京都議定書は発行することとなった。

以上の経緯により京都議定書が発行されることにはなったが、問題も多くある。まずロシアはソビエト崩壊による経済活動の停滞で1990年時点に比べて大幅に二酸化炭素

の排出量が減少しているにもかかわらず、議定書による削減目標は±0%である。今回の批准は COP6 において排出権取引の厳しい量的規制が設けられなかったことを受けた戦略的な意味合いもある。また、最大の二酸化炭素排出国であるアメリカ合衆国も発行までに批准することは無かった。その理由は「途上国にも有効な温室効果ガス削減目標を設けるべきだ」というものである。しかし、これはこの論文の一つのテーマでもあるが、まずは、これまでに経済発展を遂げた先進国が率先してこの地球規模の問題に取り組んでいくべきではないだろうか。

1-1-2 石油依存型社会の終焉（エネルギー問題）

世界の先進国で使用されているエネルギー源は大半が石油、天然ガス、石炭などの化石燃料である (Fig. 1.2) 。 そのうち、石油が 40.7% と一番多く、このことからいかに人類が石油依存型の社会構造を保ってきたかがうかがえよう。しかし、産業革命以後膨大な量のエネルギーを消費してきた結果、近い将来に化石エネルギーが枯渇することが問題となっている。ここ最近のデータを示せば、①Fig. 1.3 から、1970 年代からエネルギー消費量は増加し続けており、なお石油の使用量も増加傾向にあること、②Fig. 1.4 から、産業部門や民生部門におけるエネルギー消費量はその省エネ努力からさほど変化していないのに対し、運輸部門が増加傾向にあり全体の消費量をかさ上げしていること、③Fig. 1.5 から、産業部門や民生部門の省エネ努力から消費量は抑えられ、さらに R/P エネルギー転換が始まっているが、運輸部門では（推進燃料を必要とするため）石油が大量に使われ省エネ努力はみられないこと、など 3 つのポイントが読み取れ、これらは本論文の重要な背景である。 Fig. 1.6 に示すように、今のペースで消費が続けば石油が約 41 年、天然ガスが約 67 年、石炭が約 192 年で枯渇すると予測されている。可採年数 (R/P 値) は、その年の生産量 (P) と確認可採埋蔵量 (R) で決まるため、採掘技術の進歩やエネルギー価格の上昇などにより確認可採埋蔵量が上昇し、結果として可採年数が増加する場合もある⁵⁾。しかし、5 倍・10 倍と大幅に増える可能性は低く 21 世紀中に石油は枯渇する可能性は十分にある。

また、上の議論は IEA すなわち先進国の現状から言えることであり、この先、中国やインドなどのアジア諸国における経済発展や人口増加に伴う、エネルギー利用がさらに加速することを考えると、石油の枯渇は時間の問題である。枯渇が進めば、エネルギーの価格がかつてないほど高騰することも懸念される。いずれ水素エネルギー社会に移行するのだから現在の化石燃料の量で十分ではないかという意見もあるが、水素時代が想定されている 2030 年までこのままの状態では、その間に残り少ない化石燃料を求めて戦争が起こる危険性すらある。このような事情の中で今後ともエネルギーの安定供給を続けていくためには、風力発電や太陽光発電等のエネルギー開発を進めると

共に、省エネルギーを推進しエネルギー消費量を抑えることが必須である。

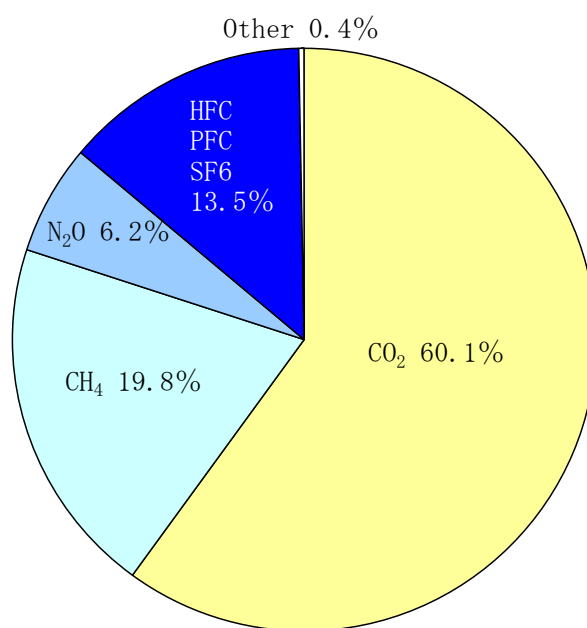
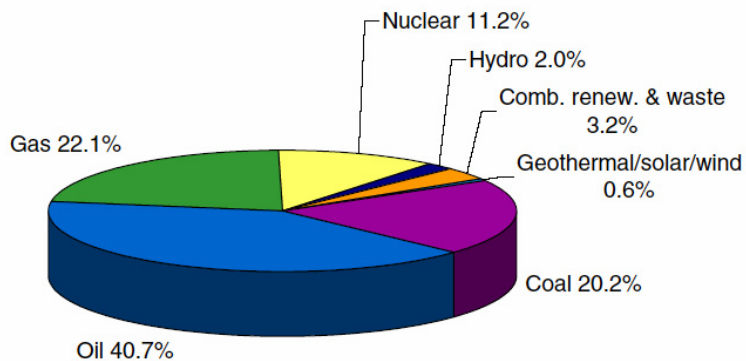


Fig. 1.1 Contribution of green house gases (GHG) to global warming.



Share of Total Primary Energy Supply* in 2003

IEA Total



5 119 Mtoe

* Share of TPES excludes electricity trade.

Note: For presentational purposes, shares of under 0.1% are not included and consequently the total may not add up to 100%.

Fig. 1.2 Construction of primary energy consumption in the world.

Evolution of Total Primary Energy Supply* from 1971 to 2003

IEA Total

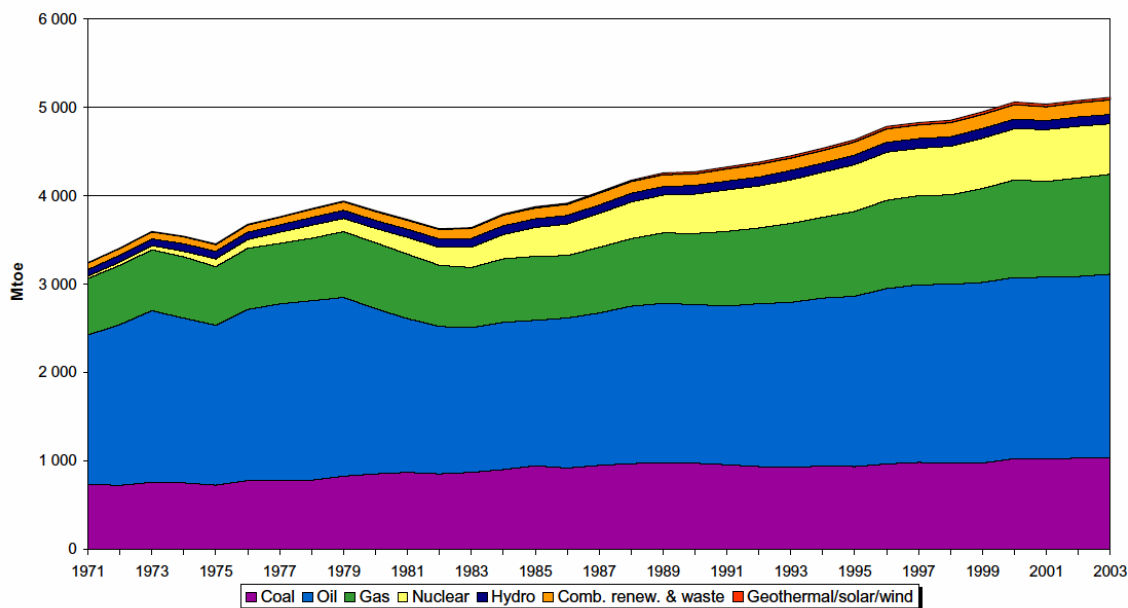


Fig. 1.3 Evolution of total primary energy supply by IEA.

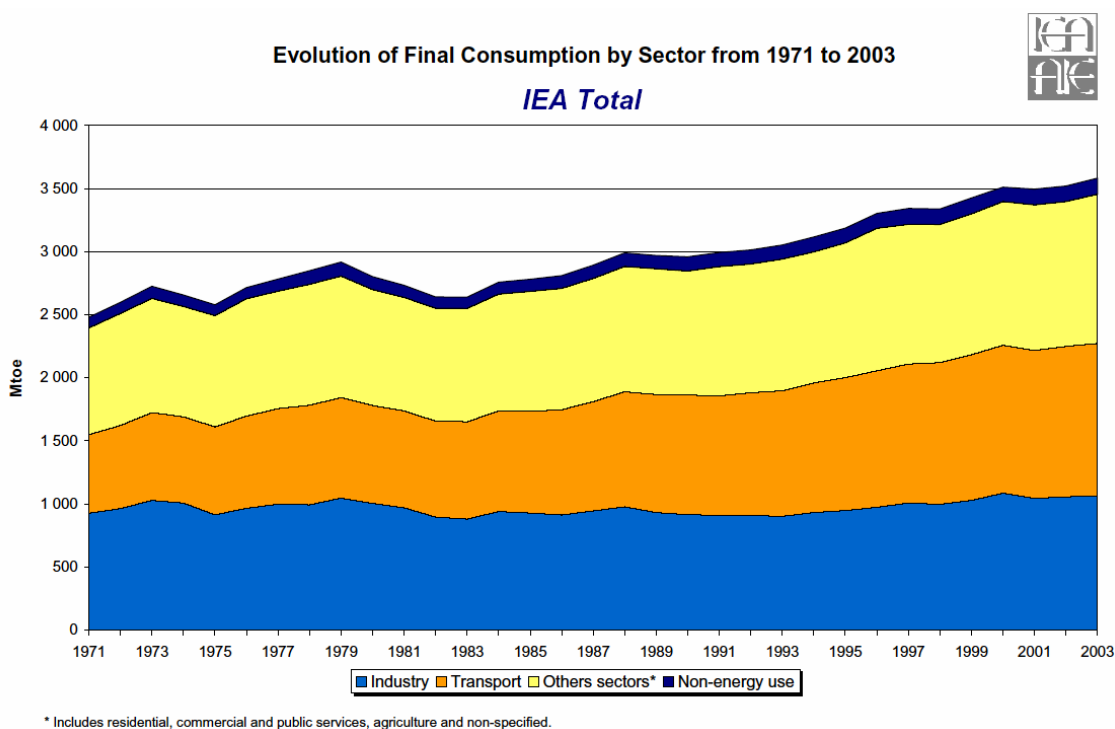


Fig. 1.4 Evolution of final energy consumption by sector.

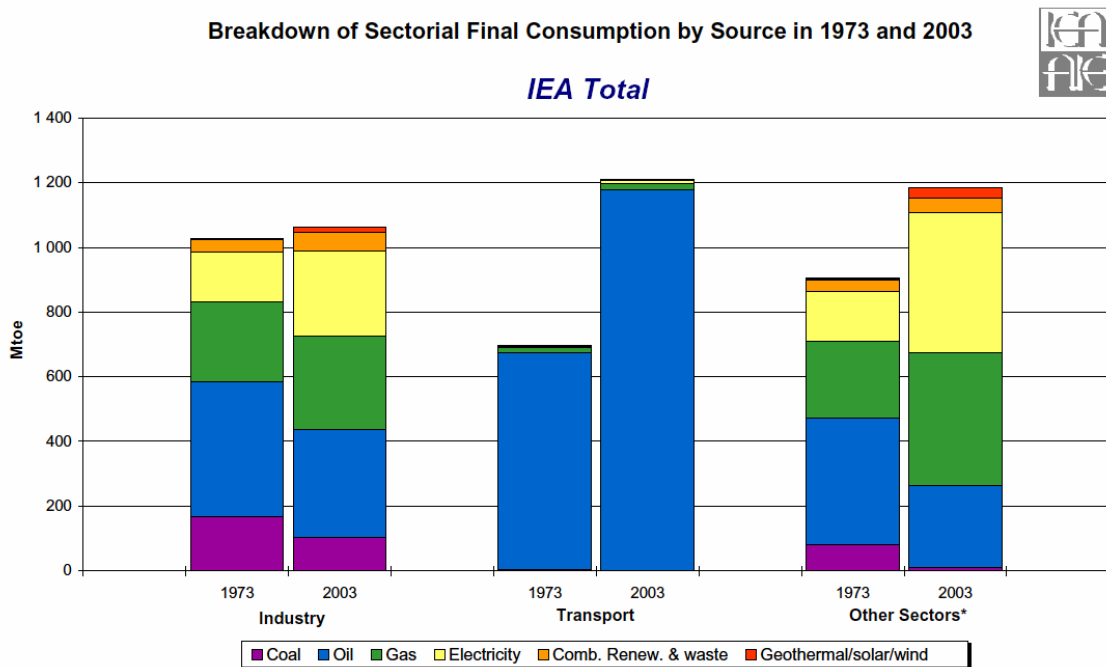


Fig. 1.5 Sectional final energy consumption.

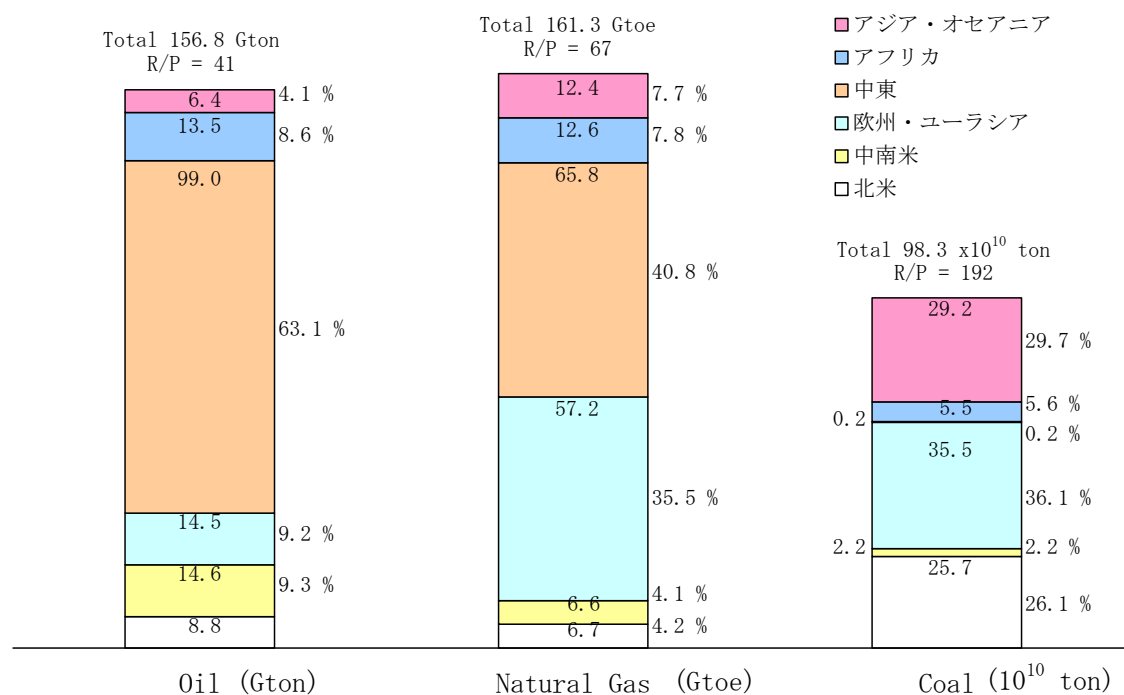


Fig. 1.6 Reserve-production ratio and geographical distribution of energy resources (Oil, Natural Gas and Coal). (Source: ref. 6)

1-1-3 BRICsの成長

1-1-3-1 PPP（購買力平価）－GDP（国内総生産）による比較

裁定行為によって、国際間の商品価格はある一定の水準に均等化し、一物一価の法則が成り立つ場合には、貨幣の交換比率は定まる。このように、国際間の商品価格の一致から理論的に導かれる貨幣の交換比率のことを、購買力平価(Purchasing Power Parity: PPP)という⁷⁾。特に先進国と発展途上国とを比較する場合は、この購買力平価により標準化された経済指標で議論するべきと考えられている。Fig. 1.7 にみられるとおおり、特に BRICs (ブラジル・ロシア・インド・中国) に注目すれば、PPP-GDP は、一般的な GDP の約 2～4 倍となる。また、Fig. 1.7 は、BRICs の成長が著しいこと、地球全体世界的にみても GDP は上昇し続けていることなどが読み取れ、この BRICs の成長は、今後の環境問題において無視できない影響力をもつであろうことを示している。そこで、この考え方を反映し、Fig. 1.8-a～e では、各国の状況（人口・国面積・森林量・ひとりあたりエネルギー消費量・ひとりあたり CO₂ 排出量）について、PPP-GDP で比較した様

子を示している⁸⁾。図中の赤印は、BRICsの現在の位置を示している。Fig. 1.8-aから、PPP-GDPと人口には強い相関があり、先進国の性格をそのままBRICsに反映すると、中国・インド共に、アメリカを抜いて世界第1位、2位のPPP-GDP国になりうること、ブラジル・ロシア共に日本と同水準の国になりうること、中国の海岸側の先進地域は、すでに先進国と同水準にあること、などが読み取れる。Fig. 1.8-bは、BRICsすべての国が大国であり、中国はこの先アメリカと同等の経済大国になる可能性があることを示している。Fig. 1.8-cから、高PPP-GDP国は、森林が少ない傾向にあること、そしてBRICsの保有する森林(CO₂吸収源)もいずれ少なくなる可能性があること、つまり、地球全体の森林が激減する可能性があること、が読み取れる。Fig. 1.8-dから、すでにロシアはエネルギー消費量が多いこと、その他のBRICsは点線より上のエリアに向かって成長するため、エネルギー消費量は指数関数的に増大する可能性があることが読み取れる。Fig. 1.8-eから、CO₂排出量についてもエネルギー消費量と同様の議論がなされることが理解できる。そして、これらはきっと自動車の増加からもたらされ、その結果、石油需要の増大、石油由来CO₂の増加等から、環境問題やエネルギー問題に直接的または間接的に影響してくることは容易に想像できる。よって、IPCCやIEAが行い、公表している予測よりもはるかに早いスピードで、環境問題やエネルギー問題は深刻化していくであろう。

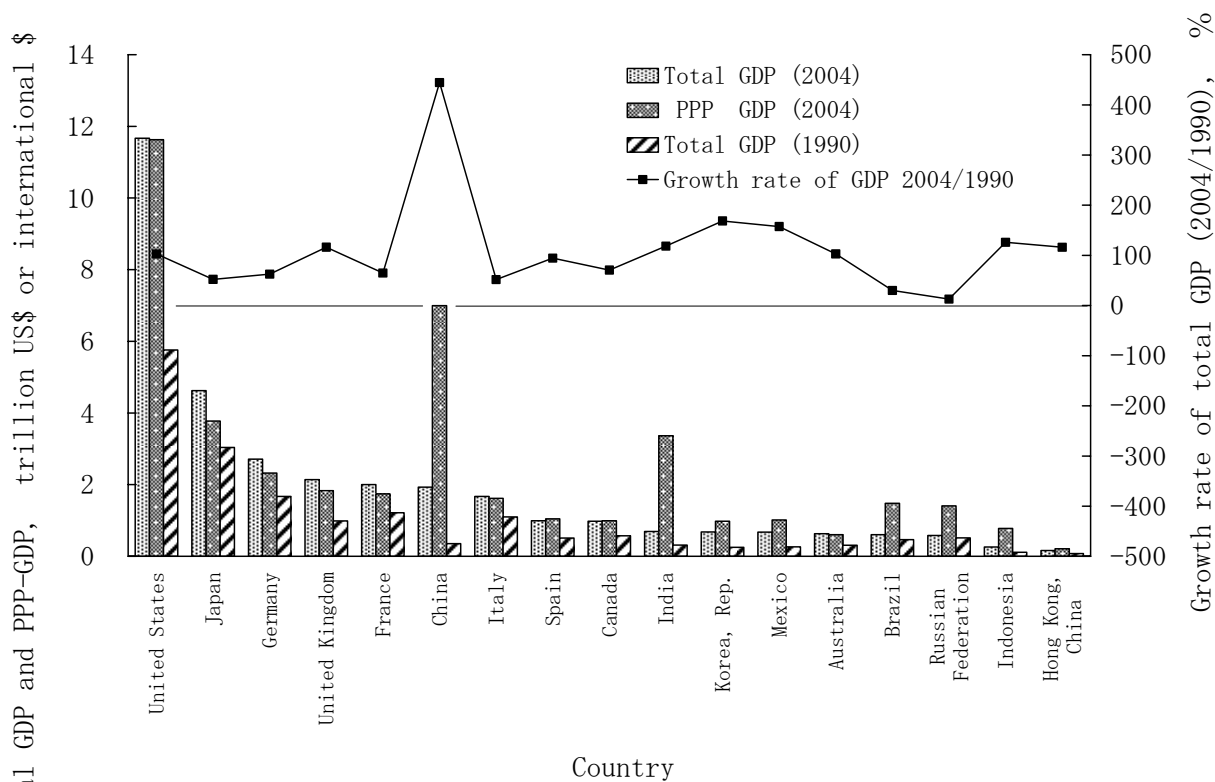


Fig. 1.7 Changing of Gross Domestic Product calculated using atlas method (GDP) and GDP calculated using purchasing power parities (PPP-GDP) in each country.

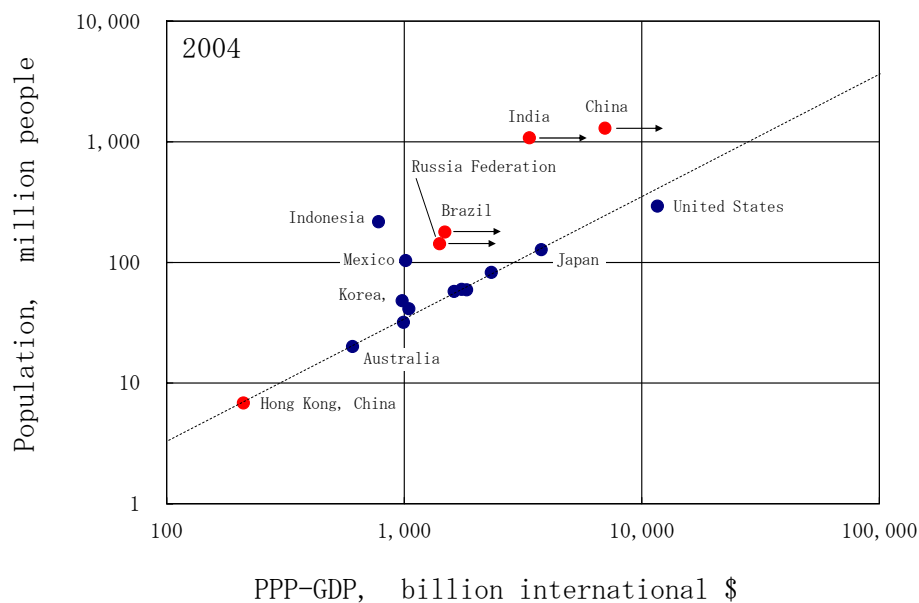


Fig. 1.8-a Population

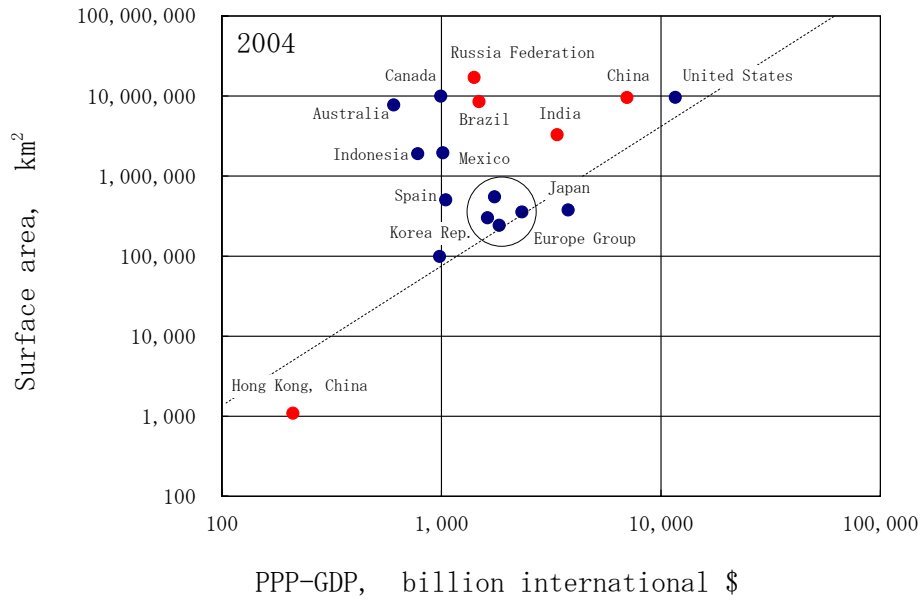


Fig. 1.8-b Surface Area

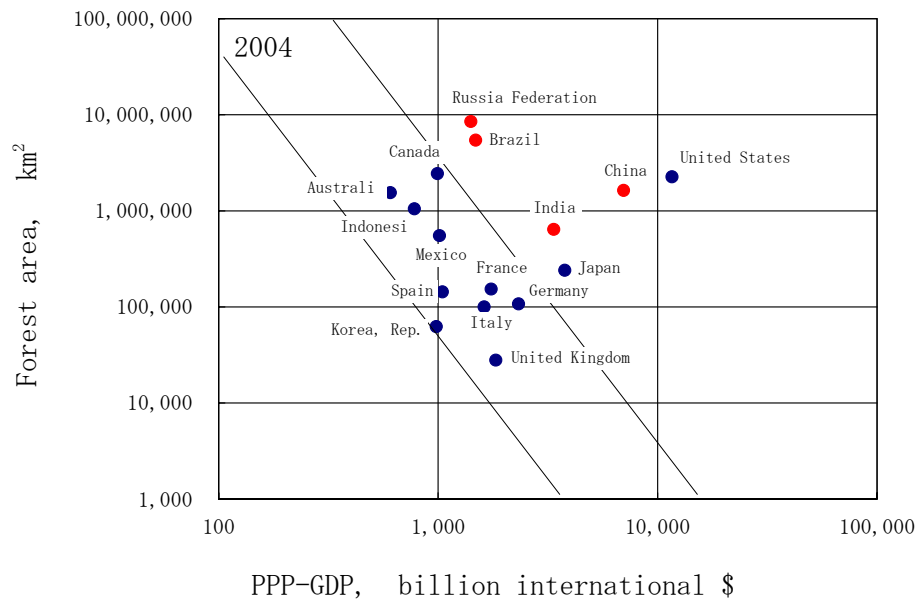


Fig. 1.8-c Forest Area

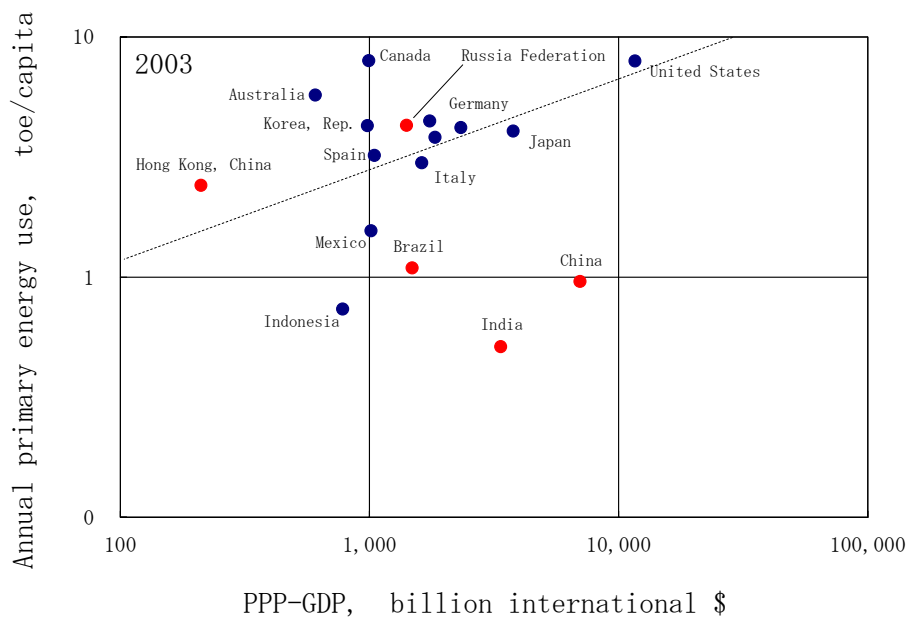


Fig. 1.8-d Primary Energy Use per capita

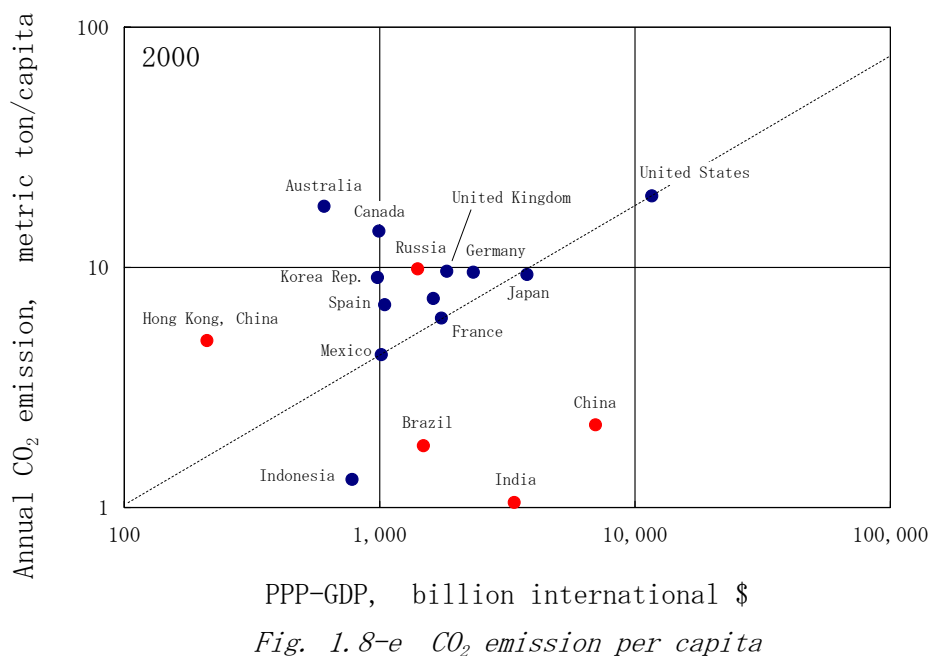


Fig. 1.8-e CO₂ emission per capita

Fig. 1.8 Comparison of present conditions by Gross Domestic Product calculated using purchasing power parities in each country.

1-1-3-2 PPP（購買力平価）－GNI（国民総所得）による比較

Fig. 1.9 は、先進諸国と発展途上国の PPP-GNI について示したものであるが、同図からやはり BRICs の GNI はまだまだ低水準にあることがわかる。これは、PPP での比較であるから商品価格は一定であるが、一方で国民ひとりあたりの所得が少ないために、物が満足に購入できない状況にあると判断できる。しかしながら、中国の海岸地域、香港をみてみると、その水準は先進国並みと言って良い。この状態が中国の本当の姿ならば、この先、内陸部の開発が進み、この GNI が浸透していくことを考えれば、国民総所得とエネルギー消費量、CO₂ 排出量との関係を理解しておく必要がある。Fig. 1.10-a～c に、各国の状況（人口・エネルギー消費量・CO₂ 排出量）について PPP-GNI で比較した様子を示す。

Fig. 1.10-a から、中国やインドの人口が地球規模で考えても極めて多いことが読み取れ、中国やインドの国民総所得が少ないのは、この莫大な人口のせいであることが理解できる。Fig. 1.10-b および Fig. 1.10-c から、PPP-GNI とエネルギー消費量、CO₂ 排出量には相関があり、今後の BRICs の GNI 増加に伴って、エネルギー消費量、CO₂ 排出量いずれも線形的にまたは指数関数的に増加していく可能性があることが読み取れる。

ここまでの議論で、BRICs の地球環境問題、エネルギー問題に及ぼす影響力が大きいことが理解できたと思うが、この BRICs の中でも特に海岸部地域で発展が飽和しつつある中国内陸部の経済発展は、今後の長期的予測の中に盛り込まれるべき話題であり、世界的な脅威である。本研究では、この中国全体の経済発展を念頭に、特にモーターゼーション（自動車保有台数の爆発的成長）の影響力を重要視しており、この抜本的な技術対策案として、普及する乗用車の CFRP による超軽量化をかかげ、軽量化実現への技術的な展望、具体的な候補材料の開発、本軽量化による各問題対策への効果試算、などを論じている。

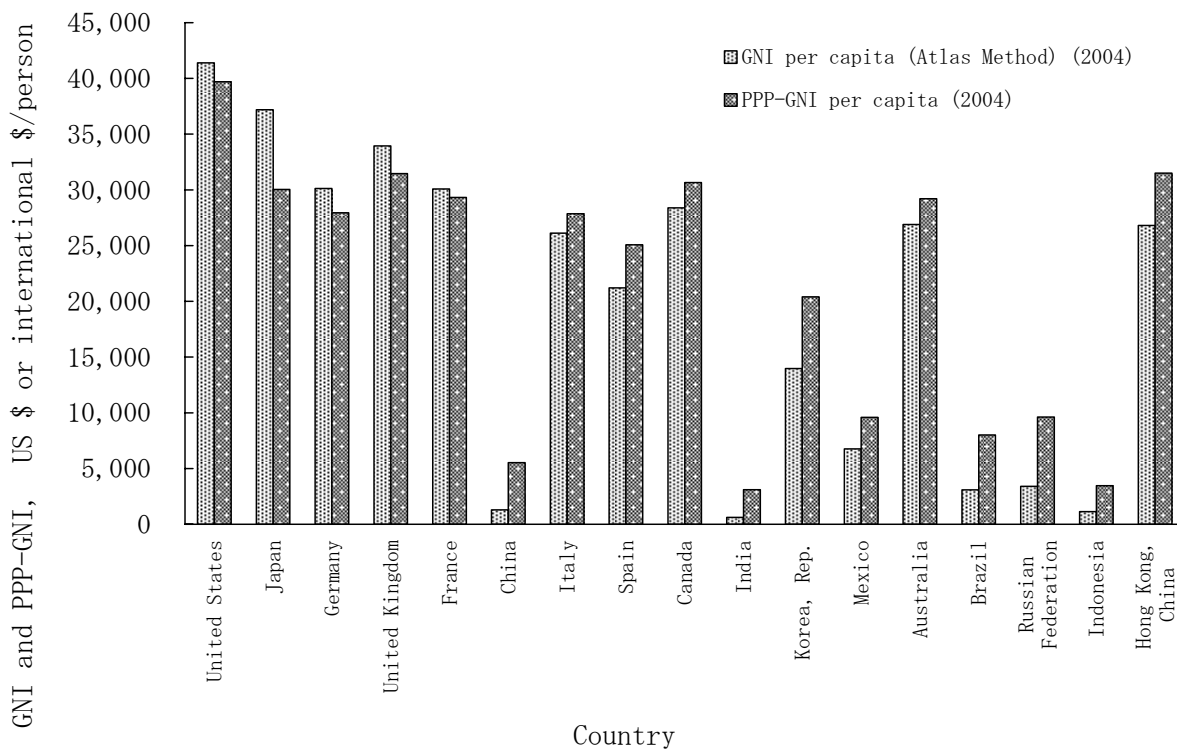


Fig. 1.9 Comparison with Gross National Income calculated using atlas method (GNI) and per capita and GNI calculated using purchasing power parities (PPP-GNI) in each country.

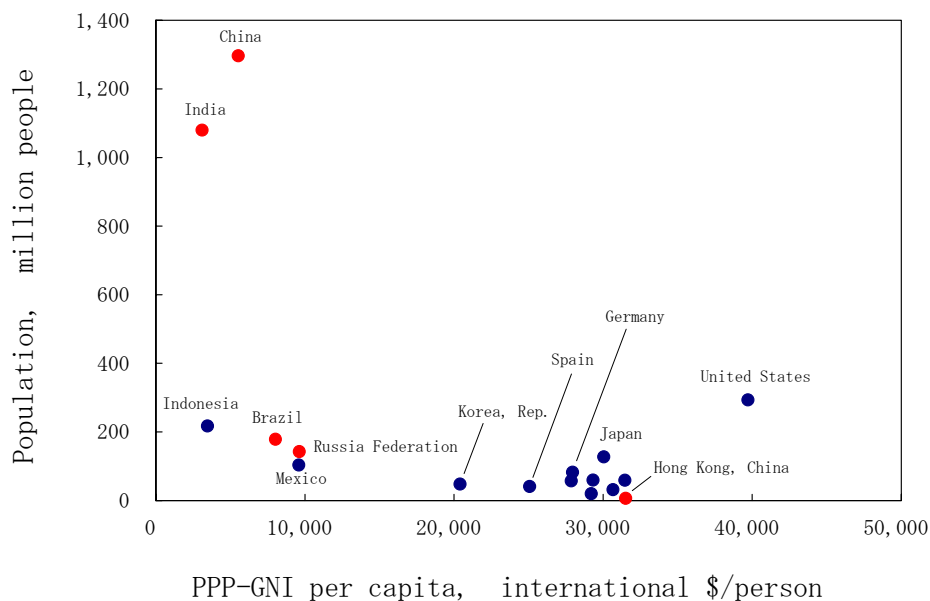


Fig. 1.10-a Population

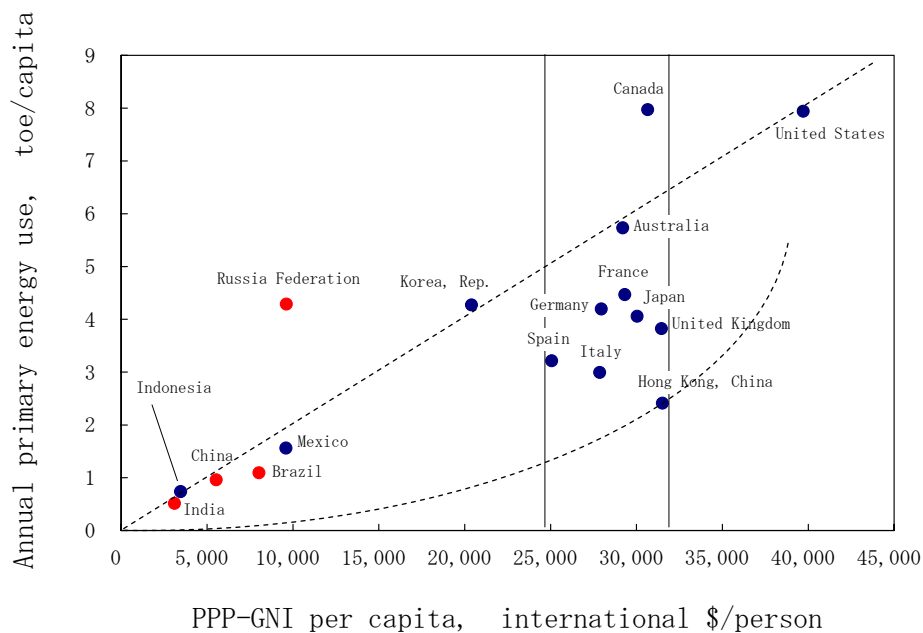


Fig. 1.10-b Primary energy use

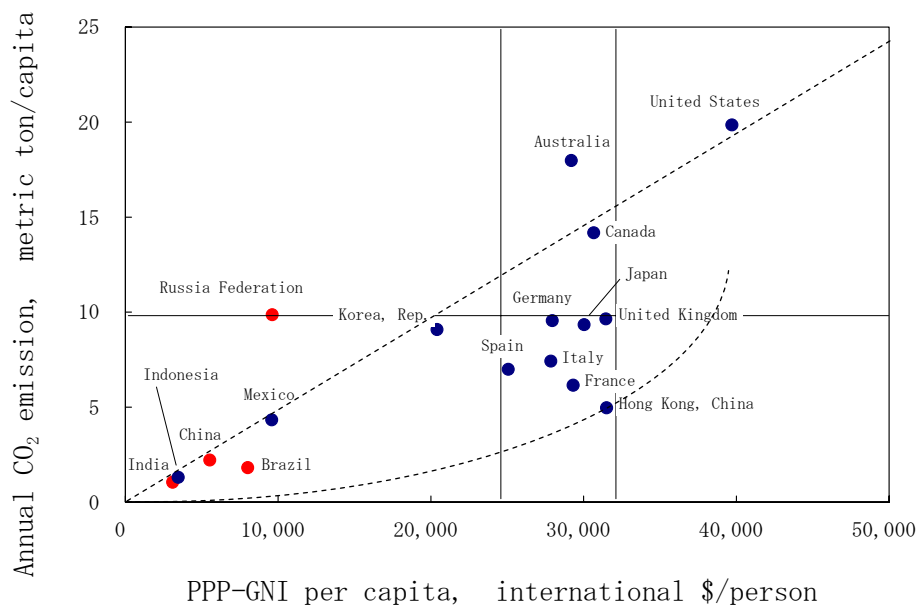


Fig. 1.10-c CO₂ emission per capita

Fig. 1.10 Comparison of present conditions by Gross National Income calculated using purchasing power parities per capita in each countries.

1-2 本研究の目的

地球温暖化の防止や省エネを考えたとき、結論から先に述べると、運輸部門の対策が遅れている。運輸部門は、燃料に石油製品を使用するため、どうしても石油依存度が高くなる。先にも述べた国際的な活動を通じて、地球環境問題というのはいまや地球人類にとっては既知の事実となり、生活意識も環境配慮へと移ってきている。

二酸化炭素排出量-6%やさらなる省エネを考えると、いままで手付かずであった運輸部門の対策を強化する必要がある。さらに、有力新興国BRICsの経済成長などを考えると、即効的な対策を早急にとらなければならない。つまり、省エネ効果の強い対策で、複雑でなく、容易に実現可能であることが要求される。そして、製造者、消費者万人の理解を得られ、その対策へ向けて、一致団結して前進していくことが求められる。

本研究では、このような対策として、主に乗用車の究極的な軽量化を目指す。この軽量化技術は、乗用車のみならず、他の人工物（例えば、ロボット、家電、建築等）にも適用可能であるが、とりあえずの目標を評価しやすい乗用車というカテゴリ内で設定する。本軽量化実現に際して重要な技術となるのが、乗用車用の新しい軽量新素材の開発である。鉄鋼はすばらしい材料であるが、比重が大きいので、どうしても車体重量が重くなってしまう。鉄鋼は4R（リユース・リデュース・リサイクル・リペア）が困難な点や絶対に省けない加工時のエネルギー消費を考えると、環境配慮という点において疑問を抱いている。はたして、鉄鋼はこの先のニーズに応えうる素材であるのか、結晶粒の微細化等で強度を2倍（弾性域 $\sim 0.4\% \epsilon$ ）にしているが、大物構造物は剛性設計なので、抜本的な（大きな）軽量化につながるのか、私見ではあるが、そう感じている。

これからは安全装置や自動航行装置などが配され、車重が益々重くなっていく中で、著者は、比重比 $1.2/7.8 (= 0.154)$ の炭素繊維強化プラスチック（Carbon Fiber Reinforced Plastics, CFRP）、特にマトリックスに熱可塑性樹脂を用いる熱可塑性CFRPに注目している。熱硬化性ではなく熱可塑性のプラスチックを選択したのは、性能と価格と4R実現性に魅力を感じるからである。もちろん、乗用車パーツすべてを熱可塑性CFRPでまかなうわけにもいかないので、やはり要の部分には、これまでの実績から信頼のある熱硬化性CFRPが使用されるであろう。鉄鋼材料と一緒に使うと、リサイクル時に素材分別の必要性が出てくるため、同じCFRPで一本化したほうが望ましい。また、複合材料は、3次元形状を自由に形成可能で、設計の自由度が高いので、乗用車の構造設計最適化によって、部品点数を画期的に削減できるという利点がある。

このようなことを背景に、本研究では、熱可塑性プラスチックにオレフィン系（ガラス転移点が低くリサイクル容易）のアイソタクチックポリプロピレン（安価で、最も軽く、生産量多く一般的で、その立体規則性からPPの中では硬い）を選択し、これを

炭素繊維で強化した、炭素繊維強化ポリプロピレン（CFRPP）を軽量新素材として提案する。

炭素繊維強化ポリプロピレンは、これまで本格的に研究されていない。何故なら、炭素繊維表面とPP界面の接着に問題があり、複合としての相性が悪かった（複合材料としてモノにならなかった）からである。他方で、熱可塑性CFRPとしては、射出グレードではあるが炭素繊維強化PA（ナイロン）、高級品であると炭素繊維強化PEEKなどがすでにあっただので、従来、市場規模の小さい熱可塑性CFRP市場に炭素繊維強化PPが入る余地はなく、研究も凍結していた。現在も、CFRPの生産量、年間約2万トンのうち、98%（1万96百トン）が熱硬化性CFRPであり、残り2%（4百トン）が熱可塑性CFRPである。著者が想定している乗用車へのCFRPの適用量は、熱可塑性CFRPが100kg/台、熱硬化性が100kg/台、と考えており、年間1千万トンのオーダーである。このように今の500倍ものCFRPが使用されはじめたら、社会的に循環させる必要があり、逆にこの準備無しに普及させてはならないと考えている。

以上より、本研究では、（1）炭素繊維強化ポリプロピレン（連続繊維、不連続繊維）の性能改善および基本的な力学特性の取得、（2）炭素繊維強化ポリプロピレンのリサイクル特性の把握、を二本柱として同軽量素材の開発を目的としている。

1-3 熱可塑性CFRPに関する従来研究

熱可塑性CFRP（以下、CFRTP）の研究は、決して新しいものではなく、論文データベース等で例えば「熱可塑性×炭素繊維」という条件で検索をかければ、700件以上ヒットする研究分野である。しかし、このような材料は、いわゆる高級品で、マトリックスに（確かに熱可塑性樹脂ではあるものの、そのイメージとはかけ離れた性能、コストである）エンジニアリングプラスチックを用いたもの（CF/PA）、またはスーパーエンブラを用いたもの（CF/PEEK）といった具合に、汎用ではない高性能の樹脂を用いている。こういった材料は、耐熱性が要求される場所に使用されたり、かなり過酷な条件下で使用されたりするために、こういった組み合わせになっている。しかし、地上を、大気圧下で走る自動車にとって、それほど高い耐熱性は不必要である。しかも、量産自動車に適用されれば、そのリサイクル性も必ず問われ、そういった場合にはエンブラやスーパーエンブラでは（その化学構造が複雑であることも起因して）都合がわるい。

汎用樹脂を用いたものの中にはある。CF/ABSなどがそうであるが、しかし汎用樹脂を用いたCFRTPは、そのほとんどが射出成形品（小物製品）である。それでもやはり、炭素繊維はガラス繊維に比べ、射出成形のシリンダ内で折損がはげしく、繊維長が

短くなって、所定の補強効果を得られないために、適用箇所に制限があるのが現状である。また、加えて、CFRPPの場合は、繊維長はもとより繊維とマトリックスの界面接着があまく、きわめて特性の低い材料であった。

本論文で取り扱うCFRPPは、不連続繊維強化のものについては（特にアジアで）研究が盛んであるが、連続繊維強化CFRPPで大物をつくろうという研究は、これまで見たことも聞いたこともない。著者は、自動車のような3～5mクラスの構造物を、CFRPPで迅速にしかも省エネでつくりたいと思っている。汎用樹脂の中で一番軽いPPをマトリックスに使用することは、その大きな軽量効果をねらってこれまで様々な工夫（例えば、無水マレイン酸をPPにグラフトさせることで極性をもたせる等）がされてきたが、界面接着の問題は解決されたとは言うに足りず、改善の余地を残す材料研究であった。

著者は、低コスト材料開発、ハイサイクル成形を念頭に、成形法の改良からこの改善に成功し、連続繊維でも十分構造物へ適用できるレベルの強度／剛性を得た。一方で、これからは4R, Reduce（廃棄物を減らす, 投入資源を減らす）・Reuse（再使用）・Recycle（サーマル／マテリアル再利用）・Repair（高修理性）可能な素材であることが前提条件,あるいは必須条件になってくるが、この点についても著者は検討している。そもそも、汎用樹脂は、その化学構造が単純で、特にPPのようなオレフィン系のポリマーはC, Hの結合のみであり、熔融温度は低く、熱劣化も少ないことから、熔融再成形には都合が良い材料である。

加えて、材料研究開発を、地球環境問題の解決といったようなグローバルな視点で定義し、かつその材料が世界に対してどのようなインパクトがあるのかを定量的に求めるという研究は、著者が知りうる限り、FRPの分野ではまだ少ない。

また最近では、成形法の改良が進み、たとえばCBTレジンを使用して、VIP法で大物成形品をつくるなどという研究もヨーロッパで進んでいる。または、炭素繊維との界面接着特性を樹脂側のポリマーブレンドで解決しようとする試み⁹⁾がはじまっている。このような研究開発は、本分野が拡大するうえできわめて重要であるが、低コストで構造軽量化効率の高い先端複合材料は、炭素繊維とPPの組み合わせであり、量産品の軽量化に有効である。

1-4 本論文の構成

第2章では、産業革命以後の人類のあゆみから、産業発展や経済的要因が環境問題やエネルギー問題に直接的または間接的に関わっていることを明らかにし、現在のエネルギー構造分析および有力新興国BRICsの成長から、中国の乗用車保有台数の増加が世界的な問題になること、そして、これらに対抗する技術開発要素として、乗用車自体

を超軽量化することを挙げ、これからの材料に要求されるサステイナブルな条件、すなわち「環境配慮」、「4Rの推進」という条件について触れる。これまで行われてきた、乗用車に対する環境・省エネ技術というのは、エンジンに対するものであるなど、アプリケーション側の技術であったが、本研究では自動車を構成する材料自体を軽量にする技術に主眼をおいているため、これら条件を満足する材料について論じ、本論文のイントロダクションとする。

第3章では、有力新興国・中国のモーターゼーションと題して、BRICsの中で人口も多く、おそらく最初で最大のモーターゼーション国である中国を例に取り、将来の乗用車増加に起因するエネルギーの使われ方、消費量の推移を、将来予測として示す。予測には、ロジスティック関数を用いた独自のモデルを用い、エネルギー消費量およびCO₂排出量をアウトプットとしている。

第4章では、乗用車という製品をもういちど原点に立ち返って考え、現在の乗用車の構造分析を行う。次に、連続繊維強化と短繊維強化のCFRPを考え、その成形法などから双方の利点・欠点を示し、それを乗用車製造にどのように生かしていくかを示す。次に、FRPの乗用車への適用段階を、構造変革の歴史、アルミによる軽量化の歴史の両面から考えた提案をし、さらなる軽量化のためにはCFRPしかあり得ないことを、金属材料との比強度・比剛性の比較、LCAを通じた環境負荷評価など多方面から示す。そして、これまで実現困難とされてきた炭素繊維強化ポリプロピレンの実現に対する期待を述べる。

第5章では、開発に成功した炭素繊維強化ポリプロピレンの力学的性質（3点曲げ試験、アイゾット衝撃試験、引張疲労試験）を示すと共に、改善に際して用いた成形手法等、5つの工夫を具体的に紹介している。

第6章では、第5章とはまた違った視点で、従来CFRP（炭素繊維強化エポキシ等）および炭素繊維強化ポリプロピレンのリサイクル（再利用）について、リサイクルパスの提案と、実際の再利用材の力学的性質評価を行っている。また、補強材、パッチ補修材として利用できる薄い炭素繊維強化ポリプロピレンシートを用いた4R技術の評価も同時に行っている。

第7章では、本研究が地球規模の省エネやCO₂排出抑制に与える効果を定量的に示すために、軽量化のみの場合、他の省エネ技術革新等と併用できた場合にわけて論じる。乗用車の軽量化は即効的できわめて効果があること、中国やほかの途上国の成長速度に勝って確実に省エネしていくためには、できるだけ早い時期に導入する必要があることなどを述べる。

さいごに第8章で、本研究の結論および今後の技術展望等を述べる。

各章と研究業績との対応を、Table 1.1に示す。

Table 1.1 Correspondence with each chapter and my research achievements.

	国内学会	国際学会	学術 雑誌 (日)	学術 雑誌 (英)	論文 番号
第2章	3 (1)				[12] [13] [14]
第3章	2 (1)	2 (2)		1 (1)	[1] [3] [6] [16] [19]
第4章	3 (0)	2 (0)			[4] [5] [15] [17] [25]
第5章	1 (1)	1 (1)	1 (1)		[2] [9] [20]
第6章	4 (1)	4 (2)			[7] [8] [10] [11] [21] [22] [23] [24]
第7章	3 (2)	1 (1)		1 (1)	[1] [3] [13] [16] [19]
第8章					
補遺A		1 (1)			[2]
補遺B	1 (1)				[18]

括弧内数字は筆頭論文件数を示す

第1章で引用した文献等：

- 1) 日本政府代表団: C O P 6 (気候変動枠組条約第6回締約国会議) 評価と概要, (2000).
- 2) 中央環境審議会：京都議定書の締結に向けた国内制度の在り方に関する答申, (2002-1).
- 3) 添谷 芳秀：外交問題としての京都議定書, 経済産業研究所, (2003).
- 4) 工藤拓毅・小川順子：日本の京都議定書批准の意義と今後の課題, IEEJ, (2002).
- 5) 佐藤友香・小林茂樹：化石燃料の現状と石油の将来, 豊田中央研究所, (1997. 6).
- 6) エネルギー要覧2005年度版.
- 7) 東京大学赤門 Economist：東大生が書いたやさしい経済の教科書, インデックス・コミュニケーションズ, (2005. 1), pp. 153-156.
- 8) World Development Indicators database, World Bank, (15 July 2005).
- 9) P. Mitschang, M. Blinzler, A. Wöginger: Processing technologies for continuous fibre reinforced thermoplastics with novel polymer blends, Composites Science and Technology, 63, (2003), pp. 2099-2110.

第2章 材料の環境配慮と4R

2-1 緒言

人類は、道具を使うことを覚え、道具をつかってモノをつくることを覚え、多くのあらゆる知識体系をつくりだした。ある程度までは、それは素晴らしいことであったが、つくり続けた結果、多くの人工物が氾濫する世の中になってしまった。人類はここにきて、モノには限度というものがあることを知り、これまでに得た知識を総動員して、ある重大かつ重要な問題解決に取り組んでいる。

「環境」ということばを人類がはじめて発したのは、果たしていつのことだったのだろうか。現代の人類は、このたった2文字のことば「環境」を合言葉に、これから人類が進むべき道はどの未来へと続く道か、議論してきている。

モノを多くつくったのはいいのだが、つくりすぎて邪魔なので、棄てようとするようになった。こうして棄てられた廃棄物は、その行き場を失い、しかも永久に無くならない。私たち材料屋も環境のことを考えなくてはならない。

そんな中、材料屋は4Rという賢い考え方を思いついた。4つのRとは、すなわち、モノを扱う選択肢のことで、これまでは「棄てる」「燃やす」程度しか無かった選択肢が一気に増えた。「もう一度使う（使い続ける）」（Reuse）、「修理してもう一度使う（使い続ける）」（RepairまたはRebuild）、「加工して別のものにもう一度使う」（Recycle）、その結果、廃棄物もあらたな投入資源も「減らすことができる」（Reduce）である。

本章では、エネルギー消費構造分析から、人類がいかにエネルギー依存型であることを示し、人類が描いた省エネ技術を紹介し、最後にこれからの材料の在り方を考えてみたい。

2-2 人類のあゆみ

2-2-1 産業革命（工業化が招いた環境問題）¹⁾

18世紀後半から、人類は急速な産業発展に伴いエネルギーを大量に消費するようになった（Fig. 2.1）。この皮切りとなったのが、産業革命である。産業革命とは、18世紀後半から19世紀にかけて主に西ヨーロッパで起こった工場制機械工業の導入による産業の変革と、それに伴う社会構造の変革のことである。産業革命は、石炭や蒸気機関を動力源とする軽工業中心の発展である第一次産業革命と、石油や電気モーターを

動力源とする重工業中心の発展である第二次産業革命に大別される。特に、第一次産業革命は、18世紀にイギリスに興り、フランス・ドイツなどではその影響を受けつつ、19世紀に入ってから本格化した (Fig. 2.2)。イギリスで興ったものが自主的なものであったのに対し、フランス・ドイツなどでは国家の果たした役割が大きかった。イギリスでは、燃料としていた木炭の消費が激しくなったことで森林破壊が深刻化し、こうした中、燃料は木炭から石炭に切り替えられた。第一次産業革命が、「燃料革命」であった所以がここにある。その後、各国とも第二次産業革命へと歩みを進めた。我が国では、明治維新後の政府の殖産興業政策によって、産業革命が興った。第一次産業革命の典型が富岡製糸場、第二次産業革命の典型が八幡製鉄所である。

しかし、産業革命は多くの社会問題を生んだ。大量生産により、物価が下がった反面、劣悪な環境での半ば強制的な労働といった労働問題、都市のスラム化による衛生面の悪化などが生じた。また、都市部では、工業化による都市への労働者の集積で、各地で都市化が進行し、住環境の悪化、人口の過密、治安の悪化など新しい社会問題をも招いた。

産業革命と地球温暖化には密接な関係がある。統計量をみてみると、産業革命が興った18世紀後半頃から、大気中の二酸化炭素 (CO₂) の濃度が、200年前と比べて30%ほど増加した。

エネルギーの転換と産業発展の中で、人類は知らず知らずのうちに、自分の首を絞め始めたのである。

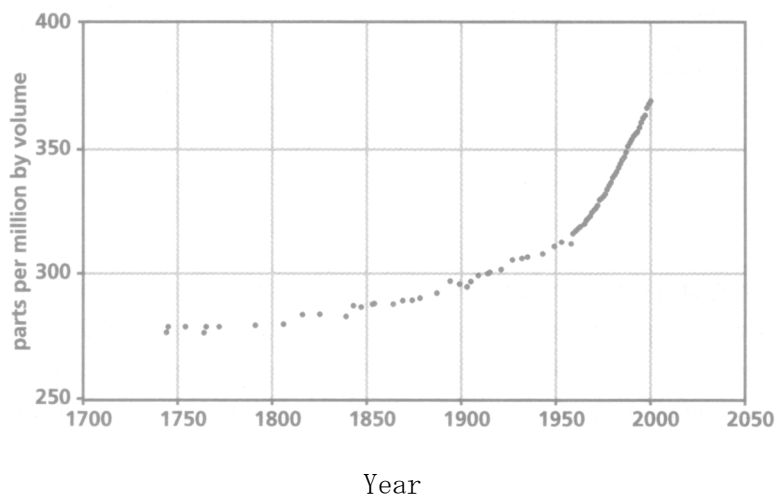


Fig. 2.1 Carbon dioxide concentration in the atmosphere
(Sources: UNEP*; U. S. DoE**).²⁾

* UNEP: United Nation Environmental Programme

** U. S. DoE: U. S. Department of Energy



Fig. 2.2 World industrial production (Sources: UN^{***}; PRB^{****}).²⁾

*** UN: United Nation

**** PRB: Population Reference Bureau

2-2-2 プラザ合意（経済変化が環境に及ぼす影響）¹⁾

プラザ合意は、1985年9月22日、アメリカ合衆国ニューヨークのプラザホテルで行われたG5（先進5カ国蔵相・中央銀行総裁会議）により発表された、為替レートに関する合意のことである。これは、当時のアメリカ合衆国の対外不均衡解消を名目とした協調介入への合意である。対日貿易赤字の是正を狙い、ドル安円高政策を採るものであった。この合意の一年後には、ドル円レートは、1ドル235円からほぼ半減の1ドル120円台での取引が行われるようになった。

1980年代のアメリカでは、貨幣的需要インフレーション（すなわち、経済全体で見た需要と供給のバランスが崩れ、物価が上昇つまり貨幣価値の低下。その原因のひとつとして、貨幣の過剰な供給）の抑制を目的にした厳しい金融引締めが行われていた。金利は2桁に達し、世界中の資金が同国へ集中した。結果、ドル相場は、高めで推移することとなり、輸出減少と輸入拡大をもたらした。高金利による民間投資抑制と重なり需給バランスが改善、インフレからの脱出に成功したが、結果的に、膨大な貿易赤字を計上することとなった。その後、インフレ沈静化に伴い、金融緩和が進行した。景気回復で貿易赤字増大に拍車がかかった。金利低下により貿易赤字の同国のUSドルへの魅力が薄れるに伴い、ドル相場は次第に不安定化した。1970年代末期のようなドル危機

の再発を恐れ、先進国による協調的ドル安の実施を図るため、このプラザ合意がなされた。

この合意を受け、日本では急速な円高が進行し、円高不況の発生が懸念されたために低金利政策が採用／継続された。この低金利政策が、不動産や株式への投機を加速させ、バブル景気に加熱をもたらした。また、円高により日本経済の規模は急拡大した。「半額セール」とまで言われた米国資産の買い漁りや、海外旅行のブーム、賃金の安い国への工場移転などが相次いだ。

このように経済の発展（実質 GDP や名目 GNI）の影響も温暖化の背景に関与してきており、さらに言えば、これからの途上国の経済発展も例外なく温暖化に影響してくる。その中であって、先進国がまずやらなければならないことは、これまで自らの経験を活かし、途上国の技術開発を「環境配慮型」へとシフトさせることである。

2-2-3 現況（原油価格の高騰）

エネルギー源としてプラスチックの原料として、石油はその需要を拡大してきた。世界で採掘されている石油の実に8割が、中東・中央アメリカ・北アメリカの地域で採掘されている。今の世界情勢からすると、各地域に対する人々のイメージは「戦争」であり、実際、この「戦争」により石油リスクは高まっている。Fig. 2.3 および Fig. 2.4 は、ここ最近の原油価格（ドル／バレル）の変動を表したものであるが、イラク戦争後、価格は上昇しており、世界は供給インフレ（コスト・プッシュ・インフレ）となっていることがわかる。日本のガソリン燃料の場合、Fig. 2.4 内の JPY/L（原油1リットルあたりのコスト（円））の値に約60円のガソリン税が加算されて、現場価格（プライス）となる。原油の確認埋蔵量／年間石油製品生産量の比（R/P）から推定される、枯渇までのタイムリミットである約40年間を考えると、人類は、エネルギー源としての石油を、他の高効率のエネルギー源に転換すべきである。

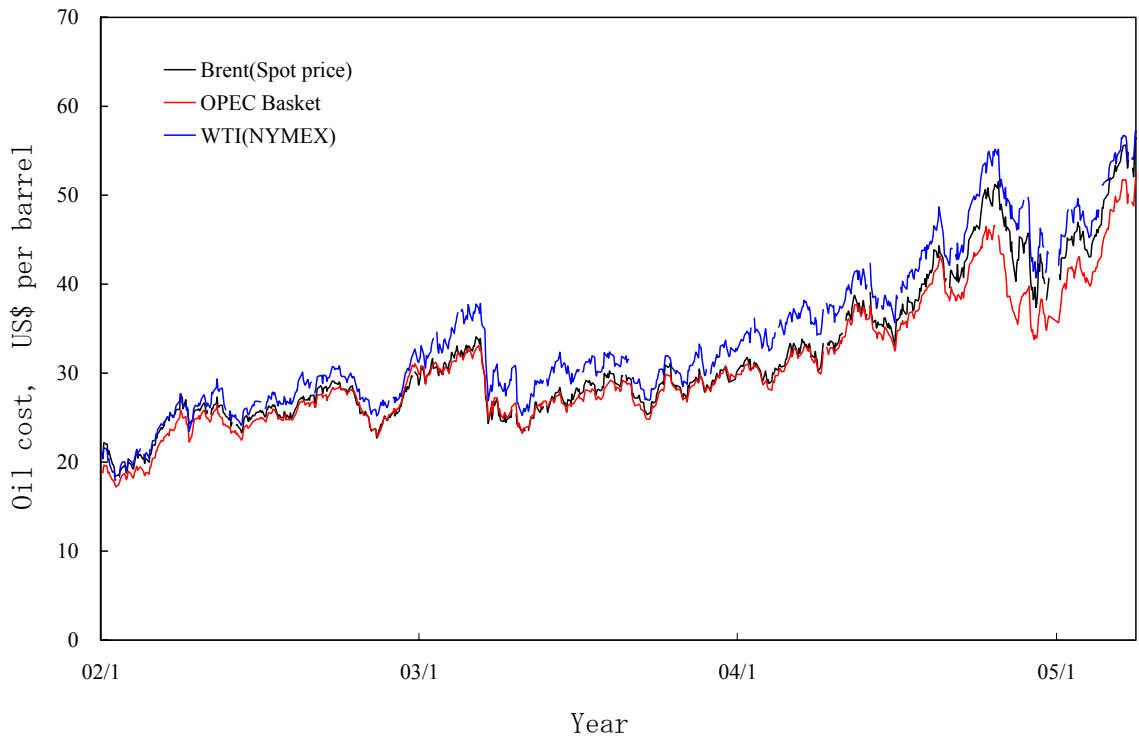


Fig. 2.3 Changing of oil costs.³⁾

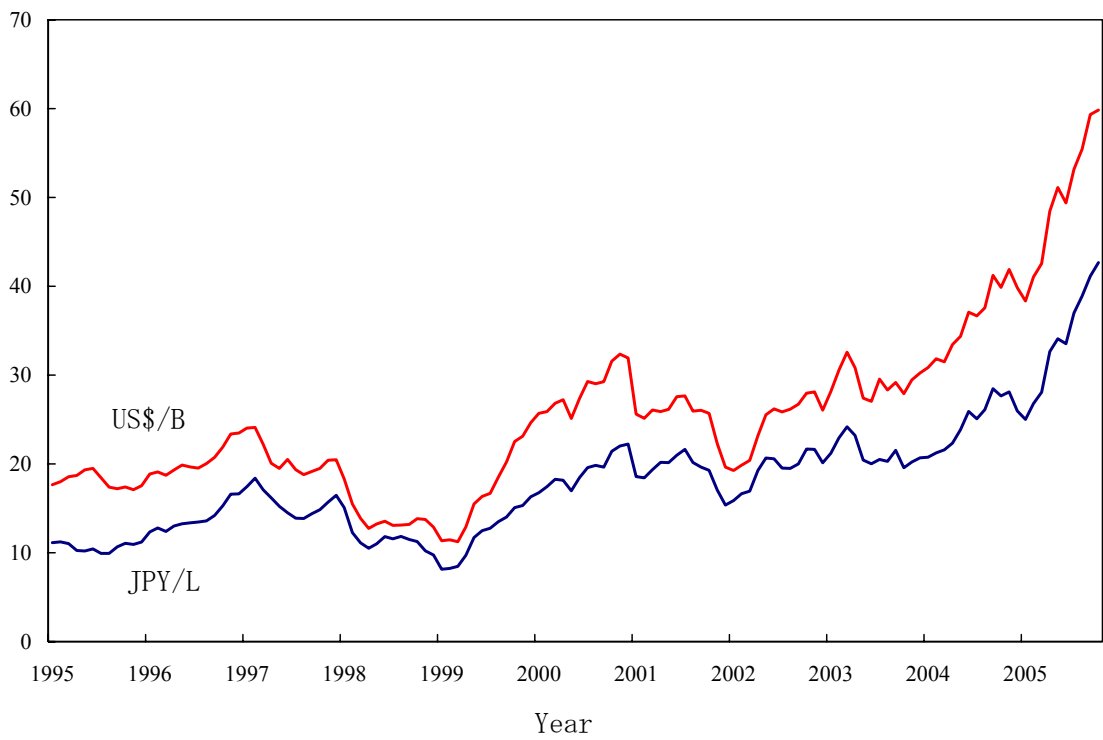


Fig. 2.4 Changing of long term oil costs (US\$/barrel and JPY/liter base).⁴⁾

2-2-4 環境問題は「環」

地球環境問題とは、「気候変動」からはじまり「温暖化」「酸性雨」「大地の砂漠化」「大気汚染」「海洋汚染」など、多くの問題をひとくちに言うもので、これらを含んだ言い方である。いずれも、地球上で人類が安心・安全に生活していくための環境を脅かす問題である。人類が生活するうえで行う活動を「人為的活動」と称するが、環境問題はこの人為的活動により引き起こされた。言い換えれば、地球は人類に対し、安心・安全の生活の場を与えたのに対して、人類は、農業革命・産業革命・経済革命を経て、地球を苦しめ（すなわち、自らの生活環境を自らで悪化させる）、恩を仇で返している格好になっている。しかし、それら問題は綿密に関わりあっていて「環」をなしており、どこかひとつを改善すると、他の問題も連鎖的に改善されると考えている。人類は、環境破壊を起こしてしまった同じ社会システムを使って、今度は環境改善をしてゆかなければならない。そのためには、いまの社会システムの中で、いま何がどうなっているのか、それに関して世界のエネルギー消費構造の分析を通じて把握してみたい。

2-3 エネルギー消費構造分析

2-3-1 世界における地域ごとの一人当たりエネルギー需給^{5)~8)}

Fig. 2.5には世界における地域ごとの一人当たりエネルギー供給量ならびに部門別最終エネルギー消費量を示したものである。0のラインより右側は最終エネルギー消費量を産業・運輸・民生・非エネルギーの部門ごとに示し、左側は発電時などに生じるロスを表す。棒グラフの全体で1次エネルギー供給量を示す。1971年から2001年の30年間のデータであるが、この図から以下の3点が読み取れる。

(1) この30年間で南北問題はほとんど解消されていない

1971年のOECD諸国の最終エネルギー消費量と非OECD諸国の一人当たり最終エネルギー消費量の比は5.3:1であり、2001年のそれは5.0:1である。つまりこの30年間で格差はほとんど縮まっておらず、南北問題は解消されていないと言える。2001年、OECD諸国の人口は約11億人、非OECD諸国の人口は約50億人である。つまり世界人口の2割の人間が半分以上のエネルギーを消費しているという非常に偏った状態が続いていると言える。

(2) OECD諸国においては世界平均より運輸部門およびエネルギーのロスが大きい

2001年のデータで見るとOECD諸国では総エネルギー供給量における運輸部門の消費

エネルギーの割合は23%である。一方非OECD諸国においては12%であり大きな差が見られる。この原因は輸送原単位の大きい自家用乗用車およびトラックの普及による差であると考えられる。

(3) 中国・インドの伸び率が非常に大きい

非OECD諸国における1971年～2001年までの最終消費エネルギーの伸びは31%である。一方中国・インドにおけるそれは92%、57%であり、非OECD諸国の平均を大きく上回っている。現在人口が世界一の中国と今世紀前半には中国を抜いて人口世界一になると予測されているインドのエネルギー消費量がこのまま成長したとすると、今世紀中にもエネルギー需給が逼迫することは容易に想像がつく。

以上のように地域ごとのエネルギー消費を分析すると色々な意味で偏ったものであることがわかる。このことを踏まえて次項では部門別のエネルギー消費をさらにエネルギー源別に見て詳細な分析を加え、さらに部門ごとの省エネポテンシャルとその難易度について考察を行う。

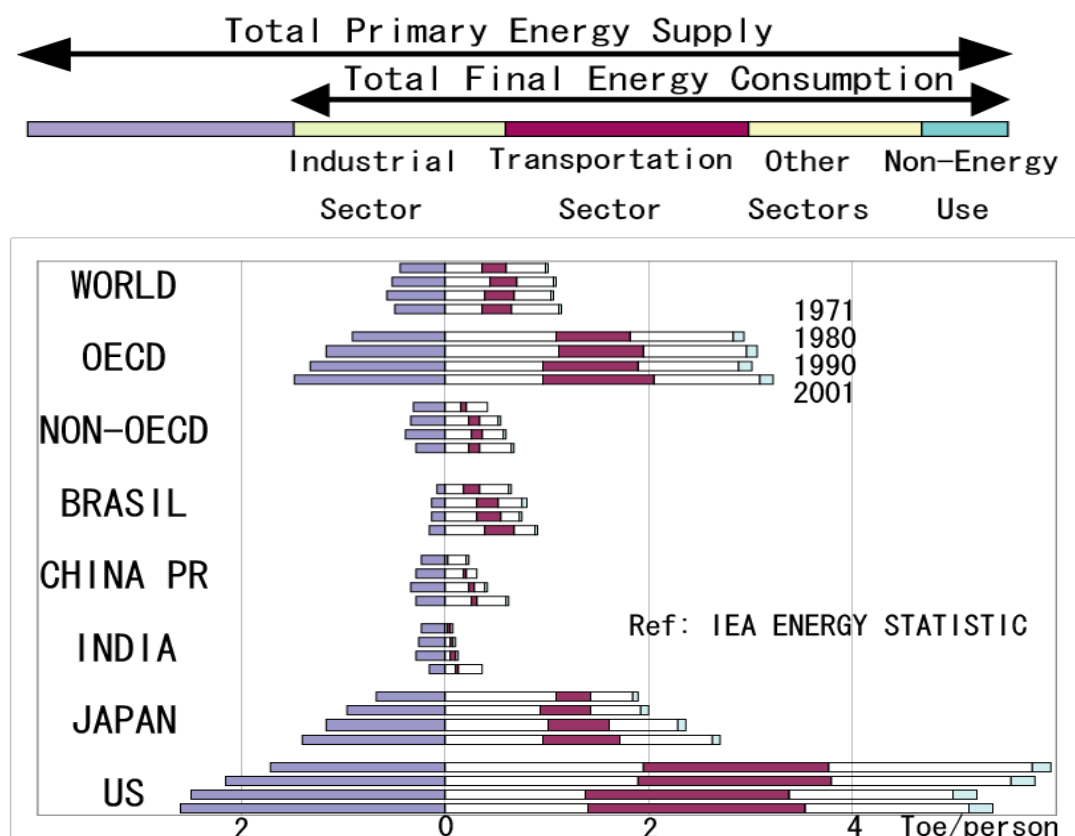


Fig. 2.5 Amount of total primary energy supply and final energy consumption in each sector per capita.

