解 説

アルミニウムの放射化分析 (その3)

小林 昌 敏*

Activation analysis of aluminium (part 3)

KOBAYASHI Masatoshi*

7. アルミニウムおよびその合金の放射化分析

7.1 熱中性子による非破壊的な放射化分析

アルミニウムおよびその合金の分析では、アルミニウム地金もしくは純アルミニウム中の微量不純物の定量が、またアルミニウム合金では添加元素および微量不純物の定量が行なわれる。

そこで、まづアルミニウム地金および純アルミニウム中の不純物、アルミニウム合金中における添加元素のうち、とくに重要と思われる元素をあげ、熱中性子によるこれらの元素の核反応について考えて見よう。(第10表)

天然に得られるアルミニウムは安定な核種である ^{27}Al のみからなっている、つまり ^{27}Al の存在比 100% である。

アルミニウムを原子炉中で照射すると、原子炉中の熱中性子および速中性子によってつぎのような核反応が行なわれる。

^{28}Al は ^{27}Al の (n, γ) 反応によって生成する半減期 2.3 min. の放射性核種であり、この反応の放射化断面積 0.21 barn である。また ^{24}Na は ^{27}Al の (n, α) 反応によって生成する半減期 15 hrs の放射性核種であり、この反応の放射化断面積は 14 MeV の速中性子に対して 0.14 barn である。

原子炉の熱中性子柱 (thermal column) のようにほぼ完全な熱中性子化が行なわれている場所で放射化を行なえば、 (n, α) 反応による ^{24}Na の生成はおきないが、熱中性子柱での熱中性子束密度は炉心部のその 1/100 以下であつて、放射化分析の感度をできるだけ大きくするためには多くの場合炉心部において放射化を行なう。

炉心部では ^{235}U の核分裂の際放出される速中性子が完全に減速されないために第5表 (軽金属第64号) にも示したように、熱中性子束密度の数%から 100% 程度の速中性子が存在する。熱中性子束密度に対する速中性子

束密度の割合は炉の形式や同一炉内でも場所によつて異なるものである。

(n, γ) 反応で生成する ^{28}Al の放射能は第12図に示すように照射終了後 $e^{-\lambda t} = e^{-0.693/T}$ の指数関数にしたがつて減衰する。この式で t は壊変時間、 T は半減期である。照射終了後 10 min. では放射能の強さははじめの値の約 5%, 20min. では約 0.24% にまで減衰する。

そこで純アルミニウムの試料を原子炉中で放射化したのち 10~20min. 間放置して冷却 (cooling) を行なえば ^{28}Al の放射能が消失し、 ^{56}Mn (半減期 2.58 hrs.), ^{122}Sb (半減期 2.75 days), ^{124}Sb (半減期 60 days), ^{64}Cu (半減期 12.8 hrs), ^{72}Ga (半減期 14.2 hrs), ^{24}Na (半減期 15 hrs.), ^{46}Sc (半減期 85 days), ^{65}Zn (半減期 245 days), ^{60}Co (半減期 5.3 years) など不純物元素から (n, γ) 反応で生成する放射性核種の放射能のみが残る。このことは地金、あるいは純アルミニウム中の不純物元素を定量するのに非常に都合であつて、純アルミニウムの場合には化学的分離操作を行わずに γ 線スペクトロメトリーのみで、いわゆる非破壊的な分析を行なつても、かなり多数の不純物元素を分析することができる。

第10表からわかるように Al-Mg 合金中の不純物の分析でも同様であり、またマグネシウム、チタン中の不純物を分析する場合にも非破壊的な分析法を適用することができる。

一方速中性子による ^{27}Al の (n, α) 反応で生成する ^{24}Na は純アルミニウム中の不純物のナトリウムを熱中性子による (n, γ) 反応で生成する ^{24}Na の測定によつて定量する場合の誤差の原因になる。

7.2 放射化時間の相異による γ 線スペクトルの形状の変化

同一品位の純アルミニウムを原子炉中で放射化する場合、衝撃時間および冷却時間の選び方によつて生成する放射性核種の放射能の相対的な大きさが変化するので全体としての γ 線スペクトルの形状も変化する。

