

高硬度歯車材の直切りドライホブ加工：RGC加工

福永圭悟¹・井上俊二²・米倉正隆³・櫻木 功⁴

¹機械工学科, ²三菱電機(株), ³元久留米工業高等専門学校, ⁴久留米工業高等専門学校

生産性向上や加工費削減,あるいは歯車加工時の切り上げ長さを短くするために,歯車材を高周波熱処理によって高硬度にした後に直切りドライホブ加工する技術を開発した。まず,歯車用0.45%炭素鋼丸棒が高周波熱処理によって指定深さまでHRC53-56に硬化された。その後,超硬ホブによって切削油なしでホブ切り加工された。これをRGC(Round bar Gear Cutting)加工と呼ぶ。RGC加工がモジュール0.8から1.25,ねじれ角25°のはずば歯車に適用された。超硬ホブの長さを軸方向にほぼ2分割し,粗加工と仕上げ加工に用いた。RGC加工は高剛性ホブ盤で行った。367個加工後の歯車精度は,JIS B1702-1960ではJIS1-2級であった。歯面粗さは,最大高さ粗さRz 1 μであった。

Key Words: Dry Hobbing, Gear motor, High hardened Gear, High hardened Material, Direct Hobbing

1. 緒 論

ギヤードモータへのユーザ要望は高負荷容量,小形,低騒音などである。高精度歯車加工がこれらの要求を満たす一つのポイントと考えられる。一般的に,高精度歯車加工は研削加工によって行われてきたが,工作機械インシヤルコストや高価な工具費用のために,製造コストが高かった¹⁾。最近注目されている切削油を使用しない超硬ホブによるドライ加工²⁾は環境に優しく,省エネルギー,高生産性のなどの特徴がある。1970年代に,筆者らは世界ではじめて高硬度歯車加工に超硬ホブを適用することに成功した^{3),4)}。その後,高生産性と高精度加工を同時に満足させるために,高硬度丸棒から直接ドライホブ切りする加工方法にチャレンジしてきた⁵⁾。本論文では,切削油を使用せず,高硬度に熱処理された丸棒を直切りドライホブ加工ができる技術が確立されたので,その内容を報告する。この加工技術はRGC(Round bar Gear Cutting)加工と呼称され,ギヤードモータ減速機部はずば歯車の生産に適用された。

2. 高硬度歯車製造方法

図1は高硬度小ピッチ歯車製造方法概要を示す。伝統的方法としての「方法A」はホブ切り後に熱処理を施すために,熱処理変形が避けられない。そこで,熱処理変形を取り除く歯研加工が必要であった。「方法B」は熱処理後

にホブ加工する方法である。その結果,熱処理変形を考慮することなく,高精度歯車を経済的に得ることができ。さらに,「方法B」は切削油を必要としないドライホブ加工なので,省資源ともなり,環境に配慮した加工技術とも言える。

本論文では「方法B」をRGC加工と呼ぶ。

Method A	Method B
Traditional Method	RGC Method
Round bar blank turning (Roughing)	
Hobbing with Cutting oil	-
Heat Treatment	
Turning (Finish)	
Grinding, Skiving, etc	Hobbing (without cutting oil)
High hardened and accuracy gears	

Fig.1 High hardened gear manufacturing methods.
NOTE: RGC means Round bar Gear Cutting.

3. ギヤードモータ製造上の問題点

図2は代表的な2段減速ギヤードモータ構造図である。ほとんどの騒音と振動はモータ軸端に加工される歯車(1st Pinion)と従動歯車(1st Gear)に依存することがわかっている。1st Gearは円筒歯車のために、直径350mmのようなねじ状研削ホイールを用いる創成歯車研削によっても容易に高精度加工ができる。他方、1st Pinionは小ピッチ、小さな直径、軸付きなどのために、創成歯車研削は困難である。さらに、ギヤードモータでは構造上1st Pinion近傍には、図2に示すようにオイルシールをとりつける必要がある。そのために、歯切り加工によって切り上げ長さ“S”が長くなれば、モータ軸も長くなり、軸強度が低下する。唯一の1st Pinion高精度加工方法はCBN(Cubic Boron Nitride)成形研削である。この方法によれば、直径30mm程度の小さな砥石によって歯を一枚ずつ歯研加工することができる。

