

溶接構造用鋼溶接部の硬化性

下 山 仁 一*

Hardability of Weldments in Steels for Welded Structures

Toshikazu Shimoyama

Hardability in Weld Heat Affected Zone is one of the most important parameters on weldability of steels for welded structures.

From this view point, I have investigated hardability of HAZ on high-tensile steels for general welded structures and high toughness steels for deep sea vehicles.

The results are as follows.

- (1) Maximum hardness in welds of high tensile steels for general welded structures is in the range of $Hv_{max} = (666C_{eq} + 40) \pm 40$.
- (2) Maximum hardness in welds of low C-high Ni-Cr-Mo high toughness steels is under the above range and then these steels have good weldability.

1 緒言

わが国に於ける各種圧力容器、水力発電の水圧鉄管、長大橋に使用される溶接構造用高張力鋼の発展は昭和30年代（1955年頃）からはじまり、引張強さ50Kgf/mm²（490MPa）級、60Kgf/mm²（588MPa）級、80Kgf/mm²（785MPa）級高張力鋼が次々に開発・実用化され、現在100Kgf/mm²（980MPa）級が開発の段階に到達している。

また海洋調査機器に適用される高い靱性が要求される高靱性高張力鋼についても同様に降伏点46Kgf/mm²（451MPa）級、63Kgf/mm²（617MPa）級、80-90Kgf/mm²（785-882MPa）級が開発・実用化され、昭和56年（1981年）には降伏点90f/mm²（882MPa）級高靱性高張力鋼が深2000m 深海潜水調査船「しんかい2000」の耐圧球殻に実用化された。

これら各種高張力鋼は溶接性を考慮に入れた化学組成と焼入れ焼戻しの調質熱処理により基本性能を確保している鋼である。これら高張力鋼の溶接性では溶接熱影響部（Weld Heat Affected Zone、HAZ）の硬化が最も重要な基本的要因の一つである。

本研究では、最近製造された溶接構造用高張力鋼及び高靱性高張力鋼について溶接部の硬化特性を調べた。

* 機械工学科

2 供試鋼及び試験内容

2-1 供試鋼

表1に本研究に供試した溶接構造用高張力鋼及び高靱性高張力鋼の化学組成と機械的性質を示す。すなわち、溶接構造用高張力鋼では引張強さ50Kgf/mm² (490MPa、HT50) 級、60Kgf/mm² (588MPa、HT60) 級、80Kgf/mm² (785MPa、HT80) 級高張力鋼を使用し、比較のため軟鋼SM41を供した。

また高靱性高張力鋼では降伏点46Kgf/mm² (451MPa、NS46) 級、63Kgf/mm² (617MPa、NS63) 級、80Kgf/mm² (785MPa、NS80) 級、110Kgf/mm² (1078MPa、NS110) 級を供した。

これらの供試鋼の化学組成からわかるように高Ni-Cr-Mo系調質鋼であり、特にNS63、NS80、NS110はCが0.10%以下の4~10%-Cr-Mo系調質鋼である。

また表1にHAZの硬化性と関係がある炭素当量Ceqと溶接割れと関係があるP_{CM}を併せて示した。(式)1及び(式)2にそれぞれの計算式を示した。

$$Ceq = C + \frac{Si}{24} + \frac{Mn}{6} + \frac{Ni}{40} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{V}{14} \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$PCM = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B \quad \dots\dots\dots(2)$$

2-2 試験内容

(1) 試験板寸法

JIS-Z-3101溶接熱影響部の最高硬さ試験の1号試験板、板厚20mm・幅75mm・長さ200mmを用い板幅中央に長さ方向に125mmの溶接ビードを被覆アーク溶接(交流AC)及びTIG溶接(直流正極性DCSP)で置いた。

(2) 溶接方法及び溶接条件

被覆アーク溶接(交流AC)では直径4mmφの低水素系溶接棒を用い溶接条件として170A-26V-15cm/min, TIG溶接(直流正極性DCSP)では直径3.2mmφタングステン電極、シールドガスAr25l/min、290A-13V-13cm/minの条件を目標で溶接ビードを置いた。この溶接条件は溶接入熱量Q (60 A×V / 溶接速度、J/cm) 17000J/cmを目標としたものである。

