

音響異方性を有する建築鉄骨溶接部の超音波探傷試験に関する研究(その1)

— 伝播特性の特異現象 —

倉持 貢
(技術研究所)
矢部 喜堂
(技術研究所)

§ 1. はじめに

海洋構造物等を対象に開発された TMCP (Thermo Mechanical Controlled Process) 鋼は、低温靱性や溶接性に優れている等の特徴を有しているところから、超高層や大スパン構造物の主要構造材料として使用される機会が増えてきた。反面、その集合組織に起因して音響異方性を有しているため、溶接部の品質保証の重要な手段である従来の超音波斜角探傷試験の適用が困難であることが指摘されている^{1)~3)}。

このような背景から、日本鉄鋼協会非破壊検査小委員会では数年前から研究を開始して、「音響異方性を有する鋼溶接部の超音波斜角探傷法」を発表した。さらに、これらが基本となり昭和63年3月に JIS Z 3060-1988 が改定された。しかし、これらに規定された探傷方法を建築鉄骨溶接部の探傷に適用する場合、①対比試験片(RB-4)を予め作成しておくことが困難である、②探傷時間が大幅にかかる等が運用上の問題点となることが予想される。

本研究では、音響異方性を有する建築鉄骨溶接部の超音波探傷試験法の確立を目的として、まず建築鉄骨用鋼材における音響異方性材の存在状況、およびその基本特性を実験的に調査するとともに、理論的にも検討した。また、音響異方性の簡易測定法についても検討した。

§ 2. 建築鉄骨用鋼材における音響異方性材の存在状況

無作為に採取した建築鉄骨の主要構造材料である SS 41, SM 50 A (66 体, $t=25$ mm) を、横波垂直探触子法により調査した結果が 図-1 である。JIS Z 3060-1988 による定義(主圧延方向の横波音速 C_{SL} と主圧延方向に直角な方向の横波音速 C_{SC} の比, すなわち音速比 C_{SL}/C_{SC} が 1.02 を超える鋼材を音響異方性材と判定する)に

よれば、音響異方性材は TMCP 鋼に限らず普通鋼の SM 50 A 等にも多く見られ、その存在率は約 32% にもなるといえる。

図-2 は、 C_{SL} , C_{SC} を標準試験片(STB-A 1)の音速 V_{STB} との比(以下、STB 音速比という)で示したものである。L 方向の STB 音速比 C_{SL}/V_{STB} は C_{SL}/C_{SC} に比例して増加し、C 方向の STB 音速比 C_{SC}/V_{STB} は逆に低下する関係がある。しかも、音速比と STB 音速比はそれぞれ図中の 1 次回帰式で近似できる相関を有している。また、 C_{SC}/V_{STB} がおよそ 0.990~1.010 と比較的小さい範囲で変化しているのに対して、 C_{SL}/V_{STB} は 1.000~1.040 と大きな範囲で変化している。すなわち、STB との音速差は C 方向よりも L 方向のほうが大きく

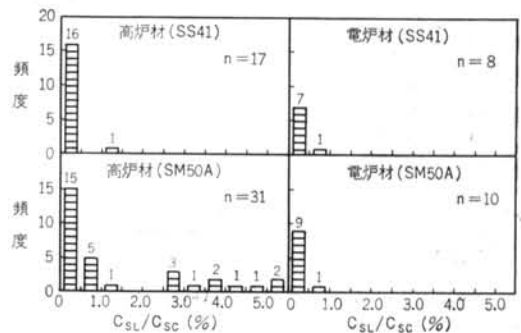


図-1 音響異方性材の存在率

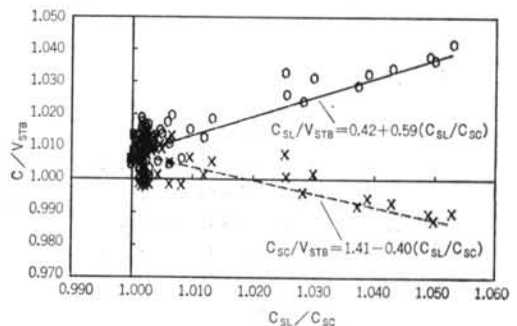


図-2 音速比と STB 音速比の関係

なるといえる。さらに、 C_{SL}/C_{SC} が1.02以下であってもSTB音速比は最大1.02になるものもある。被検材の音速の変化は C_{SL}/C_{SC} よりも、本来試験材の探傷方向の音速と標準試験片の音速との差が問題となることを考慮すると、 C_{SL}/C_{SC} が大きい場合は勿論、 C_{SL}/C_{SC} が1.02以下であっても超音波探傷上問題となる鋼材が存在するといえる。したがって、以下では被検材の音速をSTB音速比で表示することとした。