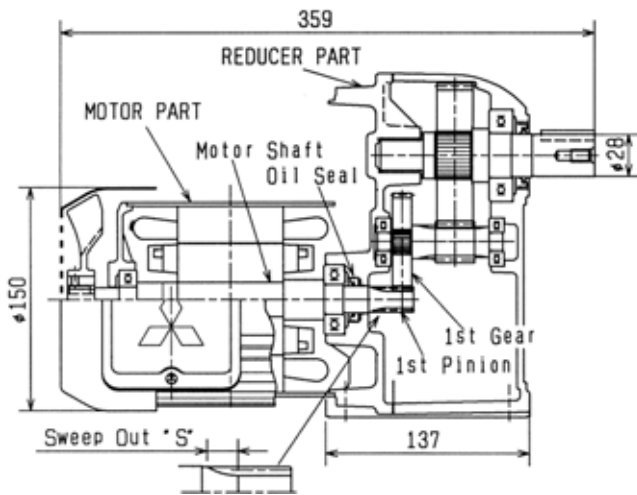


Fig.2 Typical Gear Motor Construction Drawing of Output 0.75kW and Reduction Ratio 1/40.

図3は、CBN研削加工によって量産加工されたねじれ角25°のモータ軸先端1st Pinion歯形精度である。左側の歯形は中高になっており、右側歯形は小さな圧力角を持つ精度の悪い歯車であることを示している。筆者らがよく経験することは、CBN成形研削加工されたギヤードモータは、出荷検査時に騒音と振動にばらつき大きいことである。

図4(a)と(b)は、それぞれ創成研削とCBN研削による歯面粗さを示す。図4(a)から創成研削では、最大高さ粗さはRz 2μmである。図4(b)からCBN加工では、Rz=4から

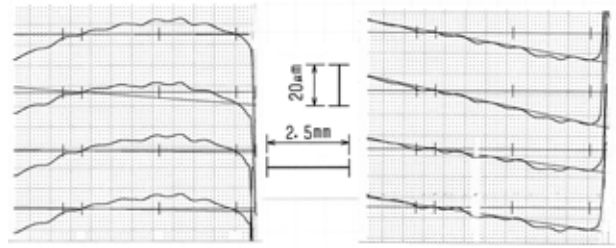


Fig.3 Profile accuracy after CBN grinding $m_n=1.75, Z=11, \alpha=25^\circ L, B=17mm,$

8μmであることがわかる。ここで、歯面粗さが小さいほど歯面強さが大きくなることが報告されている⁶⁾。したがって、歯車設計上は歯面粗さは小さいほうが良い。

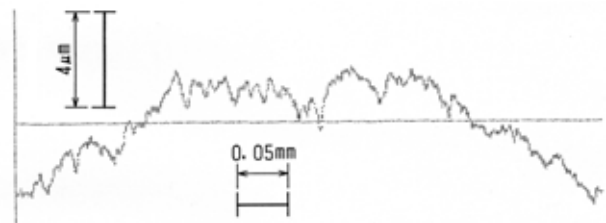


Fig.4(a) Surface roughness by generating grinding

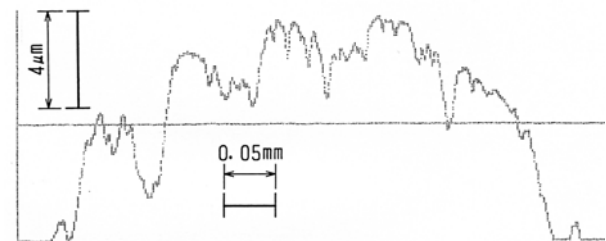


Fig.4(b) Surface roughness by CBN grinding

4. 実験方法

(1) 歯車材料

供試歯車材料は、市販 JIS G4051 機械構造用炭素鋼鋼材 S45C (AISI 1045 相当) である。表1に S45C 化学成分を示す。S45C はギヤードモータ減速機部歯車によく使用される材料の一つである。図1「方法B」に示すように、S45C 丸棒素材を旋削加工(粗加工)後、高周波焼入れ焼き戻し熱処理がされ、指定深さまで硬度 HRC53 から56となる。その後、仕上旋削し、RGC加工を行う。

Table 1 S45C Nominal Chemical Composition Wt %

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr
0.42 to 0.48	0.15 to 0.35	0.60 to 0.90	max 0.03	max 0.035	max 0.03	max 0.02	max 0.02

