



行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告  
鈦鎳形狀記憶合金變態時物理性質變化之探討及其工程應用之開發研究  
Physical Properties Variation Associated with Martensitic Transformation of  
TiNi SMAs and Their Development in Engineering Applications

計畫編號：NSC90-2216-E002-029

執行期限：90年8月1日至91年7月31日

計畫主持人：吳錫侃教授 國立臺灣大學 材料科學與工程學研究所

## 一、摘要

本研究針對  $Ti_{50}Ni_{50}$ 、 $Ti_{49}Ni_{51}$ 、 $Ti_{50}Ni_{49}Fe_1$  及  $Ti_{50}Ni_{48.5}Fe_{1.5}$ (in at%) SMAs 進行熱膨脹係數(CTE)與電阻(ER)之量測與分析。在CTE方面，母相與麻田體相在各合金的量測值皆相近，母相約為  $11 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ ，麻田散體相約為  $7\sim 8 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ ，而R相的CTE受Texture影響很大，並無一定值。 $B2 \leftrightarrow B19'$ 變態過程中CTE出現了異向性，只有在垂直軋延，但在試片厚度方向上出現負的CTE值，此現象與Ni-Al單晶在變態時 $[001]_{NiAl}$ 得到的結果相似。而試片經過固溶處理前後在 $B2 \leftrightarrow R$ 變態過程出現不同的CTE則與Au-Cd單晶各方向觀察到的結果相似。各合金在變態時的CTE值都比一般金屬甚至高分子材料來的大，特別是TiNiFe SMAs者。在ER方面，各合金的母相比電阻 $\rho$ 值都大於麻田散體相者，而R相的 $\rho$ 值又大於前兩種相。 $Ti_{50}Ni_{50}$ 合金經熱軋延後在 $M_s$ 溫度之前出現了電阻上升的現象，顯示它在麻田散體變態之前已有R相變態的產生。由電阻的量測又可知， $B2 \rightarrow R$ 變態時各SMAs  $\rho$ 值的上升約  $10\sim 16 \mu\Omega\text{-cm}$ ，其變化量約有  $12\sim 20\%$ 。

## Abstract:

Coefficient of Thermal Expansion(CTE) and Electrical Resistivity(ER) of four kinds of TiNi and TiNiFe SMAs were investigated in this study. CTEs of parent phase and martensite are  $11 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$  and  $7\sim 8 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ , respectively, which are independent of alloys' composition and rolling direction. However, the CTE of R-phase is not a constant. The anisotropic behavior of CTE of  $B2 \leftrightarrow B19'$  transformation is similar to the CTE results of martensitic transformation in Ni-Al single crystal, and that of CTE of  $B2 \leftrightarrow R$  transformation from specimens with or without solution-treating is

similar to the CTE results of martensitic transformation in Au-Cd single crystal. CTE values of all SMAs associated with phase transformations are larger than other common metals and polymers. The ER tests show that R-phase has the highest  $\rho$  value and martensite has the lowest one. The ER increment near  $M_s$  temperature occurred in the hot-rolled  $Ti_{50}Ni_{50}$  alloy indicates that R-phase transformation has appeared before martensitic transformation. According to ER tests, the increase of  $\rho$  value during  $B2 \rightarrow R$  transformation is about  $10\sim 16 \mu\Omega\text{-cm}$ , which is about  $12\sim 20\%$  change.

## 二、緣由與目的

TiNi SMAs之熱彈型麻田散體變態，除有廣為人知之SME、PE的特性外，材料本身之物理性質亦會因變態而發生變化。在TiNi SMAs眾多之物理性質中，因熱彈型麻田散體變態(在 $M_s\sim M_f$ 、 $A_s\sim A_f$ 溫度範圍內)而會有相當之變化者有制震能、熱膨脹係數(CTE)及電阻(ER)等。而TiNi SMAs之變態溫度、變態順序、熱滯溫度範圍等，都可以由合金設計(例如高溫SMAs)、熱處理(例如時效)及加工狀況(例如冷熱加工)等來加以改變[1-5]。在CTE物性方面，TiNi SMAs在變態熱滯溫度範圍內，其 $A_s\sim A_f$ 之逆變態會有負的CTE值，若能適當控制TiNi SMAs  $A_s\sim A_f$ 之溫度範圍，則可利用TiNi SMAs變態之負CTE特性來發展出具有工程應用價值之設計或產品。又在TiNi SMAs之ER物性方面，在 $B2 \leftrightarrow R$ 變態時，在其熱滯範圍內有20%左右的電阻變化，而且TiNi SMAs是電的導體，若能依不同之合金設計及熱處理來控制變態溫度，其ER變化特性可應用到工業用電器產品之安全裝置。故本研究主要針對TiNi SMAs變態時熱膨脹係數及電阻的變化做一深入探討，以作為往後工程應用之參考。

