

## 繊維コンクリート Fiber concrete

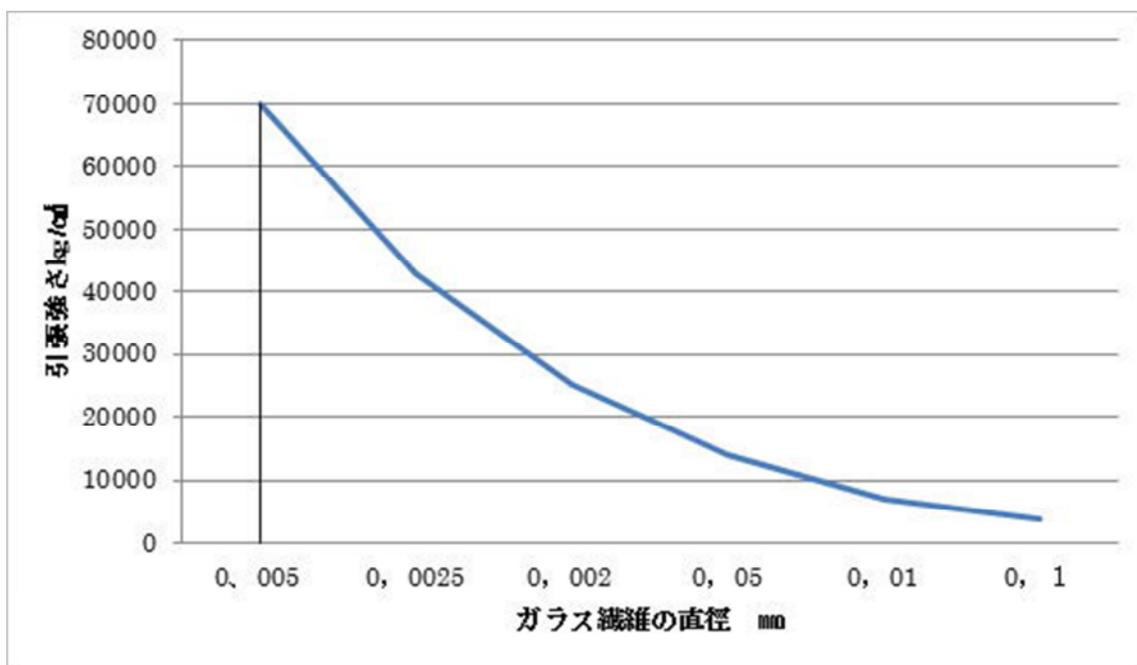
### まえがき

繊維補強コンクリートとは、セメントモルタル或いはコンクリートとバラバラな繊維とからなるコンクリートである。

使用する繊維はアスベスト、合成繊維、ガラス、金属及びカーボン等であり、現在セメント複合材としてはコンクリート脆性の改善に役立てる数多くの研究が続けられている。

これらの繊維の中から、ガラス繊維が仕様されるようになったのは、ガラス繊維の強度がその直径が小さくなるに付け何倍も増加されるという Griffith(1920年)の研究から始まる。

図 1



(Montore より)

上図で見られるように直径がすくなくなると引張強さも高くなるが、同時に、脆くて折れ易い性質も加わるので、通常は直径を約 $12\mu$ の単繊維を200本程度に撚った **Strand** としてマトリックス (matrix) と結合させその高強度を応用すると共に折れ、

繊維補強の力学的特性については応力及び弾性率の複合則 (Low of mixture) とか繊維が応力方向に何%有効に作用するかを示す配列有効係数とか、Romualdi や Mckee の繊維間隔の理論、アスペクト比を加えた終局強度理論、破壊まで供試体が吸収するエネルギー量を取り扱うタフネス理論等々の可なりの研究成果が発表され種々の製品開発への道を開きつつある現状である。

ここでは、繊維と複合体の補強効果についての概略と製品開発及び製品応用事項について

1. 繊維、
2. 繊維を混入したセメント複合体の補強効果、
3. 成型方法、
4. 製造導入法、
5. 開発将来性

について報告する。

## 1. 繊維

現在実験若しくは利用されている繊維は金属、化学有機、無機物及び植物繊維等があり、それらの物性的性質は下記のとおりである。

表 1

名 称	引張り強さ kg/ cm <sup>2</sup>	ヤング係数× 10 <sup>4</sup>	比重	終局伸び 率	軟化熔融点
スチール	2,800~4,200	210	7,8	3~4	(500)1,400
ガラス	14,000~35,000	80~120	2,7	2~3	(838)
炭素繊維	19,000~26,600	195~245	1,7	0,4~1	
アスベスト	5,600~9,800	84~140	2,9	2~3	