第5図 (軽金属第64号) は純度 99.99% のアルミニウ

* 東京都立アイソトープ総合研究所主任研究員 Senior Research Member, Tokyo Metropolitan Isotope Centre

第10表 純アルミニウム中に含まれる元素の熱中性子による放射化分析に用いられる核反応と検出限界

分 類	分 析 元 素	タ ー ゲ ッ ト 核	存 在 比 (%)	放 射 化 断 面 積 (barn)	測 定 核 種	半 減 期	検 出 限 界* (μg)
γ 線スペクトロメトリのみによる定量の可能なもの	Na	^{23}Na	100	0.56	^{24}Na	15.0h	0.005
	Mn	^{55}Mn	100	13.4	^{56}Mn	2.58h	0.00005
	Ga	^{71}Ga	39.5	3.4	^{72}Ga	14.2h	0.005
	Dy	^{164}Dy	28.18	2,600	^{165}Dy	2.32h	0.000005
	Sb	^{123}Sb	42.75	0.03	^{124}Sb	60d	
		^{121}Sb	57.25	6.8	^{122}Sb	2.75d	0.01
	Cu	^{63}Cu	69.1	3.9	^{64}Cu	12.8h	0.001
	Sc	^{45}Sc	100	10	^{46}Sc	85d	0.0002
	Co	^{59}Co	100	16	^{60}Co	5.2y	0.002
化学分離法と γ 線スペクトロメトリの併用により容易に定量できるもの**	Zn	^{64}Zn	48.89	0.5	^{65}Zn	245d	0.034
	Cr	^{50}Cr	4.31	11	^{51}Cr	27.8d	0.02
	La	^{139}La	99.911	8.4	^{140}La	40.2h	0.005
	Sm	^{152}Sm	26.63	140	^{153}Sm	47h	0.005
	As	^{75}As	100	4.2	^{76}As	26.5h	0.005
	Fe	^{58}Fe	0.31	0.9	^{59}Fe	45.1d	0.9
	Cd	^{114}Cd	28.86	1.1	^{115}Cd	53h	0.5
化学分離が必要で、半減期が短いため に定量の困難なもの	Si	^{30}Si	3.05	0.11	^{31}Si	2.62h	0.1
	Ti	^{50}Ti	5.25	0.14	^{51}Ti	5.80m	0.05
	Mg	^{26}Mg	11.29	0.05	^{27}Mg	9.45m	0.5
	V	^{51}V	99.76	4.5	^{52}V	3.76m	0.001
	Sn	^{122}Sn	4.71	0.16	^{123}Sn	39.5m	
		^{124}Sn	5.98	0.2	^{125}Sn	9.5m	0.5
	Cl	^{37}Cl	24.47	0.56	^{38}Cl	37.3m	0.1
(n, γ) 反応以外の核 反応により定量できるもの	O	$^{16}\text{O}(\gamma, n)^{15}\text{O}$, $^{16}\text{O}(t, n)^{18}\text{F}$, $^{17}\text{O}(d, n)^{18}\text{F}$ $^{16}\text{O}(\alpha, pn)^{18}\text{F}$, $^{18}\text{O}(p, n)^{18}\text{F}$					
	N	$^{14}\text{N}(\gamma, n)^{13}\text{N}$, $^{14}\text{N}(n, 2n)^{13}\text{N}$					
	F	$^{19}\text{F}(\gamma, n)^{18}\text{F}$, $^{19}\text{F}(n, 2n)^{18}\text{F}$					
基 金 属 の 核 反 応	Al	$^{27}\text{Al}(n, \gamma)^{28}\text{Al}$ $^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$ (速中性子による反応)					

* 熱中性子束密度 $1.8 \times 10^{12} \text{ n.cm}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1}$ で1時間の放射化を行ない、光電ピークにおけるカウント数が半減期1分以下では、1000cpm、半減期1分～1時間では、100cpm、半減期1時間以上では10cpmになるような元素の量を検出限界として定義した。