### 三、結果與討論

#### 3.1 CTE 實驗

本實驗試片分為兩大類，一為軋延後直接量測的試片，另一為軋延後經過 800°C 兩小時固溶處理的試片，以 q 表示。CTE 量測的方向分為三個方向，X 方向為試片軋延的方向，Z 方向為垂直軋延方向，但在試片厚度方向，Y 方向為另一垂直軋延的方向。圖 1 為 Ti<sub>50</sub>Ni<sub>50</sub> 在 Z 方向 TMA 的實驗結果，縱軸為

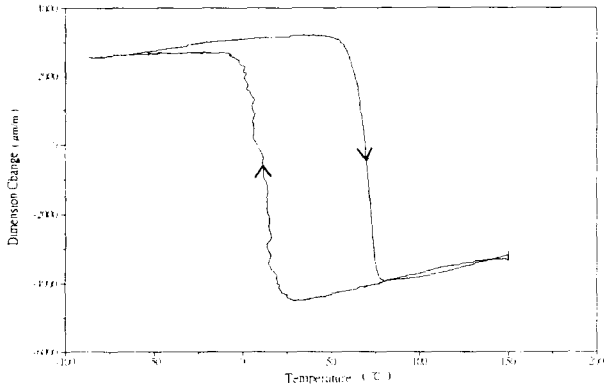


圖 1 Ti<sub>50</sub>Ni<sub>50</sub>-Z 方向之 TMA 實驗結果

dimension change，單位為長度變化量(µm)除以試片原始長度(m)，橫軸為溫度，曲線的斜率即為 CTE 值。由圖 1 中可以看出母相及麻田散體相的 CTE 為一定值，而在變態的過程中，Z 方向的 CTE 為負值，也就是有熱縮冷脹的現象。

表 1 Ti<sub>50</sub>Ni<sub>50</sub> 合金經 TMA 量測所得到的熱膨脹係數

CTE (ppm/°C)	B2	B19'	B2→B19'	接近 M <sub>r</sub> 處 0.4~13.0(°C)	B19'→B2	接近 A <sub>s</sub> 處 48.5~62.6(°C)
Ti <sub>50</sub> Ni <sub>50</sub> -Z	11.6	7.2	-347.5	—	-492.2	—
Ti <sub>50</sub> Ni <sub>50</sub> -X	11.2	8.8	110.4	-9.7	128.9	-1.7
Ti <sub>50</sub> Ni <sub>50</sub> -Y	12.1	8.4	67.3	—	72.9	—
qTi <sub>50</sub> Ni <sub>50</sub> -Z	11.7	7.0	-69.9	—	-87.7	—
qTi <sub>50</sub> Ni <sub>50</sub> -X	11.2	8.0	95.1	-12.9	108.2	-2.0
qTi <sub>50</sub> Ni <sub>50</sub> -Y	11.8	8.6	46.5	—	46.3	—

Ti<sub>50</sub>Ni<sub>50</sub> 各試片的母相、麻田散體相及相變態時所求出的 CTE 值列於表 1 中。由 Ti<sub>50</sub>Ni<sub>50</sub> 及 qTi<sub>50</sub>Ni<sub>50</sub> 在三個方向上 TMA 量測的結果發現母相及麻田散體相的熱膨脹係數在三個方向都相近。Uchil et al. 曾對近等原子比的 TiNi 線材做 TMA 量測[6]，發現在 B2⇌B19' 變態時熱膨脹係數是負的，與本實驗在 Z 方向所得到的結果是相同的，且母相的熱膨脹係數約 11 ppm/°C，麻田散體相約 7 ppm/°C 與本實驗的結果也相吻合。唯 Uchil et al. 所做的材料為線材且只有量測單方向的

