

## WPC 化処理スプルース材の振動的性質<sup>†</sup>

坂野 直義\*・岡野 健\*・太田 正光\*

### Vibrational Properties of Wood-Plastic Combination of Sitka Spruce Impregnated with MMA/HEMA

Naoyoshi SAKANO\*, Takeshi OKANO\* and Masamitsu OTA\*

#### 1. 緒 言

一般に WPC は、木材にビニル系などのモノマーを注入し材内で重合させて、寸法安定性や強度的性質の向上を図った複合材料であるが、木材-ポリマー界面の構造などに関するいくつかの物理化学的な研究<sup>1)</sup>とともに、さまざまな実用面への可能性が検討されている。本報は、ピアノ響板に用いられるスプルース材の音響特性を改善する試みとして WPC 化処理を施し、その効果を良質材の指標とされてきた振動的ファクターに基づいて考察したものである。その際、従来は顧みられることの少なかった半径方向の性質についても、ピアノ響板の振動、とくに高音域において重要であると考え、測定を行った。

楽器響板材の動力学的特性を考えると、最も基本的な物理量となるのは、与えられた振動エネルギーが音に変換する割合、すなわち音響変換効率であろう。振動の 1 周期当り熱として失われるエネルギーは  $Q^{-1}/E'$  に比例するから、この値が小さいほど力学的エネルギーの保存性が高く、より多くのエネルギーが楽音に変換されるといえる。ここで  $Q^{-1}$  は共振曲線の鋭さから求められる内部損失（または内部摩擦）であり、 $E'$  は動的ヤング率である。

したがって注入モノマーについては、

- 複合体化に伴う振動減衰性の増加を単純に考慮すれば、楽器の使用温度範囲・可聴周波数域で、内部損失  $Q^{-1}$  のピークがないこと
- 代表的な合成高分子の一つであるポリメタクリル酸エステルの場合、アルキル基が長くなるにつれて、主分散が低温側へ移行し室温付近にもかかってくると同時に、動的ヤング率  $E'$  が低下する傾向があること<sup>2)</sup>

以上を考え合わせ、良質楽器響板として  $E'$  大、 $Q^{-1}$  小の観点から、メタクリル酸メチル (MMA)\*<sup>1</sup> モノマーを用いることにした。

また、見かけの  $E'$ 、 $Q^{-1}$  の周波数特性に関連する重要なパラメータである  $E'/G'$  ( $G'$ : 動的せん断弾性率) の値の向上を図るため、川上らによって得られた知見<sup>3)</sup>,

- 極性モノマーを添加した場合、MMA 単独系よりも  $G'$  の上昇率が低いこと

<sup>†</sup> 本研究は第 39 回日本木材学会大会 (1989 年、沖縄) において発表した。

\* 東京大学農学部林産学科

Department of Forest Products, Faculty of Agriculture, University of Toyo.

\*<sup>1</sup>  $\text{CH}_2=\text{C}(\text{CH}_3)\text{COO}-\text{CH}_3$

[Poly-MMA:  $E=5.2$  (GPa) at room temp.]

表-1 WPC 調製における基礎データ  
Table 1. Summary of polymerization data for WPC

Direction	$r$	PL (%)	TC (%)	EPL (%)
L average	0.46	62.01	85.91	42.77
R average	0.45	27.73	33.96	18.03

PL; Polymer loading (ポリマー含量)

$$\%PL = 100(W_T - W_C)/W_C$$

where  $W_T$  = weight of oven-dried WPC

$W_C$  = weight of oven-dried wood

TC; Total conversion (全重合率)

$$\%TC = 100W_P/W_m$$

$W_P$  = weight of polymer

$W_m$  = weight of monomer

EPL; Effectiveness of polymer retention (ポリマー充填効率)

$$\%EPL = 100PL/TML$$

TML; Theoretical maximum polymer loading (理論最大ポリマー量)

$$\%TML = 100(1 - r/\gamma)r_m/r$$

$r$  = specific gravity of wood

$\gamma$  = specific gravity of wood substance

$r_m$  = specific gravity of monomer

を利用して、極性基を有するメタクリル酸 2-ヒドロキシエチル (HEMA)\*<sup>2</sup>を添加した、MMA/HEMA コモノマーを注入モノマーと決定した。