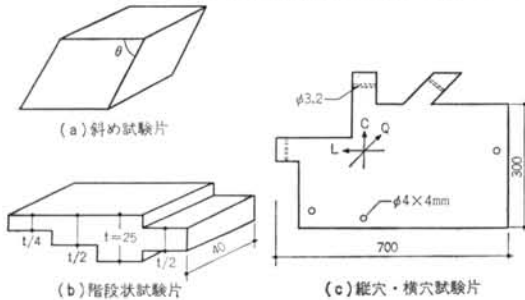
§ 3. 音響異方性材における超音波伝播特性の特異現象

3.1 実験概要

音響異方性材における超音波伝播特性の特異現象として、①音速の角度依存性、②板厚方向の音速分布、③屈折角の変化、④探傷感度の変化、⑤縦穴・横穴の距離振幅特性曲線の変化等に注目して、これらに及ぼす影響に関して調査した。

3.2 試験体

前項の試験に供したのものから15体($t=25$ mm, $C_{SL}/C_{SC}=1.000\sim 1.053$)を選定し、供試体とした。そして、1



図—3 試験体の形状寸法

超音波探傷器	FD-410 S (三菱電気) SM-80 D (東京計器)
音速測定装置	UVM-2 (東京ガス製) シンガランド方式
探 触 子	5C10×10A45, 60, 65, 70 5C14×14A45, 60, 65, 70 2C10×10A45, 60, 65, 70 2C14×14A45, 60, 65, 70 2C20×20A45, 60, 65, 70 5C10×10SN (ジャパン・プローブ)

表—1 実験装置

体の供試体から図—3に示すような斜め試験片(L, C, Q方向)、階段状試験片および縦穴・横穴試験片の3種類の試験片をそれぞれ作成した。

3.3 探傷装置

実験で使用した探傷装置および音速測定装置は表—1に示すようである。また、周波数、振動子寸法、公称屈折角が異なる24種類の斜角探触子を用いた。

3.4 実験方法

実験方法の概要を表—2に示す。

3.5 実験結果および考察

(1)音速の角度依存性

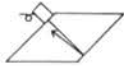
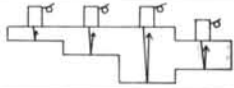

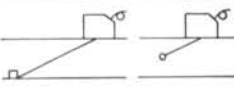
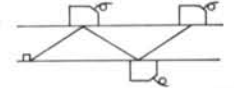
斜め試験片を用いて横波(SV波)、横波(SH波)および縦波(P波)の波面法線方向の音速を調査した結果例が図—4である。縦軸は被検材の音速、すなわちSTB音速比を示し、横軸は波面法線方向の角度を示す。また、図中の実線または破線は斜方晶モデル²⁾に基づいて計算した理論値であり、プロット点は実験値である。なお、斜方晶モデルを適用して求めた弾性スチフネスを表—3に示す。音響異方性を有する鋼材ではSV波、SH波およびP波ともに、波面法線方向の音速は伝播する角度によって大きく変化することが明らかである。特に、溶接部の斜角探傷試験に用いるSV波では、音響異方性材のL方向(L-Z断面)の音速は0および90度方向を最大値とし、45度方向を極小値とする曲線分布を示し、C方向(C-Z断面)の音速はL方向とは逆に45度方向の音速を極大値とする曲線分布を示している。

図—5は、種々の C_{SL}/C_{SC} ごとに音速の角度依存性を示したものである。音響異方性の程度(C_{SL}/C_{SC})が大きくなるほど、音速の変化は急激となることが明らかである。