CTE，與本實驗的 X、Y、Z 三方向結果是無法直接比較的。

本實驗對 Ti<sub>50</sub>Ni<sub>50</sub> 試片在 X、Y、Z 三個方向做 X 光繞射分析發現雖然三個方向的繞射峰相對強度都不盡相同，但都是以(110)繞射峰強度為最強，說明了 Ti<sub>50</sub>Ni<sub>50</sub> 在軋延及退火的過程中產生了大量的{110} Texture，使得試片的 X、Y、Z 三方向出現異向性的行為。而此一結果與 M. Liu et al.[7]對 Ni<sub>0.625</sub>Al<sub>0.375</sub> 單晶沿著三個<100>方向做熱膨脹量測的結果相似，在變態時只有在一個方向上是膨脹的，CTE 為負，其他兩個方向則是收縮，CTE 為正。

表 2 列出了 Ti<sub>49</sub>Ni<sub>51</sub> 各試片求得的母相、R 相、麻田散體相及相變態時的 CTE。

表 2 Ti<sub>49</sub>Ni<sub>51</sub> 合金經 TMA 量測所得到的熱膨脹係數

CTE (ppm/°C)	B2	B19'	R	B2→R	R→B19'	B19'→R	R→B2
Ti <sub>49</sub> Ni <sub>51</sub> -24hr-Z	11.6	6.9	-2.7	-54.8	-63.2	-173.8	-51.8
Ti <sub>49</sub> Ni <sub>51</sub> -24hr-X	10.9	7.9	16.2	19.2	-28.5	-34.1	47.3
Ti <sub>49</sub> Ni <sub>51</sub> -24hr-Y	10.8	8.8	22.9	60.0	—	80.5	20.5
qTi <sub>49</sub> Ni <sub>51</sub> -24hr-Z	12.2	8.1	15.1	31.6	-23.6	-18.3	33.5
qTi <sub>49</sub> Ni <sub>51</sub> -24hr-X	12.1	7.0	2.7	—	-144.4	-93.0	—
qTi <sub>49</sub> Ni <sub>51</sub> -24hr-Y	10.6	8.8	21.9	60.1	—	50.7	71.5
Ti <sub>49</sub> Ni <sub>51</sub> -1hr-Z	11.6	—	-9.2	-81.1	—	—	-144.1
qTi <sub>49</sub> Ni <sub>51</sub> -1hr-Z	11.5	—	14.8	26.1	—	—	40.2

本實驗針對同樣具有 B2⇌R⇌B19' 二階段變態的 Ti<sub>50</sub>Ni<sub>49</sub>Fe<sub>1</sub> 及 Ti<sub>50</sub>Ni<sub>48.5</sub>Fe<sub>1.5</sub> 合金也做了三個方向 TMA 的量測，所求到的 CTE 如表 3 所示。

表 3 TiNiFe 合金經 TMA 量測所得到的熱膨脹係數

CTE (ppm/°C)	B2	B19'	R	B2→R	R→B19'	B19'→R	R→B2
Ti <sub>50</sub> Ni <sub>49</sub> Fe <sub>1</sub> -Z	11.8	0.1	-49.6	-279.6	-428.3	-642.1	—
Ti <sub>50</sub> Ni <sub>49</sub> Fe <sub>1</sub> -X	11.5	8.4	28.5	218.4	62.5	340.3	—
Ti <sub>50</sub> Ni <sub>49</sub> Fe <sub>1</sub> -Y	11.8	8.6	34.4	237.7	88.9	296.1	—
Ti <sub>50</sub> Ni <sub>48.5</sub> Fe <sub>1.5</sub> -Z	11.9	0.2	-26.0	-181.6	-351.7	-535.2	-207.7
Ti <sub>50</sub> Ni <sub>48.5</sub> Fe <sub>1.5</sub> -X	11.7	8.3	33.9	74.1	20.6	102.0	162.1
Ti <sub>50</sub> Ni <sub>48.5</sub> Fe <sub>1.5</sub> -Y	10.8	8.1	26.7	199.4	33.7	82.4	175.6
qTi <sub>50</sub> Ni <sub>49</sub> Fe <sub>1</sub> -Z	11.6	7.4	21.7	49.4	-94.8	-69.7	—
qTi <sub>50</sub> Ni <sub>48.5</sub> Fe <sub>1.5</sub> -Z	11.3	7.3	11.3	40.7	-61.3	-41.7	36.6