** γ 線スペクトロメトリのみで定量することのできる Na, Mo, Ga, Dy, Sb, Cu, Sc, Co などはもちろん化学的分離によつても定量できる。またここにあげてない元素でも化学的分離を行なえば定量できるものが多い。

ム地金を原子炉 EL 2 中で2時間放射化した場合に得られた γ 線スペクトルで、前にも説明したように0.82MeVの光電ピークを測定することによつて Ga および Mn の非破壊的な定量を行なうことができた。1時間の放射化でもこれに類似した γ 線スペクトルが得られるが、0.82MeVの光電ピークの壊変曲線をしらべるとほとんど ^{56}Mn だけが生成していることがわかった。

原子炉トリガII型の回転試料棚に同一純度のアルミニウム地金を入れて2時間の放射化を行なうと、この炉の炉心部では熱中性子束密度の大きさに対する速中性子束密度の相対的な大きさが大きいので、第13図に見られるように不純物の Mn および Ga からつぎの核反応で生成する放射性核種 ^{56}Mn , ^{72}Ga のほかに ^{27}Al の (n, α) 反応で生成する ^{24}Na の光電ピークが1.37MeV および 2.7MeV に観察される。

またこの γ 線スペクトルには0.094MeVに ^{165}Dy (半減期2.32hrs)の光電ピークも観察される。なおこの γ 線スペクトルは純度99.99%のアルミニウム試料を原子炉トリガII型の回転試料棚で2時間放射化し、衝撃終了後2時間冷却を行なった際に得られたものである。

原子炉トリガの同じ位置で同じ試料を約5時間放射化し、17時間の冷却を行なったものでは ^{56}Mn や ^{165}Dy の生成量にくらべて ^{24}Na の生成量が相対的に大きくなり、しかも17時間の冷却を行なうと ^{24}Na よりも ^{56}Mn や ^{165}Dy の放射能の壊変の割合が大きいので第14図に見られるように ^{24}Na による1.37MeVおよび2.7MeVの光電ピークのみが観察される。

第15図は同じ試料を1日5時間の割合で4日間、つまり断続的に合計20時間衝撃し、100時間の冷却を行なった際に得られた γ 線スペクトルで、半減期15時間の ^{24}Na

第12図 若干の軽金属から生成する放射性核種の壊変曲線

第13図 トリガ型原子炉で2時間照射し、2時間冷却した純度99.99%の純アルミニウムの γ 線スペクトル

第14図 トリガ型原子炉で5時間の放射化を行ない17時間冷却した純度99.99%の純アルミニウムの γ 線スペクトル

第15図 断続20時間の熱中性子放射化を行ない、100時間の冷却を行なった純度99.99%の純アルミニウムの γ 線スペクトル

のほかに、 ^{24}Na よりも半減期の長い放射性核種である ^{158}Sm (半減期 47hrs.) の光電ピークが 0.1MeV の位置に、 ^{140}La (半減期 40.2hrs.) の光電ピークが 0.49MeV の位置にあらわれている。

第16図は原子炉 EL 2 で連続 130 時間の放射化を行なった高純度アルミニウムの γ 線スペクトルで、衝撃終了後 3 日間の冷却を行なったものでは 0.565MeV に ^{124}Sb (半減期 60 days), 0.875MeV に ^{72}Ga の光電ピークが観察される。

また同じ試料を10日間冷却したものでは 0.325MeV に ^{51}Cr (半減期 27.8days), 1.1MeV に ^{65}Zn (半減期 245 days) および ^{46}Sc (半減期 85 days) の光電ピークがある。

第16図 130 時間の放射化を行なったアルミニウム地金の γ 線スペクトル

第17図 断続50時間の放射化を行ない、200 時間冷却した純度 99.99 % の純アルミニウムの γ 線スペクトル

らわれている。

第17図は 4 週間にわたって断続50時間の放射化を行ない、衝撃終了後200時間の冷却を行なった際に得られた γ 線スペクトルで、0.60MeVおよび 1.69MeV に ^{124}Sb , 0.88 MeV および 1.12MeV に ^{46}Sc の光電ピークがあらわれている。