図 5 は高周波熱処理後，すなわち RGC 加工前焼き入れ組織例を示す．有効硬化深さは約 2mm であり，モジュール $m_n=0.8$ の歯車歯底曲げ強さに要求される焼入れ深さを満たしていることを示している．また，図 5 から，外周部のみがマルテンサイト組織に硬化されていること，中心部は硬化していないこともわかる．したがって，RGC 加工された歯車は，用途が特定できないギヤードモータに必要な衝撃強さにも十分耐えうるということがわかる．

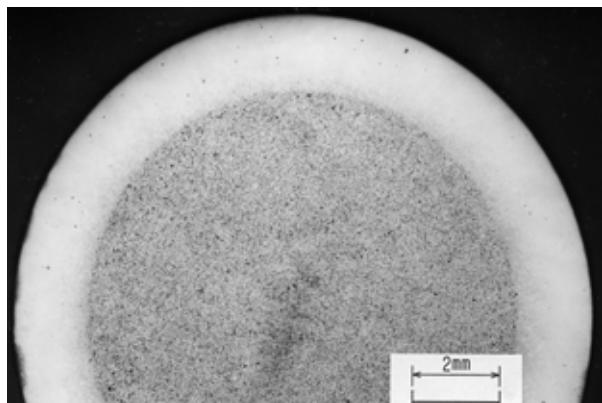


Fig.5 Gear material cross section before RGC method

(2) 硬度分布

高周波熱処理後の代表的な硬度分布例を図 6 に示す．図 2 に示す 1st Pinion を対象としたモジュール $m_n=1.0$ である．図 6 から，表面からの有効硬化深さは，設計指定硬度 HRC53-56 を満たす 3mm 以上であることがわかる．

(3) ホブと歯車仕様

表 2 は，本研究のために開発された代表的な超硬ホブと歯車仕様である．歯車仕様は一般的なギヤードモータでよく使われる諸元とほぼ同じである．

図 7 は表 2 に示す諸元を持つ超硬ホブ写真である．超硬ホブの小さな外径 32mm によって，図 2 に示す軸方向切り上げ長さ“S”を短くすることができる．

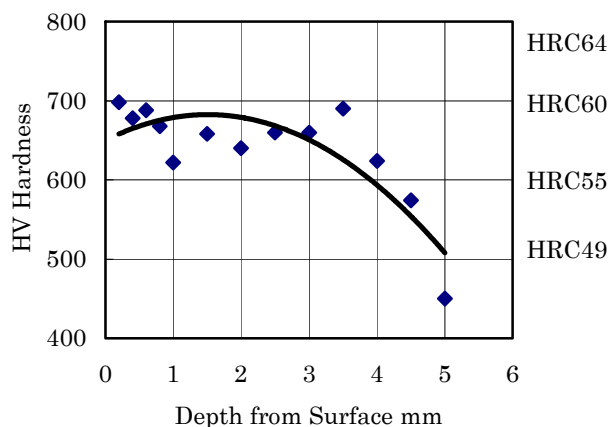


Fig.6 Hardness Distribution



Fig.7 Carbide hob for RGC method

(4) 切削条件と歯車

表 3 は，表 2 に示された歯車に適用される RGC 加工切削条件例である．超硬ホブは軸方向にほぼ 2 分割され，一方は粗加工，他方は仕上げ加工に適用される．切削油なしで高硬度材を精度良くホブ加工するために，歯車材は特殊な加工治具で固定された後，高剛性 CNC ホブ盤によって加工された．

図 8 上図はモータ軸先端に RGC 加工された代表的な 1st Pinion であり，下図は RGC 加工前である．

Table 2 Specification of the Hob and Gear

Solid Hob		Gear	
Material	Carbide	Material	S45C (equiv. AISI 1045)
Normal module	$m_n=0.8$	Normal module	$m_n=0.8$
Pressure angle	$\alpha=20^\circ$	Pressure angle	$\alpha=20^\circ$
Thread Number	1R	Helix angle	$\beta=25^\circ$
Outside diameter	32mm	Outside diameter	10.907mm
Flute Number	15	Teeth Number	$Z=10$
Width	44mm	Face width	$b=11$ mm
Lead Angle	$1^\circ 32'$	Whole depth	$2.25 \times m_n$
Rake angle	0°	Heat Treatment	High Frequency Induction Hardening
Surface treatment	Non	Hardness	HRC 53-56

Table 3 Cutting Condition

		Roughing	Finish
Cutting Speed	m/min	60	80
Axial Feed	mm/rev	1.0	0.7
Cutting Depth	mm	-	0.1
Cutting Method	Conventional		
Hob Shift	mm	0.03	
Coolant	Non (Dry cut)		

図 9 は、歯車部拡大写真の例である。歯面は滑らかであることがわかる。

Upper is after RGC, lower is before.