由表 2 及表 3 可以看出 Ti<sub>49</sub>Ni<sub>51</sub> 合金及 TiNiFe 合金各試片之母相的 CTE 大多在 11 ppm/°C 左右，與 Ti<sub>50</sub>Ni<sub>50</sub> 試片的結果一致。麻田散體相的 CTE 大約在 7~8 ppm/°C 左右，也與 Ti<sub>50</sub>Ni<sub>50</sub> 試片的結果一致。至於 R 相熱膨脹係數可以看出來其大小都不相同，並無規則可循，唯一的共同點就是出現負值的幾組試片都是在各成份沒有經過固溶處理的 Z 方向。而這幾組試片也是唯一在 R 相變態時 CTE

出現負值的試片。故很明顯的可以看出 B2→R 變態時 CTE 的正負影響了變態完成後 R 相的正負值，且其絕對值的大小並無一致性。這也說明了 R 相的熱膨脹係數受試片異向性的影響非常大，並無一固定值。

Kuroiwa et al.[8]曾對 Au-49.5 at.%Cd 單晶沿著三個<100>方向做熱膨脹的量測，其低溫麻田散體相的晶體結構為菱形晶 (Rhombohedral) [9]，與 TiNi 合金 R 相結構相同，故其變態時熱膨脹的量測可供本實驗 R 相變態時的參考依據。其結果發現在變態的過程中只有在一個方向上的熱膨脹係數出現了負值，其他兩方向皆為正值，與本實驗得到的結果相同，証實了本實驗的結果確是因試片具有異向性所致。而其試片經過 500°C 恆溫 3 小時再淬火後發現三個方向的 CTE 皆為正值，也與本實驗經過固溶處理的試片得到的結果相同，然而 Kuroiwa et al.對於淬火造成 CTE 值正負的差異並沒有深入的討論。而在本實驗中，推測可能的原因為固溶處理的過程減少了 {110} Texture 的數量，使試片的異向性改變。

由表 3 可以看出 Ti<sub>50</sub>Ni<sub>49</sub>Fe<sub>1</sub>-Z 方向及 Ti<sub>50</sub>Ni<sub>48.5</sub>Fe<sub>1.5</sub>-Z 方向兩組試片在整個 B2⇌B19'變態過程中 CTE 絕對值非常的大，也就是試片的長度變化量非常大。以 Ti<sub>50</sub>Ni<sub>49</sub>Fe<sub>1</sub>-Z 方向試片為例，在升溫過程 B19'→R→B2 變態時，於 6°C~35°C 的變態溫度範圍內，dimension change 量約有 11000 μm/m，也就是說若試片有 1 m，在經過約 30°C 的溫度變化下，長度改變了 11 mm。以一般金屬來說，鋁的 CTE 值算是很高的，在室溫下約有 25 ppm/°C，經過 30°C 的溫度變化後 1 m 長度的改變量也只有 0.75 mm，遠比本實驗的 Ti<sub>50</sub>Ni<sub>49</sub>Fe<sub>1</sub> 合金小得多。

### 3.2 電阻實驗

圖 2 為 Ti<sub>50</sub>Ni<sub>50</sub> 合金經過熱軋延後空冷的試片電阻量測之結果，可以發現在 M<sub>s</sub> 之前有電阻上升的現象，而此現象與 C.M. Wayman et al.[10]將等原子比 TiNi 做熱循環處理後得到的結果相同。故推測應該是本實驗的 Ti<sub>50</sub>Ni<sub>50</sub> 試片因為經過軋延造成在麻田散體變態之前已有 R 相變態的產生。至於 M<sub>s</sub>、M<sub>f</sub>、A<sub>s</sub> 及 A<sub>f</sub> 溫度與 DSC 量測結果之比較列於表 4，可

