疲れ寿命算出についての一提案*

539.432

中村 宏**, 田中 真一***

1. はし が き

最近、実働応力と疲れ強さに関する研究^{(1)~(31)}が盛んになり、多くの研究結果が発表されるとともに、応力測定も活発に行なわれ^{(32)~(90)}、実働応力と疲れ強さに関する多くの資料が収集されるようになってきた。

しかしながら、これらの資料が実際に設計者にどのように使用されているかを考えるとき、いまだ、研究と実際面との関連が薄いため、十分活用されているとは考えられない面もあり、むしろ、事故対策として用いられる場合が多いようである。

筆者らは、これまでに実際の応力測定に従事し、また、数多くの疲れ試験を行ない、両者の照合から疲れ寿命を算出し⁽⁵⁴⁾⁽⁶⁰⁾⁽⁶²⁾⁽⁶⁹⁾⁽⁷²⁾⁽⁷⁵⁾⁽⁹¹⁾⁽⁹²⁾⁽⁹³⁾⁽⁷⁶⁾⁽⁹⁸⁾⁽⁹⁴⁾⁽⁷⁸⁾⁽⁹⁵⁾⁽⁹⁶⁾⁽⁸³⁾⁽⁸⁴⁾⁽⁸⁵⁾⁽⁹⁷⁾⁽⁸⁸⁾、強度上の種々の問題や事故対策⁽³⁷⁾⁽³⁹⁾⁽⁴³⁾⁽⁴⁴⁾⁽⁴⁹⁾⁽⁵¹⁾⁽⁵⁴⁾⁽⁶⁰⁾⁽⁹⁹⁾⁽¹⁰⁰⁾にたずさわってきたが、定量的にその原因が判明した例は少ない。

そこで、今回は、これまでの研究経過をとりまとめ、判明していることがらと不明なことがら、

また、今後の問題点などを明らかにし、現時点における機械部品などの疲れ寿命算出の一方法を提案するとともに、実働応力と疲れ強さの考え方について検討を加えた。

この種の問題は、後述するように、今後の研究にまたねばならないことがらを多く含んでいるので、明確なる解答を求めることは、現段階としては不可能といえよう。しかしながら、今回まとめた多くの事例は、設計面のみでなく、研究上からも一つの参考資料として十分なる意義があるものと考え、あえてまとめたものである。

なお、筆者らの研究対象は鉄道車両用台車（特に車軸）が主であるので、比較的範囲が限られているが、その反面、同一種類のものが比較的多量に使用されており、その部品の使用条件は、疲れ強さに影響を与える多くの因子†を含んでいるほか、各種の資料も比較的整っている例も多いので、他の諸機械の設計上参考となる点が少なからずあるのではないと思われる。

図1は実働応力と疲れ強さの面から、合理的な機械部品の強度設計を行なうために必要と考えられる各種研究テーマを系統的に整理したものである。この図でみるように、非常に多くの研究と試験を総合して実際面に適用しなければならないので、十分なる結論をくだすことは早急には望めないことが理解される。

以下、図1に示す各種テーマのうち、筆者らが行なった研究結果とその概要、寿命の算出法に対する考え方、実際問題への適用結果についてのべる。

なお、各研究結果の詳細については、個々の文献に譲る。

図1 機械強度研究相互関係を示す系統図

* 昭和43年4月2日 第45期通常総会講演会において講演、原稿受付 昭和43年11月18日。

** 正員、川崎重工業会社技術研究所（神戸市生田区東川崎町 2-14）。

*** 正員、鉄道技術研究所。

† (i) 形状、(ii) 寸法、(iii) 切欠き、(iv) 圧入、(v) フレッシング、(vi) 変動荷重、(vii) 表面処理および表面仕上、(viii) 残留応力、(ix) き裂の発生と停留、(x) 組合せ応力、(xi) 衝撃荷重による疲れ、(xii) 熱処理組織、(xiii) 腐食疲れなど。