ポリプロピレン	5,600～7,700	2～5	0,9	25～60	(140)
ナイロン	7,700～8,400	2～9,5	1,1	28～45	(180)
セメントペースト	40～140	21	2,5	0,04～0,06	

※：FP は参考 引張り強さは線径によりことなるも

### (1) アスベスト

アスベストはセメントペーストと旨く結びつけられるので、アスベストセメントと呼ばれる製品が作られていた。

成形は一般に抄造法が主でアスベストを 8～16%容積比で含み曲げ強度はマトリックスのセメントが 2～4 倍に達している。 アスベストは天然資源で世界的に減少する方向にあり、アスベストの埃はアスベスト症と呼ばれる職業病の原因となると現在では世界的にその使用は禁じられている。

### (2) 有機物

綿、レーヨン及び、ポリエステル党派アルカリによって劣化されるが、ナイロン、ポリブ浸食は受けない。

一般にこれらの繊維は男性係数が低いため、使用するマトリックスの複合体として強度の減少を来す。 また、付着力がスチールの 1/10 にも達しにもないものもあるし、セメントペーストとの分散性も悪い。

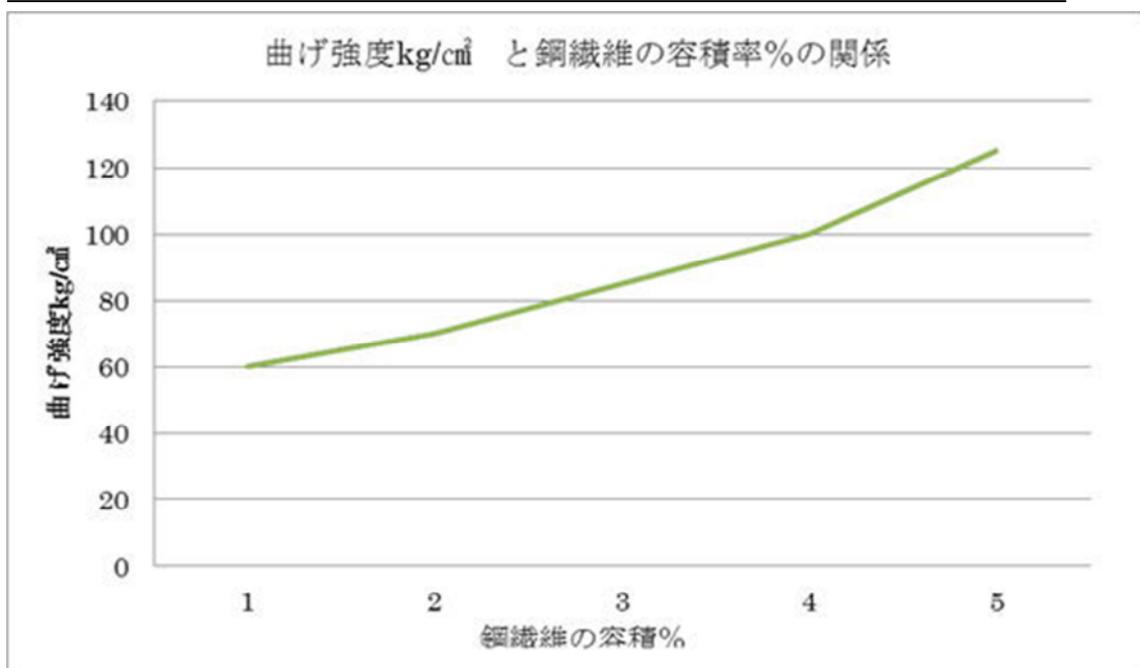
しかし、安価であること、衝撃抵抗の向上などの特色があるので研究の必要はある。

### (3) 金属

金属繊維は一般には安価でヤング係数も大きく付着力、破断時の伸び率も大きく、コンクリートの分散性もよいので、複合体の曲げ強度を著しく改善させている。

鋼繊維はコンクリートのアルカリ性環境の中では侵されないで、特に適している。 繊維の直径は 0,25～0,51 mm、長さは、12,7～50,8 mm程度で、アスペクト比 100、長さ約 25,4 mmが多く利用されている