また溶接部の冷却が極めて早いアークストライクについては同じ溶接電流で約1秒でア

表1 供試材料の組成と機械的性質

供試材料	板厚 mm	熱処理	化 学 成 分													機械的性質			
			C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Ceq ¹⁾	P _{CM} ²⁾	降伏点 kgf/mm ² (MPa)	引張試験 kgf/mm ² (MPa)	伸び %	衝撃試験	
																		温度℃	(J/cm ²)
SM41	25.0	圧延の まま	0.16	0.15	0.86	0.015	0.004	—	0.02	0.03	0.001	0.003	0.32	0.21	26 (255)	45 (441)	32	—	—
HT50	22.0	圧延の まま	0.16	0.33	1.38	0.022	0.004	0.02	0.02	0.03	—	—	0.41	0.24	45 (441)	57 (559)	26	0	24.4 (239)
HT60	50.0	焼入れ 焼戻し	0.11	0.25	1.36	0.011	0.002	0.20	0.19	0.08	0.13	—	0.40	0.19	53 (519)	64 (627)	44	-5	32.3 (317)
HT80	45.0	焼入れ 焼戻し	0.09	0.29	0.94	0.006	0.001	0.18	1.23	0.52	0.44	0.04	0.51	0.23	79 (774)	83 (813)	25	-40	27.6 (270)
NS46	20.0	焼入れ 焼戻し	0.12	0.23	1.32	0.006	0.001	0.02	0.46	0.001	0.14	0.04	0.40	0.22	60.1 (589)	85.8 (845)	37.0	-50	33.9 (332)
NS63	20.0	焼入れ 焼戻し	0.09	0.24	0.57	0.006	0.001	0.02	2.53	0.58	0.38	—	0.47	0.22	70.5 (691)	75.4 (739)	40.0	-70	27.8 (272)
NS80	20.0	焼入れ 焼戻し	0.08	0.25	0.71	0.003	0.001	0.01	3.96	0.65	0.48	0.06	0.56	0.26	86.8 (841)	90.1 (883)	36.0	-70	26.3 (258)
NS110	20.0	焼入れ 焼戻し	0.06	0.04	0.54	0.002	0.001	—	9.77	0.55	1.24	0.11	0.82	0.37	121.0 (1,186)	128.0 (1,254)	33.0	0	23.2 (227)

$$1) Ceq = C + \frac{Si}{24} + \frac{Mn}{6} + \frac{Ni}{40} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{V}{14}$$

$$2) P_{CM} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B$$

ークストライクを置いた。

なお、溶接ビードの長さ方向中央部で溶接熱サイクルを測定した。

図1にTIG溶接実験装置の系統図を示した。

(3) 硬さ測定

溶接ビードの長さ方向中央部からマクロ試験片を採取し、ビッカース硬さを測定した。図2にビッカース硬さの測定位置を示す。

なほ、被覆アーク溶接については溶接熱影響部の最高硬さを、TIG溶接については同様に溶接熱影響

部の最高硬さ及び溶接金属部の平均硬さを求めた。

3 試験結果と考察

各試験板で溶接熱サイクルを測定したが、800℃からの冷却曲線を片対数上で描いた結果の代表例として被覆アーク溶接の場合を図3に示した。

溶接部の硬化性、金属組織に関連する冷却特性としては800℃から500℃までの冷却時間(CT₈₀₀₋₅₀₀、sec)であり、被覆アーク溶接の場合約6～7sec、TIG溶接の場合約5～6secであり、ほぼ同様な冷却条件であり硬化性を併せて評価できると考える。