2. 各種の研究結果

2.1 荷重変化または応力波形 実働応力と疲れ強さの問題を究明するために、筆者らとその共同研究者が行なった各種の研究を一括してまとめたのが表1および図2である。

表1は、試験片寸法別、荷重の種類、応力波形別などに分類してあるが、実働応力を考える場合の便宜上の意味で行なったものである。回転曲げ試験が多いのは、対象を主として車軸に置いたためと、試験機の都合からである。

また、図2の細い実線は、同一応力振幅でのき裂進展曲線、太い実線は二段二重、二段三重、あるいは二段多重重複繰返し応力試験における実際のき裂進展曲線を示す。“×”印は荷重の切換え点を示し、切換え後の荷重でのき裂深さと繰返し数との関係は“●”印に相当するところを基準に示してある。

表1、図2にみるように、小形試験片、特に切欠きのある小形試験片については、応力振幅の変化の形態がきまれば、き裂の発生、き裂の進展、破断などに対する状況が比較的明らかにされてきたといえる。しかしながら、i) 応力波形が異なる場合、ii) 試験片が大きくなった場合、iii) 実物の場合、iv) 熱的影響が含ま

れた場合、v) 応力が疲れ限度以下のものを多く含む変動荷重の場合、vi) 応力の種類が途中で変わった場合（たとえばねじり応力と曲げ応力が交互に加わった場合）などの資料はいまだ少なく、今後の研究課題である。

表1に示すような研究は、さらに各種の組合せが考えられ、それぞれについての実験を十分行なうには、多くの時間と労力を費すこととなり、実際上は不可能な場合も多い。

また、注意を要する点は、小形試験片ばかりでなく、大形試験片の場合についても、実際の品物に作用する応力の絶対値よりかなり高い値で疲れ試験を行なう例が多いことである（図3参照）。かかる条件における疲れ試験の結果は、実物の疲れ強さを必ずしも表わすとは限らず、場合によってはかえって誤解を生じることすら考えられる*。したがって試験片による疲れ試験結果から、直ちに実物の実働応力下における疲れ強さを導くことは、非常にむずかしいといえる。

2.2 応力ひん度および材料強さのばらつき 各種の実働応力試験を行なうとともに、実際の品物に作用する応力ひん度のばらつき、素材および実物の強度上のばらつきを調べておくことは、実物の疲れ強さを考える上で重要なことである。

図2 き裂進展の説明（小形試験片）⁽⁶⁾

* 大形試験片(101)~(122)(129)、実物車軸(123)(25)(124)の疲れ試験において、試験機の数少ないためと結果を早く知るために、実際に働いている応力よりかなり高い応力で試験を行なっている例が多い。たとえば、図3(a)は新幹線電車用車軸の応力ひん度であり、図3(b)は疲れ試験結果の一例である(123)。疲れ試験時の応力は、実際の応力ひん度においてはひん度の少ないところの応力であり、ひん度の多い応力の小さいところでの疲れ試験は行なっていない。また、実物車軸の疲れ試験において、圧入部のき裂発生に対する疲れ寿命の短かったオーバハング・フィレット形(123)(図4参照)が、実際の使用結果ではかえって成績がよかった。したがって、S-N曲線としては図5⁽⁸⁹⁾のような傾向が考えられる。

表 1 (その 1)