## 2. 実 験

### 2.1 試 験 体

試験体はシトカスブルース (*Picea sitchensis*) の、10 mm (接線方向, T)・30 mm (半径方向, R)・300 mm (繊維方向, L) および 10 mm(T)・30 mm(L)・300 mm(R) のはりとした。前者は  $E_L$ ,  $G_{LT}$  を、後者は  $E_R$ ,  $G_{RT}$  を調べるための試験体である。後者の試験体は、長さ 100 mm の板をシアノアクリレート系接着剤で 3 片張り合わせて作製した。

これらの試験体は、(株)ヤマハより提供されたピアノ響板用柁目材 (10×100×500 mm) を、恒温室に 3 ヶ月以上放置してから分割作製した。

### 2.2 WPC の調製

MMA および HEMA を 8 対 2 の割合で混合し、開始剤として過酸化ベンゾイルを 0.3% 濃度で加え、これを 80% 水溶液として充分減圧乾燥した。浸漬 2~3 時間ののち、モノマーの蒸散を防ぐためアルミ箔で包覆のうえ、63°C で 24 時間加熱重合を行った。次にアルミ箔を解包し、1 時間ほど風乾してから 60°C で減圧乾燥し、未反応モノマーを除去した。

### 2.3 振 動 試 験

WPC 化処理前後において、両端自由たわみ振動法により、FFT アナライザーで 5 次までの共振周波数を測定した。この値を用いて、回転慣性とせん断力を考慮した Goens の補正式<sup>4)</sup>から、

\*<sup>2</sup>  $\text{CH}_2=\text{C}(\text{CH}_3)\text{-COO-C}_2\text{H}_4\text{-OH}$

表-2 試験結果の概要

Table 2. Summary of test results

(1)

No.	$r$	PL (%)		$E'_L$ (GPa)	$G'_{LT}$ (GPa)	$Q^{-1}$ ( $10^{-3}$ )	$E'/r$	$Er$	$E'/G'$
L-1	.502	33.77	CONTROL	16.8	1.003	6.64	33.4	8.41	16.7
			WPC	17.5	1.029	10.1	27.5	11.1	16.9
L-2	.456	36.49	CONTROL	14.9	0.808	6.34	32.8	6.81	18.5
			WPC	15.9	0.828	9.49	26.8	9.44	19.2
L-3	.521	44.07	CONTROL	17.4	0.899	6.00	33.3	9.04	19.3
			WPC	19.8	0.982	10.2	27.7	14.1	20.1
L-4	.454	47.29	CONTROL	14.0	0.788	6.38	30.8	6.35	17.7
			WPC	15.8	0.863	9.68	24.8	9.99	18.2
L-5	.437	52.25	CONTROL	12.6	0.858	6.22	28.9	5.51	14.7
			WPC	14.7	0.915	9.37	23.3	9.27	16.1
L-6	.455	71.41	CONTROL	13.7	0.826	6.33	30.1	6.25	16.6
			WPC	16.0	0.902	11.4	21.7	11.8	17.7
L-7	.383	73.92	CONTROL	11.6	0.635	6.27	30.4	4.45	18.3
			WPC	18.3	0.650	11.8	27.1	12.4	28.2
L-8	.431	95.82	CONTROL	13.2	0.884	6.70	30.7	5.70	14.9
			WPC	16.7	0.937	11.3	20.9	13.4	20.0
L-9	.439	103.1	CONTROL	13.0	0.881	6.66	29.6	5.72	14.8
			WPC	16.4	1.039	12.7	19.4	13.8	15.7

(2)