図 2



(Shas—より)

図 2 はスチールファイバーの混入量と曲げ強度との関係図である。ある範囲での繊維量は曲げ強度との関連として、直線的に捉えられていることを示している。

但し、鋼繊維とモルタルまたは、コンクリートの Premix の場合繊維のボウリングやフロー値（スランプ）の低下など、繊維の分散性の悪化をきたし、繊維量の問題以上に、複合体の強度増加効果を減少することが多い。

#### (4) 炭素繊維

炭素繊維は高級炭素と石油ピッチから生産される中級炭素とがあり、何れも優れた物性を持つ代わりに高価である。(大洋化研製でクレハチョップ—CF で、1kg:@7,000 円 昭和 50 年当時価格)。

前期に示した以外の物性で、同製品の物性は、次の通りである。

名 称	摘 要
直 径	10 $\mu$
炭素含有量	99,5%

電気比抵抗	10×10 <sup>-5</sup> Ω-cm
吸着水分量	10%
熱伝導率	15Kcal/mhr°C
酸化開始温度	310°C (吸気中)

炭素繊維はセメント中のアルカリには全く侵されず、対候性、耐薬品、耐水性に優れ、比重が小さい割には引張り強度が強く摩擦係数も低い。

#### (5) ガラス繊維

ガラス繊維を複合体に使用すると優れた面が多いことは従来から知られ、FRP, FW 材としてなくてはならない存在になっている。

これ等は、マトリックスとしてレジンを使用してきたが、比較的取り扱いが簡単なセメントに代えて見るという転換が試みられた。

元来、ガラスはアルカリに侵され易いため、ガラス繊維をアルカリから防ぐためのコーティングとか、酸化ジルコニウムを含むガラス繊維の開発が進み、現在ではアメリカの **Owence-Corninglas** 社とイギリスの **Pilkington Fiberglas** 社の 2 社によって商品化するに至っている。

ガラス繊維は前項で述べたように、その表面に割れ目を持たず、特別な内部構造を持つため、比強度を著しくします。また、微細な割れ目が水分に覆われると更に強さが増す実験もされたが、同時に極めて大きな単位重量当りの表面積を持ち、その表面の水分に早く浸食されるという欠点もある。

## 2. 繊維補強効果

プレーンモルタルまたは、コンクリートは外圧によって引張側に亀裂が入るとすぐに破壊に至る。このモルタルの脆性を改善するためにアスベスト混入するとか、古くは赤土に藁屑を混ぜたり、石灰にすさを混ぜて漆喰にして、壁塗りの材料として使用していた。

繊維混入によって、複合体の引 1963 年張強度を増す要因はマトリックスよりも引張強度が高く、伸び能力大きく剛性の高い繊維がマトリックスとの付着強度によって、ひび割れの増加を防ぐことにある。