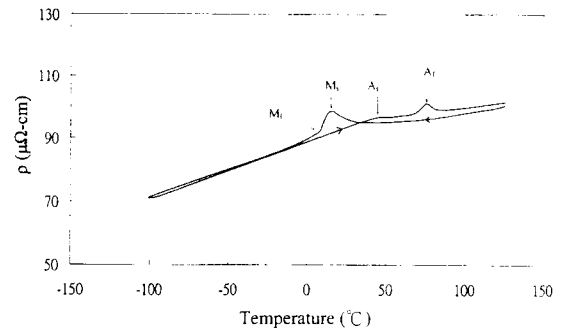


圖 2 Ti<sub>50</sub>Ni<sub>50</sub> 之電阻實驗結果

以看出經過固溶處理後的試片(qTi<sub>50</sub>Ni<sub>50</sub>-電阻)的 M<sub>s</sub> 溫度有上升的現象，代表固溶處理會抑制 R 相變態的產生，但仍有少量之 B2→R 變態之產生。

表 4 Ti<sub>50</sub>Ni<sub>50</sub> 合金 DSC 與電阻量測的變態溫度之比較

Temperature(°C)	M <sub>s</sub>	M <sub>f</sub>	A <sub>s</sub>	A <sub>f</sub>
Ti <sub>50</sub> Ni <sub>50</sub> -DSC	30.9*	0.6	49.2	77.1
Ti <sub>50</sub> Ni <sub>50</sub> -電阻	13.3	3.8	47.34	77.3
qTi <sub>50</sub> Ni <sub>50</sub> -DSC	33.4*	3.9	49.1	79.5
qTi <sub>50</sub> Ni <sub>50</sub> -電阻	26.2	2.2	50.6	85.5

\*此 M<sub>s</sub> 溫度應為 R<sub>s</sub> 溫度，詳見本文中之討論

圖 3 為 Ti<sub>49</sub>Ni<sub>51</sub> 合金經過 400°C 時效 24 小時之試片電阻量測的結果。由圖 3 中可以

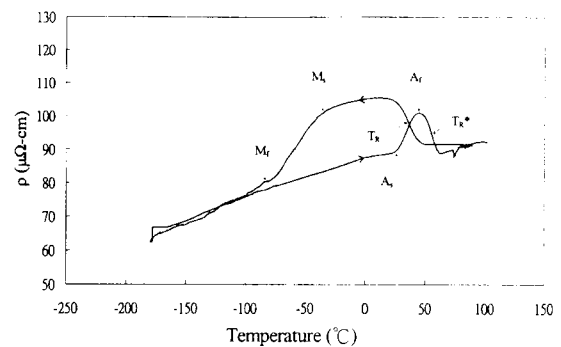


圖 3 Ti<sub>49</sub>Ni<sub>51</sub>-24hr 之電阻實驗結果

明顯看出二階段變態過程，B2→R 變態造成電阻上升，R→B19'變態造成電阻下降。至於 Ti<sub>49</sub>Ni<sub>51</sub> 合金各試片由電阻量測之變態溫度詳列於表 5，可以看出與 DSC 量測到的變態溫度相近。

本實驗的試片都是沿著 Y 方向切割成長條狀，為了觀察試片的異向性是否會對電阻性質造成影響，故選擇 Ti<sub>50</sub>Ni<sub>48.5</sub>Fe<sub>1.5</sub> 合金沿 X