(a) 試料の γ 線スペクトル (^{60}Co および ^{137}Cs を含む)
Co の重量 X_1 グラム
Cs の重量 X_2 グラム

(b) Co 標準試料の γ 線スペクトル
Co の重量 w_1 , グラム
 $x_1 = w_1 \frac{A}{A'} = w_1 \frac{h_1}{h'_1}$

(c) Cs 標準試料の γ 線スペクトル
Cs の重量 w_2 グラム
 $x_2 = w_2 \frac{B}{B'} = w_2 \frac{h_2}{h'_2}$

第18図 複雑な γ 線スペクトルの解析の方法

第 11 表 γ 線スペクトロメータの各チャンネルのパルス数を印刷した記録

48	96 104	004587	004441	004515	004469	004489	004477	004352	004368
56	112 120	004501	004474	004441	004516	004485	004459	004530	004514
64	128 136	004646	004763	004721	004743	004670	004906	004842	004933
72	144 152	004988	004867	005005	005154	005269	005286	005523	005595
80	160 168	005704	005811	005836	005930	005917	006009	005979	005906
88	176 184	005633	005224	004951	004576	004249	004101	003915	003716
96	192 200	003631	003610	003616	003498	003469	003322	003213	<u>003146</u>
104	208 216	003180	003721	004968	006891	009193	011206	012351	<u>012392</u>
1.173 MeV の光電ピーク									
112	224 232	<u>010530</u>	<u>008397</u>	<u>005592</u>	<u>003411</u>	<u>002002</u>	<u>001261</u>	<u>001131</u>	<u>001461</u>
120	240 248	<u>002408</u>	<u>003798</u>	<u>005677</u>	<u>007455</u>	<u>008876</u>	<u>009799</u>	<u>009345</u>	<u>008039</u>
1.332 MeV の光電ピーク									
128	256 264	<u>006300</u>	<u>004346</u>	<u>002685</u>	<u>001510</u>	<u>000818</u>	<u>000425</u>	<u>000277</u>	<u>000202</u>
136	272 280	000183	000162	000165	000158	000176	000154	000133	000132

(a) ^{60}Co 標準試料 (既知量の Co を放射化したもの)

48	96 104	002842	002707	002637	002431	002461	002507	002442	002581
56	112 120	002826	003562	004985	007630	011286	014694	<u>015872</u>	013805
0.662 MeV の光電ピーク									
64	128 136	009944	006425	003982	002912	002560	002540	002515	002637
72	144 152	002562	002570	002698	002724	002760	002773	002883	002919
80	160 168	002909	003021	002905	003064	003097	003047	002829	002717
88	176 184	002464	002364	002167	002165	001933	001848	001839	001889
96	192 200	001850	001791	001785	001667	001579	001601	<u>001587</u>	<u>001878</u>
104	208 216	002357	003304	004476	005456	006205	<u>006293</u>	005362	004164
1.173 MeV の光電ピーク									
112	224 232	<u>002861</u>	<u>001713</u>	<u>001019</u>	<u>000597</u>	<u>000602</u>	<u>000814</u>	<u>001320</u>	<u>002067</u>
120	240 248	<u>002938</u>	<u>003826</u>	<u>004676</u>	<u>004775</u>	<u>004598</u>	<u>003798</u>	<u>002797</u>	<u>001907</u>
1.332 MeV の光電ピーク									
128	256 264	<u>001132</u>	<u>000684</u>	<u>000381</u>	<u>000217</u>	000154	000150	000123	000117
136	272 280	000098	000114	000107	000099	000115	000073	000078	000103

(b) 放射化した試料 ($^{137}\text{Cs} + ^{60}\text{Co}$)

以上の結果から、放射化時間および冷却時間を適当にえらんで γ 線スペクトロメトリーを行えば、1~2時間の放射化で Na および Mn, Ga, Dy, 20時間の放射化で Sm, La, Na, 130時間の放射化で Sb, Ga, Cr, Zn, Sc などの定量が可能ながわかる。