2-3-2 部門別消費エネルギー

2-3-2-1 部門別・エネルギー源別消費エネルギー⁹⁾

ここでは産業・民生・運輸の各部門でこういったエネルギー源が、どのくらい消費されているのか、について分析を行う。Fig. 2.6は全世界における部門別のエネルギー消費割合とエネルギー源を示す図である。運輸部門はほとんど石油のみに依存しており、また、30年前と比べて他の部門が省エネ傾向にあるのに対し、運輸部門の消費エネルギーは増加している。また、Fig. 2.7は日本の例ではあるが運輸部門でのエネルギー消費のほとんどが自家用乗用車とトラックによることがわかる。すなわち、非OECD諸国のモータリゼーションにより石油はまず間違いなく供給不足になり、天然ガスも同様であって、自動車の燃費向上が緊急の課題であることが理解できよう。

2-3-2-2 部門ごとの省エネポテンシャルと難易度

次に、将来、再生可能エネルギーが豊富に利用できるようになったとして、究極的にはどこまで化石燃料の使用を抑制することができるのかを日本を例にとって考える。Fig. 2.8に示すように、産業部門はオイルショックを経験してからの省エネ努力が実を結んでおり、消費エネルギーはそれほど増加していないが、民生と運輸部門は増加の一途をたどっている。

民生部門

まず2001年度の日本の民生（家庭・業務）部門でのエネルギー消費量は99Mtoe（一人平均約0.8toe）で、その内訳は主にLPGとして使用される原油が36%、ガスが16%、電力（エネルギー変換効率約40%）が48%となっている。ガス・LPGは給湯や暖房に利用されているがこれらは容易に電化が可能なものであり、民生部門においては100%の電化（家庭用燃料電池によるエネルギー変換効率は約40%だが、低温の熱を給湯・暖房に使用できるので、総合効率は約70%）が可能であると言える。よって、暫定的には天然ガスを約半分に節約しながら使用し、将来再生可能エネルギーが豊富に利用できるようなれば、民生部門での化石燃料の使用量は（すなわち二酸化炭素排出量も）ほぼゼロにすることが可能である。

産業部門

2001年度の日本の産業部門でのエネルギー消費量は171M toe（一人平均約1.3toe）である。この部門においても多くの分野で電化とコージェネレーション（総合効率を約1.5倍に向上）を行うことが可能であると考えられ、高温で作動する高効率燃料電池（エ

エネルギー変換効率 50~60%) の利用が可能であることから、総合効率は従来の発電の2倍以上となって天然ガスを半分以下に節約しながら使用でき、再生可能エネルギー社会を待つことが出来る。ただし、鉄鉱石を還元するためにコークスを用いざるを得ない鉄鋼業、プラスチックの原料として原油を用いざるを得ない化学工業に関しては、OECD 諸国では廃棄物や既存人工物による高炉還元やマテリアルリサイクルも可能であるが、非 OECD 諸国では新規製造のための化石燃料の使用はやはり免れない。日本の 2001 年度のデータでは、鉄鋼業と化学工業の総エネルギー使用量はそれぞれ産業部門の 24%, 30% であるが、原料の化石資源だけでもエネルギー換算でそれぞれ産業部門の 18%, 24% を消費していることから推定できるように、この2分野（すなわち金属の還元とプラスチックの製造という基礎素材分野）における非 OECD 諸国の化石燃料の使用だけは大幅削減が困難と考えられる。

運輸部門

運輸部門の石油依存度の高さと自動車によるエネルギー消費の割合の大きさは Fig. 2.6 に示すとおりである。内燃機関のエネルギー変換効率（現在約 16%）は、将来的には軽油ハイブリッド車で約 41%（天然ガスハイブリッド車で約 38%）が可能とされている。なお、燃料電池車については、家庭用燃料電池よりも技術的ハードルが高いことに加え、低温の熱が利用できないため、総合エネルギー変換効率はそれほど期待できない（石油起源で約 40%、天然ガス起源で約 50%、再生可能エネルギー起源で約 50%）が、二酸化炭素排出量は現行のガソリン車よりも大幅に削減可能（石油、天然ガス、再生可能エネルギー起源でそれぞれ現行の約 31%, 28%, 0%）となる。すなわち、当面、温暖化対策の観点からは、軽油化、ハイブリッド化で石油を節約しつつ、CNG に切り替え、水素社会を待つというシナリオが妥当と思われるが、省エネの観点からは、石油起源のエネルギー効率の高さと価格の安さを考えれば、需給バランスが崩れ石油価格が高騰するまではエネルギー転換の動きは遅いと考えられる。

各部門のまとめ

以上、全部門を通して化石燃料消費量削減の可能性と化石資源枯渇の影響度を考えると、石油の残存量減少や価格高騰は自動車が原因となり、その影響を最も受けるのも自動車であることがわかる。なお、石油の次には天然ガスについても全く同じ事が言える。

また、逆に、以上では各部門において現行のエネルギー消費の数分の1にできることも明らかとなったが、石油枯渇と温暖化対策を考えると、さらなる効果的かつ即効的な技術が必要であると言える。これまでの日本の例を見てもわかるように、ライフスタイルと直接関係する運輸（旅客）部門と民生（家庭）部門のエネルギー消費量は産業部門等の省エネ努力とは別次元で今後伸びてくるものであり、技術でカバーする必要性の高い部門である。

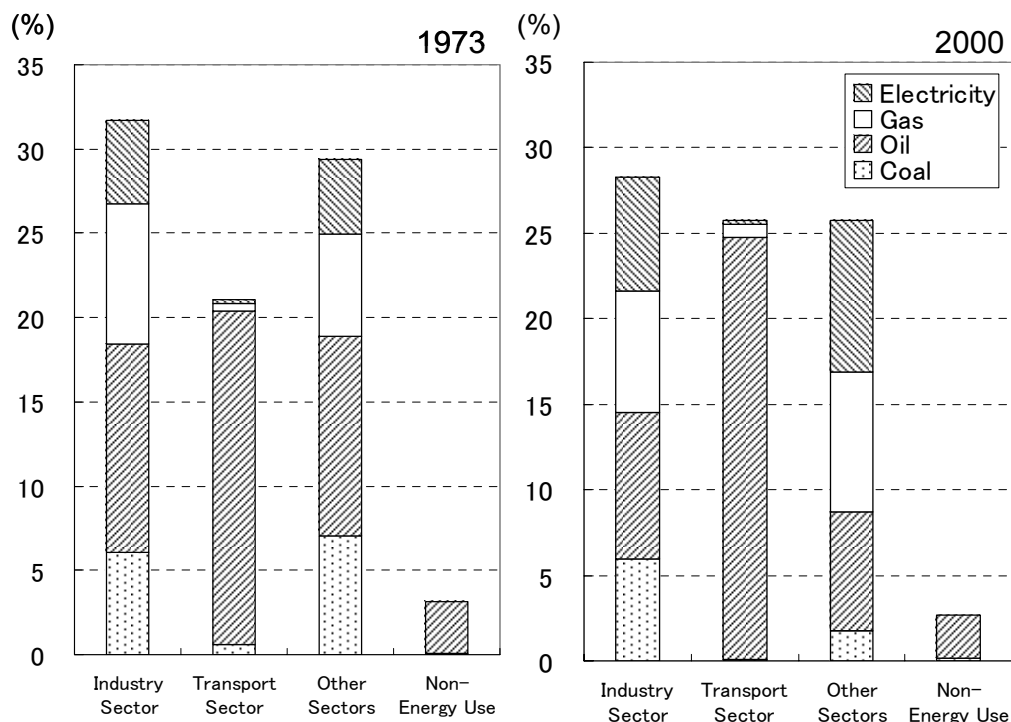


Fig. 2.6 Energy consumption rate in each sectors in the world.¹⁰⁾

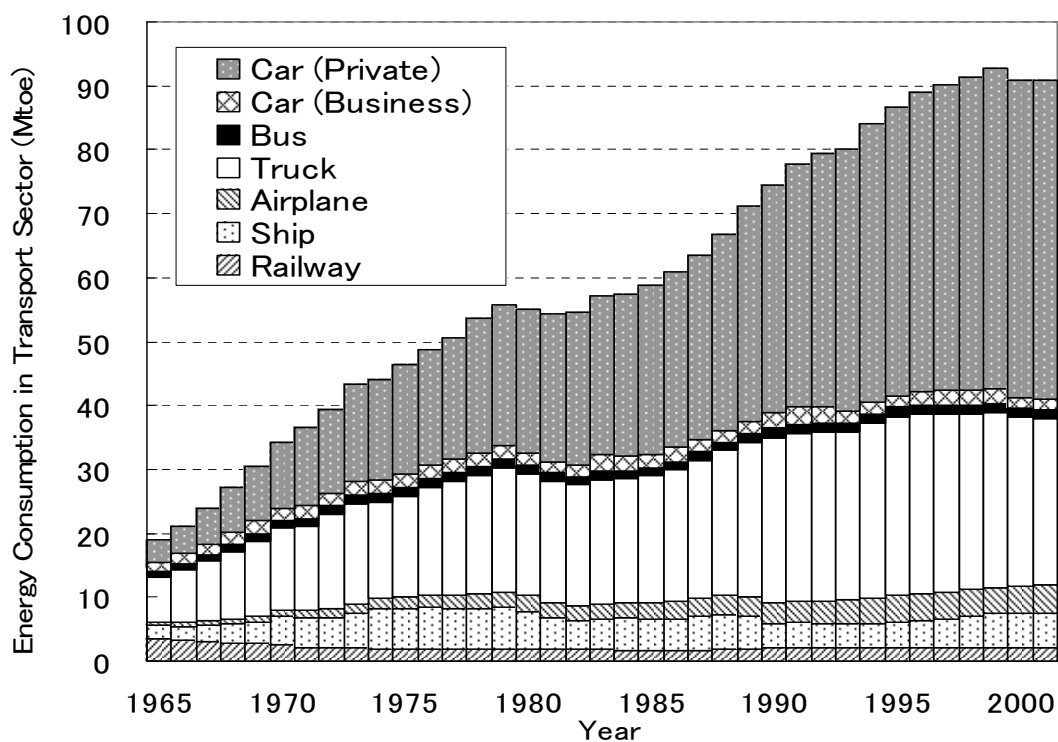


Fig. 2.7 Construction of energy consumption in Japanese transport sector.

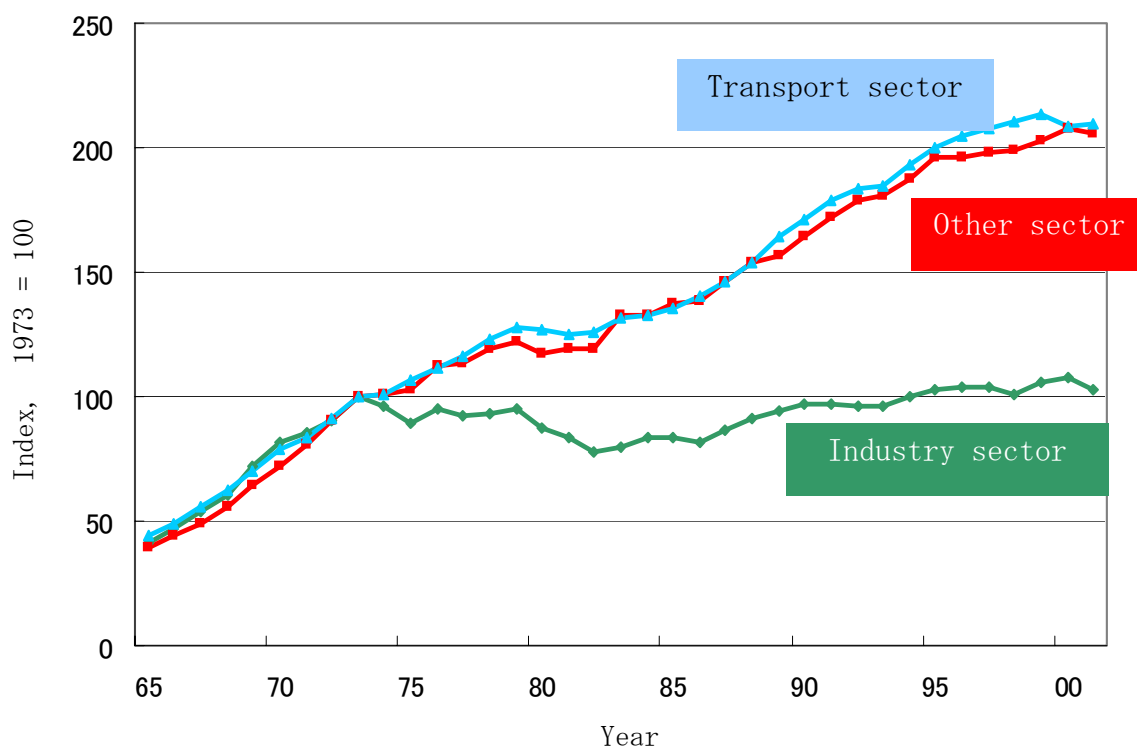


Fig. 2.8 Shift of energy consumption in Japanese each sectors.
(Energy consumption in 1973 is showed as 100)

2-4 注目される有力新興国BRICsの成長

前節で述べたように、地球温暖化およびエネルギー問題を考えた場合、未だ手付かずのところは運輸部門における化石燃料の使用である。運輸部門は、石油依存の部門であり、この部分の省エネも推進していかなければならない。人類がこれまでに開発してきた自動車は、今日まで多くの石油を必要としてきた。そういった自動車が、途上国で使用されはじめたら、さらに多くの石油を消費することになり、さらにはやく石油が枯渇する恐れがある。本章では世界のエネルギー需要の今後の見通しについて論じる。これには、これまでのGDP (Gross Domestic Product: 国内総生産) 推移、すなわち経済発展の歴史を見て、BRICsの中でどの国が最有力新興国なのかを見極める。さらに、この見通しには人口変化の影響を入れるため、国連の人口部会が2002年、2003年に相次いで発表した世界人口推移の長期予測について分析を加える。先進国とBRICsのGNI (Gross National Income: 国民総所得) の比較を参考のためFig. 2.9に示す。

2-4-1 GDPの推移

B R I C s の実質GDPの推移 (Fig. 2. 10) をみてみると、中国が急速に経済成長しているのがわかる。これは、中国特需などにより、中国国内での産業革命が第2次産業革命に移行していることを示しており、これから日本が歩んできたと同様に伸びていくものと思われる。Fig. 2. 11 は中国と先進国のエネルギー効率（エネルギー消費量をGDPで除したもの）を示している。非効率であり、先進国の約30倍であった約40年前に比べ、最近では先進国の約10倍程度で推移している。すなわち、中国内需が増えており、なお、諸外国が中国内で生産ははじめていることがうかがえる。これらの結果より、今後中国が、他のブラジル、ロシア、インドに先駆けて、今後急激に伸びることは自明であり、近い将来の即効的な省エネ効果を論じるにあたり、この中国の影響は無視できないため、本研究では、中国の成長に重点をおいている。

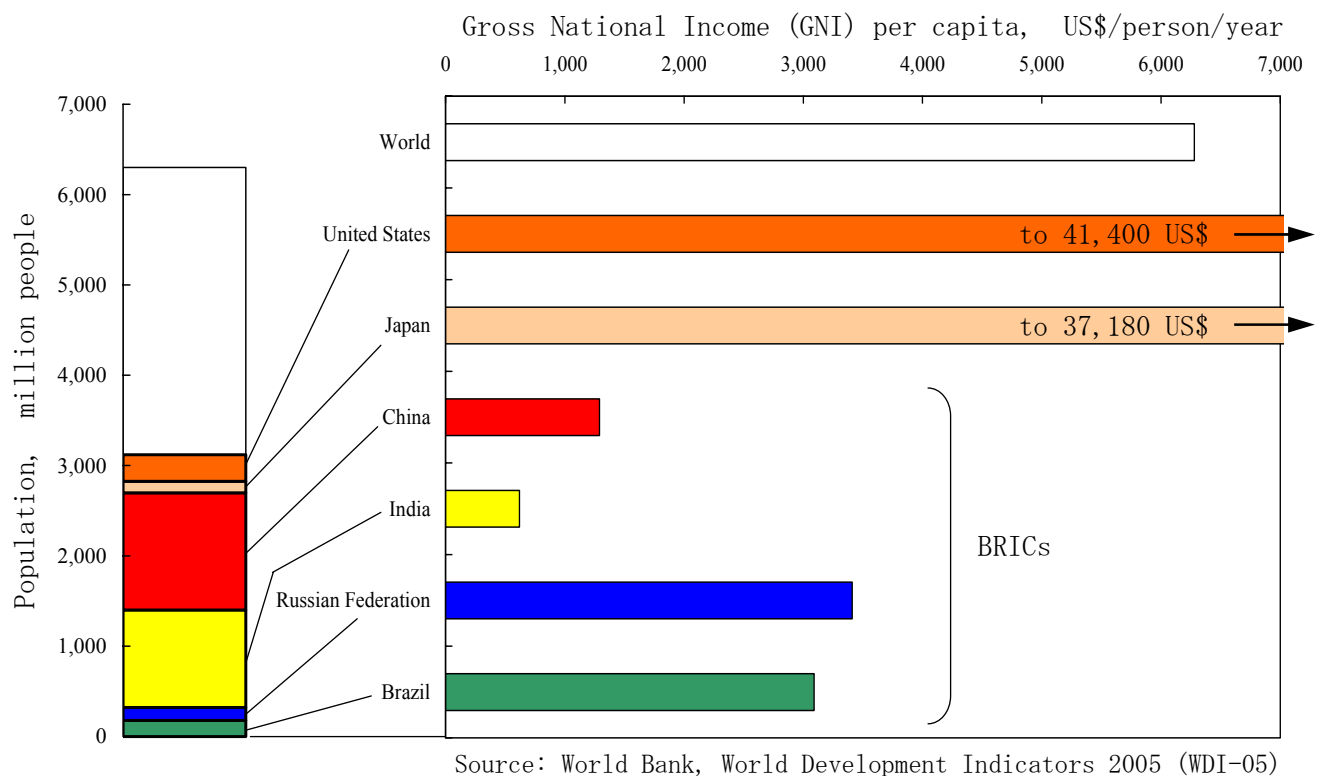


Fig. 2. 9 Gross National Income per capita in BRICs, Japan and United States, and World Average of GNI per capita.

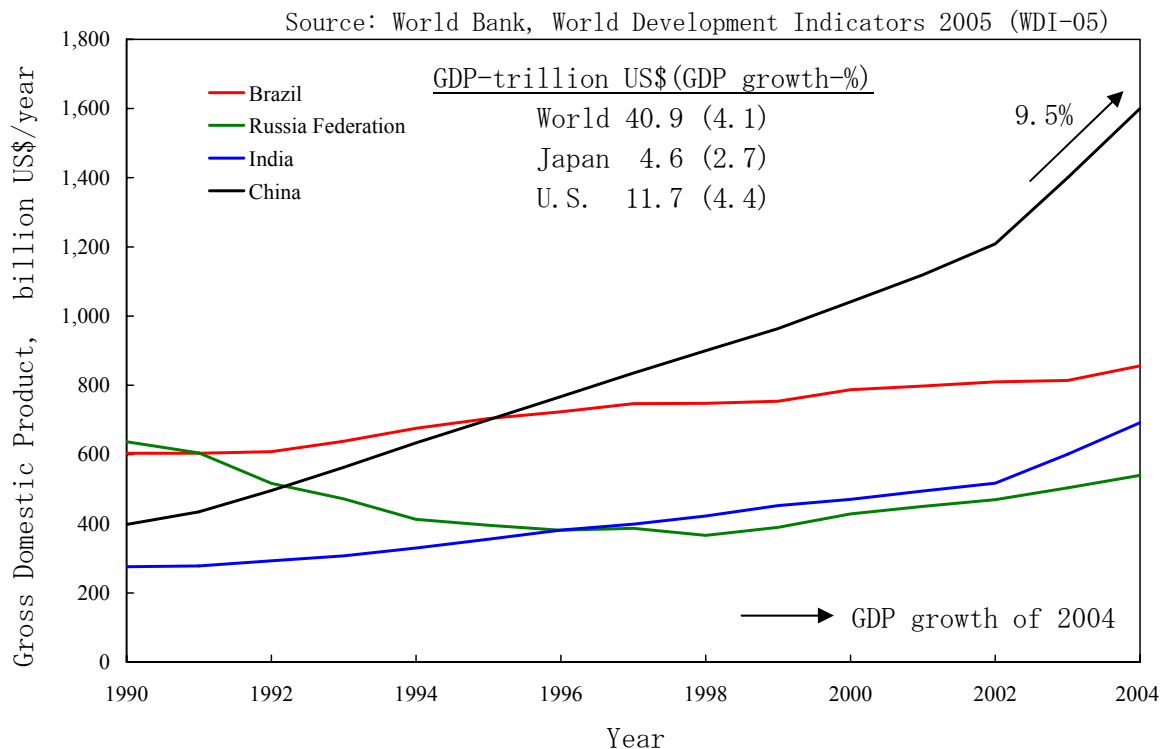


Fig. 2.10 Shift of GDP in BRICs.

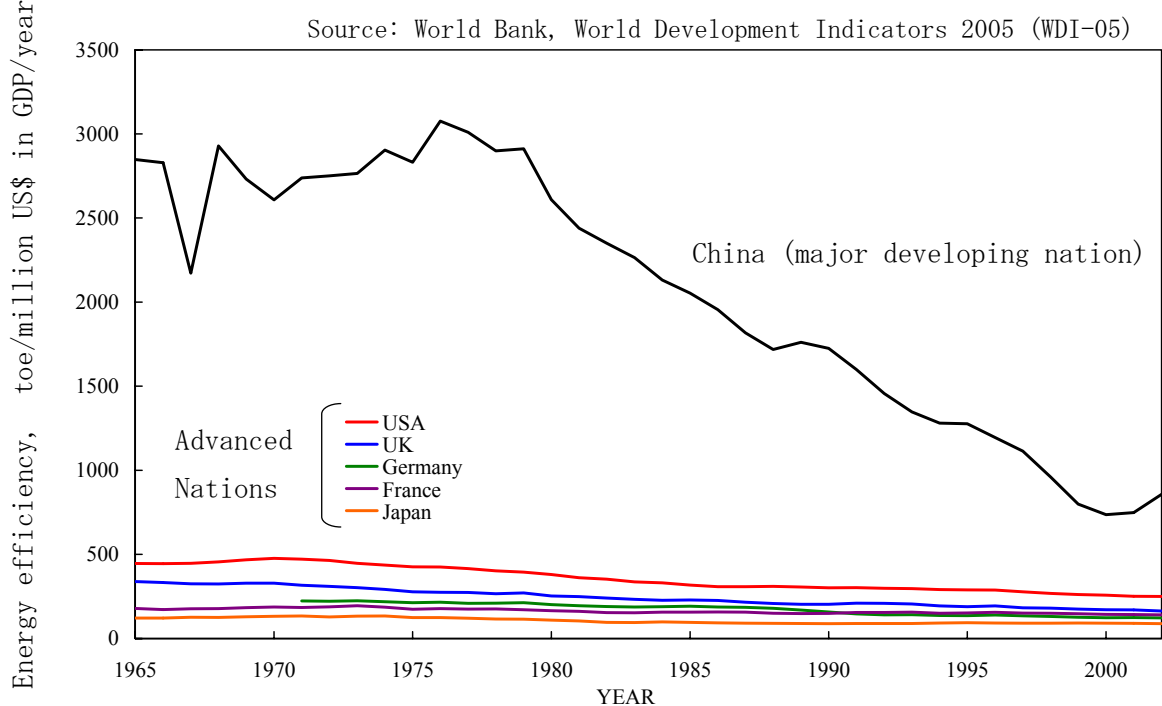


Fig. 2.11 Comparison of energy efficiency with advanced nations and China.¹¹⁾

2-4-2 人口推移予測

本節では、2002年に国連の人口部会による人口推移予測について述べる。国連の人口部会では、2002年の報告書¹⁴⁾では2050年までの、2003年の報告書¹⁵⁾では2300年までの人口の推移に関する超長期予測が行われている。

2050年までの世界人口の推移はFig. 2.12のように予測されている。2002年における国連人口部会の予測は、それまでの予測に比べて2点大きく変わっている。一つ目は出生率の見通しを下方修正したこと、二つ目はHIVの感染が人口の変化にもたらす影響をそれまでより大きく見積もったことである。この変化によりそれまでの予測に比べて2050年時点における人口は減少している。以下に予測の要点をまとめる。

- 出生率は低下するものの、今後50年間の間に人口は現在の63億人から90億人にまで増加する（中位推計）。また、現在の人口増加率を維持した場合2050年の世界人口は128億人、出生率を中位推計の半分と仮定した下位推計では74億人である。
- 世界人口の増加分は現在年間約7700万人だが、その半分はインド・中国・バングラディシュ・パキスタン・ナイジェリア・アメリカ合衆国の六国によるものである。
- 先進国においては今後50年人口はほとんど変化しない。中には減少することが予測されている国もあり、日本は14%、イタリアは22%、東欧や旧ソビエト連邦の国々には30~50%の減少が予測されている国もある。
- 一方、途上国では着実に人口は増加し、現在の49億人から77億人にまで達する。
- 全体的に出生率は低下するが、2050年時点において人口を維持するためのレベルである出生率2.1を上回る国は依然として多い。
- 平均余命は現在の65歳から74歳に上昇する。しかし、先進国・発展途上国・後発発展途上国ごとの平均余命の差はそれほど縮まらない。特に後発発展途上国においてはHIVの影響が大きい。
- 60歳以上の高齢者は現在約6億人だが、2050年にはその3倍を超える19億人まで上昇する。世界人口に占める割合では、現在8%だが2050年には20%近くまで上昇する。

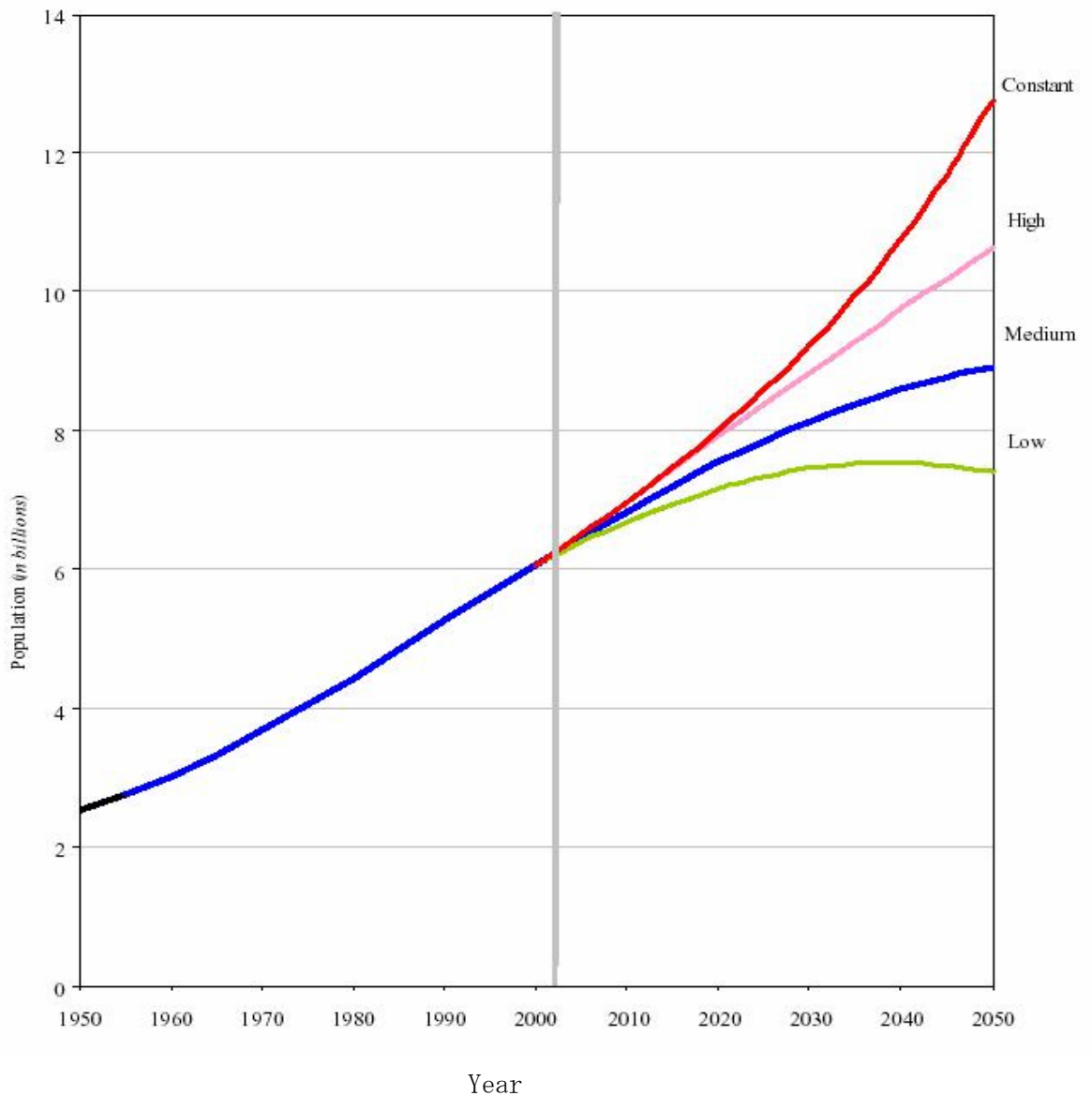


Fig. 2.12 Shift of World population.

Fig. 2.13 は、1650 年から現在までの世界人口増加の歴史である。産業革命後の 18 世紀半ば頃から人口はなだらかに増え続け、1750 年から 1950 年までの 200 年間で地球のかかえる人口は倍増し、1950 年からの 50 年間でさらに倍増 (2.4 倍) した。Fig. 2.14 や Fig. 2.15 からわかるように、前者の 200 年間の人口成長は現在の先進国と途上国同時の、後者の 50 年間の人口成長は開発途上国のみの経済発展に起因する。現在は、爆発的成長の最中にある。そして、この先の 100 年の間人口成長は続いていくものと考えられており、この開発途上国の経済活動による環境への影響が懸念されている。

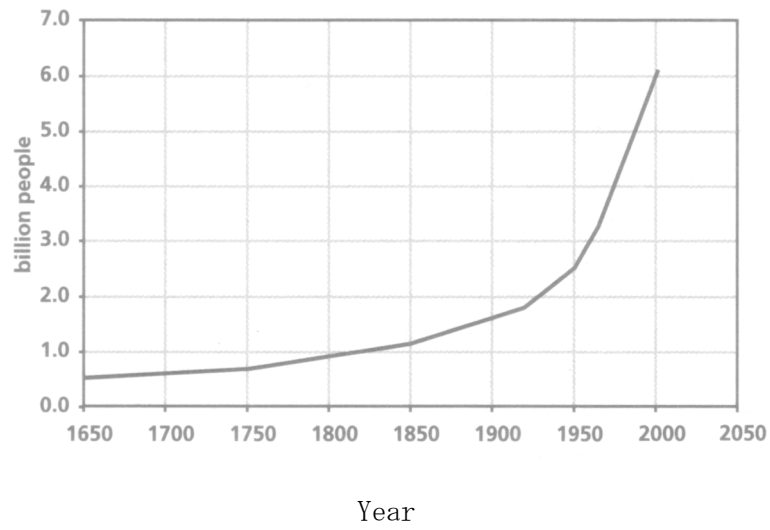


Fig. 2.13 History of World population.¹⁶⁾

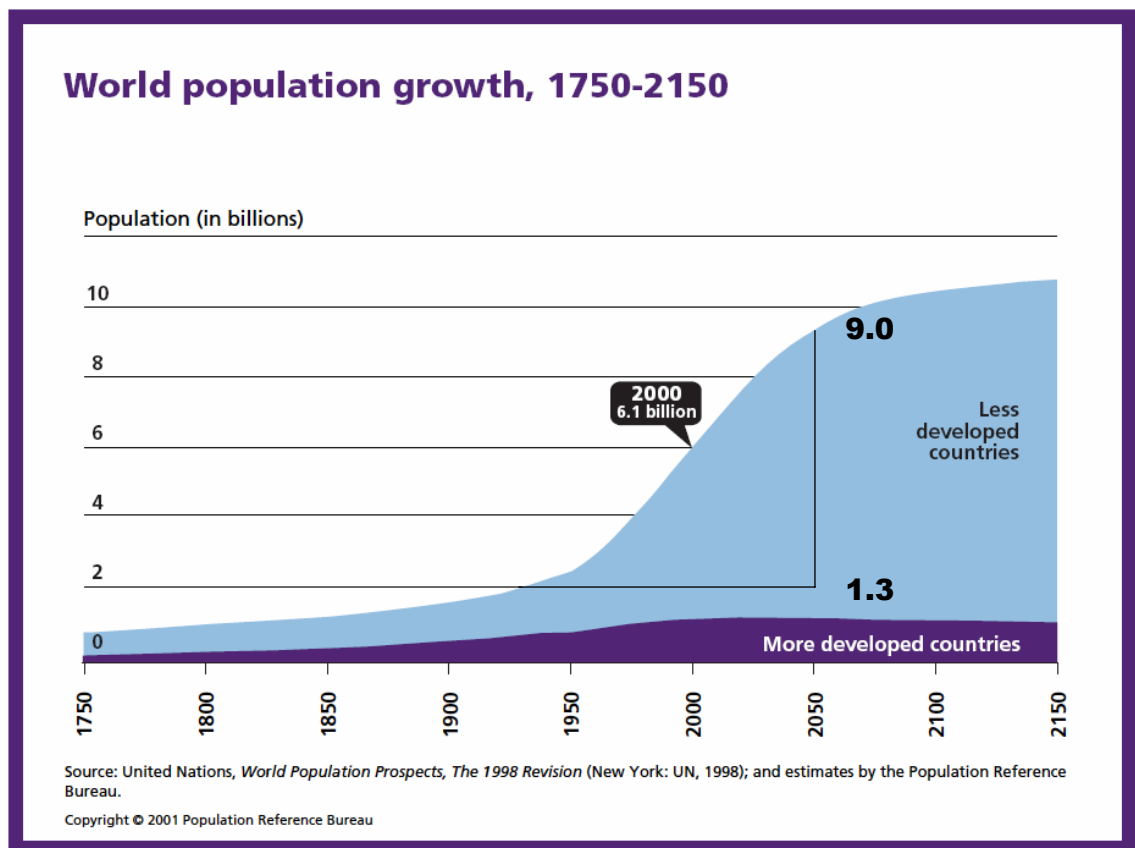
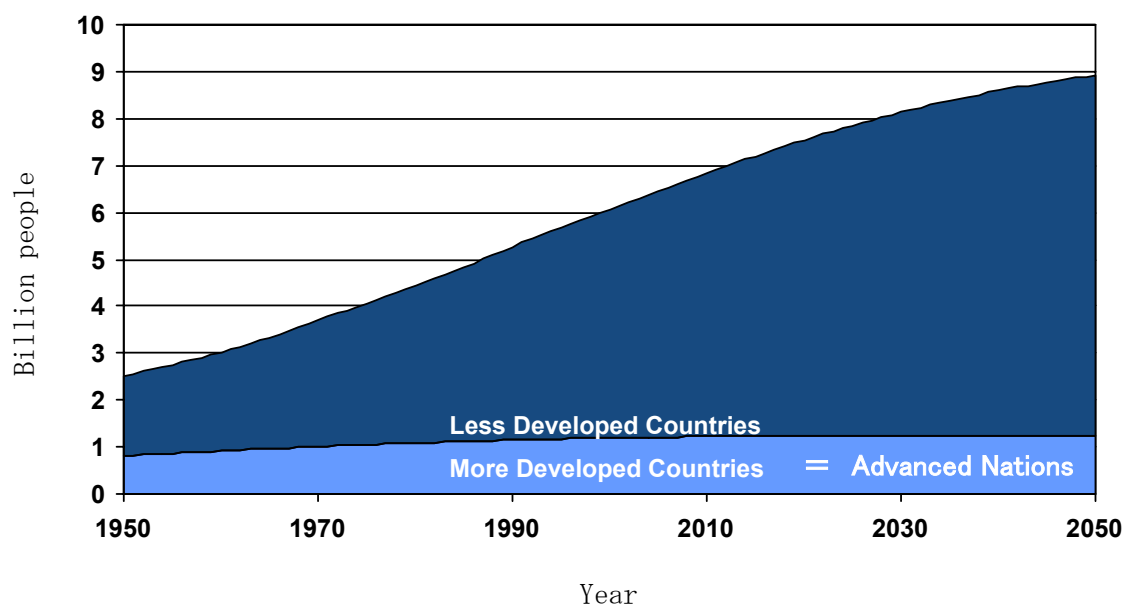


Fig. 2.14 Prediction of World population growth.¹⁷⁾



Source: United Nations, *World Population Prospects: The 2002 Revision (medium scenario)*, 2003.

Fig. 2.15 Growth in more, less developed countries.¹⁷⁾

2050年の時点で、世界人口は90億人に達し、そのうち、現在の先進国の人口は13億人(14.4%)であり、開発途上国の人口は77億人(85.6%)である。この8割強を占める国すべてが急激な成長をとげるわけではなく、おそらく有力新興国BRICsの成長が支配的になってくると考えている。これまでの先進国は、人口が比較的少ない国という歴史であったが、これからはこういった人口の多い国々がこぞって成長してくる。そうなってくると、限られた資源の中で、先進諸国およびこれらの国々のエネルギー消費に対し、どのように資源を手当てしていくか、という問題が生じる。次節では、このようなエネルギー消費の現状と未来を述べる。

2-4-3 エネルギー消費推移予測

2-4-3-1 IEAによるエネルギー消費推移予測^{18)~20)}

2000年から2030年の世界の経済成長率を年平均3.0%(OECD2.0%, 市場経済移行国3.1%, 発展途上国4.1%)との前提をおく。すると、世界の一次エネルギー供給は2000年の9,180 Mtoeから年平均1.7%で増加し、2030年には15,270 Mtoe(2000年比で66%

増)に達すると予測されている。

この見通しを地域別に見ると、今後の世界の1次エネルギー供給増加分のうち6割以上は開発途上地域で発生する(Fig. 2.16)。また、その中でも特にアジア地域のエネルギー需要の増大が予測されている。先進地域における2000~2030年の年平均増加率が1.0%にとどまるのに対し、アジアを中心とする開発途上地域では2.9%とほぼ3倍の増加率が予測されている。その結果、世界の一次エネルギー供給に占める先進地域のシェアは2000年の58%から2030年には47%に低下し、逆に開発途上地域のシェアは30%から43%に増大すると見られている。

次に、この見通しをエネルギー源別に見ると(Fig. 2.17)、現在世界のエネルギーの太宗を占める石油は開発途上地域での堅調な需要増加などに支えられ、一次エネルギー供給全体と同程度の伸び率(1.6%)が予測されている。主力エネルギー源の中で最大の伸びを示すのは天然ガスで、発電用、産業用などを中心に今後30年間で平均2.4%増加すると見られている。一方、石炭、原子力は一次エネルギー供給全体の伸びより低めの需要増加が想定され、特に原子力は欧米先進地域での新規開発が停滞していくと予測されていることから、2030年までの年平均増加率はわずか0.1%にとどまる。その結果、各エネルギーの2030年におけるシェアは、石油はほぼ現状並みの38%、天然ガスは28%にまでシェアを大きく増大させ、逆に石炭、原子力はそれぞれ24%、5%まで低下する。依然として、石油、石炭、天然ガスなどの化石燃料がエネルギーの太宗(約8割)を占めると予測されている。なお、再生可能エネルギーは今後高い増加率が予測されるものの2030年でもそのシェアは4%にとどまると見られる。

この見通しについて部門別にエネルギー源を見た場合、運輸部門においては、依然として、石油が9割以上のシェアを持つと予測されている。発電部門においては、石油の割合は現状から半減の4%程度にまで落ち込む一方で天然ガスの割合が大幅に増加し、31%に達すると予測されている。また、産業部門、民生部門では電力のシェアが増大すると予測されている。

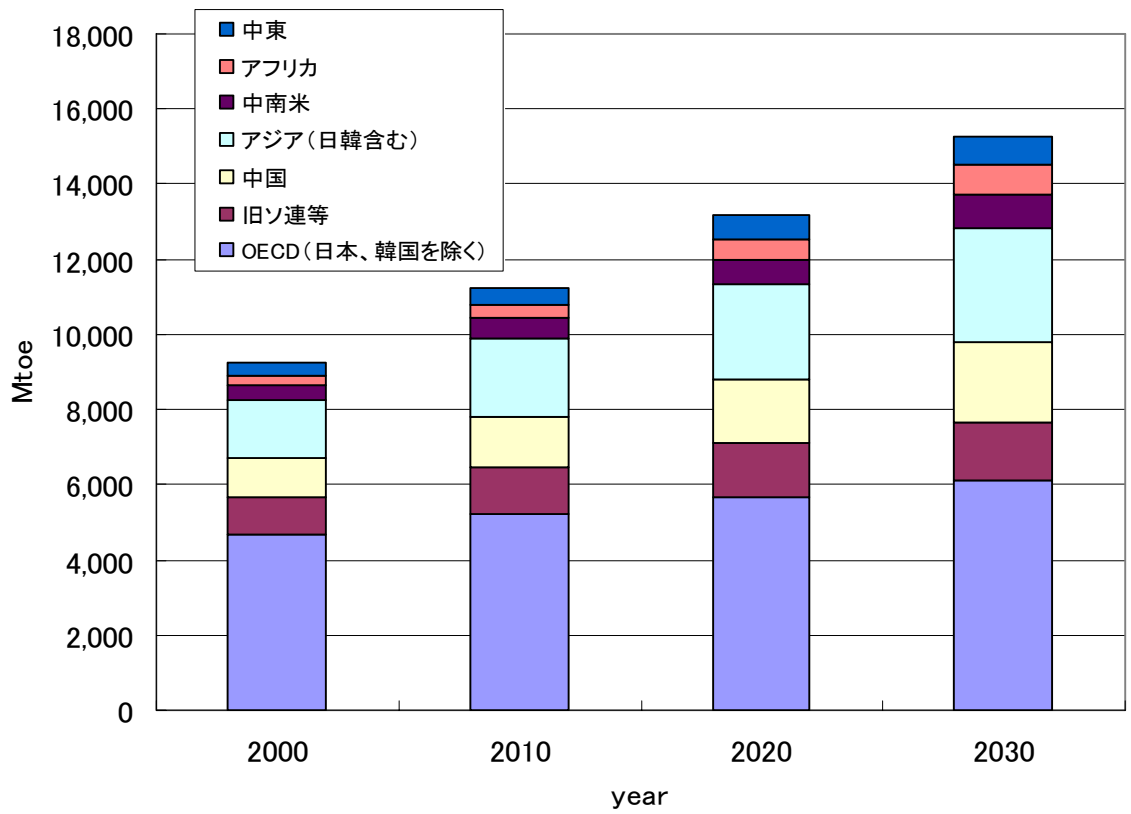


Fig. 2.16 Prediction of energy consumption in each area by IEA

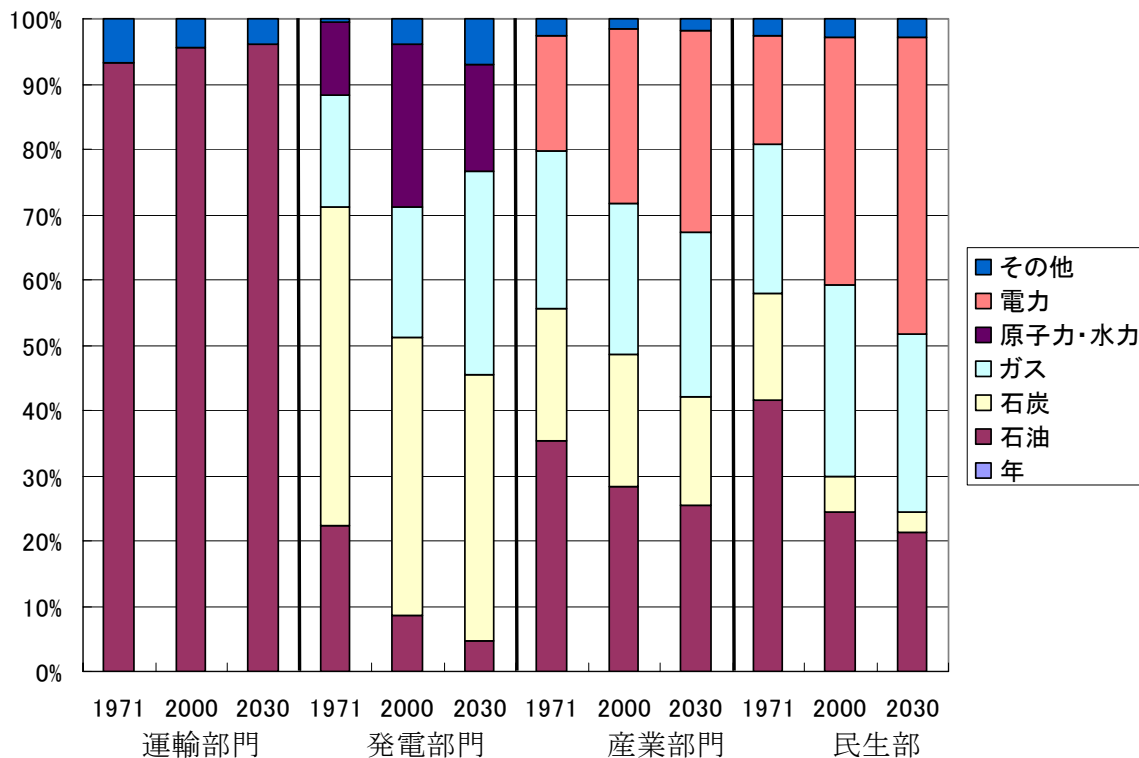


Fig. 2.17 Prediction of energy resources construction in each sector by IEA¹⁾

2-4-3-2 IPCCによるエネルギー消費推移予測^{21)~23)}

2000年3月15日深夜、ネパールのカトマンズで開かれた気候変動に関する政府間パネル (Intergovernmental Panel on Climate Change: IPCC) 第3作業部会第5回会合において、IPCCの新しい排出シナリオが承認された。IPCCではシナリオの作成に当たり、[1]対策をとらない場合の気候変動の影響を評価するため、[2]対策を行った場合の気候変動の影響を評価するため、[3]異なる地域、部門、時間軸の中で、温室効果ガスの排出を抑制する可能性と費用を分析するため、[4]国家間における削減可能量を取り決めるため、の各入力情報を挙げている。地球温暖化がどの程度進むかは、自然の不確実な挙動を別にすれば、われわれ人間社会がどのような方向に発展するかによって大きく左右される。つまり、将来の社会の描き方により、エネルギー利用や土地利用変化の予想が大きく変わり、温室効果ガスや硫黄酸化物などの排出シナリオが大きく変化する。その結果、温暖化の予測に大きな差が生まれ、温暖化対策にも大きな違いが出てしまう。

4つの叙事的シナリオ(「ストーリー・ライン」と呼ばれる)は、いずれも地球温暖化の軽減のための政策を含んでいない。4つの異なった発展方向を示し、今よりも一般的に豊かな将来世界を描いたものである。これら4つのシナリオは全て、一般に今日よ

りも豊かな将来の世界を描写したものである。これらのシナリオは、単純に「A1」、「A2」、「B1」、「B2」という記号で簡単に呼ばれる。以下に、各シナリオの概要を説明する。

A1 シナリオ

低人口成長のもとでの高度経済成長シナリオ。高い技術開発が続く。世界の地域間の壁は縮小し、地域間の社会構造、1人あたり所得とも、次第にある方向に収束に向かう。なお、世界エネルギー会議（WEC）の排出シナリオと同様、エネルギーにおける技術変化の方向性により、A1B（バランスの取れたエネルギー消費）、A1C（石炭主導型）、A1G（ガス主導型）、A1T（高効率エネルギー技術主導型）という4種類の細分類がある。

A2 シナリオ

地域主義の高いシナリオ。各地域はブロック化し、独自の伝統的文化の枠組みをあまり崩さない。また、自由貿易に基づく経済的効率性に高い価値をおかない。この結果、人口は最も増大し約150億人に達する。エネルギーも地域内の資源に依存する割合が高く、技術進歩も相対的に低い。このため、アジアなど石炭の豊富な地域では石炭依存度が低下せず、温暖化ガス排出も高水準となる。

B1 シナリオ

低人口成長、高度経済成長はA1シナリオと同様であるが、低資源消費、クリーンエネルギーの開発および利用など、持続可能性に重きをおく形で技術選択が行われる。このため、経済水準自体はA1シナリオよりも下がる。地域主義より、地球主義の価値観が主導であり、結果として温暖化ガス排出量は2100年で1990年水準を下回る。温暖化対策をことさら取らなくとも社会全体として環境を重視するため、温暖化対策の追加的費用は小さくなる。ただし、そのような社会の実現には、現状からは大きな旋回が必要である。

B2 シナリオ

比較的地域主義が強く、その範囲で経済・社会・環境の持続可能性が追求される。このため、世界は多様性を残す。ただし、環境保全も意識されているため、A2シナリオほど極端な姿ではない。人口は国連の中位推計に従う。やや保守的であるが、中庸なシナリオと言える。

数の多いシナリオを扱いやすくするため、各ストーリーライン（A1、A2、B1、B2）についてこの特徴を最もよく反映したものを代表的ケースとして選び出し、「標識シナリオ」と決められた。標識シナリオは他のシナリオに比べて、現実性が高いわけでも低いわけでもなく、あくまで各ストーリーラインを例証しているとSRES作成チームが考え

たシナリオである。その4つのシナリオ(A1B-AIM, A2-ASF, B1-IMAGE, B2-MESSAGE)が示す2050年までの1次エネルギー供給量をFig. 2.18に示す。

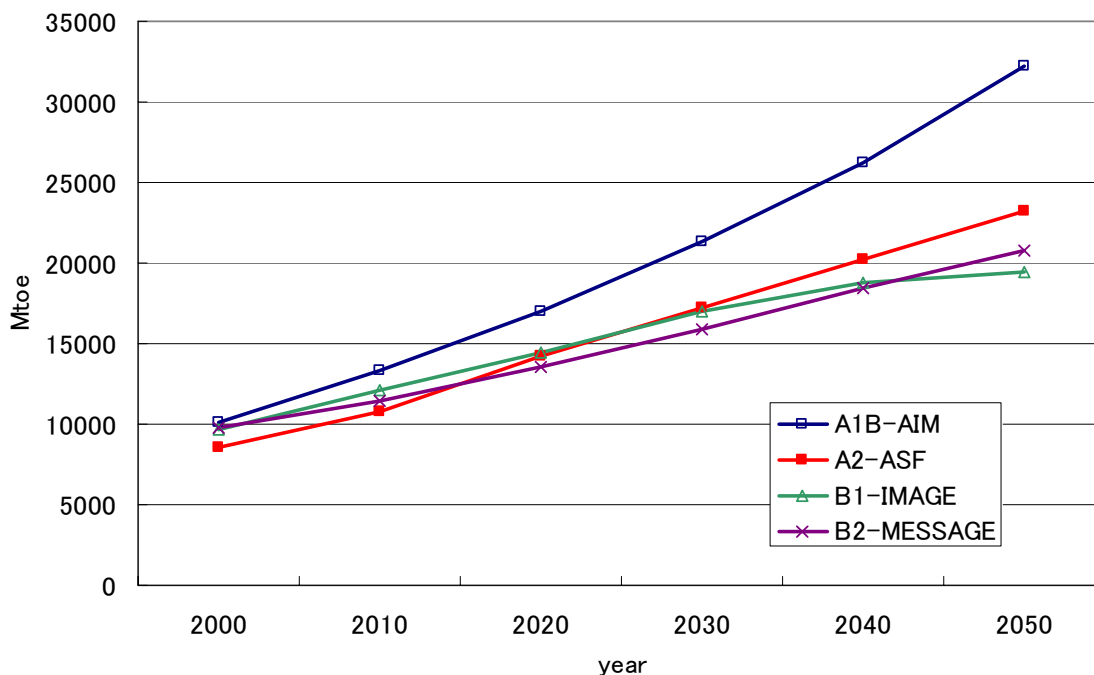


Fig. 2.18 Prediction of energy consumption in major 4 scenarios by IPCC. ²⁻¹²⁾

2-5 自動車保有台数の成長（「成長の限界」に学ぶ）

成長の限界 ^{24), 25)} は、1975年にドネラ・メドウズらによって書かれた。彼らが開発した計算プログラムによると、成長はすでに限界にきており、人類の安易な考えと認識不足に警笛を鳴らすものであった。メドウズらは、主に人口の成長や毒物の成長、食物産業や穀物消費の成長をシミュレーションした。またこれは2度改訂、更新されている ^{26), 27)}。

各国が保有する自動車の台数、特に途上国などこれから成長しようとしている有力新興国などは、これから、このシミュレーションのように爆発的な成長過程 (exponential growth) を経て、大規模な自動車市場ができ、地球上に存在する自動車台数は増大する。中国やインド、ロシアなど、比較的大きな国は、特に都市部や都市近郊部で自動車に乗る人口が増えるであろう。例えば中国などは、現在急ピッチでハイウェイを建造・整備中である。この自動車保有台数の成長については、第3章でくわしく論じる。

すると、運輸部門は益々問題視され、さきほどのシナリオよりも大きな変化でエネルギー消費量は増え、石油も急速に枯渇する。これはもう明日のことに迫ってきている事実であり、このような現実から目をそらしてはならず、このようなバックグラウンドで材料屋はどうすればいいのかを、しっかり考えなくてはならない。フォアキャストिंगではなく、バックキャストिंग的な発想で問題解決に望まなければならない。

2-6 現在の自動車に関連する環境・省エネ技術開発

2-6-1 内燃機関を改善する技術

2-6-1-1 自動車の内燃機関の効率向上

現在使用されている自動車の動力源のほとんどはガソリンまたはディーゼル機関である。しかしエネルギー問題・二酸化炭素排出による温暖化問題に加え、石油需給の逼迫が取り上げられる昨今、エネルギーの採掘から走行までの燃料サイクルで自動車のエネルギー消費やCO₂排出量を評価する必要がある。そこで、本項では自動車のエネルギー効率を燃料サイクルで考え、さまざまな内燃機関に関して WTW(Well-to-Wheel)分析を行い、評価する。

2-6-1-2 内燃機関の効率の考え方

一次エネルギーやCO₂排出量を計算評価するときは自動車の走行燃費や走行時のCO₂排出量を求めただけでは正確な評価が行えない。なぜなら車載エネルギーの製造段階でのエネルギー使用を考慮していないからである。よって車載エネルギーが異なる自動車を比較する際には燃料サイクルを考慮しないとエネルギー消費量やCO₂排出量を正しく評価できない²⁸⁾。また、車載エネルギーが同じであってもその車載エネルギーがいろいろな1次エネルギーから製造されているときはやはり燃料サイクルでその影響を評価すべきである。

2-6-1-3 原動機別エネルギー効率とCO₂排出量

Fig. 2.19, Fig. 2.20 に示したのは現行のガソリン自動車を1とした場合の各内燃機関別（現在技術開発が進行中のものも含める）の1次エネルギー消費量とCO₂排出量の比較である。縦軸の項目の説明は、Table 2.1 に示してある。従来のガソリン車を除いて各自動車の走行段階における効率は全てハイブリッド化されたものを想定している。

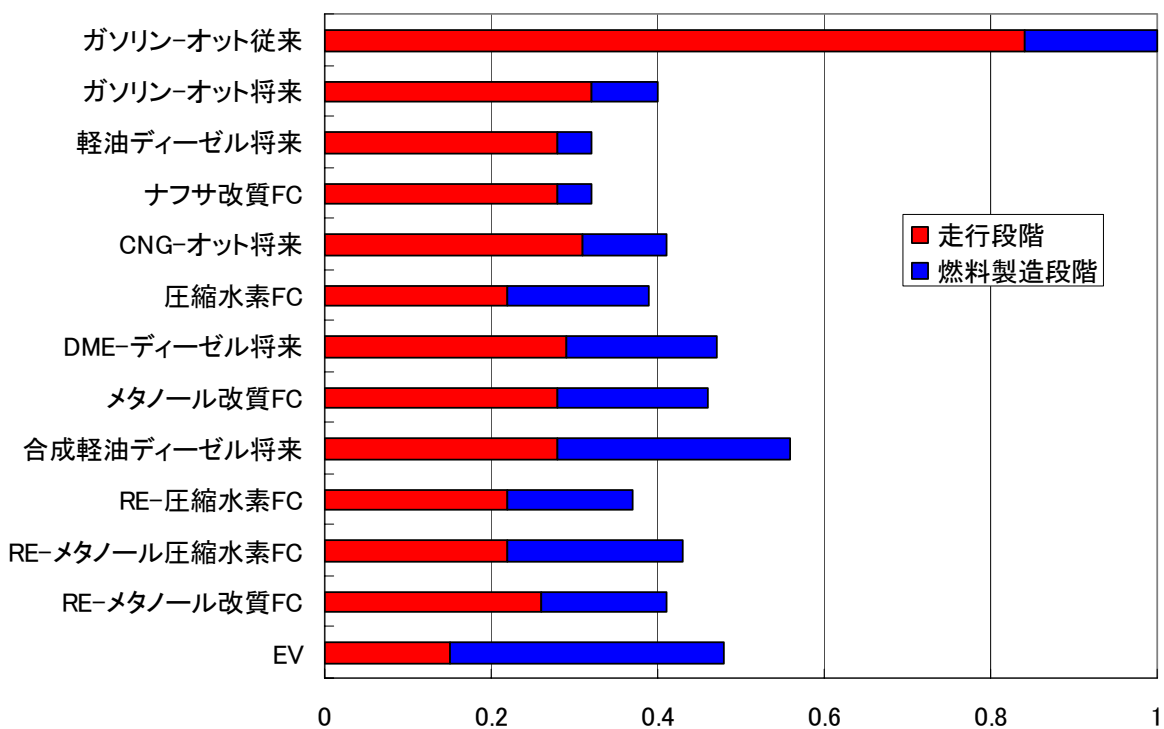


Fig. 2.19 Fuel efficiency performance by fuel cycle (about energy consumption)

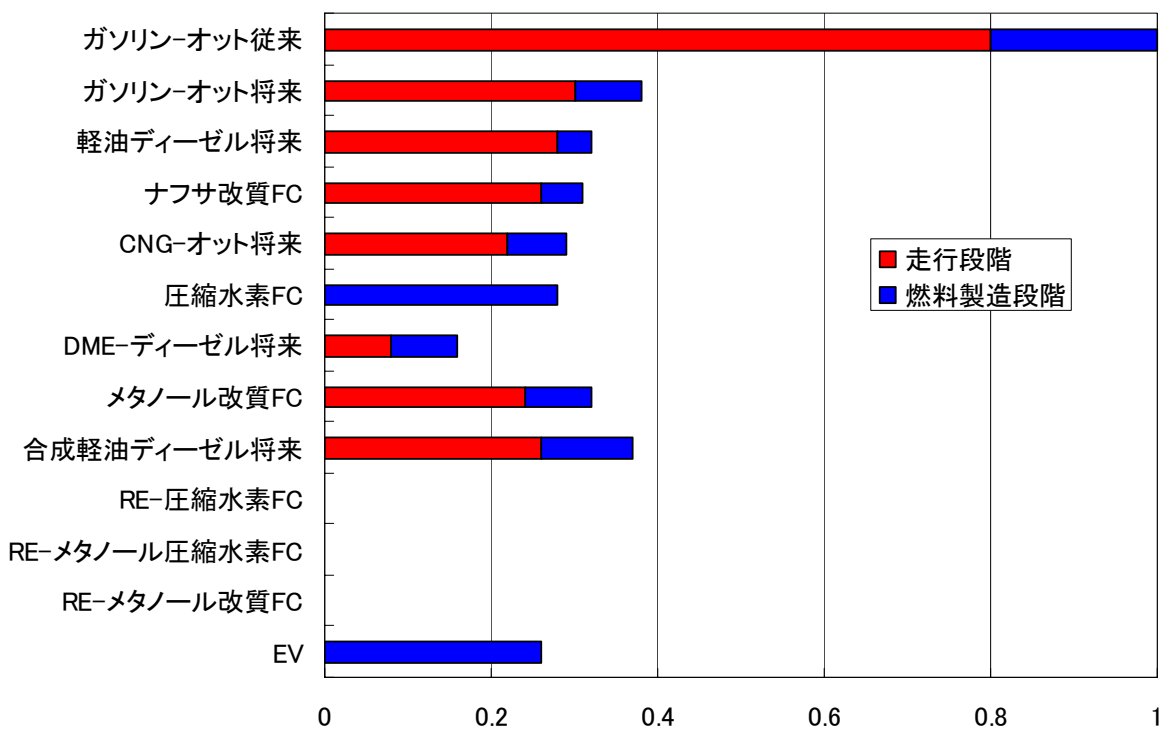


Fig. 2.20 CO₂ emission by fuel cycle.

Table 2.1 Example of research and development on engine technology.

ガソリン-オート従来	現行の自動車でも多く採用されている内燃機関
ガソリン-オート将来	ハイブリッド化を想定
軽油ディーゼル将来	ハイブリッド化を想定
ナフサ改質 FC	ナフサを用いる改質 FCEV
CNG-オート将来	天然ガス車, ハイブリッド化を想定
圧縮水素 FC	天然ガスから水素を製造し, それを燃料とする FCEV
DME-ディーゼル将来	ジメチルエーテルを燃料とするディーゼル車, ハイブリッド化を想定
メタノール改質 FC	メタノールから水素を取り出し燃料とする FCEV
合成軽油ディーゼル将来	合成軽油を燃料とするディーゼル車, ハイブリッド化を想定
RE-圧縮水素 FC	再生可能エネルギー起源の水素を燃料とする FCEV
RE-メタノール圧縮水素 FC	再生可能エネルギー起源のメタノールから水素を取り出し燃料とする FCEV
RE-メタノール改質 FC	再生可能エネルギー起源のメタノールを用いる改質 FCEV
EV	電気自動車. 2010 年の電源ミックスを想定.

現行のガソリン車に対し, ほとんどの自動車で燃費性能が2倍以上に向上している。また, 石油を1次エネルギーとする将来のHEV(ハイブリッド仕様車)やFCEV(燃料電池電気自動車)で燃費性能が3倍を超えるポテンシャルが示されている。また, Fig. 2.20からもわかるとおり, ほとんどの自動車でCO₂排出量が半分以下に低減するポテンシャルが見られる。天然ガスを1次エネルギーとするいくつかの自動車ではCO₂排出量が現行の三分の一以下に低減するポテンシャルが見られる。また, 当然ではあるが再生可能エネルギー起源の水素を燃料として用いるFCEVではCO₂排出量は0である。

ここで注目すべきは各FCEVのエネルギー効率である。たしかにFCEVのエネルギー効率は現行のガソリン車と比較すると非常に高いものである。しかしハイブリッド化したガソリン車やディーゼル車と比較すると特に優位性を持つわけではない。運輸部門における化石燃料消費量・CO₂排出量を抜本的に低減させるためには再生エネルギー起源の水素が安価に入手可能であることが必要条件である。

2-6-1-4 普及の展望

短・中期的には直噴エンジンなどを搭載し燃費性能が改善された現行車とともに燃費性能が現行車の2倍くらいのハイブリッド自動車(すでに市販されている)が普及していくと思われる。これらの自動車の動力性能は現行者とほぼ変わらず, 現行のエネル

ギーであるガソリンや軽油を用いることができるので燃料のインフラが整っており普及の可能性は高い。

中・長期的にはエネルギーの保全、地球温暖化防止などの環境保全性がさらに要求されることになる。そこで燃費性能が現行ガソリン車の3倍に改善された石油を1次エネルギーとするHEVやCO₂排出量が三分の一に低減される天然ガスを1次エネルギーとするHEV、そしてさらには高効率でよりクリーンなFCEVなどの普及が期待される。途上国の工業化や人口増加等による世界全体で見た自動車普及の急速な進展により21世紀中には石油の需給が逼迫することは間違いない。水力発電、太陽光発電、そしてバイオマスなどの再生可能エネルギーから製造された水素を用いるFCEVが究極の自動車としてその実現と普及が期待される。

2-6-2 自動車軽量化技術

自動車の軽量化といえばアルミ合金フレームや熱硬化性FRPであるが、鉄鋼の需要も高いのも事実である。よって、強度を維持しながら鉄鋼製部品を薄肉化できれば、より車重を軽くできる。そこで1990年代半ばからハイテン（高張力鋼板）が注目されてきた。

ハイテンは、一般の鉄に加えられる炭素の他にニッケルやシリコン、マンガンなどを加え、さらに冷却工程で急速に冷却するなどして強度を高めた特殊鋼である²⁹⁾。従来の鉄鋼は1平方ミリメートルあたり20kgf未満の力（20kgf/mm²≒200MPa級）しか耐えられないが、ハイテンは50キロ以上（400MPa～800MPa級）、中には100キロ以上の力（～1,440MPa級）に耐えられるものまである。

ハイテンが使われる自動車部品は、センターピラーやドアインパクトビームといった対衝突性を高める部材（衝撃吸収構造部材）からサスペンション関連、シート、バンパーのリンクホースなど多岐におよぶ。自動車用鋼板のうち、1999年は20%がハイテンだったが、2002年には57%、さらに2005年には米国で安全基準が引き上げられたため、70%がハイテンに置き換わった³⁰⁾。

鉄鋼製自動車を軽くする試みは、プロジェクトとして1994年から2002年にかけて、国際鉄鋼協会が中心となり、世界の鉄鋼メーカーが参加する形で行われた。スチールによる自動車軽量化プロジェクトについては、ボディの軽量化プロジェクト「ULSAB」（1994年～1998年）を端緒として、ドア等の軽量化プロジェクト「ULSAC」（1997年～2000年）、サスペンションの軽量化プロジェクト「ULSAS」（1997年～2000年）がそれぞれ成果を発表している。

中でも1999年に開始された「ULSAB-AVC」は、これらプロジェクトの集大成として推進され、2002年1月30日に成果発表を行い、車両全体に高性能・高強度鋼材を利用することで、自動車の大幅な軽量化による燃費の向上と、高い衝突安全性、さらに高い

リサイクル性と低価格をも併せて実現できることを示しました。それによると 1500CC クラスの小型車で 19%，2500CC クラスの普通乗用車で 32%の軽量化が実現，二酸化炭素排出・衝突安全性の欧州基準をクリアし，プライスダウンも 9,190～10,240 ドルと低価格化につながる事がわかった。ここまでの議論で，ハイテンを使えば，鉄鋼も自動車用軽量素材として他の新素材にひけを取らないことがわかる。

ハイテンは冷え込む鉄鋼産業のいわば救世主である。自動車メーカーの値下げ要求によって通常の鉄鋼は値崩れが激しいが，ハイテンの価格は通常の鉄鋼よりも 1 トンあたり 3 万円ほど高いため，順当な売り上げ増が見込めるためである。ハイテンを始めとする特殊鋼は鉄鋼全体の約 5 分の 1 にあたる 2,273 万トン（2003 年度実績）で，そのうちの半分は自動車用である。

ハイテンのネックはその硬さにある。強度を高めた結果、成形加工性が悪くなった。ハイテンの硬さは混合する合金の量に比例するため、合金の量を減らしつつ、別の角度から強度を向上させる新しいハイテン（俗にいう、超鉄鋼）の開発を鉄鋼各社は進めている。さらに自動車メーカーにエンジニアを派遣し、設計の段階からコミットすることで、要求に見合った素材の提供を行っている。

しかし、超鉄鋼を考えるといささかひとつの疑問にたどりつく。合金添加物の量を減らし、結晶粒の微細化によって、強度を倍にし、簿肉化することで軽量化を図るとあるが、例えば、ハイテンの引張弾性率（ヤング係数）や曲げ弾性率は、材料定数であるから変化しないわけであり、同じ要求強度ということで簿肉化しても、今度は薄くなることで曲げ剛性が低下することはないのだろうか。もし、何も考えずにただ薄くしただけであれば、曲げ剛性 EI は、 I が小さくなる分低下するはずである。そうなると、リブなどで構造的に補強が必要になって、結局それほど軽量化されないのではなかろうか。著者は少なくともそう感じている。加えて、深刻な問題としては、鉄鋼価格の高騰があげられる。Fig. 2.21 は、最近の国内鉄鋼市況であるが、一時は 1 トンあたり 65,000 円であったハイテンが、現在では、1 トンあたり 10 万円に届くかというところである。また、Fig. 2.22 は粗鋼ベースの需給推移であるが、鉄鋼は途上国（特に中国）でも作られ始め、現在は、需給の増加がみられ、今後も鉄鋼の供給インフレ（コスト・プッシュ・インフレ）が続きそうである。

ハイテン以外にも軽量化に関わる技術開発は各メーカーで進んでいる。

2004 年 7 月、自動車内装部品を手がける河西工業は、従来より 4 割軽いドア内装材を開発した。表面樹脂の補強方法を変更したもので、2006 年からの量産を目指している³¹⁾。

自動車部品を中心にアルミ合金（AL 合金）やマグネシウム合金（MG 合金）のダイキャスト製品を製造する旭テックは、大物マグネシウムダイキャスト法（ACTIV-MG 技術）を用いて、MG 合金を使った運転席回りの補強材を開発した³²⁾。MG 合金は経済産業省が管轄する産業技術総合研究所でも次世代の自動車用素材として研究を進めている金属で

ある。スポーツカーを中心に自動車の軽量化に使われる AL 合金は体積あたり鉄鋼の 3 分の 1 ほどの重さしかないが、MG 合金は AL 合金に対して体積あたり 3 分の 1 という超軽量素材である。MG 合金で車体をすべて作った場合、一般の鉄鋼と比べると重量は約半分になることが知られている。世界の AL 市況は、Fig. 2. 23 に示すとおりである。1990 年前半と 1995 年は航空機建造で AL 合金が多く使われた時代であり、需要インフレが起こり、一時コストが上がったが、ULSAB プロジェクトの間は、自動車等であまり検討されなくなったためか、価格は安定し、また最近の新たな航空機建造が反映してか現在はコスト高となっている。平均すると、AL は 1 トンあたり 20, 000 円程度である。

また一方で、次世代素材として国を挙げて取り組んでいるのがカーボンナノファイバー（微細炭素繊維、CNF）である。CNF は従来の金属素材に比べ驚異的な強度と耐久性を持ちながら、非常に軽い。もし仮に CNF を用いた材料で自動車のフレームを作ることができれば、車重はきわめて軽くなる。CNF は、鉄の 20 倍の強度を持ちながら AL 合金の半分の重さしかない。ただし非常に高価であるため、単独での利用は不可能に近く、現在考えられているのが、MG 合金などの軽量合金と複合させることで、より軽くすることが検討されており、研究開発が進んでいる。21 世紀に入り、自動車には環境と安全という大きなテーマが課せられた。新素材の研究開発は、自動車がこの課題をクリアするための必須技術であると感じている。

さて、ここまでの議論で、金属材料でも軽量化できることが理解できた。しかし、ひとつ大きな問題がある。それは、軽量化することで燃費が向上し環境にやさしい、と果たしてなるのだろうかということである。軽量化は確かに、LCA 結果から読み取れる走行段階の（ガソリンという石油製品をダイレクトに使用した）エネルギー消費を抑えるという意味では有効かも知れないが、使用済みの金属自動車は、廃棄物として地球に留まらないだろうか。これから大量の自動車を使用されるが、使用済みになるたびに廃棄物として溜まっていったら、いつかは大地がひっ迫し、それこそ生活環境を脅かすのではなかろうか。それでは、意味がないのである。別の要因で、地球環境上に汚染物質を排出しているのと同じになってしまう。問題は、軽量材料がきちんと 4R されるかにかかっているのではなかろうか。

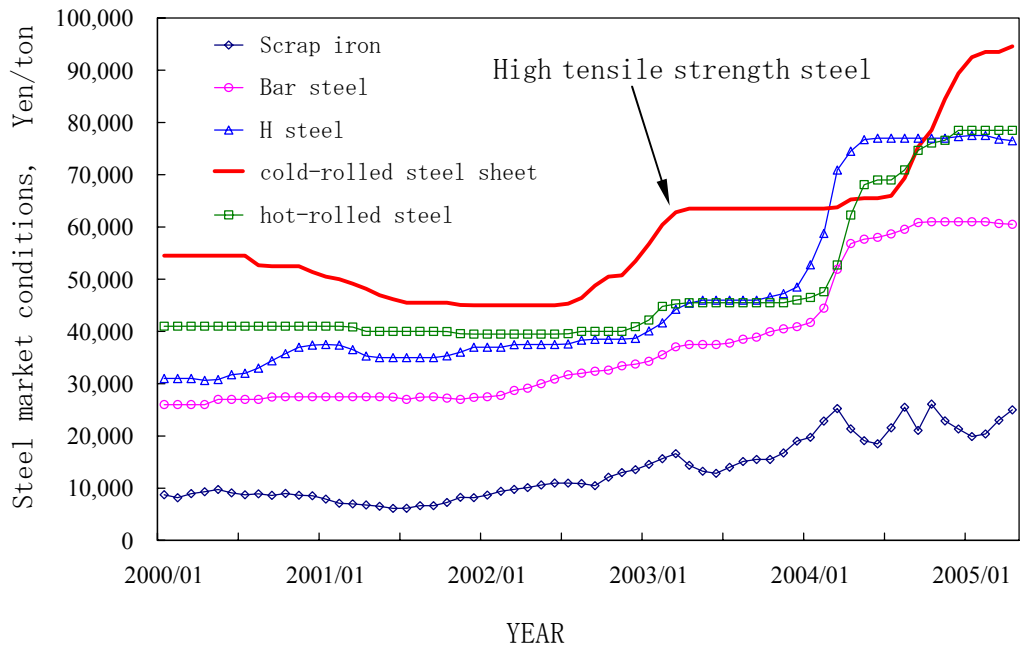


Fig. 2.21 Steel market conditions in Japan.

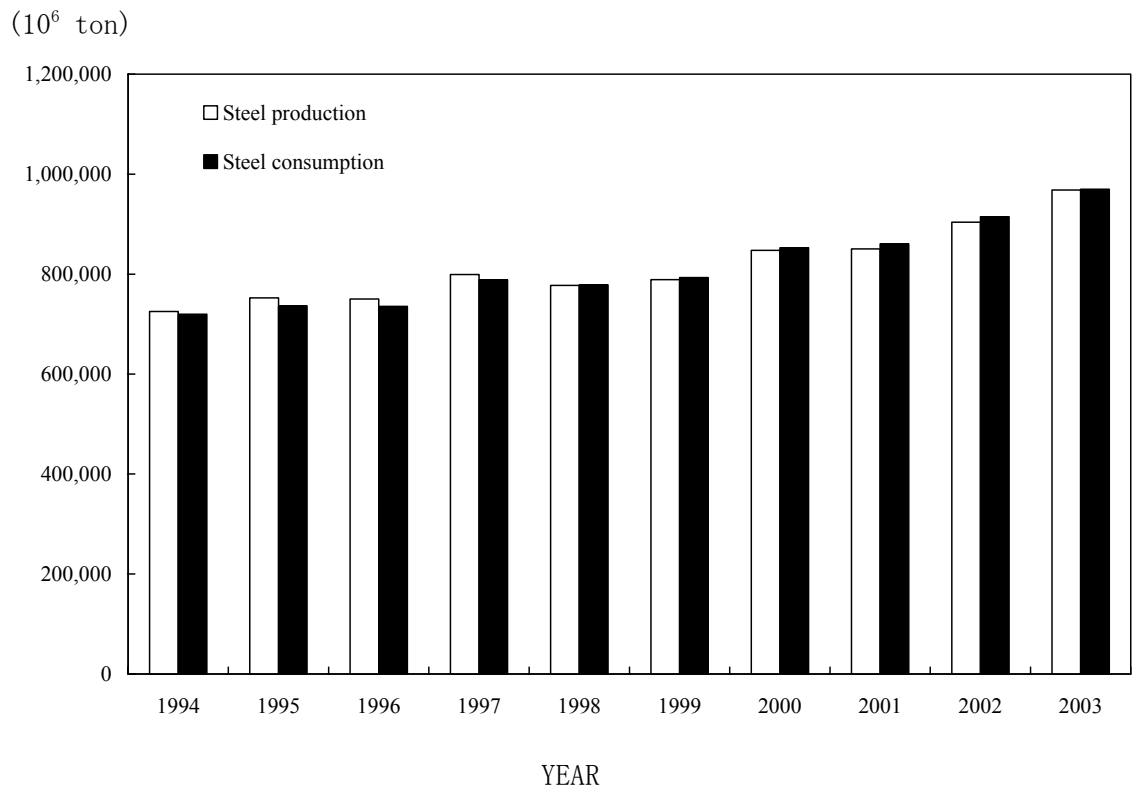


Fig. 2.22 Steel production and consumption in the World.