表 5 Ti<sub>49</sub>Ni<sub>51</sub> 合金 DSC 與電阻量測的變態溫度之比較

Temperature(°C)	M <sub>s</sub>	M <sub>f</sub>	A <sub>s</sub>	A <sub>f</sub>	T <sub>R</sub>	T <sub>R</sub> *
Ti <sub>49</sub> Ni <sub>51</sub> -1hr-DSC	—	—	—	—	19.1	32.5
Ti <sub>49</sub> Ni <sub>51</sub> -1hr-電阻	—	—	—	—	15.4	35.8
qTi <sub>49</sub> Ni <sub>51</sub> -1hr-DSC	—	—	-36.5	-5.7	16.1	33.6
qTi <sub>49</sub> Ni <sub>51</sub> -1hr-電阻	—	—	-39.1	-6.2	8.7	30.1
Ti <sub>49</sub> Ni <sub>51</sub> -24hr-DSC	-29.0	-83.0	26.7	—	36.4	53.2
Ti <sub>49</sub> Ni <sub>51</sub> -24hr-電阻	-33.6	-86.8	28.0	47.1	38.4	55.6
qTi <sub>49</sub> Ni <sub>51</sub> -24hr-DSC	-43.1	-89.2	27.2	—	37.6	52.1
qTi <sub>49</sub> Ni <sub>51</sub> -24hr 電阻	-44.1	-88.8	25.5	42.2	37.2	50.1
Ti <sub>49</sub> Ni <sub>51</sub> -32hr-DSC	-28.0	-58.0	32.5	—	39.2	53.3
Ti <sub>49</sub> Ni <sub>51</sub> -32hr-電阻	-24.4	54.8	30.2	45.3	41.3	50.9

方向切割，做電阻的量測。表 6 列出了 TiNiFe 各試片由電阻量測到的變態溫度，可以看出 Ti<sub>50</sub>Ni<sub>48.5</sub>Fe<sub>1.5</sub>-X 試片的麻田散體變態溫度比起 Ti<sub>50</sub>Ni<sub>48.5</sub>Fe<sub>1.5</sub> 試片(Y 方向)整個被壓低，逆變態溫度則是被提高。R 相變態也是一樣，T<sub>R</sub> 被壓低，T<sub>R</sub>\* 則是提高，造成兩變態時的熱滯都變大許多。而經過 650°C 退火 1 小時的

表 6 TiNiFe 合金 DSC 與電阻量測的變態溫度之比較

Temperature(°C)	M <sub>s</sub>	M <sub>f</sub>	A <sub>s</sub>	A <sub>f</sub>	T <sub>R</sub>	T <sub>R</sub> *
Ti <sub>50</sub> Ni <sub>49</sub> Fe <sub>1</sub> -DSC	-16.5	-53.8	6.5	—	1.2	—
Ti <sub>50</sub> Ni <sub>49</sub> Fe <sub>1</sub> -電阻	-21.2	-58.2	8.8	—	0.8	—
q Ti <sub>50</sub> Ni <sub>49</sub> Fe <sub>1</sub> -DSC	-11.8	-53.2	10.8	—	0.2	—
q Ti <sub>50</sub> Ni <sub>49</sub> Fe <sub>1</sub> -電阻	-19.5	-59.3	2.1	—	-5.6	—
Ti <sub>50</sub> Ni <sub>48.5</sub> Fe <sub>1.5</sub> -DSC	-51.3	-81.1	-26.7	—	-9.9	6.7
Ti <sub>50</sub> Ni <sub>48.5</sub> Fe <sub>1.5</sub> -電阻	-53.2	-83.4	-27.0	-1.7	-10.5	5.6
qTi <sub>50</sub> Ni <sub>48.5</sub> Fe <sub>1.5</sub> -DSC	-51.1	-98.1	-24.6	—	-11	7.8
qTi <sub>50</sub> Ni <sub>48.5</sub> Fe <sub>1.5</sub> 電阻	-54.6	-103.4	-35.5	-4.2	-14.7	2.7
Ti <sub>50</sub> Ni <sub>48.5</sub> Fe <sub>1.5</sub> -X 電阻	-75.7	-120.7	13.3	44.2	-29.9	53.6
aTi <sub>50</sub> Ni <sub>48.5</sub> Fe <sub>1.5</sub> -電阻	-63.0	-92.6	-24.1	2.0	-15.1	11.2

aTi<sub>50</sub>Ni<sub>48.5</sub>Fe<sub>1.5</sub> 試片，原本偏移之變態溫度有回復的現象。至於變態點偏移的原因，推測應該與試片的 X 方向因軋延導入較多缺陷有關。