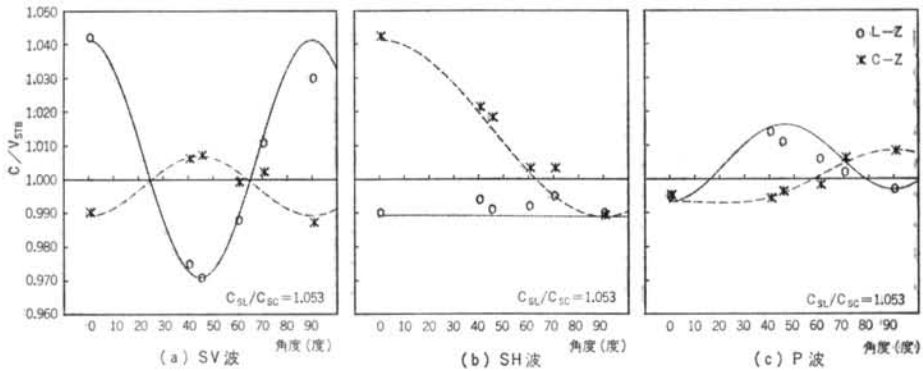
(2)板厚方向の音速分布

階段状試験片を用いて、板厚(深さ)方向の音速分布を横波垂直探触子法により調査した結果が図—6である。なお、板厚は表層 $t/4$ 部、表層 $t/2$ 部、中間層 $t/2$ 部および全板厚 t の4つに区分した。音速は、表層 $t/4$ 部が最も大きく、逆に中間層が最小となる分布を示している。全板厚 t における測定結果は、表層 $t/4$ 部と中間層のほぼ平均値を示している。すなわち、音速は断面方向に一樣とはならず、表層部が最も大きく変化しているといえる。

欠陥位置等の厳密な算定には上記の結果も考慮しなければならないが、表層部と中間層との音速差は最大でも

実験項目	試験片	試験片数	実験方法
①音速の角度依存性	斜め試験片 (L, C, Q方向)	225	横波垂直探触子法 
②板厚方向の音速分布	階段状試験片	15	横波垂直探触子法 
③屈折角の変化	縦穴・横穴試験片 (L, C, Q方向)	15	斜角二探触子・V走査法 
④探傷感度の変化	縦穴・横穴試験片 (L, C, Q方向)	15	斜角一探触子法 
⑤縦穴の距離振幅特性曲線の変化	縦穴・横穴試験片 (L, C, Q方向)	15	斜角一探触子法 

表—2 実験方法の概要

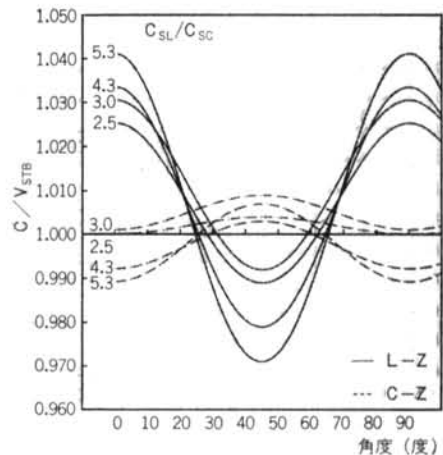


図—4 法線方向の音速の角度依存性

試験体 No.	音速比 C_{SL}/C_{SC}	C11	C22	C33	C44	C55	C66	C13	C23
1	1.000	277.3	276.6	280.7	84.3	84.4	83.0	113.5	112.5
2	1.000	277.6	277.6	282.4	84.7	84.7	82.6	115.2	114.9
3	1.000	277.1	277.9	280.0	83.9	83.9	82.9	113.1	113.1
4	1.000	277.1	277.4	278.5	83.3	83.2	82.4	113.3	112.8
5	1.000	277.6	275.9	280.6	83.9	82.8	83.0	113.3	112.8
6	1.004	276.5	277.5	276.1	82.7	83.3	82.5	111.5	110.7
7	1.006	276.3	275.2	265.5	83.3	84.2	82.0	109.3	107.5
8	1.012	278.9	279.0	278.1	82.7	84.6	82.7	115.7	112.1
9	1.025	275.6	279.0	277.5	82.6	86.8	81.7	115.0	111.7
10	1.028	276.2	280.5	275.9	81.8	86.5	81.2	114.9	109.8
11	1.030	277.2	281.7	278.6	82.7	87.7	81.5	115.4	112.0
12	1.039	275.6	280.7	274.7	81.5	87.9	81.6	115.3	110.6
13	1.043	275.1	283.4	273.1	81.3	88.2	81.4	115.8	112.1
14	1.049	276.1	282.5	272.2	80.7	88.8	80.3	117.2	110.8
15	1.053	274.6	281.0	272.7	80.8	89.5	80.7	117.9	109.4