また、繊維の混入量と引張または曲げ強度との関係は、1963年に特許を採った Romualdi と Ratson の繊維間隔の理論 (Spacing) に始まる。

$$S=13,8 d \sqrt{1/p} \text{-----(1)}$$

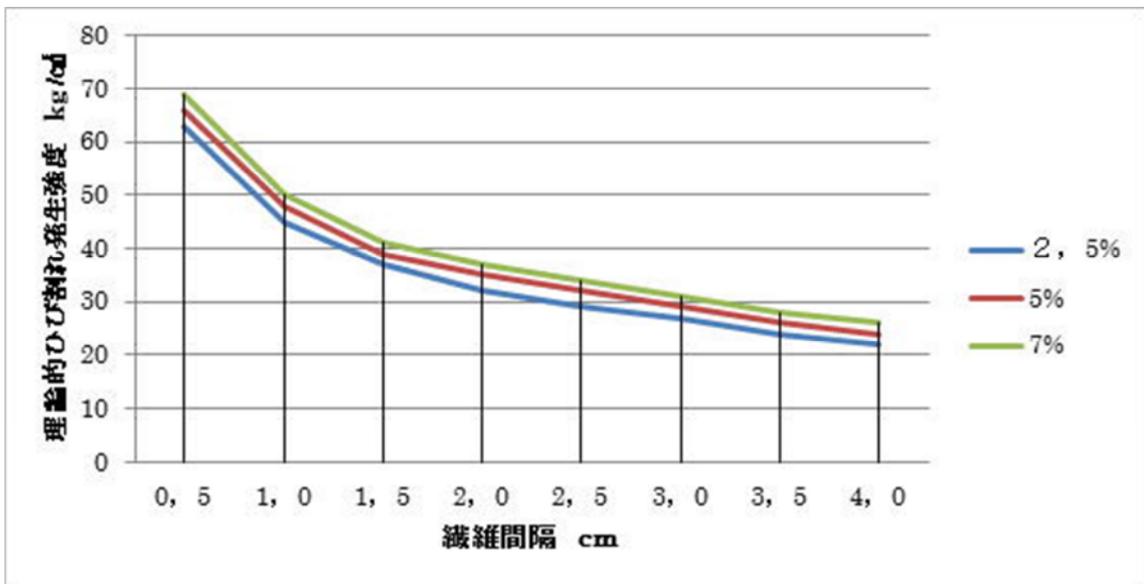
ここに:S=繊維の中心間隔

d = 繊維の直径

p = 繊維の体積率 (° /vol)

Romualdira らは Griffith のクラックの概念からこれに抵抗して引張強度を増大させる応力と繊維間隔との関係をマトリックスの応力係数を媒介として理論的に求めた。その理論的な亀裂発生引張強度のグラフを示す。

図 3



(ACI Committee 544)

Mckee は (1) 式と異なる次式を提案した。

$$S=3\sqrt{V/P}$$

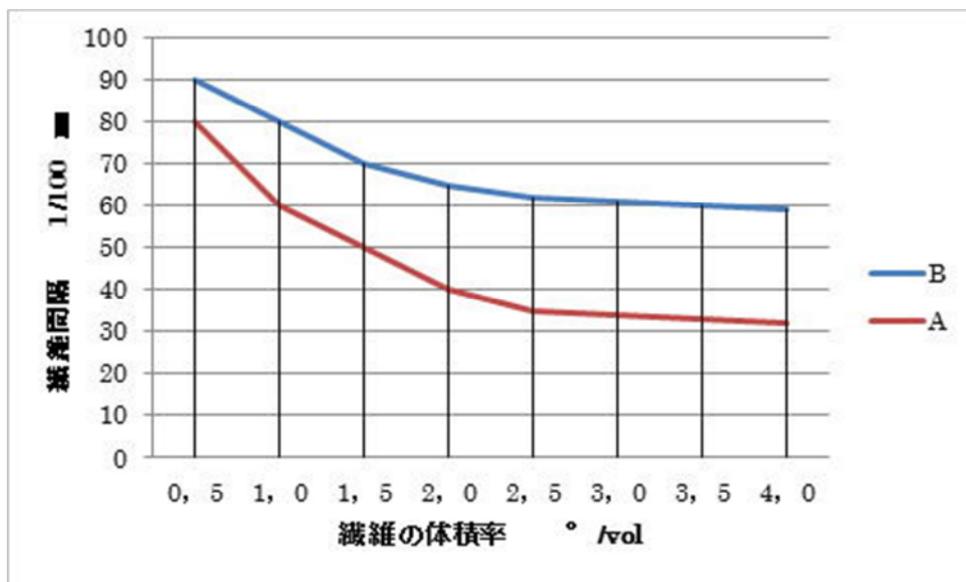
ここで、Vは1本の繊維の体積、Pはモルタル中の繊維の体積率である。

(1) 式と(2)式の比較を図に示すと次の通りである。

$$\text{ここで、A= Mckee } S=3\sqrt{v/p}$$

$$\text{B= Romualdi } S=13,8d\sqrt{1/p}$$

図 4



(ACI Committee)

Snyder や Lankard は「亀裂発生強度は繊維の平均間隔のみならず繊維の長さも関係する」として実験結果やアスペクト比 ( $L/d$   $L$ =繊維の長さ  $d$ =径) で示した。