7.3 非破壊的な分析法

γ 線スペクトルにあらわれた光電ピークから分析値を決定するには第18図(a), (b), (c)に示すように試料および標準試料の γ 線スペクトルの比較を行なう。

第18図(a)に見られるように最もエネルギーの大きい光電ピークをもつ放射性核種では、他の核種の放射能の影響が全くないので、光電ピークの全面積に相当する計数値を標準試料の同じエネルギーの光電ピークの全面積に相当する計数値と比較すればよい。

マルチチャネル線スペクトロメータを用いる場合には第11表のように記憶回路に蓄積された各チャネルのパルス数を読みだしてタイプライター、またはプリンタで印刷させたのち、第18図(a)の光電ピークの両側の極小点に相当するチャネルを見つけだし、この2つのチャネルの谷間にある全チャネルの計数値の和を求めると、これが光電ピークの面積に相当する計数値である。

2つの光電ピークを比較する簡便な方法としては光電ピークの高さを比較する方法があり、マルチチャネル γ 線スペクトロメータを用いる場合には印刷された各チャネルの計数値のなかからこの光電ピークの最高値に相当するチャネルの計数値をさがし、標準試料の同じチャネルの計数値と比較する。

シングルチャネル γ 線スペクトロメータを用いる場合には第18図(a)に示すように各チャネルの計数率に相当する記録計のペンの移動が直線目盛のグラフをえがくので、グラフ上で光電ピークの高さを測ることができる。第18図(a)の γ 線スペクトルは ^{60}Co および ^{137}Cs の γ 線スペクトルが合成されているものであるが、 ^{60}Co の1.17 MeVおよび1.33 MeVの光電ピークをこのような方法で比較することによってCoの定量を行なうことができる。

つぎに ^{137}Cs の光電ピークは0.6 MeVの位置にあるがCoが共存する場合には ^{60}Co から放出される γ 線のコンプトン散乱によるコンプトン・ピークが重なるため ^{137}Cs の光電ピークの両側にある2つの極小値に相当するチャネルの間にある全チャネルの計数値の和のなかには ^{60}Co の γ 線による計数も含まれてう。

このような場合には第18図(a)に示したように2つの極小点を結びこの線より上にある部分の面積に相当する計数で標準試料との比較を行なわなければならない。

シングルチャネル γ 線スペクトロメータを用いて書かせた直線目盛のグラフをつかう場合には第19図(a)のよ

うに光電ピークの最高点を通る垂線と2つの極小点を結ぶ線分との交点 m を求め、 bm の長さで比較を行なう。

多数の放射性核種が同一試料内に共存する場合にはそれぞれのエネルギーの γ 線によつてつくられるコンプトン・ピークが重畳するため、比較的能量の低い光

(a) 試料の γ 線スペクトル (^{60}Co および ^{137}Cs を含む) Co の重量 x_1 グラム Cs の重量 x_2 グラム、パルスの蓄積時間 t

(b) Co標準試料の γ 線スペクトル (曲線a) Coの重量 w_1 グラム $x_1 = w h/h'_1$ 、試料の γ 線のスペクトルから ^{60}Co の γ 線スペクトル (曲線b) を差引くと曲線cが得られる曲線aのパルスの蓄積時間 t

(c) Cs標準試料の γ 線スペクトル
Csの重量 w_2 グラム
 $x_2 = w_2 h_2/h'_2$
パルスの蓄積時間 t

第19図 差引き法による γ 線スペクトルの解析

第20図 2結晶で測定した純度99%のAlのγ線スペクトル（照射時間30min.）

曲線 1：8 hrs 冷却
曲線 2：16 hrs 冷却

電ピーク、あるいは他の核種よりも放射能の弱い放射性核種の光電ピークを測定するのは困難であり、かつ分析値に対する誤差も大きくなる。

γ線スペクトロメトリーでこのような困難をきり抜けるにはつぎのような方法がある。

(1) NaI シンチレータの寸法の大きなものを使用する。

結晶の寸法が大きいほど結晶内でのγ線のコンプトン散乱に比較して光電効果の割合が大きくなるため、光電ピークの高さに比較してコンプトン・ピークの高さが低くなり、光電ピークが見やすくなる。