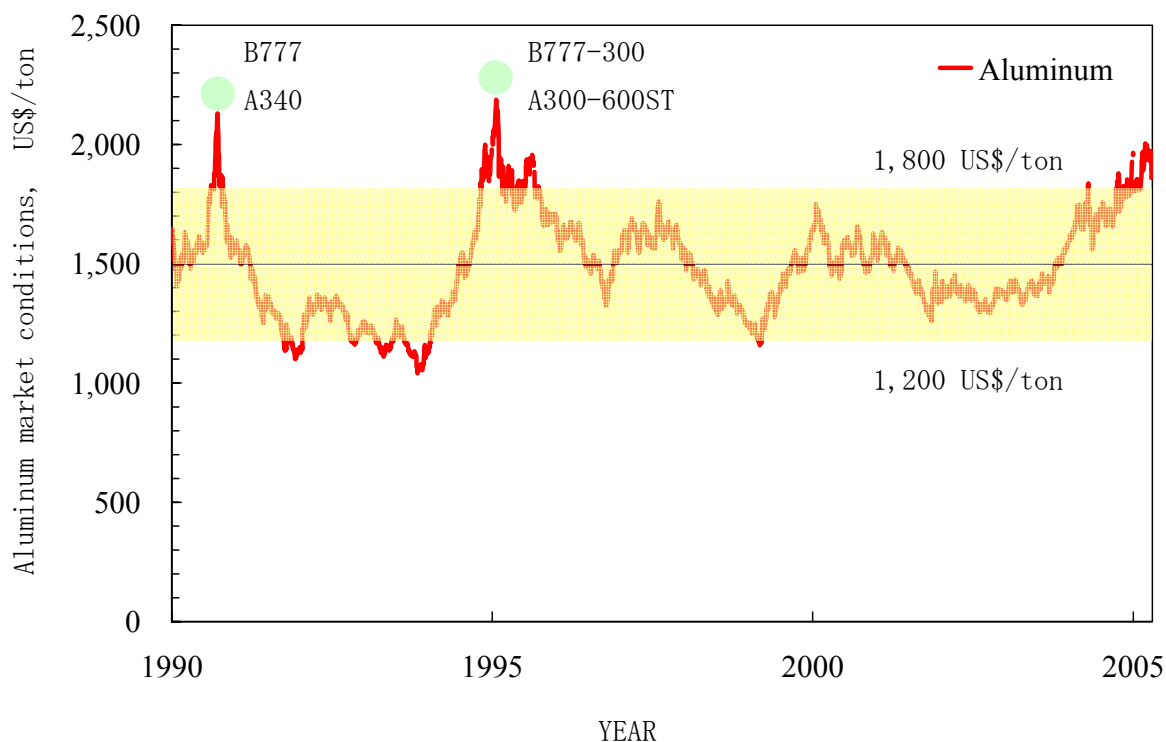


Fig. 2.23 World aluminum market conditions.

2-7 材料4Rについて

これからの材料は、4R できなければ使ってはいけない。4R, すなわち、リユース・リペア・リサイクル・リデュースであるが、これを容易に達成可能な材料が必要である。リユース・リペアは、そのまま使ったり、修理して使ったりするので、想像しやすいが、リサイクルの定義をどのようにするかが論点となる。

ひとくちにリサイクルと言っても、(1) マテリアルリサイクル、(2) ケミカルリサイクル、(3) サーマルリカバリーなど、その用途に応じて様々である。例えば、マテリアルリサイクルとは、何か別の材料の中に混ぜたりして、別の材料として再生することも含む。ケミカルリサイクルは、化学的なリサイクルで、例えばポリマー材料は、解重合反応をへて不純物を除去し、また重合させるというプロセスで、実はエネルギーを大量に消費する。サーマルリカバリーとは日本語で熱回収というのであるが、これはいわば最終手段で、最後は燃やして熱量を取り出そうということであるから、材料がエネルギーというものに姿を変えているように見えるが、「燃やす」という行動にエネルギーを使うので、せいぜい差し引き0であろう。

著者は(1)を推奨する。しかも、他の材料に混ぜるのではなく、そのまま再加工なり再成形して使うスタイルである。不純物を嫌う金属材料には、この達成は難しいであろうが、実は複合材料ならばこれが可能である。

2-8 新材料に求められる要求項目

自動車が多く走る世界を考えると、ライフスタイルが変わらない限りは、1台に平均1~2人しか乗らない。このことは、統計量でも公開されているし、著者の経験上からも(あえて胸を張って言うことではないが)堂々と言える。60kgの人間1人を移動させるのに、その約20倍の1.2トンの自動車は果たして必要なのか。燃費は、自動車の車重と1:1の関係にある。自動車が重いと燃費は悪い。これを改善するためには、自動車の抜本的な軽量化が必要であろう。

軽量化には、複合材料が適している。複合材料は、材料までも設計できるうえ、現実的な3次元形状を容易に形成可能で、設計の自由度が金属材料にくらべきわめて高い。複合する素材のプロパティで、複合材料のプロパティは変わる。軽くて強い複合材料を作りたいのであれば、炭素繊維とエポキシの組みあわせ、少し重くてもしなやかな複合材料をつくりたいのであれば、ガラス繊維と不飽和ポリエステルといった具合に、自由に設計可能である。現在は、繊維を熱硬化性樹脂(加熱すると硬化する樹脂)で固めた熱硬化性FRPが主流である。

では、その4R性はどうか。熱硬化性樹脂は、一度硬化してしまうと解重合処理をしない限りは、もとのモノマー(液状物質)に戻れないので、これまでは破碎し細挽してセメントに混ぜたり、それこそ焼却処分していたりした。熱硬化性FRPは、4R困難で環境負荷の高い(地球にやさしくない)材料と言われていた。FRPからFRPへ戻す究極のリサイクル技術(つまりは、繊維と樹脂を分離して、再利用する)は研究されてきたが、どれもリサイクル時の(特に分離プロセスの)エネルギー消費量が大きいのが問題であった。最近になって、繊維と熱硬化性樹脂を容易に分離する方法が見出され、研究されている³³⁾ことが、明るいニュースではある。もともと、純粋なポリマーの中に繊維を入れて強化する複合材料は、不純物の混入に対しては金属材料ほどデリケートではない。金属材料は高強度とするために、材料を合金化しているため、種々の成分を分離したり、同じ合金で分別したりしなければならないため、リサイクルが容易ではない。また、金属の融点が高いことから、再溶解させようとするエネルギー消費が大きくなるというネックがある。そういった意味でFRPは、シュレッダー処理したあと、分別作業なしにそれをリサイクル材としてすぐに再成形できるので、金属材料よりもリサイクルには向いている材料であろう。あとは、複合材料の製造工程で、作業性が良さ、成形温度が低いなどの要求項目をクリアすれば良い。しかし、自動車用途として展開する(こ

れが可能ならば多くの分野に適用可能) ためには, これまでのハイテン等と同等の性能ないしは低価格, 生産速度など, 越えなければならないハードルはまだある。

しかし, このハードルを越えるひとつの解決策としてあたらしい材料の可能性を著者は見出した。

2-9 熱可塑性CFRPという選択

4R が容易に可能で, 自動車にも使用でき, 超軽量かつ低価格, すばやく生産可能な材料を模索していると, 炭素繊維とエポキシの組合せ(熱硬化性CFRP)は, 先の議論のように4Rが現状では難しく, また硬化に時間がかかることもあり, 現実的ではなくなる。多品種少ロット生産では熱硬化性CFRPというのは都合がよくその特長をいかんなく発揮するが, 「安く」「速く」「たくさん」の点で実用化にやや難ありである。最近では, VARTM等の迅速成形法で大物成形品を作ったりしているが, やはりまだ手作業の域を超えないようなイメージがある。

そこで, 熱可塑性FRPという材料を考えた。繊維と熱可塑性樹脂とを複合するこの材料は, 実はモノとしては世の中にすでに出ている³⁴⁾。ガラス繊維強化PETや炭素繊維強化PA(ポリアミド:ナイロン)や炭素繊維強化PEEK(ポリエーテルエーテルケトン)である。しかし, ガラス繊維強化は, 弾性率が低いというのと, 繊維がガラスであるため衝撃に弱い。一方, 炭素繊維強化PAやPEEKは, まずPEEKは高耐熱性の高級熱可塑性樹脂(スーパーエンブラ)で大変高価であり, 自動車用途としては, それほど耐熱性能は要らないので, オーバースペックとなる³⁵⁾。PAは様々な用途に応じて, 6, 11, 46, 66などのタイプがあるが, 一番高性能なのは66であり, これもエンブラの仲間である。スーパーエンブラやエンブラは, 熔融温度が高い(それだけ分子構造が複雑で平均分子量が大きい)ので, 再成形時のエネルギー消費も大きくなってしまいうため, 4Rに関しては都合が悪い³⁶⁾。

そこで, もっと低温で熔融するプラスチックで軽いものを探していくと, ABSやPP(ポリプロピレン)にいきつく。ABSは, A(アクリルニトリル)B(ブタジエン)S(スチレン)のポリマーブレンド物で, この割合で物性が大きく変わるため, 異なる物性同士のABSリサイクルは難しい。ABSは非結晶性の熱可塑性プラスチックである。PPは, 結晶性のプラスチックで, 特に結晶化核剤(結晶促進剤)を入れないでも温度制御で結晶化度がある程度制御可能であるところが魅力である。そして何よりも, 熱化成プラスチックの中で一番軽く, ポリマーブレンド物ではないため, 構造が単純であり熔融温度も低い。耐熱温度は~120℃程度であり, 実用範囲内である。本研究では, このPPをマトリックス樹脂に選定している。

最近, モノマーレベルのPBT樹脂を含浸させて, 加熱で熱可塑性ポリマー(CBT

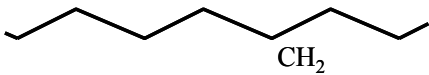
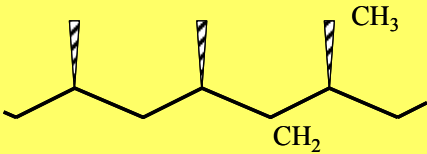
樹脂) とする研究^{37),38)}が行われており, この研究動向にも注目していきたい。

2-10 ポリプロピレンについて

一般に, 4R 可能な軽量素材を考えたときに, 金属系は4R が難しいことや, 重いことで, 要求項目を満足しない可能性があり非現実的であるが, 先の熱可塑性 CFRP であれば, マトリックスが熱可塑性樹脂なので省エネで再成形可能であり, 現実的である。マトリックススペースで考えれば, 水素と炭素のみで化学構造式が定義されるような単純な構造のオレフィン系ポリマーが, より 4R し易いという判断になろう。オレフィン系ポリマーには, ポリエチレンとポリプロピレンがあるが, 耐熱性や耐候性では後者のポリプロの方が優れている。Table 2.2 に, 両者を比較したものを示す。

ポリプロピレン (PP) には, 3種類ある。アタクチック PP やシンジオタクチック PP は, その立体規則性からもわかる通り, 比較的やわらかい PP である。アイソタクチック PP は, 同一方向に側鎖メチル基が並んでいるため, 硬い材料である。また, 低分子量の PP から高分子量の PP まで, 主に流動性の面でグレードが幅広くある。本研究に使用する PP は, 低分子量になりすぎると, 結晶化しにくくなるので問題だが, ある程度流動性が良い方が, 成形性も良いため, ふさわしい。詳しくは, 第5章の成形で述べる。

Table 2.2 Comparison of the performance with high-density polyethylene and isotactic polypropylene.

Crystalline Polymers	poly-ethylene (HDPE)	poly-propylene (isotactic)
Structure		
Density (g/cm ³)	0.941 – 0.970	0.850 – 0.943
Crystallinity (%)	65 – 85	60 – 70
Weather proof	×	○
Deflection temp. under load (°C)	60 – 83 (at 0.45 MPa)	118 (at 0.45 MPa)
Application	<ul style="list-style-type: none"> ▪ films 50% ▪ bottles, containers 15% ▪ pipes 6% 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ automobile, appliance 60% ▪ film 20% ▪ fiber and yarn 6%

2-1-1 結 言

2-1における地域ごとのエネルギー需給分析からこの30年間、南北問題は解消されていないが、途上国の中でも特に人口の多い中国／インドのエネルギー消費量が大きく伸びてきており、この2国の経済発展に伴うエネルギー消費量の今後の増大が世界全体のエネルギー需給にとって脅威となりうる。また、先進国は途上国に比較して運輸部門のエネルギー消費割合が非常に高く、この部門はほとんどが石油エネルギーによってまかなわれていることから途上国の発展に伴い石油需給の逼迫が予想される。

第2章で引用した文献等：

- 1) フリー百科事典ウィキペディアより引用：<http://ja.wikipedia.org/wiki/>
- 2) Donella Meadows, Jorgen Randers, Dennis Meadows, LIMITS TO GROWTH (The 30-Year Update), Chelsea Green Publishing, (2004), p.7.
- 3) New York Mercantile Exchange (NYMEX) data: <http://www.nymex.com/index.aspx/>
- 4) 垣見油化のデータを引用：<http://www.kakimi.co.jp/index.html/>
- 5) Energy balances of OECD countries 1971-2001, IEA, (2003).
- 6) Energy balances of non-OECD countries 1971-2001, IEA, (2003).
- 7) Energy statistics of OECD countries 1971-2001, IEA, (2003).
- 8) Energy statistics of non-OECD countries 1971-2001, IEA, (2003).
- 11) 通商白書 2005：経済産業省，第2-1-127 図のデータを引用，(2005)。
- 12) EDMC エネルギー・経済統計要覧，省エネルギーセンター，(2004-2)。
- 13) 森田裕二他，定置用燃料電池の普及見通しと課題，IEEJ，(2003-2)。
- 14) World Population Prospects The 2002 Revision Highlights, United Nations department of economic and social affairs population division, (2002).
- 15) WORLD POPULATION IN 2300 EXECUTIVE SUMMARY, United Nations department of economic and social affairs population division, (2003).
- 16) Donella Meadows, Jorgen Randers, Dennis Meadows, LIMITS TO GROWTH (The 30-Year Update), Chelsea Green Publishing, (2004), p.6.
- 17) Population Reference Bureau (PRB): <http://www.prb.org/>, (PRB Library- PRB Graphics bank).
- 18) World energy outlook 2003, IEA, (2003).
- 19) World energy outlook 2004, IEA, (2004).
- 20) World energy investment outlook 2003, IEA, (2003).
- 21) Climate Change 2001: Synthesis Report Summary for Policymakers, IPCC, (2001).
- 22) 4つの社会・経済シナリオについて－「温室効果ガス排出量削減シナリオ策定調査報告書」－，環境省地球環境局，(2001-6)。
- 23) 増井利彦・森田恒幸，I P C C 特別報告書－排出量シナリオ－，地球環境研究センター，2000年（平成12年）6月号（通巻第115号）Vol.11 No.3.
- 24) D・H・メドウズ，D・L・メドウズ，J・ランダズ，W・W・ベアランズ三世（大来佐武郎（訳））：ローマクラブ「人類の危機」レポート 成長の限界，ダイヤモンド社，(1972-5)。
- 25) ドネラ・H・メドウズ，デニス・L・メドウズ，ヨルゲン・ランダース（茅陽一（訳））：限界を超えて 生きるための選択，ダイヤモンド社，(1992-12)。
- 26) ドネラ・H・メドウズ，デニス・L・メドウズ，ヨルゲン・ランダース（枝廣淳子

- (訳)) : 成長の限界 人類の選択, ダイヤモンド社, (2005-3).
- 27) ドネラ・H・メドウズ, デニス・L・メドウズ, 枝廣淳子: 地球のなおし方, ダイヤモンド社, (2005-7) .
- 28) 小林紀: 燃料サイクルで見た自動車のエネルギー効率, エンジンテクノロジー (2001).
- 29) 新日鉄製鉄 (株) 編著: カラー図解 鉄と鉄鋼がわかる本, 日本実業出版社, (2004-11) .
- 30) National Association of State Directors of Pupil Transportation Services: MINI GUIDE to the FEDERAL MOTOR VEHICLE SAFETY STANDARDS and RELATED REGULATIONS, (2004-5).
- 31) 河西工業ホームページ: <http://www.kasai.co.jp/>
- 32) 旭テックホームページ: <http://www.asahitec.co.jp/>
- 33) K. Shibata, K. Maekawa & M. Kitajima: COMPOSITES RECYCLING USING DEPOLYMERIZING THROSETS UNDER ORDINARY PRESSURE, Proceedings of the Ninth Japan International SAMPE symposium, (2005), pp. 38-43.
- 34) 村山 宏: F R T Pの基礎と応用, ラバーダイジェスト社, (1981-8) .
- 35) 長谷川正木: エンプラの化学と応用, 大日本図書, (1996-12), 第5章 (pp. 117-146) .
- 36) 中条 澄: エンジニアのためのプラスチック教本, 工業調査会, (1997-11) , 第5章 (pp. 125-170) .
- 37) REINFORCEDplastics, applications news, (2003-6), p. 4.
- 38) Plastics Additives & Compounding, Industry news, (2005-3/4), p. 12.

第3章 有力新興国・中国のモータリゼーション

3-1 緒言

ここでは今世紀最初かつ最大のモータリゼーションを遂げるであろう中国について、2050年までの乗用車保有台数推移の予測を行う。

3-2 成長の基本形（ロジスティック曲線）

乗用車保有台数推移を予測するために、Fig. 3.1に示すようなロジスティック曲線を用いる。この曲線は、生物の個体数の増加や、耐久消費型製品の普及などを表す際に一般的に用いられる成長曲線である。はじめはゆるやかに成長し、途中の急激な成長（exponential growth）を経て、いずれ成長は停止するというモデルに基づいている。この曲線の形状は、主に3つのパラメーターによって決定する。すなわち、この成長（量）がどこまで続くのかを示す飽和値 χ 、急激な成長はいつから起きるのかを示す成長開始年 τ_0 、急激な成長の程度を表す μ である。本成長予測の場合 χ は、国家によって人口が異なるために、人口1,000人あたりの最終的な乗用車保有台数と標準化するのが妥当で、これは、モータリゼーションを遂げた先進国の統計量の平均値から、大体500から600程度であると推定される。

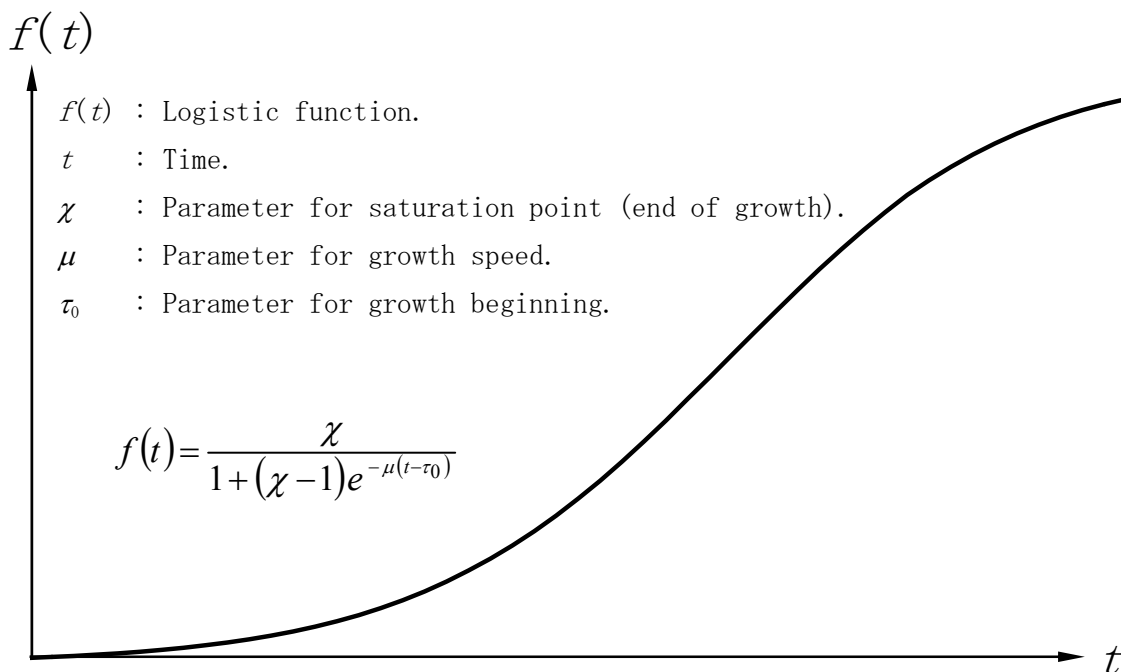


Fig. 3.1 Shape of logistic function, $f(t)$.

3-3 関連統計量分析

3-3-1 日本の統計量へのロジスティック関数のあてはめ

先に述べたロジスティック曲線による乗用車普及台数予測の有効性を確認するために、既にモーターゼーションを遂げた先進国の統計量¹⁾にこの曲線をあてはめ、各国の χ , τ_0 , μ を推定する。ここでは、特に日本の例を示す。Fig.3.2 に日本・アメリカ・イタリア・フランスの四カ国において人口 1000 人当たりの自家用乗用車保有台数の統計量を、Fig. 3.3 に日本の統計量および関数あてはめ結果をそれぞれ示す。Fig. 3.2 から四カ国の成長の速度が似ていること、着実に成長の終焉に向かっていること、成長停止時の値（飽和値）は、400-600 台/1,000 人の範囲に入ること、などが読み取れる。

同図から各国ともロジスティック曲線に近い形で乗用車が普及していることがわかる。傾向としてはアメリカ合衆国のように成長開始年が非常に早い国（T型フォードの発表が 1908 年）、すなわちモーターゼーションのパイオニアとも言うべき国では、自動車は大変高価なもので新しいものであったことから、なだらかな成長が長期間に渡ってつづき、量産化、低価格化されてはじめて急速な成長を遂げるというタイプのために、ロジスティック曲線から若干外れる傾向にある。しかしながら、日本のように成長開始が遅い国においてはロジスティック曲線に非常に近い形で成長が進む。アメリカも含め、マクロ的にみればどの国もこの曲線に沿って成長していると言って間違いないだろう。Fig. 3.3 は日本のデータをロジスティック曲線で近似したものであるが、この図から先進国の統計量に、本成長曲線があてはまることがわかる。この曲線（日本）の各パラメーターは、 $\chi=500$, $\tau_0=1938$, $\mu=0.142$ となる。

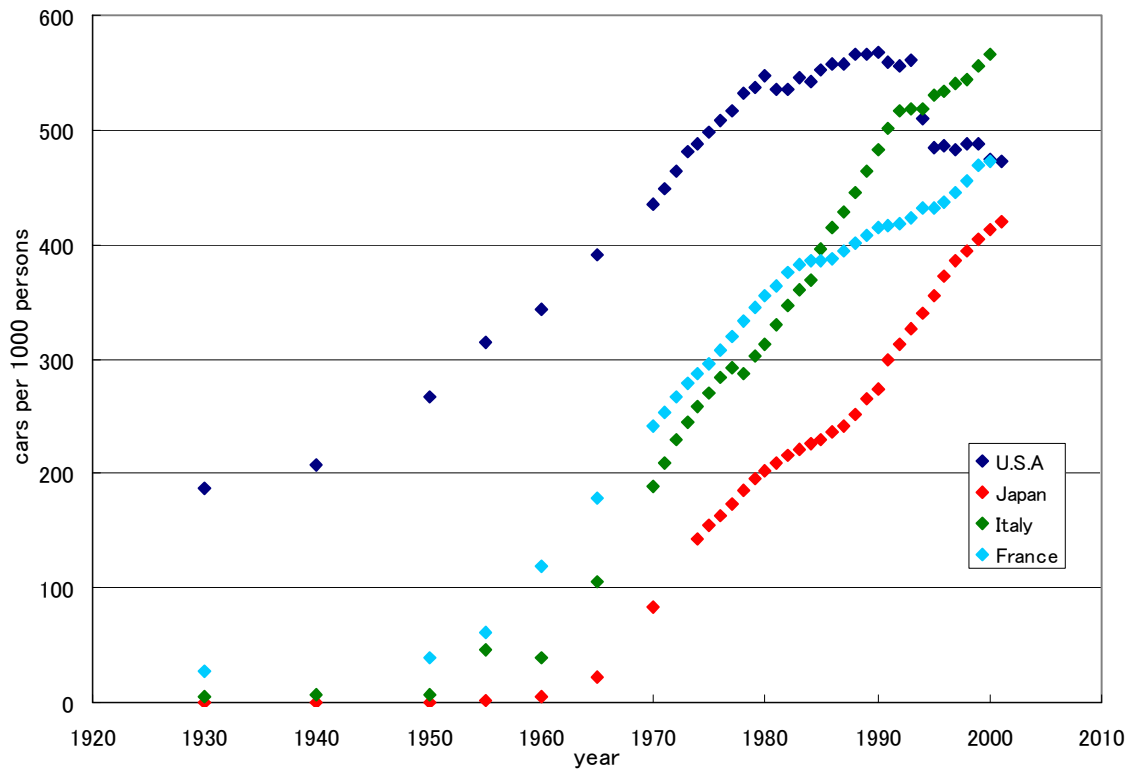


Fig. 3.2 Shift of the number of automobiles in U.S., Japan, Italy and France per 1,000 people.

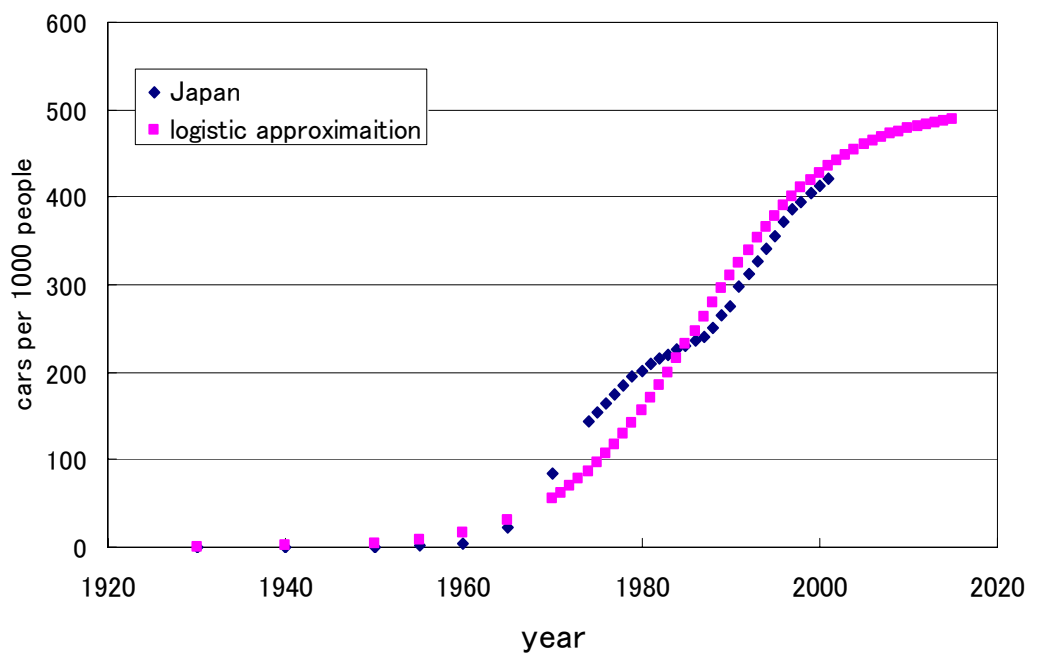


Fig. 3.3 Logistic approximation for Japanese statistics data.

3-3-2 予想成長曲線

2002年現在の中国の人口は12億8000万人で世界一である。国連人口部会の予測²⁾によれば、Table 3.1のように推移するとされる。今世紀前半に人口世界の座をインドに譲ると予測されているが、経済発展はインドに先行しており今世紀で最初かつ最大のモータリゼーションを遂げる国家となることは明白である。

予測を行うに当たり、先に示した3つのパラメータ χ 、 μ 、 τ_0 を決定しなければならない。まず χ の決定プロセスについて述べる。

モータリゼーションを遂げたといえる先進国においても、現在もわずかながら乗用車保有率の上昇は続いている。よって、実績値としての χ は存在せず、現存するデータから読み取る必要がある。Fig. 3.2に示した四ヶ国以外だけでなく他の先進国の普及データ等について検討を行ったところ χ の平均値は550程度になることがわかった。また、Fig. 3.4は、文献1), 2), 3)より引用したデータを用い、横軸に国民一人当たりのGDP、縦軸に人口千人当たりの乗用車保有台数を国別にプロットし、データ点にその国の人口密度を書き加えたものである。また、1次近似を行った際の直線も書き加えてある。つまり、近似直線より上にプロットされた国々は、GDPに対して乗用車保有台数が多く、逆に下にプロットされた国々はGDPに対する乗用車保有台数が少ないといえる。特徴として、直線より上の国々の多くは150人/km²以下と人口密度が低く、下の国々は多くが300人/km²以上と人口密度が高いう傾向が認められる。これは現在のGDPのみに関わらず、乗用車の普及が完了した際の保有率、つまり χ の値、にも影響を与えると考える。上記のような傾向が現れる原因として、人口密度の高い国では公共交通機関を整備しやすく、乗用車を持たなくても生活に困る人々が少ない、ということが挙げられる。例として、日本の都道府県別に自家用乗用車の保有率を見ると、群を抜いて低いのが最も人口密度が高い東京都の263台/1000人である。これは2002年度のデータで、全国平均が413台/1000人であることを考えると非常に低い値である。以上のことから人口密度が132人/km²である中国の χ は大きなものになることはない、と予想できるので500と仮定した。

次に μ について述べる。Table 3.2は6カ国について乗用車普及率の推移をロジスティック曲線で近似したときの τ_0 と μ の値である。ここから普及開始年が早い国ほど普及速度は遅く、遅くにモータリゼーションが始まった国ほど普及速度が速いことが読み取れる。

Table 3.1 Prediction of Chinese population growth by U. N.

year	2000	2015	2025	2050
population(thousand)	1, 275, 125	1, 402, 321	1, 445, 100	1, 395, 182

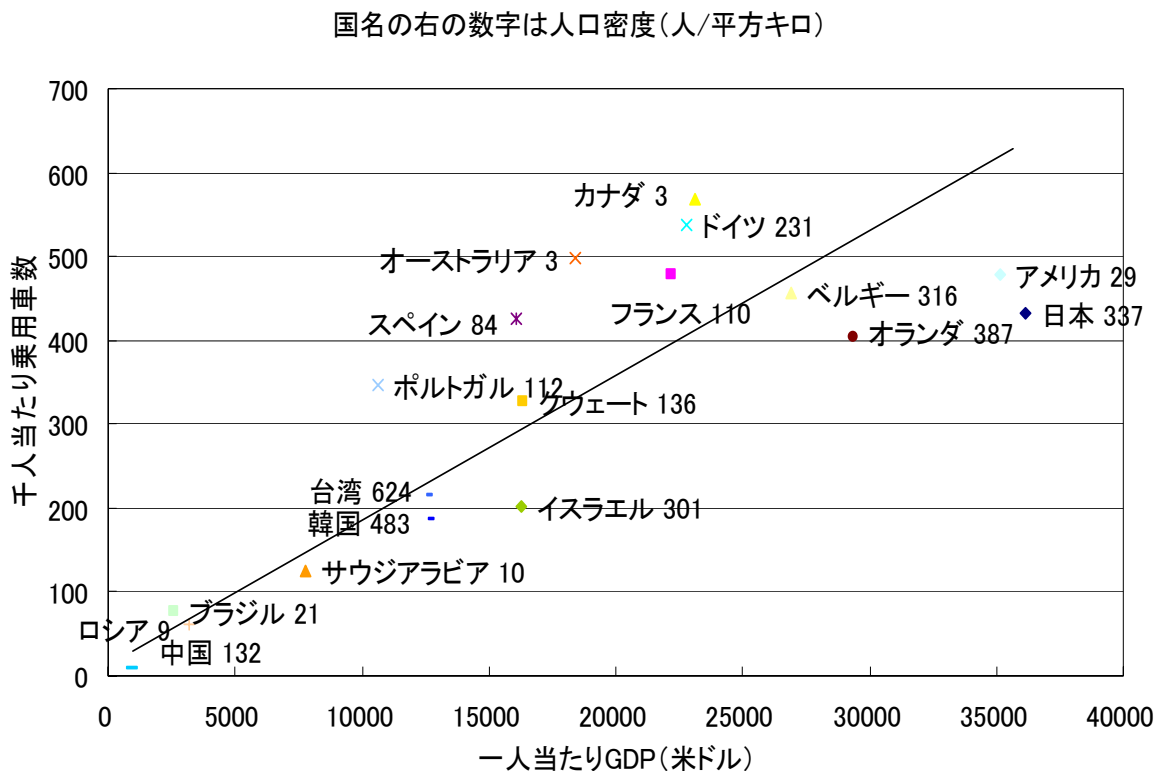


Fig. 3.4 Relationship of GDP per capita, number of automobile per 1,000 people and population density in each countries. ^{3-6) 3-7)}

Table 3.2 Result of logistic approximation to the number of automobile statistics in each countries.

	Japan	France	Germany	Spain	Netherlands	Canada
τ_0	1938	1903	1897	1926	1894	1846
μ	0.142	0.0919	0.0803	0.106	0.0759	0.0352

現在の中国の乗用車保有率は約5台/1000人であり、日本の1960年前後の保有率に相当する。当時日本では高度経済成長期が始まったところで1956年から1973年までの経済成長率は平均で9.1%、1995年～2004年までの中国の経済成長率は7～10%。このことから今後45年前の日本が迎ったモータリゼーションと同じような状況を中国が今後迎えると考え、予測には日本と同じ0.142という μ の値を採用した。

最後に τ_0 について述べる。先進国における τ_0 は普及のデータをロジスティック曲線でフィッティングした際の最適値として求めていたが、中国は普及が始まったばかりなので同じ方法を取ることは不可能である。そこで、上記の χ と μ の値を固定し、これまでの普及データにフィッティングさせることによって求めた。 τ_0 つまり普及開始年は1988年である。

Fig. 3.5 に人口1000人当たりの保有台数、Fig. 3.6 に全体での保有台数をそれぞれ示す。この予測によれば、2014年には現在の日本の乗用車保有台数に匹敵する5500万台、2040年には現在の世界の乗用車保有台数に匹敵する約5億5000万台に達する。

3-4 成長に伴うCO₂排出量およびエネルギー消費量の増加

Fig. 3.7 に中国における乗用車からの二酸化炭素排出量を示す。仮定として乗用車一台から排出される二酸化炭素の排出量は現在の日本の値である2.034t-C/台・年を用いた。

現在日本国内から排出されている二酸化炭素(乗用車からのもの以外も含む全体)は約3億t-C、世界全体で排出されている二酸化炭素は約60億t-Cであることを考えると、Fig. 3.7 に示した中国一国の乗用車から排出される二酸化炭素の量がいかに莫大なものであるか認識できる。

一方で、エネルギー消費量であるが、Fig. 3.8 に示すように、中国の乗用車が増えるだけで2040年には、今の日本が年間に使用するエネルギー量に達する。それまでの積分値を考えると、一体どれだけの石油が使われるのか、想像しただけでも恐ろしい。直感的に、石油は急速に枯渇へと進み、石油の高騰などをうけて、確保のため各地では戦争さえ起こるかも知れない。

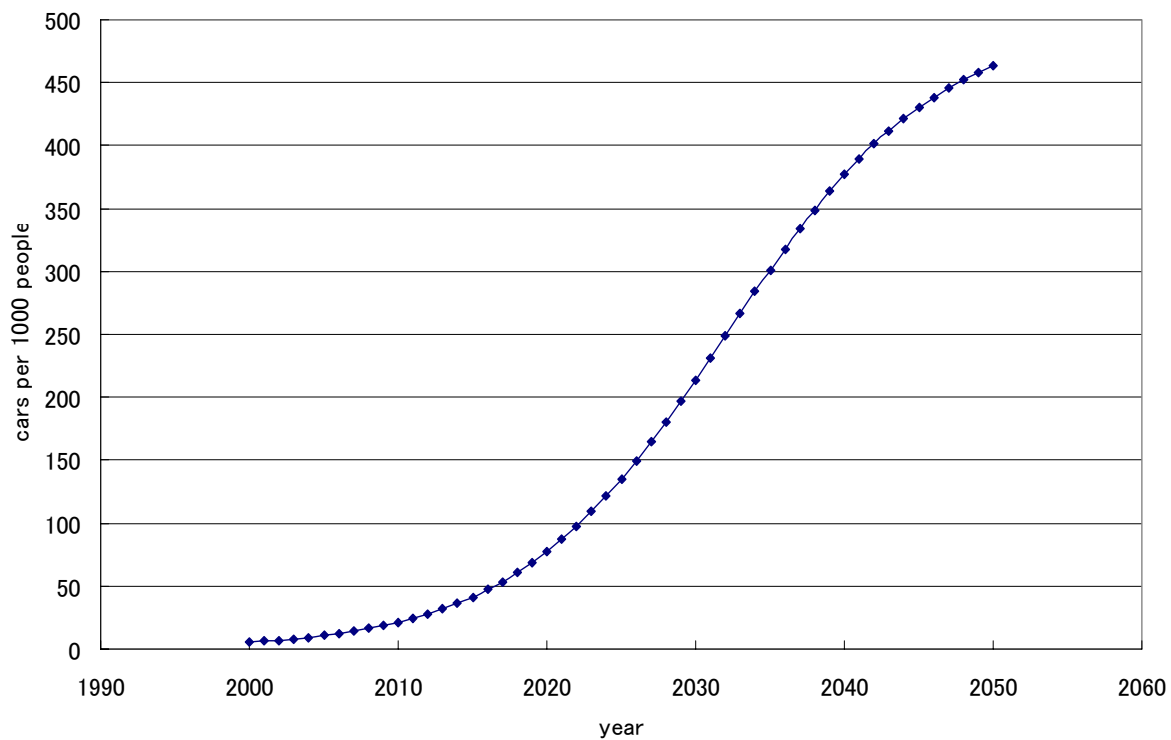


Fig. 3.5 Prediction of the number of automobiles per 1,000 people in China.

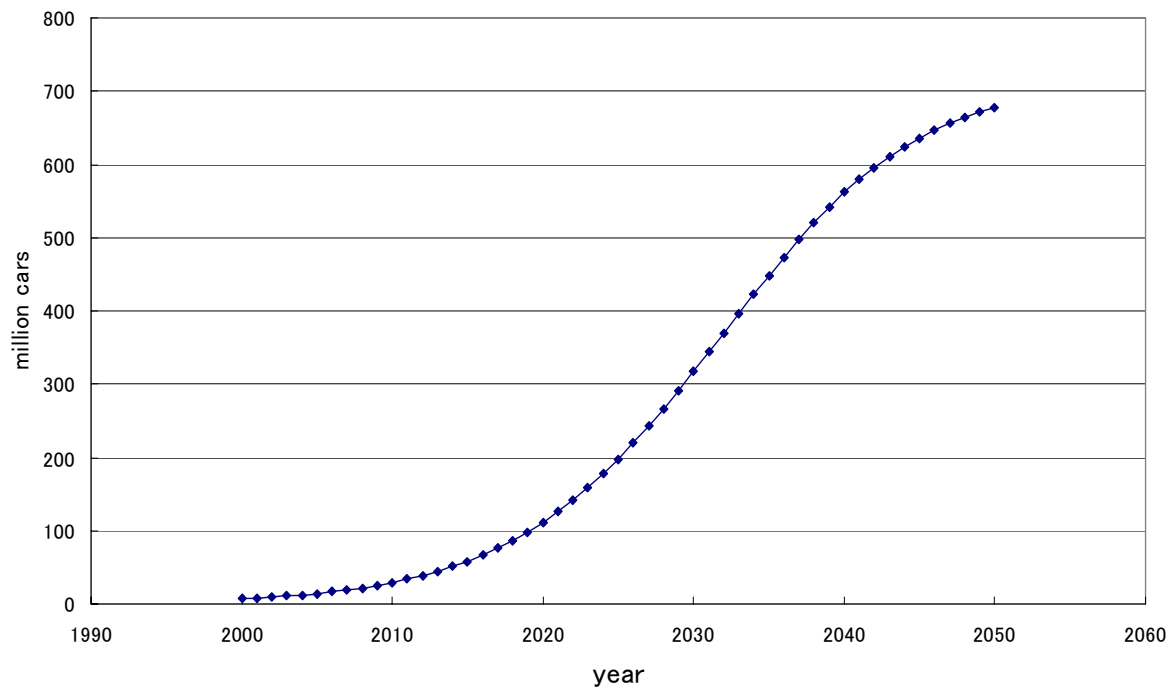


Fig. 3.6 Prediction of Chinese motorization.

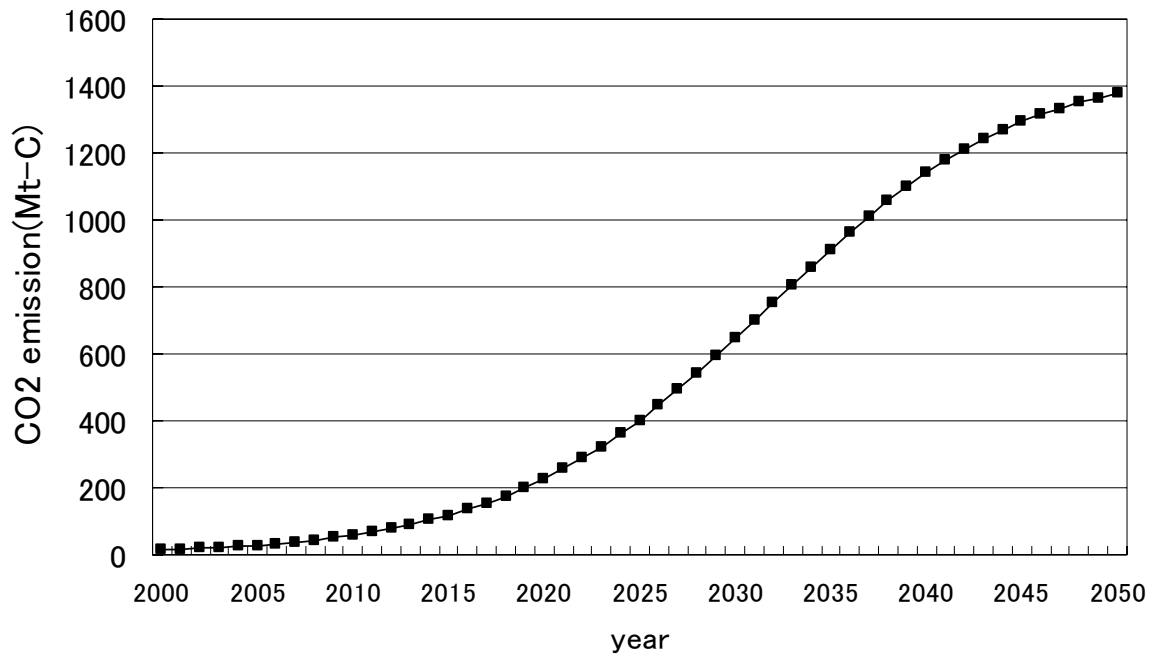


Fig. 3.7 Prediction of the amount of annual CO₂ emission by the automobiles in China.

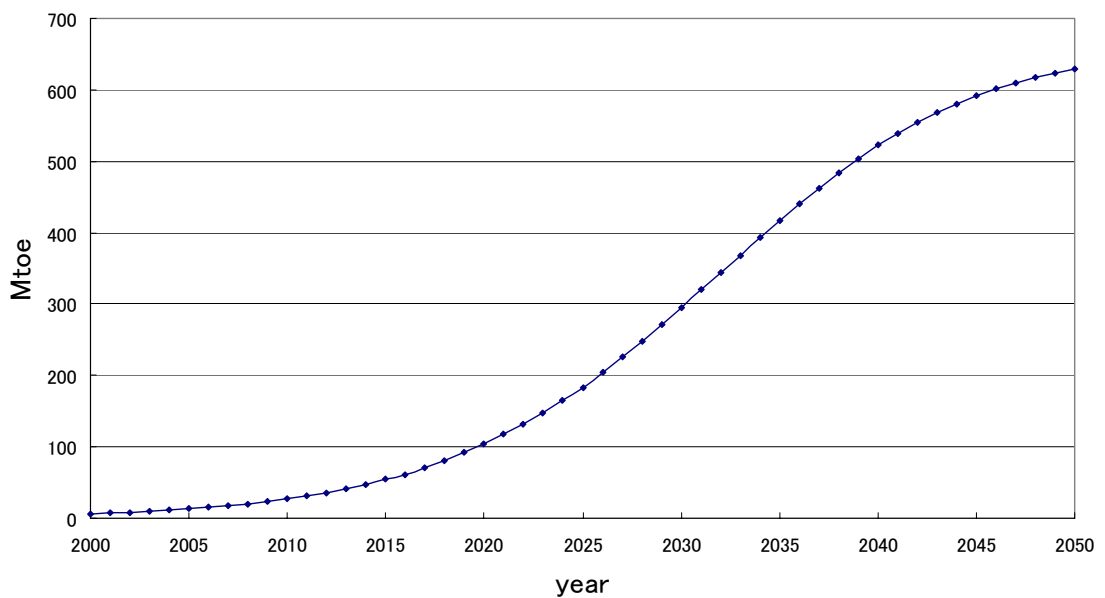


Fig. 3.8 Prediction of the annual energy consumption growth due to increasing automobiles in China.

3-5 対策案

しかし、これほどまでに急速に増加するエネルギー消費を考えると、この成長速度に勝るかたちで、果たして省エネ技術開発は行われるのか、という疑問が生じる。単純に考えて、技術開発の目標を、これ以上の成長速度を想定したものに行なうなければならない。しかしながら、たとえ省エネの技術革新が起こったとしても、なかなか達成困難な目標であることは間違いない。乗用車が増える裏では、さらにエネルギーが消費されているわけであり、この乗用車保有台数の成長速度に依存するエネルギー消費量の他にも、増加要因は多数ある。

自動車の省エネ対策としては、ITSによる交通円滑化や内燃機関の改善、別の動力源へのシフト等が考えられるが、どれも技術開発が進み実用化されるまでにはまだ時間がかかるし、これらが相互的に機能し効果がでるまでに時間がかかるなどして、即効的で大きな省エネ効果は期待できない。技術開発が複雑でなく単純であり、即効的な対策で大きな省エネ効果がないと、この成長速度に勝ることができない。

そこで考えられるのが、車体の超軽量化である^{4),5)}。軽量化案の優れているところは、(1)大きな省エネ効果が得られる(単純で効果が出やすい⁶⁾)こと、(2)インフラ整備等を要さないこと、(3)省エネ効果が永続的に持続すること、などである。これまでも、軽量化の議論はあったが、いずれも金属(の優位性)から逸脱できずに、軽量化率に限界があった。しかし、最近のCFRP研究開発は航空機への積極利用等ですばらしく発展しており、しかも自動車用途であれば技術開発のハードルは航空機用途よりも下がるであろうから、実用化しやすく、次世代の自動車は非常に軽くて強いCFRPでつくるべきである。

3-6 必須な技術開発の整理

自動車の抜本的な軽量化^{5),6)}は、現在の自動車はもとより、2章で述べたような将来内燃機関がディーゼルハイブリッドになっても、FC(燃料電池)になっても、エネルギー問題を考えるうえで「燃費を上げる」というひとつの目的においては極めて有効であり、必ず成し遂げなければならない技術開発のひとつである。特に、自動車はこれから装備品が増え、安全装置等で重くなっていくので、操舵性や加速性能を上げる、衝突エネルギーを小さくするという意味でも、軽量化は絶対に必須な技術といえよう。軽量化は、材料開発や構造解析、設計最適化など、多くの技術開発が絡み合うことで達成するが、まずは、材料開発のところで、鉄鋼やアルミのような金属系ではなく、FRPのような繊維強化プラスチック系で軽量素材を考えるべきであろう⁷⁾。

3-7 結 言

2章で示したように国連の人口部会によれば2300年までの長期的な視点で世界人口の推移を考えたとき、今世紀の前半が最も人口の増加率が高い時期である。また経済発展との相乗効果によりエネルギー消費は人口の増加率以上の伸びを示すことは明白である。

IPCC/IEAの2つの1次エネルギー需要予測を2章で紹介したが、2030年に関してはIEAによる予測もIPCCの4つのシナリオ全ても現在の1.5倍かそれ以上の1次エネルギー需要があると予想され、2050年に関して予測を行っているのはIPCCのみであるが、4つのシナリオ全てが現在の2～3倍ものエネルギーが必要とされると予測している。これは有効な対策をとることができなければ今世紀前半中に大きな代償を払ってでも必ず急激なエネルギー転換に迫られることを示している。

中国の乗用車普及予測では、中国の乗用車保有台数の伸びだけで現在の世界全体で保有されている乗用車の数が2倍になる可能性があることを示した。2章でも述べたように運輸部門、とりわけ自動車はそのほとんどが石油のエネルギーで走行している。このことから最も強くエネルギー源の転換を迫られるのは自動車であると言える。こうした中で、まず我々技術者にできることは、自動車そのものを軽くすることであり、そのために材料研究、構造解析、設計の最適化などの研究開発を推進していかなければならない。特に材料研究はすべての基礎になるために重要で、金属などの重い素材ではなく、FRPのように非常に軽くて強い繊維強化プラスチックに的をしぼり、さらに軽くてしなやかで強い繊維/マトリックスのコンポジットを実用化にむけ検討していかなければならない。次章では、この自動車の軽量化について述べる。

第3章で引用した文献等：

- 1) 世界自動車統計年報2003 第2集, 日本自動車工業会, (2003-3).
- 2) World Population Prospects The 2002 Revision Highlights, United Nations department of economic and social affairs population division, (2002).
- 3) 世界の統計 2004, 総務省統計局, (2004).
- 4) 圖子博昭・高橋淳・影山和郎・吉成仁志, CFRPによる超軽量乗用車の実現可能性—走行時のCO2排出抑制と省エネ効果の長期予測—, 日本機械学会2002年度年次大会講演論文集 (II), (2002-9), pp. 273-274.
- 5) 中塚史紀・圖子博昭・高橋淳, 地球環境問題対策としてのCFRPによる軽量化自動車開発の必要性, 第48回FRP CON-EX 2003 講演要旨集, (2003-10), pp. 69-71.
- 6) 圖子博昭・澤田真一・鈴木徹也・折口壮志・高橋淳, CFRPによる軽量化乗用車の長期的環境エネルギー問題対策効果, 日本複合材料学会2003年度研究発表講演会予稿集, (2003-5), pp. 81-82.
- 7) 高橋淳・圖子博昭・影山和郎・吉成仁志, 地球温暖化対策としての乗用車軽量化の効果と材料研究の役割, 日本機械学会2002年度年次大会講演論文集 (II), (2002-9), pp. 271-272.

第4章 乗用車の軽量化

4-1 緒言

前章までの議論により、共通して言えることは乗り物の軽量化が環境負荷低減に寄与するということであり、特に自家用乗用車の軽量化はマクロな環境負荷低減効果が大きい。本章では、日米欧で開発競争の激しい量産車用樹脂系複合材料について、その軽量化ポテンシャルおよびLCAによる環境負荷低減効果の試算結果等を紹介する。

4-2 乗用車という製品

乗用車は、Fig. 4.1に示すように、ほかの製品（たとえば家電製品等）と比べて、使用段階のエネルギー消費が大きい。船崎ら¹⁾は、LCA（ライフサイクルアセスメント）手法を用いて、自動車用鉄鋼材料のエネルギー消費原単位を求めている。それをもとに鈴木ら^{2),3)}は、現行乗用車1台あたりの生涯エネルギー消費量を定量的に求めている。乗用車を起動するためには、燃料が必要で、この燃料は今のところ石油製品（ガソリンや軽油等）である。これは、乗用車の推進系が内燃機関である以上変わらないことである。石油製品（エネルギーの固まり）を原油からつくりだし（使いやすくし）、それをタンクにいれ、内燃機関にて動力に転換し、乗用車の車軸を駆動させる。このように乗用車を駆動させるためには、このような段階的なプロセスが必要で、これにはかなりのエネルギーロスを含んでいる。ほかの製品は、ライフサイクルでみた場合、製品をつくる段階で多くのエネルギーを消費する（よって、この部分の省エネ、効率化（ロスの低減等）が進んでいる）。多くの製品の場合、つくってしまえばあとは消費者がつかうモノ（動力を要しない物質）として普及するため、使用段階の「地球資源を使うようなエネルギー消費」はゼロである。家電の場合は、使用段階で電気を要するため、この部分でのエネルギー消費がある。しかしながら、これは、家庭用の太陽光発電や燃料電池によるコージェネレーションシステムによって、効率化が図られることで解決できそうである。乗用車は、動力源（内燃機関）の燃料電池化が進んでいるものの、まだ低価格での実用化には問題が多く、実現はまだ先のことである。小林⁴⁾は、現状で達成可能な内燃機関（ディーゼル、電気バッテリー、ガソリンハイブリッド、ディーゼルハイブリッド、燃料電池等）の効率化技術別の省エネ効果を定量的に示している。また、最近の動向では、内燃機関で車軸を回して動力を伝達するのではなく、ホイール内に電気モーターを仕掛けて、そのモーター動力で推進する方式のほうが、車輪を有する移動体には最適ではないか、という議論もある。

しかしながら、車体重量を軽くする議論はあまりなされていない。車重の軽量化は、燃費向上をうながし、先述の「使用段階の地球資源を使うエネルギー消費」を低減できる。安全装置の搭載や、先進運転支援システム等、これから先、乗用車の車重はより一層重くなる傾向にある。また、モーター駆動や燃料電池駆動になった場合も同様に、車重はこれまで以上に重くなる。よって、乗用車という製品を考えた場合、この車重軽量化に関する技術開発（とくに材料開発と構造最適化）は重要であると考えられる。

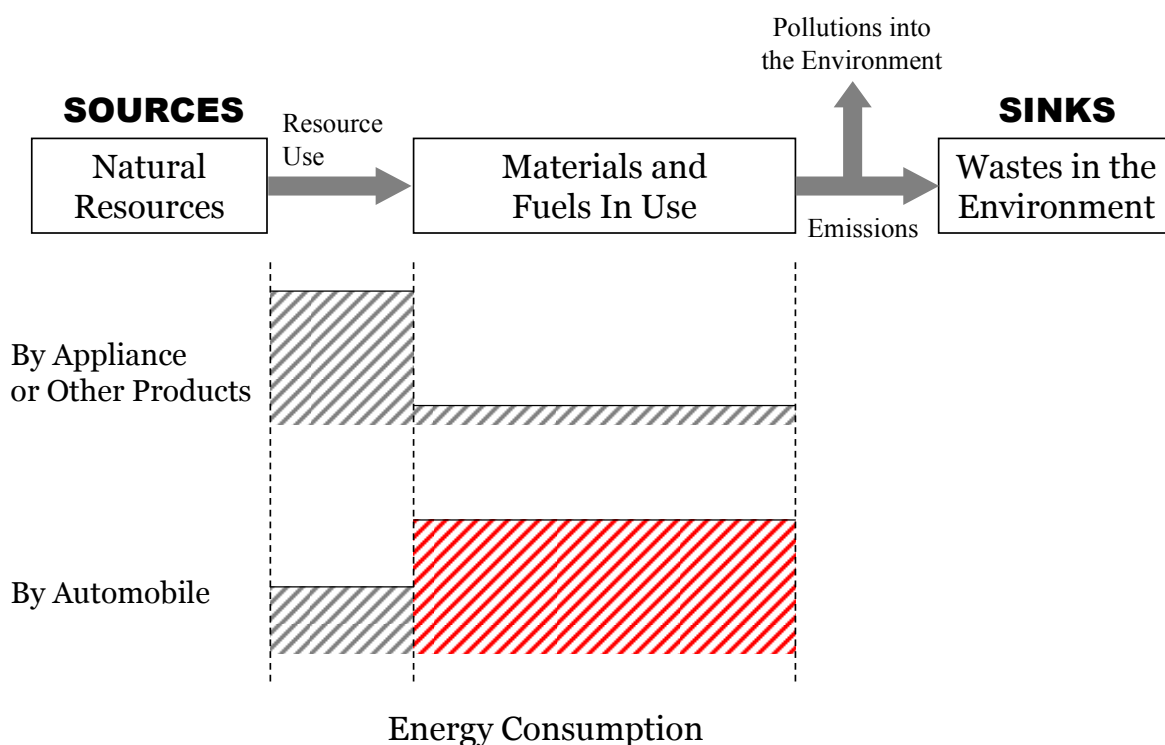


Fig. 4.1 Energy consumption construction of automobile.

4-3 乗用車の構造部材と強度部材（各構造指標について）

構造設計において、一般的に用いられる構造指標（構造的効率⁵⁾）を Table 4.1 にまとめる。構造指標（構造的効率）とは、所要の剛性を確保するのに必要な材料の重量を左右するものである。この表から、航空機等ハイテク構造物のように、構造物全体で評価する際には E/ρ 、部材単位で評価するには $E^{1/2}/\rho$ 、パネル材などの薄板を評価する際には $E^{1/3}/\rho$ 、を用い、 ρ が小さいほど（部材重量が軽くなるため）構造効率に有利であることがわかる。ここに、 E は材料定数のヤング係数、 ρ は材料物性の比重である。この中で、特に柱や薄板では、木材が有利であることが読み取れ、また価格も安いが、

木材の大量確保は森林破壊を促進して炭酸ガスの吸収源を減らすこと、木材は成長が遅いので需要と供給のバランスが保てないこと、使用に際して高温・長時間の乾燥を必要とし製品製造のコストとエネルギー消費を増大させること、木材には木目が存在し木目方向の強度は強いが木目直交方向の強度はその3%と極めて低いこと等を加味すると木材による構造は現実的ではない。

乗用車の構造は、現在その多くがスペースフレーム構造であり、フレームを構成する構造部材と、それに貼り付けるパネル強度部材とに大別される。乗用車は、曲げやねじりに対する剛性で設計されるため、前述のヤング係数を用いた構造指標で議論できる。本構造は、構造物全体で剛性を保つので、構造部材の集合であるフレーム構造は航空機等のハイテク構造物と同等に考えて、全体評価では E/ρ の指標を用い、パネル強度部材には $E^{1/3}/\rho$ の指標を用いる。しかしながら、全体構造は様々な要因で変化し最適化されていくために、ただ単純に材料の優位性を確認するためには、各々の材料で薄板をつくった場合の構造指標の比較が直感的で理解しやすい。したがって、本研究では、すべての構造指標を $E^{1/3}/\rho$ に統一して議論している。

前章までの議論とこの表から、乗用車の軽量化に有利な材料は、CFRTS および CFRTTP しかないことがわかる。CFRTS を高強度／高剛性が要求される構造部材に、CFRTTP をその他の構造部材、およびパネル強度部材にそれぞれ適用すれば、画期的な軽量化が図れる。

Table 4.1 Structural indexes on each materials.

Material	STRUCTURAL INDEX for			Integration	Member	Panel/Sheet
	Young's Modulus	Specific Gravity	Specific Tensile Strength	Specific Young's Modulus	$\frac{\sqrt{E}}{\rho}$	$\frac{\sqrt[3]{E}}{\rho}$
	E GPa	ρ -	σ/ρ MPa	E/ρ GPa	$\times 10^3$ Pa ^{1/2}	$\times 10$ Pa ^{1/3}
Steel	210	7.8	62 (480/7.8)	27	59	76
Ti alloy	108	4.5	213 (960/4.5)	24	73	106
Al alloy	75	2.8	168 (470/2.8)	27	98	151
Mg alloy	42	1.7	118 (200/1.7)	25	121	204
Glass	73	2.4	50 (120/2.4)	30	113	175
Concrete	15	2.5	2 (4/2.5)	6	49	99
GFRP SMC Vf60%	12	2.0	50 (100/2.0)	6	55	114
CFRTS RTM Vf60%	46	1.6	438 (700/1.6)	29	134	224
LC-CFRTP Vf30%	23	1.2	167 (200/1.2)	19	126	236
Wood	14	0.5	200 (100/0.5)	28	236	482

Source: ref. 5), 6), 7), 8)

NOTES:

Steel: High Tensile Strength Steel.

Al alloy: A5052.

GFRP: Glass Fiber Reinforced Plastic (E-glass/Unsaturated Polyester Resin).

CFRTS: Carbon Fiber Reinforced Thermoset (T700SC/Epoxy Resin).

LC-CFRTP: Low Cost Carbon Fiber Reinforced Thermoplastic (T700SC/Polypropylene).

Wood: Spruce. The property of loading with the grain direction.

4-4 連続繊維強化と短繊維強化

繊維強化コンポジットには用途に応じて、連続繊維強化と短繊維強化とがある。Table 4.2 は、主要な FRP 製造法である。現在、FRP の成形法はその用途に応じて、または繊維形態に応じて様々な手法が準備されている。これらは、熱硬化性 FRP 用として発展してきた技術であるが、熱可塑性 FRP となっても大きな技術変更なしに成形可能である。熱可塑性 FRP の熱成形性、自動車用途かつ量産性（超短時間成形）等を考えれば、RTM や SMC、PRM（スタンパブル成形）、自動プライアップマシンでオートメーション化された PPM、PUL（プルトルージョン成形）、FIL（フィラメントワインディング）、IM（射出成形）等が現実的であろう。COM は、経験とスキルが必要であるのと、手作業なため生産速度の向上にはつながらない。よって、熱可塑性 FRP を考える上では不向きであり、除外せざるを得ない。

Table 4.3 は、各製造方法による成形品の寸法、形状、繊維長、繊維配向などについて特長を述べたものである。この表から、どんな成形にも対応可能な RTM/PPM、連続繊維で対応可能な PRM/PUL/FIL、短繊維で対応可能な SMC/IM などが読み取れる。この7種類の成形法が今後の FRP 製自動車製造の鍵を握ると思われる。一番大事なのは、10～50メートルクラスの大物成形品を製造する場合には連続繊維を使用し、中、小物成形品では、短繊維を使用することにある。自動車の場合、例えば、スペースフレーム等は高強度／高剛性が要求され、かつ大物になるので、RTMによるCFRTS（熱硬化性CFRP）一体成形品や、PULやFILによる成形品の組合せで対応可能である。パネル強度部材は、剛性は（自身の形を保っているだけで良く）それほど要求されないために、SMCやIM、PRMによる短繊維強化のCFRTP（フレッシュ熱可塑性CFRPやCFRPリサイクル材）で対応可能である。このように、自動車はもとより多くの構造体にFRPを用いる際には、連続繊維と短繊維とをうまく使い分け、適材適所に配置するという設計が必要となる。

Table 4.4 に、各成形法の利点および問題点、Table 4.5 に繊維形態別の成形品製造の特徴をまとめる。

Table 4.2 Major Fabrication Process of Fiber Reinforced Plastics.

Type	abbreviation	Comment
contact molding	COM	hand lay-up or spray up; small production runs
resin transfer molding	RTM	medium production; dimensionally accurate parts
sheet molding compound press molding	SMC PRM	High speed molding using compounds high speed molding in long production runs; stamping molding
prepreg molding	PPM	high consistency and high performance
Pultrusion	PUL	longitudinally reinforced parts
filament winding	FIL	bodies of revolution such as pipes and tanks
centrifugal molding	CEM	generally for three-dimensional shape
injection molding	IM	generally for small parts with short fibers (<5 mm)

Source: ref. 9)

Table 4.3 Fabrication process limitation.

Process	COM	RTM	SMC	PRM	PPM	PUL	FIL	CEM	IM
maximum dimension (m)	30	3	3	3	10	50	30	6	3
shape	Any	any	any	flat	Any	const	cyl	cyl	any
reinforcement length	Any	any	long	any	Cont	cont	cont	short	more short
orientation	Any	any	ran	ori	Ori	ori	ori	ran	ran

Source: ref. 9)

NOTES:

- Shape flat: height much less than in-plane dimensions;
 const: constant cross section;
 cyl: cylindrical symmetry.
- Length cont: continuous;
 any: short, long or continuous.
- Orientation ori: oriented;
 ran: random.

Table 4.4 Principal considerations for using each processes (remove COM).

Resin Transfer Molding Process, RTM	
Advantages	Disadvantages
most reinforcements	wet-out of fiber and resin
most resins	design of molding
wide level of properties	medium tooling cost
reproducibility	
Press Molding Process, PRM (include SMC)	
resins and reinforcement pre-selected	restricted range of materials
materials formulated to optimize properties	high tooling cost
properties known	high capital cost
suitable for medium to high volume production	
Prepreg Molding Process, PPM	
resins and reinforcements prescribed	Restricted range of materials
process route established	drapability limited
property level known	thin layers
economic in small volumes	high material and labor cost
Pultrusion Molding Process, PUL	
materials pre-selected	not all material combination possible
property level established	only certain types of profile possible
better reproducibility	
profiles available off-shelf	special profiles have
small and large numbers possible	a high tooling cost
Filament Winding, FIL	
all fibers and most resins	restricted geometry unless
good fiber alignment	multi-axis winding head use
reproducible properties	medium capital cost
medium volume production	
easily automated	

Source: ref. 9)

Table 4.5 Fabrication of composite products by using continuous fiber and discontinuous fiber.

Continuous	Discontinuous
Large products with RTM, Light-RTM, VIP, PUL, FIL, PPM (High quality integration molding using advanced closed molding)	Medium and Small Products with IM, SMC, PRM (High speed, low cost & low energy intensity molding)

4-5 乗用車へのFRP適用段階（パーツからフルモノコック構造まで）

4-5-1 自動車車体構造の変遷⁶⁾

一般的に自動車車体の構造は、フレームつき構造とモノコック構造に大別される。自動車の大量生産の歴史は、1908年のT型フォードにはじまるが、当時の車体構造は、ラダーフレームと呼ばれる「はしご状フレーム」のプラットフォームのうえに、キャビンをマウントするフレームつき構造であった。

フレームつき構造は、前後の車輪の懸架装置やエンジン、トランスミッションなどの駆動系からの入力をすべてフレームで受ける構造となっており、フレーム単体で車体として十分な強度／剛性を保つ必要がある。さらに、キャビンを構成する外板などの隔壁を有することから、重量面では不利な構造であった。また、フレーム構造は主としてアーク溶接により組み立てられる場合が多く、その量産性にも課題があった。

1950年にはいり、当時航空機からはじまった「機体外板パネルに最小限の補強を施して強度／剛性をもたせる」という応力外皮構造の考え方を採用し、自動車のモノコック構造が誕生した。前者と異なり、車体全体で入力を受けるモノコック構造は、フレームつき構造に比べ重量も軽く、高い曲げ剛性／ねじり剛性を得られる。また、薄板プレス加工が中心で、スポット溶接などの点溶接が多用でき、産業用ロボットを有効につかうことで量産性に優れることから、鉄鋼乗用車においてはこのモノコック構造が主流となっている。

4-5-2 車体アルミ化の変遷⁶⁾

1980年代にはいり、車両重量制限への対応や、主にスポーツカーにおいて運動性能の向上を目的として、軽量素材としてのアルミニウム合金が採用され、自動車車体への適用が拡大した。

アルミニウム合金（以下、AL 合金）は、鉄鋼との溶接が不可能であると同時に、両者が接する場合、その電位差によって腐食が進むという問題から、鉄鋼と同一の構造体に混在する形で使用することはきわめて困難な材料である。

そこでまず、車体の AL 合金化はエンジンフードやフェンダーサンルーフなどといったボルトオンで車体に取り付けられるクロージャーパネルを中心にはじまった。クロージャーパネルの AL 合金化は、その構造を変えない単なる材料置換が可能であり、自動車メーカーとしては鋼板用の生産設備をほぼそのまま使用できるというメリットがあった。

その後、車体軽量化の追及はさらに進み、1980年代の後半よりオール AL 合金車体の開発が加速した。

1990年、ホンダはNSXにおいて世界初のオールAL合金製モノコック構造を発表した。この構造は、それまでの鉄鋼製車体のモノコック構造を、ほぼそのままアルミ化したもので、軽量化と高い量産性の両立を図った。内板部（骨格部）には5000系の高強度かつ良成形性のAL合金（A5052, A5182等）を、外観性が要求される外板部には、腐食性を向上させたベークハードタイプの新しい6000系AL合金を施した。この内板5000/外板6000という組合せは、のちのAL合金製車体の素材構成のスタンダードとなった。しかし一方で、鋼板に比べてAL合金板の成形性、溶接性の悪さなどの課題から、車体構造、製造コストにおいては改善の余地を残す結果となった。

1994年、アウディはA8にAudi Space Frame (ASF) と名づけ、スペースフレーム構造のオールAL合金製車体を採用した。スペースフレーム構造は、Fig. 4.2に示すように、パイプなどのフレームにより車体の基本骨格を構成する「外骨格構造」で、複雑で大径の閉断面を容易に得られるAL合金押出材を活用できることから考えて、AL合金製車体に適した構造といえよう。

近年では、このスペースフレーム構造をベースに、量産性の向上や低コスト化、あるいは軽量化をねらった部材構成最適化の研究や、加工および接合法が開発され、様々な形態のAL合金製スペースフレーム構造が発表されている。AL合金ダイカストのさらなる簿肉大物化技術により、プレス成形品は、ダイカスト部品へと転換が進み、プレス成形品、押出品、ダイカスト品を適材適所に配したあたらしいスペースフレーム構造が、今日のオールAL合金製車体構造のスタンダードとなっている。

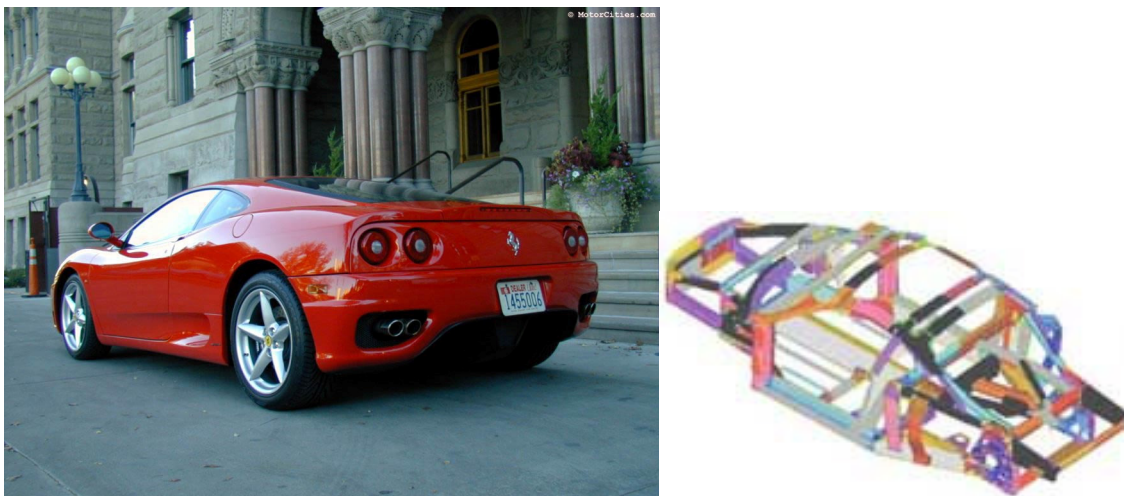


Fig. 4.2 Photograph of Ferrari 360 Modena and its space frame structures.

4-5-3 さらに軽量化を目指して

しかしながら、AL 合金製車体構造で実現できる軽量化には、AL 合金材の力学特性に起因する限界があるように思われる。軽量合金（AL 合金やマグネシウム（MG）合金）を用いてフレームを形成しようとする、まずヤング率が、鉄鋼（210GPa）のたかだか1/3 程度（71GPa）であることから、曲げ剛性の不足やそれを補うための厚肉化、接合部での応力集中に対する強度不足、疲労の影響等を加味し、フェールセーフを保とうとすると、結局画期的に軽量化できない（つまりフレーム構造自体に限界がある）ということが挙げられる。代表的な AL 合金の引張強度は、約 320MPa で、ハイテンの約半分である。

炭素繊維複合材料は、これまでも述べてきているが、材料定数までも人為的に設計可能であり、役割に応じて、異なる性能の材料を適材適所に配するというスペースフレームの設計コンセプトであれば、まさに最適な材料である。さらに、炭素繊維複合材料は、その軽さと強さが売りであり、また、疲労特性にすぐれていることから、AL 合金よりも大きな軽量化率が期待でき、自動車用途材料向きであると言えよう。また、第2章でも述べたとおり、熱可塑性CFRPを考えれば、リサイクルしてCar to Carのクローズドリサイクルも容易である。AL 合金のリサイクルの場合には、部品回収→分離/分別→溶解/精錬→ダイカスト成形→リサイクル品、という具合にリサイクルプロセスが複雑かつ多段階で、「溶解/精錬」プロセスでのエネルギー消費が膨大になる可能性がある。リサイクル品は品質のおちたダイカスト品のため、リサイクルアルミの用途は限

られてくる。

Fig. 4.3 は、著者が提案する熱可塑性 CFRP の適用順序を示している。第1世代は、ハイテンや AL 合金のスペースフレームとハイブリッドで使用するのが現実的であろう。第2世代では、スペースフレームを継ぎ目なしのインテグレーション成形にて熱硬化性 CFRP でつくり、曲げ応力を負担しないクロージャーパネルに、熱可塑性 CFRP が適用される。第3世代では、フレームの熱硬化性 CFRP はそのままに、そのリサイクル材がクロージャーパネルが適用される。第4世代では、フル熱可塑性 CFRP 製構造となり、このとき構造だけの軽量化率は、55%を超える。

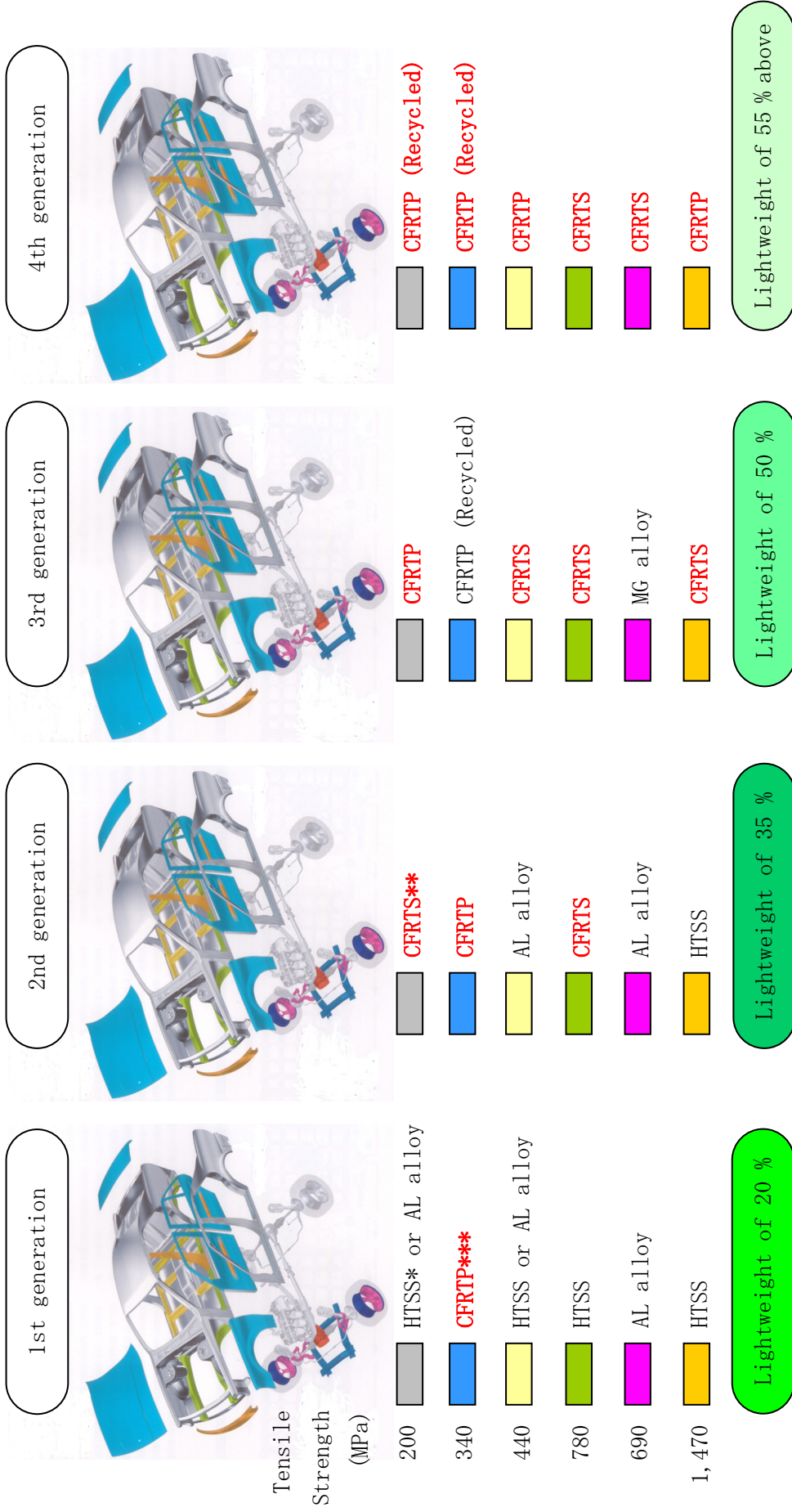


Fig. 4.3 Suggestion for lightening automobile fabrication by using carbon fiber reinforced thermoplastic.