強度比 (縦軸) と繊維の間隔 (横軸) 関係図

図 5

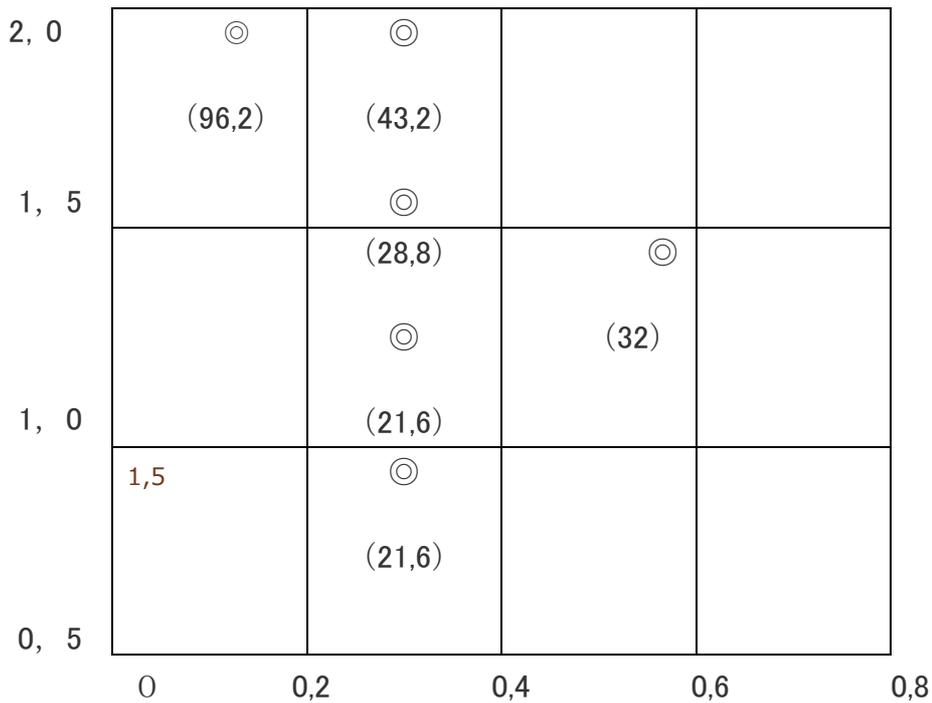


図 5 は繊維の容積比 2.1%の補強における鋼の間隔のかんすうとしての強度比を示す。

( ) の数字はアスベスト比であり、図 5 で見る限り強度にかんけいするのは鋼繊維間隔より、寧ろ、アスベスト比のほうが大きいものと考えられる。

Swanmy と Mangat は実験結果より複合体の引張強度の方程式を次のように提案した。

$$S_c = 0.97 S_m (1 - V_f) + 3.41 V_f L/d \text{-----} (3)$$

ここに  $S_c$  = 複合体の強度

$S_m$  = 複合体のマトリックスの強度

$V_f$  = 繊維の有責含有量

$L$  = 繊維の長さ

$d$  = 繊維の径 (  $L/d$  = アスペクト比 )

定数 0.97 及び 3.41 は各々繊維の付着力や繊維の分散 (配列の方向性) 状態によっておこるもの。

なお、強度と繊維の容積に対す強度比は別項で示す。

別項を読む。

### 3. タフネスについて

タフネスとは供試体を完全に破壊するまでに吸収するエネルギー量と定義する

繊維コンクリートの荷重—たわみ曲線上の A 点を超えると非線径的であり、B 点で最大荷重となり終局強度になる。従来のコンクリートとはことなり繊維コンクリートの強度は徐々に引張力を受けてくる繊維によって決まり、その時の繊維は依然として破壊をしていないのが普通である。従って、繊維コンクリートとふつうコンクリートのたわみ荷重曲線は異なった形状を示す。

タフネスについての資料を続けて読む

### 4. 繊維コンクリートの成形方法

複合体、特にガラス繊維セメントの複合材の特色は強度、耐衝撃性及び耐水性等において優れ、その製品応用への開発が進められている。FRP のマトリックスをレジンカラセメントに代えたという概念からスプレー方式で成形する工法が多くその応用製品の形状、用途も近似している。例えば、上記特性を生かして床、壁、屋根等のプレキャストパネル、カーテンウォール等の化粧版カラボード、ポンツーン、容器、パイプ等に至るまで、薄いプレキャスト部材への応用は広いものと思われる。

次に成形方法を挙げる。

#### (1) スプレーアップ

##### ① 成形方法

一般にスプレーアップ法が多い。その理由は開発の発想が FRP ガラスファイバー生じているので、それらの使用に機器備品をそのまま流用していたところにある。従って、成形物はシート状の成形に適している。