Fig. 8 Before and after RGC method of motor shaft for gear motor

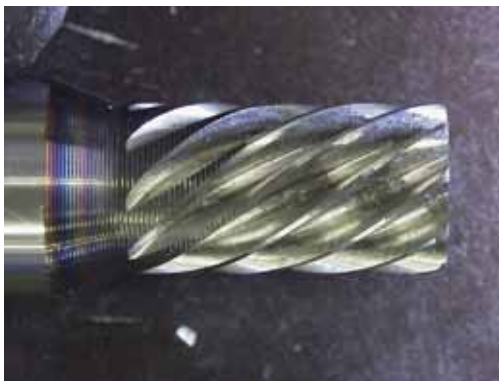


Fig. 9 Tooth surface after RGC Method

図 10 と 11 はそれぞれ、RGC 加工による 367 個後の仕上げ加工部と粗加工部のホブ切り刃エッジ部である。図 10 から、仕上げホブ切り刃エッジ部にはほとんど磨耗はないが、図 11 にからわかるように粗加工部には幾つかの損傷が認められる。

5. 実験結果

(1) 歯車精度

図 12 と 13 は、RGC 加工された歯車加工精度例を示している。図 12(a) と (b) はそれぞれ、第 1 個目の加工後歯形と歯筋精度を示す。図 13(a) と (b) はそれぞれ、367 個加工後である。歯車諸元は表 2 参照。