No.	$r$	PL (%)		$E'_R$ ( $10^{-1}$ GPa)	$G'_{RT}$ ( $10^{-1}$ GPa)	$Q^{-1}$ ( $10^{-3}$ )	$E'/r$	$Er$	$E'/G'$
R-1	.406	14.07	CONTROL	6.20	0.258	21.5	1.53	2.52	24.1
			WPC	9.02	0.265	38.4	1.79	4.54	34.0
R-2	.455	14.59	CONTROL	5.61	0.971	23.0	1.23	2.55	5.78
			WPC	5.93	0.801	38.1	1.20	2.93	7.40
R-3	.422	15.00	CONTROL	5.08	0.557	24.7	1.20	2.14	9.12
			WPC	6.17	0.600	35.6	1.30	2.93	10.3
R-4	.421	19.13	CONTROL	5.05	0.448	22.6	1.20	2.13	11.3
			WPC	4.99	0.421	40.6	1.06	2.34	11.9
R-5	.386	26.04	CONTROL	4.16	0.166	22.1	1.08	1.60	25.1
			WPC	4.21	0.156	39.3	0.937	1.89	27.1
R-6	.457	29.35	CONTROL	4.35	2.56	21.0	0.953	1.99	1.69
			WPC	4.84	1.59	35.9	0.851	2.75	3.02
R-7	.422	39.31	CONTROL	4.41	0.299	21.1	1.09	1.78	14.7
			WPC	7.14	0.387	38.3	1.34	3.82	18.5
R-8	.454	43.04	CONTROL	5.54	1.87	23.6	1.22	2.51	2.97
			WPC	10.9	1.38	36.8	1.62	7.38	7.90
R-9	.472	49.07	CONTROL	6.22	0.952	24.8	1.32	2.94	6.53
			WPC	12.1	0.933	45.0	1.75	8.33	12.9

Notes:  $r$ , specific gravity. PL, polymer loading.  $Q^{-1}$ , internal friction.  $E'_L$ ,  $E'_R$ , dynamic Young's modulus in longitudinal and radial direction, respectively.  $G'_{LT}$ ,  $G'_{RT}$ , dynamic shear modulus in L-T plane and R-T plane, respectively.

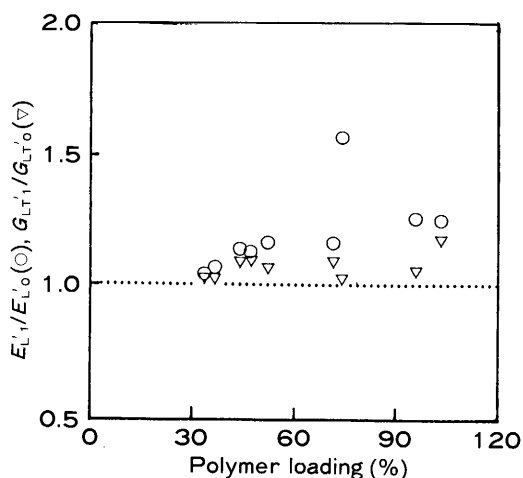


図-1-1 ポリマー含量と  $E'_L$ ,  $G'_{LT}$  の変化率  
 $E'_{L0}$ ,  $E'_{L1}$ : 処理前, 処理後の L 方向動的ヤング率  
 $G'_{LT0}$ ,  $G'_{LT1}$ : 処理前, 処理後の LT 面動的せん断弾性率

Fig. 1-1. The relative moduli of dynamic elasticity before and after treatment versus polymer loading.

Notes.  $E'_{L0}$ ,  $E'_{L1}$ : dynamic Young's modulus in longitudinal direction measured before and after treatment, respectively.  
 $G'_{LT0}$ ,  $G'_{LT1}$ : dynamic shear modulus in L-T plane measured before and after treatment, respectively.

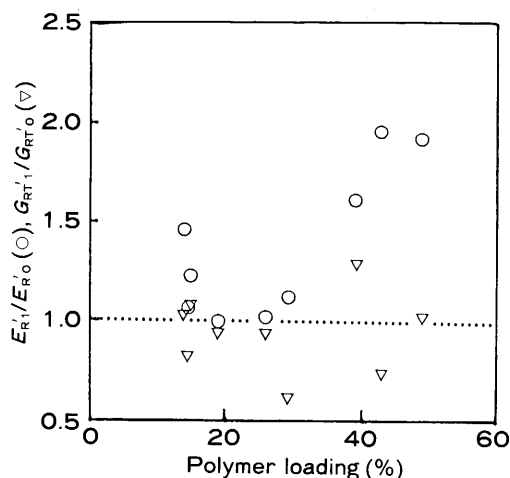


図-1-2 ポリマー含量と  $E'_R$ ,  $G'_{RT}$  の変化率  
 $E'_{R0}$ ,  $E'_{R1}$ : 処理前, 処理後の R 方向動的ヤング率  
 $G'_{RT0}$ ,  $G'_{RT1}$ : 処理前, 処理後の RT 面動的せん断弾性率

Fig. 1-2. The relative moduli of dynamic elasticity before and after treatment versus polymer loading.