##### ② 使用材料

使用セメントは普通ポルトランドセメント。

細骨材は、相模川産で、FM = 2,90 、比重 = 2,63

粗骨材は、相模川産で、FM = 5,60 、比重 = 2,62

繊維は耐アルカリガラス Cemfil を使用した。

##### ③ 主な仕様

引張強度 = 31,640 kg/cm<sup>2</sup>

弾性係数 =  $6,33 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$

比重 = 2,69

単位繊維径 = 0,0127 mm

単位長さ = 25,4 mm

ストランド当りの単位繊維数 = 204 本

ストランド外表面積/ 単位長さ =  $0,62 \text{ mm}^2/\text{mm}$

#### ④ 配合

配合は実験計画を行って水セメント比、繊維混合率の範囲を決める。主に、遠心成型と転圧成型タイプにおいて、遠心成型は薄肉であることも考慮してセメントペーストを基盤に細骨材を内面仕上げや内面収縮の抵抗材のため補助的に混合した。

表 6

配合 No	水セメント比	粗骨材 10 mm	細骨材	ガラス 繊維	繊維 Prewett	As	投入水	セメント
1	36%	900kg	895kg	44kg			157kg	440kg
2	36	865	865	73	36,5		157	440
3	36	900	910			0,157	157	440
4	38		357	120			540	1420

### 混合、成形について

#### ① 混合

スプレー方式でモルタルと繊維を交互に吹付けると 15%程度の繊維混入が可能であるが、Premix 法でスランプあるコンクリートの繊維の混合は 2%程度がフロー値やスランプの低下、繊維の **boling** 現象等のため困難になる。

金属繊維や有機繊維の混合に際しても種々の繊維分散の研究が行われているが、従来のコンクリートで計られてきたウオーカビリチイの尺度では当て嵌まらない状態が見受けられる。

本実験では、予めコンクリートミキサーで混練りしたモルタルまたは、コンクリートに繊維を手練りによって十分に練り混ぜた。繊維は乾燥したものと **prewetting** したものを使用した。

配合 No1~3 はスランプのないコンクリートであったので、何の繊維の分散も良好で通常な能率と変わらない作業性で混練り可能であった。

## ② 成型

パイプの形状は次に示す通りである。

A— $\Phi 400 \times 200 \times 40$

B— $\Phi 500 \times 200 \times 40$

C— $\Phi 464 \times 200 \times 8$

D— $\Phi 260 \times 600 \times 15$  (ソケット付)

### (1) 遠心成形

型枠は **CD** タイプを使用した。配合は **No4** で実験成型機を使用した。

投入方法はスプレー式と同様にモルタルと繊維を交互に投入する方法と **Premix** 法と区別したが、強度に余り差異は生じなかった。繊維の投入には特に円周方向の配向性を高めることに意を使いパイプ内面の仕上げには空練りモルタル (1 : 1) を使用した。遠心力は **6~20 G** ,時間は **5~20** 分間を要した。

### (2) 転圧成形

型枠は A と B タイプのものを使用した。投入方法は遠心成型と同じ様に Premix 法とスプレー法で投入した。繊維の Prewetting には繊維 1kg 当たり 500 g の 4%界面活性剤 (Ls400) を噴霧し浸した。

(4) 養生

成型 2 日後に脱型し、20℃ で湿潤養生を行う (1 部は脱形後水中養生を行う)。

(5) 試験方法および結果

材令 14 日に JISA-5302 規定する外圧試験を行う。ひずみは 1/100 mm マイクロメーターを内径 (管端より 50 mm) に固定し、測定した。結果は何れも平均値で示す。

表 7

C-φ 464× 200×8  供試 体 No	寸法	自重  Kg	半径	外圧 荷重	曲モーメント		曲げ応力	
					ヒビワ レ	ヒビワ レ m <sup>1</sup>  kg/cm <sup>2</sup>	破壊  m <sup>2</sup>  kg/cm <sup>2</sup>	σ <sup>1</sup>  kg/cm <sup>2</sup>
1	464×200×8	5,9	0、238	0、563	4429	5416	415	512
2	464×200×8	5,9	0、238	0、325				
3	260×600×15	30,0	0、133	1,982				
4	500×200×40	33,0	0、270	1,500				
5	500×200×40	33,0	0、270	2,500				
6	500×200×40	33,4	0、270	2,750				
7	500×200×40	25,6	0、220	2,250				
8	500×200×40	26,0	0、220	2,000				