一方アークストライクの場合、冷却が極めて速いためばらつきも大きいがCT₈₀₀₋₅₀₀は約1secであり従来の値とほぼ一致している。

次に溶接部の硬さ分布の代表例として、HT80及びNS80の被覆アーク溶接とTIG溶接について図4～図7にそれぞれ示した。

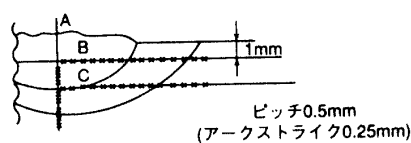


図2 硬さ試験要領図

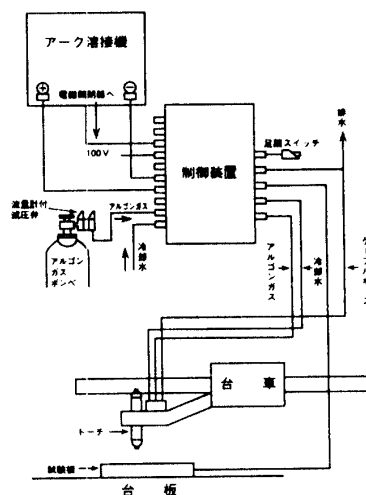


図1 TIG溶接装置系統図

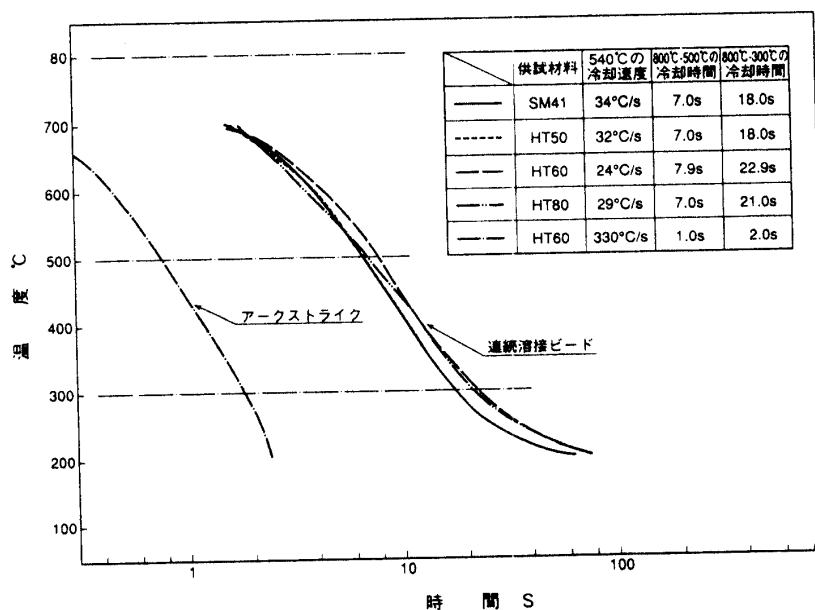


図3 被覆アーク溶接による800℃からの冷却曲線

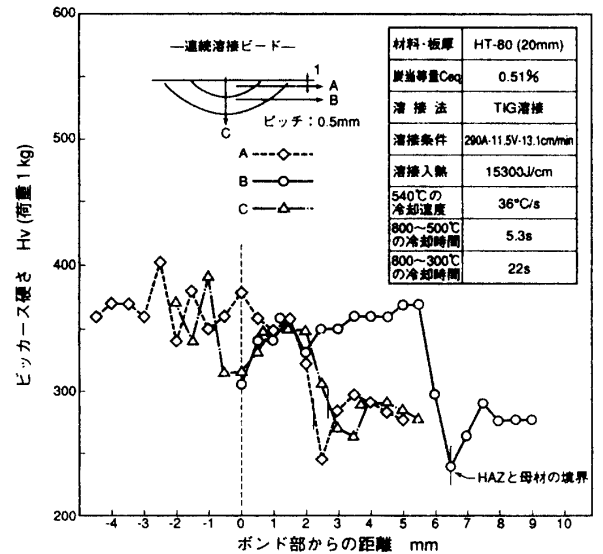
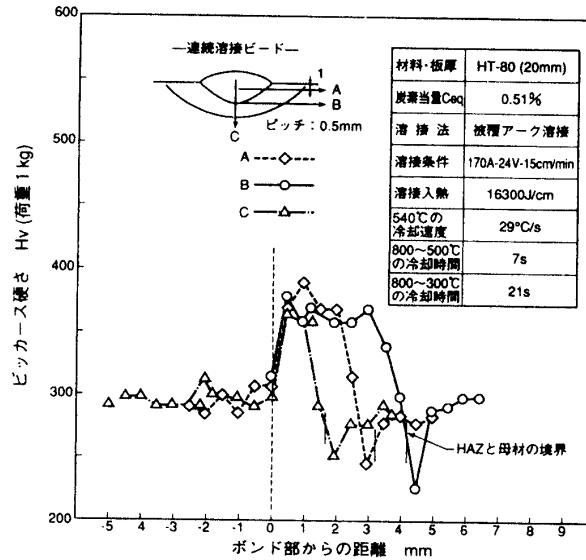