Notes.  $E'_{R0}$ ,  $E'_{R1}$ : dynamic Young's modulus in radial direction measured before and after treatment, respectively.  
 $G'_{RT0}$ ,  $G'_{RT1}$ : dynamic shear modulus in R-T plane measured before and after treatment, respectively.

Hearmon の方法<sup>5)</sup>で  $E'$  と  $sE'/G'$  ( $s$ : せん断たわみ係数) について 1 次回帰することにより動的ヤング率  $E'$  ならびに動的せん断弾性率  $G'$  を求め, 音響的特性を表す諸ファクターの数値を導出した。また 1 次の共振曲線の形状から  $Q^{-1}$  を算出した。なおせん断たわみ係数は, 中尾による両端ねじり振動試験の結果<sup>6)</sup>から 1.18 とした。

### 3. 結果と考察

#### 3.1 ポリマー含量 (PL)

処理後重量の絶乾重量における増加率によって表されるポリマー含量 (PL) は, WPC の指標の一つである。

$$\%PL = 100(W_T - W_0)/W_0$$

$W_T$ : WPC の絶乾重量

$W_0$ : 未処理材の絶乾重量

今回個体差や浸漬時間の違いなどによって, ポリマー含量に大幅なばらつきがあったので, 以下 PL を基に考察を進める。試験に供した WPC がどの程度の効率で充填されたものかを明らか

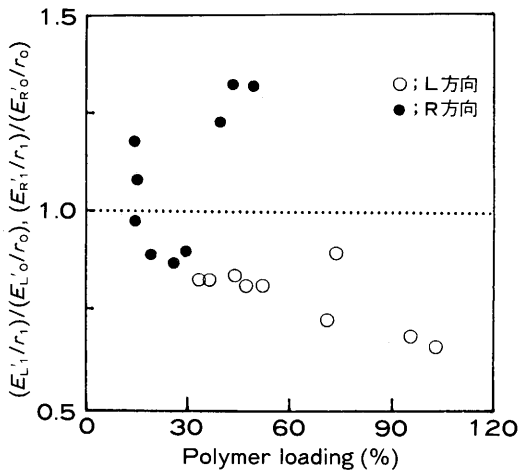


図-2 ポリマー含量と比動的ヤング率の変化率

$E'_{L0}/r_0, E'_{L1}/r_1$ : 処理前, 処理後の L 方向比動的ヤング率

$E'_{R0}/r_0, E'_{R1}/r_1$ : 処理前, 処理後の R 方向比動的ヤング率

Fig. 2. The relative specific dynamic Young's modulus before and after treatment versus polymer loading.

Notes.  $E'_{L0}/r_0, E'_{L1}/r_1$ : specific dynamic Young's modulus in longitudinal direction measured before and after treatment, respectively.

$E'_{R0}/r_0, E'_{R1}/r_1$ : specific dynamic Young's modulus in radial direction measured before and after treatment, respectively.

にするため、Table 1 に、調製に関する基礎データを示した。ただし重合率は、重合中に揮散してしまうモノマー量（モノマーロス）を加味していないので、見かけのものである。一部の試料で、包覆状態での重合前後の重量を比較することによりモノマーロスを調べたところ、注入液の 1.4～9.8% が失われていることが分かった。

