

(昭和 59 年 5 月 日本造船学会春季講演会において講演)

構造物の応力集中について

(第 1 報 赤外線による応力測定)

正員 西 村 允 男* 正員 湯 浅 通 史*
鈴木 康 平*

On Stress Concentration in Structures

(1st Report : Stress Measurement by Thermal Emission)

by Masao Nishimura, *Member* Michifumi Yuasa, *Member*
Kohei Suzuki

Summary

The failures in structures often develop from small cracks which initiated at the stress concentration parts such as structural discontinuity, welding toe of component etc.

Though strain gauge instrumentation is usually applied to the stress measurement at such parts, this method requires considerably complicated procedures and preparing time. Recent advances in the infrared technology have enabled to develop highly sensitive non-contacting instruments, for instance thermoelastic stress analysis.

This paper presents the results of some basic experiments for stress measurement using the thermoelastic stress analysis. The system produced stress maps which indicate the stress concentration around notches in test specimens and bracket end in structural model. The experimental maps showed well agreement with the results from F.E.M. or strain gauge measurements.

1 緒 言

構造物において、構造部材の不連続部や溶接止端部などでは応力集中が生じやすく、さらに、それらが損傷につながることもある。応力集中部では、幾何学的形状による影響のほか、工作および溶接などの影響があり、船体構造については、2次部材あるいは艤装品の溶接部などから発生する損傷が問題となる。

構造物の応力集中を調べる方法として、現在では、F.E.M. による応力解析あるいはひずみゲージによる応力計測が一般的な方法である。しかしながら、F.E.M. では多大の費用を要し、また、工作および溶接などの影響を算入することは困難であると考えられる。一方、ひずみゲージでは多くの工数を必要とし、また、対象を点として計測するため応力集中箇所を確実にとらえることは困難であると考えられる。

本研究では、赤外線による応力測定法を用いて、切欠付試験片の応力測定ならびに計算値との比較、構造模型の応力測定および測定法としての基礎的実験を行い、全

般的な検討を加えた。

2 システムの概要

赤外線による応力測定システムとして、英国で開発された SPATE (Stress Pattern Analysis by Thermal Emission) モデル 8000 を利用した。本システムは、赤外線技術を応用して物体の応力変化に伴う放射エネルギーの変化を検知することにより、物体表面の応力分布を知ろうとするもので、非接触型の応力測定装置である^{1),2)}。測定法の原理およびシステムの構成について、以下に簡単にその概要を記す。

2.1 測定法の原理

本システムでは、物質の熱弾性効果ならびに熱放射現象を応用して、赤外線による応力測定を行う。

弾性範囲内で、引張あるいは圧縮力を受ける物体においては、エネルギーの力学的形態と熱的形態の間は可逆変換の関係にある。例えば、断熱状態の下で物体に周期的荷重が働く場合には、温度変化と主応力和の変化は線型関係にあり、荷重周波数には無関係である。これらの関係は熱弾性効果 (Thermoelastic Effect) として知ら

* (財) 日本海事協会

れている³⁾。等方均一性の材料についての、温度変化と応力変化の関係式は、

$$\Delta T = \frac{-\alpha T \Delta \sigma}{\rho C_\sigma} = -K_m T \Delta \sigma \quad (1)$$

ここに、

$\Delta \sigma$: 主応力差の振幅 ($P-P$)

ΔT : 温度変化 ($P-P$)

T : 計測点の平均温度

α : 材料の線膨張係数

ρ : 材料の密度

C_σ : 材料の比熱

K_m : 材料の熱弾性定数 ($=\alpha/\rho C_\sigma$)

で与えられる。

また、物体表面に垂直な応力が生じない場合には、主応力差は、

$$\Delta \sigma = \Delta \sigma_1 + \Delta \sigma_2 = \Delta \sigma_x + \Delta \sigma_y \quad (2)$$