*HTSS: High Tensile Strength Steel. **CFRTS: Carbon fiber reinforced thermoset. ***CFRTP: Carbon fiber reinforced thermoplastic.

4-6 軽量基礎素材の比強度・比剛性の比較¹⁰⁾

Fig. 4.4 は自動車の構造部材として考えられる各種材料の比強度と比剛性を比較したものである。なお、自動車構造では曲げ剛性での比較となるので比剛性としてはヤング率の3乗根を密度で割った構造効率指標を用いている。同図より、金属材料は強度にバリエーションがあるものの剛性は一定であるのに対し、複合材料は繊維形態・繊維含有率・成形方法によって幅の広い特性を発現することがわかる。なお、ここでは炭素繊維強化熱硬化性樹脂 (CFRTS) として航空機やF1カーで実績のあるものと、低コスト材として開発途上のものを例示した。また、炭素繊維強化熱可塑性樹脂 (CFRTP) は開発中のものが多いが、その大きな狙いの一つは低コストな板材の提供であって、炭素繊維の体積含有率によって力学特性以上に素材コストが大きく変動するため、目的に応じた繊維体積含有率の設定が重要となる。

Fig. 4.4 から、CFRTS は強度部材、剛性部材共に金属材料よりも大幅な軽量化が期待できることがわかり、CFRTP は強度で競合するものの剛性部材としての軽量化ポテンシャルが大きいことがわかる。Fig. 4.5 は複合材料のマトリックスとして用いられているいくつかの樹脂に関して炭素繊維の体積含有率を変化させてCFRPの比曲げ剛性を示したものであり、Fig. 4.6 と Fig. 4.7 はスチールを1とした場合に同じ曲げ剛性を発現する板材の重量と板厚を示したものである。まず、Fig. 4.5 から、スチール板はアルミニウムにより約半分に、マグネシウムにより約4割に、CFRPにより最高で約3割にまで軽量化できることがわかる。また、CFRTPにおいては一般に、高価な炭素繊維の体積含有率を増やしても曲げ部材の軽量化効果はそれほど上がらないこともわかるが、逆にあまり炭素繊維の含有量が低いと、Fig. 4.6 や Fig. 4.7 に示されるように板厚が厚くなったり、弾性変形するひずみ範囲が狭く疲労しやすくなるため、用途に応じた適量の炭素繊維の含有が必要となる。

本研究においては、熱可塑性CFRPについて、開発目標値をこの青色のエリアと設定している。

4-7 乗用車の環境配慮の検討 (LCA)¹⁰⁾

CFRPを用いた軽量化による環境負荷低減効果

もちろん以上で示したようなCFRTSもCFRTPも量産車用には開発途上であるが、開発目標値とその効果がある程度明らかとなってきたことから、ここ数年で特に熱可塑性樹脂関連技術の向上がめざましい。Fig. 4.8 は、この種の新素材を適用した場合の段階

的な車体軽量化の例であり、コスト、製造速度、リサイクル性の面からそれぞれ問題解決のための技術開発が進んでおり、超軽量量産車の実現可能性が高まってきていると考えている。

以上で CFRP による乗用車の軽量化ポテンシャルが明らかになったが、ライフサイクルでのエネルギー消費量を計算した結果^{11),12),13)}を Fig. 4.6 に示す。すなわち、炭素繊維の製造エネルギー原単位の大きさ¹⁴⁾に起因して、CFRTS だけで軽量化した場合には部材製造までのエネルギーが大きく、ライフサイクルでの省エネ効果は-17%にとどまること、CFRTP の併用（主として板材への適用）で軽量化率を損なわずに省エネ効果を向上させられること、さらにはリサイクルによってより大きな省エネ効果が期待できることなどが読みとれる。

4-8 炭素繊維強化ポリプロピレンへの期待

LCA の結果よりいえることは、CFRP を自動車に導入することは、炭素繊維の製造原単位が高いからといって、決して環境に悪いわけではないということである。先述した成形法において、これまでの常識では（特に熱硬化性 CFRP : CFRTS では）、硬化剤で樹脂を硬化させるために、成形が長時間に及んだり、エネルギーを多大に消費する（同時にコストも高くなる）など、環境に悪い軽量素材として認知され、さらに材料 4R の考え方が追い打ちをかけるなどして、CFRP は一部にしか普及せず、量産には不向きだとされてきた。しかし、最近になって、迅速クローズモールドの VARTM（バータム法: Vacuum Assist RTM または、VIP 法: Vacuum assist resin Infusion Process）や迅速/低コストクローズモールドである L-RTM（ライト RTM 法: Light-RTM）などの研究開発がすすみ、実用化されており¹⁵⁾、CFRTS の量産性や低コスト化が図られている。

その中であって、CFRTP は、CFRTS の成形法をそのまま応用し、速く/安くつくれる可能性がある一方で、CFRTS のリサイクラビリティ（4R）を解決できるという点で優れている。マトリックスに繰返し熔融再成形可能な熱可塑性樹脂を用いている CFRTP は、廃棄後に回収され、分別後、それがそのまま新しい材料の資源となることができる。CFRTS も一度使い終わったら今度はあらたな CFRTP の資源として有効再利用される。炭素繊維にも段階的なグレードができて、高級グレードはフレッシュな炭素繊維、中級グレードは解重合等によって CFRTS から取り出された繊維、低級グレードは CFRTS 破砕物という具合にわかれ、消費者はそれを必要に応じて選択できるようになる。つまり、適材適所にそれに見合った炭素繊維を使用することによってムダを一切省く。こういう考え方のもとで、CFRTP は本来長寿命である炭素繊維を寿命ぎりぎりまで使いきれるという意味で、環境配慮型の次世代軽量素材といえよう。CFRP が世の中に普及すると、同時に地球環境の中へ排出される廃棄物が増えるイメージにあったのが、CFRTP の登場に

よってその可能性はうすれる。

炭素繊維強化ポリプロピレン (CFRPP) は、以上のコンセプトにマッチする材料である。CFRTP 自体はあたらしい概念ではなく、CF/PEEK, CF/PA66 などに代表されるように、世の中にすでに普及している。しかしながら、CF/PEEK, CF/PA66 はその優れた特性とほうらはらに、エンブラのため材料コストが高い、高耐熱性で成形温度が高い、再熔融温度も高く、また熱劣化を起こしやすい材料なため容易にはリサイクルできないなど、普及型の材料とは言い難い。CFRPP のマトリックスは、熱可塑性樹脂の中で一番軽く、材料コストが安く、成形温度が低く、C と H の単純な化学構造であるオレフィン系であるためにリサイクルや変性させやすい¹⁶⁾など、利点が多い。

しかし、元来炭素繊維とポリプロピレンの界面接着が悪く、期待される物性（特に強度）が発現しなかったことから、炭素繊維とポリプロピレンの組合せ用途は、射出グレード（短繊維強化）のみにとどまっていた。界面接着がわるいと、きちんと応力やひずみを伝達しきれないために、限界ひずみが極めて低い。この問題を解決するのが、本研究のひとつのテーマでもある。本研究では、ポリプロピレンが結晶性のポリマーであることを利用して、この解決に努めている。詳しくは、第5章を参照されたい。

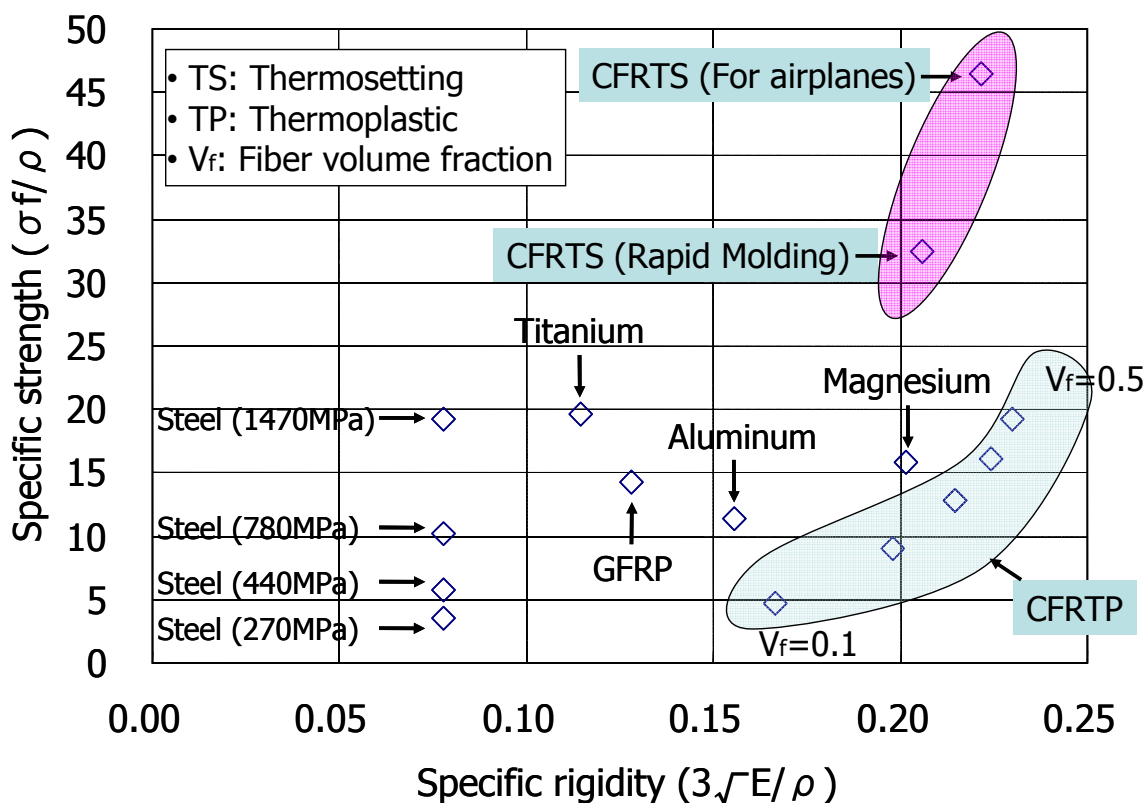


Fig. 4.4 Comparison of each structural materials with the specific strength and the specific rigidity.

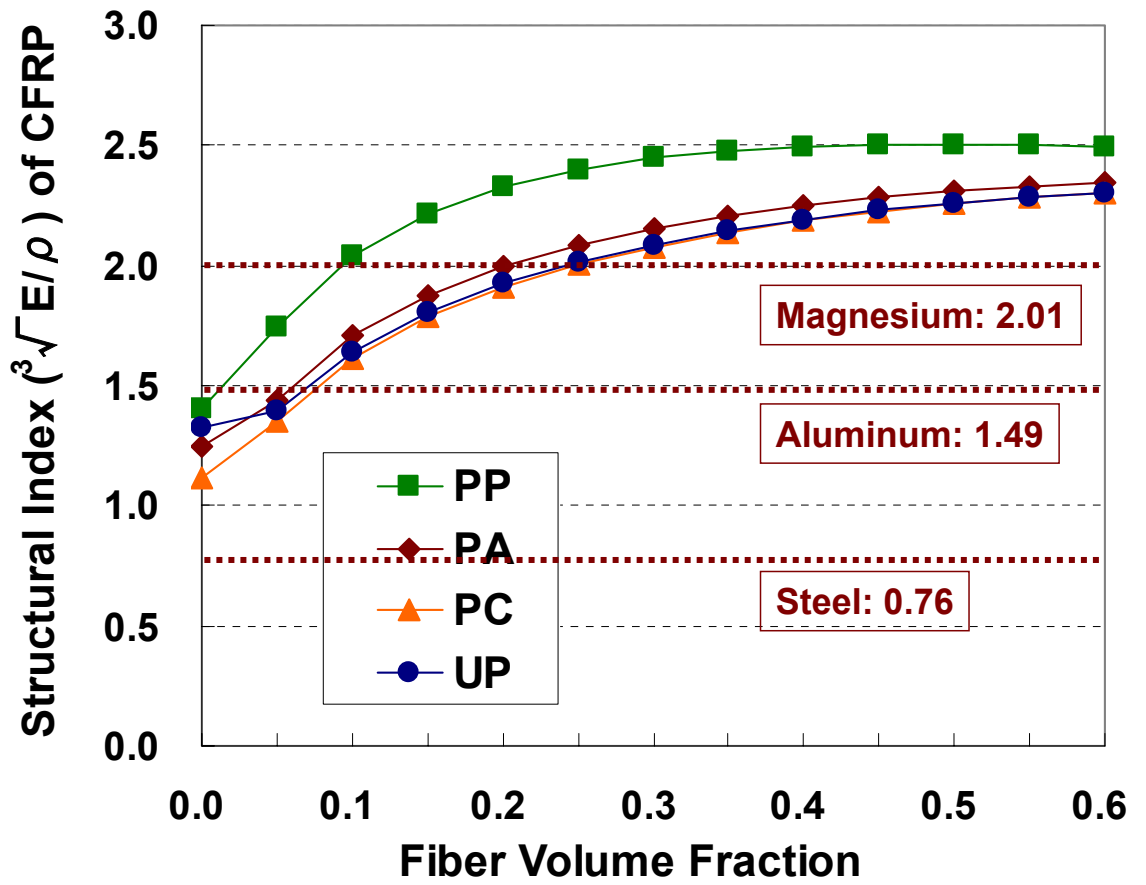


Fig. 4.5 Influence and comparison of the structural index related the flexural stiffness by the fiber volume fraction of each CFRTPs.

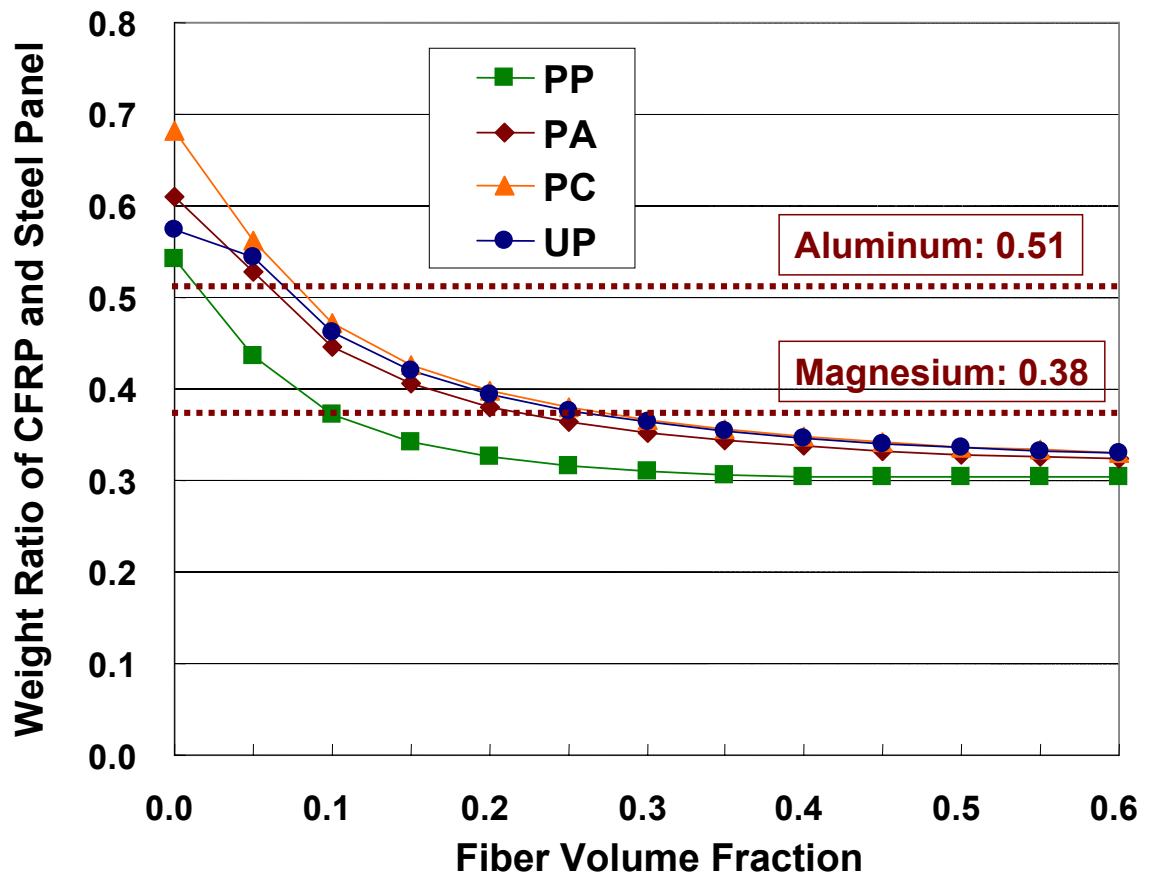


Fig. 4.6 Influence and comparison of the weight ratio of CFRTP and Steel panel by the fiber volume fraction of each CFRTPs.

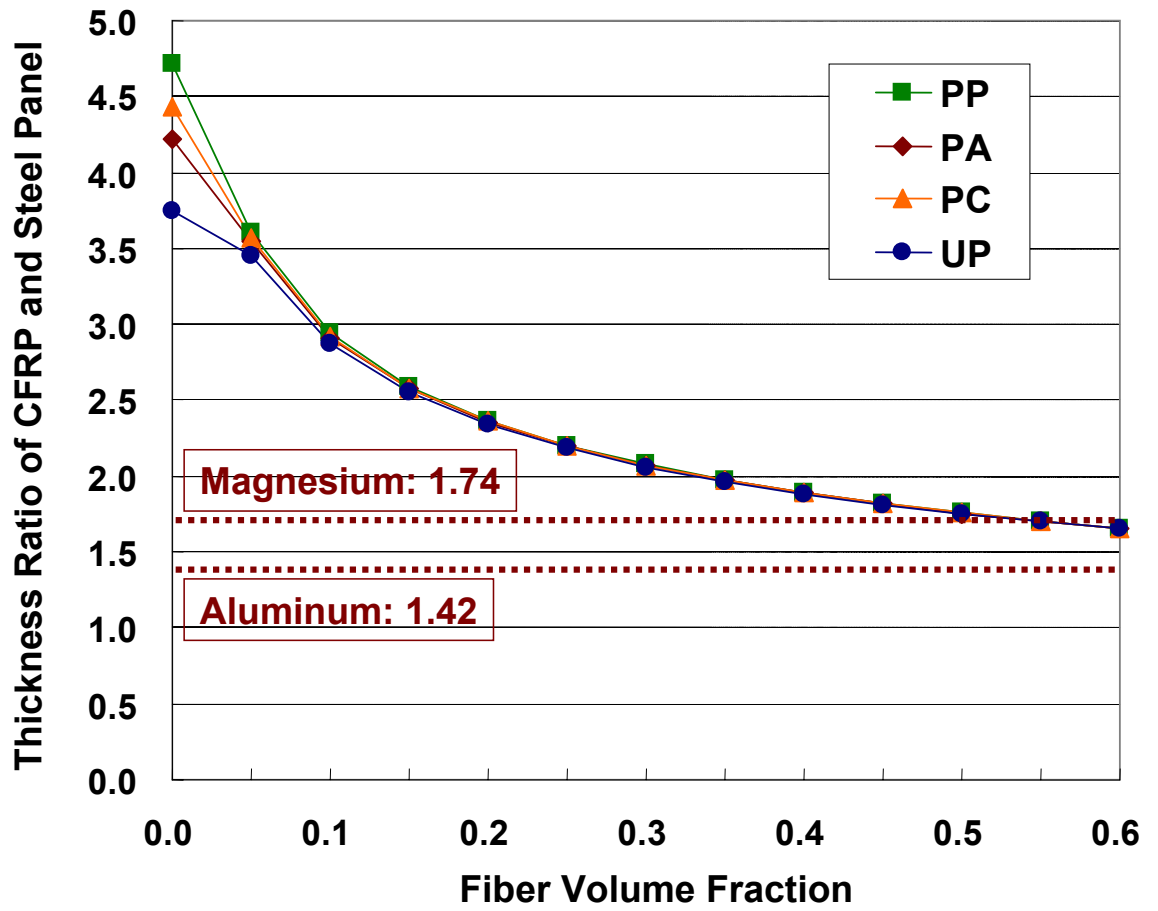


Fig. 4.7 Influence and comparison of the thickness ratio of CFRTP and Steel panel by the fiber volume fraction of each CFRTPs.

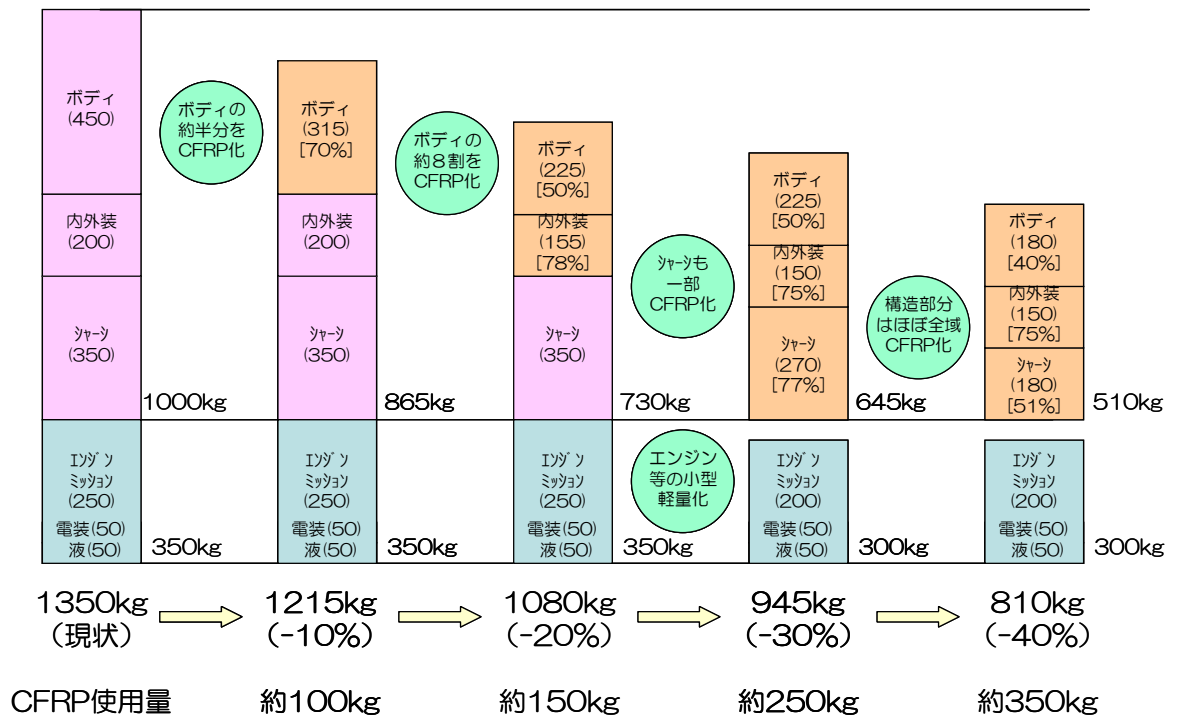


Fig. 4.8 Lightweight steps of a passenger vehicle by using CFRP.

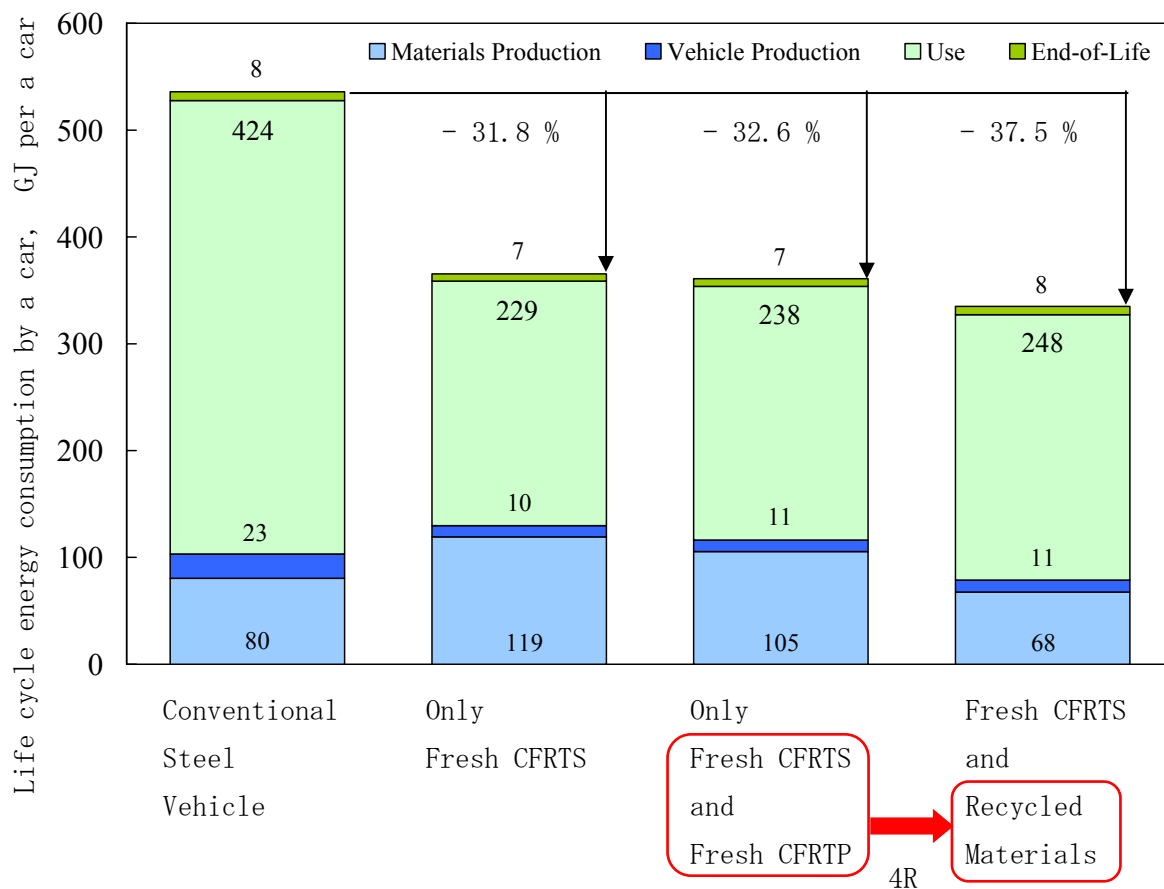


Fig. 4.9 Changing to the reduction of life cycle energy consumption of a passenger vehicle, in case of lightening the passenger vehicle by using CFRTS and CFRTTP (calculated by using basic energy intensity of ref. 17)).

4-9 結 言

本章では、乗用車の抜本的な軽量化には、軽量材料として CFRP しか考えられないことを、自動車構造、成形法、薄板材の軽量金属との比較等を通して示した。また、CFRP 製乗用車は CFRP 材料の 4R を推進することで、ライフサイクルでのエネルギー消費を現行の鉄鋼製乗用車に比べて大幅に抑えることが可能であり、4R 推進のためには、自動車用 CFRTTP の実現が求められることを述べた。

中国をはじめとする非 OECD 諸国の今後の人口増加と経済発展を考えると、抜本的な省エネ技術と持続可能社会のためのライフスタイルモデルを先進国において構築して、

出来るだけ早く途上国に伝えていく必要があると言える。ところが、産業・民生部門ではエネルギー変換効率向上のメリットからガス化や再生可能エネルギーの積極活用という脱石油のインセンティブがあり、これが同時に温暖化対策ともなっていくが、運輸部門においては省エネと温暖化対策が脱石油においてトレードオフとなっており、当面は市場原理に委ねられ、先進国における技術開発遅延が危惧される。

このような中で注目すべきは輸送機器の超軽量化技術であり、運輸部門におけるエネルギー源や内燃機関の選択と無関係に、即効的かつ抜本的に省エネと温暖化対策を進めることが可能となる。そのうえで、CFRTPは必要不可欠な軽量素材となり、超軽量、低コストかつ4R利用までも視野に入れた早急な材料開発が求められる。

第4章で引用した文献等：

- 1) A. Funazaki, K. Taneda: A Study of Inventories for Automobile LCA (3) - Iron and Steel Production -, JARI Research Journal, Vol.23, No.2, (2001), pp.22-29.
- 2) 鈴木, 菅, 高橋: 量産車用CFRPによる軽量乗用車のLCA, 第29回複合材料シンポジウム講演論文集, (2004-10), pp.195-196.
- 3) T. Suzuki, T. Odai, R. Fukui and J. Takahashi: LCA of Passenger Vehicles Lightened by Recyclable Carbon Fiber Reinforced Plastics, Proceedings of International Conference on LCA 2005, (2005-4), pp.1-3.
- 4) 小林紀: 燃料サイクルで見た自動車のエネルギー効率, エンジンテクノロジー, (2001).
- 5) J. E. Gordon, (石川廣三(訳)): 構造の世界, 丸善, (1991-10), pp.337-338.
- 6) J. E. Gordon, (土井恒成(訳)): 強さの秘密, 丸善, (1999-9), p.38.
- 7) コンポジット材料の製造と応用, シーエムシー, (2000-10).
- 8) だれでも使えるFRP-FRP入門-, 社団法人強化プラスチック協会, (2002-9).
- 9) NEIL L. HANCOX AND RAYNER M. MEYER: DESIGN DATA FOR REINFORCED PLASTICS. AGUIDE FOR ENGINEERS AND DESIGNERS, CHAPMAN & HALL, (1994), pp.269-295.
- 10) 高橋淳, 軽量化に寄与する高分子系複合材料の現状と将来, 自動車技術, Vol.59, No.11, (2005-11), pp.17-23.
- 11) T. Suzuki, et al. : Evaluation of Effects of Lightening Trucks on Environment by LCA, Proceedings of the 3rd International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing, p. 135 (2003).
- 12) T. Suzuki, T. Odai, R. Fukiu and J. Takahashi, LCA of Passenger Vehicles Lightened by Recyclable Carbon Fiber Reinforced Plastics, Proceedings of International Conference on LCA 2005, (2005-4), pp.1-3.
- 13) T. Suzuki, et al. : LCA of Lightweight Vehicles by Using CFRP for Mass-produced Vehicles, Proceedings of 15th International Conference on Composite Materials (ICCM-15), (2005).
- 14) 高橋淳: FRPのLCA, 強化プラスチック, Vol.51, No.8, pp.61-64 (2005).
- 15) Composite One Web site: <http://www.compositesone.com/process.htm>
- 16) H. Zushi, et al. : Mechanical Properties of CFRP and CFRTTP After Recycling, Proceedings of 15th International Conference on Composite Materials (ICCM-15), (2005).
- 17) 日本航空宇宙工業会: 複合材料のインベントリデータ構築に関する調査報告書, (1999).

第5章 CFRPPフレッシュ0°材の開発と力学特性評価

【本章の概要】

本研究では、軽量で量産性に優れ、低コストかつリサイクル容易で長寿命な熱可塑性CFRPとして、炭素繊維強化ポリプロピレンの実現を目指している。その一環として、ここでは、成形／加工条件をパラメーターとして、基本的な0°材の力学特性データを取得することに主眼をおいている。

本章では、炭素繊維の化学的処理による表面改質／解繊、樹脂の流動性／無水マレイン酸による変性、および成形条件に着目した。試験は、静的評価では3点曲げ試験およびアイゾット衝撃試験、動的評価では引張疲労試験を実施した。提案する方法で成形された繊維含有率40%の0°材は、約700MPaの曲げ強度、約89GPaの曲げ弾性率、約115kJ/m²の衝撃強度を有し、上記検討を行わないものに比べ、強度で約1.5倍、弾性率と衝撃強度で約1.1倍の改善がみられた。よって、本材料を等方化した場合、約260MPaの強度、約33GPaの弾性率を有することが期待される。この値は、現在の熱可塑性GFRPマット材や射出成形品の特性を凌駕するものである。さらに疲労試験では、静的引張応力の1/3程度（約500MPa）の応力下では、疲労特性は従来のCFRPと同じように金属材料に比べ優れている。このことは、本材料で現実的な（使用に際し、繰り返し変動応力が生じるような）大物成形品が成形可能で、本材料が広範の分野に適用可能な低コスト量産型CFRPとなりえることを示している。

5-1 緒言

京都議定書は2005年2月16日に発効され、批准国はこれから省エネ努力を国策として講じていかなければならない。

筆者らは、これまでの研究で、世界のエネルギー需要とそれを起源とするCO₂排出量の中／長期的な将来予測を行っており、特に中国の自動車社会の爆発的な成長は、直接または間接的にエネルギーの大量消費を促進し、炭酸ガスの排出等環境負荷を増大させ、結果として地球環境問題と深く関わることがわかった^{1)~3)}。この解決の糸口として自動車軽量化による走行燃費の大幅な改善や自動車寿命の延命等が考えられる。前者には、比強度／比剛性共に高い材料の開発が要求され、後者には、優れた耐食性／耐久性／修理性等が要求される。さらに自動車への導入を考えると、これに低価格／量産性／4R性（材料のリユース／リサイクル／リペア／リデュース）が加わる。本研究は、この要求を満たすべく、軽量高耐久の炭素繊維強化複合材料（以下、CFRP）を新しい自動車用

途材料とするアプローチである。

自動車の排気ガスが環境（公害）問題としてはじめて認識された1960年代から、排ガスのクリーン化や低燃費化の技術開発がなされているが、これらは推進系／動力系の改善であった。最近になって自動車用途材料の見直しが図られ、アルミ合金やマグネシウム合金といった鉄鋼に替わる軽量金属材料が注目されている。しかし適用箇所の制限や技術経験等から、このような自動車用途材料は大変高価であり普及していない。自動車の車重は、安全性向上のための安全装置類や、円滑な交通のためのITS装置類で、これからも増加し続けるであろう。金属材料による軽量効果は限界に達しており、より大きな軽量効果を生むためには、金属に替わる革新的な材料で、抜本的に見直さなければならない。

航空機や一部の高級自動車等に用いられているような従来の熱硬化性CFRPは、比強度、比剛性に優れ、軽量で高性能な反面、金属に比べライフサイクルエネルギー消費／価格／量産性／4R性の面で不利とされ、人工物に広く普及させることは困難であり、あくまで特殊用途材料でしかない⁴⁾。D. Kanawadeらの研究⁵⁾で言及されているように、一般に広く認知され、大規模に普及させるためには、非常に安価であり、迅速に成形可能で、かつどこにでも使える性能と、リサイクルし易さを兼ね備えたCFRPの開発が必要となってくる。

熱硬化性CFRP製品の製造のエネルギー消費⁶⁾は、Fig. 5.1に示すように、鉄鋼製品の約48MJ/kg-Steelに比べ、少工数短時間成形であるRTMでも約234MJ/kg-CFRPと確かに多いが、熱可塑性プラスチックの利用や炭素繊維使用量の削減で約183MJ/kg（約22%の省エネ）に抑えられ、1.3/7.8の比重比を考えれば、鉄鋼と同等となる。また、製品の4Rを合理的に行えば、リサイクル材のエネルギー消費は、鉄鋼、熱硬化性CFRP、熱可塑性CFRPいずれも同程度であることから、比重が小さく、長寿命で使用可能なCFRPがライフサイクルでは有利となる。

CFRP製品の価格を安くするためには、成形（加工）費と材料費を抑えることが考えられる。成形（加工）費は、工数の短縮や部品点数の削減から抑えることができる。工数は、熱可塑性CFRPを考えれば、今のオートメーション化されたプラスチック成形インフラを利用することにより、熱硬化性CFRPに比べ短縮可能である。CFRP部品は、構成要素を細分化せずに一体部品として成形可能なため、部品点数は鉄鋼製に比べ大幅に削減できる。

CFRP部品の材料費を抑える方法として、マトリックス樹脂に安価な熱可塑性プラスチックを用いることが挙げられる。また、CFRPは鉄鋼に比して比強度および比剛性に優れる材料であることや、設計の自由度が高いことを考慮すると、材料の使用量を抑えることが可能で、CFRP部品の材料費は設計の最適化等で大幅に削減できる可能性がある。さらに、CFRP部品の市場が拓け、ニーズが増えてゆけば合理的な生産で炭素繊維の実勢価格が下がり、部品の量産技術の発展で、CFRP製品の価格が下がる。このよ

うな観点から、現在の鉄鋼部品との競合は充分可能である。

量産を視野にいたした迅速成形を考えると、射出成形やプレス成形等、今現在稼働しているプラスチックインフラで成形できることが、作業性、成形費の面からみても肝要である。

4R を効率よく行うためには、熱溶解によるリユースやリペア、カスケードリサイクルが低エネルギーで容易にかつ迅速にできるマトリックスが必要となる。熱硬化性と異なり、熱可塑性プラスチックは、熱溶解性があり、このマトリックスに向いている。熱溶解による再成形はクローズドリサイクルで製品内での材料寿命を延命する効果が期待でき、また軽度の損傷の修復も容易に行える。さらに接合も、熱融着可能であるため、接着剤やボルトを必要としない。

以上の議論から、本研究は強化繊維に炭素繊維を、マトリックス樹脂にアイソタクチックポリプロピレン（以下 PP とはすべてこれを指す）を選択し、材料評価を行っている。ポリプロピレンは、熱可塑性プラスチックの中で非常に軽く、また大量に使用されており材料供給も安定で安価であり、射出成形、プレス成形等、成形技術の経験も豊富である。

炭素繊維強化ポリプロピレン（以下、CFRPP）は、炭素繊維表面と PP マトリックス間の界面接着特性が弱いために、従来は複合則で予測される性能の10分の1程度しか発現しなかった。CFRPP は上記課題を解決する可能性のある有望な軽量素材であるため、本研究はこの接着性向上を目標に設定した。またこの分野では、近年、Shao-Yun Fu らの射出グレードの CFRPP に関する系統的な研究^{7)~9)}や I. C. Finegan らのカーボンナノファイバー（繊維アスペクト比 20 以下、平均繊維長 140 μm 以下）で強化された PP に関する研究¹⁰⁾等が有名ではあるが、あくまで短繊維強化の CFRPP を対象としており、その性能は実用に供するまでには至っていない。一方で、本来評価対象としてあるべき連続繊維一方向強化 CFRPP（以下、CFRPP 0° 材もしくは UD）の力学特性については未だ明らかでない。

本章では、プレス成形品を想定した CFRPP 0° 材の性能の改善方法および、その基本物性について述べる。

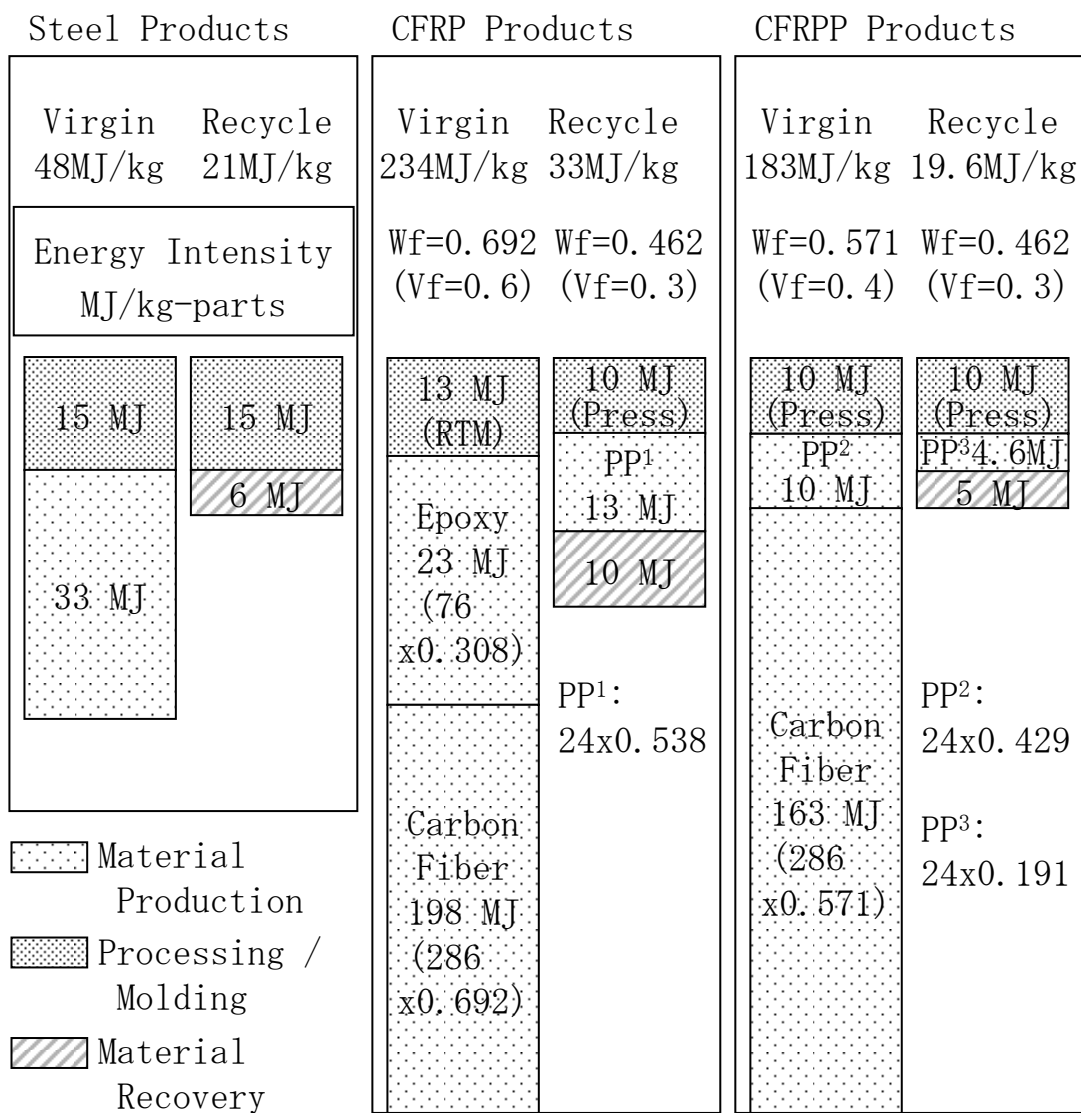


Fig. 5.1 Comparison of energy intensity with Steel, CFRP and CFRPP products.

5-2 アイソタクチックポリプロピレンについて

母材に PP (ポリプロピレン) を使用する理由は、大きく分けて4点である。第1点は、その汎用性であり大きな生産量である。PP ならびに PE (ポリエチレン) を中心としたポリオレフィンは、幅広い分野で使用されており、その生産量は国内だけで年間650万トン、世界では年間7,000万トンを越えている。第2点は、その「安さ」である。熱可塑性樹脂は、特殊用途の超スーパーエンブラ (5,000円/kg) でない限りは、熱硬化性樹脂よりも安い。例えば、スーパーエンブラの PPS (ポリフェニレンサルファイド) 樹脂は、1キロあたり800円程度であり、汎用エンブラの PC (ポリカーボネート)、PET (ポリエチレンテレフタレート) や PBT (ポリブチレンテレフタレート) は、1キロあたり500円程度である。ここで取り上げる PP は、汎用プラスチックで、他に ABS (アクリルニトリルブタジエンスチレン)、HDPE (高密度ポリエチレン)、LDPE (低密度ポリエチレン) や HIPS (耐衝撃性ポリスチレン) などがあるが、これらは1キロあたり200円程度である。第3点は、ポリオレフィンがポリマーの中でも非常に「軽い」ということである。結晶性ポリマーのため、結晶部と非結晶部で若干の違いはあるが、比重でいえば、平均的に PP で0.90程度、PE で0.95程度である。本研究で目標としている炭素繊維体積含有率 (以下、 V_f) は、エネルギー節約やコスト削減のため、30~40% (炭素繊維はエネルギーの固まりであり、素材製造段階のエネルギー消費が過大で、また高価である) であり、つまりは複合材料中の6割~7割が母材であることから、母材の比重は小さい方が複合材料はより軽くなり、安くなる。さいごは、やはり3Rし易いということである。ポリオレフィンには、炭素と水素だけから成り、有害元素を含まない。ポリオレフィンには、リサイクル (ケミカルに解重合しモノマーまで分解後、再重合しポリマー化するのではなく、ここでは熱を加えて熔融状態とし再成形するプロセスを指す) のとき、熱サイクルによる加水分解等の性能劣化がほとんどみられない。

ここまでで、ポリオレフィンを母材に用いる理由が理解できたと思うが、では PP と PE、どちらを選択するべきかとなる。Table 5.1 に示すように、PP は、i-PP (アイソタクチック PP)、s-PP (シンジオタクチック PP)、a-PP (アタクチック PP) の3種類に分かれる。PE も、LDPE、L-LDPE (直鎖状低密度ポリエチレン)、HDPE、S-HDPE (超高分子量 PE) の4種類に分かれる。しかし、PE の場合、プラスチック (固体) としては少なくとも2~3万以上の分子量を必要とし、高性能化 (主に耐熱性) を狙った S-HDPE に至っては100万を越える。これでは、熔融粘度が高くなり射出成形に向かない。また PE は、全体的に紫外線による劣化が激しく、耐候性が悪い。一方で、PP は、耐久性、耐熱性、耐薬品性、耐候性が良く、力学特性も PE より優れている。

Table 5.1 Profile of olefinic thermoplastics¹¹⁾.

POLYMER	TYPE	Heat resistance	Chemical resistance	Weather Resistance	E_{BEND} (GPa)	σ_{BEND} (MPa)
Poly-propylene	i-PP	○	○	○	1.40	40
	s-PP					
	a-PP					
Poly-ethylene	LDPE	△	○	×	0.85	10
	HDPE					
	L-LDPE					
	S-HDPE					

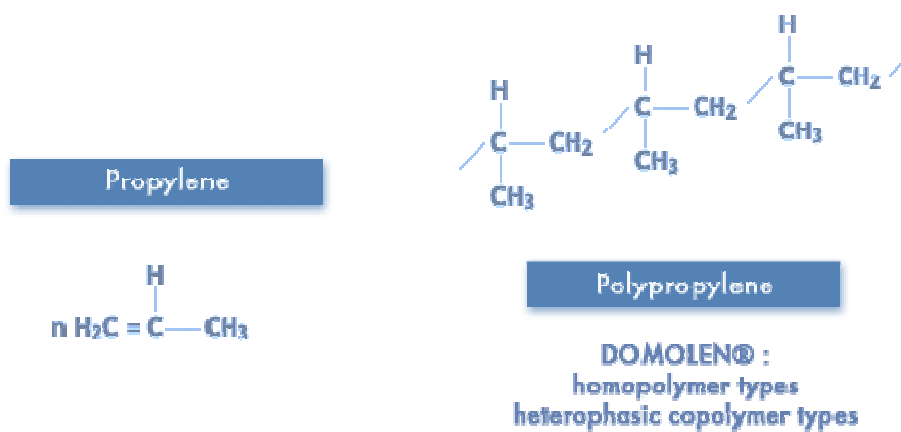


Fig. 5.2 Chemical structure of propylene and polypropylene.

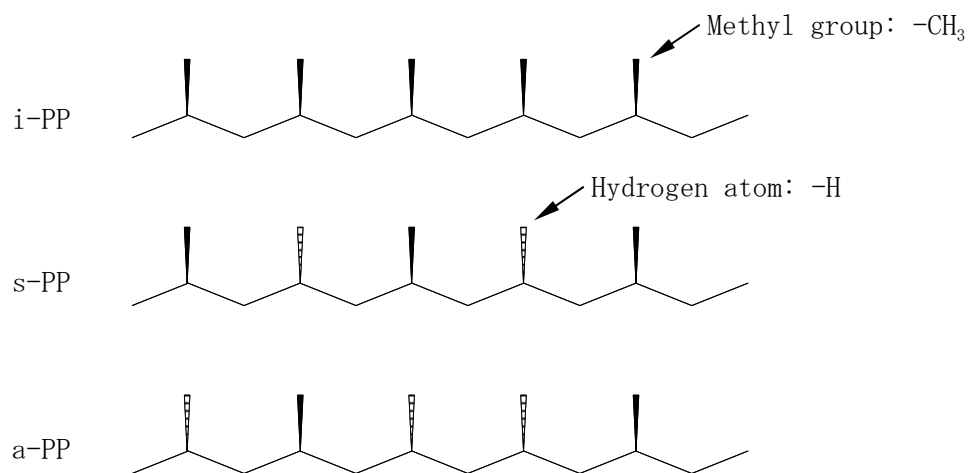


Fig. 5.3 Structural pattern of polypropylene.

a-PP は合成の過程で出る副生成物でいわば蠟のようなもので，複合材料の母材としては使えない．s-PP は分子構造からも分かるとおり軟質の PP で，i-PP は硬質の PP と認識しておけば良い．Fig. 5.2 に PP の基本分子構造を，Fig. 5.3 にそれぞれの構造パターンを示す．

さらに PP は，ホモ系とブロック系に分かれる．ホモ系はプロピレンの単独重合体であるのに対し，ブロック系は，プロピレンとエチレンの共重合体である．実際の高次構造イメージはポリプロピレン中にエチレンプロピレンラバー相に包まれたポリエチレンが存在する，いわば海・島構造を有している．一般には，ブロック系の方が，構造部材用の高強度複合材料（強度もさることながら，衝撃強度も高い）に適していると思われる．

本研究では，ホモ系もブロック系も使用している．いずれのプロファイルも i-PP である．ホモ系は，フレッシュ材を SMC で成形する際に用いた．ブロック系は，リサイクル材を BMC で成形する際に用いた．リサイクル材を混練しコンパウンドを作製する際には，繊維長を維持するためにも，低分子量の PP を使用することが好ましいが，ホモ系を低分子化すると極端に母材としての性能が劣るので，ブロック系を使用した．

5-3 CFRPPフレッシュ0°材の高性能化（5つの工夫）

5-3-1 わずか0.3mm厚の極薄CFRPPシートの開発

炭素繊維強化ポリプロピレン（以下、CFRPP）は、繊維表面と母材PPとの界面接着の相性が極めて悪く、連続繊維とPPとの複合は、事実上、炭素繊維が強化材として作用せず、これまでまじめに検討されてこなかった。充填材としてカーボンブラックをブレンドする事例はあるが、補強目的ではなく、もっぱら電気的特性改善のためである。

しかしながら、前述したように、軽量複合材料としてのCFRPPの開発は、バックキャストイングアプローチによる地球環境問題の対策としての人工物の抜本的軽量化、またはその軽量材料の4Rを考える上で、極めて肝要な技術開発である。

本研究では、相性が悪いと言われ続けている、炭素繊維とPPの複合化に主眼をおいている。主として、成形方法／成形条件／加工条件をパラメーターとして、これらがCFRPP成形品の力学特性に及ぼす影響を調べている。

成形条件や加工条件は後に述べるとして、本節では成形方法について少し触れてみる。度重なる試行錯誤の中で、著者は、フレッシュ0°材を作製する上で一番良い手法を見出した。研究開始当初は、成形品の埋没ボイドが深刻な欠陥になり、また繊維表面とPP界面の接着が甘く、材料の限界ひずみは極めて小さく、0.2~0.5%程度であった。しかし今日では、これも改善され、0.8~1.0%程度となってきた。その成功の影に、極薄CFRPPシートの開発がある。

ボイドをできるだけ混入しないためには、後に出てくる「段階加圧法」も重要であるが、薄いシート状にしたものを金型内で積層し、プレスするという成形方法が有効であることを発見し、これの基本となるCFRPPシートの開発を開始した。次節以降順次述べていくが、成功の秘訣は、繊維の解繊、無水マレイン酸をグラフトさせた高MFR（Melt mass Flow Rateで、樹脂流動性の指標となる）のPPシートにある。

Fig. 5.4に成形方法を、Fig. 5.5-1, -2に実際の工程およびCFRPPシートを写真で示す。厚さわずか0.3mmのシートは、CFRP用のプリプレグシートの厚さ0.125mmの2.4倍である。これは、解繊されたバンドル内へ、樹脂を強制的に含浸させるために、バンドル厚と同じ厚さのスペーサーを設け、かつ樹脂を多めに入れるためである。金型上に炭素繊維バンドルを敷き詰め、アセトンでサイジング剤を除去／解繊し、無水マレイン酸0.3wt.%で変性させたPPのシートを置き、一気にプレス成形する。なお、このシートは次章で述べられるリサイクルCFRPPのリペア技術にも応用されている。

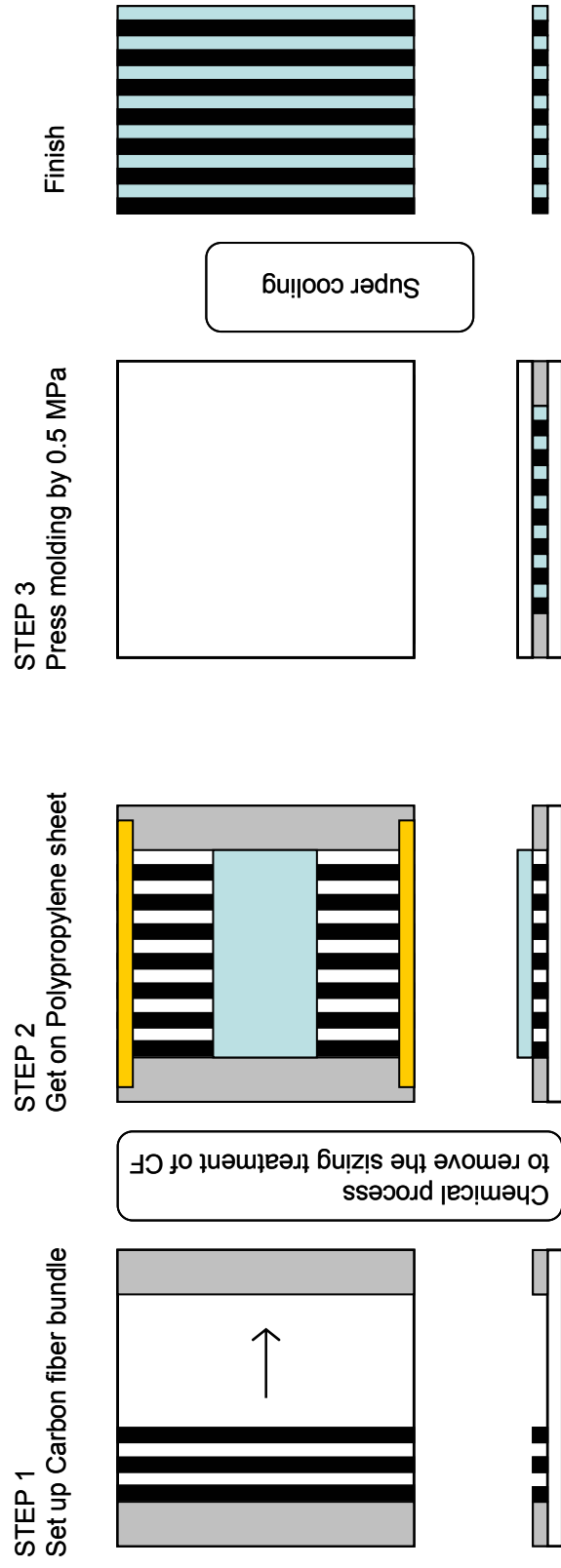
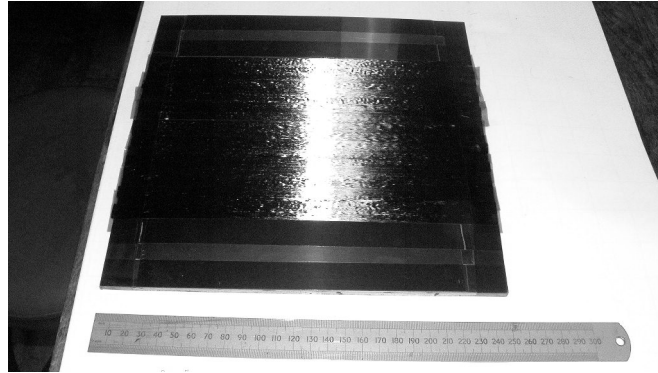
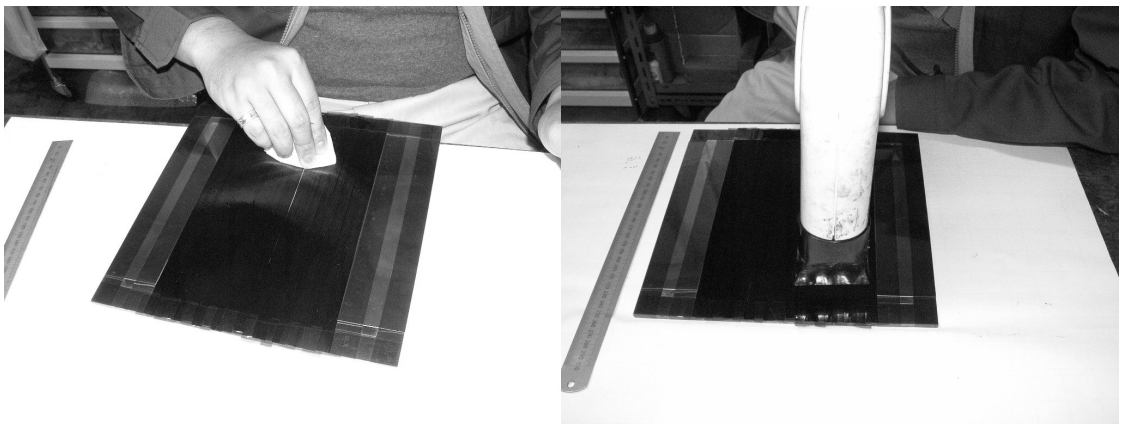


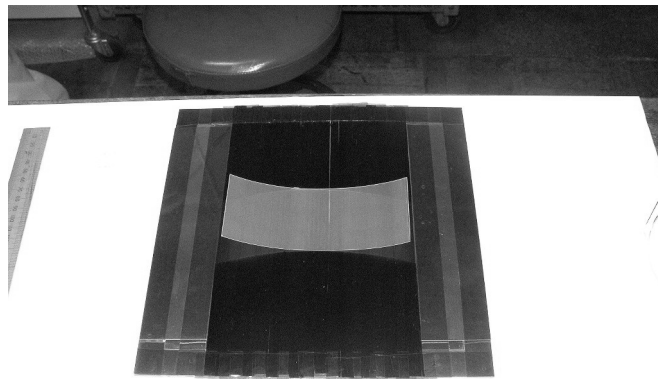
Fig. 5.4 Molding method of thin CFRPP sheet.



(a) STEP 1: Set up carbon fiber bundle.

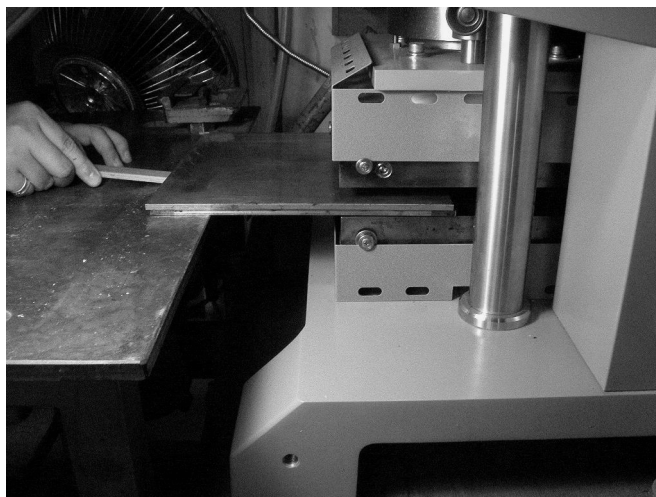
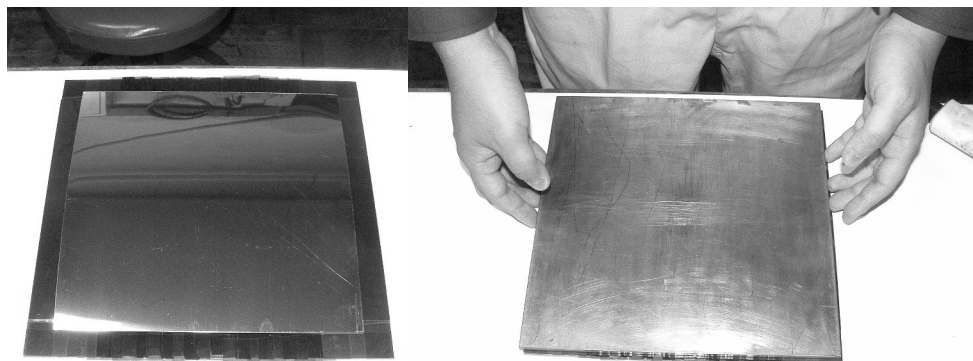


(b) Chemical process to remove the sizing treatment of carbon fiber.

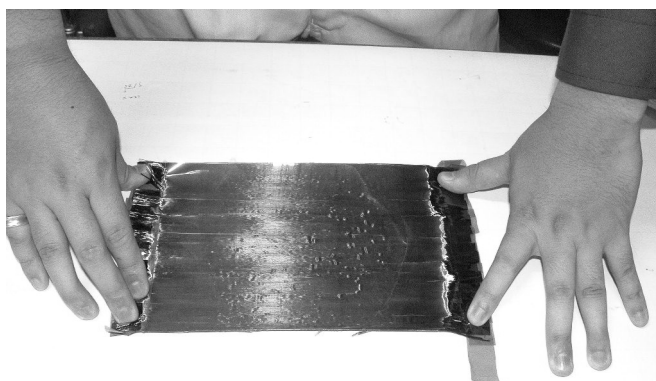


(c) STEP 2: Get up polypropylene sheet on carbon fiber.

Fig. 5.5-1 Photograph of STEP 1 to STEP 2 process in the molding.



(d) STEP 3: Press molding.



(e) FINISH: Molded thin CFRPP sheet.

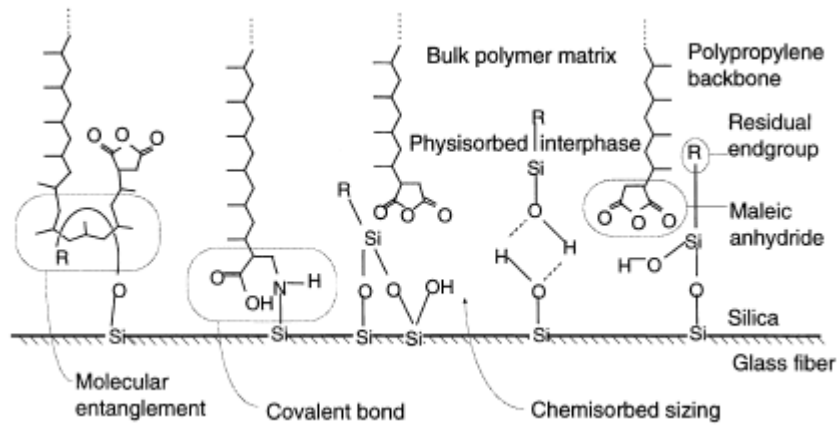
Fig. 5.5-2 Photograph of STEP 3 to FINISH in the molding.

5-3-2 無水マレイン酸微量添加によるマトリックスの変性

近年、ポリプロピレンへの無水マレイン酸のグラフトが、ガラス繊維、竹、ジュート、サイザル麻等の複合材料で界面接着性の向上を目的として実際に試みられている^{12)~14)}。Fig. 5.6 に示すように、マレイン基をグラフトすることで、ポリプロピレンは極性をもち、相互拡散により繊維表面の官能基との、分子間のからみあい、化学吸着、物理吸着、水素結合で界面接着性が向上する¹⁵⁾。サイジング剤がカップリングされていない天然繊維、もしくはヒートクリーニング等により成形前にサイジング剤が除去されたガラス繊維等に対しては、無水マレイン酸の添加は力学的特性の向上へ大きく寄与している。しかし、炭素繊維に対しても同様のことが起こっていると考えられる。その証拠として、Fig. 5.7 に SEM で観察した破断面写真を示す。SEM は、倍率はすべて 2,000 倍である。Fig. 5.7 に示すように、無水マレイン酸を添加した CFRPP と添加しない CFRPP の破断面をそれぞれ比較してみると、その接着性の向上が、繊維についての PP の残留量からわかる¹⁶⁾。Fig. 5.7(a) は、何も処理していない炭素繊維と PP とを単純に複合したものであるが、表面が滑らかで PP はほとんど残留していない。Fig. 5.7(c) は、無水マレイン酸を 0.1wt.% 添加しているが、PP は少し残留し、繊維表面が凸凹である。Fig. 5.7(d) は 10.0wt.% 添加しているが、今度は繊維間まで樹脂が含浸しているが、ミクロな樹脂割れやボイドが目立つので、これは過添加で劣化を引き起こしている。よって、本研究では PP には必ず 0.3wt.% の無水マレイン酸を添加している。0.3wt.% の無水マレイン酸を添加した CFRPP の破面 SEM 像は、補遺 D を参照されたい。

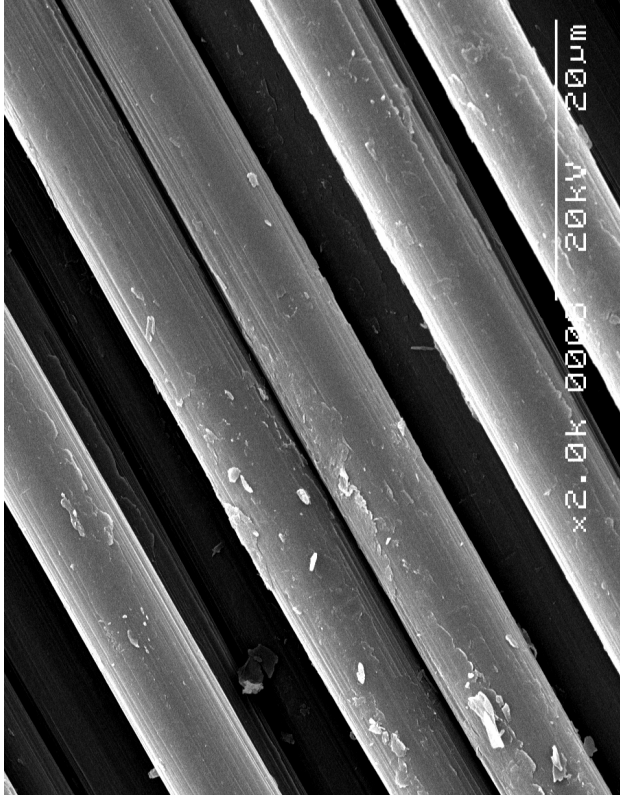
PP が極性をもつ分子構造であるのに対し、PE はその分子構造が非極性であるために、このような相互拡散は起こらず、このような変性による力学特性の向上は望めない。PE もオレフィン系で、界面接着は (PP よりは良いと思われるが) それほど良くない。このような点も、PP を選択した一理由である。

炭素繊維にはハンドリング性向上のためにサイジング剤が付着している。マレイン基がグラフトした PP 界面を炭素繊維表面に接着するためには、炭素繊維表面に炭素繊維側の官能基を露出させる必要がある。そのような目的で、サイジング剤を除去する方法について次節で述べる。Fig. 5.7(b) は、サイジング剤を除去した炭素繊維である。

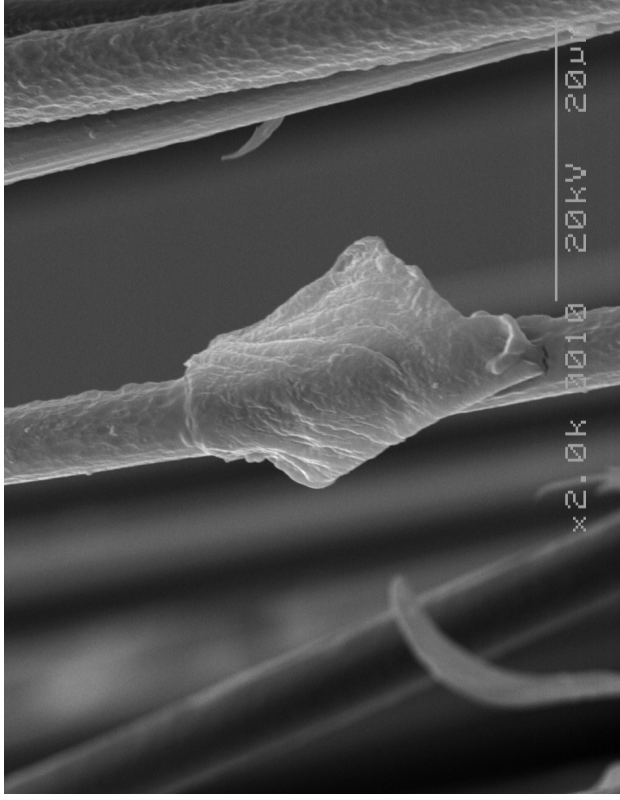


(Source: ref. 15)

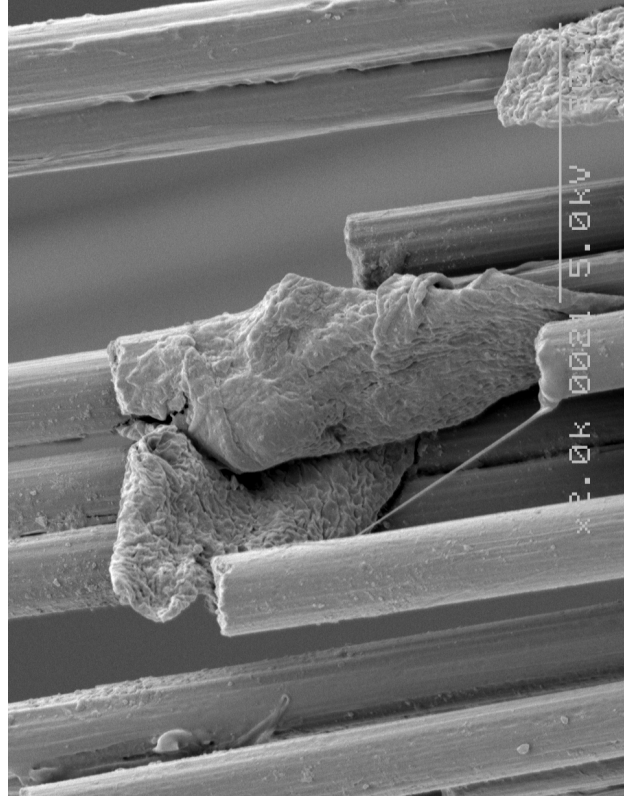
Fig. 5.6 Possible interfacial bonding after maleic anhydride modification.



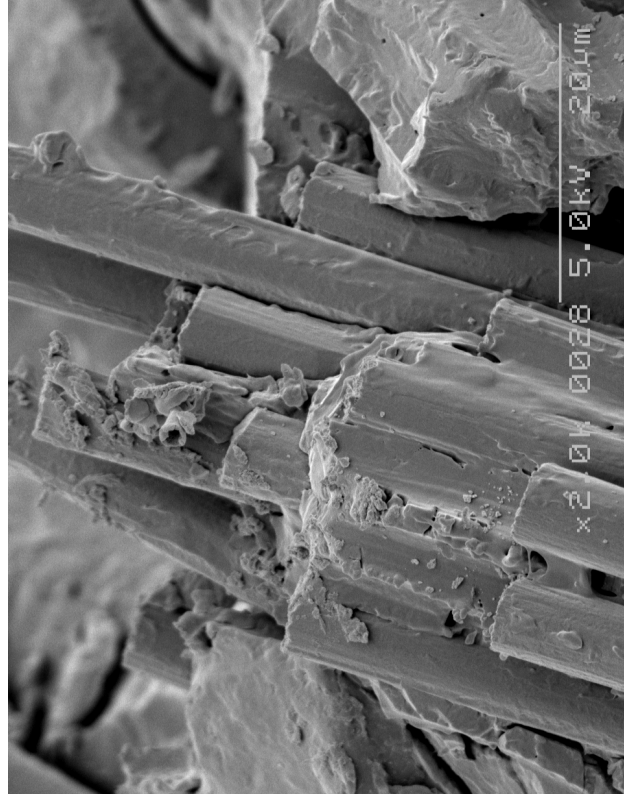
(a) molded without modification



(b) molded chemical processed carbon fiber



(c) 0.1wt.% of maleic anhydride denaturation



(d) 10.0wt.% of maleic anhydride denaturation

Fig. 5.7 Observation on the fracture surfaces of each samples molded by the different process condition using SEM

5-3-3 湿式解繊法による解繊と表面改質（サイジングトリートメントの除去）

炭素繊維の製造工程では、ハンドリング性を良くする目的で、モノフィラメントを12K（12,000本）や24K（24,000本）で束ねるためのサイジング処理を施す。サイジング処理は硬化剤のカップリング、サイジング剤のカップリングという2段階のカップリングを経て行われる¹⁷⁾。硬化剤を繊維表面へ滑らかに均一にカップリングするために、繊維に酸化処理を施し活性化繊維とする。活性化繊維の表面官能基は主に、カルボキシル基（-COOH）、フェノール性水酸基（-OH）、カルボニル基（-C=O）、ニトロソ基（-NO）である。サイジング剤のカップリングには、炭素繊維自身のハンドリング性向上の目的で、成形前に除去する必要のないプレポリマーを使用する。プレポリマーは、複合材料マトリックス樹脂の化合物と同類のものが使用され、多くのものがエポキシ系である。熱可塑性であるPPと熱硬化性であるエポキシは接着しないことから、炭素繊維とPPの界面接着性問題の原因のひとつは、このサイジング剤のカップリングにある。そこで、このサイジング剤を化学的処理にて除去、解繊し、活性化炭素繊維の表面官能基を露出させた上で、あらかじめPPにグラフトさせておいたマレイン酸基をカップリングすることで、界面接着性向上効果をねらった。ここでいう化学的処理とは、炭素繊維束をアセトンで洗浄することにより表面のサイジング剤を除去（湿式解繊）後、加熱により残留するアセトン除去する、という工程すべてを指す。

5-3-4 高MFR（高流動性）PPの使用

前節で述べたとおり、サイジング剤を除去すると繊維はばらけて解繊状態となる。解繊された繊維束内へPP高分子を進入させ（このことを含浸という）、炭素繊維表面に接触する面積を増やし、かつモノフィラメント1本1本の周りをPPで取り囲み固めることが理想である。炭素繊維表面は、前節の処理により改質されており、また、PPへの無水マレイン酸添加による効果で、炭素繊維とマレイン化PPとのぬれ性は改善されており、加えて接着性も良好である。残るは、この含浸であるが、分子量が巨大なオレフィン系しかもアイソタクチックの立体規則性であるホモポリマーを使用している以上、一般グレードでは分子鎖が極めて長く、その立体規則性から流動運動も制約されるため、この繊維間の隙間に進入していかない。そこで、高流動性PPを使用することにした。流動性の指標であるMFR（メルト・マス・フローレート）は30~60g/10minで、比較的高流動である射出成形用PP（MFR=10g/10min）の実に3~6倍である。高MFRのPPを使用するとFig. 5.8-1に示すように、炭素繊維束内までしっかりPPが進入していることがわかる。MFRが上がった分、犠牲にしなければならないのが、その巨大な分子量である。PPを高MFRとするには、プラントで重合条件を変えたり、成形時に過酸化物を加えPPを分解したりして低分子化する。低分子量になると、含浸の面からは好

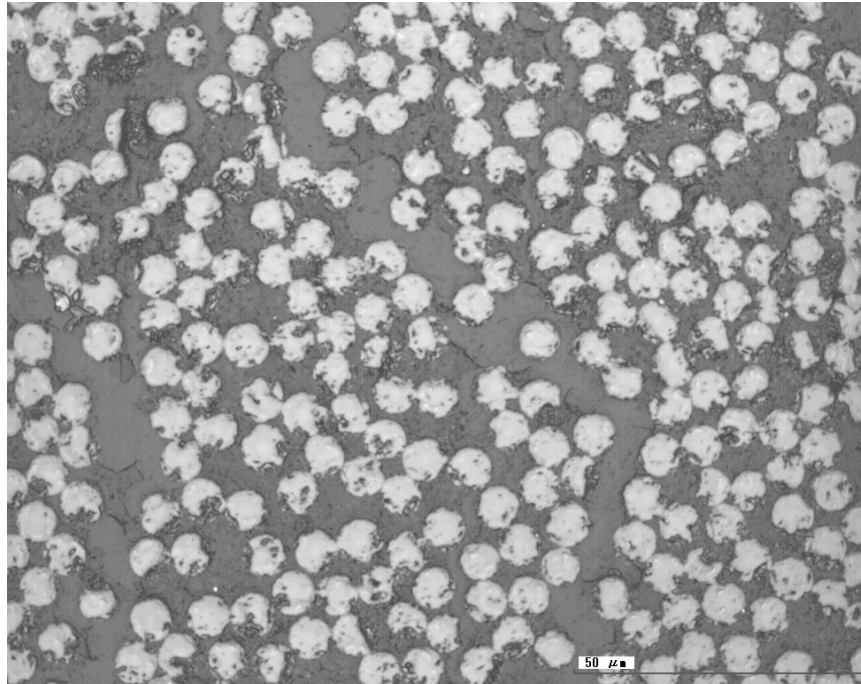


Fig. 5.8-1 Observation on the sectional surface of unidirectional CFRPP using Laser Microscope, VK-8500 (Keyence corporation). MFR of i-PP is 30 g/10min.