図4 連続溶接部の硬さ分布 (HT80, 被覆アーク溶接) 図5 連続溶接部の硬さ分布 (HT80, TIG溶接)

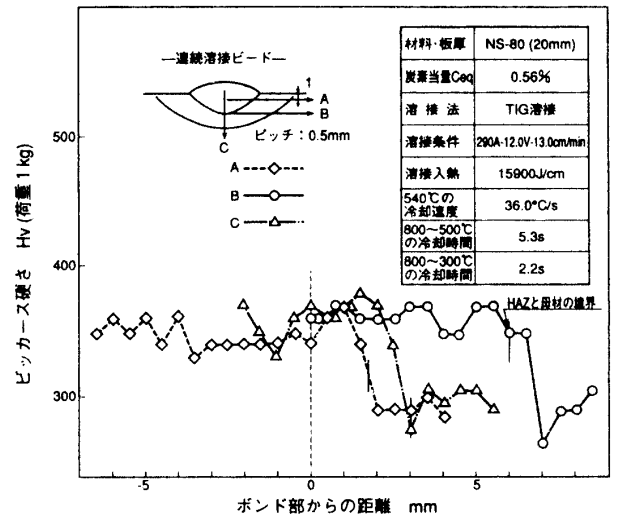
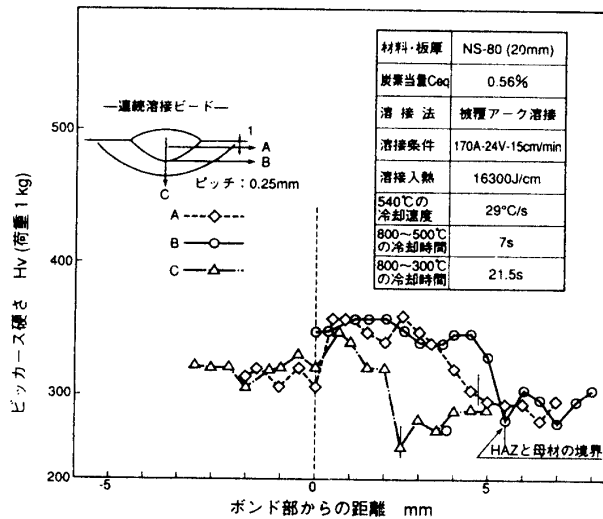


図6 連続溶接部の硬さ分布 (NS80, 被覆アーク溶接) 図7 連続溶接部の硬さ分布 (NS80, TIG溶接)

HT80の場合、溶接熱影響部の粗粒域に最高硬さが位置しているのに対して、低C-高Ni-Cr-Mo系高靱性高張力鋼であるNS80の場合、溶接熱影響部全体が硬化していることがわかる。またTIG溶接の溶接金属部は溶接熱影響部と同程度の硬化を示し、化学組成と冷却特性が同じであれば溶接金属部も硬化することを示している。従ってTIG溶接の溶接金属部については平均硬さを取った。

このようにして求めた被覆アーク溶接とTIG溶接の溶接熱影響部の最高硬さ及びTIG溶接の溶接金属部の平均硬さを一括して表2(連続ビード)と表3(アークストライク)にそれぞれ示した。

表2の結果をCeq及びPCMとビッカース硬さとの関係としてまとめるとそれぞれ図8～図9のごとくなる。この図8から明らかなように溶接構造用高張力鋼及びNS46やNS63クラ