(2) 差し引き法 (subtraction method) を用いる。この方法ではたとえば 512 チャネルのγ線スペクトロメータを 1～256 チャネルと 257～512 チャネルの 2つの部分に分けて使用し、まず 1～256 チャネルに試料のγ線スペクトルを記憶させる。（第19図 a）

つぎに 257～512 チャネルに (a) の場合と同じ時間 Co 標準試料のパルスを蓄積して第19図 (b) の曲線 a のようなγ線スペクトルを得る。この図では 1.332MeV の光電ピークの高さ h_1 および h_1' の比からまず試料中に含まれる Co の定量を行なう。

つぎに Co 標準試料のパルスの蓄積を継続して 1.332 MeV のピークの高さが正確に h_1 に等しくなったとき蓄積を終了する。このときには第19図 (b) の曲線 b が得られる。1～256 チャネルに蓄積したγ線スペクトル (a) と 257～512 チャネルに蓄積したγ線スペクトル (b) の曲線との差を求めると第19図 (b) の曲線 c が得られる。

曲線 c は ^{137}Cs のγ線スペクトルであるので、つぎに Cs の標準試料から第19図 (c) のようなγ線スペクトルをつくり、0.662MeV の光電ピーク h_2 および h_2' の高さの比から試料中の Cs の量を決定する。

第21図 Hoogeboom の方法で測定した ^{60}Co のγ線スペクトル a. 普通の方法で測ったもの
b. サム・コインシデンスを利用したもの

第12表 トリガ型原子炉のパルス中性子による検出感度と定常状態における検出感度との比率

放射性核種の半減期 (sec)	パルス中性子による感度/定常状態における感度
1	35
2	18
3	12
4	8.9
5	7.1
10	3.5
20	1.8
30	1.2

(3) 2結晶法によりコンプトン・ピークを消去する。第20図に示すように試料の両側に NaI クリスタルとアントラセン・クリスタルをおき、2つの結晶からの出力パルスをアンチ・コインシデンス回路をととして波高分析回路に送る。いま試料から放出されるγ線が NaI クリスタルに入射してコンプトン散乱を行なつたとする。この散乱γ線をアントラセン・クリスタルでうけてアンチ・コインシデンス回路を動作させるので、NaI クリスタル中で光電効果によりつくられたパルスだけが波高分析回路に送られる。

第20図のγ線スペクトルは純度99%の純アルミニウムを原子炉中で30分間放射化し、上記の2結晶法で測定したγ線スペクトルで、曲線 1 は 8 時間の冷却を行なつたもの、曲線 2 は 16 時間の冷却を行なつたものである。この方法により、Cu = 103 p.p.m., Na ≤ 10 p.p.m., Ga ~ 530 p.p.m., Mn ~ 45 p.p.m という定量値が得られている。

(4) コインシデンス回路を用いて特定の放射性核種のγ線スペクトルだけを測定する。この方法についてはすでに本稿の (その 2) において Be-0.7% Ta 合金中の Cu を測定した例を挙げて説明した。第21図は Hoogeboom の方式で測定した ^{60}Co のγ線スペクトルで (b)、

普通の方法で測定した γ 線スペクトル(a)と比較したものである。

数分と1時間の熱中性子放射化を行なつた純アルミニウムの試料では ^{24}Na 、 ^{56}Mn および場合により ^{165}Dy の光電ピークが観察される。しかしきわめて短時間の放射化で ^{24}Na および ^{56}Mn の放射能の生成を抑えることにより、生成する短半減期の放射性核種を利用した非破壊的な定量の可能性も考えられるが、純アルミニウムの不純物の放射化分析については報告された例がない。

原子炉トリガではその構造上他の原子炉と異り、20～30 μsec の間 $10^{16}\text{n}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{sec}^{-1}$ 程度の大きな中性子束を与えることが可能である。つまりこの炉では瞬間的に制御棒を引きあげると増殖係数がきわめて短時間に上昇するため 10^{16} 程度の線束密度に到達するが、出力上昇に伴う温度の上昇により ^{235}U の核分裂の断面積が低下し、