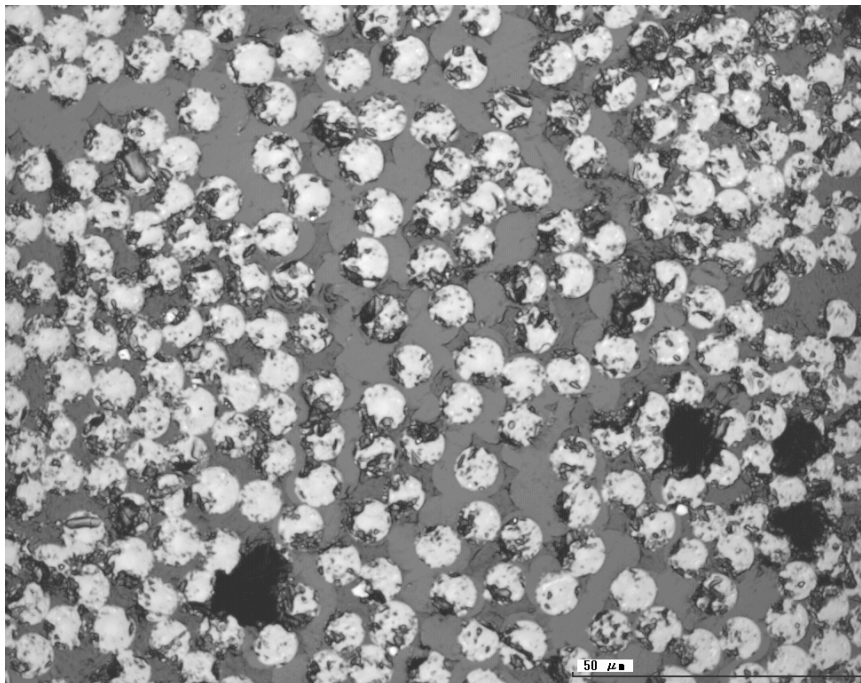


Fig. 5.8-2 Observation on the sectional surface of unidirectional CFRPP using Laser Microscope, VK-8500 (Keyence corporation). MFR of i-PP is 7 g/10min.

都合であるが、結晶化度が低くなる（結晶化しにくくなる）。Fig. 5.8-2 は MFR が 7 の汎用 PP であるが、Fig. 5.8-1 に比べ全体に結晶化が進行していることがわかる（写真の明るい灰色の部分が結晶化部位）。結晶化度が低くなると、マトリックスの力学特性が低下する。そこで、高 MFR の PP の結晶化度を比較的容易に高める手法を検討した。

5-3-5 結晶化度制御による接着性の改善

PP は結晶性プラスチックのため、成形後の冷却処理により結晶化度が変化する。結晶化度が高いと、材料は硬くなり、耐熱性が向上し、不透明になる。結晶化度が低いと、材料は柔らかくなり、耐衝撃性が増し、透明になる¹⁸⁾。PP や PE などの鎖状高分子の場合、分子が長いため、分子鎖の末端から末端まで一様に結晶化（100%結晶化）はありえない。多くても 60%結晶化程度である。結晶化を一口で言えば、隣接する分子鎖の水素原子間距離が等間隔になっていることで、結晶部は非結晶部に比べ分子間拘束力が極めて強い。そのため、プラスチックの性能は飛躍的に向上する。すなわち高性能な熱可塑性複合材料を創製するためには、母材に結晶性のプラスチックを適用することが有効である。かといって、非結晶が全くダメかというところでもなく、例えば非結晶性のプラスチックでも主鎖にベンゼン環や別の元素が入ると、分子運動が不活発になるので、性能は向上する。エンジニアリングプラスチック以上の高性能プラスチックになると、主鎖に必ずといっていいほどベンゼン環が入っている（例えば、PC など）。しかし、分子構造が複雑になり、今度は結晶化しにくくなるという問題がある。PET は結晶性高分子であるが、ベンゼン環と酸素原子が主鎖に入っており、そのおかげで結晶化しにくい。PET を結晶化させるには、促進剤として結晶化核剤を入れなければならない。またベンゼン環の両脇にエステル結合（-OCO-）をもつため加水分解しやすい。このような理由から PET は、4R まで考えると熱可塑性 CFRP の母材としては不向きのように思える。

結晶化度を上げるためには、オレフィン系のような水素と炭素だけの比較的単純な分子構造の場合、①冷却速度を遅くする（超徐冷）、②再結晶化温度まで急冷し圧力と温度を保持する（アニーリング）方法がある。①の冷却時間は、成形温度が 230°C であるとき、室温まで下がるのに要する時間は、約 240 分（4 時間）であまり現実的ではないが、結晶化度は確実に上昇する。②は、本研究で検討し有効と判断された方法で、冷却時間は約 40 分（含む、アニーリング 30 分）にまで短縮された。また、マトリックス単体に関して、Fig. 5.9 に示すように、無水マレイン酸を 1.0wt.% 添加した PP は、添加しない PP に比べ結晶化速度が上昇すること、結晶化温度はガラス転移温度より少し低い 120°C~125°C 程度が適当なことなどが、Y. Seo らの研究¹⁹⁾によって明らかになっている。この関係から本研究では、結晶化温度を 120°C~125°C と設定した。著者が予言した、CFRPP の結晶化度とアニーリング時間の関係を Fig. 5.10 に示す。

薄いPPシートに炭素繊維バンドルを挟んで、熔融・冷却し結晶化をみると、繊維近傍が先に不透明になることが確認できている。つまり、結晶化は、PP内に存在する固体近傍から成長する可能性がある。Fig. 5.11は冷却速度の違うサンプルの断面形状であり、そのことを示している。Fig. 5.11(a)は急冷したものであり、繊維まわりには結晶化（色違い）がみられない。Fig. 5.11(b)はアニーリングをしたもので、繊維周りに明らかに他とは違う特徴（色違い）がみられ、これが結晶化している部分ではないかと考える。本論文では、確認だけで突っ込んだ議論はしていないが、繊維まわりの結晶化が繊維表面とPP界面との接着性を向上させている可能性は棄てきれない。実際、PPマトリックス内に置かれた繊維まわりの結晶化を詳細に検討している研究²⁰⁾もある。

本論文では、成形温度と冷却速度をかえて、この結晶化度の影響を定性的に述べている。その検証は、WAXD (Wide Angle X-ray Diffraction) によるX線回折で行った。この結果は、補遺Aに示してある。

このように、本研究では、シート積層法・PPの変性・炭素繊維の解繊および改質・高MFR-PPの使用・結晶化度の制御、この5つの工夫（成形法の改良）によって、CFRPPの高性能化、力学特性の改善を行っている。

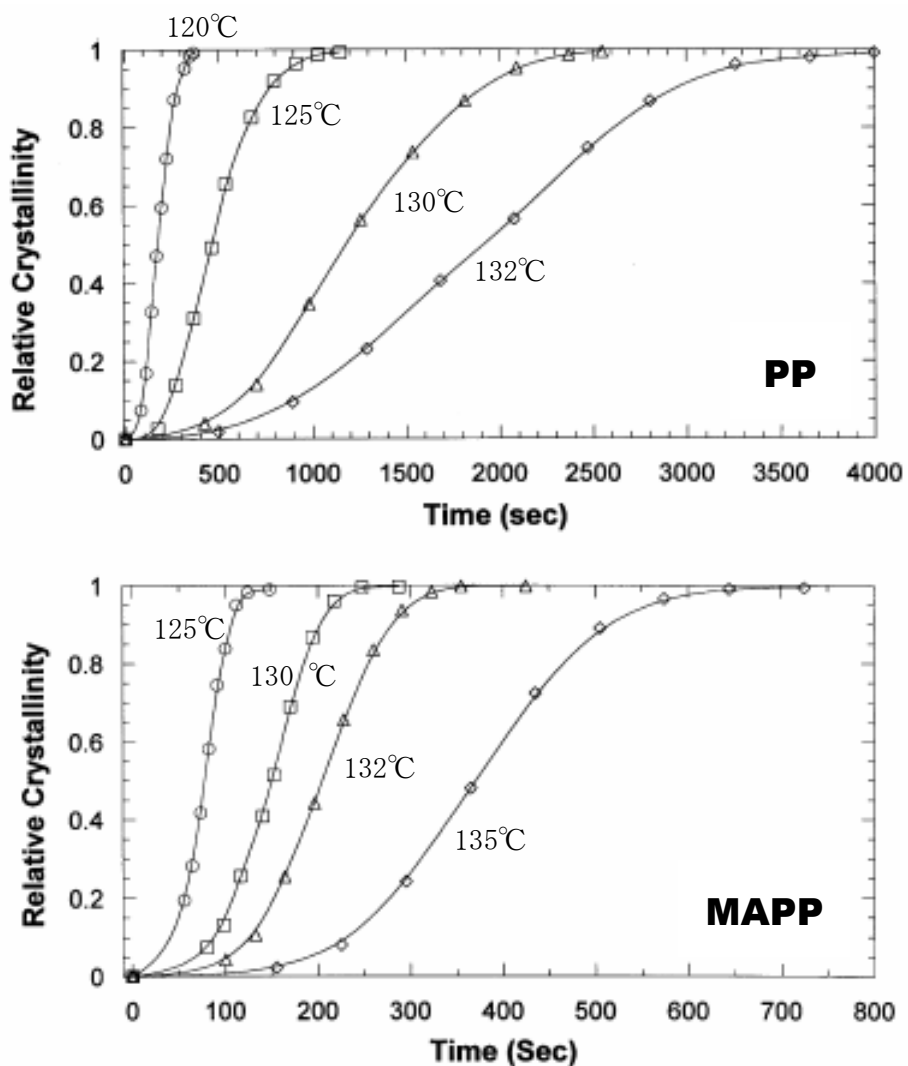


Fig. 5.9 Development of relative crystallinity with time for isothermal crystallization (Source: Ref. 19).

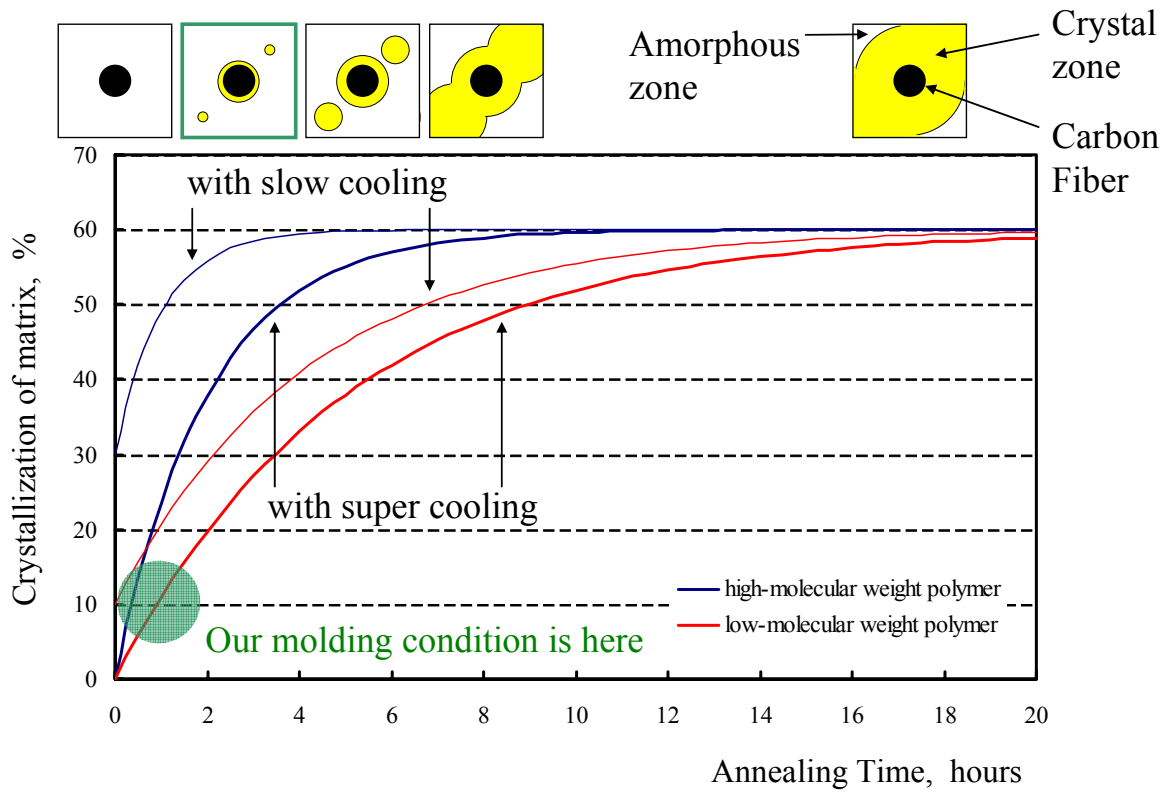
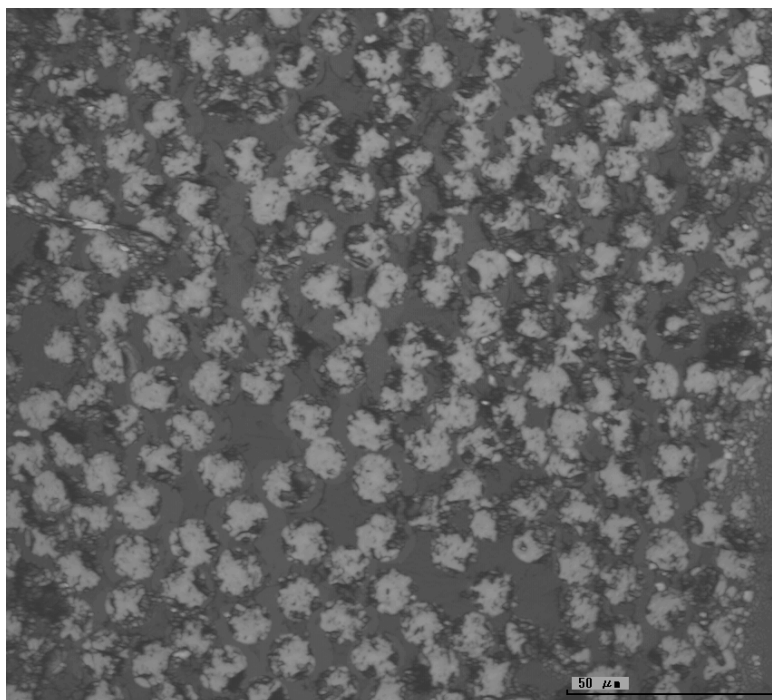
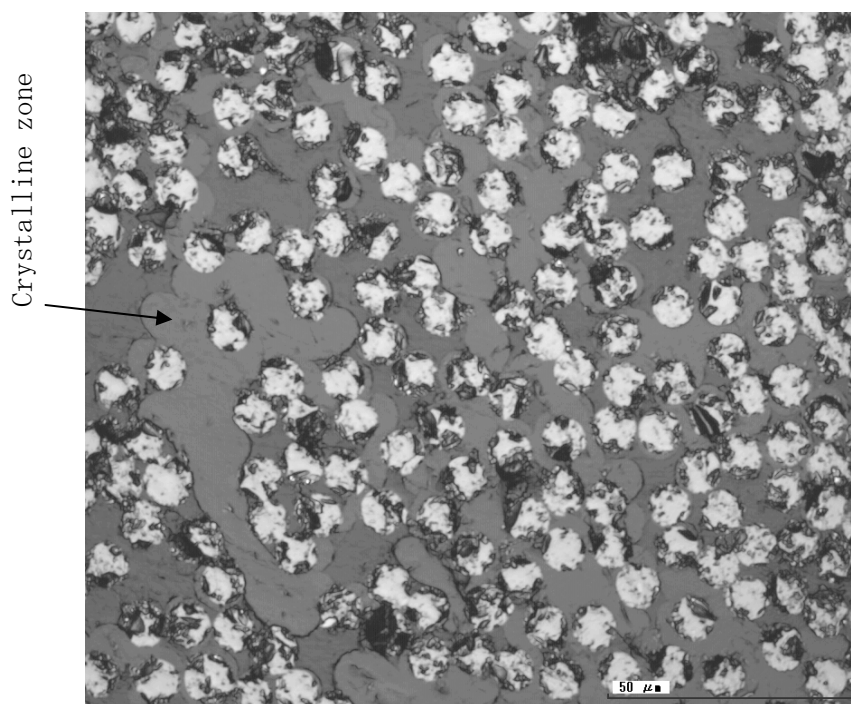


Fig. 5.10 Prediction of crystallization occurring around fiber.



(a) With Super Cooling



(b) With Annealing

Fig. 5.11 Crystallization around the mono filament of carbon fibers molded by different cooling condition. MFR of i-PP is 30. Molding temp. is 230 centigrade.

Table 5.2 Material properties of unidirectional CFRPP.

Carbon Fiber		isotactic Polypropylene*	
TORAY T700SC 24K		PP1 IDEMITSU PP E203GV	(homo polymer)
		PP2 IDEMITSU PP J3003GV	(homo polymer)
Density	1.80 g/cm ³	density	0.90 g/cm ³
			PP1 PP2
		molecular weight M_w	464 000 197 000
		molecular weight distribution M_w/M_n	4.14 4.69
longitudinal elastic modulus	230 GPa	melt mass flow rate	PP1=2, PP2=30 g/10min
ultimate longitudinal strain	2.1 %	flexural modulus	0.95—1.25 GPa
ultimate longitudinal stress	4 900 MPa	ultimate flexural stress	26—34 MPa

* maleic anhydride addition is 0.3wt% of polypropylene.

5-4 3点曲げ試験およびアイゾット衝撃試験

自動車用途はじめ各種構造部材に CFRP を用いる場合、静的曲げ特性と動的衝撃特性を知る必要がある。本節では、この両特性に着眼し、論じる。

5-4-1 試料

本研究で使用した材料の詳細を Table 5.2 に示す。炭素繊維は東レ製の T700SC 24K であり、アイソタクチックポリプロピレンは出光石油化学製の E203GV (MFR=2), J3003GV (MFR=30) でシート状である。アイソタクチックポリプロピレンは一般に、その立体異性 (側鎖メチル基が櫛状同一方向に配置) から、他のシンジオタクチック (側鎖メチル基が互い違いに配置), アタクチック (側鎖メチル基がランダムに配置) に比べ高剛性である。E203GV, J3003GV 共にホモポリマーであり、双方に 0.3wt.%の無水マレイン酸を添加し、樹脂の変性を行った。ホモポリマーとは、プロピレン単独重合体という意味であり、変性させやすく、また炭素と水素だけの純粋な分子構造なので結晶化させやすく、安価で作業性が良いのが特徴である。MFR はメルトマスフローレートであり、単位は g/10min で表され、規格に準じた測定装置から 10 分間にどれだけの質量の PP が流れ出すかを示す値で、値が大きいほど流動性が良いことを表す指標である。MFR の制御は、プラントで重合条件を変えたり、過酸化剤で PP の主鎖を切断し、平均分子量を小さくしたりすることで行う。

5-4-2 成形

試験片は、プレス成形機 (PY-50/50A, 東洋精機製) のみを使用し作製した。用いる

PPの乾燥条件(120°C, 3時間)は一定とした。

すでに5-3-1節で言及済みであるが, 平らな金型の上に一方向に引き揃えた炭素繊維束を化学的処理により改質/解繊後乾燥させ, これにPPシートを乗せプレスすることで, まずは150mm x 200mm x 0.3mm t のCFRPPシートを作製する(Fig. 5.4)。そこから, 幅7.5mmの短冊を20本切り出し, 内10本を重ね12mm x 200mm x 1.5mm t の金枠内にセットし, 金型ではさみプレス成形する。成形終了後, ダイヤモンドカッターにて試験片の中央部で分断し, 試験片寸法12mm x 100mm x 1.5mm t の曲げ試験片を得た。同様にして, さらに半分に分断し, 試験片寸法12mm x 50mm x 1.5mm t のアイゾット衝撃試験片を得た。ここまでは時間のかかる作業であったが, 引張疲労試験片作製にあたっては, 試験本数が多いので量産手法を考案した。まずCFRPPシートを, 130mm x 200mm x 1.0mm t の金枠内に8枚積層する。このとき, 長辺(200mmの方)を繊維方向とするようにすべて配置し0°材とする。上記と同じように, プレス成形する。成形品から, ダイヤモンドカッターを用いて, 試験片寸法12mm x 200mm x 1.1mm t を切り出す。これならば一度の成形で引張疲労試験片を9本得ることができる。Fig. 5.12に各試験片作製方法を模式図としてまとめた。

プレス成形時の成形条件(温度・圧力・時間)は, 先述の評価項目によって異なるが, 指示圧力35MPa(金型内圧力1.86MPa)までの加圧法については段階的に行い同様とした。詳しくは, Table 5.3およびFig. 5.13を参照されたい。

Table 5.3 Molding condition of each specimens.

S/N	Fiber modification*	Polypropylene	MFR (g/10min)	V_f	Temp. (°C)	Process type
UD1	None	PP1	2	0.30	180	HC
UD2	C/W	PP1	2	0.30	180	HC
UD3	C/W	PP2	30	0.30	180	HC
UD4	C/W	PP2	30	0.40	180	HC
UD5	C/W	PP2	30	0.40	230	HC
UD6	C/W	PP2	30 <td>0.40</td> <td>180</td> <td>LC</td>	0.40	180	LC
UD7	C/W	PP2	30	0.40	230	LC
UD8	C/W	PP2	30	0.40	230	HCA

* C/W means chemical washed to fibrillate of carbon fiber bundle.

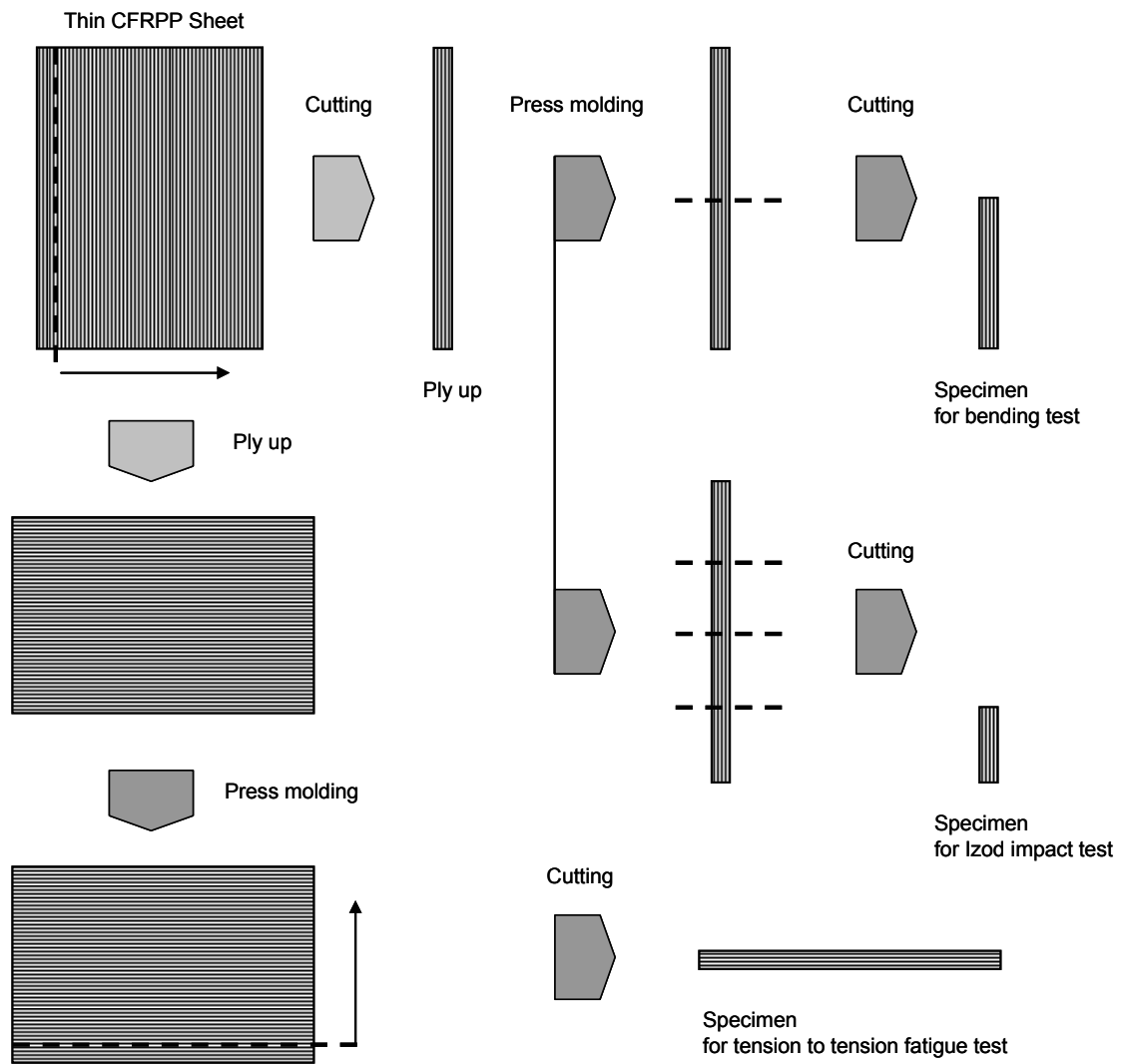


Fig. 5.12 Molding of each specimens.

5-4-3 アニーリング条件

前述のように、本研究では CFRPP 0° 材のアニーリングが力学特性改善にどの程度寄与するかを検討している。アニーリングには、成形時に生じるひずみ、つまり成形時の温度と使用時の温度の違いから生じる成形品全体にわたる熱応力の影響を除去する目的がある。今回はさらに結晶化促進の副次的効果も検討するため、PP の温度-圧力状態図²¹⁾を参考に、 α 相単独の再結晶化温度とされる、120°C、35MPa（金型内圧力 1.86MPa）で1時間処理した。

5-4-4 評価項目

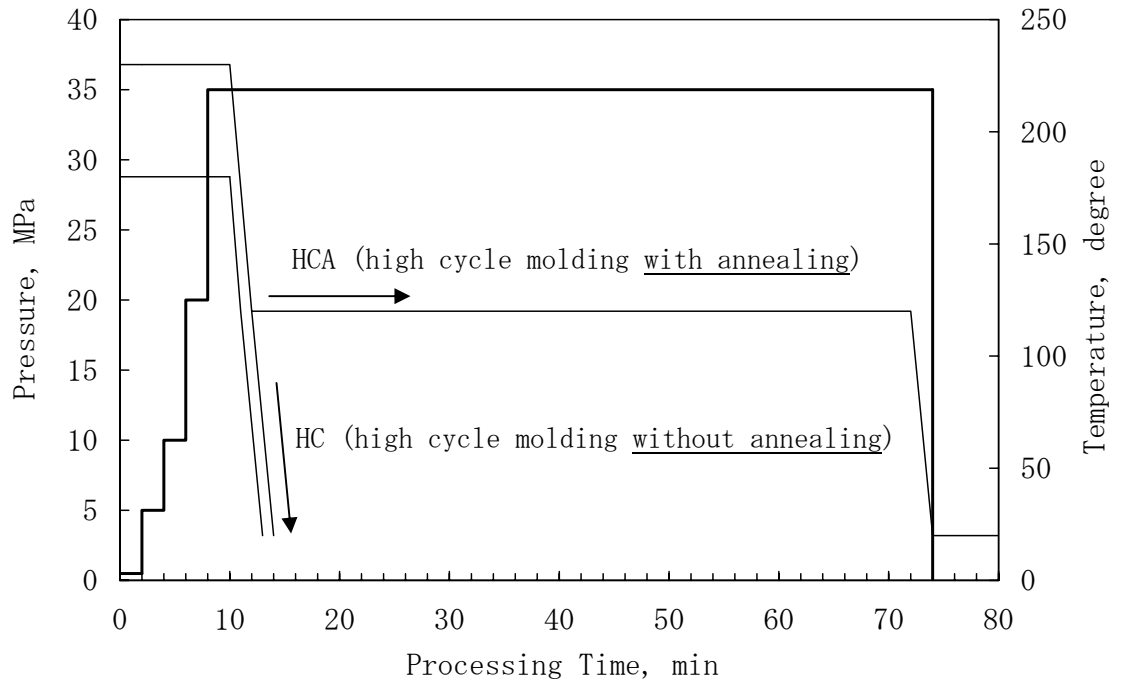
5-4-4-1 MFRの違いと炭素繊維の解繊の影響

まずは MFR のちがいと炭素繊維の解繊が力学特性に与える影響を調べた。試験片の作製条件を Table 5.3 に示す。PP にはいずれも、無水マレイン酸が 0.3wt% 添加されており、この変性度は一定である。炭素繊維体積含有率（以下、 V_f ）はいずれも 30% である。成形過程は Fig. 5.13(a) の HC で、成形温度は 180°C、成形後の冷却は水冷で、1秒間に約 1°C の温度低下（急冷）である。

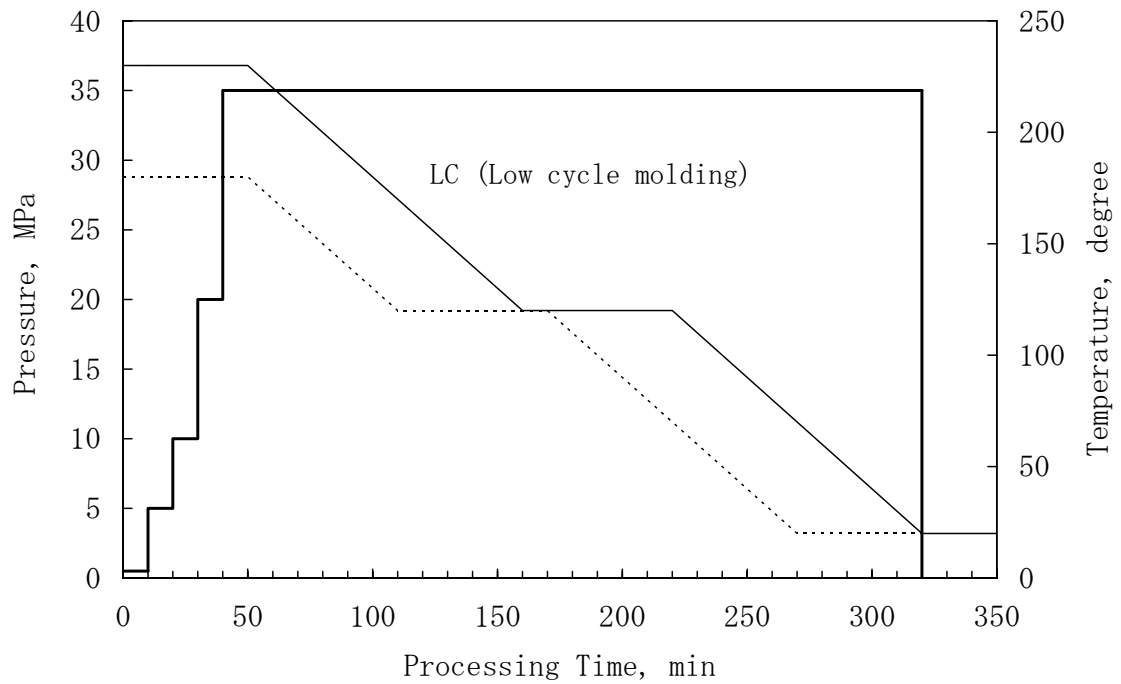
試験片 UD1 は、MFR の低い PP をマトリックスとし、炭素繊維の解繊をしていない試験片である。UD2 は、UD1 と同じマトリックスで、炭素繊維の解繊をしている試験片である。UD3 は、MFR の高い PP をマトリックスとし、炭素繊維の解繊をしている試験片である。

5-4-4-2 加工条件とアニーリングの影響

次に、加工条件とアニーリングの影響を調べた。ここで言う加工条件とは、成形温度と冷却速度である。成形温度は、180°C と 230°C の二通りを試した。試験片の詳細を Table 5.3 に、成形過程線図を Fig. 5.13(a) - (b) にそれぞれ示す。冷却速度は、1秒間に約 1°C の温度低下である急冷と、1分間に約 1°C の温度低下である徐冷の二通りを試した。試験片作製にあたっては、MFR30 の PP をマトリックスとし、解繊された炭素繊維を用いた。また、PP には無水マレイン酸を 0.3wt% 添加し、変性度は一定である。



(a) High cycle molding, HC and HCA.



(b) Low cycle molding, LC

Fig. 5.13 Two difference types of molding process ($P-t-T$) diagram.

試験片 UD4 は、成形温度 180°C で、ハイサイクル (HC) 成形を目的としており、急冷である。UD5 は、成形温度 230°C で、成形過程は UD4 と同様である。UD6 は、成形温度 180°C で、ローサイクル (LC) 成形を目的としており、徐冷で、アニーリングを含む。UD7 は、成形温度 230°C で、成形過程は UD6 と同様である。UD8 は、成形温度 230°C で、ハイサイクル成形とし急冷で、アニーリングを含む (HCA)。

5-4-5 試 験

5-4-5-1 3点曲げ試験

ASTM D790-02 に準拠し、3点曲げ試験を行った。試験本数は各4本である。材料万能試験機 AUTOGRAPH (DCS-10T, 島津製作所製) を用い、50kgf のロードセル (LT-50KG, KYOWA 製) を使用し、試験速度は 5mm/min とした。支持スパンは 80mm とした。試験片本数は各4本である。

5-4-5-2 アイゾット衝撃試験

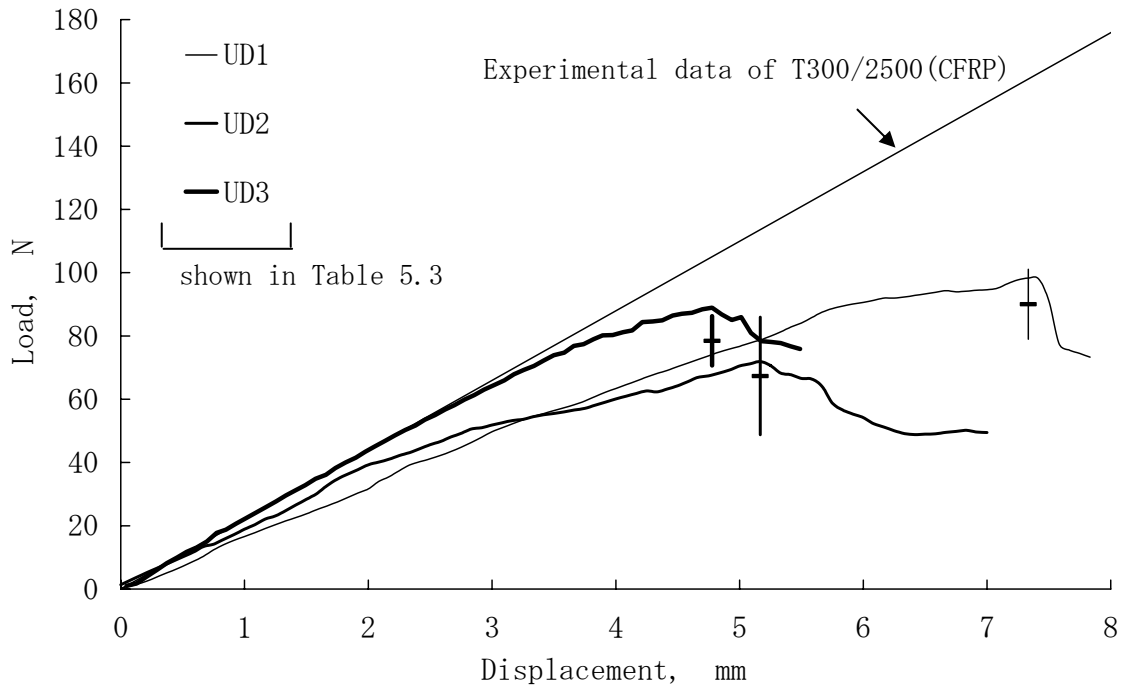
ISO 180/1U を参考にし、アイゾット衝撃試験を行った。試験本数は、各8本である。試験機は、ひょう量 14.715J (150kgf-cm) , ハンマ重量 36.179N (3.688kgf) , ハンマの回転軸中心線から重心までの距離 0.2176m (21.76cm) で、東洋精機製のものである。破壊様相は、フラットワイズ衝撃とした。

5-4-6 結 果

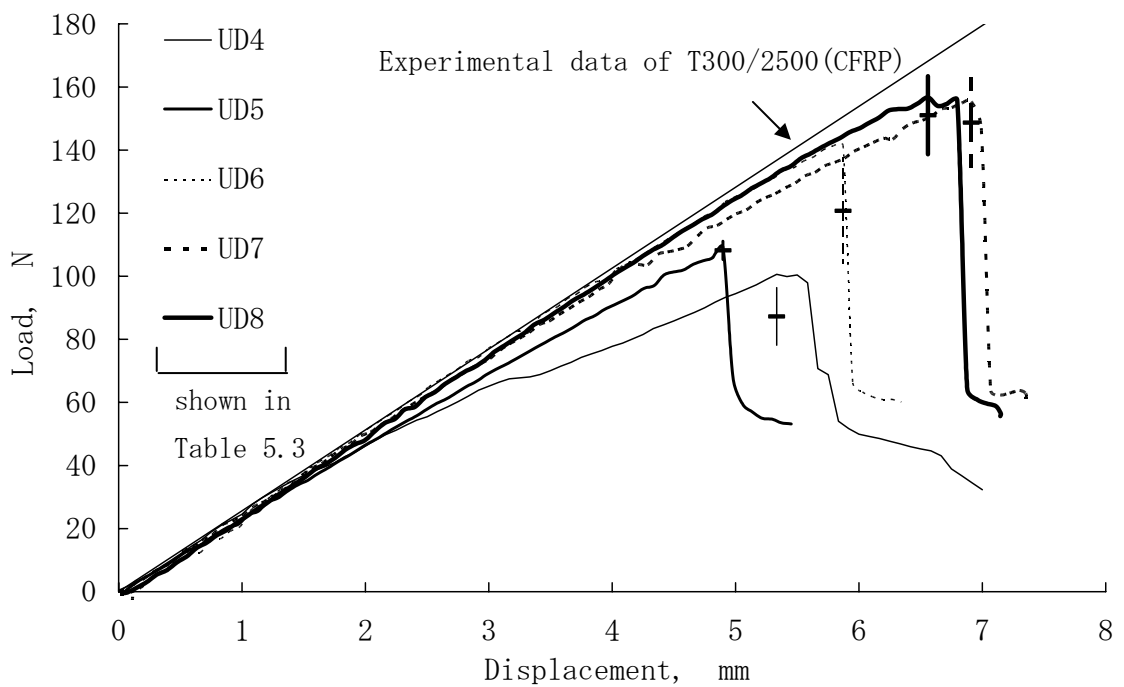
5-4-6-1 MFR とサイジングトリートメントの影響

Fig. 5.14(a) に代表的な荷重-変位線図を示す。縦軸は荷重、横軸は荷重点の変位 (たわみ量) である。図中の直線は、CFRP (T300/2500)0° 材の曲げ特性 (実験値) であり、比較のために載せてある。図中の十字マークは、横線がデータの平均値、縦線の長さがデータの偏差 $\pm\sigma$ である。UD1, UD2 は CFRP 的な材料挙動とは程遠くどちらかといえばやわらかく延性的な PP の材料挙動に近いが、UD3 は荷重の線形性もあり、CFRP 的な材料挙動に近い。Fig. 5.15 に曲げ強度、曲げ弾性率、アイゾット衝撃強度をそれぞれ示す。図中三本の棒グラフのうち上から、曲げ強度、曲げ弾性率、アイゾット衝撃値の順である。棒グラフ先端の線は、データの偏差 $\pm\sigma$ である。上部横軸は曲げ強度であり、下部横軸は曲げ弾性率およびアイゾット衝撃強度を示している。

まず、UD1 と UD2 を比較すると、炭素繊維を化学的処理により改質/解繊すると、同



(a) UD1 to UD3 series, $V_f = 30\%$



(b) UD4 to UD8 series, $V_f = 40\%$

Fig. 5.14 Typical load-deflection curves.

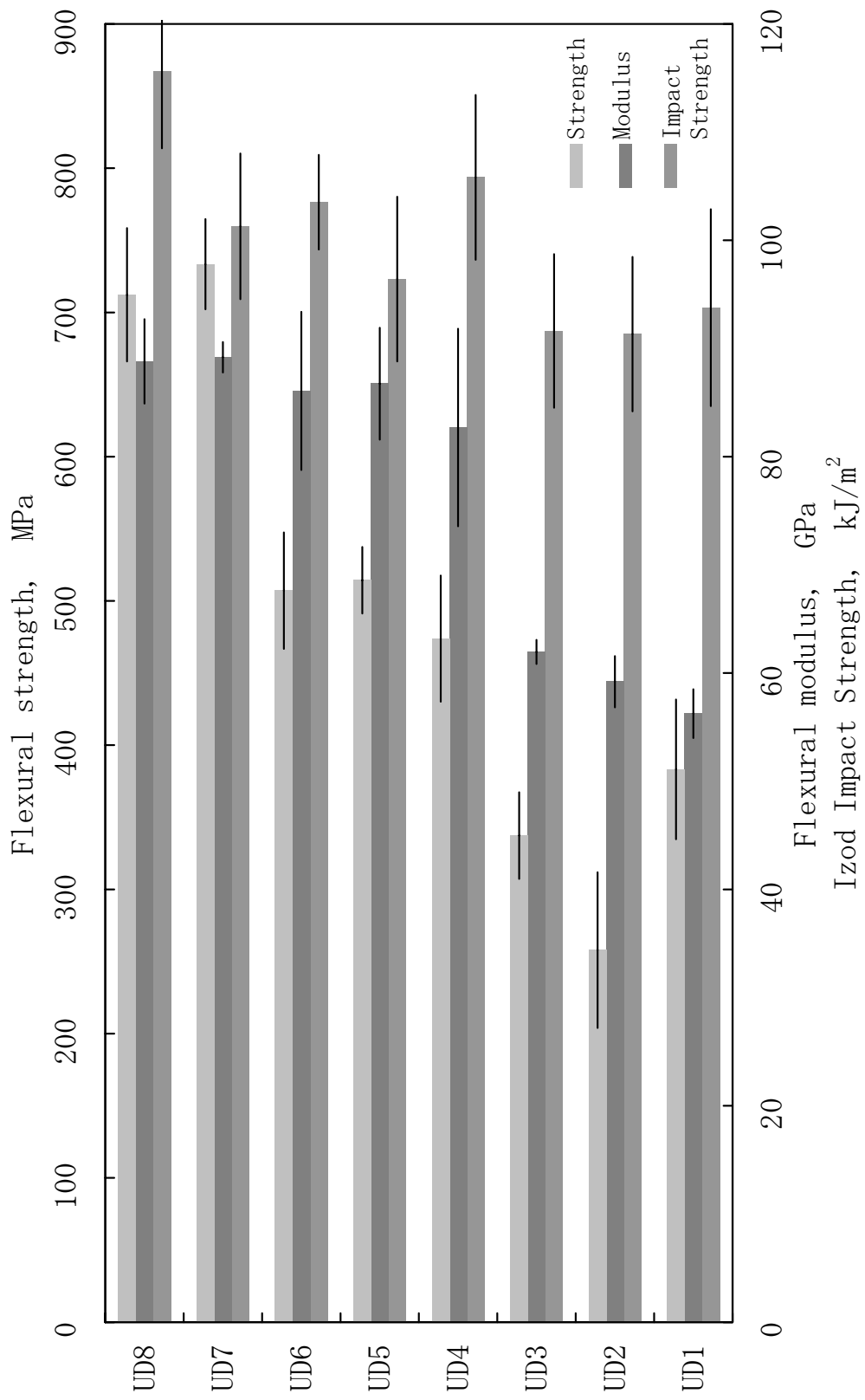


Fig. 5.15 Flexural properties and impact property of each specimens.

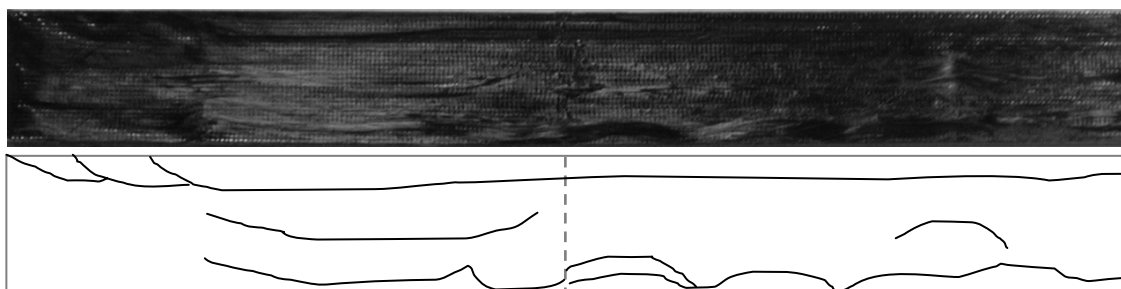


Fig. 5.16 Fibrous kinks on surface of UD2 specimen.

じマトリックスで弾性率は向上するが、しかし強度は低下することがわかる。弾性率の向上は、単純にサイジング剤除去による、炭素繊維とPPの界面特性の改善で説明できる。複合材料の力学特性は、その複合効果から界面接着特性に反映される²²⁾。界面は繊維に荷重を伝達する役目を担っている。マトリックスに比べ力学特性の高い繊維同士で荷重分担を行えるため材料は強化される。この界面接着が不十分であると、十分な複合効果は得られない。UD1は解繊しておらず、サイジング剤で束ねられた炭素繊維のまわりをPPで固めただけのもので、繊維束内への含浸は考えにくい。繊維はサイジング剤により一方向に引き揃えられている。それに対し、UD2の試験片表面を観察してみると、Fig. 5.16に示すように、解けた繊維がうねっているような様子が確認された。これは、サイジング剤を除去して解繊されている証拠であると同時に、一方向性が失われて繊維が曲がっていることも示している。MFRの低いPP1を使用したため、高分子量が一気に流動するために、繊維は型内流れに影響されやすいのではないかと考えられる。すなわち、繊維の曲がりにより繊維が負担できる荷重が低下し、0°材の繊維方向の強度が低下する。ここまでの議論で、弾性率を向上させるためには界面特性を改善することが、また、強度を向上させるには一方向性を維持することが重要であることがわかった。

次に、UD2とUD3を比較すると、MFRの高いPP2を使用したため、解繊による繊維のうねりが少なく、強度が向上した。MFRの高いPP2はPP1に比べ重量平均分子量が約5分の2と比較的低分子量であり、繊維は型内流れに影響されにくい。さらに解繊されたことによって繊維束内への低分子量PPの含浸が進行したと考えられる。これらの結果から、化学的処理によりサイジング剤を除去し、かつMFRの高いPP2を使用すれば、CFRPP 0°材の性能は特に弾性率の面で、理論弾性率 $E_c=69.8\text{GPa}$ ($V_f=30\%$ 、炭素繊維の $E_t=230\text{GPa}$ 、PPの $E_t=1.2\text{GPa}$ として複合則から算出) の約9割を発現する。以後の検討は、すべてUD3の材料条件で行った。また、材料の長寿命化を見据え、破碎し、新たにPPを加え再成形するというカスケードリサイクルを考え、CFRPP 0°材の実用的な V_f は40%と設定した。これならば、従来の熱硬化性CFRP ($V_f=60\%$) と比較して、炭素繊維使用量が少なく済むから材料費が抑えられ、多少の損傷は修復して再利用でき、加えるPP量でリサイクル材の V_f の制御が容易であるため、合目的な4Rが可能となる。ここで、4Rとは、Reuse, Recycle, Reduce, Repairの3

つの頭文字Rであり、修理してリユースすることや、熔融再成形してカスケードリサイクルすることで、作りすぎを減らし新たな投入資源を節約するというサステナブルコンセプトである。

5-4-6-2 加工条件の影響

加工条件が力学特性改善にどの程度寄与するかを調べた。Fig. 5.14(b)に代表的な荷重—変位線図を示す。縦軸は荷重、横軸は荷重点の変位（たわみ量）である。図中の直線は、CFRP(T300/2500)0°材の曲げ特性（実験値）であり、比較のために載せてある。図中の十字マークは、横線がデータの平均値、縦線の長さがデータの偏差 $\pm\sigma$ である。Fig. 5.15に曲げ強度、曲げ弾性率、アイゾット衝撃強度をそれぞれ示す。

弾性率とアイゾット衝撃強度はそれほど変化しないが、強度は加工条件に大きく依存する。この結果から、弾性率は、解繊の進行と界面特性のみに敏感で、加工条件には鈍感であることがわかる。先の議論から、強度は、界面特性はもとより含浸具合と一方向性の影響が大きいということがわかっているため、その点に注目して考察する。

UD4・UD5グループは冷却温度が急冷で、それに対しUD6・UD7グループは、徐冷でアニーリングを含む。冷却条件の違いは、マトリックスの結晶化度に影響する。PPやポリエチレンなどオレフィン系プラスチックでは、一般的に結晶化度が大きいと、材料は硬くなり、耐熱性も向上するが、脆くなるため耐衝撃性は低下する。結晶化度が小さいと、柔軟になり、耐衝撃性や透明性は向上するが、耐熱性がなくなる。複合材料のマトリックスとする場合は、その複合効果から考えても結晶化度は大きい方が好ましい。また、繊維束を薄いPPシートに挟み込み結晶化させるという検討によって、結晶化は繊維まわりから生じることが確認できる。180°Cで成形した場合のUD4とUD6を比較すると、約1.1倍の強度向上に対し、230°Cで成形した場合のUD5とUD7を比較すると、約1.4倍もの強度向上である。つまり、繊維まわりの結晶化度が大きくなれば、曲げ強度、つまり0°材の圧縮特性は向上するといえる。成形温度の違いは、熔融状態にある高分子の流動性に寄与し、230°Cで成形したUD7は180°Cで成形したUD6よりも一方向性に富み、含浸もより進行しているといえる。また、冷却速度の違いは、マトリックスであるPPの結晶化度に影響し、徐冷のUD7は急冷のUD5よりも、特に炭素繊維近傍での結晶化が促進され、界面特性が向上したといえる。このことは、UD7の弾性率が、UD5のそれよりも若干向上している点で確認できる。これらの相乗効果でUD7はUD4～UD6に比して、性能が良い。では、どの成形過程による影響が大きいのか。そこで、成形温度230°C、アニーリングの他はすべて急冷するという条件で加工したUD8をみてみると、強度はUD7と同等であるから、アニーリング過程が重要であるという結果が得られた。今回は、120°C/1時間程度のアニーリングであったが、文献²³⁾によれば、PPについて、140°C/1,400分のアニーリングを試しているものもあり、最適なアニーリング温度と時間は、今後の課題として残った。しかし、この結果は迅速成形を考えるならば、成形中はハイサイク

ルで成形後は1時間程度のアニーリングという条件で十分な改善効果があることを示している。この結果をうけて、結晶化度の比較を定性的に行うために、X線回折による材料分析を行った。これに関しては、補遺Aにまとめてある。

5-5 引張疲労試験

炭素繊維強化ポリプロピレン (CFRPP) は、マトリックスにオレフィン系の熱可塑性ポリマーであるポリプロピレンを用いた熱可塑性のコンポジットである。本材料は、とても軽く（比重で 1.20）、乗用車に用いられればその高い軽量化率で、燃費を大幅に改善させ、省エネとなり環境負荷を低減するであろう。前述したとおり、本材料0°材（VF=40%）の曲げ特性は、曲げ弾性率約 90GPa、曲げ強度約 750MPa と性能良く、衝撃特性も約 120 kJ/m² と高い。これらの値は、比強度・比剛性で考えると今の自動車の構造材に比べ、非常に魅力的である。しかし実用的に自動車用材料とするためには、本材料の耐久性、つまり疲労特性を明らかにしておく必要がある。そこで本節では、CFRPP の疲労特性について論じる。

5-5-1 複合材料の疲労特性

よく知られているように、複合材料0°材の疲労による損傷は、Fig. 5.17 に示すように、繊維に沿った方向の引張荷重下では4パターンに単純化され、これらが単独あるいは重複して損傷は進展する²⁴⁾。熱可塑性のコンポジットでも、このような4つの現象が起こることは予想される。材料には、層内での3つの現象、すなわち繊維破断による空孔の形成、樹脂割れ、き裂成長によるせん断破壊が疲労によってもたらされる。積層材の場合は層間も問題となり、1つの現象、すなわち層間はく離がもたらされる。オレフィン系樹脂の高いじん性や伸延性は、これら4つの現象を生じにくくするかも知れない。本節では、基本的な疲労特性として、CFRPP の引張疲労特性を調べた。

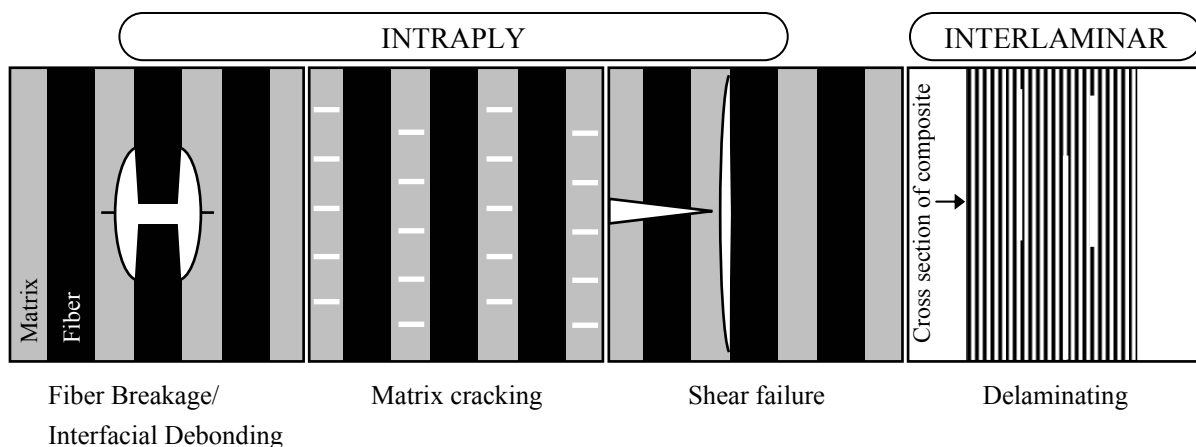


Fig. 5.17 Four fatigue damage phenomena of thermoplastics matrix composite.

5-5-2 試料

本実験で使用した試料の詳細を Table 5.4 に示す。炭素繊維には、東レ製の T700SC-24K を使用した。アイソタクチックポリプロピレンには、出光興産製の J3003GV というホモポリマーを使用した。

Table 5.4 Material properties of unidirectional CFRPP.

Material	ρ g/cm ³	M_w	M_w/M_n	MFR g/10min	E_{11} GPa	ε_{11} %	σ_{11} MPa
CF / T700SC-24K	1.80	—	—	—	230	2.10	4 900
i-PP / J3003GV-homo polymer	0.90	197 000	4.69	30	2.1	10	42

ρ : density, M_w : weight-average molecular weight, M_n : number-average molecular weight, MFR: melt mass flow rate,

E_{11} : longitudinal elastic modulus, ε_{11} : ultimate longitudinal strain, σ_{11} : ultimate longitudinal stress.

5-5-3 成形

本材料の成形条件（圧力-時間-温度線図）を Fig. 5.18 に示す。これは先述した試験片番号で示せば UD8 となる。成形温度は 230°C であり、指示圧力は 35MPa（実働圧力は 1.86MPa \approx 19 気圧）である。結晶化度を高め、成形による残留ひずみを除去するためのアニーリング条件は、指示圧力 35MPa, 125°C で等圧等温保持し、時間は 60 分である。本成形時間は約 70 分である。

< CFRPP 0° 材の試験板の成形 >

はじめに、著者の新しい成形法 (Fig. 5.4)²⁵⁾にて、薄さ 0.3 mm の一方向強化の CFRPP シートを作製する。次に、それらを積層して、Fig. 5.18 に沿ったプレス成形法により 1 枚の板を作製する (Fig. 5.12)。こうして作られた試験板の寸法は、巾 130 mm x 長さ 200 mm x 厚さ 1.2 mm である。試験版の繊維体積含有率は、約 50% である。全ての成形は、東洋精機製のミニテストプレス 10 により行われた。

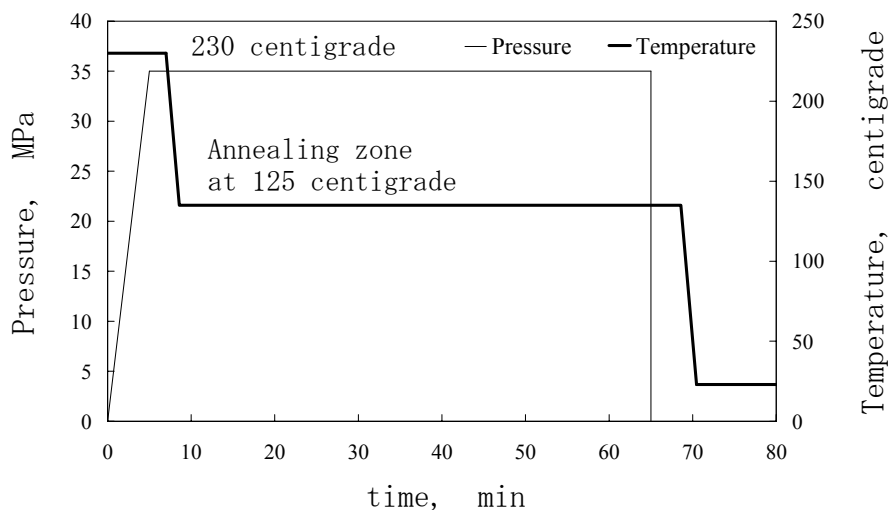


Fig. 5.18 High cycle molding P-t-T diagram.

5-5-4 試験

本材料の基本的な耐久性を調べるために、引張疲労試験を行い、 $S-N$ 線図すなわち疲労負荷応力と破断回数との関係を求めた。引張試験片は JIS K 7054 に準じ、試験は電気-油圧サーボ疲労試験機（容量 49kN，サーボパルサー model EHF-UB5-20L，島津製作所製）を用い、定振幅荷重制御による正弦波 5Hz，応力比 $R=0.1$ で行った。

試験に際し、把持部を薄さ 0.2 mm の CF/エポキシ平織材 (1K) のタブで補強した。接着剤には、東京測器研究所製の CYANOACRYLATE ADHESIVE を用いた。この補強タブは、ピーリングには弱いけれども、シアリングには強い特性をもつ。Fig. 5.19 に試験概略を、Table 5.5 に試験条件をそれぞれ示す。

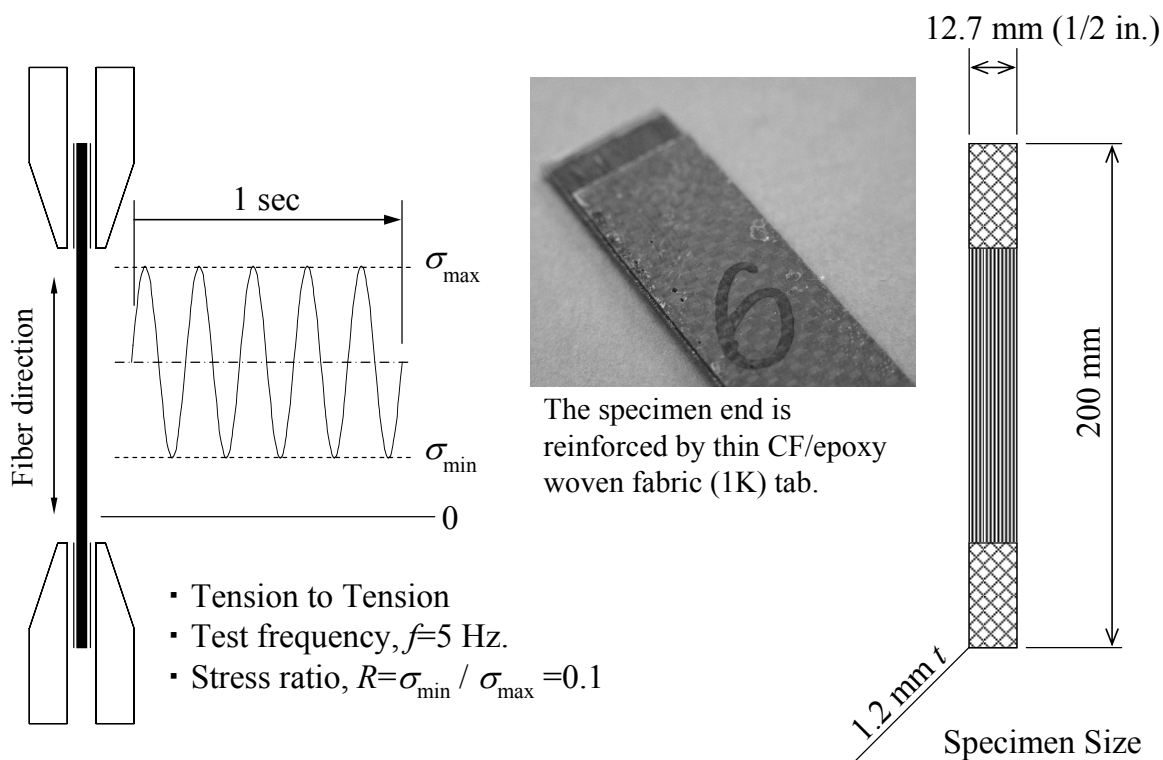


Fig. 5.19 Fatigue testing Method.

Table 5.5 Fatigue testing condition.

Condition	σ_{max} MPa	σ_{mean} MPa	σ_{min} MPa	P_{max} N	P_{mean} N	P_{min} N	$\sigma_{max.}/\sigma_u$ %	$\Delta\sigma$ MPa
F1	994.7	547.3	99.4	14 431	7 937	1 443	70	895.3
F2	710.5	390.7	71.0	10 299	5 664	1 029	50	639.5
F3	426.3	234.4	42.6	6 125	3 368	612	30	383.7
F4	568.4	312.6	56.8	8 196	4 507	819	40	511.6
F5	639.9	351.9	63.9	9 421	5 181	942	45	576.0
F6	782.0	430.1	78.2	11 755	6 459	1 163	55	703.8
F7	852.6	468.9	85.2	13 080	7 193	1 307	60	767.4

σ_u : ultimate tensile strength of unidirectional CFRPP, $\sigma_u=1\ 421$ MPa, measured by static tension test.

Tensile stress ratio, $R=\sigma_{min} / \sigma_{max}=0.1$. $\Delta\sigma=\sigma_{max} - \sigma_{min}$. Fiber volume fraction of specimen is about 50%.

5-5-5 結果

Fig. 5.20 に CFRPP 0° 材の引張疲労試験の $S-N$ カーブを示す. 本カーブの作成および結果整理において, 金原らの研究²⁶⁾を参考にした. Fig. 5.21 には, KEYENCE 製のレーザー顕微鏡 VK-8510/VK-8500 で観察した 破断箇所の様子を示す.

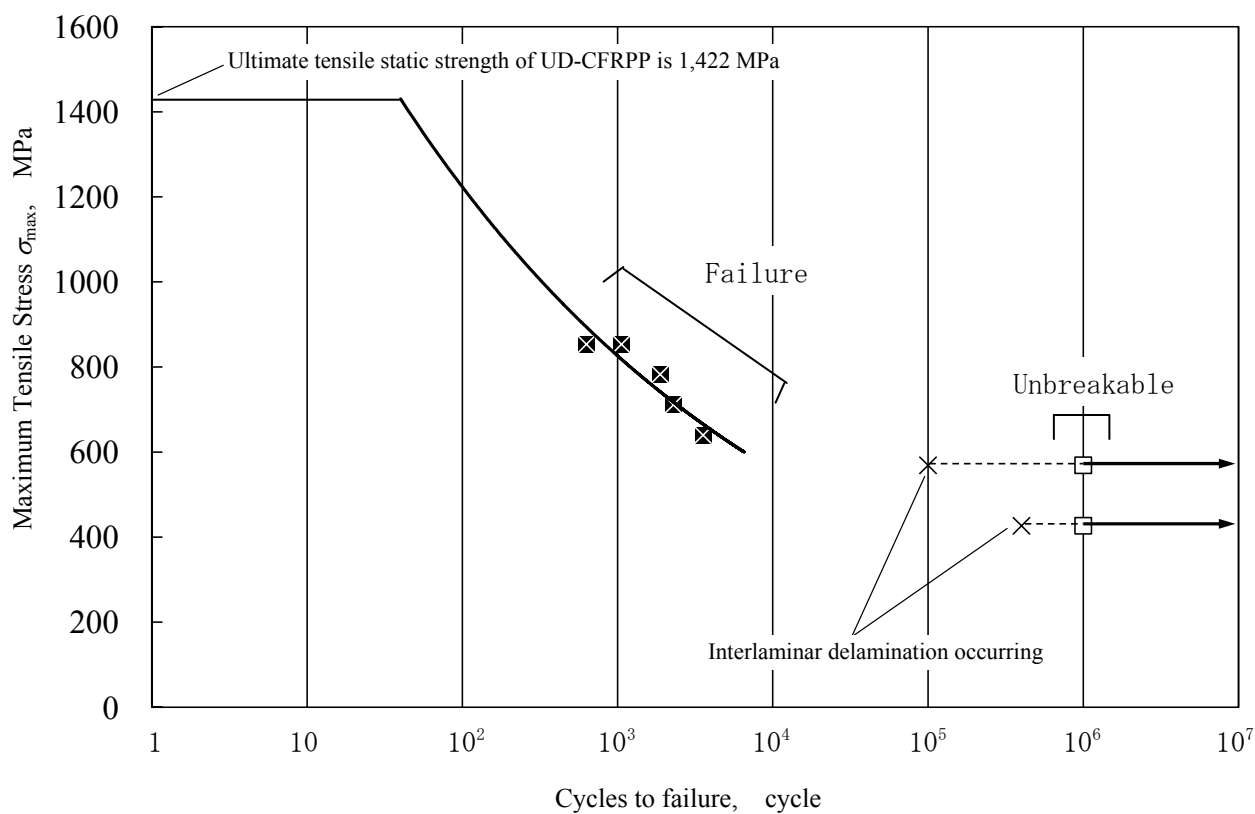


Fig. 5.20 Fatigue behavior and fracture characteristic of CFRPP.

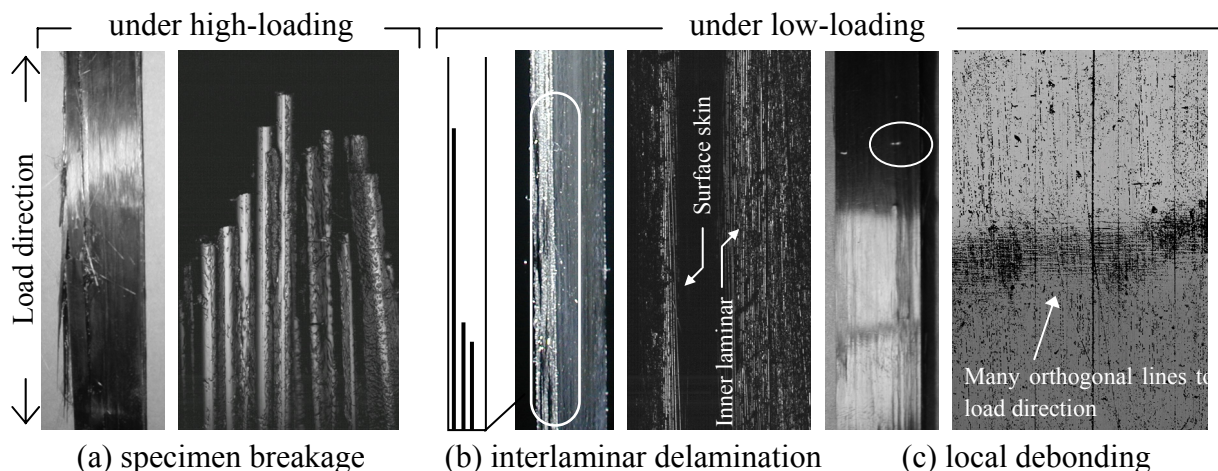


Fig. 5.21 Characteristic of fatigue failure about CFRPP composites.