表—3 被検材の弾性スティフネス

($\times 10^9$ dyne/cm)



図—5 音速比と音速の角度依存性

0.015程度である。したがって、音速の角度依存性を考慮すれば十分であると考えられる。

(3) 屈折角の変化

斜方晶モデルを適用して、計算により屈折角の変化を求めた結果例が図-7である。横軸は標準試験片における屈折角（以下、STB 屈折角 θ_{STB} という）を、縦軸は音響異方性材における屈折角（以下、探傷屈折角 θ という）を示している。探傷方向がL方向（L-Z断面）となる場合の探傷屈折角は、約48度以下ではSTB 屈折角よりも小さくなるように変化し、48度以上では逆に大きく

なるように変化する。一方、探傷方向がC方向（C-Z断面）となる場合の探傷屈折角は、L方向とは逆の変化を示すことが明らかである。

種々のSTB 音速比を示す鋼材ごとに、屈折角の変化を計算した結果が図-8の破線である。また、同図には斜角二探触子・V走査法で調査した結果をプロット点および実線で同時に示している。縦軸はSTB 屈折角と探傷屈折角との角度差、すなわちSTB 屈折角度差 $\theta - \theta_{STB}$

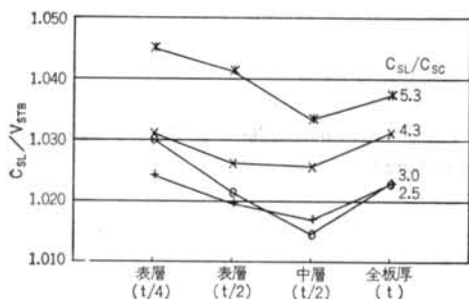


図-6 板厚方向の音速分布

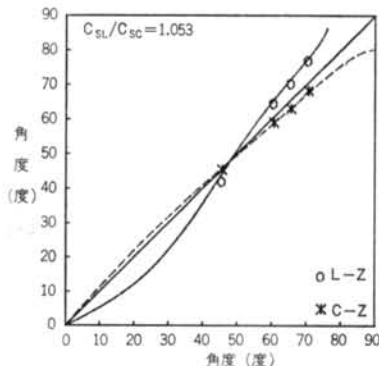
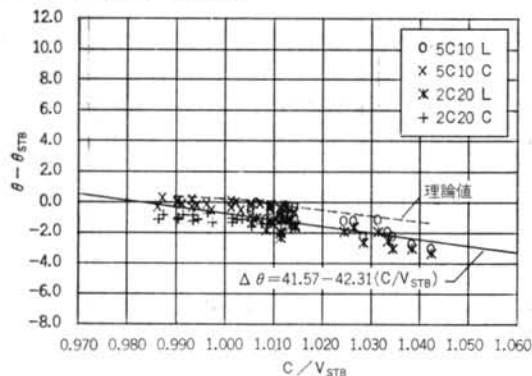
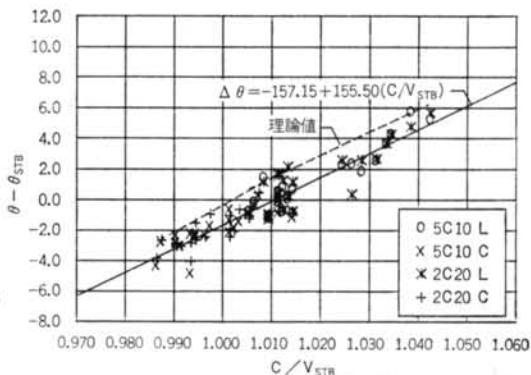