早期在以四點量測方法測量電阻時，因為溫度控制不精確以及試片尺寸上的差異等原因，以致於只能求出相對的電阻值，而在本實驗中則是量測了電阻的絕對值，也就是比電阻的變化，除了以 Cryocon 32B 型溫度控制器得到良好的控溫及均溫條件，為了使誤差降至最低，儘量增加試片的長度 L 及減小截面積 A。在表 7 中則列出了本實驗各試片 B2→R 相變態時比電阻的變化量。可看出 TiNiFe 合金試片比電阻的變化量比 Ti<sub>49</sub>Ni<sub>51</sub> 合金試片來的大一些，各試片在 B2→R 變態時 ρ 值上升約 10~16 μΩ-cm，變化量約 12~20%。

表 7 B2→R 相變態時比電阻的變化量

	ρ 的變化量 (μΩ-cm)	ρ 的變化比例 (%)	變化之溫度範圍 (°C)
Ti <sub>49</sub> Ni <sub>51</sub> -1hr	12(85~97)	14.1	33.5~9.6
qTi <sub>49</sub> Ni <sub>51</sub> -1hr	10(77~87)	13.0	31.4~19.5
Ti <sub>49</sub> Ni <sub>51</sub> -24hr	12(93~105)	12.9	42.9~21.2
qTi <sub>49</sub> Ni <sub>51</sub> -24hr	12(93~105)	12.9	47.6~21.7
Ti <sub>49</sub> Ni <sub>51</sub> -32hr	11(88~99)	12.5	51.5~30.9
Ti <sub>50</sub> Ni <sub>49</sub> Fe <sub>1</sub>	16(82~98)	19.5	8.9~21.7
qTi <sub>50</sub> Ni <sub>49</sub> Fe <sub>1</sub>	12(75~87)	16.0	0.5~18.1
Ti <sub>50</sub> Ni <sub>48.5</sub> Fe <sub>1.5</sub>	16(85~101)	18.8	-4.0~24.8
qTi <sub>50</sub> Ni <sub>48.5</sub> Fe <sub>1.5</sub>	12(74~86)	16.2	-7.1~33.2
Ti <sub>50</sub> Ni <sub>48.5</sub> Fe <sub>1.5</sub> -X	15(75~90)	20.0	-19.5~48.3
aTi <sub>50</sub> Ni <sub>48.5</sub> Fe <sub>1.5</sub> -X	15(76~91)	19.7	-10.2~39.3

#### 四、計劃成果自評

本研究針對了 TiNi SMAs 變態時熱膨脹係數及電阻的變化做一深入探討，發現其 CTE 值不論正負都比起一般金屬大一個 order 以上，若能利用其變態時具有負 CTE 的特性用在 Silicon chip 導熱件之銅基或鋁基複合材料(MMC)上，以線材的形式埋入 MMC 內，使其整體的 CTE 值下降，並能接近 Si 的 CTE，使得 Silicon chip 與 MMC 之間因熱應力造成的熱疲勞破壞情形得以改善。至於 TiNi SMAs 在 R 相變態時有近 20% 的電阻變化量，可將此電阻變化特性應用在電器產品的安全裝置之開發，其應用溫度範圍很廣，可依不同的溫度需要設計變態溫度相近之 TiNi SMAs。

#### 參考文獻

1. H.C. Lin, S.K. Wu, T.S. Chou and H.P. Kao, Acta Metall. Materi., 39(1991) 2069-2080.
2. S.K. Wu and H.C. Lin, Scripta Metall. Materi., 25(1991) 1529-1532.
3. Y.C. Lo and S.K. Wu, Scripta Metall. Materi., 26(1992) 59-62.
4. Y.C. Lo, S.K. Wu and H.E. Horng, Acta Metall. Materi., 41(1993) 747-759.
5. H.C. Lin and S.K. Wu, Acta Metall. Materi., 42(1994) 1623-1630.
6. J. Uchil, K.P. Mohanchandra, K. Ganesh Kumara, K.K. Mahesh and T.P. Murali, Physica B, 270(1999) 279-287.
7. M. Liu, T.R. Finlayson and T.F. Smith, Mater. Sci. Eng., A157(1992) 225.
8. Y. Kuroiwa, T. Finlayson and F. Smith, Solid State Commun. 106(8) (1998) 501.
9. T. Ohba, Y. Emura and K. Otsuka, Mater. Trans. JIM, 33(1992) 29.
10. C.M. Wayman, I. Cornelis and K. Shimizu, Scripta Metall., 6(1972) 115-122.