表 2 硬さ試験結果の総括表（連続ビード）

溶接方法	供試材料	Ceq %	PCM %	溶接入熱 J/cm	溶接速度 cm/min	540℃の 冷却速度 ℃/s	冷却時間		熱影響部の 最高硬さ Hvmax.	溶接金属部の 平均硬さ Hv
							800℃～500℃ s	800℃～300℃ s		
被覆アーク 溶接	SM41	0.32	0.21	16300	15	34	7	18	251	—
	HT50	0.41	0.24	16300	15	32	7	18	305	—
	HT60	0.40	0.19	16300	15	24	7.9	22.9	305	—
	HT80	0.51	0.23	16300	15	29	7	21	389	—
	NS46	0.40	0.22	16300	15.0	24.0	8.0	23.0	297	—
	NS63	0.47	0.22	16300	15.0	24.0	7.9	22.9	401	—
	NS80	0.56	0.26	16300	15.0	29.0	7.0	21.5	358	—
	NS110	0.82	0.37	16300	15.0	22.0	6.7	20.9	413	—
TIG溶接	SM41	0.32	0.21	15900	13.1	41	5.5	18	251	271
	HT50	0.41	0.24	15300	13.1	42	5.3	15	339	330
	HT60	0.40	0.19	14800	13.1	40.5	5.5	21	290	307
	HT80	0.51	0.23	15300	13.1	36	5.3	22	358	359
	NS46	0.40	0.22	14900	13.1	25.1	5.0	16.5	378	313
	NS63	0.47	0.22	15900	13.1	32.0	6.0	31.0	401	370
	NS80	0.56	0.26	15900	13.1	36.0	5.3	22.0	378	347
	NS110	0.82	0.37	15300	13.1	22.0	5.0	24.5	426	377

表 3 硬さ試験結果の総括表（アークストライク）

溶接方法	供試材料	Ceq %	PCM %	溶接入熱 J/cm	溶接時間 s	540℃の 冷却速度 ℃/s	冷却時間		熱影響部の 最高硬さ Hvmax.	溶接金属部の 平均硬さ Hv
							800℃～500℃ s	800℃～300℃ s		
被覆アーク 溶接	SM41	0.32	0.21	244800	2.0	330	1	2	439	—
	HT50	0.41	0.24						453	—
	HT60	0.40	0.19						358	—
	HT80	0.51	0.23						401	—
	NS46	0.40	0.22	244800	2.0	330	1	2	401	—
	NS63	0.47	0.22						401	—
	NS80	0.56	0.26						368	—
	NS110	0.82	0.37						389	—
TIG溶接	SM41	0.32	0.21	208800	1.0	525	0.3	1.4	389	385
	HT50	0.41	0.24						401	403
	HT60	0.40	0.19						413	387
	HT80	0.51	0.23						413	393
	NS46	0.40	0.22	208800	1.0	525	0.3	0.4	401	321
	NS63	0.47	0.22						439	382
	NS80	0.56	0.26						348	325
	NS110	0.82	0.37						389	350

スの高靱性高張力鋼は従来の関係式 $Hv_{MAX} = (666Ceq + 40) \pm 40$ の範囲にほぼ位置していることがわかる。

一方Cが0.10%以下で4%以上のNiの低C-高Ni-Cr-Mo系高靱性高張力鋼の場合、 $Hv_{MAX} = (666Ceq + 40) \pm 40$ よりも低い値を示し、Ceqの高い割には硬化しない特性であることがわかる。