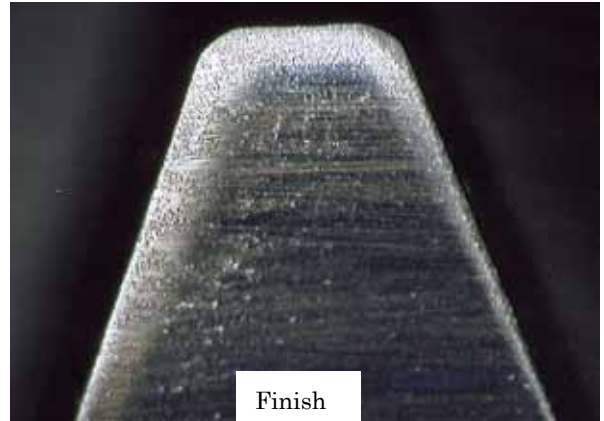


Fig.10 Hob wears after 367 pieces cutting

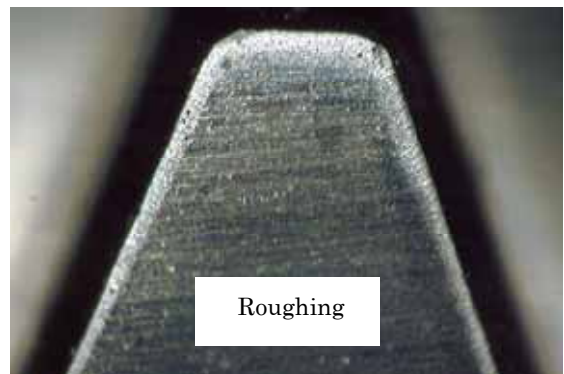


Fig.11 Hob wears after 367 pieces cutting

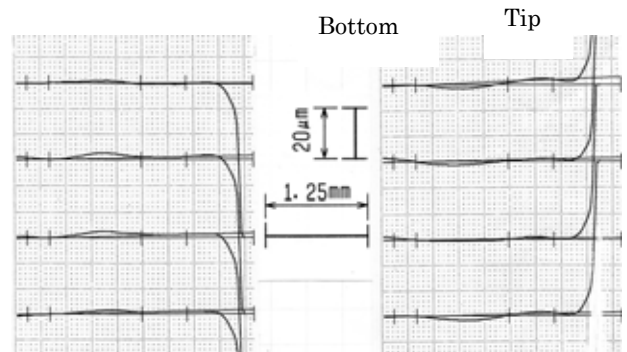


Fig.12 (a) Profile accuracy after the first hobbing

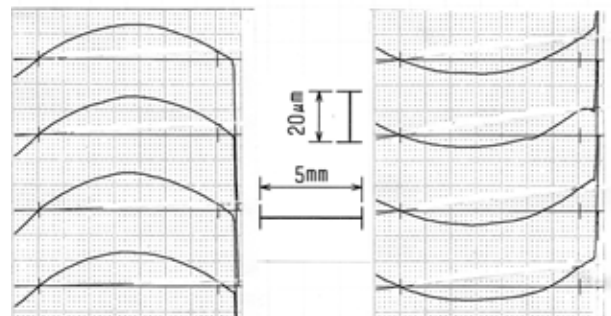


Fig.12 (b) Lead accuracy after the first hobbing

図 12(a) から歯形誤差は約 $2\mu\text{m}$ 以下であることがわかる。図 3 に示した CBN 研削歯形表面はなめらかではなかったが、RGC 加工による図 12(a) はなめらかな歯形表面を示している。

図 13(a) は 367 個加工後歯形誤差は約 5 から $6\mu\text{m}$ であることを示している。図 13(b) は予想されたようになめらかな歯筋曲線を示していることがわかる。

したがって、RGC 加工による歯形精度は JIS B1702-1960 によれば、およそ 1-2 級 (AGMA 11-12 級相当) であることが結論付けられる。

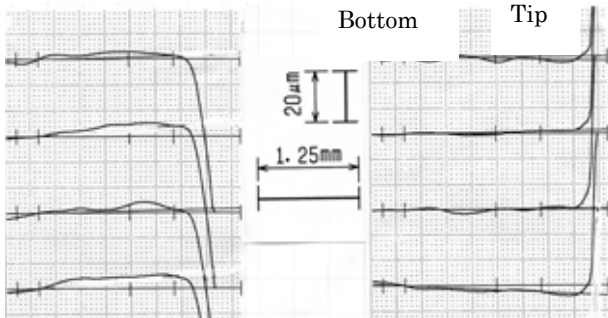


Fig.13 (a) Tooth accuracy after 367pieces hobbing

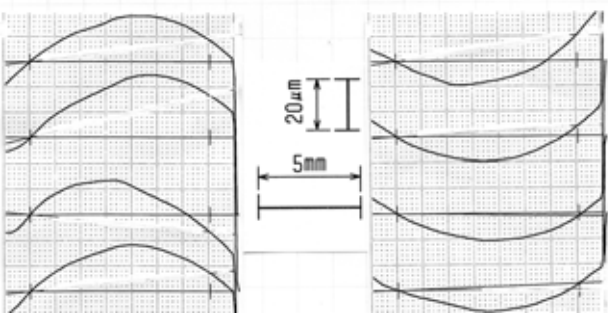


Fig.13 (b) Lead accuracy after 367pieces hobbing

(2) 表面粗さ

図 9, および図 12 と 13 から、歯面粗さもまた著しくなめらかであることが予想される。歯面粗さは RGC 加工後、歯形方向に測定した。図 14 は代表的な歯面粗さである。図 14 から、歯面最大高さ粗さはおよそ $Rz = 1\mu\text{m}$ であることがわかる。このように、小さな歯面粗さを得ることができたのは、歯車材料、熱処理方法、歯面硬度、超硬ホブ仕様および切削条件などの組み合わせがよかったためと思われる。

したがって、RGC 加工は優れた高精度歯車加工技術であると考えられる。さらに、RGC 加工による歯面粗さは、図 4(b) に示す CBN 成形研削よりも小さいことがわかる。

それゆえ、「ギヤードモータ製造上の問題点」で述べたように、我々は競争力のあるギヤードモータ開発が期待できる。これは、RGC 加工による歯車が小さな歯面粗さを持つためである。

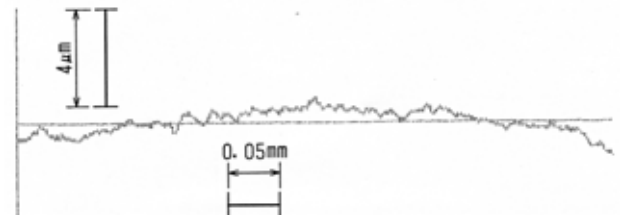


Fig.14 Surface roughness by the Direct Dry Hobbing method

6. RGC加工適用例

RGC 加工方法研究結果が M 社製ギヤードモータモータ先端の 1st Pinion および 1st Gear に適用された。モジュールは 0.8 から 1.25, モータ容量は 100W から 0.75kW, 全減速比は 1/10 から 1/367 までである。