WPC 化处理による各物性値の変化を PL とともにまとめたものが Table 2 である。

### 3.2 $E', G'$ の変化

$E'_L, G'_{LT}$  の変化率と PL の関係を Fig. 1-2 に、 $E'_R, G'_{RT}$  の変化率と PL の関係を Fig. 1-1 に示す。 $E'_L, E'_R$  および  $G'_{LT}$  は WPC 化によって増大するといえるが、試料数が少なくばらつきも大きいので、PL 依存の一般的傾向は見出し難い。しかしながらいずれも  $E'$  が  $G'$  を上回って増加していることが分かる。また PL40% 程度で  $E'_L, E'_R$  の変化を比較すると  $E'_L, E'_R$  は約 10% の増加を示しているのに対し、 $E'_R$  の増加率は約 7 倍となっている。

$E'_R$  の増加率は比重  $r$  のそれよりも大となり得るため、Fig. 2 に見られる通り比動的ヤング率  $E'_R/r$  が未処理材より大きくなっている試料もみられる。 $E'_L/r$  は PL の増大にともなって減少する傾向を示した。

また  $G'_{RT}$  は約 50% 以下の比較的 low ポリマー含量にあって未処理材よりも低下する現象が認められた。これは、細胞壁に対するポリマーの補強効果は単純でなく、重合に伴うバルキングによって壁層相互間の凝集力が低下したためと考えられる。HEMA の OH 基によって木材との親和性が高まったモノマーは、細胞壁中にも浸透し細胞壁実質との相互作用を起こしやすいからである。したがって、ポリマーが木材のどこに、どのような形態で存在し、木材の物理的性質にいかにか寄与するのか、という問題が提起されよう。

### 3.3 内部損失

Fig. 3 は、内部損失  $Q^{-1}$  の変化を示している。木材よりも  $Q^{-1}$  の大きい高分子を充填したことにより、約 1.5～1.8 倍に増加している。これもばらつきはあるが、PL に伴って増大する傾向を

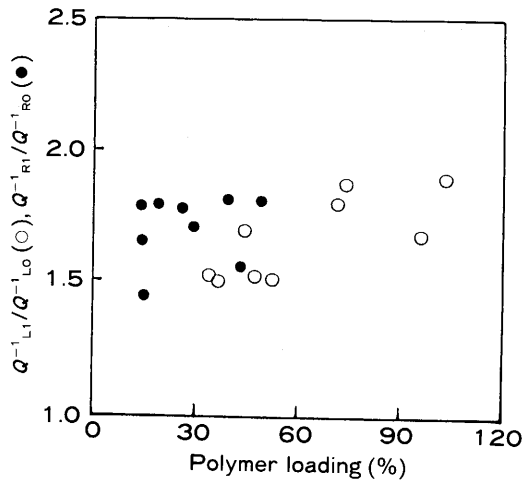


図-3 ポリマー含量と内部損失の変化率

$Q_{L0}^{-1}, Q_{L1}^{-1}$ : 処理前, 処理後の L 方向内部損失

$Q_{R0}^{-1}, Q_{R1}^{-1}$ : 処理前, 処理後の R 方向内部損失

Fig. 3. The relative internal loss before and after versus polymer loading.

Notes.  $Q_{L0}^{-1}, Q_{L1}^{-1}$ : internal loss in longitudinal direction measured before and after treatment, respectively.

$Q_{R0}^{-1}, Q_{R1}^{-1}$ : internal loss in radial direction measured before and after treatment, respectively.

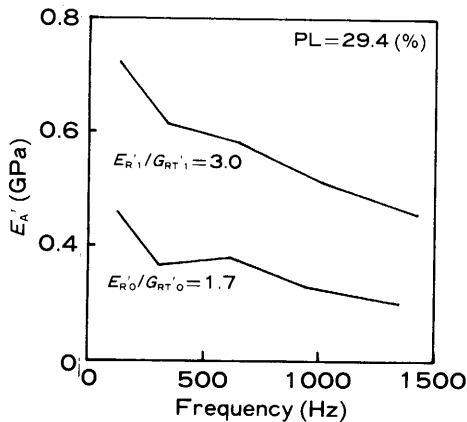


図-4-1 見かけの動的ヤング率の周波数依存性の変化 (試験体 R-6)

$E'_A$ : 見かけの動的ヤング率

Fig. 4-1. Change in the dependence of  $E'_A$  on frequency (No. R-6).