となる。

多くの工業材料では K_m は正の値であり、したがって、引張応力が生ずると温度が下がり、圧縮応力が生ずると温度が上がることになる。この温度変化は一般に微小な量であり、例えば炭素鋼では 1.0 kgf/mm^2 の応力変化に対して約 0.01°C である。

ある温度における物体表面からの放射エネルギーは、

$$E = \epsilon \delta T^4 \quad (3)$$

ここに、

E : 放射エネルギー

ϵ : 物体面の放射率

δ : ボルツマン定数

T : 物体の表面温度

で与えられる⁴⁾。物体面の放射率 ϵ は黒体面からの全放射エネルギー E_b を基準として、 $\epsilon = E/E_b$ と定義されている。なお、黒体面からの全放射エネルギーは、

$$E_b = \delta T^4$$

である (ステファン・ボルツマンの法則)。

したがって、物体面からの放射エネルギーがわかればその表面温度を知ることができ、これらの関係は、特定の波長についても同様に成り立つ。本システムでは、赤外線波長帯に属する放射エネルギーを検知することにより、微小な温度変化の測定を行う。

2.2 システムの構成

本システムの基本的な構成を Fig. 1 に示す。主要部は赤外線検知素子 (半導体) を内蔵したスキャンヘッド、荷重信号と赤外線信号を同期させる相関計および演算処理を行うマイクロ・コンピュータから成っており、制御入力にはキーボードおよびハンドセットから行い、測定結果は TV モニタおよび X-Y プロッタに出力される。

本システムの基本的な機能を Table 1 に示す。最小分

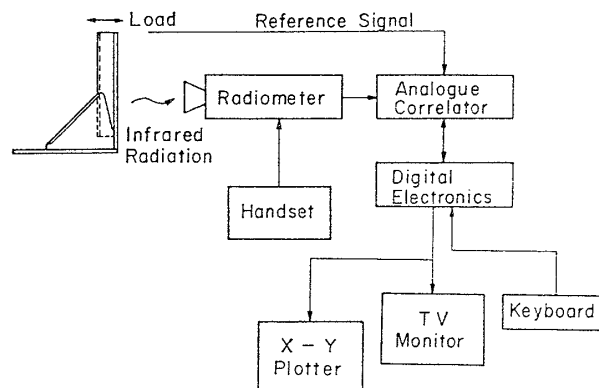


Fig. 1 Block diagram of system

Table 1 Function of system

Maximum Field of View	25° x 25°
Focus Range	0.2 m to infinity
Resolution	Stress detail to 0.5mm dimension
Load Frequency Range	0.5 Hz to 20 kHz
Sensitivity	Typically 0.1 kgf/mm ² for steel 0.04 kgf/mm ² for aluminium
Picture Resolution	Up to 255 x 255 points

解能は 0.5 mm であり、試験体表面上の 0.5 mm 角の範囲内の平均応力を検出することができる。応力の測定感度は、炭素鋼の場合は 0.1 kgf/mm^2 、アルミニウムでは 0.04 kgf/mm^2 である。スキャンヘッドは、繰り返し荷重 (定振幅・定周期) を受けている構造物の予め設定された測定範囲について、自動的にスキャンして放射赤外線の変化量を検知する。従来のひずみゲージでは一般に対象を点として計測を行うが、本システムでは対象を線 (Line) あるいは面 (Frame) として連続的に測定を行う方式としている。検知された赤外線信号は、相関計でノイズ除去および荷重信号との位相調節が行われ、さらに、演算処理部で応力分布に変換され、 16×16 から 255×255 までのマトリクスとして TV モニタに出力 (カラー表示) される。

3 実 験

3.1 実験の概要

引張試験片および船側肋骨の構造模型について、繰り返し荷重を加えて赤外線応力測定システムによる応力分布の測定実験を行った。実験の概要を Table 2 に示す。

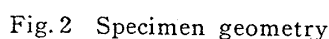
3.1.1 目的

今回の実験は、以下の 3 項目を主な目的として行われた。

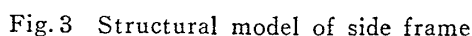
(1) 赤外線応力測定システムを用いて切欠付引張試験片の応力測定を行い、また、測定値について F. E. M. による計算値との比較・検討を行う。