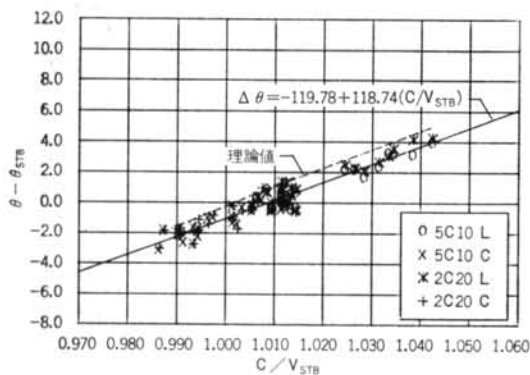
図-7 屈折角の変化の計算例



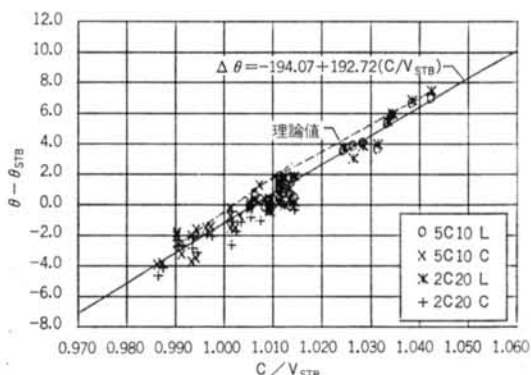
(a) 公称屈折角45度



(c) 公称屈折角65度

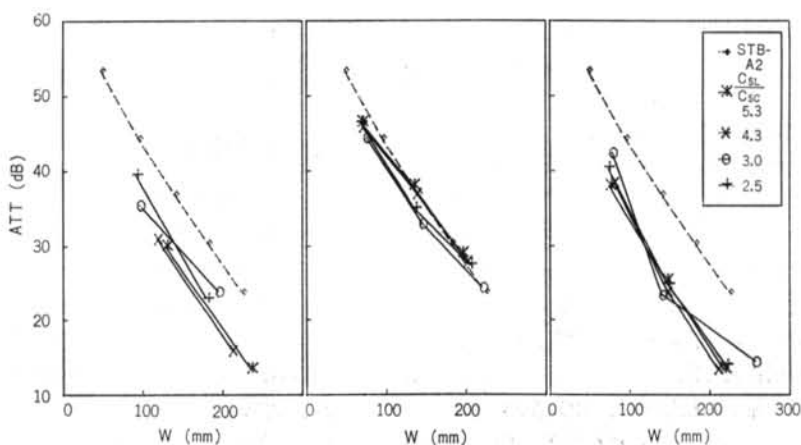


(b) 公称屈折角60度



(d) 公称屈折角70度

図-8 探傷屈折角とSTB 屈折角の角度差



図一 9 距離振幅特性曲線 (5Z10×10A70)

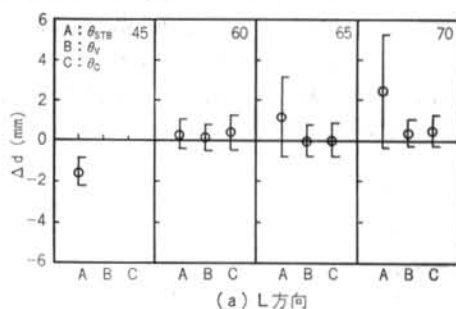
を示し、横軸は被検材の STB 音速比を示している。探触子の公称屈折角が 45 度の結果では、STB 音速比が大きくなるほど STB 屈折角度差は- (マイナス) 側に变化し、しかもその変化量は STB 音速比が 0.910~1.060 の範囲でも約-2 度と比較的小さい。公称屈折角が 60 度、65 度および 70 度の探触子では、STB 音速比が大きくなるほど STB 屈折角度差は+ (プラス) 側に变化する。しかも、その変化量は公称屈折角が大きい探触子ほど大きい。特に、70 度の探触子では約-8 度~約 10 度の範囲で大きく変化することが明らかである。したがって、これらの探触子を用いて音響異方性材を探傷する場合は、被検材の STB 音速比に対応して STB 屈折角を補正する必要があると考えられる。ちなみに、STB 音速比が 1.050 の被検材を STB 屈折角 70 度の探触子を用いて探傷する場合、探傷屈折角は 78 度にもなる。

また、斜角二探触子・V 走査法を適用して求めた屈折角度差は、STB 音速比と良い相関があることが明らかである。したがって、この STB 屈折角度差は L 方向や C 方向などの方向によらず、探傷方向の STB 音速比から求めることが可能であるといえる。