5-5-6 考察

高荷重下では、Fig. 5.20 (a)に示すように、繊維破断が生じた。破断は $0.5\sigma_u$ まで生じた。著者は、破断箇所の観察を、レーザー顕微鏡を用いて行った。Vf が 50%と少し高いせい、アイソタクチックポリプロピレンは、表面ではよく含浸しているものの、板厚方向中央付近では含浸不足が確認された。やはりこれまで通り、特に耐久性を考えた場合、Vf は 30~40%程度が妥当である。

定荷重下での主な疲労損傷は、層間はく離と層内のデボンディングであり、これが単独あるいは重複して起こった。しかしながら、疲労破壊はせず、いずれの試験片も 10^6 を越えた。損傷はまず把持部の補強タブのエッジから層間はく離が成長するのが確認された。やはりチャック部分は応力集中が起こり、また標点間の炭素繊維は疲労しないので、結局応力集中部から損傷が起こる。本来ならば、引張-引張疲労試験ではなく、引張-圧縮疲労試験で評価すべきであった。こうして生じた損傷はそのまま試験片中央部へ進展しつづけた (Fig. 5.20 (b))。さらに著者は、Fig. 5.20 (c)に示すように、試験片表層に、負荷方向に直交する「樹脂しわ」を確認した。

本結果から、著者は本材料の疲労限界を 500MPa と定めた。一般的に、複合材料の疲労設計基準は、静的強度の 3分の1である。本結果、500MPa も、静的強度 1,421MPa の約 3分の1であるから、CFRPP 用に新たに設計基準を設けずとも、これまで通りの設計基準で問題ない。今回は、Vf が 50%であるが、これが 30%程度になると、今度は樹脂側の高じん性の影響等が出て、損傷は起きるけども進展しづらいなどの現象が確認できるかも知れない。

5-6 結 言

本章では、CFRPP フレッシュ 0° 材の基本的な力学特性について、以下のように結論付けられた。

I. 静的 3 点曲げ特性およびアイゾット衝撃特性

炭素繊維の化学的処理による表面改質／解繊，樹脂の流動性／無水マレイン酸による変性，および成形条件を検討し，CFRPP 0° 材の基本的な力学的特性評価を行った。本研究で提案した成形法により，CFRPP 0° 材の高性能化に成功し，低環境負荷，低コスト量産型 CFRP の実現性を示した。得られた結果を以下にまとめる。

1) 曲げ弾性率は界面接着性で決定し，炭素繊維と PP との界面の接着の妨げになっていたサイジング剤を化学的処理により除去することで，これを解決した。炭素繊維の活性表面と無水マレイン酸変性 PP が，化学的／物理的な結合をすることで，界面接着性を向上させた。曲げ弾性率は，89GPa でほぼ理論通りである。

2) 曲げ強度は界面接着性に加え，PP の含浸具合，繊維の一方向性，残留ひずみの度合い，結晶化度で決定する。含浸はサイジング剤を除去すること，MFR を上げることで進行し，これに付随して，繊維の一方向性は保たれる。また，加圧保持の状態でのアニーリングすることや無水マレイン酸添加の効果により，短時間で残留ひずみを除去すると同時に，結晶化度を増大させることに成功した。この結果，曲げ強度は，700MPa を超えた。

3) このことは本材料を等方化した場合，約 260MPa の曲げ強度，約 33GPa の曲げ弾性率を有することが期待され，この値は，現在の熱可塑性 GFRP マット材 (GMT) や GFRP 射出成形品の強度 200MPa，弾性率 20GPa を凌駕するものであり，大物成形品および広範の分野に適用可能である。

4) 高結晶化度としたホモポリマーの PP は，衝撃特性の低下が問題となるが，複合材とすることでこれが向上した。

5) WAXD 分析の結果，CFRPP の結晶化度は加工条件で決定し，マトリックスに高 MFR の PP を用いる場合は，アニーリングの影響が大きいことがわかった。今回の結果からは，事実上， α 相への再結晶化による結晶化度の増大を定性的に確認したまでであるが，高圧下／長時間アニーリング／超徐冷という条件では γ 相へも結晶化する^{20), 27)}ため， γ 相へも結晶化させ，正味の結晶化度を上げることで，強度，または限界ひずみがさらに向上する様な工夫が期待される。

6) UD8 の限界ひずみをしてみると， $V_f=40\%$ でも 0.845%であった。UD3 から約 1.3 倍の向上である。これから計算される圧縮側の理論強度は，弾性率を 92GPa としておよそ

777.4MPaであるから、今回開発した712.2MPaのCFRPP 0°材は92%の強度発現率を有する。この限界ひずみを1%台（T300/2500系のCFRP0°材の限界ひずみは、約1.2%）にのせ高強度化することが、迅速成形と併せて今後の課題である。

I I. 引張疲労特性

著者は、CFRPPの疲労特性について、以下の結論を得た。

- 1) CFRPPの引張—引張疲労特性を明らかにした。
- 2) 初期破壊は、応力集中による層間はく離である。
- 3) 疲労設計基準では、本材料の適応応力は500MPa程度であり、これは静的強度の約3分の1であることがわかった。

I I I. 界面接着性（詳しくは、補遺Cを参照）

CFRPP開発材料の界面接着性の定量的評価を、ショートビーム法によるILSS試験およびDNS試験片を用いた目違い切欠き圧縮せん断試験を通じて行った。成形法の改良により開発されたCFRPP（UD8）は、従来のCFRPP（UD1）に比べ、約3.5～5.8倍の界面接着の改善を確認し、それはCFRP（T800H/3900-2）の約1/3～2/5であることが分かった。

I V. AE法による破壊挙動（詳しくは、補遺Dを参照）

界面接着問題の原因を、AE測定とSEM観察を通じて定性的に調査した。従来のCFRP（T700SC/105/206）に比べてCFRPPにはかなり早い段階での初期損傷が認められ、その初期損傷は繊維まわりのマイクロボイドの成長や合体、あるいはボイドを起点とした荷重方向に伸びるき裂進展により進行・蓄積されていると考えられる。マイクロボイドやき裂進展は、繊維まわりの結晶質で起こっているため、この改善が望まれる。しかしながら、界面接着の形態が無水マレイン基を介在した化学的結合、高分子のからまりや物理的吸着であり、界面の接着力としては弱いCFRPPにおいて、繊維まわりの結晶化というのは成形法の改良という面では力学的特性の改善に大きな影響をもたらした。改善の方向性としては、1) 結晶質をブロックPPとすることや、2) PP用のサイジング処理あるいは繊維表面官能基を改良した炭素繊維側の改質、などが考えられるであろう。いずれにせよ、界面接着を絶対的にCFRPに近づけなければならない必要はなく、自動車や家電、ロボットに使用するのであれば、航空機用の6～7割で良い。よって、実用化にはあと2、3割の改善が望まれるが、これは各論で述べられた成形法の改良とPPの変更、繊維改質をもってすれば十分実現可能な目標値である。

5章で引用した文献等：

- 1) 中塚史紀, 高橋淳：CFRPによる車両重量軽量化の環境負荷低減効果, 第29回複合材料シンポジウム講演要旨集, (2004), pp.201-202.
- 2) 中塚史紀, 圖子博昭, 高橋淳：地球環境問題対策としてのCFRPによる軽量化自動車開発の必要性, 48th FRP CON-EX 2003 講演会講演要旨集, (2003), pp.69-71.
- 3) H. Zushi, J. Takahashi, K. Kageyama, H. Murayama, H. Nagai & J. Matsui: Life Cycle Assessment and Long Term CO2 Reduction Estimation of Ultra Lightweight Vehicles Using CFRP, Key Engineering Materials., 243-244(2003), pp.45-50.
- 4) H. Adam: Carbon fibre in automotive applications, Materials & Design., 18, 4(1997), pp.349-355.
- 5) D. KANAWEDE & P. K. MALLICK: Thermoplastic Matrix Composites for Structural Automotive Applications, TECHNICAL PAPER of ICCM-15, EM03-293(2003), pp.1-10.
- 6) 鈴木徹也, 菅満春, 高橋淳：量産車用CFRPによる軽量乗用車のLCA, 第29回複合材料シンポジウム講演要旨集, (2004), pp.195-196.
- 7) S. Y. Fu, Y. W. Mai, B. Lauke & C. Y. Yue: Synergistic effect on the fracture toughness of hybrid short glass fiber and short carbon fiber reinforced polypropylene composites, Materials Science and Engineering., A323(2002), pp.326-335.
- 8) S. -Y. Fu, B. Lauke, E. Mader, C. -Y. Yue & X. Hu: Tensile properties of short-glass-fiber- and short-carbon-fiber-reinforced polypropylene composites, Compo-sites Part A., 31(2000), pp.1117-1125.
- 9) S. Y. FU, Y. W. MAI, B. LAUKE, G. XU & C. Y. YUE: Fracture resistance of short-glass-fiber-reinforced and short-carbon-fiber-reinforced polypropylene under charpy impact load and its dependence on processing, JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE., 37(2002), pp.3067-3074.
- 10) I. C. Finegan, G. G. Tibbetts & R. F. Gibson: Modeling and characterization of damping in carbonnanofiber/polypropylene composites, Composites Science and Technology., 63(2003), pp.1629-1635.
- 11) 高野菊雄：これでわかるプラスチック技術, 工業調査会, 東京, (2000), pp.70-87.
- 12) M. van den Oever and T. Peijs: Continuous-glass-fibre-reinforced polypropylene composites II. Influence of maleic-anhydride modified polypropylene on fatigue behavior, Composites Part A., 29A, (1998), pp.227-239.
- 13) J. Gassan and A. K. Bledzki: The influence of fiber-surface treatment on the mechanical properties of jute-polypropylene composites, Composites Part A., 28A, (1997), pp.1001-1005.
- 14) P. V. Joseph et al.: The thermal and crystallisation studies of short sisal

- fibereinforced polypropylene composites, *Composites Part A.*, 34, (2003), pp. 253-266.
- 15) E. K. Gamstedt et al.: Fatigue mechanisms in unidirectional glass-fibre-reinforced polypropylene, *Composites Science and Technology.*, 59(1999), pp. 759-768.
- 16) 田村学, 高橋淳, 大澤勇, 金井誠, 鶴沢潔, 田原正夫: 炭素繊維強化ポリプロピレンにおける界面改質効果, 48th FRP CON-EX 2003 講演会講演要旨集, (2003), pp. 111-113.
- 17) 大谷杉郎, 奥田謙介, 松田茂: 炭素繊維, 近代編集社, 東京 (1983), pp. 211-229.
- 18) 佐藤功: 図解雑学プラスチック, ナツメ社, 東京 (2004).
- 19) Y. Seo, J. Kim, K. U. Kim & Y. C. Kim: Study of the crystallization behaviors of polypropylene and maleic anhydride grafted polypropylene, *Polymer.*, 41(2000), pp. 2639-2646.
- 20) Chang-Mou Wu, Ming Chen & J. Karger-Kocsis: Interfacial shear strength and failure modes in sPP/CF and iPP/CF micro-composites by fragmentation, *Polymer* 42(2001), pp. 129-135.
- 21) K. Mezghani & P. J. Phillips: The γ -phase of high molecular weight isotactic polypropylene: III. The equilibrium melting point and the phase diagram, *Polymer.*, 39, 16(1998), pp. 3735-3744.
- 22) 日本複合材料学会 (編): 複合材料活用辞典, 産業調査会, 東京 (2001), pp. 400-402.
- 23) D. Dudić, V. Djoković & D. Kostoski: The high temperature secondary crystallisation of aged isotactic polypropylene, *Polymer Testing.*, 23(2004), pp. 621-627.
- 24) E. E. Gdoutos, et al.: *Failure Analysis of Industrial Composite Materials*, McGraw-Hill, (2000).
- 25) 圖子博昭, 田村学, 大澤勇, 鶴沢潔, 高橋淳, 安田浩: 炭素繊維一方向強化ポリプロピレンの力学特性評価, 日本複合材料学会誌, 日本複合材料学会誌 32 巻 4 号 (2006 年 7 月発行) に掲載予定.
- 26) 金原勲, 大澤勇, 影山和郎, 鈴木敏夫, 吹上紀夫, 中田政之: ガラス/アラミド/カーボン系ハイブリッドFRP積層板の力学的特性と材料設計(第2報:疲労特性), *材料*, Vol. 44, No. 499, (1995), pp. 412-417.
- 27) E. Pérez, D. Zucchi, M. C. Sacchi, F. Forlini & A. Bello: Obtaining the γ phase in isotactic polypropylene: effect of catalyst system and crystallization conditions, *Polymer*, 40(1999), pp. 675-681.

第6章 CFRPの4R技術開発と力学特性評価

【本章の概要】

世界のエネルギー消費量は、21世紀最初で最大の中国の急速なモーターゼーションなどによって、急速に成長するだろう。自動車1台あたりの生涯エネルギー消費量は、LCA結果によれば、使用段階が全体の86%を占める。従って、この使用段階のエネルギー消費を抑えるために、車重を超軽量にして燃費を向上させることは重要である。車重の軽量化は、自動車のダウンサイジングなどでも達成されるが、本研究では、現在の利便性や使い心地をそのままに軽量化したいというコンセプトから、ダウンサイジングではなく、適用材料自体を軽量化するアプローチである。具体的には、熱可塑性CFRPを構造部材や強度材として適用する。

本章では、リサイクルの観点から、まずはリサイクル法を提案し、熱可塑性CFRP(CF/PP, CF/ABS, CF/PC, CF/PET)を評価し、CFRPPの優位性を示したあと、第5章で示された力学特性(一方向 $E_{\parallel}=92\text{GPa}$, $\sigma_{\parallel}=750\text{MPa}$, 直交異方 $E_{+}=46\text{GPa}$, $\sigma_{+}=375\text{MPa}$, 擬似等方 $E_{*}=31\text{GPa}$, $\sigma_{*}=250\text{MPa}$)がリサイクルでどこまで低下するのかを定量的に示す。さらに、重要な部位には使用されるであろう熱硬化性CFRPの簡便リサイクル法を提案し、樹脂一本化の理念に基づき、これをPPで固めて再利用したときの力学特性について論じる。

6-1 緒言

本章では、炭素繊維複合材料のリサイクル技術について検討している。将来、種々のグレードのCFRPが多く的人工物に、軽量素材として採用されたとすると、必ず4Rの必要性が出てくる。例えば、現在の世界のCFRP生産量は、その用途が航空機やモータースポーツ、高級自動車に限られているせいで年間約2万トンに収まっているが、これが量産自動車や産業用/家庭用ロボット、家電製品等に採用されていけば、年間1,000万トンのオーダーとなり、その社会リサイクル(資源循環)が求められることは明白である。これは、炭素繊維のライフサイクルからも同じようなことが言える。炭素繊維は、高い消費エネルギーで作られるが、その高い耐久性を考えると、再利用し、長い寿命で使用した方が環境にやさしい。

すなわち、CFRPを世の中的人工物に広範に普及させるためには、このリサイクル技術が確立されていることが大前提となる。CFRPの4Rを考える場合、リユースなどは、もう一度同じ製品に戻すだけなので検査法の確立で実現可能であるが、リサイクルやリペアという分野は、まだまだエンジニアリング的にも未開拓の分野であり、検討する必要がある。

現在、熱硬化性CFRPに関しては、炭素繊維と熱硬化性樹脂とを溶媒により分離、炭素繊維を回収し、熱硬化性樹脂をモノマーまで解重合処理して、これを再利用するという技術が検討されているが、これは処理工程が複雑で多くのエネルギーを有することや、回収効率の問題で、有用なリサイクル方法とは言い難い。

そこで本研究では、熱硬化性CFRP、熱可塑性CFRPが混在する社会を想定し、それぞれのCFRPに合った目的別リサイクル手法の開発を試みた。省エネで、しかもたがいに似たようなリサイクル処理を提案する。そのほうが、処理システムという点からは環境に有利である。具体的には、①破砕、②再成形、という2つの大きなメインプロセスをもつ。熱可塑性CFRPの場合は、主にこのメイン2工程で行う。熱硬化性CFRPの場合は、①の中に熱処理によるエポキシ残留物の除去、②の中に再成形用熱可塑性樹脂の添加、というサブプロセスが入ってくる。このように、本研究で提案するリサイクルシステムは極めて簡便・単純にできている。そのため余計な処理は省くことができ、従来の複雑なシステムよりは省エネにつながる。

この手法でリサイクルすると、熱硬化性CFRPについては、リサイクル成形品である熱可塑性CFRPには熱硬化性CFRP破砕物が混練され、成形条件、負荷条件によってはそれが欠陥として作用する。熱可塑性CFRPについては、リサイクル回数が増すたびに、繊維は短くなり、繰返しの混練により繊維が折れ曲がったりして、破断ひずみが小さくなり、性能が劣化するという問題がある。

そこで、この問題解決を考えると、一方でリサイクル混練物（コンパウンド）をペレタイズして、射出成形するというものがあるが、他方でコンパウンドをSMC成形物のソリッドコアとすることが考えられる。本章では、リペアのことも考え、第5章で得られた知見をもとに、後者の検討に主眼を置いたリサイクル手法についても触れる。

6-2 リサイクルの必要性

安価で迅速に成形可能な熱可塑性CFRPが世の中に普及するとしても、やはり要の部位には熱硬化性CFRPが、その信頼性や高品質から考えても、使用され続けるだろう。著者は、環境問題やエネルギー消費の観点から、軽量化のため自動車への適用を急ぐべきで、はやい段階でCFRPが使用されはじめると思っているが、実用化にあたりそのリサイクルの準備も重要であると考えている。

自動車に適用された場合、その量はどのくらいか考えてみると、自動車への適用には、これまでの生産量をはるかに凌駕するCFRPが必要であることがわかり、またその4Rが重要であることが理解できる。現在、自動車は毎年、保有台数の1割が更新され新たに生産されている。自家用乗用車について試算してみると、世界の乗用車保有台数は約5億台でその1割にあたる5,000万台が毎年生産されている。熱硬化性CFRPが構造部材として1台に100kg、熱可塑性CFRPがボディの部材として1台に1

00kg適用された場合を想定すると、熱可塑性CFRPと熱可塑性CFRP合わせて1,000万トンの生産量になる。現在のCFRP生産量が約2万トンなので、実に500倍である。現在世の中に出回っている炭素繊維量は、 V_f を60% ($W_f = 1.8 / 1.56 \times V_f$ で69.2%)として、約1.38万トン程度である。しかし、CFRPが自動車用途として普及した場合は、構造部材用熱硬化性CFRPに含まれる炭素繊維が、 V_f を60% ($W_f = 69.2\%$)として、約346万トン、ボディ用熱可塑性CFRPに含まれる炭素繊維が、 V_f を30% ($W_f = 1.8 / 1.17 \times V_f$ で46.2%)として、約231万トンであり、合わせて約577万トンである。これだけの量の炭素繊維が世の中に出回ると、炭素繊維は高耐久性素材であり、素材製造段階のエネルギー消費原単位(MJ/kg)が他の素材に比べ高いこともあり、長く使いたい。長く使うために、何度もリサイクル(再成形)し、強化材としてその機能を永続的に発揮し続けてもらいたい。しかし、強化材として機能する繊維長は決まっており、リサイクル回数はおのずと決まってくるだろう。著者は、同じ製品内で再利用することがリサイクルの本質であると考えているため、3回くらい同じ製品内で水平、カスケード利用し繰り返し再利用して、4回目以降では別製品で使えるまで使いこみ、最後は熱回収すればどうかと考えている。繊維自体は劣化しないので、あとは、迅速に効率よく再成形できるようなリサイクルシステムと、熱劣化しにくいマトリックスを選定すればよいと考えている。詳しくは、次節で述べる。

6-3 熱硬化性CFRPと熱可塑性CFRPの想定されるリサイクルパス

6-3-1 熱硬化性CFRPを再利用する

Fig. 6.1の左側が熱硬化性CFRPの想定される現実的なリサイクルパスである。パスは、リユース(水平リサイクル)とカスケードリサイクルの2系統に大別される。熱硬化性CFRPを再成形材としてカスケード利用する場合、熱硬化性CFRPを破碎し、PPで再成形するという方法が考えられる。熱硬化性CFRPの破碎物とPPとをブレンドするには、ラボプラストミルによるブレードスクリュ混練法を用いる。しかし、熱硬化性CFRP破碎物は炭素繊維がエポキシで固められたフレーク状であり、そのまま混練しようとするスクリュを傷めたり、機械に過大トルクが生じたりして危険なため、PPを逐一追加して混練する必要がある。すなわちリサイクルループでは、 I_f を下げながらリサイクルする形態をとる。また、破碎物そのものを混練すると、混練過程で破碎物からエポキシが剥がれ落ち、それが不純物として混入するため、それを防ぐために、熱処理や化学処理で熱硬化性CFRPから炭素繊維を取り出す(マトリックスを除去する)方法もあるが、新たにエネルギーを投入するこの方法は、リサイクルの本質から少し外れている気がしているので、できれば破碎物そのものを利用す

る方がよい。

6-3-2 熱可塑性CFRPを再利用する

熱可塑性CFRP（本研究では、CFRPPをさす）の一方向材やそのアングルプライ材のリサイクルパスは、Fig. 6.1の右側である。先の熱硬化性CFRPのリサイクルと比較すると、そのプロセスの単純さがわかる。熱可塑性CFRPは、PPを足さずにそのまま再成形できるため、 V_f を下げずとも高性能のまま繰り返しリサイクルが可能である。著者が考えているのは、1～3回まではSMCやBMCで成形し、最終ステージが射出成形で、射出成形物使用後は燃焼により熱エネルギーを回収するというものである。

また、熱硬化性CFRPや熱可塑性CFRPのリサイクル材の表層にCFRPPフレッシュ材の一方向シートやクロスプライ・アングルプライシートを熱融着しサンドイッチ構造としたハイブリッドリサイクル材も、リサイクル材の一形態として考えている。この、CFRPPフレッシュ材の一方向シートやクロスプライ・アングルプライシート熱融着による補強法は、CFRPPフレッシュ材のリペア技術としても応用される。

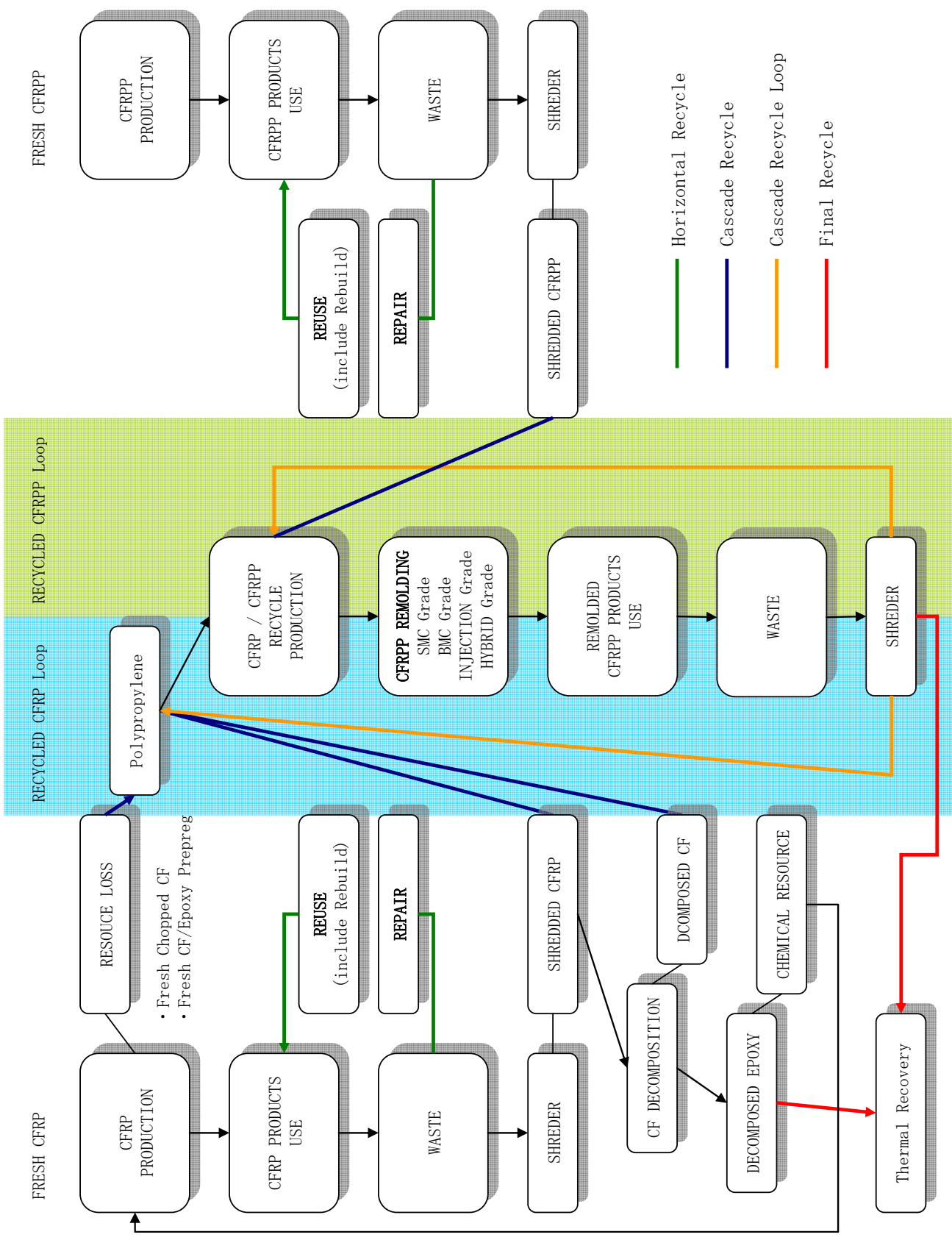


Fig. 6.1 Recycle path of CFRP and CFRPP using PP resin.

6-4 リサイクル手法の検討

リサイクルパスはFig. 6.1に示したが、リサイクルループ内でのカスケード利用(同じ製品内で物性に応じてリサイクル材適用箇所を変えていく利用法)の許容物性低下率と適用箇所について、自動車を例にあげ、検討した(Fig. 6.2)。

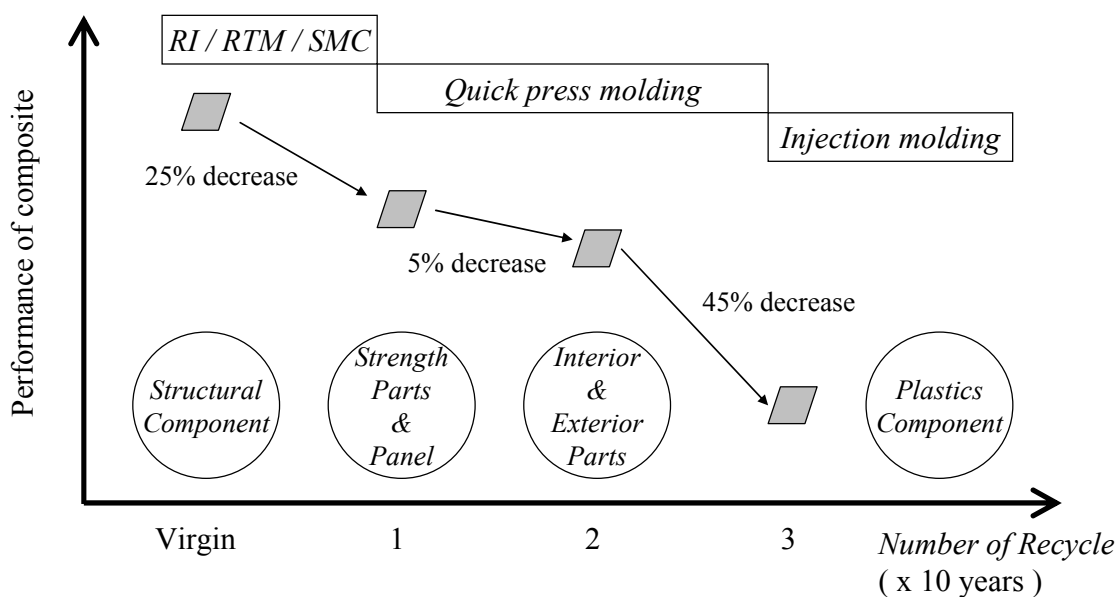


Fig. 6.2 Recycling vision of thermoplastics matrix composites for automotive applications.

6-5 ブレードスクリュ混練法(ラボプラストミルによるコンパウンドの作製)

プラスチック製品のリサイクル方法は、多岐に渡る。まだ確立されていないプラスチックもあるが、プラスチック市場の8割を占める熱可塑性プラスチックの汎用グレードまたはエンプラのケミカルリサイクルを考えると、6工程、すなわち回収→破碎→分離→分解→再重合→再成形のパスを経て製品に戻る。しかしながら、熱可塑性CFRPのリサイクルは、まだ未確立であり、また材料の性格上リサイクルでのエネルギー消費は極力抑えたいので、工程数の少ない再成形利用を考えたい。特に熱硬化性CFRPの分野では、破碎後繊維を長繊維の状態でもマトリックスから分離し取り出す研究もなされているが、これには多くのエネルギー消費と工程を要し、リサイクルステージでの環境負荷を増大させるのみならず、リサイクル材のコストが高くなる。

そこで本研究では、リサイクル法として熱可塑性 CFRP の熱溶融のみの再成形法を提案したい。著者は、Fig. 6.3 に示すようなリサイクルプロセスを独自に考案した。本方法によれば、4工程、すなわち回収→破碎→混練→再成形に簡素化できる。それ故、本方法は、リサイクル段階でのエネルギー消費を抑え、また迅速である。破碎は、Fig. 6.4 に示す破碎機によって行う。混練は、Fig. 6.5 に示す混練装置（東洋精機製、ラボプラストミル 10C100）によって行う。Fig. 6.6 は破碎された試料の例である。

炭素繊維は、混練工程におけるブレードのシアリングによって、繰返し再成形によってその長さを短くしていく。繊維長には、荷重を伝達できる限界値があり、これよりも短くなったコンパウンドに関しては、射出成形用にする。こうすることで、炭素繊維を限界まで繰返し成形で使い切ることができ、環境にやさしい。

本研究では、繊維長分布とトルクとの検討結果からスクリーンの回転数を 40 rpm とし、シアリングの低減・繊維長の維持・材料の長寿命化を目指した。こうすることで、自動車の8つの要素、すなわち、プラットフォーム・ボデー・構造部材・強度パーツ・パネル材・内装材・外装材・バンパースカートに段階的に適用可能で、同一製品内でのカスケード利用を目標にできる。

一方、熱硬化性 CFRP は、まだ開発途上ではあるが、一部の高級自動車のシャフトやパネル材に適用されている。著者は、このような技術も今後発展し、自動車の重要な部位には、その高い信頼性と性能で熱硬化性 CFRP も適用されることを想定しており、熱硬化性 CFRP と熱可塑性 CFRP が平行で使用される状況でも、本方法ならば（樹脂が同じであれば）一括処理可能であると考えている。

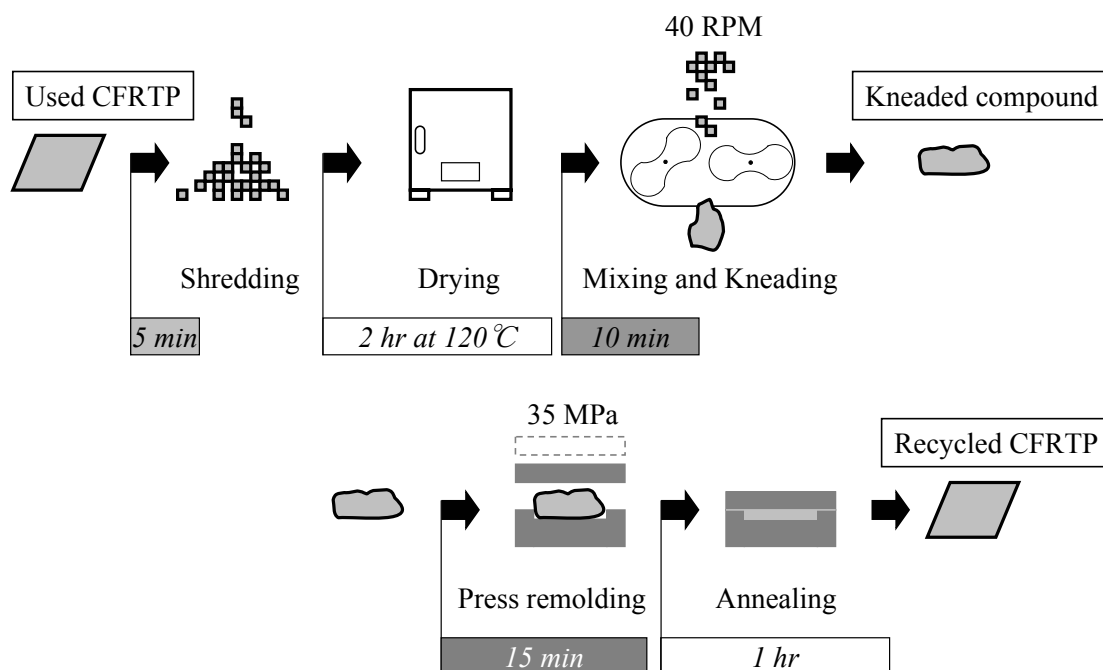
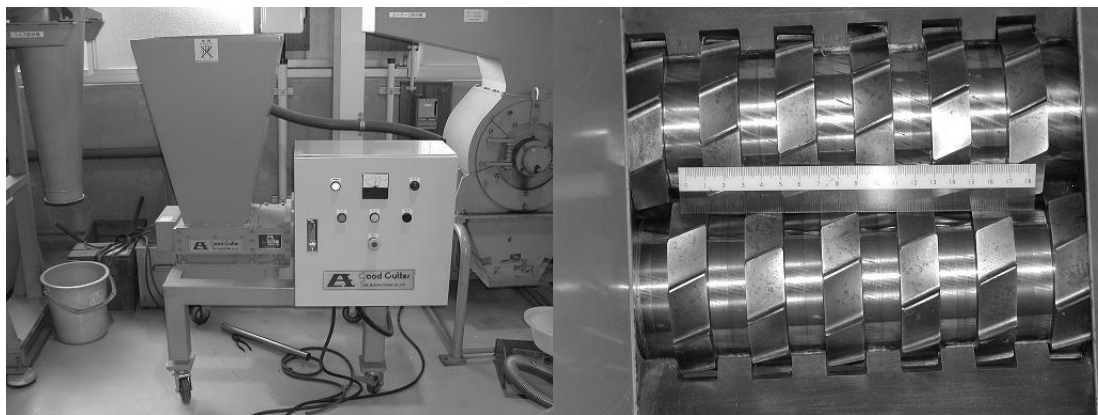


Fig. 6.3 Remolding process of CFRTP and CFRP in just 3.5 hours.



(a) Device overview

(b) Shredding rollers

Fig. 6.4 Photograph of shredding machine, "GOOD CUTTER".



Fig. 6.5 Photograph of mixing machine, "LABO PLAST MILL model 10C100".



Fig. 6.6 Shredded Carbon Fiber Reinforced Thermoplastic.

6-6 リサイクルに適したマトリックスの検討

熱可塑性CFRTPには、そのマトリックスTPの種類によって様々なものが考えられる。ここでは、熱可塑性CFRPであるCF/PPが、他の考えられる熱可塑性CFRP、CF/ABS、CF/PC、CF/PETに比べて、リサイクル性に優れることを示す。

リサイクル材の評価にさきがけて、熔融再成形しやすい熱可塑性CFRPを見極めるため、マトリックスを種々変えて、その再成形性を3点曲げ試験を通じて評価した。

6-6-1 試料

炭素繊維には、東レ製のT700SC-24Kを用いた。PPには、出光興産製のIDEMITSU PPを用いた。PCには、出光興産製のタフロンを用いた。ABSには、東レ製のトヨラックを用いた。PETには、TEIJIN製の帝人ペットを用いた。各基本物性をTable 6.1に示す。

PPには無水マレイン酸が0.3wt.%添加してある。炭素繊維は、あらかじめ改質および解繊しているものとする。

Table 6.1 Material properties.

Material	manufacturer	grade type	Density g / cm ³	MFR g / 10 min	E_L , E GPa	$\sigma_{L f}$, σ_f MPa
carbon fiber	TORAY	T700SC	1.80		230	4,900
i-PP	IDEMITSU	J3000GP	0.90	30.0	2.2	58
ABS	TORAY	250	1.05	48.0	2.3	70
PC	IDEMITSU	R1900	1.20	22.8	2.3	90
PET	TEIJIN	TR-8580HP	1.34		3.0	127

6-6-2 成 形

成形条件を Table 6.2 に示す。成形は、試験後の試験片を回収し、破碎し、混練にて中間材（ニードコンパウンド）を作製し、再成形するという4つのパスを通じて行われる。破碎は、Fig. 6.4 に示すグッドカッターにて行った。混練は、Fig. 6.5 に示す東洋精機製のラボプラストミル 10C100 にて行った。混練とは、破碎した材料と樹脂とを混ぜ合わせブレンドする工程を指す。

Table 6.2 Molding conditions.

Composite	mixing and kneading			Press molding		remarks
	Temp. °C	rev. RPM	time, min	temp. °C	Pressure MPa	
CF / i-PP	200			200		maleic anhydride 0.3wt. %
CF / ABS	220			220		
CF / PC	300	40	2	300	35	
CF / PET	300			300		

6-6-3 試 験

3点曲げ試験で評価した。3点曲げ試験は、ASTM D790-02 に準拠し、島津製作所製の万能試験機 DSC-10T で行った。試験速度は 5 mm/min であった。試験片サイズは、長さ 100 mm x 巾 15 mm x 厚さ 2 mm である。支持スパンは 80 mm とした。

6-6-4 結 果

Fig. 6.7 から Fig. 6.10 に3点曲げ試験結果を示す.

6-6-5 考 察

CF/i-PP のリサイクル (Fig. 6.7)

第5章で示した一方向強化CFRPPのリサイクル材にあたる、CF/i-PPについて、曲げ特性からそのリサイクル性を検討した。PPのMFRは第5章で示したCFRPPと同様の30であり、その流動性は一般的な射出グレードPPの3倍にあたる。

リサイクルテストは、3回まで行った。Fig. 6.7 に示す白抜きのバーは、左からPP樹脂単体の性能、複合則から予想される連続繊維の擬似等方材の性能である。上図がVf=15%、下図がVf=30%である。やはり、リサイクル材（不連続繊維強化）になると、性能が1/2程度に落ちる。繰返しリサイクルの特長は、Vf=15%程度であれば、曲げ強度も曲げ弾性率も変わらない。しかし、Vf=30%ぐらいになると、弾性率は変化しないが、強度が若干劣るようになる。破壊は引張側から起こる傾向にあるので、つまりは引張側の破断ひずみが小さくなっていることになる。破断ひずみが小さくなる理由は、繊維が短くなりすぎて、応力を伝達できなくなっていることが考えられる。Vf=15%に比べ、Vf=30%は繊維体積含有率が大きい（繊維が多く存在している）ため、特に再混練する際に繊維が余計に短くなる。リサイクルの観点から言えば、本リサイクル法においては、リサイクル材のVfは30%程度が限界なのではないかと考えている

CF/i-PP リサイクル材 (Vf=30%) の曲げ弾性率は12 GPa、曲げ強度は100 MPaである。以下、全ての検討をVf=30%で行う。

CF/ABS のリサイクル (Fig. 6.8)

リサイクルすると、性能が向上した。ABSは、A（アクリロニトリル）：B（ブタジエン）：S（スチレン）の比率で、性能を自由に換えられる材料である。ブタジエンのゴム高分子が入っているので、耐衝撃性や伸延性がいい反面、リサイクル（再成形性）には疑問が残っていたが、それほど問題ではないことがわかった。分子構造がPPに比べ複雑なため分子量が大きく、含浸は難しいと考えていた。しかし、繰返しリサイクルの繰返し混練により、この含浸が進んだものと思われる。成形温度が高い分、リサイクル材の性能はPPよりも良く、曲げ弾性率で15 GPa、曲げ強度で150 MPaであった。ただし、熱履歴によるブタジエン成分の熱劣化が心配されるころではある。急に性能が劣化する可能性は否めない。

CF/PCのリサイクル (Fig. 6.9)

CF/PCは高性能の熱可塑性CFRPであるが、リサイクルすると性能は劣化する。この原因は、きちんと分子量低下のデータをとったわけではないが、常識として、ポリマーの加水分解が起こった影響であろう。マトリックスが弱く柔らかくなるため、複合材料全体の性能（特にCF/PCは硬い）が劣った（CF/PPと同等）と考えられる。リサイクル工程に問題があり、本手法には適さない。加水分解を起こさない雰囲気（窒素等の雰囲気）下で再成形する必要があり、省エネルギープロセスには適さない。

CF/PETのリサイクル (Fig. 6.10)

CF/PETは、不連続繊維強化材とすることで、性能が発現せず、使い物にならない。PETは、結晶性ポリマーであるが、核剤等を入れないと結晶化しないくらいに、結晶化しづらいポリマーであり、今回の方法では結晶化しない。よって、繊維と界面の接着不足や、複雑な分子構造による含浸不足が考えられる。PETを使うよりも、結晶化しやすいPBTを使用するほうが良いと考えている。現在では、CBT樹脂（はじめはPBTモノマーで、成形すると熱可塑性のPBTポリマーになる）が使われはじめており、熱可塑性CFRPのホットな話題となっている。

6-6-6 まとめ

PCやPETは、再成形時に加水分解してしまい、平均分子量が低下し劣化してしまうため、リサイクルには成形法と作業環境の改善が必要であり、容易かつ省エネでリサイクルをおこなう場合はあまり現実的ではない。結果的に、PPとABSが良いという結果が得られたが、ABSは成形温度が高いことやブタジエンゴムが劣化しやすいことなどから考えて、繰り返しリサイクル（最終的に射出成形するまで）には耐えられないように思っている。この辺もしっかり実験データを取るべきである。作業性および成形性から、ここでは、リサイクルの優等生であるポリプロピレンが最適であると判断した。

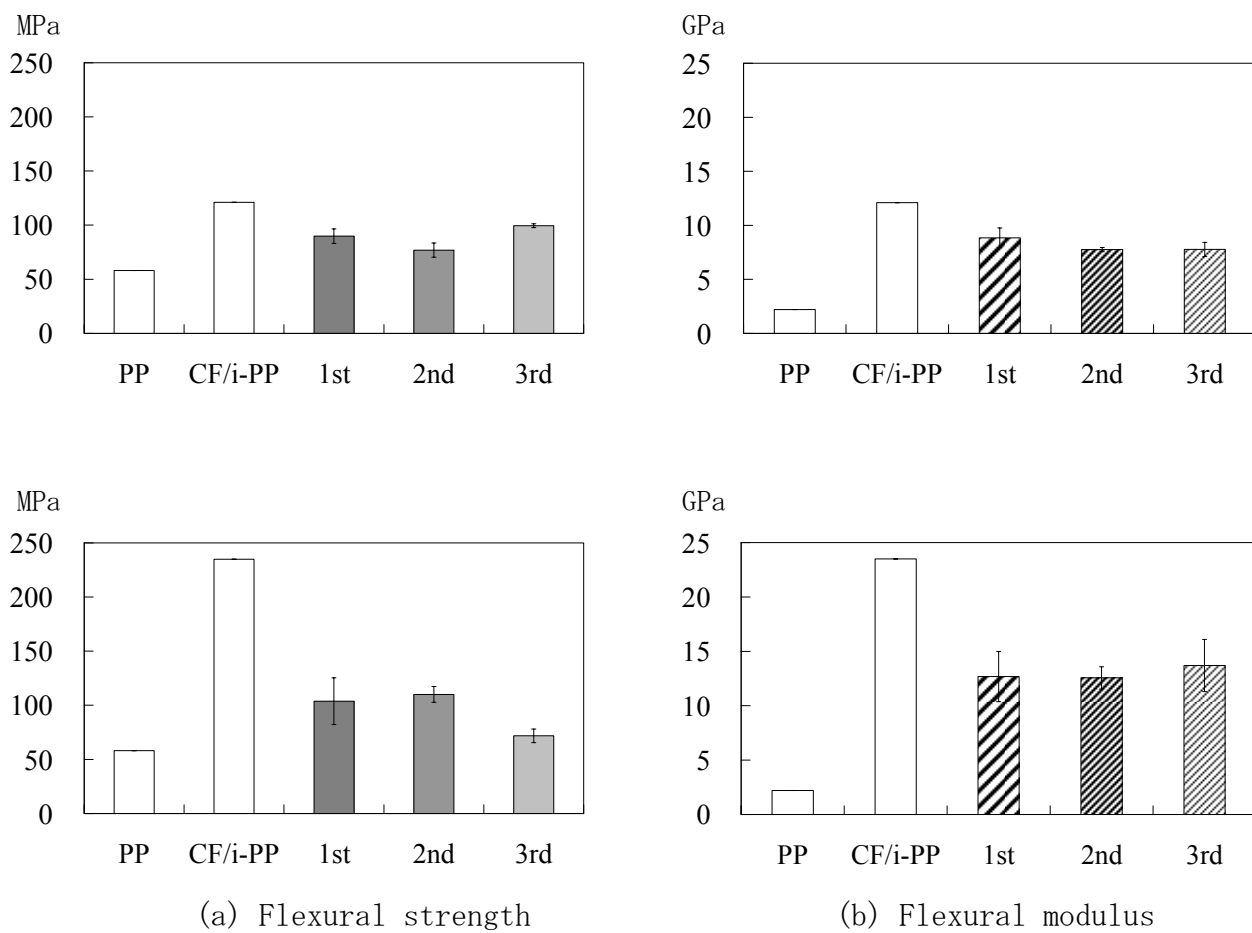


Fig. 6.7 Flexural properties of recycled CF/i-PP at $V_f=15\%$ (upper) and $V_f=30\%$ (lower).

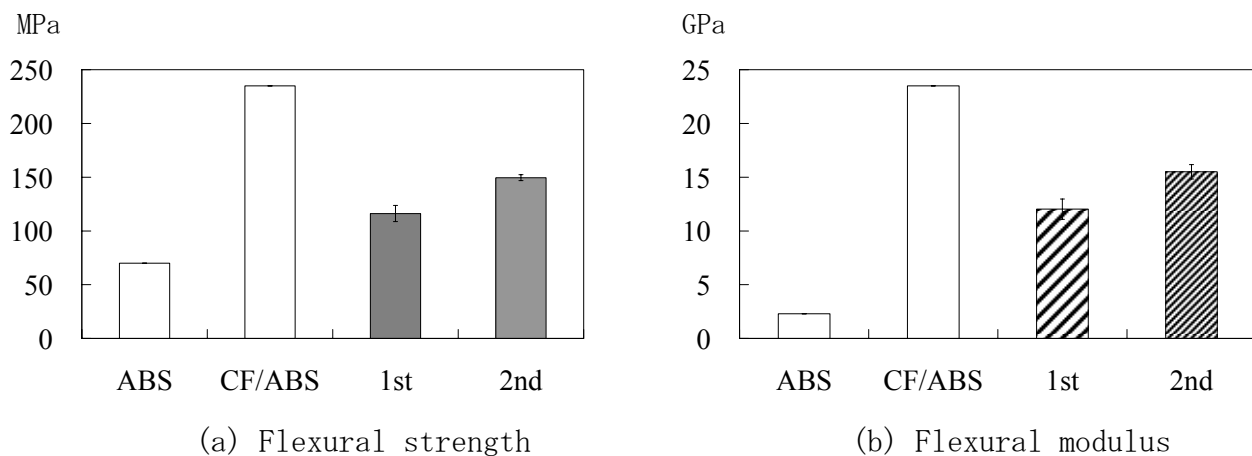


Fig. 6.8 Flexural properties of recycled CF/ABS.

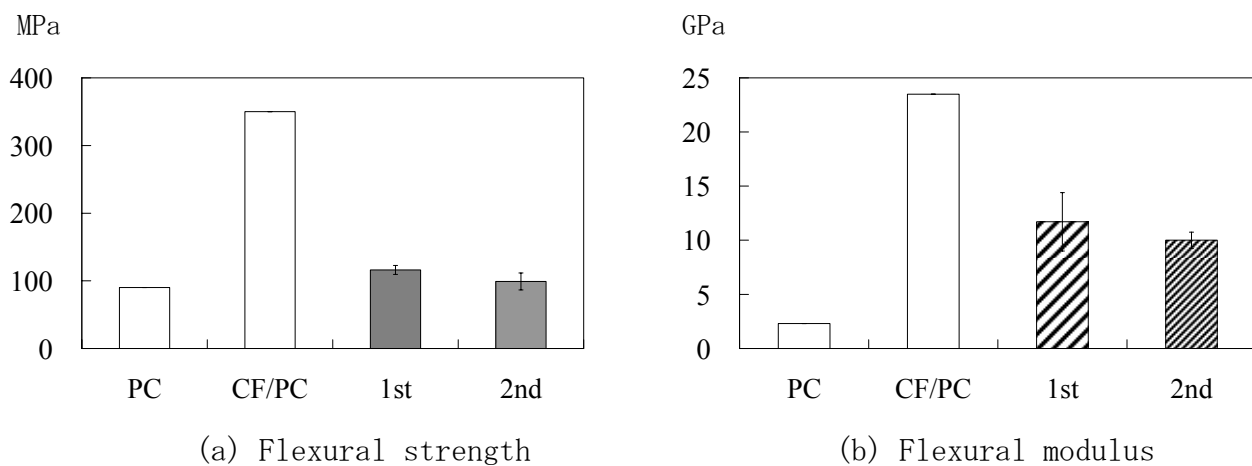


Fig. 6.9 Flexural properties of recycled CF/PC.

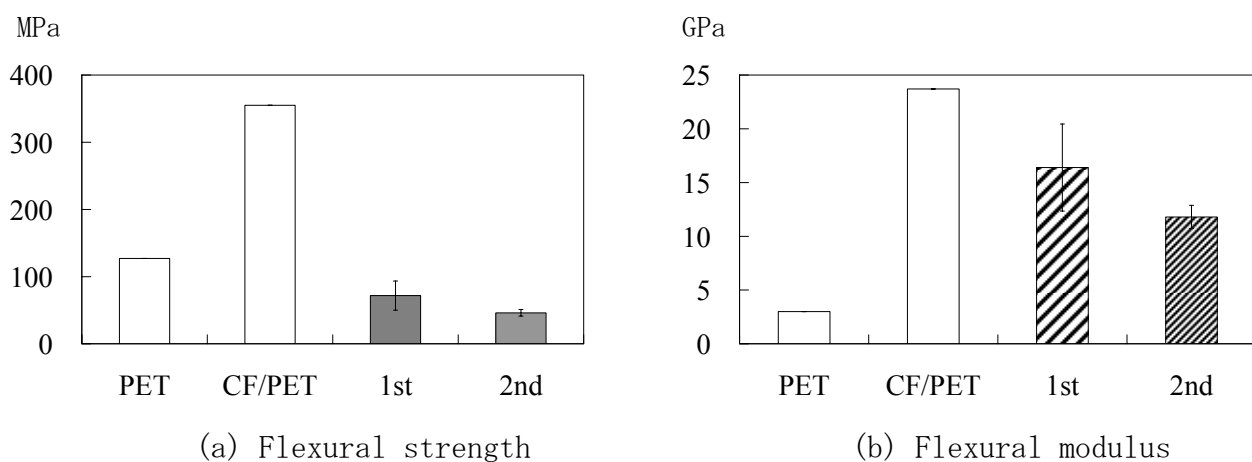


Fig. 6.10 Flexural properties of recycled CF/PET.

6-7 不連続繊維強化 CF/PP の力学特性評価

リサイクル材を想定し、不連続繊維強化（ランダム繊維向配向）のプレス成形品について、その基礎力学特性データの取得を試みた。

6-7-1 試料

炭素繊維を6ミリにチョップしたものとMFRの異なるPPペレット、それに無水マレイン酸変性PPを添加するなどして機械混練（LABO PLASTMILL，東洋精機製）し、これを直ちにプレス成形（PY-50/50A，小平製作所製）して、短繊維強化PPを作製した。素材の詳細をTable 6.3およびTable 6.4に、作製した試験片の種類をTable 6.5に示す。試験片の炭素繊維体積含有率はすべて30%とした。

Table 6.3 Material properties of polypropylene.

Grade of Polypropylene Sheet (0.5mm t) and Pellet	
• IDEMITSU PP <u>E203GV</u>	MFR 2 (<i>homo</i>)
• IDEMITSU PP <u>J3003GV</u>	MFR 30 (<i>homo</i>)
• IDEMITSU PP <u>J6083HP</u> (Pellet)	MFR 60 (<i>block</i>)
Properties of Polypropylene	
/ melt mass flow rate (MFR)	2, 30, 60 g/10min
/ density	0.90 g/cc
/ flexural modulus	0.95–1.25 GPa
/ ultimate flexural stress	26–34 MPa

Table 6.4 Material properties of carbon fiber.

Grade of Carbon Fiber	
• TORAY <u>T700SC</u> 24K for Random	Chopped (6mm)
Properties of Carbon Fiber	
/ density	1.80 g/cc
/ longitudinal elastic modulus	230 GPa
/ ultimate longitudinal strain	2.1 %
/ ultimate longitudinal stress	4 900 MPa

Table 6.5 Contents of specimens.*1

Random CFRPP ($b=15$, $h=2$, $l=100$ mm)			
R1	Non-modification	E203GV (2)	N/A
R2	Non-modification	E203GV (2)	A
R3	Chemical washed	E203GV (2)	A
R4	Chemical washed	J6083HP (60)	A
R5	Chemical washed/ Electric Decomposed	J6083HP (60)	A

*1 fiber volume fraction is about 30 %.

*2 maleic anhydride addition, A: add, N/A: not add.

6-7-2 成 形

炭素繊維を6mmに切り、マレイン化させたPPと混練（ラボプラストミル，東洋精機製）させたのち、ただちにプレス成形し、板材を成形した。

6-7-3 試 験

3点曲げ試験

プレス成形品（板材）から、Table 6.3に示す寸法の短冊形試験片を各5本切り出し、3点曲げ試験を行った。3点曲げ試験には、材料万能試験機 AUTOGRAPH (DCS-10T, 島津製作所製) を用い、50kgf のロードセルを使用し、試験速度は5mm/minに設定した。また、圧子接触面にクッション材（テフロン, 0.2mm）をいれた。支持スパンLは、80mmとした。評価はASTM D 790-02(2002)に準拠した。

アイゾット衝撃試験

ISO 180/1Uに準拠し、アイゾット衝撃試験を行った。試験片寸法は幅10mm, 厚さ2mm, 長さ60mm, ノッチ無しとした。試験片本数は6本とした。

引張疲労試験

リサイクル材（R4）の基本的な耐久性を調べるために、引張疲労試験を行い、S-N線図すなわち疲労応力と破断回数の関係を求めた。引張試験片はJIS K 7054に準じ、試験は電気-油圧サーボ疲労試験機（容量10kN, INSTRON）を用い、定振幅荷重制御による正弦波5Hz、応力比 $R=0.1$ で行った。

試験に際し、把持部を薄さ0.2 mmのCF/エポキシ平織材（1K）のタブで補強した。接着剤には、東京測器研究所製のCYANOACRYLATE ADHESIVEを用いた。この補強タブは、ピーリングには弱いけれども、シアリングには強い特性をもつ。なお、疲労試験は、CFRP廃棄物（破砕品）をPPで固めたCFRTSリサイクル材についても行った。

6-7-4 結果

Fig. 6.11に、不連続繊維強化CF/PP材の3点曲げ試験結果を、Fig. 6.12に、同アゾット試験結果をそれぞれ示す。また、Fig. 6.13に引張疲労試験の結果を示す。

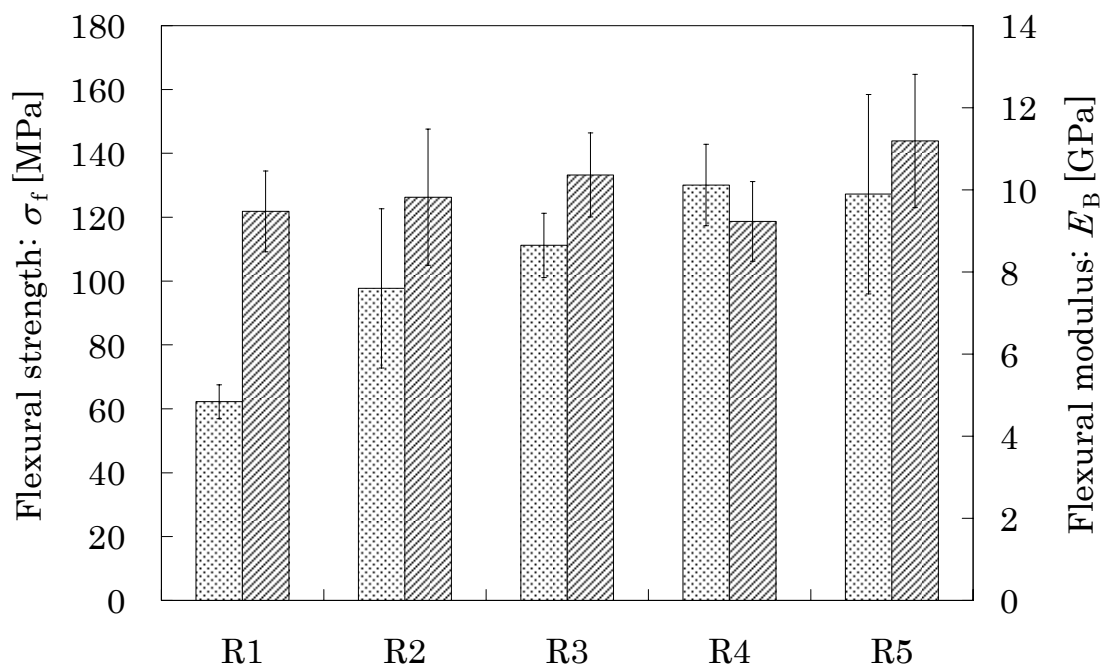


Fig. 6.11 Flexural properties of discontinuous CF/PP composites.

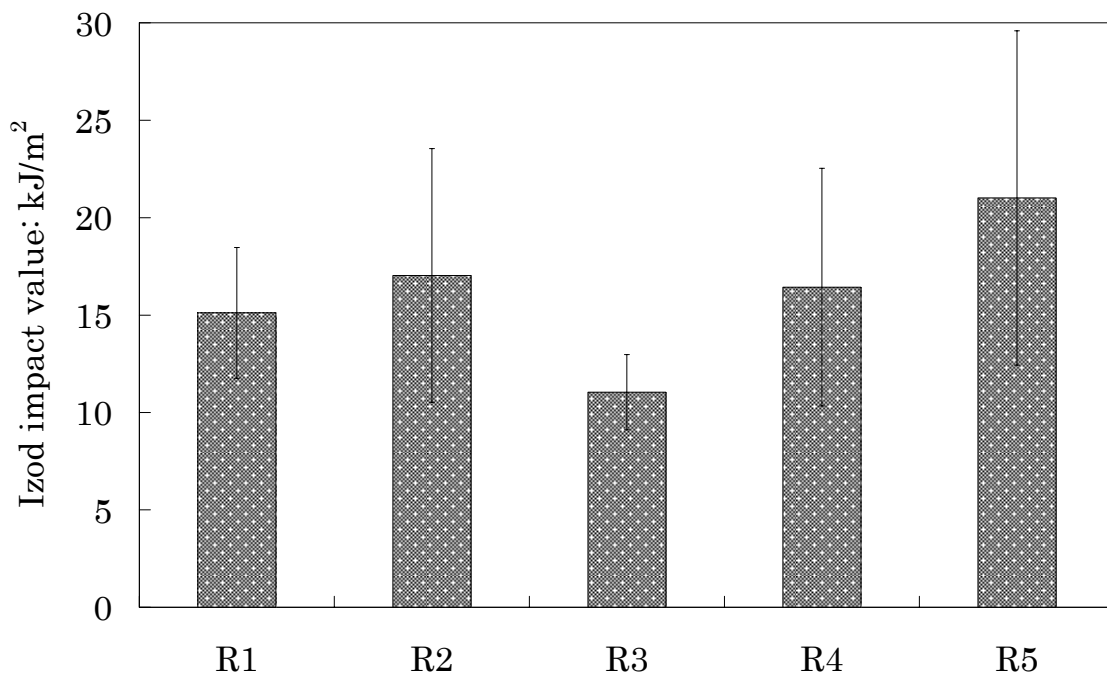


Fig. 6.12 Izod behavior of discontinuous CF/PP composites.

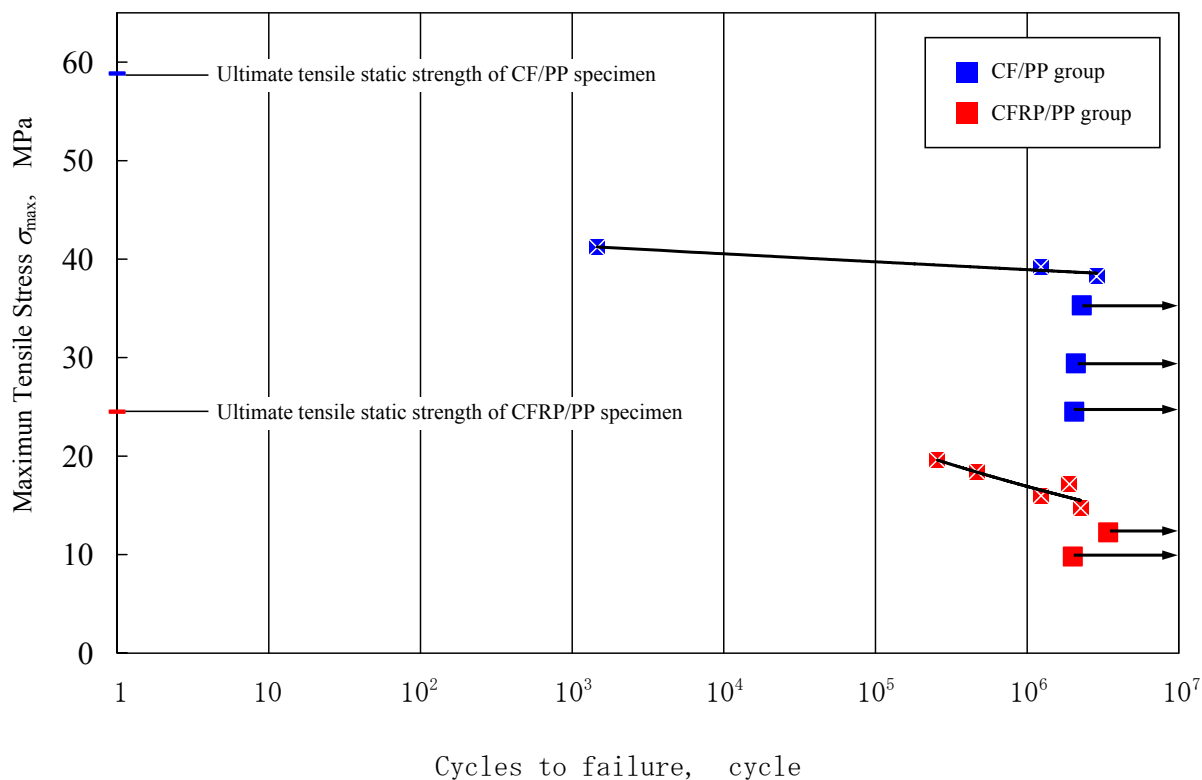


Fig. 6.13 Tensile fatigue behaviors of discontinuous CF/PP(R4) and CFRP/PP.

6-7-5 考 察

試験片 R1 から R5 の計 5 種類の 3 点曲げ試験を行った。検討は、PP の界面接着性、高温下流動性、立体規則性および CF の表面改質（薬品洗浄、電気分解）について行った。混練温度、成形温度共に 200℃とした。混練は繊維長維持ため、低回転下（40rpm）で行った。Fig. 6.7 中の R1 から R3 は、MFR が低く高結晶性で高剛性のホモ系 PP をマトリックスのベースとしている。R4, R5 は、MFR が高く高結晶性で、剛性と耐衝撃性のバランスが良い、低分子化されたブロック系 PP をベースとしている。連続繊維強化の場合同様、無水マレイン酸添加による影響は、強度の向上ばかりでなく、特性のばらつきをもたらす（R2）。PP と無水マレイン酸変性 PP は相溶性があり相分離はしないため、介在する CF 束界面に一様なせん断強度をもたらす。また、酸無水基を PP にグラフトすることで、平均分子量の大きい PP の高温下流動性は向上する。これらの相乗効果で、CF 束はマトリックス内で容易に位置を変え、CF 束の繊維長分布、配向性が顕著になるためにばらつきと理解できる。薬品洗浄をした CF を用いれば、解繊が進み単繊維に近い状態でランダムに分散するためばらつきを抑えると同時に、繊維が不連続なので繊維間拘束が少なく含浸を促進し、強度は低下しない（R3）。さらに、CF 表面の官能基のうち接着性に寄与する水酸基の数を増やすことで、界面せん断強度を上げる効果を期待し、0.1mol/リットル濃度の水酸化ナトリウム水溶液中で電気分解した CF の強化効率を調べた（R5）。この R5 は R1 に比べ、強度で約 2 倍、弾性率で約 1.2 倍、衝撃吸収性で約 1.5 倍の向上が認められた。炭素繊維表面の官能基を増やすことは、接着性を改善し、力学特性向上に寄与することが明らかになった。

また、低サイクル疲労のデータが不足しているので、はっきりしたことは言えないが、少なくとも CF/PP は疲労特性が優れる。試験の観察から、CFRP/PP は疲労き裂が生じると、それが CFRP 破砕品と PP の境界面に沿って進展していくのに対し、CF/PP のほうは、き裂発生から破断までの時間が長く（クラックがアレストする現象も見受けられた）、マトリックス TP の高靱性の特徴が出ていたように思われる。

6-8 一方向 CF/PP シート補強ハイブリッド CFRP の力学特性評価

現在、次世代の超軽量素材として熱可塑性 CFRP が注目されている。省エネルギー性、成形/作業性、コストパフォーマンス、環境適合性を考えると、マトリックスにアイソタクチックポリプロピレン（以下、i-PP）を用いた不連続繊維強化の熱可塑性 CFRP（以

下、CFRPP) が有用である。しかし、CFRPP を BMC や SMC により迅速成形すると、弾性率は強度に比べ複合則通り得られるが、プレス成形時に混入する微小空孔、繊維の折損や湾曲等の影響により、破断ひずみが極めて小さく、強度が低い。また、本材料は 3R (リユース/リデュース/リサイクル) に都合がよいが、特にリサイクルをする場合、同様な傾向がみられる。このような理由から、本材料の荷重条件の厳しい箇所への応用は現状では考えられず、これが実用化への足かせとなっている。

そこで本研究では、このような CFRPP をコアマテリアルとするサンドイッチ構造をもつ CFRPPHybrid の補強有効性を検討する。スキンには、同じ CFRPP の 0° 材を用いた。スキンとコアは、接着剤を一切使用せず、熱圧着のみで接着した。この接着法は、熱可塑性 CFRP の特長であり、スタンパブルプレス一体成形や修理性の向上のみならず、3R し易さの優位性を損なわせないためにも有利である。

6-8-1 試料

本研究で使用した炭素繊維と i-PP の基本物性を Table 6.5 に示す。Mw や Mw/Mn は化学的なプロパティで、この i-PP は比較的分子量である。コアには、①繊維長 6 ミリに切断した炭素繊維と i-PP とを機械混練した CFRPP と、②粉々に破砕された熱硬化性 CFRP 廃棄物と i-PP とを機械混練した、リサイクル CFRPP (R-CFRPP) の 2 種類を準備した。混練には、2 軸機械混練装置 (LABO PLASTMILL 10C100, 東洋精機製) を用いた。スキンには、炭素繊維と i-PP とをプレス成形することにより得られた、厚さ 0.35 ミリの連続繊維強化 CFRPP の 0° 材シート (以下、CF/PP シート) を施した (以下、この材料のことをハイブリッドと称する)。i-PP は、炭素繊維との界面接着改善のため、無水マレイン酸により変性 (0.3 wt.%マレイン化) させた。炭素繊維は、含浸性を改善し、また、繊維界面の接着性を向上させる目的で、化学洗浄 (サイジング剤の除去) し、あらかじめ改質/解繊させた。

Table 6.6 Material properties.

Materials	Grade	Corp.	ρ g/cm ³	MFR/230°C g/10min	M_w x 10 ⁴	M_w/M_n	E_L GPa	ϵ_L %	σ_L MPa
Carbon Fiber	T700SC	TORAY	1.8				230	2.1	4 900
i-PP (core)	J3000GP	IDEMITSU	0.9	30.0	19.7	4.69	2.1	10	42
i-PP (skin)	J3003GV								

M_w : weight-average molecular weight, M_n : number-average molecular weight, (common i-PP data)

$M_w \doteq 50.0 \times 10^4$, $M_w/M_n \doteq 4.10$.

6-8-2 成 形

前節の①, ②いずれの材料も, プレス成形機 (Mini Test Press 10, 東洋精機製) で成形した。成形温度は, 200℃である。成形後, すみやかに 120℃まで急冷/保持し, 繊維近傍の i-PP の結晶化度を上げる目的で, 120℃, 30MPa, 1h のアニーリング処理を行った。ハイブリッドCFRPP の炭素繊維含有率は, およそ 30%である。

6-8-3 試 験

引張試験

試験片寸法, 長さ 130 x 幅 18 x 厚 2 (hybrid は 2.5) mm, 試験速度 1 mm/min で引張試験を実施した。

3点曲げ試験

引張試験から, 本手法による補強効果が認められたため, 次に3点曲げ試験による静的評価を行った。試験片寸法, 長さ 100 x 幅 25 x 厚 2 (hybrid は 2.5) mm の短冊試験片をそれぞれ 4 本準備した。

3点曲げ試験には, 材料万能試験機 AUTOGRAPH (DCS-10T, 島津製作所製) を用い, 試験速度は 5mm/min に設定した。支持スパンは, 80 mm とした。評価は ASTM D 790-02 (2002) に準拠した。

曲げ疲労試験

本材料の基本的な耐久性を調べるために, 曲げ疲労試験を行い, $S-N$ 線図すなわち疲労負荷応力と破断回数との関係を求めた。曲げ試験片は JIS K 7055 (3点曲げ, A法) に準じ, 試験は電気-油圧サーボ疲労試験機 (容量 49kN, サーボパルサー model EHF-UB5-20L, 島津製作所製) を用い, 定振幅荷重制御による正弦波 5Hz, 応力比 $R=0.1$ で行った。

6-8-4 結果

6-8-4-1 引張試験

Table 6.6 に、試験結果を示す。①、②いずれの材料もハイブリッドCFRPP とすることで弾性率、破断ひずみがともに改善され、強度が向上した。極めて薄いCF/PP シートのスキンでも補強効果は十分にあることがわかった。

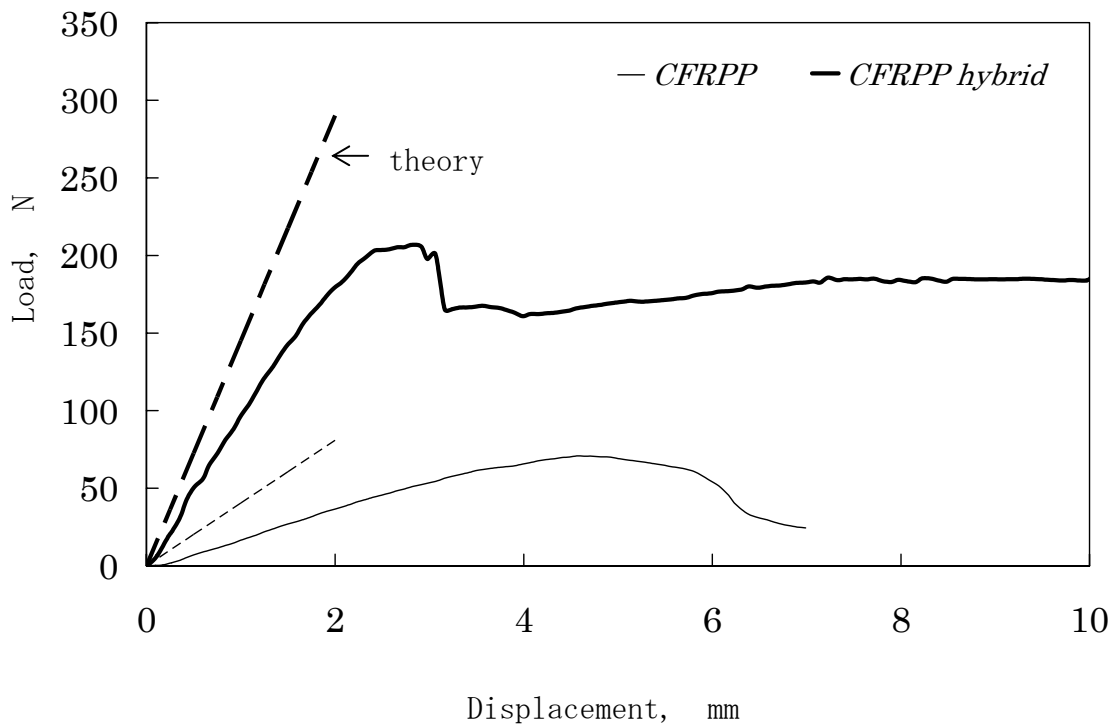
Table 6.7 Tensile properties of hybrid CF/PP and hybrid CFRP/PP.

	E_L , GPa	ε_L , %	σ_L , MPa
CFRPP	13.6	0.37	58
CFRPPHybrid	22.1	1.42	244
R-CFRPP	17.8	0.24	25
R-CFRPPHybrid	21.2	1.42	243

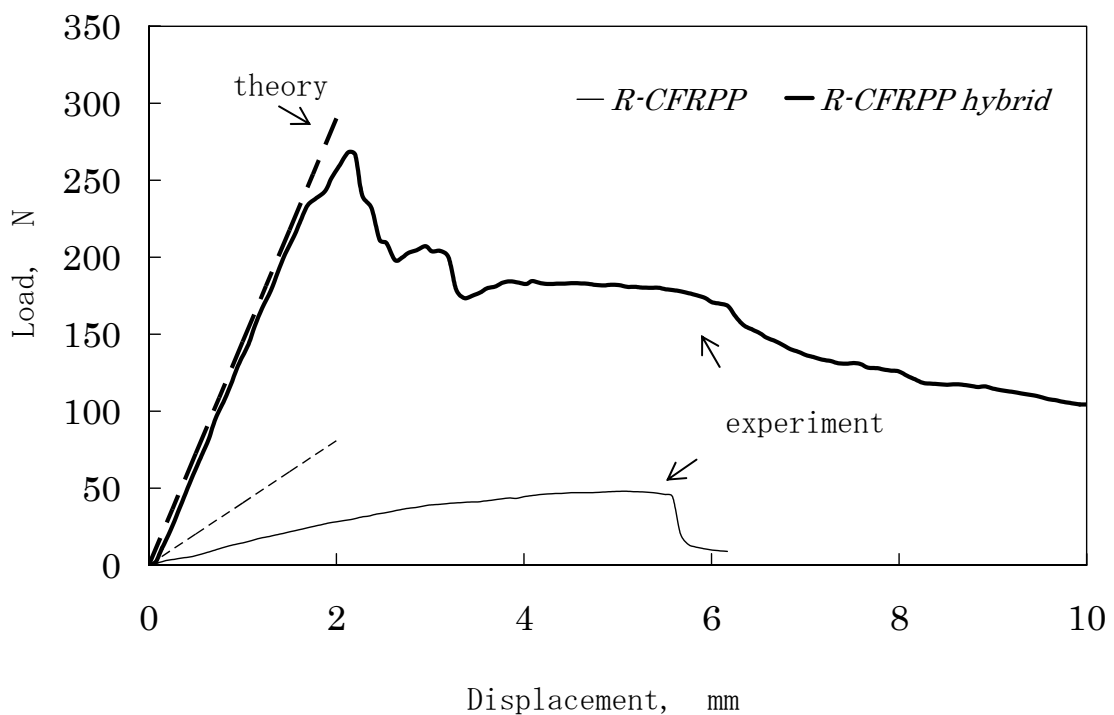
6-8-4-2 3点曲げ試験

Fig. 6.14 に、各材料の荷重-たわみ線図を示す。比較のため、コアのみのデータも載せてある。図中の理論値は、単純曲げの複合はり理論から算出した。

Fig. 6.15 は、曲げ弾性率、表面の破壊ひずみ、曲げ強度を示している。破壊形態は、コアのみの場合は引張側破壊であり、ハイブリッドの場合は圧縮側破壊であった。これは、コアの破壊ひずみが、CF/PP シートの圧縮限界ひずみよりも極めて大きいためである。破壊は、スキンの圧縮側から始まり、続いてコア-スキン界面ではく離が生じ、コアの損傷へと段階的に進行することが目視観察により確認された。



(a) CF/PP series



(b) CFRP/PP series

Fig. 6.14 Load-displacement curves of CFRPP(CF/PP) and R-CFRPP(R-CFRP/PP).

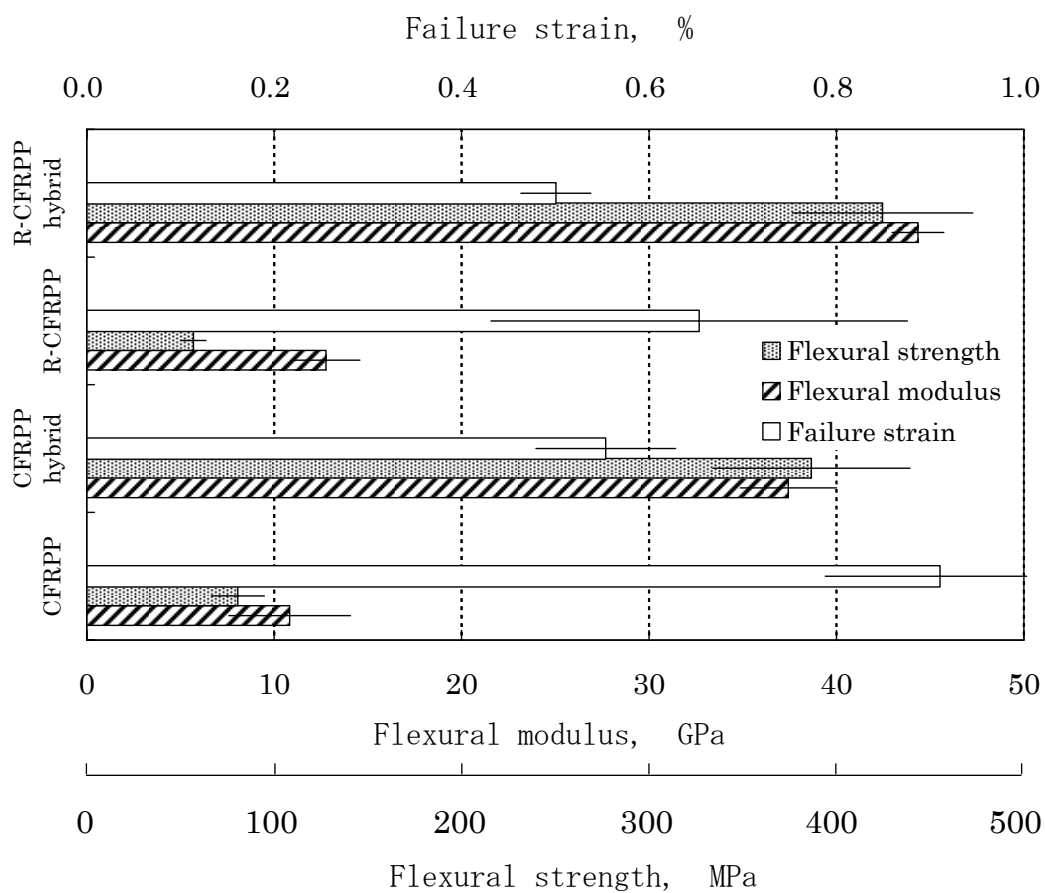


Fig. 6.15 Flexural behavior of CFRPP hybrid.