Theme of Experiments		Specimen	Nominal Stress (kgf/mm ²)	Load Frequency (Hz)
Stress Pattern of Specimen		MA - I	5.2 ~ 0.2	10
		MB - I	5.1 ~ 0.2	
Stress Pattern of Structural Model		(NO.1)	13.2 ~ 3.0 *	3.25
		(NO.2)	12.2 ~ 4.1 *	
Basic Tests	Coating	MN - I	10.1 ~ 0.2	20
	Load Frequency	MN - I	10.1 ~ 0.2	0.5 ~ 20
	Thickness	MA-I, MT-I ~ 4	5.1 ~ 0.2	10
	Material	MA - I	5.2 ~ 0.2	10
		AL - I	5.1 ~ 0.2	
	Distance	MN - I	10.1 ~ 0.2	20
	Stress Level	MA - 2	1.2 ~ 0.2	10
			5.2 ~ 0.2	
			10.1 ~ 0.2	
18.0 ~ 0.2				

Material	Thickness (mm)	Yield Strength (kgf/mm ²)	Tensile Strength (kgf/mm ²)	Elongation (%)
K A M	12.5	36.0	48.0	27
K D S	20.0	38.0	48.0	25
K D K	25.5	35.0	46.0	30
$\frac{A}{B}$ S	32.0	34.0	47.0	26
A5083P	50.0	14.8	30.2	28



Specimen	Material	Thickness (mm)	Notch
MA-1,2	K A M	10.0	A
MB-1	K A M	10.0	B
MN-1	K A M	10.0	Nil
MT-1	K A M	6.0	A
MT-2	K D S	18.0	A
MT-3	K D K	24.0	A
MT-4	$\frac{AB}{B}$ S	30.0	A
AL-1	A5083P	12.0	A



トン、繰返し速度は3および6ヘルツ、荷重波形はサイン波である。

3.1.4 キャリブレーション

今回の実験では、試験片あるいは構造模型の応力が一様であると考えられる個所に2軸のひずみゲージを貼付して計測を行い、同時に同じ個所について赤外線線の測定を行い、それらの値を用いてキャリブレーションを実施した。

3.2 切欠付引張試験片の応力分布

3.2.1 赤外線応力測定システムによる応力測定

切欠付の2種類の試験片について、赤外線応力測定システムによる応力測定実験を行った。試験片は黒色のベイント塗装とし、測定距離は0.7m、画素数は121×114(分解能は約1.0mm²)とした。測定時間は1画素当たり1.0秒とし、応力分布の測定には約4時間を要した。測