自動的に出力が低下する。

熱出力 250kW のトリガ型原子炉でいろいろな半減期の放射性核種が飽和値に達するまで衝撃した場合の放射能と、原子炉の中性子パルスを利用してこれらの核種を放射化した場合に得られる放射能との比を計算で求めると第12表のようになる。つまり半減期が3秒程度以下の放射性核種を生成する元素では原子炉の中性子パルスを用いることにより検出感度が10倍以上になるので有利であると考えられる。しかし極端に半減期が短いものでは放射能の測定が困難かしくは不可能になる。

^{12}B (半減期 0.02sec), ^{73}mGe (半減期 0.33sec), ^{90}mZr (半減期 0.83sec), ^{38}mCl (半減期 1.0sec) などの放射性核種を利用する放射化分析も場合によつては有効であろうと考えられる。

海外文献紹介 (22) ALUMINIUM AND ITS ALLOYS

45) スリップ

- * Study of slip formation in polycrystalline aluminum. U.S. NACA. 1951. 18p. (NACA TN 2566)
- * On the angular distribution of slip lines in polycrystalline aluminum alloy. U.S. NACA. 1951. 18p. (NACA TN 2577).
- * Observations on the maximum average stress of flat plates buckled in edge compression. 1949. 23p. (NACA TN 1625)

46) 応力ひずみ

- * Elevated-temperature compressive stress-strain data for 24ST3 aluminum-alloy sheet and comparisons with extruded 75S-T6 aluminum alloy. 1949. 11p. Stress and strain concentration at a circular hole in an infinite plate. (Alclad 24S-T3 aluminum alloy). U.S. Labgley Aeronautical Lab. 1950. 14p. (NACA TN 2073)
- * Stress-strain and elongation graphs for aluminum-alloy 75ST6 sheet. U.S. NACA. 1950. 37p. (NACA TN 2085)
- * Plastic stress-strain relations for 75S-T6 aluminum alloy subjected to biaxial tensile stresses. 1951. 48p. (NACA TN 2425)
- * Study of elastic and plastic stress concentration factors due to notches and fillets in flat plates. (24S-T3 aluminum alloy-sheet). U.S. NACA. 1951. 23p. (NACA TN 2566)
- * Apparatus for recording the compressive stress-strain

curve for thin material coupons at large strains. (Aluminum alloys). Flygtekniska Forsoksanstalten. 1951. 31p. (FFA 39)

- * Plastic stress-strain relations for combined tension and compression. (14S-T4 aluminum alloy). U.S. NACA. 1952. 61p. (NACA TN 2737)
- * Experimental investigation of the behavior of 24S-T4 aluminum alloy subjected to repeated stresses of constant and varying amplitudes. U.S. NACA. 1952. 23p. (NACA TN 2798)
- * Combined-stress fatigue strength of 76S-T61 aluminum alloy with superimposed mean stresses and corrections for yielding. U.S. NACA. 1953. 90p. (NACA TN 2924)
- * Stress-strain and elongation graphs for alclad aluminum alloy, 24S-T86 sheet. U.S. NACA. 1950. 30p. (NACA TN 2094)
- * Protective shot peening of propellers. Part 1: Residual peening stresses. (Aluminum alloy 76S-TS, titanium alloy Ti 150A, etc.) Lesjels and Associates, Inc.) 1955. 438p.
- * Study of elastic and plastic stress concentration factors due to notches and fillets in flat plates. (24S-T3 aluminum alloy). U.S. NACA. 1953. 12p. (NACA 1117).
- * Shear-stress-strain curves for sheet material. (Aluminum alloys stresses, etc.) U.S. National Bureau of Standards. 1953. 32p.
- * Dynamic creep, stress-rupture, and fatigue properties of 24S-T4 aluminum at elevated temperatures. Part I: Unnotched specimens. University of Minnesota. 1954. 51p.
- * Study of aluminum deformation by electron microscopy. U.S. RACA. 1956. 39p. (NACA TN 3728)