6-8-4-3 曲げ疲労試験

Fig. 6.16 に、ハイブリッド CF/PP (HY-CF/PP) およびハイブリッド CFRP/PP (HY-CFRP/PP) の曲げ疲労特性を示す。

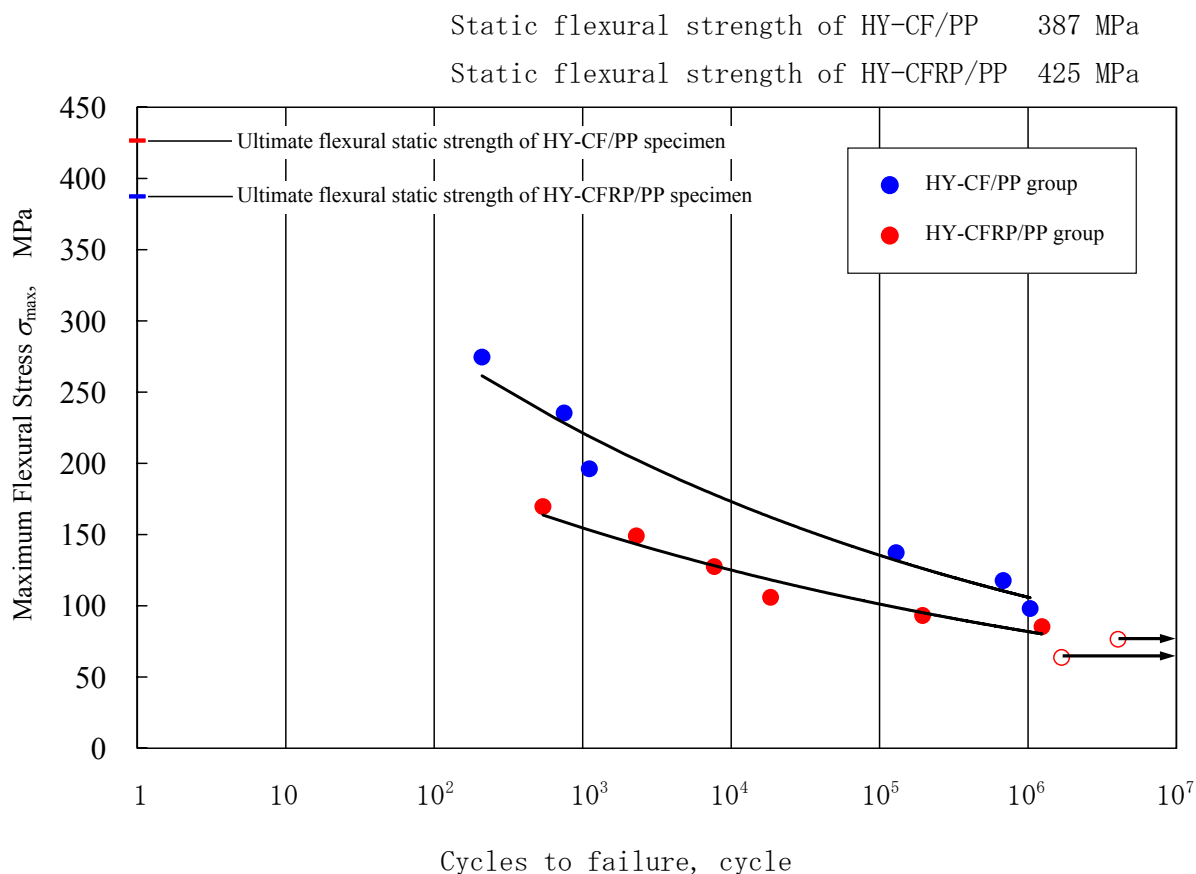


Fig. 6.16 Flexural fatigue behavior of CF/PP and CFRP/PP composite.

6-8-5 考 察

3点曲げ試験

(弾性域)

Fig. 6.16 のグラフの初期の傾きは、本材料の静的な剛性を示している。本補強法で、剛性は、コアのみの場合に比べ大幅に向上する。剛性は、コアとスキンの弾性率の差が大きいため、スキンの品質や弾性率で規定されることが考えられる。しかしながら、今回のような非常に薄いスキンの場合、スキンの品質保持が難しく、成形作業時には慎重を要する。CFRPPhybrid のピーク荷重点がはっきりしないことや、早い段階で剛性が低下している一因は、成形不良にある。従って、弾性変形でストックできるひずみエネルギー量の増加は、本補強法による剛性の向上によるもので、コアの種類によらない。

(塑性域)

ハイブリッド材の強度はスキンの圧縮強度で決まる。圧縮破壊後はコアと引張側スキンで荷重を負担する。ハイブリッドCF/PPの場合、高MFRのオレフィン系ポリマーの特長でもある高い靱性により、き裂はコア内を進展しにくく、塑性変形中もはく離とき裂進展で破壊エネルギーを吸収しながら、荷重を持ち続ける。ハイブリッドCFRP/PPの場合、熱硬化性CFRPの影響で、コアの破壊は極めて脆性的となり、圧縮破壊後すぐに引張側のスキンのみでの荷重負担となる。そのため、ハイブリッドCFRP/PPに比べ塑性変形によるエネルギー吸収量が少ない。

曲げ疲労試験

ソリッドコアが熱硬化性CFRPのリサイクル材(CFRP/PP)の場合、曲げ疲労特性が良くないことがわかった。コアとスキンを熱融着で接着しているので、薄いPPの単独層がコアとスキンとの間に存在しており、はがれやすい一因であるから、この影響であると思われる。特に、コアがCFRP/PPの場合、エポキシの残留物があるために、この影響は顕著である。圧縮側のスキンはすぐにはく離してしまうが、引張側はなかなかはく離しない。低荷重下で、疲労試験が長い時間に至ると、引張側もはく離する。これは、スキンとコアの性能差(スキンはあまりひずまず、コアはよくひずむ)が原因である。スキンは極めて薄いので、剛性の差というよりは、ひずみ量の差であろう。

6-9 結 言

リサイクラブル熱可塑性CFRPの検討

著者は、リサイクラブル熱可塑性CFRPの検討を、PP、ABS、PC、PETの4種のマトリックスに対して行った。リサイクル後、劣化がみられなかったのは、PPとABSで素材コストや成形性(成形温度)から考えて、PPが良いと考える。さらに、ポリマーブレンドではないPPは、3種のポリマーからなるABSに比べて、熱劣化の心配が少ない。よって、CFRPPを破碎し再成形したリサイクル材であるCF/PPは、実現可能であり、提案したリサイクルパスも現実的なものとなってきた。

CF/PPは、超軽量(1.17 g/ccの密度)で成形性が良く(成形温度230℃、離型性良好)、このリサイクル再成形が可能ということは、自動車に導入するうえで非常に重要なアドバンテージとなる。また、CF/PP材については、疲労特性もいい事から、実際の

リサイクル材も疲労特性は優れているものと思われるが、この特性は繊維長に依るかもしれないので、射出成形等で繊維長が臨界繊維長ぎりぎりのものについてもデータを取得する必要がある。

シートプレースメント法による補強

本補強法により CFRPP の剛性，強度，エネルギー吸収特性が改善した。しかし，曲げ疲労特性（耐久性）は，低いことがわかった。これは，シートとコアの間の PP 層がはがれやすいことに起因していると思われる。本補強法は，スキンを極めて薄いシート状としており，SMC や BMC 等の迅速に現実的な 3 次元形状のものの一歩成形に応用できる。

第6章で引用した文献等：

- 1) Donella Meadows, Jorgen Randers & Dennis Meadows: LIMITS TO GROWTH, The 30-Year Update, Chelsea Green Publishing, (2004).
- 2) 中塚史紀, 鈴木徹也, 高橋淳: CFRPによる車両重量軽量化の環境負荷低減効果, 第29回複合材料シンポジウム講演論文集, (2004), pp.201-202.
- 3) Statistics Bureau, Ministry of International Affairs and Communications, Japan, Japan Statistical Yearbook series.
- 4) IPCC, Climate Change 2001, Synthesis Report Summary for Policymakers, 2001.
- 5) IEA, World Energy Outlook 2004, 2004.
- 6) Kanawade, D. and Mallick, P. K., "Thermoplastic Matrix Composites for Structural Automotive Applications", Technical Paper of the 14th International Conference on Composite Materials, ICCM-14, 2003, San Diego, California, USA, July 14-18, 2003, EM03-293.
- 7) Savage, G., Bomphray, I. and Oxley, M.: Engineering Failure Analysis 11, 2004, pp. 677-694.
- 8) Zushi, H., Sawada, S., Suzuki, T., Origuchi, T. and Takahashi, J.: Proceedings of the Third International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing, National Olympic Memorial Youth Center, Yoyogi, Shibuya-ku, Tokyo, Japan, December 8-11, 2003, pp. 473-476.
- 9) Zushi, H., Tamura, M., Ohsawa, I., Uzawa, K., Kanai, M., Takahashi, J. and Yasuda, H.: Proceedings of the 29th Symposium on Composite Materials, Naha city, Okinawa, Japan, October 28-29, 2004, pp. 211-212, (in Japanese).

第7章 効果試算

7-1 緒言

本論文の前半で、研究室でこれまでシミュレーションされてきた、中国に特化したモーターゼーションと、エネルギー消費量の将来予測、および CFRP 製乗用車による軽量化の効果を示した。論文後半の材料研究開発の部分では、熱可塑性 CFRP である CFRPP（炭素繊維強化ポリプロピレン）の力学的特性を通じて、CFRPP が要求項目の軽量、ハイサイクル成形、低コスト、4R を達成しうる材料であることを示した。

そこで、本章では、実際に CFRPP が徐々に段階的に自動車に導入される現実的なケーススタディを行う。評価は、世界レベルでの省エネ効果（エネルギー消費量の削減効果）で行う。これは、自動車増加に起因するエネルギー消費量の増加（つまり、全分野のエネルギー消費量の積算ではなく、運輸部門のみのエネルギー消費量増加分）についての議論である。まず、IEA が発表している予測（開発途上国の成長が反映されていない）をもとに効果を試算した。次に、第3章で示したロジスティック関数を用いて、開発途上国の成長も加味した予測をし、それをもとに効果を試算した。最後に、軽量化に加え、パワープラントの進化（ディーゼルハイブリッド・燃料電池等）の影響も考慮に入れた効果の試算結果を述べる。

7-2 IEA の公表データをもとにした効果予測

IEA が公表している 10 年ごとの部門別エネルギー需要予測^{1), 2)}から、Reference ケースを設定した。シミュレーションの条件を Table 7.1 に示す。Fig. 7.1, Fig. 7.2 は先進国と開発途上国別の予測であり、Fig. 7.3 はこれらを合わせた、世界予測である。Fig. 7.1, Fig. 7.2 から、先進国や開発途上国双方でまだ乗用車によるエネルギー消費は増えること、軽量化技術により、2割～4割程度の省エネが可能であること、技術は早急に導入すべきことなどが読みとれる。また、Fig. 7.3 から 2040 年には乗用車で使用されるエネルギー量が、年間エネルギー消費量の約半分には達するなど、この先のエネルギーをどう手当てしていくか（どう上手につかっていくか）が今後の課題となることを示唆している。

Table 7.1 Simulation conditions.

		Introduction begging year of ULA	Ratio of ULA occupied to newly possessed automobiles	Lightening rate of ULA	Maximum lightening rate of ULA
Positive	OECD	2010	10% first +10% / year	10% first +10% / year	40%
	Non- OECD	2015	5% first +5% / year	10% first +10% / year	40%
Negative	OECD	2015	5% first +5% / year	5% first +5% / year	20%
	Non- OECD	2025	5% first +5% / year	5% first +5% / year	20%

NOTES: ULA means Ultra Lightweight Automobiles

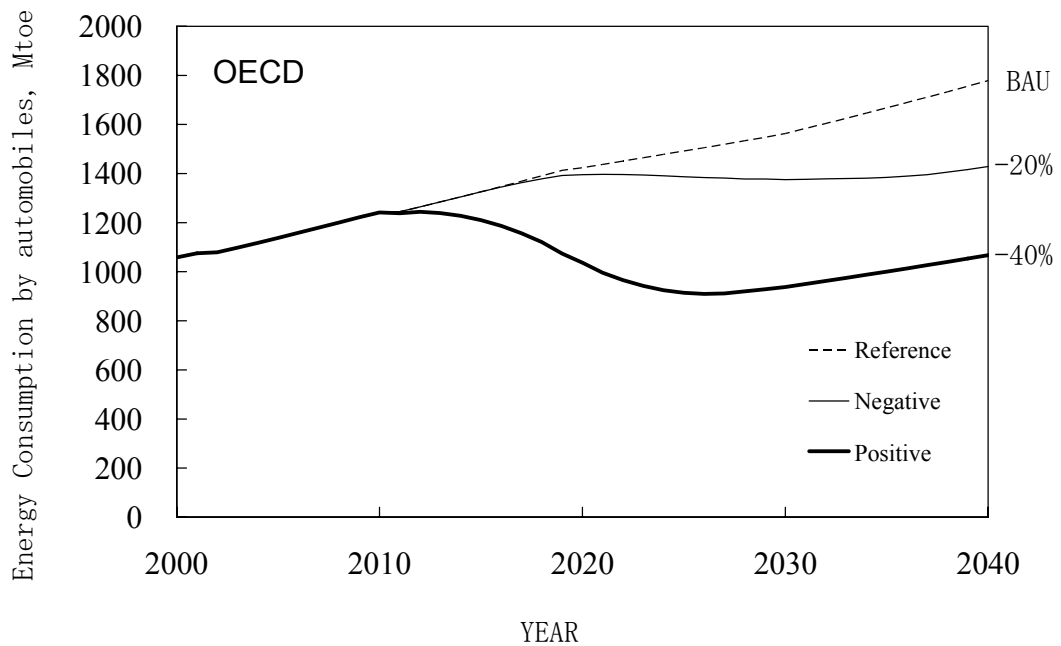


Fig. 7.1 Prediction of the energy consumption growth by automobiles in more developed countries and saving potential of the consumption by introduced ultra lightweight automobiles using CFRP (with ref. IEA statistics).

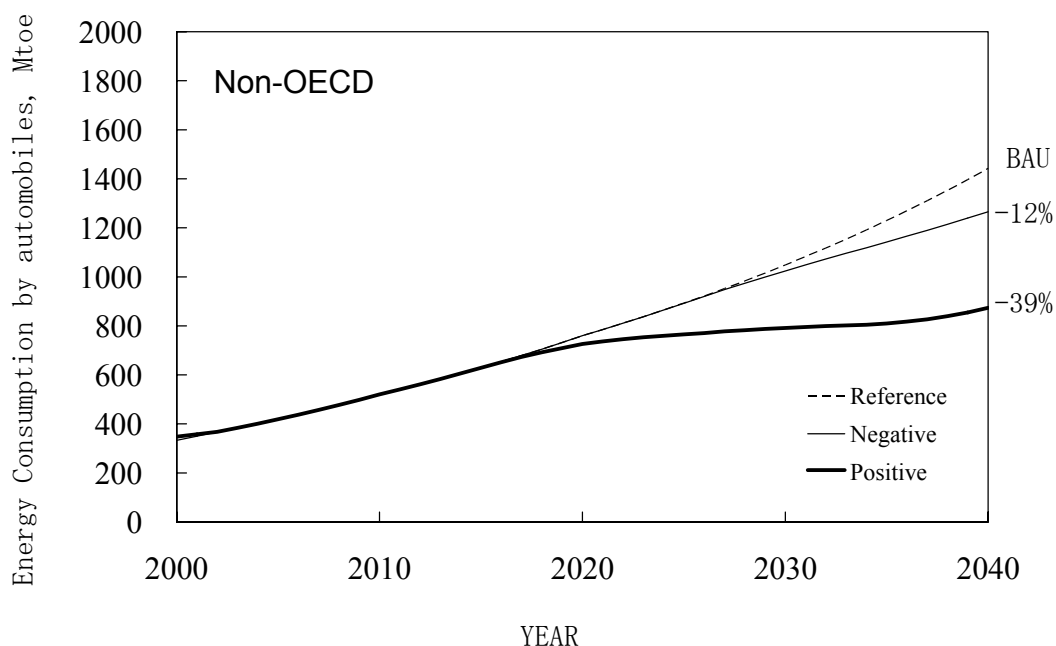


Fig. 7.2 Prediction of the energy consumption growth by automobiles in less developed countries and saving potential of the consumption by introduced ultra lightweight automobiles using CFRP (with ref. IEA statistics).

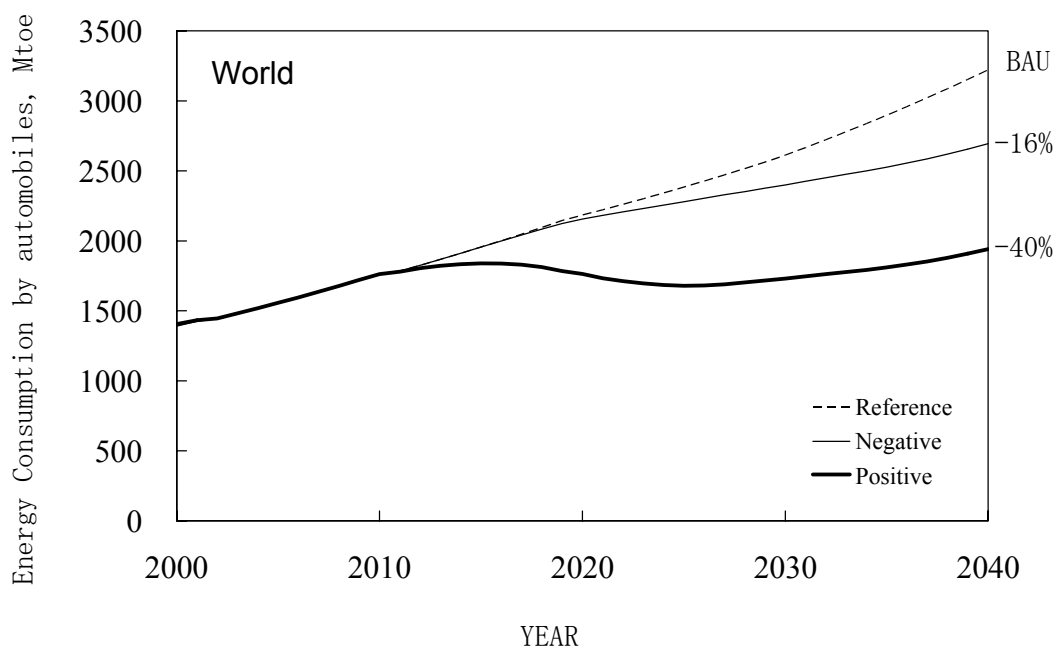


Fig. 7.3 Prediction of the energy consumption growth by automobiles in the World and saving potential of the consumption by introduced ultra lightweight automobiles using CFRP (with ref. IEA statistics).

7-3 ロジスティック関数による予測に基づく予測

次に、第3章で示されたロジスティック関数（による乗用車台数の増加）を用い、途上国の「成長」を加味した予測を行った。予測は、Table 7.1 に示す条件と同様である。7-2の予測と異なるところは、開発途上国の乗用車保有台数の予測を反映していることである。手順は、まず IEA および UN が公表している先進国の1,000人あたり乗用車保有台数をロジスティック関数で近似し、平均的なパラメータ λ , μ , τ_0 （第3章を参照）を推定する。次に、そのパラメータを用い発展途上国の1,000人あたり乗用車保有台数を予測する。それと人口予測のデータと合わせて、実際の乗用車保有台数の予測をする。それに1台あたりのエネルギー消費量（軽量化率に依存）をかけて、全体のエネルギー消費量を算出する。

Fig. 7.4, Fig. 7.5 は、先進国および開発途上国別の乗用車によるエネルギー消費量の変化（増大）を示したものであり、Fig. 7.6 は、それらを合わせて世界予測としたものである。まず、Fig. 7.4, Fig. 7.5 から、先の IEA の予測よりも、開発途上国の成長が著しいこと、先進国は現状維持（成長停止、飽和）に近いこと、などが読み取れる。Fig. 7.6 からは、開発途上国の成長が直接的に影響してくること、現在の世界の年間エネルギー消費量と同等のエネルギーが必要になること（世界がもうひとつできること）を示しており、軽量化のような即効的な技術はこのような爆発的な成長に、効果的であること、などが読み取れる。

Fig. 7.7 は、IEA の予測と、本研究の予測の比較であり、本研究のほうが IEA よりも5.4%増の予測であり、本問題の早期対応が必要であることを強調している。

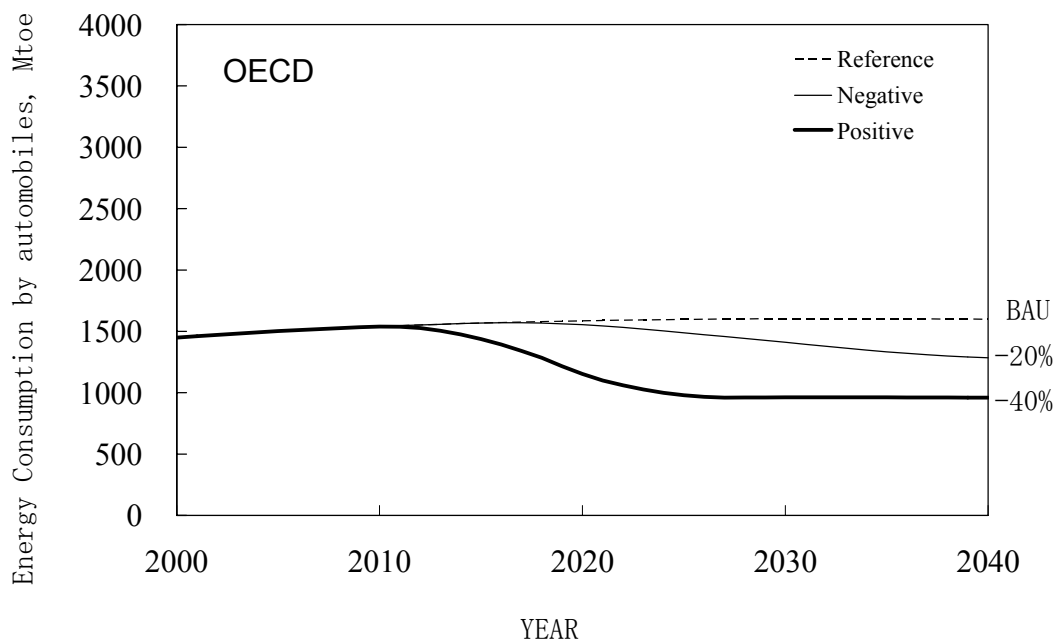


Fig. 7.4 Prediction of the energy consumption growth by automobiles in more developed countries and saving potential of the consumption by introduced ultra lightweight automobiles using CFRP (with logistic function method).

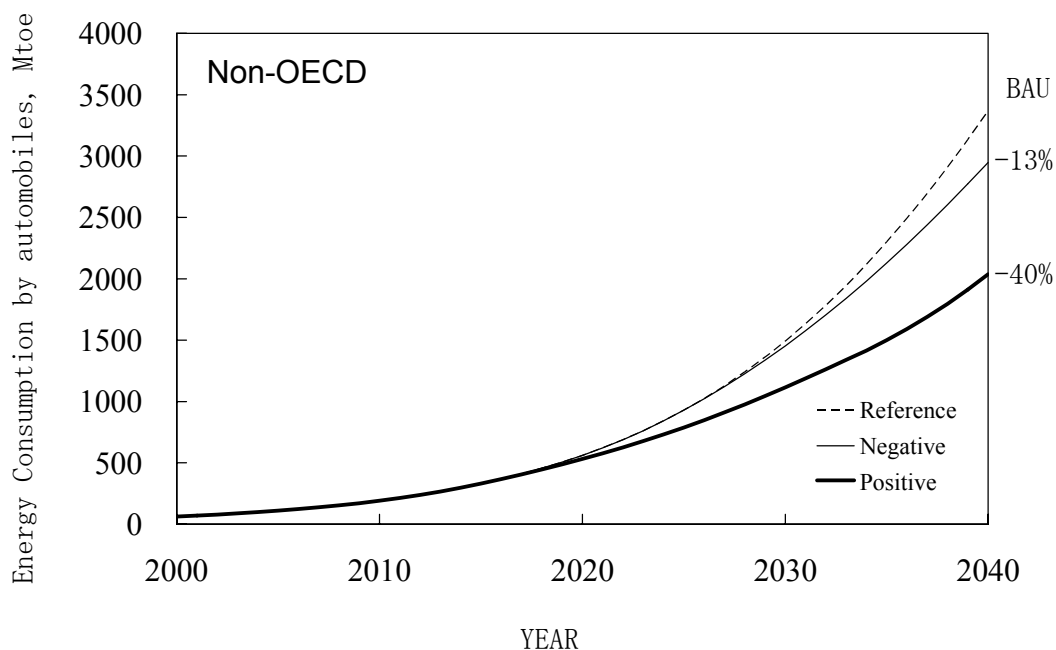


Fig. 7.5 Prediction of the energy consumption growth by automobiles in less developed countries and saving potential of the consumption by introduced ultra lightweight automobiles using CFRP (with logistic function method).

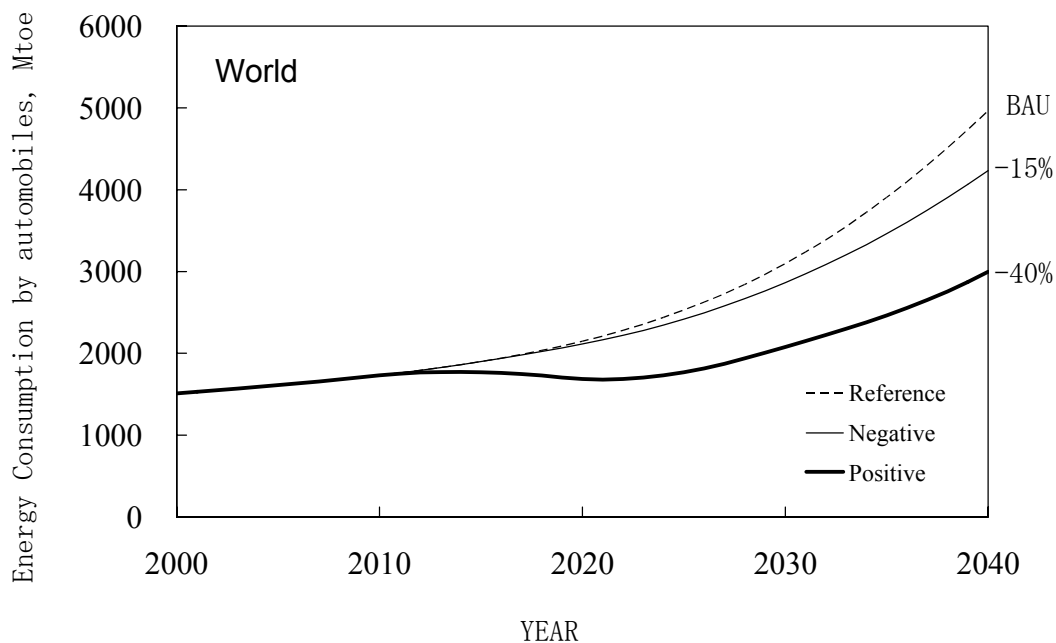


Fig. 7.6 Prediction of the energy consumption growth by automobiles in the World and saving potential of the consumption by introduced ultra lightweight automobiles using CFRP (with logistic function method).

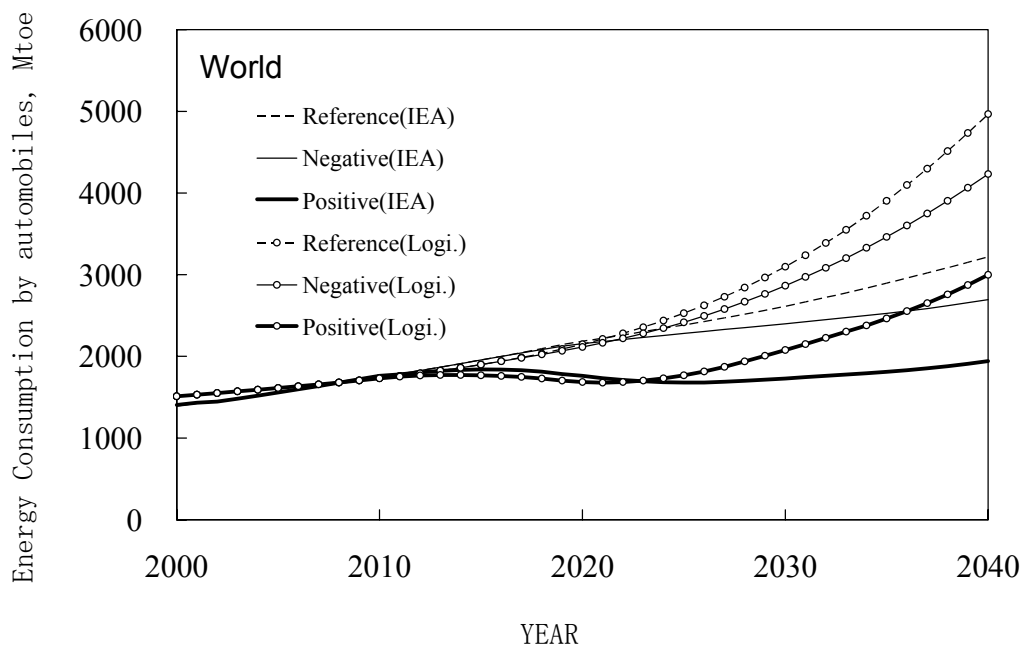


Fig. 7.7 Prediction gap between referred of IEA statistics and logistic function method.

7-4 軽量化とパワープラント技術革新の相乗効果

7-4-1 WTW (Well to Wheel) 分析の取り込み

第2章で示されたように、今後の開発途上国における運輸部門におけるエネルギー消費は、世界のエネルギー需要や地球環境問題をおびやかす。そして、これまでの議論で、BRICs等の成長により今後50年間のエネルギー消費が急速に成長すること、軽量化はそういった運輸部門の省エネに対し有効であり、それはCFRPPという環境配慮型超軽量素材で実現可能なことなどが分かったが、では世界はエネルギーの手当てをどうしていくのか、という問題に帰着する。つまり、この先のエネルギー消費の見積もりを、軽量化だけではない他分野の技術革新との相乗効果というものでより現実的に詳細に分析することは、手当てを考えるうえで重要であり、きわめて意義のある作業である。

そのような予測をするために、ガソリンやディーゼルエンジンといったパワープラントにおける技術革新は、最も現実的で有効な方法のうちの1つである。例えば、燃料電池自動車(FCEV)およびハイブリッドの電気自動車(HEV)は、現在の内燃機関に替わることが期待されている。しかしながら、これらの効率を適切に正確に評価するために、採鉱、生産、輸送および使用のといったプロセスをすべて含むシステムの全体のエネルギー消費およびCO₂排出量を考慮し比較しなければならない。この評価方法は、一般にWTW分析と呼ばれる。

Fig. 7.8とFig. 7.9は、現状の基本的なガソリンエンジン値を1として、国内で提案されている各パワープラント同士の比較であり、各システムの相対的な一次エネルギー消費およびCO₂排出量を示している⁷⁾。これらの図から、提案されているシステムが、エネルギー消費およびCO₂排出量において、双方がよく改善されることを理解できる。すべてのシステムで、現状の2倍あるいは3倍の改善であることが分かる。再生可能資源である水素を使用するFCEVは、特にライフサイクル全体を通じてCO₂を排出しない。電気自動車(EV)は、Tank to Wheelの部分に長所があるが、Well to Tankの部分で効率が悪いために、他とそれほど大きな差異はない。確かに、再生可能エネルギーが使用されるFCEVは自動車のための理想的なパワープラントと言える。しかしながら、それらを普及させ、万人に使用させるためには、低価格化やインフラ整備等で、実用化にはまだ問題が山積みの状態である。したがって、初めはEVやディーゼルハイブリッドが導入されてゆき、のちにFCEVが導入されることは現実的なシナリオとして考えられる。Fig. 7.10は中国におけるWTW分析の結果である⁸⁾。各国固有のエネルギー供給システムがあるために、本分析は導入される地域の特徴に強く依存する。それにもかかわらず、この図から、FCEVが中国のモーターレーゼーションに有効であると認めることができ、他の開発途上国についても同様に有効であると思われる。

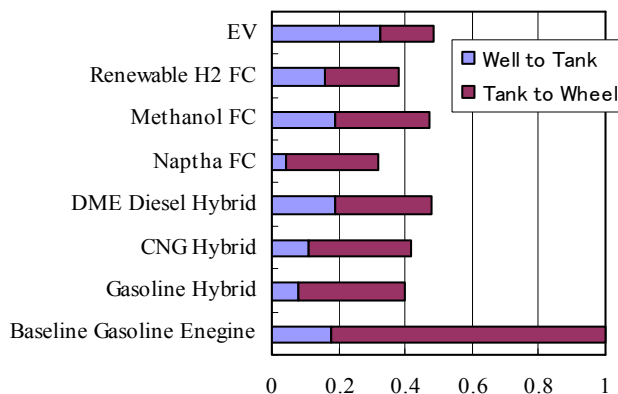


Fig. 7.8 Well to Wheel energy consumption.

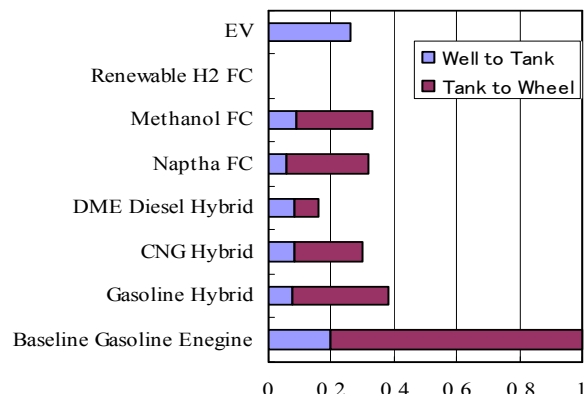


Fig. 7.9 Well to Wheel CO₂ emission.

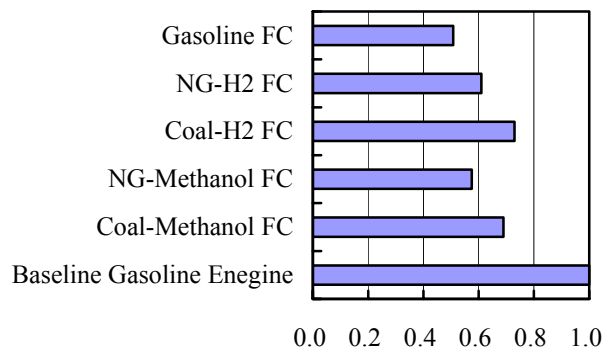


Fig. 7.10 Well to Wheel energy consumption in China.

7-4-2 WTW分析も反映した予測（中国および世界について）

今後の石油使用量の増加要因は主として非 OECD 諸国の自動車保有台数の増加である。本節では、21 世紀最初で過去最大のモータリゼーション国である中国を例に取り、モータリゼーションの時期的予測とそれによる燃料使用量の増加、ならびに超低燃費車の導入時期によりそれがどの程度抑制できるものかの検討結果を紹介する。

Fig. 7.11 は中国の乗用車保有台数の予測結果であり、Fig. 7.12 は中国の乗用車のみによるエネルギー使用量の変化である⁹⁾。Fig. 7.12 より、2020 年以降のエネルギー使用量の伸びが著しく、無対策の場合には 2032 年には中国国内の乗用車のみで現在の日本の総エネルギー消費量と同じ燃料を消費することとあわせて、早期の対策が積分値としてのエネルギー消費量の削減に極めて効果的であることがわかる。すなわち 2020

年ごろまでに安価な超低燃費車が中国市場に導入されなければ莫大な量のエネルギーが消費されるが、2020年までに再生可能エネルギー起源の水素による燃料電池車の実現は難しいことから、温暖化対策の観点からは特に軽量化効果の高いCFRPによる超軽量車の早期導入が必要不可欠であると言える。

Fig. 7.13 は、IEA のデータをもとに、軽量化技術と先の WTW 分析結果の相乗効果によって削減される、自動車によって消費されるエネルギー量の見積もりであるが、この結果からも中国の予測同様に、低燃費化技術の段階的早期導入が求められる。

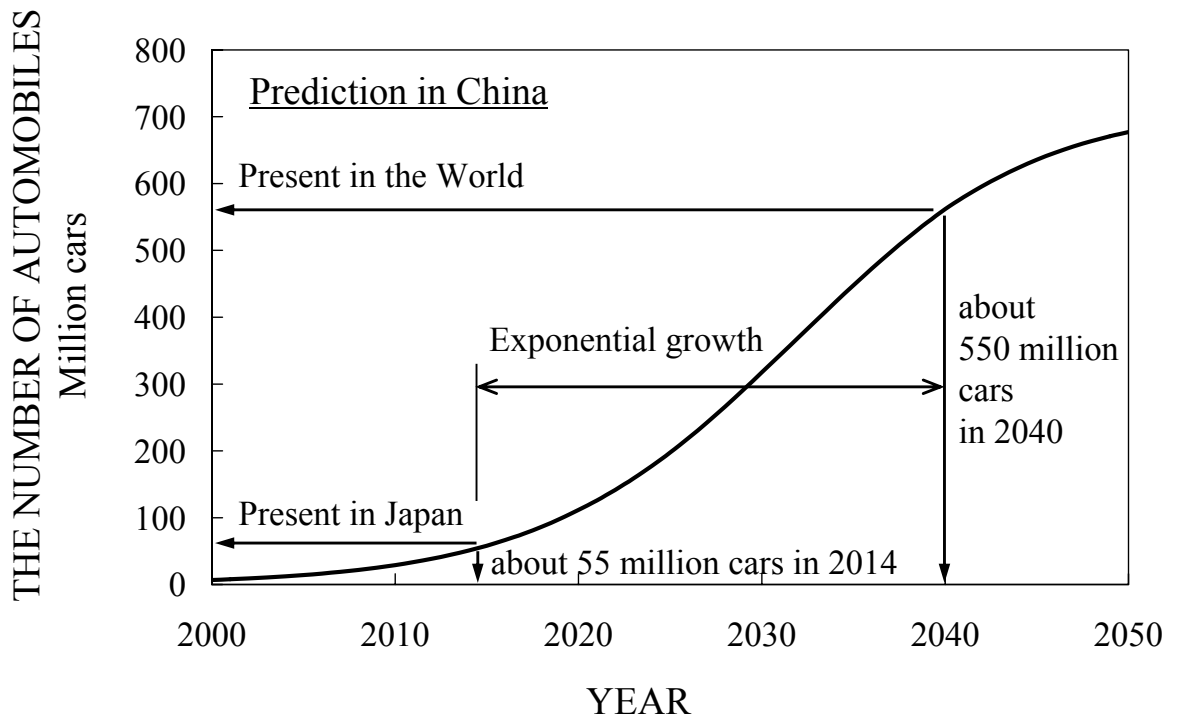


Fig. 7.11 Prediction of number of automobiles in China.

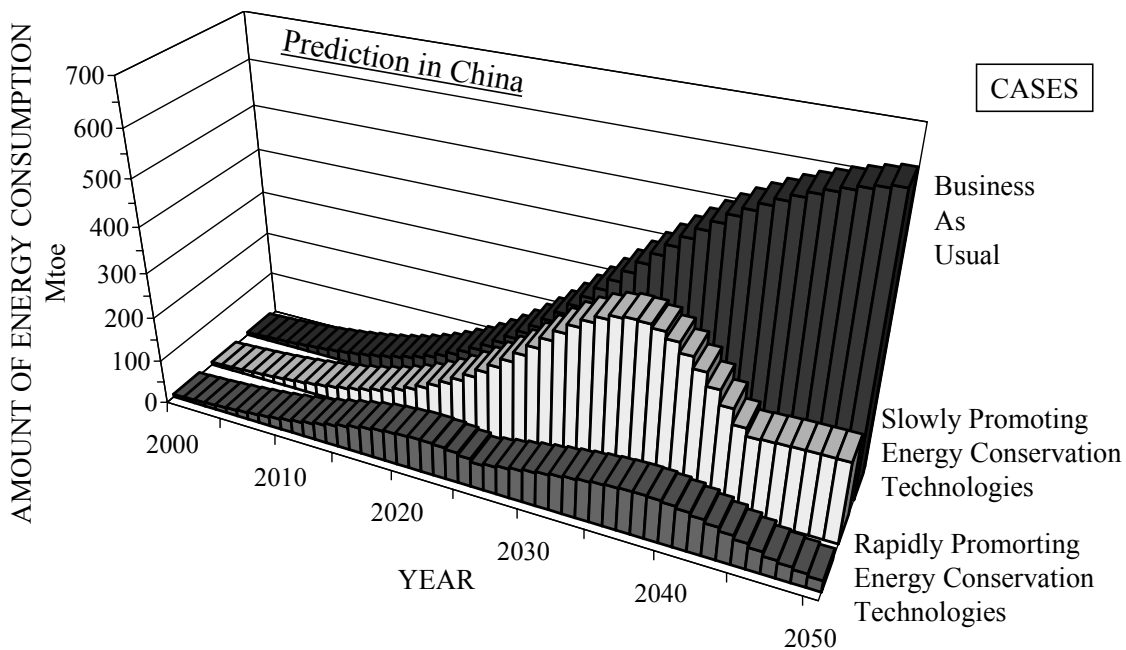


Fig. 7.12 Prediction of energy consumption growth by automobile and effect of energy saving both a combination of lightweight and novel power plant technology in China.

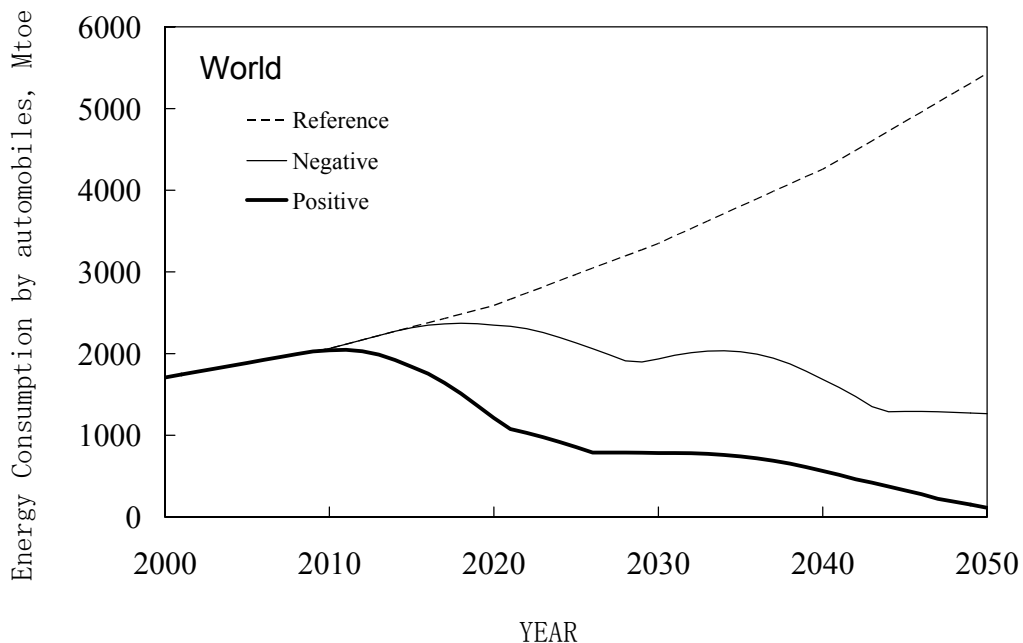


Fig. 7.13 Prediction of energy consumption growth by automobile and effect of energy saving both a combination of lightweight and novel power plant technology in the World.

7-5 結 言

上記に示したとおり、エネルギー消費量増大のひとつの原因は、発展途上国のモーターリーゼーションであり、それは2020年頃から爆発的に成長することがわかった。現在、さまざまな対策がとられようとしているが、いくら内燃機関における改良が有効な方法だとしても、現段階では軽量化のように即効性のある対策だとは言い難い。CFRPによる自動車軽量化は、インフラ整備等、その技術を使用する準備というものが不要で、効果が直接的に燃費改善、省エネにつながる（乗れば、省エネな）ために、地球環境問題やエネルギー問題にただちに反映され、即効性があり、万人に受け入れられやすい、わかりやすい技術と考える。これらの技術が開発途上国のために非常に速く採用されるとき、今世紀にエネルギー危機を回避することができるかもしれない。しかしながら、先進国が技術開発に失敗してもたしていたら、石油は近い将来に枯渇するために、慎重にかつ確実に進めなくてはならない。開発途上国や人類の未来は、先進国にゆだねられ、先進国は責任をもって、この任務を遂行しなくてはならない。先進国は、いち早く持続可能な技術を実現し、開発途上国へできるだけ早く広めるよう努力してゆかなければならない。

第7章で引用した文献等：

- 1) IEA: Energy statistics of OECD countries 1971-2001, International Energy Agency, Paris, 2003.
- 2) IEA: Energy statistics of non-OECD countries 1971-2001, International Energy Agency, Paris, 2003.
- 3) IEA: World energy outlook 2005, International Energy Agency, Paris, 2004.
- 4) UN: World Population Prospects the 2002 Revision Highlights, United Nations department of economic and social affairs population division, New York, 2002.
- 5) UN: World Population in 2300 Executive Summary, United Nations department of economic and social affairs population division, New York, 2003.
- 6) Seiichi Nakajima: Economic Statistics in China, JETRO, Japan, 2002.
- 7) Osamu Kobayashi: Perspective on Future Fuel and Prime Mover from the Viewpoint of Fuel Cycle Analysis, Engine Technology, Sankaido, Japan, 2001, pp.13-18.
- 8) C. Wang, S. Zhou, et al: A comprehensive comparison of fuel options for fuel cell vehicles in China, Fuel Processing Technology 86, Elsevier, 2005, pp.831-845.

第8章 結 論

本論文で、以下のことが明らかになった。

エネルギー構造分析およびLCA（第2章）から、

- (1) 世界のエネルギー消費構造分析や将来予測から、運輸部門の石油依存度が高く、途上国の乗用車普及もあいまって、この依存度は今後も伸び続ける。
- (2) 乗用車のLCAの結果から、ライフスタイル全体の消費エネルギーの86%が使用（走行）段階である。内燃機関を使う以上、燃料は必要であり、ここに改善の余地がある。
- (3) 車体重量と燃料消費量には1：1の対応があり、燃費改善には車重の超軽量化が有効である。

中国のモーターゼーションの予測（第3章）から、

- (4) まさに中国はこれから急速な成長領域に入っていくことが確認され、また、そのことは、中国がこれから大量エネルギー消費国になることを示唆しており、今後の中国のエネルギーの手当ておよび、原因である乗用車の抜本的な低燃費化技術を早急に段階的に導入していかなければ、対策が手遅れになる。

素材の検討（第4章）から、

- (5) 金属材料との比強度・比剛性の比較から、樹脂系複合材料が軽量新素材として有望である。
- (6) 樹脂系複合材料のなかで、要求性能（例えば曲げ強度200 MPa以上、曲げ弾性率20 GPa以上）から、強化繊維としては軽くて（1.8 g/cc）強い（強度4,900 MPa、弾性率230 GPa）炭素繊維しかない。
- (7) マトリックス樹脂は、価格、成形温度、生産量、軽さからアイソタクチックポリプロピレンが有力である。

炭素繊維強化ポリプロピレン (CFRPP) 0° 材の力学特性の改善 (第5章) から、

- (8) CFRPP 0° 材の力学特性を、成形法の改良 (5つの工夫) により画期的に改善した。実際に大物成形品をつくれるだけの力学性能が得られた。
- (9) 界面接着は、従来のCFRPPに比べ、約3.5～5.8倍の改善となったが、航空機用CFRP (T800H/3900-2) に比べると約1/3～2/5程度であることがわかった。＜ILSS試験およびDNS試験＞
- (10) 従来のCFRP (T700SC/105/206) に比べてCFRPPにはかなり早い段階での初期損傷が認められ、その初期損傷は繊維まわりのマイクロボイドの成長や合体、あるいはボイドを起点とした荷重方向に伸びるき裂進展により進行・蓄積されていると考えられる。＜AE計測およびSEM観察＞

CFRPPのリサイクル性の検討 (第6章) から、

- (11) マトリックス樹脂のリサイクル性から、樹脂の検討を行った。現実的な価格帯と性能の4つの樹脂に関し、4種類の不連続繊維強化材、CF/PP, CF/ABS, CF/PC, CF/PET を作製し、破碎・混練・再成形というリサイクルパスで評価したところ、PPが一番良いという結果が得られた。
- (12) また、同様のプロセスで、熱硬化性CFRP破碎材のリサイクルも可能であることも示した。

ハイブリッド材の提案 (第6章) から、

- (13) しかし、リサイクル材は力学特性発現率が良くないため、ソリッドコアをリサイクル材、薄いCFRPP 0° 材のスキンでサンドイッチとしたハイブリッド材料を開発し、力学特性およびエネルギー吸収特性の改善に成功した。
- (14) 本材料の耐久性については、基本的な物性を取得するまでにとどまったため、あまり突っ込んでの言及は控えたいが、連続繊維強化の0° 材やハイブリッド材は、比較的良い耐久性を示したが、リサイクル材に関しては、本リサイクル方法であると繊維の折れ曲がりやPPの局所結晶化などから品質のバラツキがみられるため、耐久性は良くなく、成形の改善が必要である。

本技術の効果予測（第7章）から、

-
- (15) 本材料が自動車に適用された場合、その平均軽量化率は40%（現在の自動車の平均車重1.5トンが1トン～750キロになる）であり、この軽量化率で普及のタイミング等をパラメーターとしてシミュレーションしたところ、やはり自動車の軽量化は即効的対策であり、開発途上国の乗用車市場の成長速度に勝るには、早い段階で多種の乗用車に本材料を段階的に早急に適用することが肝要である。

なお、本研究で、以下のことが今後の課題として残った。

- (1) 本研究で、実際の大物成形物をつくる際の指標である曲げ特性が、0°材やハイブリッド材に関しては高い値が出たので、次の段階として、これをアングルプライした場合などの物性の取得が必要である。
- (2) リサイクル材は、そのまま使用しようとする、剛性を構造でもたせるようになるため、その構造計算（CAE等）による検証が必要である。
- (3) 実用化のためには耐熱性や耐候性の試験も必要である。
- (4) 0°材の追加試験として、引張-圧縮疲労試験が必要である。
- (5) 界面接着性を絶対的にCFRPに近づけなければならない必要はなく、自動車や家電、ロボットに使用するのであれば、航空機用の6～7割で良い。したがって、実用化にはあと2、3割の改善が望まれるが、そのためのさらなる工夫、具体的にはブロックPPの適用や、改質繊維を用いた成形品の評価などが必要である。

補 遺 A

定性的な結晶化度上昇確認のためのXRD (X線回折) による分析

A-1 はじめに

Table A1 に示す試料について、X線回折により各材料の結晶化度を定性的に比較した。X線回折装置は、Material Analysis and Characterization Science 社製の MXP3II であり、X線発生装置容量は 3kW で線源は Cu (波長 1.5418 Å) である。管電圧は 40kV、管電流は 30mA で、スキャン速度は 1 degree/min とした。成形過程に含まれているアニーリングは、圧力 35MPa (金型内圧力 1.86MPa)、120°C、1 時間である。また乾燥条件は、大気圧下で 100°C、3 時間である。

今後出てくる記号 (hkl) は、結晶構造を示すミラー指数と呼ばれるもので、一般に PP の結晶系の種類は複雑である。例えば α 相なら単斜晶 (monoclinic) で格子定数は $a=6.65$ Å, $b=20.96$ Å, $c=6.5$ Å, $\beta=99.8$ deg. である。 γ 相については今も活発な議論が行われているが、現状では斜方晶 (orthorhombic) で、 $a=8.54$ Å, $b=9.93$ Å, $c=42.41$ Å とされている^{A1), A2)}。

A-2 PP 単体の XRD 分析

Table A2 に示す α 相、 γ 相^{A3)}を確認するために、PP 単体の XRD (X-ray Diffraction) 分析を行った。Table A1 に示す成形条件でプレス成形された PP の板から試料を切り出し、測定した。結果を Fig. A1(a) に示す。この回折パターンに含まれるのは、PP の結晶質からのピークと、非晶質からのブロードなハローである。ここで、HC において (040) のピークが突出しているのは、このサンプルが引抜成形したシート状のもので、結晶面がこの面に偏っている可能性がある。HC と LC を比較すると、非晶質からのブロードピークに多少変化がある。LC の方が、明らかにピークが平たく、LC は HC よりも結晶化度が大きい。結晶化度が增大する理由は、成形完了後の冷却速度と、等温高压結晶化にある。PP 中の高分子量成分は、比較的結晶化しやすく (冷却速度に影響されやすく)、逆に低分子量成分は結晶化しにくい (冷却速度に影響されにくい)。特に、等温高压結晶化では 120°C、35MPa (金型内圧力 1.86MPa) という雰囲気中で 1 時間保持させると、成形温度からの冷却で結晶化できなかった比較的融点の低い低分子量成分の非晶質が、条件によって α 相、 γ 相にそれぞれ結晶化しやすくなる。そこで結晶化できなかった残りの低分子量成分は結晶ラメラ界面に残り、等温結晶化完了後の徐冷によって、この低分子量成分は γ 相に二次結晶化する^{A4)}。LC では成形温度から徐冷しているため、等温結晶化時、PP はその殆どが α 相に結晶化済みであり、アニーリング後の徐冷で γ 相への二次結晶化は

少ない。

一方、HCA では、成形温度から急冷しているため、等温結晶化時にまだ十分にPPの結晶化が進んでおらず、 α 相、 γ 相に結晶化してゆき、アニーリング後は急冷であるため、残った非晶質は二次結晶化しない。しかし、アニーリングによる等温結晶化を経て、結晶化度はLCと同程度に制御することができる。よって、非晶質が多少増え、ブロードピークもやや大きくなるため、重なって見えにくい、 γ 相のピークが確認できる。LCやHCAにおいて、今回のアニーリング条件では、全体的に α 相の結晶化度が高いということを確認した。

A-3 フレッシュCFRPP 0°材のXRD分析

本研究で用いた成形条件の異なる2種類のフレッシュCFRPP 0°材について、XRD分析を行った。成形条件をTable A1に、結果をFig. A1(b)に示す。このパターンにはPPの結晶質のピーク、非晶質のブロードなハロー、炭素繊維単体のブロードなハロー等が重なっている。成形後室温まで急冷したものと、急冷したのちアニーリング処理したものとを比較すると、定性的ではあるが後者のほうに結晶化度の増大が認められる。特に、(111)、(041)のピークの絶対値が増加している。一方、20~30 deg.の範囲に広がるブロードピークは、炭素繊維のそれと位置が一致している。炭素繊維表面とPP界面の結晶化挙動と何らかの相関があることが予想される。また、本結果から、結晶化度が大きくなると、成形に伴い材料に内在する残留ひずみの程度も大きくなることが懸念される^{A5)}。しかし、アニーリングすることでこのひずみは除去できる。

A-4 おわりに

繊維近傍のPPの結晶化度が少し離れた場所でのそれと比べて上昇しているという、ミクロレベルでの定量的な確証は得られていない。試料は異方性材料で、しかも粉体でなく固体であり、この結晶化度を定量的に求めるためには、今回のような一方向の回折だけでは不十分で、本来ならばDebye-Scherrer環に沿った周回積分を行う必要がある。しかし一方で著者らは、 $V_f=40\%$ のとき、繊維間の理論的隙間は5,944nmで、PPの α 結晶の格子定数は大きいところで3nm程度であり、これは約2,000分の1のオーダーで、この空間領域に結晶が優先的に成長すると思っている。それならば、局所的に等方性として考えて、マクロには均一な強度のDebye-Scherrer環を想定し、A.Weidingerらの論文^{A6)}で示されるように、PPのプロファイルを結晶質/非晶質に分割し、回折パターンから結晶化度を求めれば、異方性材料でも定量的な議論ができるかも知れない。また、マクロな結晶化度を定量的に得るためには、精密な比重計を用い、結晶/非結晶の比重差(結晶 $\rho_{cr}=0.932-0.943$:非結晶 $\rho_{am}=0.850-0.854$)^{A7)}から結晶化度を推定する方法も

あり、簡便であり、有効かも知れない。いずれにせよ、本データを示すためには、膨大な時間がかかるため、今回は定性的な考察にとどまった。本定量分析は、今後の課題としたい。

CFRPP 0° 材の強度向上は、結晶化度の増大、特に炭素繊維まわりの結晶化成長が重要であると考えられる。これはハイサイクルで成形する際には、アニーリングすることで制御できる。また、本研究で用いたPP2は、繊維への含浸を向上させるために、低分子化し高MFRとしている。このことから、高MFRのPPをマトリックスとして使用する際には、低分子量成分が多く存在するため、特に等温結晶化が重要であると考えられる。アニーリングは、結晶化度を向上させると同時に、ひずみ除去にも有効であることから、高性能CFRPP開発においては欠くことのできない成形過程である。

Table A1 Condition of each samples for XRD.

Carbon fiber reinforced polypropylene (CFRPP)*	isotactic Polypropylene (PP2)
1 High cycle molding without annealing (HC)	1 High cycle molding without annealing (HC)
2 High cycle molding with annealing (HCA)	2 Low cycle molding with annealing (LC)
Pure carbon fiber bundle was chemical washed.	3 High cycle molding with annealing (HCA)

* Fiber volume fraction is 40%.

Table A2 Assignment of XRD peaks of the α and γ crystalline phase of *i*-PP.^{A3)}

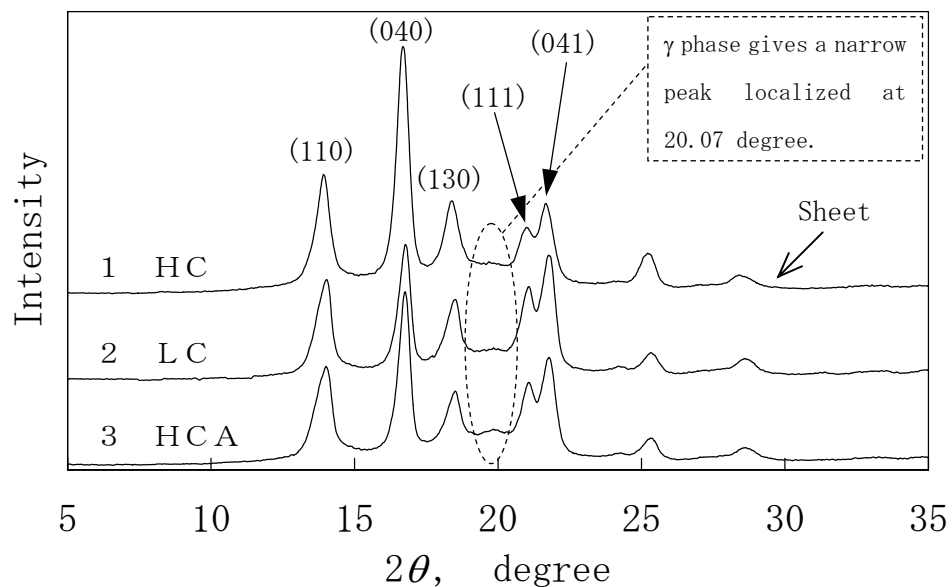
	I	II	III	IV	V	VI	VII
α	14.08 (110)	16.95 (040)	18.5 (130)	21.2 (111)	21.85 (041)	25.5 (060)	28.45
γ	13.84 (111)	15.05 (113)	16.72 (008)	20.07 (117)	21.2 (202)	21.88 (026)	

For each phase the number at the top is the angle 2θ , and the index (*hkl*) is given below.

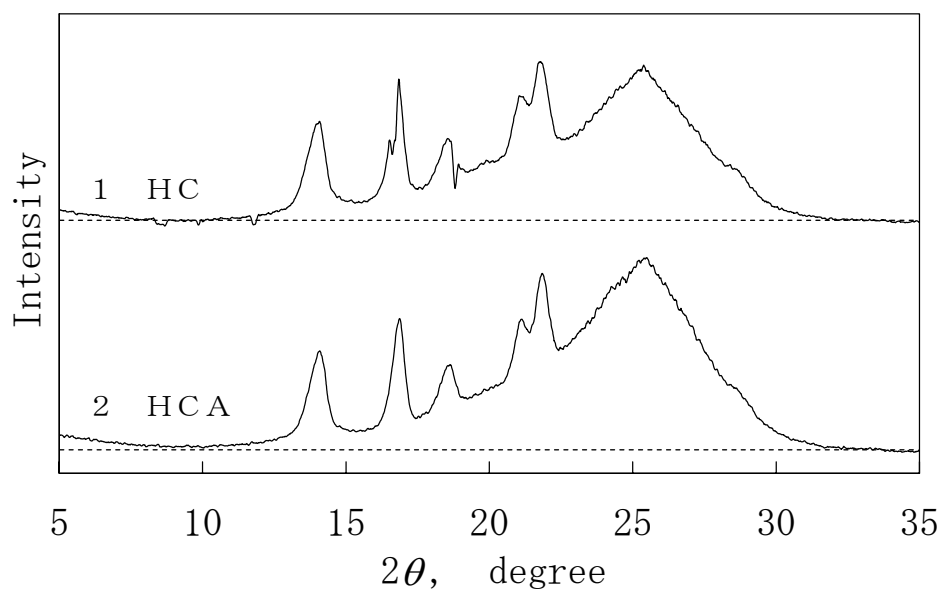
Table A3 Check list for x-ray intensity peak shift of each samples.

Material	Condition	α (110)	α (040)	α (130)	γ (117)	α (111)	α (041)	α (060)
PP	1 HC	Comparison base						
	2 LC	same	-	same	same	incr	incr	decr
	3 HCA	same	-	same	incr	incr	incr	decr
CFRPP	1 HC	Comparison base						
	2 HCA	Practical increasing of measured x-ray intensity						

NOTES: incr. means increasing of peak level. decr. means decreasing of peak level.



(a) isotactic PP



(b) Unidirectional CFRPP

Fig. A1 XRD patterns of isotactic polypropylene and CFRPP samples.

Table A3 は、測定された X 線強度の成形条件による変化 (Fig. A1) を、PP と CFRPP についてまとめた結果を示す。この表から、PP については急冷後アニーリング処理することにより、特に回折角度が大きいところの結晶化度が上昇していること、そしてその傾向は CFRPP のマトリックスに対しても同様に起こり、CFRPP においても急冷後アニーリング処理が有効であること、等が読み取れる。この結果より、CFRPP は迅速に成形できる可能性が見出される。すなわち、本来ならば低分子量 PP を使用しているために、徐冷処理が望ましいところを、急冷処理でも可能になることを示しており、このことは、長時間成形が短縮されることにつながる。

補遺Aで引用した文献等：

- A1) Bruckner, S. & Meille, S. V. : Nature, 340(1989), 455.
- A2) Meille, S. V., Phillips, P. J., Mezghani, K. & Bruckner, S. : macromolecules, 29(1996), 795.
- A3) T. Foresta, S. Piccarolo & G. G. Wood: Competition between a and g phases in isotactic polypropylene: effects of ethylene content and nucleating agents at different cooling rates, Polymer., 42(2001), 1167-1176.
- A4) 和気洋平 : アイソタクチックポリプロピレンの結晶化- γ 相の結晶化挙動, 平成 15 年度修士論文, 山口大学, (2004), pp. 3-28, pp. 49-66.
- A5) 日本複合材料学会 (編) : 複合材料活用辞典, 産業調査会, 東京 (2001), pp. 400-402.
- A6) A. Weidinger & P. H. Hermans: Makromolekulare Chem., 50(1961), 98-115.
- A7) J. Brandrup & E. H. Immergut: POLYMER HANDBOOK 3rd Edition, John Wiley & Sons, Inc., New York(1989), V/28.

補 遺 B

ペレタイズを主眼とした射出成形用スクリーレス混練装置の開発

CFRTP のリサイクルを考える場合、繊維をできるだけ折損しないように、長繊維のまま RTM や SMC でスタンパブルに成形する方法が望ましい。その最終段階（繰り返しリサイクルによって繊維長が短くなったケースを想定）では射出グレードに用いることが考えられる。射出成形するためには、使用済み CFRTP の破砕物をあらかじめペレタイズしておくことが、シリンダー内での繊維折損などから考えても望ましい。炭素繊維はガラス繊維と比較して高価な上に、繊維が折れ易くて射出成形のように樹脂と混練が必要な成形では、繊維が粉々になってしまい（粒子充填のようになってしまい）所定の補強効果が得られない。それゆえに、ガラス繊維強化熱可塑性樹脂はいろいろあるのに対し、炭素繊維強化熱可塑性樹脂はその用途に限られ、あまり知られていない。このような背景にあって、CFRTP の射出リサイクルを考えるうえで、成形機側の改善も視野に入れていかなければならない。従来のスクリー型の押出成形機では、TP の流動性と繊維の特性から、混練作業が思うように進まない（Vf のばらつき）や繊維折損などの問題があり、CFRTP 射出リサイクル成形時の短繊維化を防ぐ技術の検討を行った。ここでは、CFRTP として、炭素繊維強化ポリカーボネートを用いた。ポリカーボネートは、非結晶性高分子であり、強靱なエンジニアリングプラスチックである。そのために、樹脂と繊維がからまりづらく、また流動過程でスクリーに大きなせん断力が加わるため、繊維が折れやすく混練しづらい材料である。

B-1 はじめに

輸送機器の軽量化は、今後の途上国の経済発展に伴うエネルギー消費を抑え、温暖化を抑止するのに有効である^{B1)}。軽量化を実現するために、現在、材料の見直しが図られており、高強度・高剛性でかつ軽量の CFRP（炭素繊維強化プラスチック）が注目されている。

しかし、これまで航空機やモータースポーツ等で活躍してきた CFRP は、特殊用途を目的として開発され発展してきた材料であり、自動車部品のように量産が必要とされる、安価でリサイクル可能な汎用材料としては発展してきていない。また、このような材料は、CF（炭素繊維）製造のエネルギー消費が多いことや価格が高いこと、成形工程でのエネルギー消費が多いことなどから、省エネ時代にふさわしくない。そこで、低い繊維含有率（チョップド CF）で安全性を確保でき、熱可塑性プラスチックスペースとすることで低コスト化、リサイクル性の向上、環境調和性（省エネ）の推進を目的とした CFRTP（不連続炭素繊維強化熱可塑性プラスチック）の開発が急務となっている。

ここでは、量産部品にも適用可能な CFRTP を成形する前段階処理であり、安全性と強い関わりのある、熱可塑性プラスチックと CF とのプリフォーム工程において、繊維長の維持を可能にする簡易プリフォーム法について報告する。

B-2 スクリュータイプ混練機による検討

不連続繊維で強化された熱可塑性プラスチックは、擬似等方性をもつと考えられ、プレス成形や射出成形といったような現在のプラスチック部品生産のインフラをそのまま利用して、鉄鋼のような等方性材料がつけられるところに強みがある。プレス成形や射出成形の際に用いられる熱可塑性プラスチックはペレットの形を有しており、これが連続的に供給されることで、オートメーション化された機械により生産されている。そこで、ピュアなプラスチックを、強度・剛性を発現させるために必要な長さの繊維に予め含浸（プリフォーム）させて再ペレット化するため、熱可塑性プラスチックと繊維の混練工程が必要になる。

しかしながら、スクリータイプ混練機は、主に異種の熱可塑性プラスチック同士を混練（ポリブレンド）するための機械であり、繊維との混練には一般に適していない。ポリブレンドならば、ガラス転移温度（ T_g ）以上でポリマーは硬いガラス状態からやわらかいゴム状態へ変わり、ある粘性をもって流動しはじめるので、スクリーと粘性流体間に生じるせん断力が混練の駆動力になって、ポリマーは均一に混ざり合っていく。しかし、繊維は固体として存在しつづけ、混練が進むにつれ、ちぎれたり、目詰まりを起こしたりして、均一に存在させること、つまり一定の強化機構（繊維長・繊維含有率）を維持させることが非常に難しい。

実際に CF を用いて実験した結果を Fig. B1(a)に、試験条件を Table B1 にそれぞれ示す。Fig. 1(a)にみられるように、現状の混練機によるプリフォームは、繊維が不均一で、繊維長も非常に短くなってしまふことがわかる。熱可塑性プラスチックに PC（ポリカーボネート）を選んだ理由は、PC が非晶性ポリマーであり、一般に流動性が悪く溶解粘度が高い^{B2)}ので、繊維は非常に大きなせん断力を受ける環境下におかれる。つまり、繊維長維持の立場でレオロジー特性が過酷な条件として、PC を選択した。

Table B1 Condition and result of mixing test using conventional mixing machine.

CF : HTA-12K (東邦テックス)	解繊	未解繊
PC :	連続供給	
炭素繊維量 (g)	1.0	1.0
混練温度 (°C)	180	
インプット繊維長 (mm)	10 mm	10 mm
プリフォーム繊維長	200 μ m~1 mm	目詰まりで停止
プリフォーム材様相	不均一	供給されず

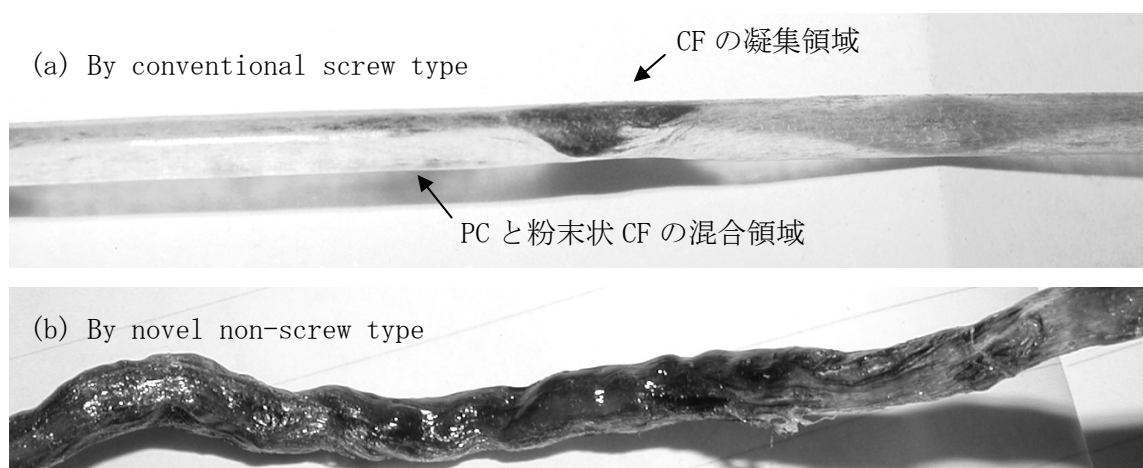


Fig. B1 Observation of performed discontinuous carbon fiber reinforced polycarbonate for palletize to injection molded recycling.

B-3 ノンスクリュー・スタンドタイプ混練機の開発

前述のように、熱可塑性プラスチックと不連続な炭素繊維を混練するには、スクリータイプの混練機は使用できない。そこで、Fig. B2 に示すような原理で混練する混練機を提案したい。以下に、混練操作の説明と、その原理を示す。

(予熱段階)

実験は、a で示すシリンダー（本体）を f で示す小型電気炉と断熱材で覆い、開放型

(b の押出棒, c のかきまぜ棒を外して, 装置上部が大気中に開放されている状態) で a を加熱することから行う. 温度コントロールは, a の側面に接触させた, e で示す熱伝対で行った. a の内部温度が 165°C (e の指示温度: 260°C) 付近で安定したら, 混練したい材料同士 (本実験では, 5mm 程度に切った CF と PC ペレット) を層状にして a 内に収め, b, c および断熱材で密閉し, 約 10~20 分間加熱する. b, c および断熱材にて密閉するのは, 大気雰囲気中での加熱による酸化を最小限に抑えるためである.

(混練段階)

a の内部温度が再び安定したら, c を下に向かって, 一方向に回転させながら, ゆっくりと降下させる. c の回転運動と, 層をまたぐ下方向の直線運動がプラスチックの粘性流動をうながし, プラスチックは繊維を取り込みながら, らせん状にシリンダー内を運動することで, 均一に混ざりあっていくと考えられる. 一番下まできたら, 次に, 再び一方向 (この方向は, 降下させるときと同じにする) に回転させながら, ゆっくりと上昇させる. この作業を 2 回から 5 回程度行う.

(押出段階)

最後に, b をゆっくり降下させることでシリンダー内の材料を押し出す. このとき, シリンダー内の下部についたテーパ的作用により, 繊維が一方向に揃い, また壁面からの圧力で, d で示す出口付近で含浸された繊維とプラスチックが等圧で収束し, 押し出しをなめらかにすると共にプラスチック内の気泡をつぶす役割をしていると考えられる.

(回収段階)

d から出てきたプリフォーム済の材料を, ある程度テンションをかけながら回収した. 内部に繊維が入っているプラスチックは, 純粋なプラスチックとは違い, 重力のみではまっすぐ押し出されない. 材料内の強度や含有率の分布, 微妙な繊維の異方性が原因と考えられる.

開発した混練機の実物と試験装置を Fig. B3 に示す.

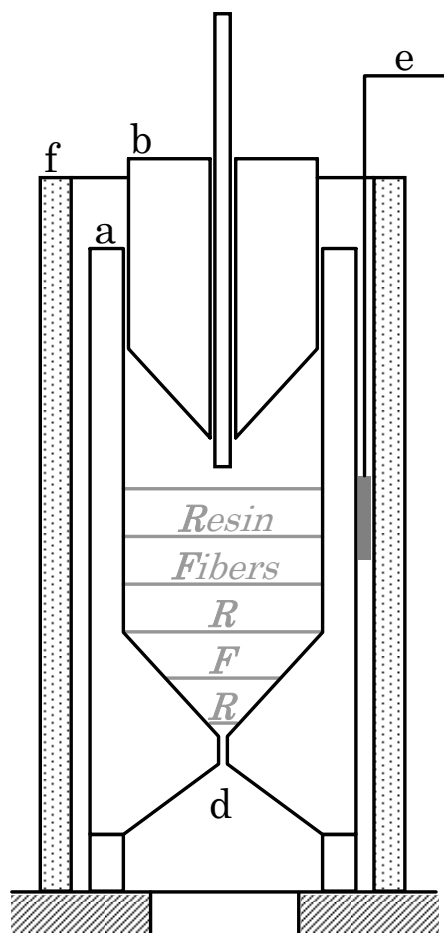


Fig. B2 Illustration of developed novel non-screw mixing machine.

Table B2 Condition and result of mixing test using novel non-screw mixing machine.

試験番号	#1	#2	#3	#4
CF 層数	1	3	7	7
PC 層数	2	4	8	8
CF/1 層(g)	0.3	0.1	0.1	0.1
PC/1 層(g)	4	2	2	2
かきまぜ回数	0	2	2	1
プリフォーム材料外観	不均一 ×	均一 ○	均一 ◎	均一 ○

Wf: fiber weight fraction is about 4 percent per preformed materials.

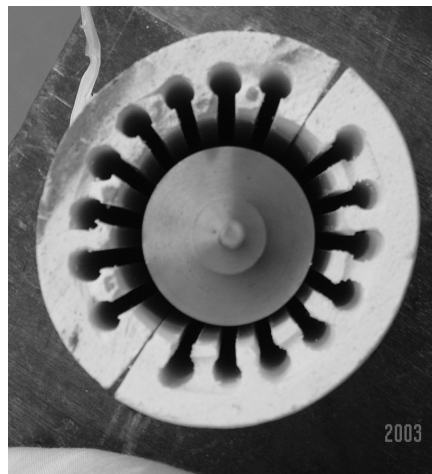


Fig. B3 Overview of novel non-screw mixing machine.