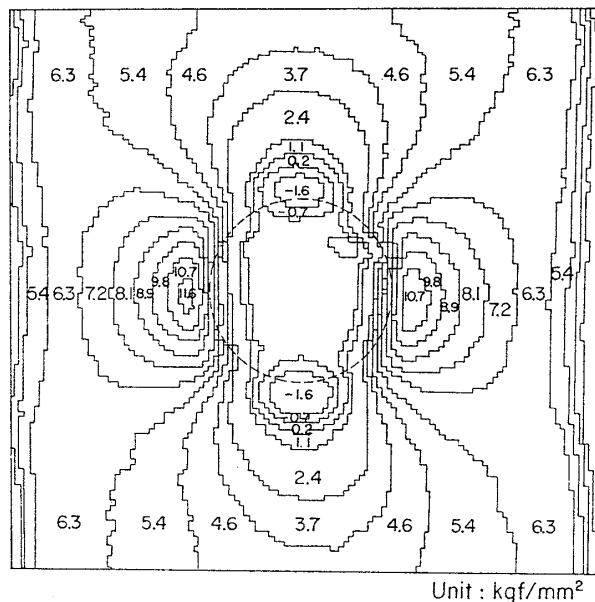
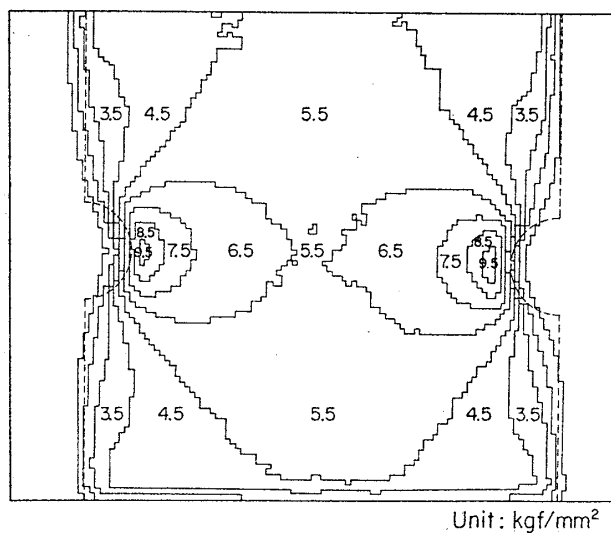


Fig. 4 Stress pattern of specimen (type A)



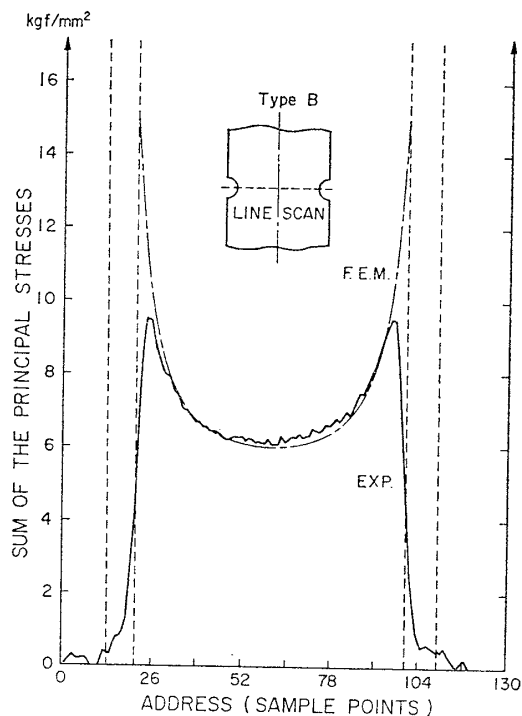


Fig. 8 Comparison of measurement and calculation (type B)

切欠付試験片の中央部断面（切欠中心）における応力分布について、赤外線応力測定システムによる測定値とNASTRANによる計算値の比較・検討を行った。タイプAの試験片についての結果をFig. 7に、タイプBの結果をFig. 8にそれぞれ示しているが、測定値と計算値は全般的にはほぼ良好な一致を示している。なお、切欠のエッジ部では測定値の低下がみとめられるが、この理由については、分解能の影響、試験片の切欠内面の影響などが考えられる。本システムの最小分解能は0.5mmであり、試験片を大きくして、測定距離を短くすればより高い精度で応力測定を行うことができると考えられる。また、タイプAの試験片の中心線断面（長手方向）の応力分布についても、測定値と計算値の比較を行ったが両者はほぼ良好な一致を示した。

3.3 構造模型の応力分布

船側横肋骨の構造模型について、溶接部を含む複雑な応力状態の個所における応力測定を行った。試験体表面は無塗装のままで、測定距離は0.25m、画素数は56×64（分解能は約0.5mm²）とし、測定時間は1画素当たり1.5秒（1画像で約1.5時間）とした。実験結果から、すみ肉溶接部を含むブラケット上端近傍における応力分布をPhoto 1およびFig. 9に示す。き裂の発生が予想されるブラケット先端の周辺ではかなりの応力集中がみとめられ、一部は塑性化していると考えられる（疲労試験を行った結果、き裂は同個所から発生した）。また、測定範囲内の4個所にひずみゲージを貼付して計測を行った