高靱性高張力鋼についてCeqとの関係を同様に求めると(式)3のごとくなる。

$$Hv_{MAX} = (136Ceq + 295) \pm 55 \quad \dots\dots\dots (3)$$

次にPCMとの関係を示した図9から溶接構造用高張力鋼については(式)4が、高靱性高張力鋼については(5)がそれぞれ求められた。

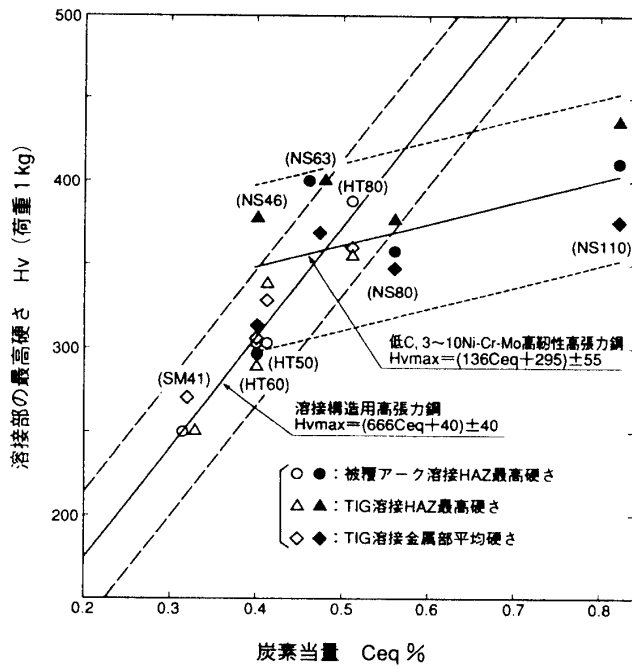


図 8 炭素当量Ceqと溶接部の最高硬さの関係

$$Hv_{MAX} = (1159PCM + 60) \pm 55$$

$$Hv_{MAX} = (288PCM + 294) \pm 52$$

この PCM でまとめた結果からも明らかなように、C が 0.10% 以下で 4% 以上の Ni の低 C - 高 Ni - Cr - Mo 系高靱性高張力鋼の場合、PCM の増加の割には硬化の程度が低いことがわかる。

表 3 に示したアークストライクの硬さについても同様に整理することができるが、今後データを積み重ねて実験式を確立したいと思う。

4 結言

最近製造された溶接構造用高張力鋼及び高靱性高張力鋼について溶接性を評価する最も重要な基本的要因の一つである溶接部の硬化性を調べ、次のことを明らかにした。

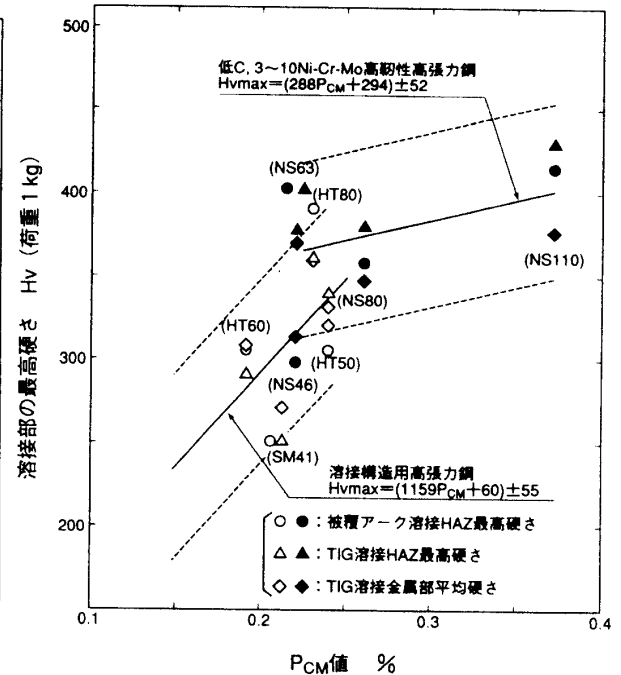
- (1) 炭素当量 Ceq と溶接部の最高硬さについては、溶接構造用高張力鋼の場合は、従来の関係式 $Hv_{MAX} = (666Ceq + 40) \pm 40$ が適用できるのに対して、低 C - 高 Ni - Cr - Mo 系高靱性高張力鋼の場合、硬化性が低く次の関係が成立した。

$$Hv_{MAX} = (136Ceq + 295) \pm 55$$

- (2) PCM と溶接部の最高硬さについても次の関係が成立した。すなわち、溶接構造用高張力鋼については、 $Hv_{MAX} = (1159PCM + 60) \pm 55$ ，低 C - 高 Ni - Cr - Mo 系高靱性高張力鋼については、 $Hv_{MAX} = (288PCM + 294) \pm 52$ が成立した。

〔参考文献〕 1) 稲垣道夫，学位論文「構造用鋼材溶接部の変質について」(1960)

2) 木原博他「鋼の溶接硬化に関する研究(第1-3報)」溶接学会誌，vol. 26 Non. 2・7(1957) vol. 27, Non. 1(1958) (平成5年12月13日受理)


図 9 P_{CM}値と溶接部の最高硬さの関係

$$\dots\dots\dots(4)$$

$$\dots\dots\dots(5)$$