Notes.  $E'_A$ : dynamic Young's modulus uncorrected for the effect of rotation and shear.

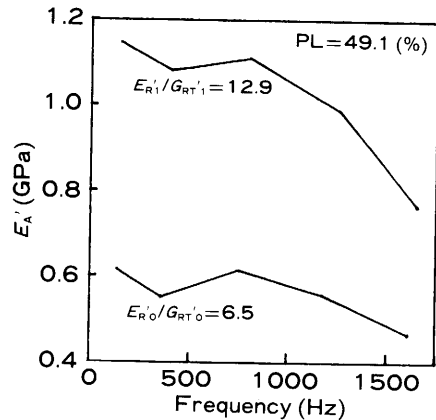


図 4-2 見かけの動的ヤング率の周波数依存性の変化 (試験体 R-9)

Fig. 4-2. Change in the dependence of  $E'_A$  on frequency (No. R-9)

示した。また  $Q^{-1}$  に与える WPC 化処理の影響は、もともと  $Q^{-1}$  の大きい半径方向に対し、なお大きいといえる。

### 3.4 音響的ファクターとしての検討

Fig. 2 が示しているように、振動の伝播性を表す  $E'/r$  は、繊維方向では減じているが、半径方向では適当なポリマー含量によって増大させることが出来る。PL40%で同一の板材に施された処理を仮定して異方向に着目すると、 $E'_L$  に対する  $E'_R$  の比が約 1.5 倍になっており、ピアノの響棒間の振動が現れる高音域<sup>7)</sup>において、共振周波数の変化をもたらすと思われる。

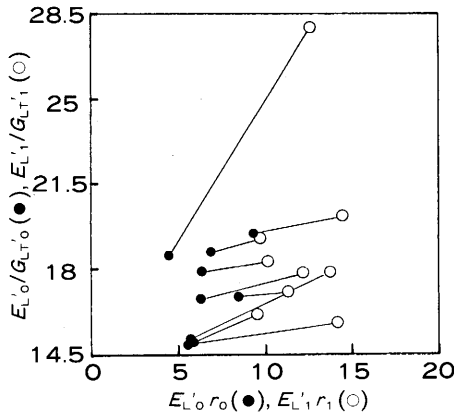


図 5-1  $E'r-E'/G'$  平面における処理前後の比較 (L 方向)

Fig. 5-1. Comparison between WPC (○) and control (●) on  $E'r-E'/G'$  plane (longitudinal direction).

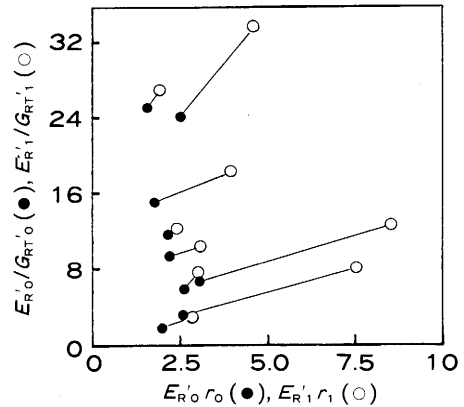


図 5-2  $E'r-E'/G'$  平面における処理前後の比較 (R 方向)

Fig. 5-2. Comparison between WPC (○) and control (●) on  $E'r-E'/G'$  plane (radial direction).

内部損失  $Q^{-1}$  は部材としての減衰性を表すはずであるが、実際に試作された響板材によると、‘音の伸び’といった時間軸特性よりも、‘音の明るさ’といった音色に対し弱い相関をもつ程度であるとする報告もある<sup>8)</sup>。したがってこのファクターによる音響的評価は微妙だが、ここにみられるような 1.5 倍以上もの増加は、好ましいものではない。

次に  $E'/G'$  であるが、これは Goens によるヤング率補正式の、せん断力に関わる項に含まれるパラメータである。この値が大きいと、周波数依存性、すなわち高次モードになるにつれてたわみ変位にせん断力の寄与する割合が増し、見かけのヤング率の減少および内部損失の増大、という音響的特性が高められることになる。この高周波数域における損失性は、良質な楽器響板材の指標となるもので、深くウッディな音質を生む。