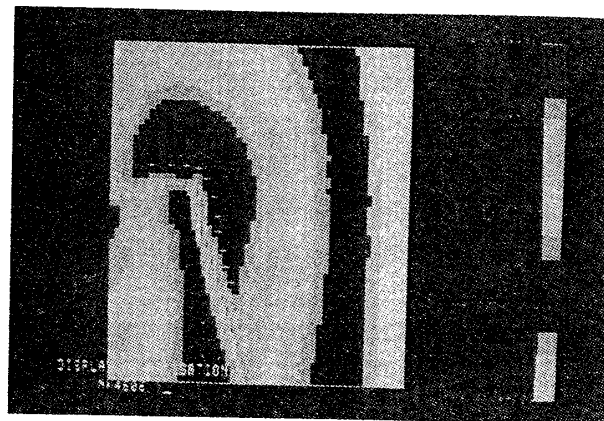


Photo 1 Stress pattern display on monitor TV

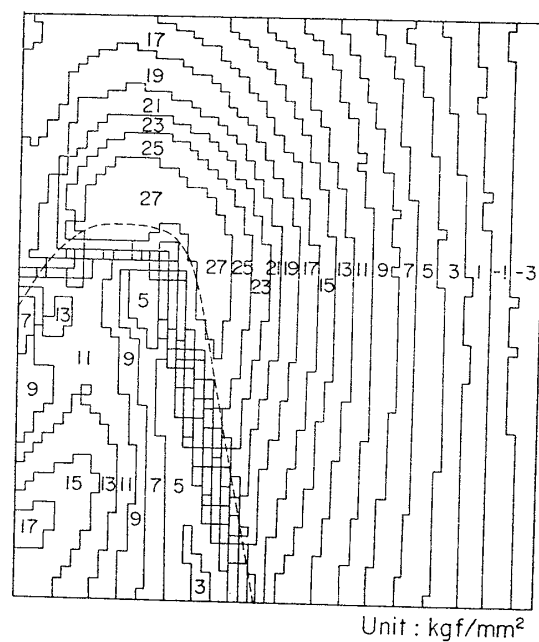


Fig. 9 Stress pattern at bracket toe (No. 2)

が、ブラケット先端の直上50mmの位置でゲージによる計測値は18.3kgf/mm²、本システムによる測定値は17.5kgf/mm²となったほか、計測値と測定値は良好な一致を示した。肋骨のウェブの両面について応力測定を行ったが、ブラケット上端部ではウェブの局部的な面外曲げ応力を明確にとらえることができた。以上の結果から、赤外線応力測定システムでは、複雑な応力場、特にすみ肉溶接部のような立体的な個所についても高い精度で応力測定ができるものと考えられる。なお、この実験は試験体の表面は無塗装の状態、また試験体がかかり振動している下で測定を行ったが、結果は良好であった。したがって、本システムは船舶や製造工場などの現場にも十分適用できるものと考えられる。

3.4 基礎的実験

赤外線による応力測定法に関する基本的な問題点についての検討および確認を行うため、以下に示す基礎的な諸実験を実施した。

(1) 試験片の表面塗装

本システムでは、赤外線放射率を十分高くするため、試験体表面に黒色つや消しペイントを塗装することが推奨されている。ここでは、研磨仕上げの試験片、ペイント塗装の試験片および無塗装の構造模型を対象として、表面状態についての比較実験を行った。ペイント塗装の場合には正常な測定値が得られたが、研磨仕上げでは不規則なものとなり平均レベルもペイント塗装の場合の約20%であった。また、無塗装状態についての測定結果は、ひずみゲージによる計測値とほぼ良好な一致を示した。以上の実験結果から、表面が光沢面でない場合には、必ずしもペイント塗装としなくても測定は可能であるとえられる。