工場内出荷試験では、開発されたギヤードモータは、当初目的通りに安定した低騒音および低振動を示した。したがって、CBN 研削加工のような伝統的な高硬度歯車加工方法による従来のギヤードモータよりも優れた品質を得ることができた。

図 15 は、RGC 加工によって開発されたモータ容量 0.4kW, はすば歯車 2 段減速, 減速比 1/30 のギヤードモータ概観写真である。



Fig.15 Developed Gear motor

7. 結論

高精度で低コスト歯車を製造するために、高硬度に熱処理された歯車材料を、高精度に切削油なしでホブ加工できる技術開発に成功した。この加工技術は RGC 加工と呼称された。RGC 加工適用範囲は、モジュール $m_n=0.8$ から 1.25, 歯車ねじれ角 25° のはすば歯車である。特殊超硬ホブおよび高剛性 CNC ホブ盤も同時に開発された。

本研究で得られた主な成果は次の通りである。

(1) 高周波熱処理によって HRC53-56 に硬化された歯車材

を切削油なしでホブ加工できる RGC 加工技術が開発された。

(2) RGC 加工による 367 個加工後の歯形誤差は約 5 から 6 μ m であった。

(3) RGC 加工された歯車の歯面粗さは、創成研削や CBN 成形研削よりも小さく、Rz 1 μ m であった。

(4) RGC 加工によって製造された歯車を組み込んだギヤードモータが市場に投入され、安定した低騒音と低振動での評価を得ている。

結局、RGC 加工と呼称される高精度高硬度歯車製造技術は、優れた歯車加工方法であると言える。

謝辞：最後に、本研究にご協力頂いた(株)カシフジおよび(株)鈴木工機殿に厚く感謝します。なお、「RGC 加工」は三菱電機(株)の商標登録済みであり、この加工技術は特許出願中です。

参考文献

1) R.Newman,;Hard Finishing By Conventional Generating and Form Grinding, GEAR TECHNOLOGY, MARCH/APRIL, (1991), pp.36-41.

2) F.Klocke, Chr.Esher, M.Vullers,;Dry Hobbing - Efficient and Ecological, VDI BERICHTE 1230, Int. Conf. ON GEARS (1996), pp.509-523.

3) 相浦, 米倉,;A Research on Hobbing With the Carbide Skiving Hob, Proceeding of 1st World Congress on Gearing, France, Vol.1, 1977, pp.1099-1113.

4) 米倉, 相浦, 杉本,;Hobbing of Hardened Gears Using the finishing Hobs, MPT'91, Int. Conf. on Motion and Power Transmissions (1991), pp. 175-180.

5) 櫻木, 広尾, 米倉,;Study on Practical Application of Carbide Hobbing -Full Depth Cutting of Hardened Gear Teeth;, MPT2001-FUKUOKA, Int. Conf. on Motion and Power Transmissions (2001), pp.321-326.

6) 有浦, ほか 3 名,;Load-Carrying of Austempered Ductile Iron Gears, MPT'91, Int. Conf. on Motion and Power Transmissions (1991),pp.843-848.

(2005.9.30 受付)

Direct Dry Hobbing of High Hrdness Material -RGC(Round bar Gear Cutting) Method-

Keigo FUKUNAGA¹ · Syunji INOUE² · Masataka YONEKURA³ · Isao SAKURAGI⁴

¹Department of Mechanical Engineering, ²Mitsubishi Electric Corp.,

³Former Kurume National College of Technolory, ⁴Kurume National College of Technology

Abstract

To content high productivity and low manufacturing cost, it is believed that direct dry hobbing after gear material heat treatment is the best manufacturing method. First, 0.45% carbon steel of round bar gear material was hardened to HRC53-56 by high frequency induction heat treatment till the specified depth. Next, the high-hardened material was directly hobbled by special carbide hob installed on a highly rigid CNC hobbing machine without using cutting oils Thus, the authors have developed Direct Dry Hobbing of High hardness Material, called the RGC (round bar Gear Cutting) method. The gears applying the RGC Method were module 0.8 to 1.25 and of helix angle 25°. The gear profile accuracy was JIS Grade 1-2. Gear motors incorporating gears manufactured by the RGC method are now receiving remarkable customer's satisfaction as low noise and low vibration gear motors.