既にみたように本報の WPC 化処理によると、 $E'/G'$  の値は増大しており、このファクターに関し好ましい結果を得た。見かけのヤング率の周波数依存性が処理によって鋭くなっている様子を、Fig. 4-1, Fig. 4-2 の 2 例で示す。

Fig. 5-1, Fig. 5-2 は、野崎ら<sup>8)</sup>が現場の実績をもとにして、ピアノ響板材の音響的評価のために用いた  $E'r-E'/G'$  平面において、未処理材と処理材を比較したものである。 $E'r$  はインピーダンスを表すので、これが大きいと弦の振動エネルギーが駒-響板系に透過する割合が少なく、振動初期のレスポンスは鈍いが、弦の支持端における反射エネルギーが保存されやすいために音の伸びは良くなるという。したがって横軸は時間特性を、縦軸は周波数特性を表しているのであって、この平面上右上に位置するものほど評価が高く、響きが自然・芯のある・重厚などといった音質表現と結びつけられている。

Fig. 5 をよると、各方向とも右上に移行している結果がうかがわれるものの、この処理の場合  $r$  の増大による響板自体の放射効率低下などが看過できず、検討を要するところである。

#### 4. 要 約

木材-PMMA/HEMA 複合体化処理による、シトカスプリースの振動的性質の変化を調べた結果、以下のことが分かった。

(i) 動的ヤング率  $E_L', E_R'$ , 動的せん断弾性率  $G_{LT}'$ , および内部損失  $Q_L^{-1}, Q_R^{-1}$  はポリマー含量の増加にともなって上昇する傾向を示したが,  $G_{RT}'$  は約 50% 以下のポリマー含量で低下する現象が見られた。

(ii)  $E_L'/r$  (比動的ヤング率) は, ポリマー含量の増加にともなって減少したが,  $E_R'/r$  は減少する場合と, 増大する場合とが見られた。

(iii) 繊維方向・半径方向いずれにおいても,  $E'$  が  $G'$  を上回って増大するために  $E'/G'$  値の増大がもたらされ, 楽器響板の周波数特性を向上させることが出来ると思われる。

**キーワード:** WPC, ポリマー含量, 動的ヤング率, 動的せん断弾性率, 内部損失, 周波数特性

#### 文 献

- 1) 水町 浩: 木材学会誌, **18**(11), 549 (1972).
- 2) Hoff, E. A. W. *et al.*: J. Polymer Sci., **18**, 161 (1955).
- 3) 川上英夫・種田健造・石田茂雄・大谷 淳: 木材学会誌, **27**(3), 197 (1981).
- 4) Goens, E.: Ann. Phys., **11**, 649 (1931).
- 5) Hearmon, R. F. S.: British J. of Applied Physics, **9**, 381 (1958).
- 6) 中尾哲也: 東京大学博士論文, 45-73 (1988).
- 7) 中村 勲: 日本音響学会誌, **37**(10), 510 (1981).
- 8) 野崎欣也・林田 甫・山田俊也: 日本機械学会誌, **19**, 653 (1988).

(1989年6月30日受理)

#### Summary

Changes in acoustical properties of Sitka spruce due to MMA/HEMA copolymer impregnation were investigated. The properties were evaluated by the dynamic Young's modulus  $E'$ , dynamic shear modulus  $G'$  and internal loss  $Q^{-1}$  measured using the flexural vibration method on free-free beams for the longitudinal and radial direction.

In both the directions,  $E'$ ,  $G'$  and  $Q^{-1}$  showed tendency to increase with increasing polymer loading, except for  $G'$  in R-T plane reducing at lower polymer loading.

Specific dynamic Young's modulus in the longitudinal direction decreased with increasing polymer loading. But in the radial direction, it increased in some range of polymer loading.

In both the directions, the rate of increase in  $E'$  was higher than that in  $G'$ . As a result, the value of  $E'/G'$ , which is the parameter exerting influence on frequency dependence of apparent Young's modulus or internal loss, became higher.

**Key words:** WPC, polymer loading, dynamic Young's modulus, dynamic shear modulus, internal loss, frequency dependence