(2) 荷重周波数の影響

荷重周波数が低い場合には、試験片の熱伝導による赤外線のピークの減衰が問題となる。軟鋼材の引張試験片を用いて、荷重周波数を20ヘルツから0.5ヘルツまで変化させて周波数に対する赤外線信号の減衰を調べた。

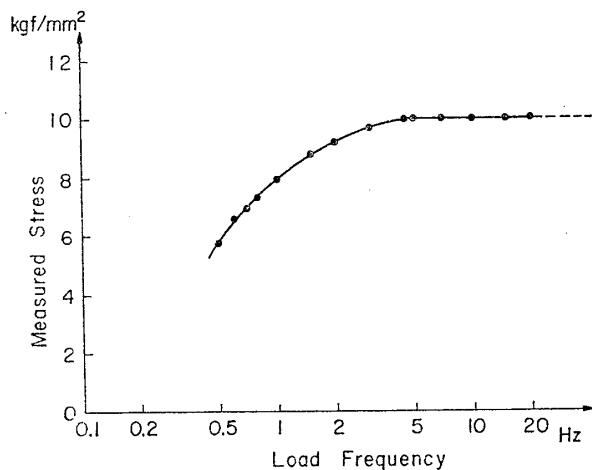


Fig. 10 Effect of load frequency

実験結果を Fig. 10 に示しているが、同図からわかるように5ヘルツから減衰が始まり、0.5ヘルツでは測定不能となった。荷重周波数が低い場合には、一般に、キャリブレーションが必要であると考えられる。

(3) 試験片の板厚

軟鋼材について試験片の板厚を6mmから30mmまで変えて実験を行った。キャリブレーションには板厚10mmのものをを用いた。実験結果を Fig. 11 に示しているが、板厚が厚くなるに従って測定値がやや低くなる傾向がみとめられるが、板厚18mm以上では測定値に有意な差はみられない。これらの理由については、板厚による熱容量の差、負荷方法の問題などが考えられる。一般に、板厚が大きく異なる場合には、キャリブレーションを行った方がよいと考えられる。

(4) 試験片の材質

軟鋼材およびアルミ材の同一形状の試験片について、同一の応力で実験を行ったが、両者の測定値に有意な差はみとめられなかった。

(5) 測定距離

試験片とスキャンヘッド間の距離を0.4mから5.0mまで変化させて実験を行い、測定距離による影響を調べた。キャリブレーションには0.9mの値を用いた。Fig. 12 に実験結果を示しているが、測定距離3.3mまでは測定値はほぼ一定であり、5.0mでは若干の低下がみとめられた。

(6) 荷重の大きさ (塑性域)

軟鋼材の引張試験片について、荷重の大きさを500kgfから9,000kgfまで上げて、試験片の一部応力集中部に塑性域が生ずるまでの実験を行った。実験結果を Fig. 13 に示しているが、荷重9,000kgfの場合にはかなりの領域が塑性化しているものと考えられ、測定値に飽和の傾向がみとめられる。なお、弾性範囲では応力が