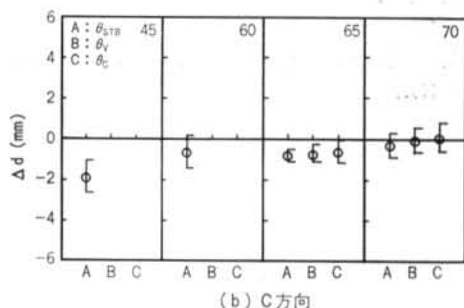
計算で求めた STB 屈折角度差と V 走査法で求めた STB 屈折角度差に若干の差異が見られるのは、探触子の指向性や板厚方向の音速分布等の影響が現われているためと考えられる。

(4) 距離振幅特性曲線および探傷感度の変化

縦穴 ($\phi 4 \times 4$ mm) の距離振幅特性曲線を調査した結果の例が図一 9 である。被検材の L 方向、C 方向、Q 方向 (圧延方向に 45 度傾斜した方向) の距離振幅特性曲線の傾きは、標準試験片 STB-A 2 ($\phi 4 \times 4$ mm) のそれとほとんど差異はない。探触子が異なる場合でもほぼ同様の結果である。これは、音響異方性材と等方性材料の減衰定



(a) L 方向



(b) C 方向

図一 10 反射源位置の推定精度

数が近似していることを示しているものと考えられる。したがって、溶接欠陥の評価に必要な距離振幅特性曲線は、音響異方性材であっても従来の斜角探傷試験と同様に標準試験片 STB-A 2 ($\phi 4 \times 4$ mm) を用いて作成すれば良いといえる。

一方、STB-A 2 との感度差は C 方向ではほとんどなく、L、Q 方向で約 5~10 dB の感度差が見られる。ただし、その感度差は各探傷方向ともに音響方性の程度 (C_{sl}/C_{sc}) によって変化することはないと考えられる。

(5) 反射源位置の推定精度

横穴 ($\phi 3.2$) 試験片を用いて、反射源位置の推定精度

について調査した結果が図-10である。ここでは、STB 屈折角を用いた場合と各試験体ごとにV走査法により求めた探傷屈折角を用いた場合、さらに図-8の角度補正式を用いて求めた探傷屈折角を用いた場合の反射源位置(欠陥深さ)の推定結果を比較した。公称屈折角45度、60度の探触子の結果では、3方法の反射源位置の推定精度はほぼ同程度と見なすことができる。しかし、公称屈折角65度、70度の探触子の結果では、STB 屈折角を用いた場合の深さのずれが大きくなるとともにばらつきも大きくなるといえる。一方、斜角二探触子・V走査法により求めた探傷屈折角や図-8の角度補正式を用いて求めた探傷屈折角を用いた結果では、欠陥深さのずれは1mm以下となり、かつばらつきも標準偏差で約1mmと小さくなるのが分かる。しかも、両者の差はほとんどない。すなわち、音響異方性材の斜角探傷試験における反射源位置の推定には斜角二探触子・V走査法により求めた探傷屈折角か、図-8の角度補正式を用いて求めた探傷屈折角の何れかを用いれば良いことを示していると考えられる。

えられる。

§ 4. あとがき

音響異方性材はTMCP鋼に限らず、SS 41やSM50A等の普通鋼にも数多く含まれている現状である。音響異方性材ではSTB音速比がかなり大きくなる一方で、音響異方性材ではない場合でもSTB音速比が大きくなる鋼材が存在することが明らかとなった。超音波斜角探傷試験におけるSTB屈折角や探傷感度の変化に及ぼす影響を考慮する場合、音響異方性とともこのSTBとの音速差を問題にすべきと考えられる。

今後、溶接欠陥を対象として、欠陥の検出精度、位置推定精度、欠陥指示長さの測定精度等への影響に関して調査し、これらの研究成果をもとにSTBとの音速差を有する建築鉄骨溶接部の超音波探傷試験方法について検討する予定である。

〈参考文献〉

- 1) 日本鉄鋼協会非破壊検査小委員会：“音響異方性を有する鋼溶接部の超音波斜角探傷法” 鉄と鋼 Vol. 73, No. 6 (1987年)
- 2) 宇田川，他：“厚板異方性の非破壊測定—電磁超音波法による異方性測定装置の開発—” NDI 第2分科会資料 No. 21134 (昭和62年5月)
- 3) 広瀬，他：“音響異方性を有する材料中における超音波の伝播特性(第2報)” NDI 第2分科会資料 No. 21159 (昭和62年11月)