B-4 新提案の混練機による混練試験結果

混練試験は、Table B2 に示すように 4 ケース行った。つまり、Wf（繊維重量含有率）は一定という条件下で、シリンダーに収める容積の違い（層数の違い）、1 層あたりの量の違い、かきまぜ回数の違いが、プリフォーム後の材料に与える影響について定性的に調査した。

調査した結果、シリンダー内に収める層数を増やして（1 層あたりの量を少なくして）、かきまぜ回数を多くすることが、品質の良いプリフォーム材を製造するのに効果的であることがわかった。また、ポリマーは高温にさらされ続けると、熱や熱酸化などにより化学構造が変化し、材料の劣化につながってしまう^{B3)}ので、材料を層状にセッティングした後シリンダー内の空気を抜いて真空にし、真空雰囲気中で混練作業を行い、短時間で押出・回収することも重要であると思われる。実際試験#3 で得られた CF/PC プリフォーム材の一部を、Fig. B1 (b) に示す。

B-5 おわりに

不連続な繊維と熱可塑性プラスチックとのプリフォーム工程において、従来のスクリー型による不都合を解消した、ノンスクリー型の混練機を開発した。実際に、長繊維（繊維長 6mm）の CF と PC とをこの装置で混練し、プリフォーム材の品質を定性的に評価した。今後は、PC のみならず、PET や ABS、PA などのポリマーを長繊維の CF と混練してプリフォーム材をつくと同時に、それらプリフォーム材から試験片をつくり、力学的性質（引張強度・曲げ剛性・衝撃エネルギー吸収特性）やリサイクル性の面から、定量的に超軽量車用 CF/TP 材を検討していきたい。

補遺B で引用した文献等：

B1) 圖子ら：CFRP による軽量化乗用車の長期的環境エネルギー問題対策効果，日本複合材料学会 2003 年度研究発表講演会予稿集，(2003)，pp. 81-82.

B2) 大柳康：実践ポリマーアロイ，アグネ承風社，(1993).

B3) 川上浩良：工学のための高分子材料化学，サイエンス社，(2001).

補 遺 C

連続繊維強化ポリプロピレン0°材の層間せん断強度

C-1 はじめに

炭素繊維強化ポリプロピレン（以下、CFRPP）は、これまで航空機等に使用されてきた炭素繊維強化エポキシ（以下、CFRP）に比べると、特に強度の面で性能が劣る。論文の各論で述べられた一方向材の曲げ強度は、厚さがたかだか1.0~1.5mmの薄板のものであり、その値は約700MPaと従来に比べ非常に改善されたが、その改善された要因を「成形法の改良によるもの」とし、定量的に説明しているとは言い難い。加えて、FRP成形の大型化は、同時に板厚の厚肉化を意味しており、例えば自動車などをFRPで成形しようとするならば、設計要求によってはこの厚肉積層材の多用は避けられない。こうしたFRP厚板の強度特性でもっとも重要かつ改善が要求されるのは、層間せん断強度であろう⁽¹⁾。そして、層間せん断強度と繊維-樹脂界面の接着問題には密接な関係がある⁽²⁾。特に、CFRPPの場合、この界面接着が弱点であり、接着問題の改善/解決が望まれている。各論で述べられた一方向材の強度特性改善は、成形法の改良によりおそらくこの接着問題が改善された結果である。つまり、このことを定量的に示し確認するためには、層間せん断強度を比較すればよい。

そこで、ここでは、板厚を3.0mmと厚肉化されたCFRPPおよびCFRPの層間せん断強度を、ショートビーム法による3点曲げ試験（スパン/厚さ比=4で得られた結果を形式的に、ILSSとする）および目違い切欠き圧縮せん断試験（得られた結果を形式的にDNSとする）にて測定し比較した結果を示す。CFRPPには、工夫を施さないUD1成形法、すべての工夫をもちこんだUD8成形法の2者について比較した。比較の結果、測定値に信頼性（米国MILのB基準値）を導入した値で、UD8はUD1のILSSで約3.5倍、DNSで約5.8倍の改善であることが判明した。しかしながら、UD8はCFRP（ここで言うCFRPとはT800H/3900-2のことで、層間せん断強度を改善するための工夫として層間にマイクロバルーンを持たせた航空機用先端複合材料）に比べ、MILのB基準値で、ILSSで約1/3（33%）、DNSで約2/5（40%）程度の層間せん断強度しかないことがわかった。自動車用途や家電、ロボット等の分野に使う複合材料として考えるのであれば、航空機用の設計基準値は必ずしも正しくなく、もっと材料として多様性のある性能を持ち合わせればよい。すなわち、今の航空機用先端複合材料の性能の6~7割の性能であれば、地上で扱う分には十分な材料といえよう。成形法や樹脂側の改良ではここまで改善できたが、さらなる接着問題の改善（残り20%~30%）のためには、炭素繊維側の改良（例えば、熱可塑性プラスチック用に表面官能基を工夫するなど）も必要である。

C-2 ショートビーム法による3点曲げ破壊特性

ショートビーム法による I L S S 試験は, ASTM D 2344-84 で規格化されている. すなわち, スパン/厚さ比が4となるようにスパンを決定するが, まだ材料としては新しく, 層間せん断強度も低いことが予想される CFRPP の場合も, これに準じてよいかを事前に調べておく必要がある. そこで, スパン/厚さ比を4, 6, 8 と系統的に変えたときの3点曲げ破壊特性を確認した. CFRPP 試験片は, 幅 8.5mm×厚さ 3.0mm の断面寸法で, 炭素繊維体積含有率 (Vf) が成形条件 (UD1, UD8) に応じて約 25~40%である.

比較のため, CFRP (T800H/3900-2) についても並行して試験を実施した. CFRPP と CFRP の特性値の比較は, CFRP 試験片の Vf が 58%であるので, 比較する際, UD8 の Vf 平均値 (0.344) を CFRP の Vf 平均値 (0.580) で除した Vf 比を CFRP 特性値に乗ずることで行った. 詳しくは, Table C1 および Table C2 を参照されたい.

Table C1 Difference between molding conditions UD1 and UD8.

Molding condition code		UD1	UD8
Materials	Carbon Fiber (CF)	Toray T700SC	Toray T700SC
	Polypropylene (PP)	IDEMITSU J700GP (isotactic, homo)	IDEMITSU J3003GV (isotactic, homo)
	MFR of PP	7	30
Pre-processing	PP+MA [†]	None.	Addition of 0.3 wt. %
	CF	None.	Removal of sizing treatment.
Molding	Method	Hot press after in-process thin CF/PP sheets laid-up.	Hot press after in-process thin CF/PP sheets laid-up.
	Temperature	180 deg. centigrade.	230 deg. centigrade.
	Pressure	1.82 MPa.	1.82 MPa.
	Cooling rate	-1.0 deg. /s to 40 deg.	-1.0 deg. /s to 120 deg. ahead of annealing.
Post-processing	Annealing	None.	Keeping conditions; 120 deg., 1.82 MPa, 1hr. of temp., pressure and time. -1.0 deg. /s to 40 deg. after annealing.

[†] MA: Maleic anhydride.

Table C2 Interlaminar shear strength of a specimen by short beam method.

Molding Condi- tion	No.	Width b mm	Thickness h mm	CF content vol.% (Vf)	Breaking load, P _B N	Shear strength, τ MPa
UD1	UD141	8.690	2.982	17.5	228.6	6.6 †
	UD142	8.698	2.953	21.1	245.3	7.2
	UD143	8.712	2.957	20.8	265.9	7.7
	UD161	8.713	2.871	26.6	250.2	7.5
	UD162	8.710	2.889	25.1	241.3	7.2
	UD163	8.778	2.875	23.1	257.0	7.6
	UD181	8.657	2.911	25.3	131.5	3.9
	UD182	8.685	2.940	21.1	118.7	3.5
	UD183	8.224	2.977	15.7	97.1	3.0
UD8	UD841	8.459	2.975	36.1	570.0	17.0 †
	UD842	8.462	2.963	36.0	580.8	17.4
	UD843	8.473	2.913	35.7	584.7	17.7
	UD861	8.458	2.920	33.4	437.5	13.3
	UD862	8.472	2.864	34.2	346.3	10.7
	UD863	8.461	2.869	34.0	422.8	13.0
	UD881	8.469	2.915	32.7	325.7	9.9
	UD882	8.384	2.945	32.3	323.7	9.8
	UD883	8.069	2.906	34.8	329.6	10.5
Wet hand lay-up	UD41E	8.662	3.047	60.5	1775	50.3 ‡
	UD42E	8.644	3.040	58.1	1746	49.7
	UD43E	8.626	3.027	59.5	1786	51.2
	UD61E	8.640	3.065	57.4	1466	41.4
	UD62E	8.664	3.060	56.9	1460	41.2
	UD63E	4.984	3.067	56.3	849.5	41.6
	UD81E	8.664	3.065	57.2	1332	37.6
	UD82E	8.685	3.064	58.5	1350	38.0
	UD83E	4.931	3.030	57.6	750.6	37.6

$$† \tau = 0.75 \cdot P_B / bh, \quad ‡ \tau = (0.344 / 0.580) \cdot 0.75 \cdot P_B / bh$$

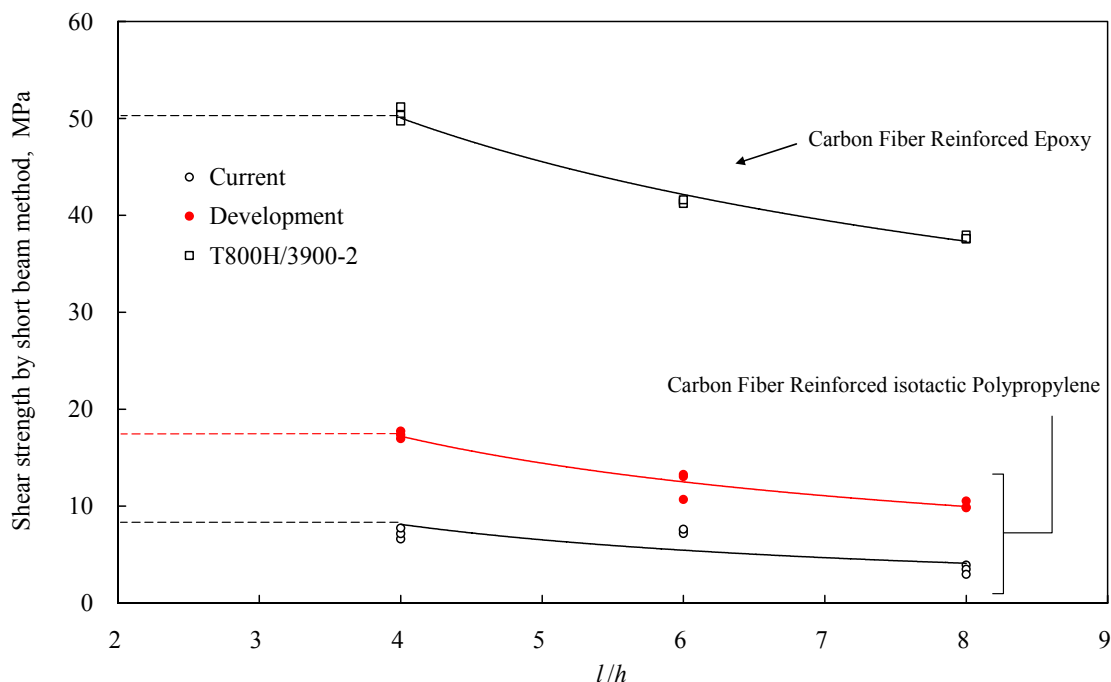


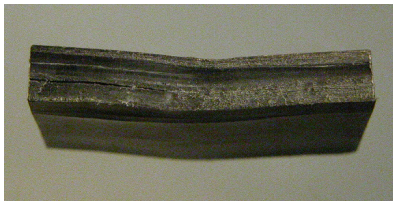
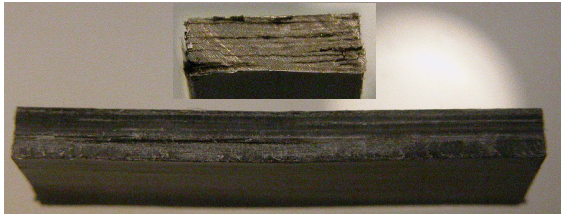
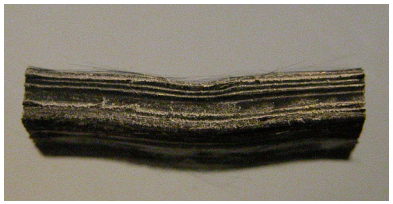
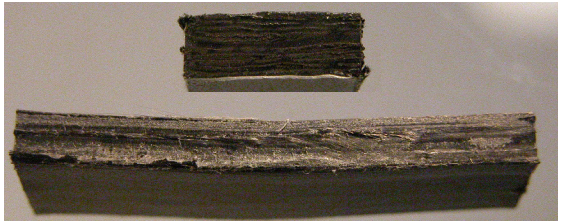
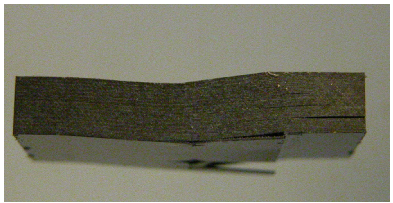
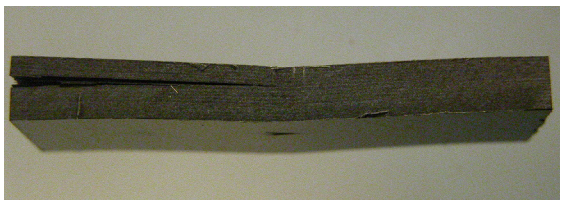
Fig. C1 Relationship between shear strength and l/h .

Fig. C1 は、複合材料の中立面に発生するせん断応力のスパン／厚さ比 (l/h) による変化を示したものである。図中、プロット点が円のもものが CFRPP、四角のもものが CFRP であり、CFRPP のうち中黒のもものが UD8 成形法で作られた開発品 (Development)、中白のもものが UD1 成形法で作られた従来品 (Current) である。3 者ともに同様の変化、すなわち l/h が非常に小さい (ASTM によれば l/h が 4 以下) ところではせん断応力が支配的になりせん断破壊が進行し、 l/h が増えるに従って、せん断応力と曲げ応力が混在する応力状態となり、 l/h が非常に大きい (例えば、各論の曲げ試験では $l/h=40$) ところでは曲げ応力が支配的になり曲げ破壊が進行する。若干、Current の「にぶさ (l/h が 6 でもせん断破壊応力が変化しない)」が露見するが、これは層間せん断強度が非常に弱い材料であるため、それ以上のせん断応力に耐え得ないということであるから、3 者の層間せん断強度として $l/h=4$ の測定値で議論する分には問題ないと判断した。

また、Table C3 は、 $l/h=4$ と 8 のものについて破壊様相の違いを示したものである。 $l/h=4$ において、CFRPP の UD1 では圧縮側のつぶれ (層のせん断変形) が、UD8 では中央からはりの片側末端方向伸びる層間せん断破壊のみが、CFRP では荷重点から支持点に向かって伸びる斜せん断破壊 (貫層せん断破壊) を伴う層間せん断破壊がそれぞれ確認された。 $l/h=8$ においては、UD1 では実質的な曲げ変形の進行が、UD8 や CFRP では層間せん断破壊がそれぞれ確認された。UD1 では、界面接着が弱いために低い応力場で

もせん断変形が容易に起こるのに対し、UD8 では接着問題が改良され、材料中にストックされた破壊エネルギーは、各層がずれるせん断変形ではなく、中立面中央からはりの片側端末に向かって層間を（引き剥がしながら）伝播するき裂成長として解放されている。UD8 は、CFRP に比べまだ界面接着は弱いいため、斜せん断破壊を伴わないが、CFRP の性能に近づくにつれて、破壊エネルギーは大きなものとなり、解放するにあたって層を貫くせん断破壊も同時に確認されるであろう。この様相の違いが強い界面接着のひとつの目安になると考えられる。

Table C3 Deference of fracture appearance by changing l/h .

CFRPP (UD8)		
CFRPP (UD1)		
CFRP		
	$l/h = 4$	$l/h = 8$

C-3 I L S S 試験（見かけの層間せん断強度）

Fig. C2 に $l/h=4$ のときのせん断強度を示す。 $l/h=4$ の場合でも、曲げ応力も発生しているのので、この値は純粋な層間せん断強度とはいえず、見かけの値として扱うのが一般的である。 Fig. C2 の横軸の 1, 2, 3 の番号は試験片番号を示している。それぞれ 3 本の試験を行った。この図から、成形法を工夫した development (UD8) は、工夫しない current (UD1) よりも約 2.4 倍の層間せん断強度の向上が認められるが、CFRP の約 $1/3$ であることがわかった。また、成形法の改良により CV 値（標準偏差/平均

値)が7.7%から2.0%になり, CFRPのようなばらつきの少ない物性に近づいたことがわかる. このことは, Table C2内のVf値が, 40%を目標とした成形であるにも関わらずUD1では平均21.8%しかないのに対し, UD8では平均33.8%でデータのばらつきも少ないことから確認できる. このように, 成形法の改良は, CFRPPの界面接着性の改善に起因する性能の向上のみならず品質面の改善も実現している.

品質を考えた場合, n数がただか3の試験結果からその材料の保証される力学的性能を判断する基準として, 米国MILのB基準値がある. これならば, n数が異なる試験結果も公平に比較することができる. 測定値のB基準値は以下の式c1により求められる.

$$x_B = \bar{x} - k_B s \tag{c1}$$

\bar{x} : 測定値の平均値

$k_B(n)$: n数により決まる係数, $k_B(3)=4.5$, $k_B(5)=3.4$.

s : 標準偏差

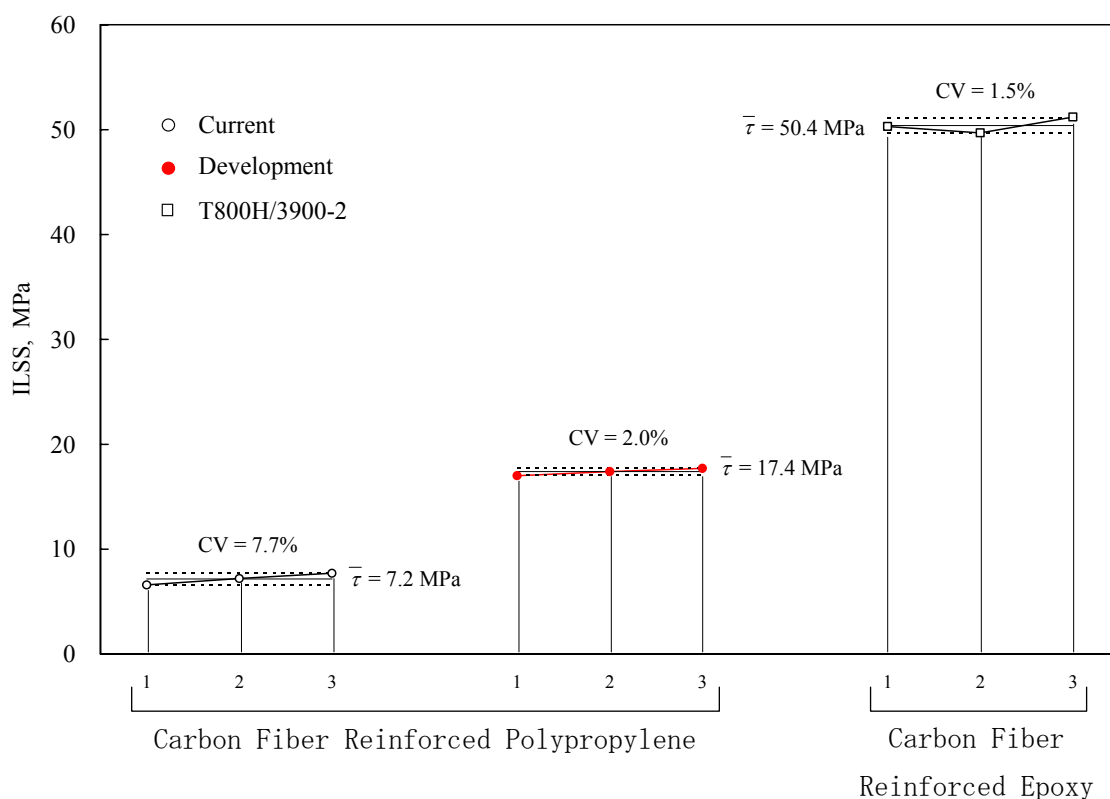


Fig. C2 Comparison of interlaminar Shear Strength of CFRPP and CFRP.

こうして求めなおした見かけの層間せん断強度を、Table C3 にまとめる。UD1 の測定値は、CV 値（ばらつき）が大きいので、MIL の B 基準値で議論する場合は大きな下方修正となる。その結果、最終的な CFRPP の UD8 の層間せん断強度の値は、UD1 に比べ約 3.5 倍の向上であり、CFRP の約 1 / 3 であることがわかる。

Table C4 ILSS by MIL standard B.

	n=3	$\bar{\tau}$	SD	CV	k_B	τ (MIL-B)
ILSS test		MPa	MPa	%		MPa
	Development (UD8)	17.4	0.4	2.0	4.5	15.6
	Current (UD1)	7.2	0.6	7.7	4.5	4.5
	T800H/3900-2	50.4	0.8	1.5	4.5	46.8

C-4 DNS 試験（目違い切欠き圧縮せん断強度）

上記 ILSS 試験の結果が、純粋なせん断破壊試験結果と比べてそれほどかけ離れていなければ、これは信頼のおける値となる。そのため、CFRPP についてのみ、DNS 試験片を用いて、目違い切欠き圧縮せん断試験を行った。Fig. C3 に試験結果を示す。この中で CFRP の測定値は文献 C4)からの引用である。ILSS 試験の場合と同様に、UD8 は UD1 よりも界面接着の改善が認められるが、その値は CFRP に比べるとまだ低いレベルにあることがわかる。また、Table C6 に試験後の試験片の写真を示す。UD8 はせん断破壊しているが、UD1 は切欠き部の応力集中による局所的な圧縮破壊を起こしていることが確認された。

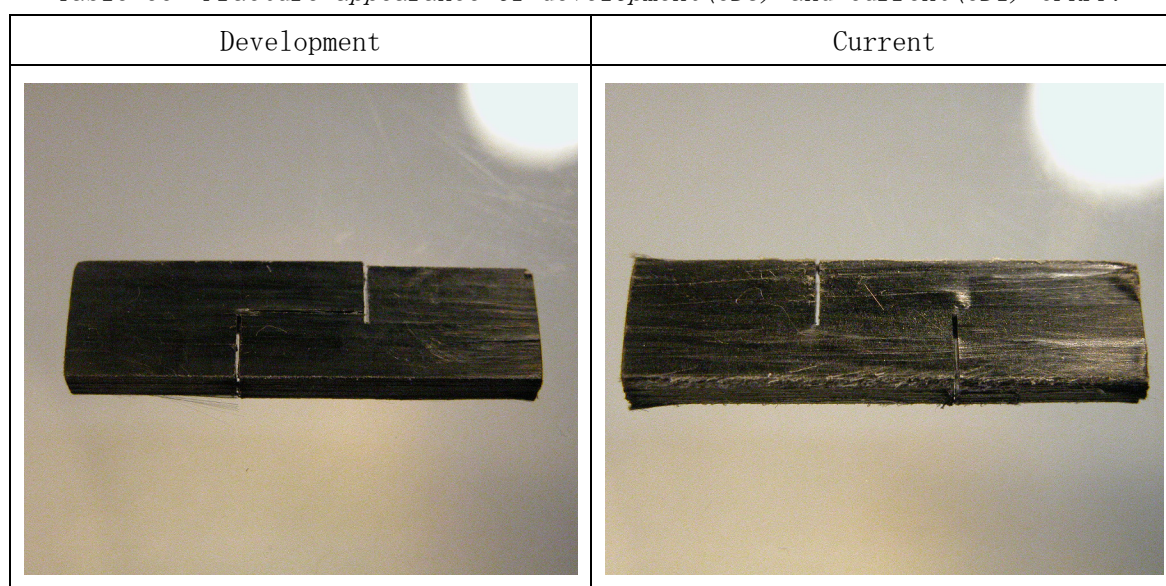
Table C7 は、前節の c1 式を用いて、MIL の B 基準値を計算してまとめた結果である。この結果から、CFRPP の development (UD8) の純粋なせん断強度は、current (UD1) に比べて、約 5.8 倍の向上であり、CFRP の約 2 / 5 であることが分かった。Table C4 と比較すると、特に数値の相違はみられず、この関係が CFRPP の現状での界面接着性を示しているといえる。

Table C5 In-plane shear strength of a specimen by double notch shear (DNS) test.

	No.	Width	Thickness	Vf	Distance	Breaking	Shear
		b	h		between	load	strength
		mm	mm	%	notches, a	P_B	τ
					mm	N	MPa
UD1	UD11DNS	7.960	2.943	24.4	7.5	169.7	7.7 †
	UD12DNS	8.050	2.951	24.3	7.5	178.5	8.1
	UD13DNS	8.120	2.916	24.7	7.7	115.8	5.2
	UD14DNS	8.184	2.934	23.9	7.6	142.2	6.4
	UD15DNS	7.921	3.006	20.9	8.0	150.1	6.2
UD8	UD81DNS	8.140	2.921	36.9	7.8	461.1	20.2 †
	UD82DNS	8.194	2.884	37.4	7.8	482.7	21.4
	UD83DNS	8.256	2.843	38.4	8.0	451.3	19.8
	UD84DNS	8.306	2.882	37.2	8.0	528.8	22.9
	UD85DNS	8.397	2.889	43.0	7.8	418.9	18.6
Ref	CFRP1	13.033	4.795	57.1	6.42	5170	41.8 ‡
	CFRP2	13.046	4.790	57.1	6.45	5670	45.1
	CFRP3	13.035	4.788	57.1	6.50	5425	43.1
	CFRP4	13.036	4.791	57.1	6.39	5209	41.8
	CFRP5	13.026	4.785	57.1	6.47	5602	44.4

$$\dagger \tau = P_B/ah, \quad \ddagger \tau = 0.386/0.571 \cdot P_B/ab$$

Table C6 Fracture appearance of development (UD8) and current (UD1) CFRPP.



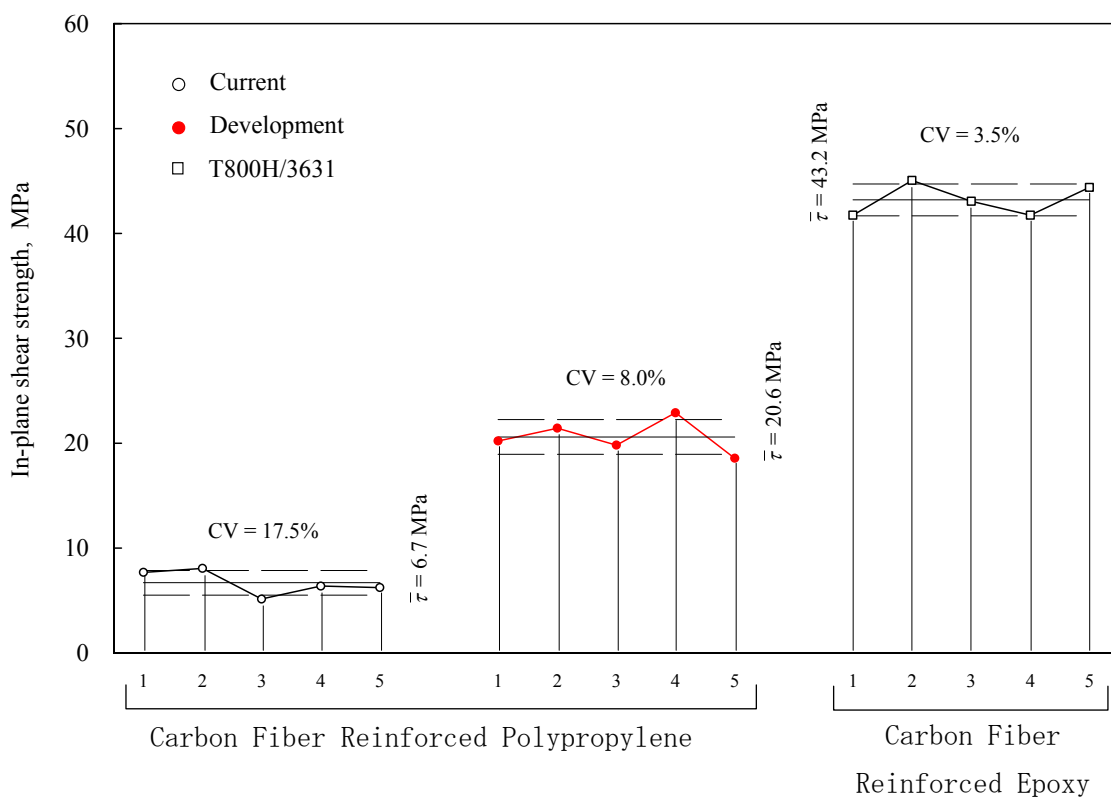


Fig. C3 Result of double notch shear test.

Table C7 In-plane shear strength by MIL standard B.

	n=5	$\bar{\tau}$	SD	CV	k_B	τ (MIL-B)
		MPa	MPa	%		MPa
DNS test	Development (UD8)	20.6	1.6	8.0	3.4	15.2
	Current (UD1)	6.7	1.2	17.5	3.4	2.6
	T800H/3631	43.2	1.5	3.5	3.4	38.1

C-5 おわりに

CFRPP 開発材料の界面接着性の定量的評価を、ショートビーム法による ILSS 試験および DNS 試験片を用いた目違い切欠き圧縮せん断試験を通じて行った。成形法の改良により開発された CFRPP (UD8) は、従来の CFRPP (UD1) に比べ、約 3.5 ~ 5.8 倍の界面接着の改善を確認し、それは CFRP の約 1/3 ~ 2/5 であることが分かった。

補遺Cで引用した文献等：

- C1) 金原・竹鼻・鈴木・大沢：FRP厚肉積層材の三点曲げ破壊特性，第5回FRPシンポジウム要旨集，(1976)，pp. 22-25.
- C2) 金原・大沢・竹鼻：FRP積層板の層間せん断強度測定法に関する検討，第3回複合材料シンポジウム講演要旨集，(1977)，pp. 8-11.
- C3) 森田・金原・福田：複合材料，日刊工業新聞社，(1988)，pp. 204-208.
- C4) 平成13年度CFRP-NAL報告書，2002.

補 遺 D

AE法による引張破壊挙動の計測

D-1 はじめに

補遺Cにて示された界面接着の改善は目覚しいものがあるが、CFRPの約1/3の接着性であることも同時に明らかになった。では、1/3となる原因は何であるか。界面接着が悪いのであれば、低ひずみで初期破壊が起こっている可能性がある。材料は、外力による変形がはじまると自身にひずみエネルギーを蓄積し、破壊するときそのエネルギーを弾性波として解放する。AE (Acoustic Emission) 法は、破断前に内部で発生する極めて小さな弾性波を検出し、破壊進展の様子、破壊箇所の位置評定や、エネルギー量の同定などを行うものである。ここでは、まず初期破壊進展の様子 (イベント) に注目し、CFRPPとCFRPの破壊挙動の違いを調べた。次に、破断面のSEM (電子顕微鏡) 観察により、界面接着性を低下させている要因について調べた。

D-2 AE法とは

Acoustic Emission (以下AE) は、「材料が変形したりき裂が発生したりする際に、材料が内部に蓄えていたひずみエネルギーを弾性波として放出する現象」と定義されている。この弾性波を材料の表面に設置した変換子すなわちAEセンサで検出し、信号処理を行うことにより材料の破壊過程を評価する手法がAE法である^{D1)}。

D-3 AE法によるCFRPPの引張破壊挙動

Fig. D1 および D2 は、AEの測定結果を示した図である。そのほかの測定結果については、章末に添付する資料を参照されたい。測定は、日本フィジカルアコースティクス株式会社のAE測定装置 (AEセンサ: R15, 信号処理: MISTRAS) を用いて行った。試験は、UD8成形法で成形したCFRPPとCFRPの一方向強化材について実施した。材料の素性をTable D1に示す。表中の性能は、複合則より予想される理論材料強度である。試験片寸法は、幅18mm×厚1mm×長130mmであり、Vfは40%である。AEセンサは2個取り付けられ、センサ間隔は60mmである。AEセンサは、PHYSICAL ACOUSTICS CORPORATION (A MISTRAS Holdings Company) 製のR15であり、PEAK FREQUENCYは153.91kHz、BAND PASSは100kHz - 300kHzである。

Fig. D1 および D2 から、CFRPの場合は破断直前に内部損傷が発生し破壊に至るのに対して、CFRPPの場合は、負荷直後から内部損傷が徐々に発生しその蓄積で破壊に至っ

ていることがわかる。また、試験後のマクロ的な観察から、CFRP は引張とせん断が混合した分断破壊であるのに対し、CFRPP は「ほうき状」の破壊であった。特に CFRPP の方は、中央層の未含浸箇所や繊維不整が目立ち、繊維の多くは破断せずにつながっていた。CFRP、CFRPP 共に、炭素繊維の限界ひずみがマトリックスの限界ひずみよりも小さいため、界面がしっかり接着していれば、最終破壊は本来、繊維破断が先行し、続いてマトリックスの分断が起こる。従って、弾性波の放出形態は繊維破断が次々と開始される試験後半で出るとする Fig. D1 および D2 の(a)が正しい。しかしながら、CFRPP の場合には試験前半ですでに弾性波の放出ははじまっており、このことと界面の弱さ (CFRP の約 $1/3 \sim 2/5$) は何らかの関係があると思われる。まず考えるのは、弾性波が放出されているということは、エネルギーを解放する要因があるということである。一番に考えられるのは、内部欠陥からのき裂進展であるが、成形品の Vf は目標値である 40% に近いので、大きなボイドが混在しているとは考えにくく、ボイドまわりの応力集中によるき裂進展はないと思われる。マトリックスに熱可塑性樹脂を用いた炭素繊維強化複合材料の破壊指標 K_{Ic} は、CFRP のそれに比べると若干小さいかも知れないが、例えば界面が十分に接着されていない状況においても結局は繊維強度に依存するものと考えられ、また、たとえマトリックス中のき裂進展が開始しても与えられたひずみに対して極めて遅延的であると推測されるため、このように連続的に弾性波が放出されつづけるのは理解に苦しむところである。残る可能性は、繊維-マトリックス界面近傍における何らかの損傷進展であるが、この初期損傷の原因追及のため SEM 観察にて破断した材料の繊維まわりを重点的に調べてみることにした。

Table D1 Composition of composites.

Composite	Fiber	Resin	Vf	E GPa	ϵ	σ MPa
CFRPP	TORAY T700SC	IDEMITSU J3003GV	40 %	93.3	2.1 %	1 958
CFRP	TORAY T700SC	WEST SYS. 105/206	40 %	93.9	2.1 %	1 972

E is 230 GPa, 2.10 GPa, 3.17 GPa of T700SC, J3003GV, 105/206.

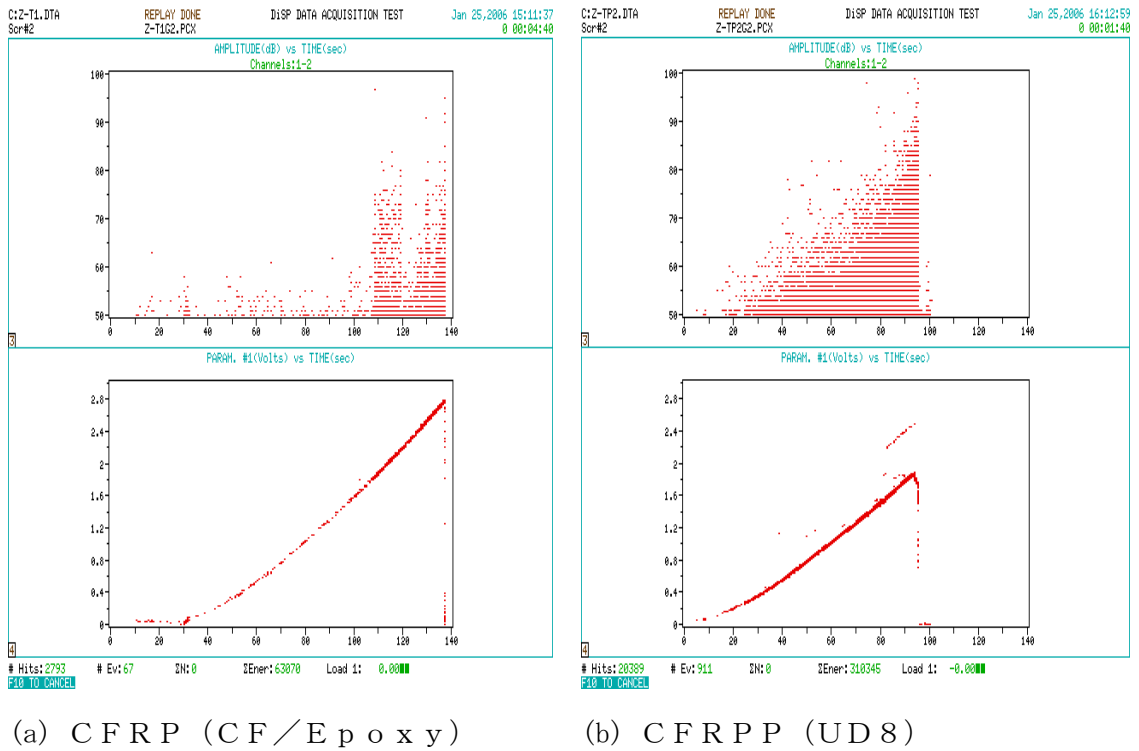


Fig. D1 Difference of fracture appearance by AE method (amplitude).

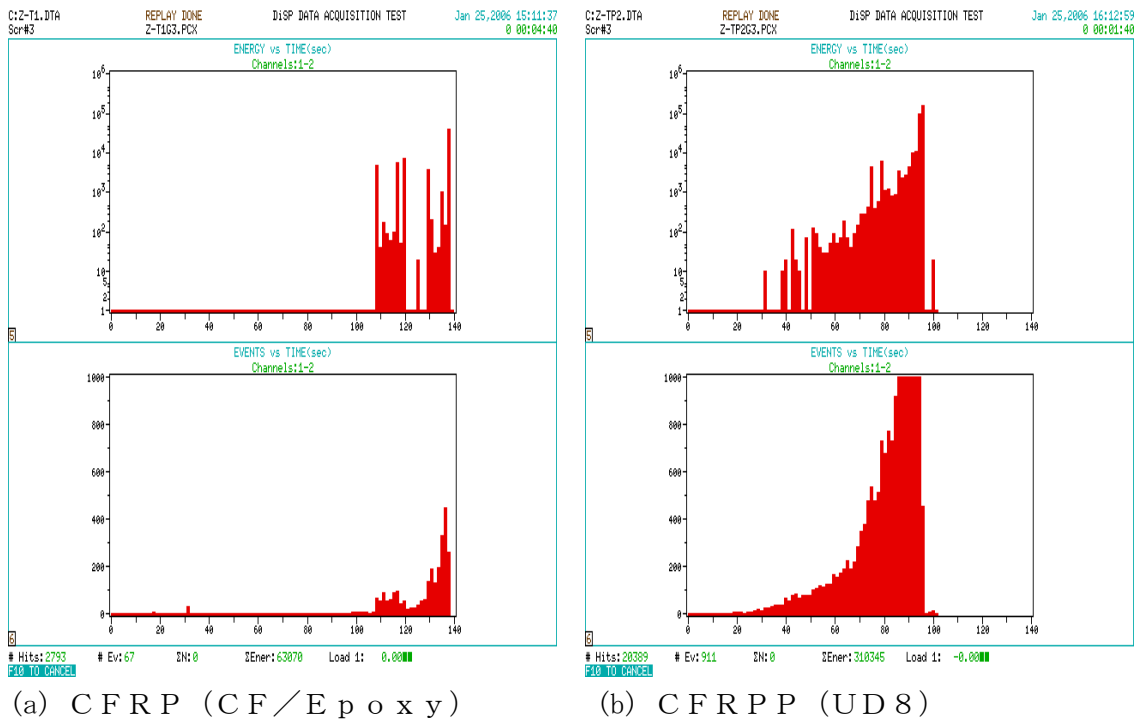


Fig. D2 Difference of fracture appearance by AE method (Energy and Events).

D-4 SEM (電子顕微鏡) による観察

初期損傷の原因はどこにあるのかを調べるために、試験後の試験片のSEMによる破面観察を行った。Table D2 はせん断破壊をしている箇所を2,000倍に拡大したSEM像であり、Table D3 は引張分断破壊をしている箇所を2,000倍に拡大したSEM像である。CFRPP は、先にも述べたとおり、繊維破断はみられずほうき状の破壊であったために、いずれもCFRPPについては破面を荷重方向と直交する方向から観察した。

Table D2 から、接着の良いCFRPの界面の様子や含浸の良さがうかがえるが、これとCFRPPとを対比させてみると、含浸は良好であるが接着の悪さの原因がわかる。繊維が抜けた箇所の表面は、CFRPのように凹凸はみられず滑らかであり接着の悪さを示す証拠のひとつかも知れないが、これは熱可塑性樹脂を構成する高分子の性質であるとも理解できる[†]ため、決定的ではない。むしろ、繊維まわりに発生している1~15 μm 程度のマイクロボイド (Table D2) や、繊維に沿って荷重方向に伸びるボイド起点のき裂成長 (Table D3) の方が、界面接着の悪さを説明していると考えられる。そしてこのボイドやき裂成長は、繊維まわりのPP結晶質で発生していることは確かであり、この改善が望まれる。各論でも述べたが、繊維まわりのPP結晶化は力学特性改善に大きな影響をもたらした。しかし、おそらくは冷却過程で非結晶質に比べてボイドを形成しやすい性質や、あるいはき裂が成長しやすい性質が、結果的に界面接着問題の解決を停滞させているのが現状のようである。

このように、AE法で確認された初期損傷は、繊維まわりのマイクロボイドの連鎖的な合体や、き裂成長によってもたらされていると考えられ、このことがCFRPPの界面接着がCFRPの約1/3~2/5である一因であると推察される。

[†] エポキシは、成形時では低分子量であるが、成形の進行に伴い材料内部で架橋反応を繰り返して重合していくことで高分子量となるため、繊維のサイジング剤とも化学的な極めて強力な結合が可能で強固な接着であり、SEM像にあるような凹凸のある破面を呈する。しかしながら、ポリプロピレンは、はじめから高分子量であり、繊維のまわりを包むように固め、繊維自身との化学的な結合よりは分子鎖のからまりや、物理的な吸着による接着であるために、凹凸のない滑らかな破面を呈すると考えられる。

Table D2 Observation of fracture surface (shear) by SEM.

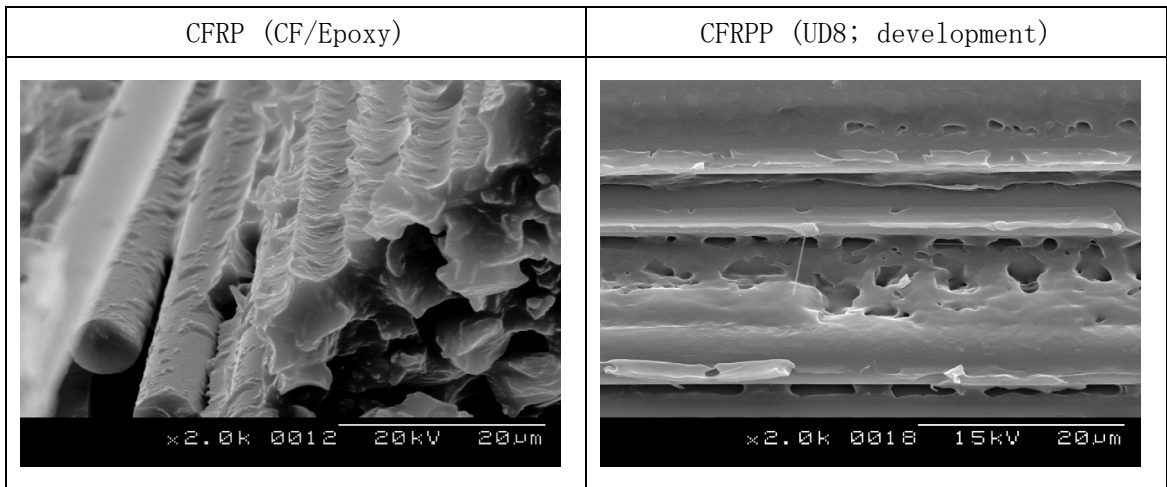


Table D3 Observation of fracture surface (tension load direction) by SEM.

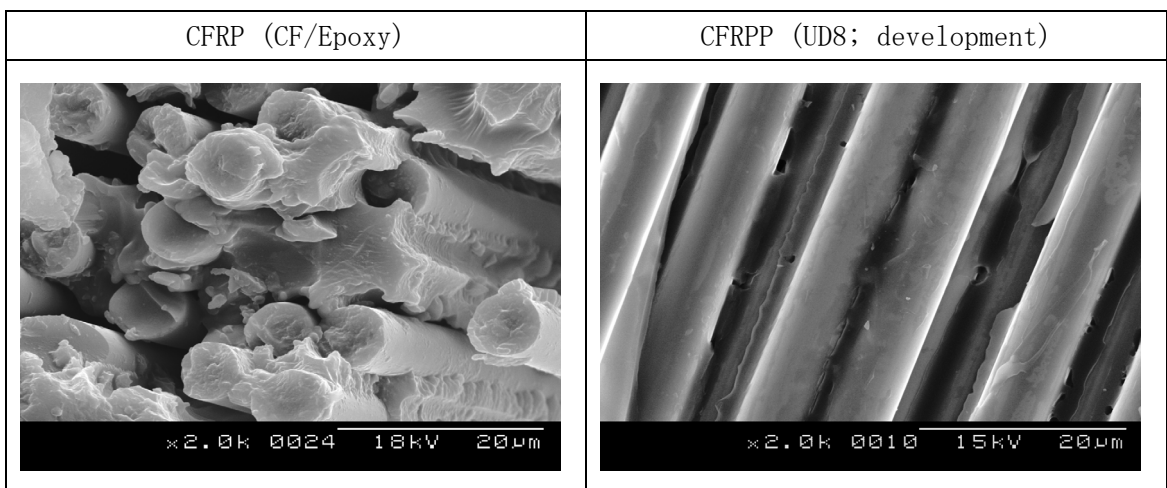


Table D4 Failure conditions of CFRP and CFRPP in static tension test.

	CFRP (CF/Epoxy)	CFRPP (UD8, development)
Breaking Load, N	27 259	18 349
Failure Strain, %	1.96	1.50
First AE signal occurring	from 1.25 % of strain	from 0.25 % of strain
Fracture appearance	tension - shear	broom
Observation by SEM	<ul style="list-style-type: none"> • without void • good impregnation 	<ul style="list-style-type: none"> • Occurring micro voids around fibers

D-5 おわりに

界面接着問題の原因を、AE測定とSEM観察を通じて定性的に調査した。従来のCFRPに比べてCFRPPにはかなり早い段階での初期損傷が認められ、その初期損傷は繊維まわりのマイクロボイドの成長や合体、あるいはボイドを起点とした荷重方向に伸びるき裂進展により進行・蓄積されていると考えられる。マイクロボイドやき裂進展は、繊維まわりの結晶質で起こっているため、この改善が望まれる。しかしながら、界面接着の形態が無水マレイン基を介在した化学的結合、高分子のからまりや物理的吸着であり、界面の接着力としては弱いCFRPPにおいて、繊維まわりの結晶化というのは成形法の改良という面では力学的特性の改善に大きな影響をもたらした。改善の方向性としては、1) 結晶質をブロックPPとすることや、2) PP用のサイジング処理あるいは繊維表面官能基を改良した炭素繊維側の改質、などが考えられるであろう。いずれにせよ、界面接着を絶対的にCFRPに近づけなければならない必要はなく、自動車や家電、ロボットに使用するのであれば、航空機用の6～7割で良い。よって、実用化にはあと2、3割の改善が望まれるが、これは各論で述べられた成形法の改良とPPの変更、繊維改質をもつてすれば十分実現可能な目標値である。

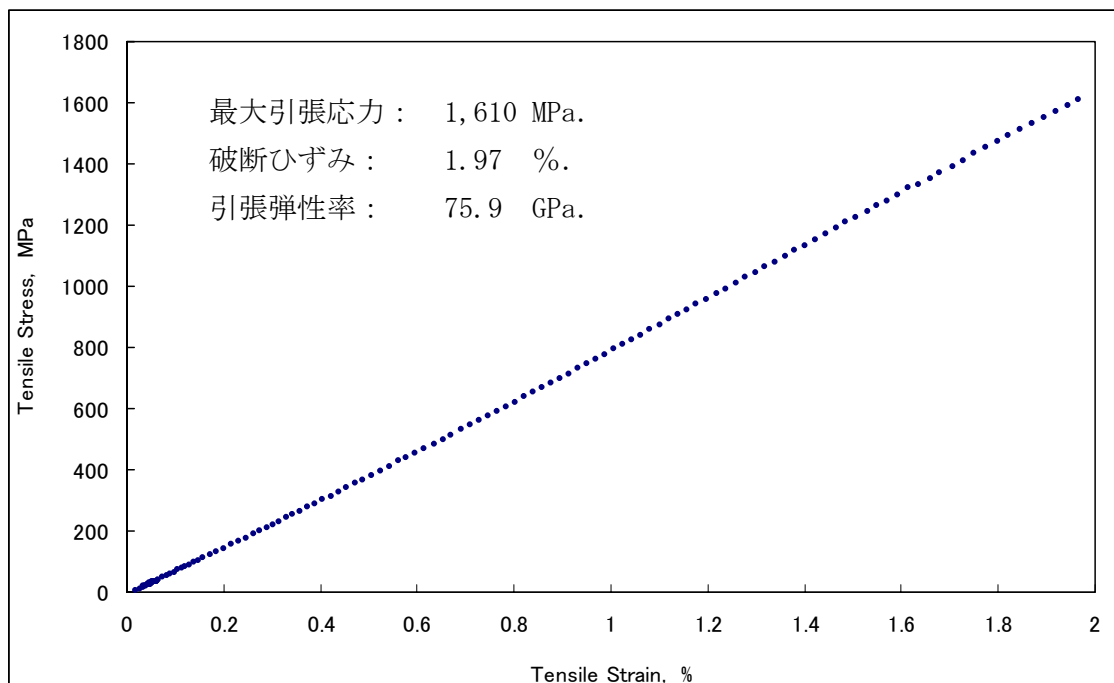
補遺Dで引用した文献等：

D1) NIPPON PHYSICAL ACOUSTICS, LTD. site: <http://www.pacjapan.com/>

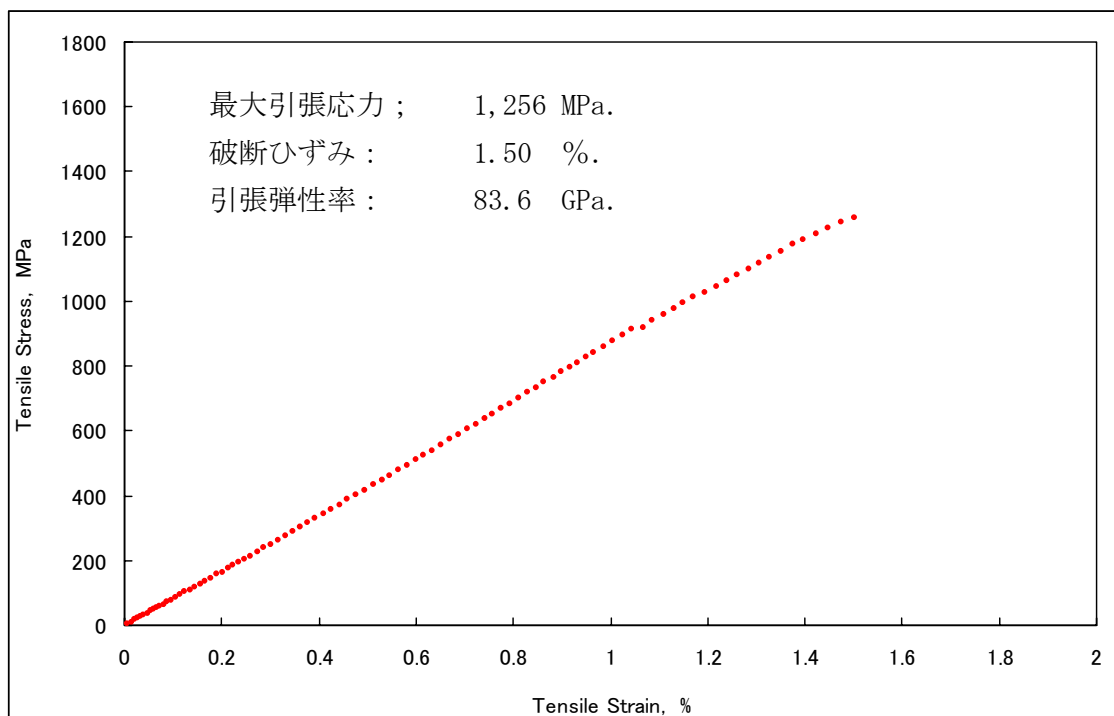
添付資料： AE計測のデータ集（次頁以降）

応力-ひずみ線図

<T700SC-24K/Epoxy (WEST SYSTEM 105/206) > VF=40%.



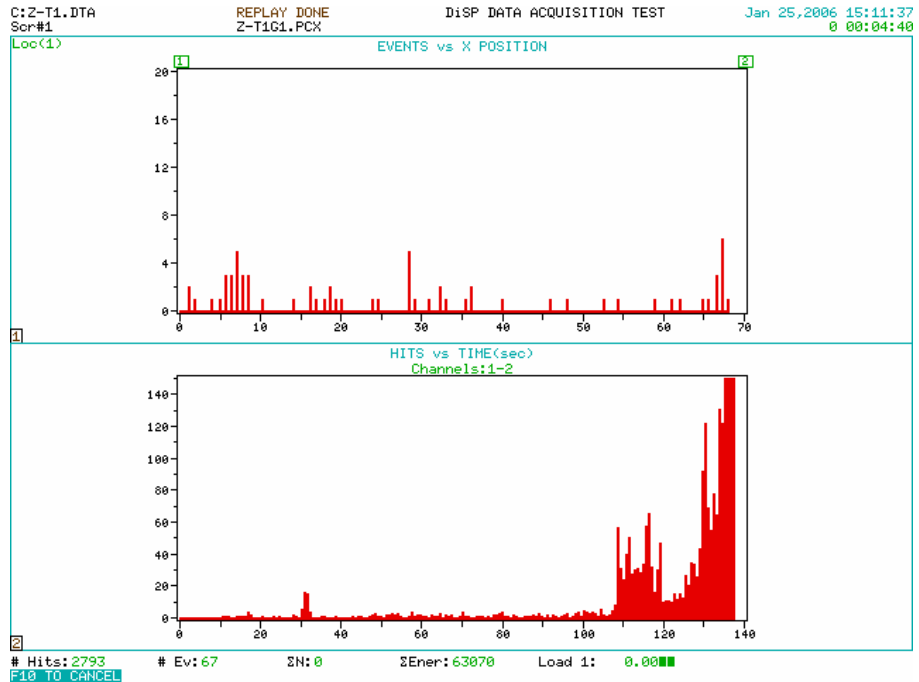
<T700SC-24K/Polypropylene (IDEMITSU PP, J3003GV) > VF=40%.



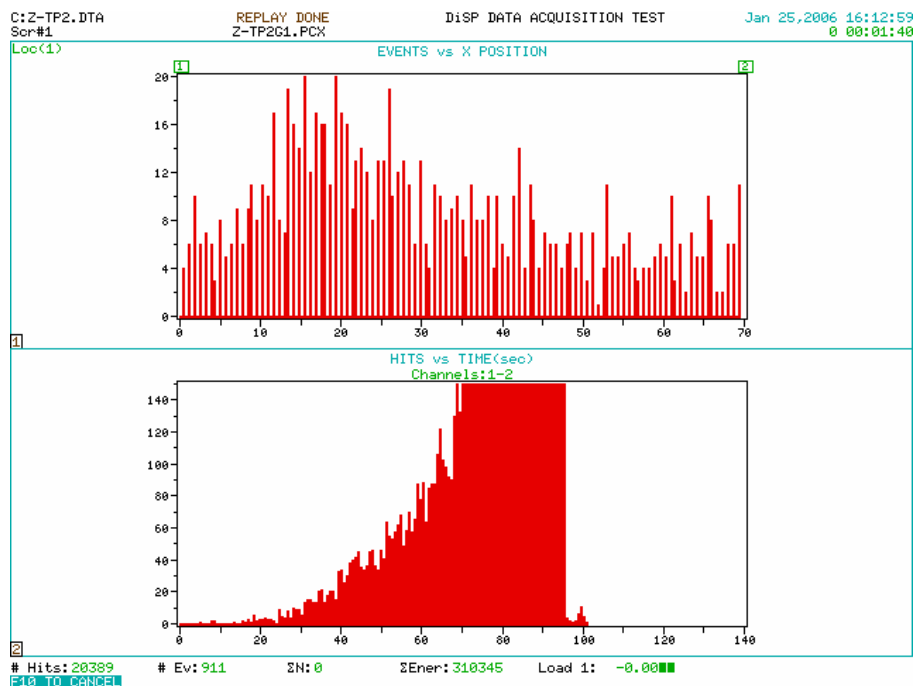
AE計測

① Location, HITS, TIME

<T700SC-24K/Epoxy (WEST SYSTEM 105/206)> VF=40%.



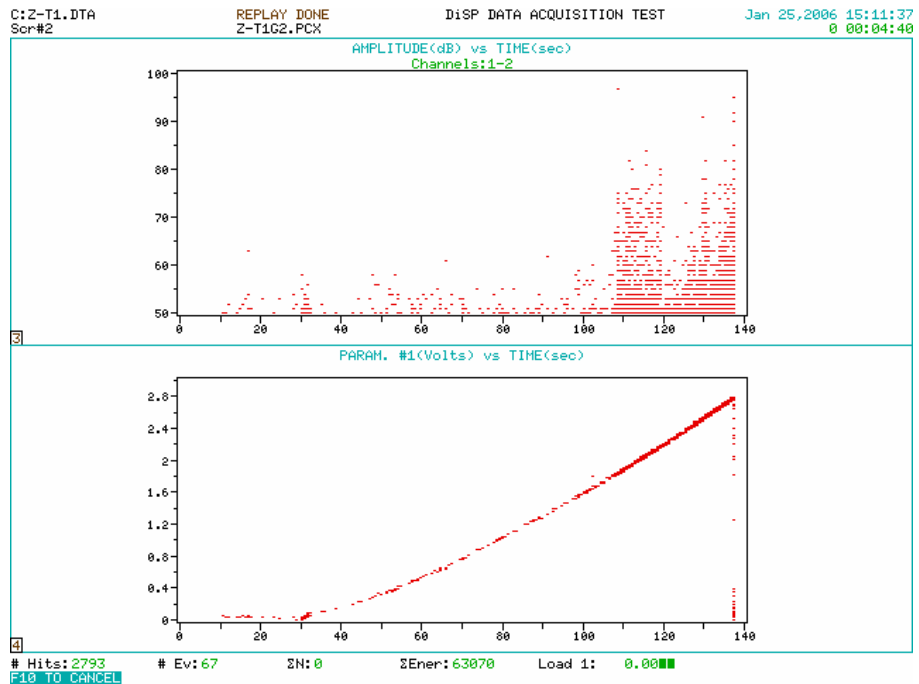
<T700SC-24K/Polypropylene (IDEMITSU PP, J3003GV)> VF=40%.



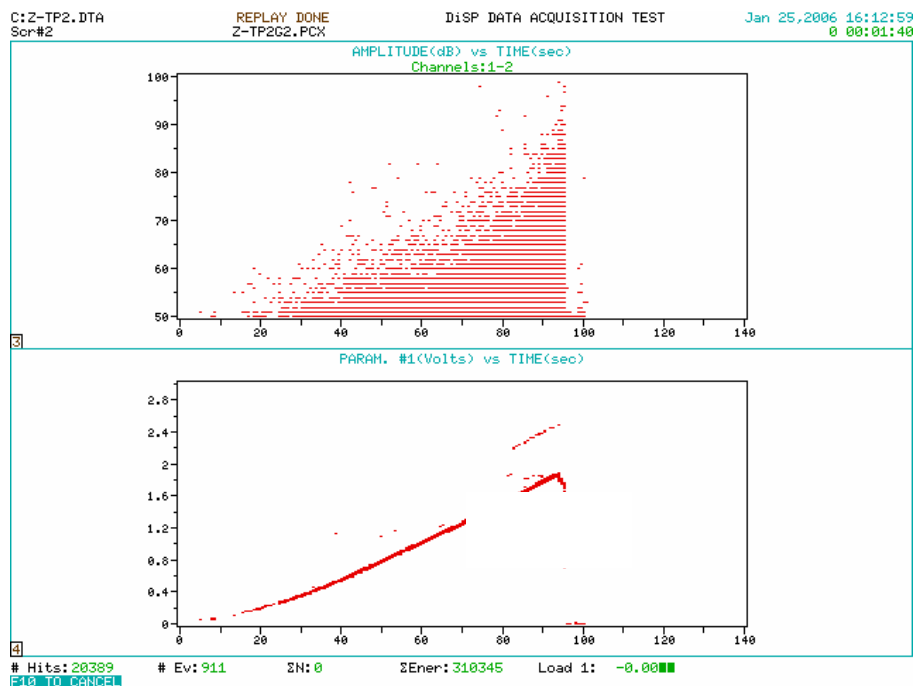
AE計測

② AMPLITUDE, LOAD, TIME

<T700SC-24K/Epoxy (WEST SYSTEM 105/206)> VF=40%.



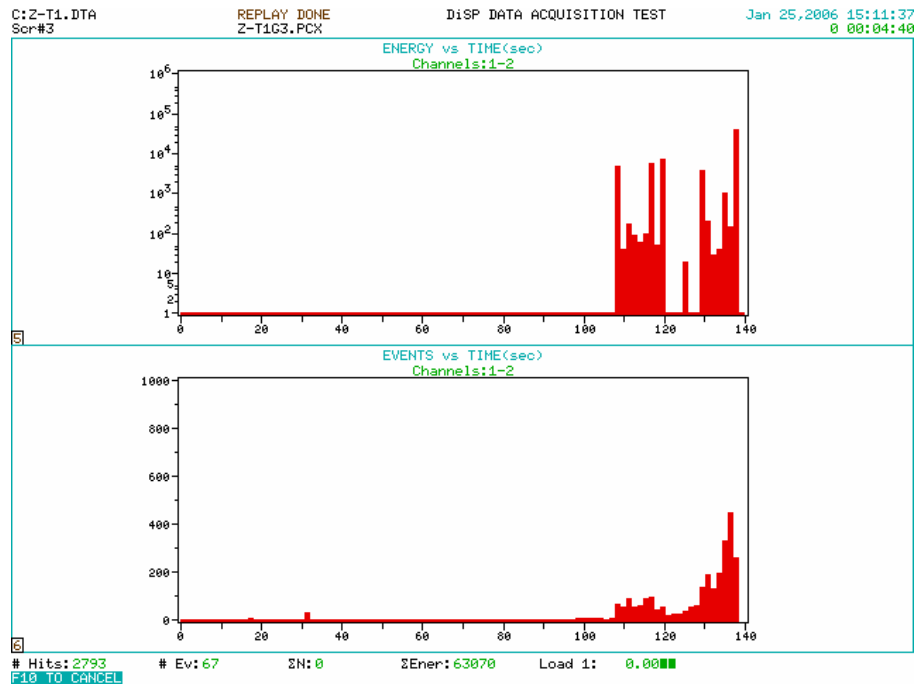
<T700SC-24K/Polypropylene (IDEMITSU PP, J3003GV)> VF=40%.



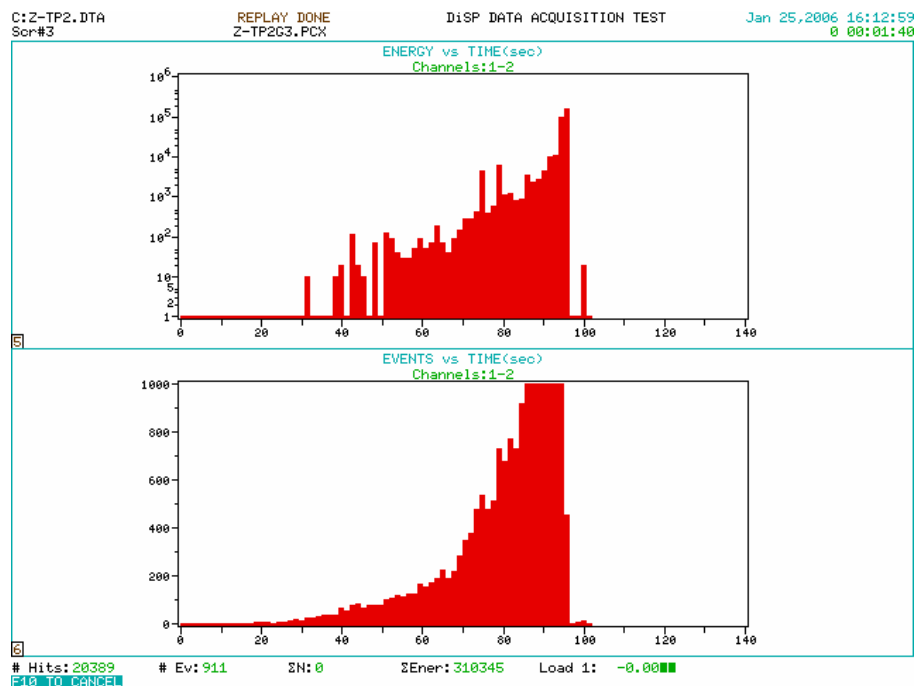
AE計測

③ ENERGY, EVENTS, TIME

<T700SC-24K/Epoxy (WEST SYSTEM 105/206)> VF=40%.



<T700SC-24K/Polypropylene (IDEMITSU PP, J3003GV)> VF=40%.



謝 辞

謝 辞

本論文に関わったすべてのひとたちに、心から感謝を申し上げます。

まず、研究の指導教官であり本論文の主査である、東京大学大学院工学系研究科環境海洋工学専攻安全評価工学研究室の 高橋 淳 助教授には、修士2年からの5年間にわたり公私共にわたりお世話になり、またすばらしい研究環境および研究生活を与えてくださり、心より感謝申し上げます。

つぎに、本論文の副査である、同大学院工学系研究科環境海洋工学専攻の 影山和郎 教授, 湯原哲夫 教授, 鈴木英之 教授, 村山英晶 講師には、貴重なお時間を頂戴し、重要なご意見, アドバイス等をしていただき、大変お世話になりました。本論文を書き上げることができましたのも、すべて皆様のお陰であります。ありがとうございました。

また、応力研の金田助手, 渡辺技官, 森田技官には、実験や研究生活をよくするために尽力していただきました。ありがとうございました。

機装研の大澤助手, 鶴沢助手, 金井技官には、特に成形や力学試験でサポートしていただき、貴重なご意見を頂戴いたしました。ありがとうございました。

材料研の、博士課程また研究室の長として共に歩んできた、鈴木徹也氏、いまは休学中ですが環境に関して白熱する議論を交わした折口壮志氏をはじめ、修士院生の円谷氏、福井氏、松塚氏、山本氏、芦田氏、上迫氏、佐藤氏、学部生の前浦氏、志田氏には、筆者の研究生活のうえで大変重要な共同研究者でありました。ここに感謝いたします。

材料研をすでに巣立たれた、長岡氏、月森氏、森本氏、菅氏、名越氏、尾台氏、中塚氏もすばらしい共同研究者でした。ここに感謝いたします。

最後になりますが、勉学することを長きにわたり許して下さり援助して下さった両親と、本論文執筆中に結婚した最愛の妻 圖子 美紀 に心から感謝申し上げます。

以 上

平成17年12月

東京大学
大学院工学系研究科環境海洋工学専攻
安全評価工学研究室

圖子 博昭

論 文 目 録

【印刷論文】 2 件

[1] H. Zushi, J. Takahashi, K. Kageyama, H. Murayama, H. Nagai and J. Matsui: Life Cycle Assessment and Long Term CO2 Emission Estimation of Ultra Lightweight Vehicles Using CFRP, Progress in Experimental and Computational Mechanics in Engineering, Trans Tech Publications Ltd., Key Engineering Materials, Vols. 243-244, (2003-2), pp. 45-50.

[2] 圖子博昭, 田村学, 大澤勇, 鵜沢潔, 高橋淳, 安田浩: 炭素繊維一方向強化ポリプロピレンの力学特性評価, 日本複合材料学会誌, Vol. 32, No. 4, (2006-7), 掲載予定.

【講演論文】 (国際学会) 9 件

[3] H. Zushi, J. Takahashi, K. Kageyama, H. Murayama, H. Nagai and J. Matsui: Life Cycle Assessment and Long Term CO2 Emission Estimation of Ultra Lightweight Vehicles Using CFRP, Proceedings of International Conference on Experimental and Computational Mechanics in Engineering (ECM02), (2002-8).

[4] J. Takahashi, H. Zushi, T. Suzuki, H. Nagai, K. Kageyama and H. Yoshinari: Life Cycle Assessment of Ultra Lightweight Vehicles Using CFRP, Proceedings of the Fifth International Conference on EcoBalance, (2002-11), pp. 259-262.

[5] T. Suzuki, T. Fukuyama, H. Zushi, T. Origuchi and J. Takahashi: Evaluation of Effects of Lightening Trucks on Environment by LCA, Proceedings of the 3rd International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing (EcoDesign 2003), (2003-12), pp. 344-347.

[6] H. Zushi, S. Sawada, T. Suzuki, T. Origuchi and J. Takahashi: Effect of Lightened Automobiles on the Environmental Problem due to Asian Motorization, Proceedings of the 3rd International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing (EcoDesign 2003), (2003-12), pp. 473-476.

[7] H. Zushi, T. Odai, I. Ohsawa, K. Uzawa and J. Takahashi: Mechanical Properties of CFRP and CFRTP After Recycling, Proceedings of Fifteenth International Conference on Composite Materials (ICCM-15), (2005-6), pp. 1-10.

[8] H. Zushi, D. Shiozawa, I. Ohsawa, K. Uzawa and J. Takahashi: Improvement of Mechanical Properties of Recycled CFRP Reinforced by Thin CF/PP Sheets, Proceedings of Advanced in Ecomaterials incorporating the Seventh International Conference on Ecomaterials (ICEM7) of Symposium Q in 3rd International Conference on Materials for Advanced Technologies (ICMAT 2005) and 9th International Conference on Advanced Materials (ICAM 2005), Stallion Press, Vol. 2, (2005-7), pp. 512-519.

[9] H. Zushi, I. Ohsawa, M. Kanai, K. Uzawa and J. Takahashi: Fatigue Properties of Carbon Fiber Reinforced Polypropylene, Proceedings of Ninth International Conference on Japan International SAMPE Symposium and Exhibition (JISSE9), (2005-11), pp. 26-31.

[10] R. Fukui, T. Odai, H. Zushi, I. Ohsawa, K. Uzawa and J. Takahashi: Recycle of Carbon Fiber Reinforced Plastics for Automotive Application, Proceedings of Ninth International Conference on Japan International SAMPE Symposium and Exhibition (JISSE9), (2005-11), pp. 44-49.

[11] N. Matsutsuka, J. Takahashi, H. Zushi, I. Ohsawa and K. Uzawa: Evaluation of Recycled CFRTP for Mass Production Applications, Proceedings of Ninth International Conference on Japan International SAMPE Symposium and Exhibition (JISSE9), (2005-11), pp. 50-55.

【講演論文】 (国内学会) 14 件

[12] 高橋淳, 圖子博昭, 影山和郎, 吉成仁志: 地球温暖化対策技術としての乗用車軽量化の効果と材料研究の役割, 日本機械学会 2002 年度年次大会講演論文集 (II), (2002-9), pp. 271-272.

[13] 圖子博昭, 高橋淳, 影山和郎, 吉成仁志: CFRP による超軽量乗用車の実現可能性—走行時の CO₂ 排出抑制と省エネ効果の長期予測—, 日本機械学会 2002 年度年次大会講演論文集 (II), (2002-9), pp. 273-274.

- [14] 長岡悟, 圖子博昭, 高橋淳, 吉成仁志, 影山和郎: CFRP による軽量乗用車の社会受容性評価 (コストと 3R 性の観点から), 日本機械学会 2002 年度年次大会講演論文集 (II), (2002-9), pp. 275-276.
- [15] 鈴木徹也, 手柴富美, 圖子博昭, 高橋淳, 影山和郎, 吉成仁志: CFRP 車の LCA, 日本機械学会 2002 年度年次大会講演論文集 (II), (2002-9), pp. 281-282.
- [16] 圖子博昭, 澤田真一, 鈴木徹也, 折口壮志, 高橋淳: CFRP による軽量化乗用車の長期的環境エネルギー問題対策効果, 日本複合材料学会 2003 年度研究発表講演会予稿集, (2003-5), pp. 81-82.
- [17] 鈴木徹也, 福山哲士, 圖子博昭, 折口壮志, 高橋淳: CFRP による軽量化トラックの LCA, 日本複合材料学会 2003 年度研究発表講演会予稿集, (2003-5), pp. 83-84.
- [18] 圖子博昭, 田村学, 高橋淳, 大澤勇, 金井誠, 鵜沢潔: 不連続炭素繊維強化ポリカーボネートの簡易プリフォーム法, 第 48 回 FRP CON-EX 2003 講演要旨集, (2003-10), pp. 114-115.
- [19] 中塚史紀, 圖子博昭, 高橋淳: 地球環境問題対策としての CFRP による軽量化自動車開発の必要性, 第 48 回 FRP CON-EX 2003 講演要旨集, (2003-10), pp. 69-71.
- [20] 圖子博昭, 田村学, 大澤勇, 鵜沢潔, 金井誠, 高橋淳, 安田浩: 炭素繊維強化ポリプロピレンの力学特性の改善, 第 29 回複合材料シンポジウム講演要旨集, (2004-10), pp. 211-212.
- [21] 尾台竜也, 圖子博昭, 大澤勇, 鵜沢潔, 高橋淳: CFRP 破砕材を利用した CFRP リサイクルの提案, 第 29 回複合材料シンポジウム講演要旨集, (2004-10), pp. 197-198.
- [22] 圖子博昭, 大澤勇, 鵜沢潔, 高橋淳: CF/PP シートプレスメント法による CFRPP の補強, 第 30 回複合材料シンポジウム講演要旨集, (2005-10), pp. 231-232.
- [23] 福井良平, 尾台竜也, 圖子博昭, 大澤勇, 鵜沢潔, 高橋淳: 廃棄 CFRP のリサイクル性評価, 第 30 回複合材料シンポジウム講演要旨集, (2005-10), pp. 221-222.
- [24] 松塚展国, 高橋淳, 圖子博昭, 大澤勇, 鵜沢潔: 炭素繊維強化プラスチックのクローズドリサイクルの各段階における力学特性評価, 第 30 回複合材料シンポジウム講演要旨集, (2005-10), pp. 223-224.

[25] 山本道隆, 圖子博昭, 大澤勇, 鵜沢潔, 金井誠, 高橋淳: CF/ABS の衝撃吸収能力向上に関する研究 (第1報: 種々の CFRP の力学特性比較), 第30回複合材料シンポジウム講演要旨集, (2005-10), pp. 153-154.

【講演論文】 (本論文と関連しないもの) 2件

[26] 伊藤圭史, 圖子博昭, 中本秀一: ペットボトル自噴水の製作とものづくり教育, 日本機械学会 2004 年度年次大会講演論文集 (5), (2004-9), pp. 403-404.

[27] 伊藤圭史, 圖子博昭, 中本秀一: コンストホンテーインの復元, 日本機械学会 2005 年度年次大会講演論文集 (5), (2005-9), pp. 57-58.

【受賞】 1件

(1) H. Zushi, S. Sawada, T. Suzuki, T. Origuchi and J. Takahashi: Effect of Lightened Automobiles on the Environmental Problem due to Asian Motorization, Proceedings of the 3rd International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing (EcoDesign 2003), (2003-12), pp. 473-476, Best Poster EcoDesign 2003 Award.