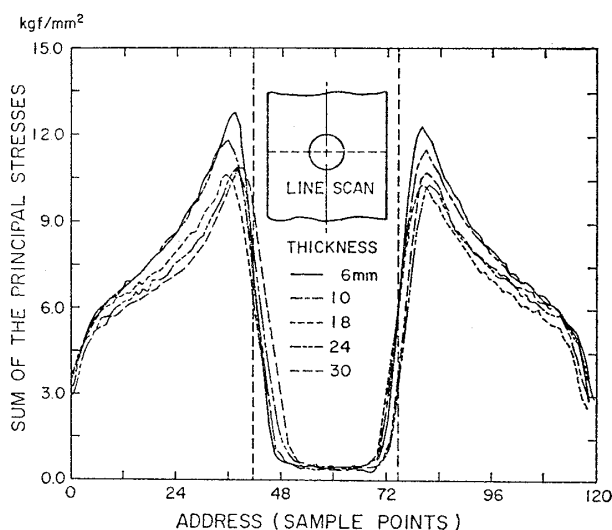


Fig. 11 Effect of plate thickness

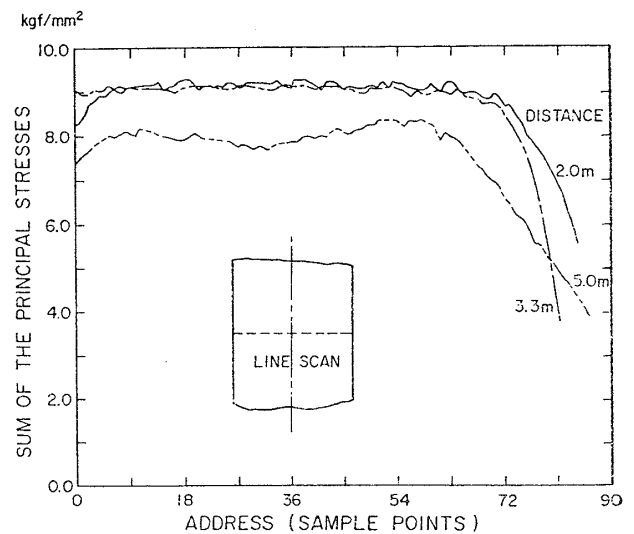


Fig. 12 Effect of measuring distance

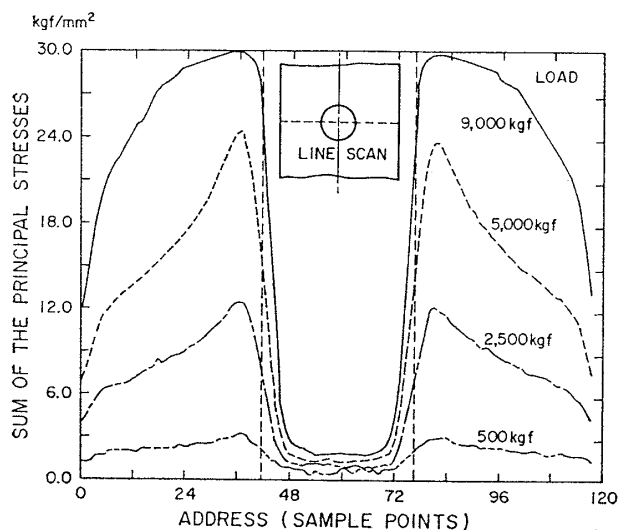


Fig. 13 Effect of stress level (up to plastic zone)

5.0 kgf/mm² 程度以上であれば測定精度は十分であると考えられる。

4 考 察

赤外線応力測定システムによる応力分布の測定結果、F. E. M. による計算値との比較および基礎的諸実験の結果などについて総合的な検討を行い、以下に若干の考察を加えた。

4.1 応力分布の測定および応力集中について

切欠付の引張試験片および船側肋骨の構造模型について赤外線応力測定システムによる応力測定実験を行ったが、いずれも良好な結果が得られた。特に、試験片の切欠近傍および船側肋骨のブラケット上端部では応力集中の傾向が明瞭に示された。数点の測定値については、ひずみゲージによる計測値とほぼ一致した。また、切欠付引張試験片については F. E. M. 計算を行い、測定値と計算値の比較を行ったが両者はほぼ良好な一致を示した。以上の結果から、本システムは高い精度で応力分布の測定を行うことができ、また、特に応力集中部の識別には非常に有効であると考えられる。本システムでは、ひずみゲージでは困難な構造物のすみ肉溶接部についても測定が可能であり、その適用範囲はかなり広いものであろう。

船体構造の強度に関しては、き裂損傷の多くは部材の応力集中部あるいは部材の溶接部近傍に発生することから、これらの個所の応力測定に本システムを有効に利用できるものと考えられる。例えば、ハッチコーナにおける応力集中、ハッチサイドコーミングのブラケット下端部あるいは船側肋骨下端部などの詳細設計における応力レベルについて、幾何学的形状による影響のほか、溶接施工および工作法などによる影響を含んだ形でその検討

を行うことが可能であると考えられる。

4.2 基本的な問題点について

赤外線による応力測定法に関する、試験片の表面塗装、荷重周波数、試験片の板厚および測定距離などの基本的な問題点について実験を行って基礎的なデータを求めたが、それらの実験結果から、本システムは応力測定装置として実用上十分な機能を有していると考えられる。本システムは高い精度で測定できること、前準備をほとんど必要としないことおよび応力測定の自由度が高いこと（すなわち、任意の個所の任意の範囲について測定できる）などの多くの長所を備えていると判断される。

実験結果から、試験体の表面状態については無塗装でも測定が可能であること、測定距離が長い場合および板厚が厚い場合にはキャリブレーションを行った方がよいことなどがわかった。荷重周波数については、応答減衰の問題のほか、測定時間の短縮化の観点からも周波数を高くする方が得策であると考えられる。測定精度をより高めるための工夫としては、試験体のペイント塗装をより均一にすること、外乱（照明、人間および機器などからの赤外線）をシャ断すること、荷重周波数を高く設定しキャリブレーションを毎回実施することなどが考えられる。

4.3 今後の問題点

システムに関しては、測定時間が比較的に長いので、演算処理の高速化が一つの課題であると考えられ、データのサンプル数の縮小、S/N比の改良などが今後の問題点であると考えられる。赤外線応力測定システムを現場に適用するには、小型・軽量化（現在は総重量 150 kgf）、遠隔操作の機能などが必要とされるであろう。また、荷重周波数に関しては、構造模型の場合に加振器を用いて高い周波数の荷重を与える方法も検討に値するであろう。

構造強度に関しては、まず、構造模型についてのシリーズ実験を行い、基礎的なデータを得ることが必要であると考えられる。塑性域の問題については、弾性係数 (E) とセカント係数 (E_s) を用いたアプローチの可能性があろう。

5 結 語

赤外線応力測定システムを用いて、切欠付試験片および構造模型についての応力測定実験ならびに基礎的な諸実験を行った結果、概略以下のようなことがわかった。

(1) 切欠付試験片の応力分布について、赤外線応力測定システムによる測定値と F. E. M. による計算値の比較を行ったが、両者はほぼ良好な一致を示した。

(2) 船側肋骨の構造模型について応力測定を行ったが、ブラケット上端部における応力集中の状況を明確に

とらえることができた。

(3) 応力測定法としての基本的な問題点について実験および検討を行ったが、本システムは簡便で実用上十分な機能を備えていると判断される。

(4) 以上の結果から、赤外線による応力測定法は、応力集中部、特にすみ肉溶接部のような立体的な個所における応力集中を調べる実用的な方法として有用であると考えられる。

赤外線技術は非接触の温度測定法として、すでに、熱機関の設計および監視、プラントの熱管理、医療診断および環境調査などの多方面で利用されている⁵⁾。赤外線技術の応力測定への応用は新しい分野であり、今後の発展が期待される。

参 考 文 献

- 1) D. E. Oliver, others : Structural Design Assessment using Thermoelastic Stress Analysis, Sira Report (1982).
- 2) 宮崎 宏, 仲山要二 : サーモビュア IBL による応力分布測定, 映像情報, Vol.13, No.7 (1981).
- 3) ジョンウルフ編 : 機械的性質 (材料科学入門Ⅲ), 岩波書店 (1981), pp. 42~45.
- 4) 日本機械学会編 : 機械工学便覧(改訂第5版), 日本機械学会 (1968), pp. 11-10~11-15.
- 5) Barry L. Zimmerman : Infrared Thermometry and the Telatemp 44 as a Ship System Maintenance Monitoring Tool, DTNSRDC Report (1977).