(a) 小形試験片, 回転曲げ, 正弦波, 荷重変動の影響												
調査項目	荷重の種類	形状	材 料	熱処理	えられた結果	調査項目	荷重の種類	形状	材 料	熱処理	えられた結果	
微小き裂	二段二重	$\rho=1.0$ $\rho=3.0$	$C=0.36\%$ "	A A	i) 応力大なるときは粒界き裂の割合が多く, 応力小なるときは粒内き裂の発生割合が多い ⁽¹⁾ . ii) $\rho=3.0$ と $\rho=1.0$ でき裂の発生に対する影響が異なる ⁽¹⁾ .	き裂発生後に荷重を変化させたときのき裂の進展	二段多重	$\rho=0.35$ "	$C=0.36\%$ $C=0.17\%$	N N	“平行則” 図 2 (e), (f) ⁽⁸⁾ 応力一定期間の繰返し数少ないとき 図 2 (m), (n) ⁽⁸⁾ 応力一定期間の繰返し数多いとき 図 2 (g), (r) ⁽⁸⁾ 応力一定期間の繰返し数が非常に少ないとき 図 2 (s) ⁽⁸⁾	
	き裂発生	二段二重	$\rho=0.35$ "	$C=0.17\%$ $C=0.36\%$	N "		$\Sigma(n/N) \approx 0.8 \sim 1.0$ ⁽²⁾ (8) $\Sigma(n/N) \approx 1.0$ ⁽⁴⁾ $\Sigma(n/N) \approx 0.9 \sim 1.1$ ⁽⁵⁾	三段多重	"	$C=0.36\%$ $C=0.17\%$	N N	“平行則” 図 2 (e'), (f') ⁽⁸⁾ 応力一定期間の繰返し数少ないとき 図 2 (n'), (m') ⁽⁸⁾ 応力一定期間の繰返し数多いとき 図 2 (p'), (o') ⁽⁸⁾ 応力一定期間の繰返し数が非常に少ないとき 図 2 (s') ⁽⁸⁾
三段三重		$\rho=0.35$	$C=0.36\%$	N	$\Sigma(n/N) \approx 1.0$ ⁽⁴⁾		"	"	"	"	"	
二段多重		$\rho=3.0$	"	A	$\Sigma(n/N) \approx 0.65$ ⁽¹⁾		"	"	$C=0.36\%$ $C=0.17\%$	N N	応力一定期間の繰返し数が非常に少ないとき 図 2 (s') ⁽⁸⁾	
正弦波の荷重変動		$\rho=0.35$	$C=0.17\%$	A	$\Sigma(n/N) \approx 1$ ⁽⁶⁾		多段多重					図 2 (t) ⁽⁸⁾
"		"	$C=0.36\%$	"	$\Sigma(n/N) \approx 1$ ⁽⁶⁾		正弦波の荷重変動	$\rho=0.35$	$C=0.17\%$	N	き裂の“平行則”で説明しうる ⁽⁶⁾ (8).	
"		$\rho=0.40$	$C=0.17\%$	IH	$\Sigma(n/N) \approx 1$ ⁽⁶⁾		"	$\rho=0.35$ $\rho=0.40$	$C=0.36\%$ $C=0.17\%$	" IH	" “重ね合せ則” ⁽⁶⁾	
き裂発生前に荷重を変化させたときのき裂の進展	漸増漸減荷	$\rho=0.35$	$C=0.36\%$	A	$\Sigma(n/N) \approx 1$ ⁽⁷⁾		二段二重	$\rho=0.20$	$C=0.12\%$	IH	応力上昇“重ね合せ則” ⁽⁶⁾ 応力下降 予想よりき裂は早く進む	
	二段多重	"	$C=0.34\%$	圧延のまま	低応力が σ_{w1} 以下でも影響があり $\Sigma(n/N)$ は 0.004 まで低下する ⁽¹⁸⁵⁾ .		三段三重	$\rho=0.35$	$C=0.16\%$	IH	一次応力にてき裂を入れた後, 三次応力との間に σ_{w1} 以下の二次応力を入れてもき裂は進展している ⁽¹⁰⁾ .	
	五段五重	$\rho=0.35$	$C=0.17\%$	N	“重ね合せ則” ⁽²⁾		漸増荷重	$\rho=0.35$	$C=0.36\%$	N	漸増速度が遅い場合は“重ね合せ則”による予想より早く, 速度が早い場合は予想値にほぼ近い ⁽⁷⁾ .	
	二段二重	$\rho=0.35$	$C=0.17\%$	N	応力上昇“重ね合せ則” 図 2 (j) ⁽⁸⁾ 応力下降“重ね合せ則” 図 2 (i) ⁽⁸⁾		"	"	$C=0.13\%$	N	予想より早い ⁽¹¹⁾ .	
	"	"	$C=0.36\%$	"	応力上昇“重ね合せ則” 図 2 (b) ⁽⁴⁾ 応力下降“平行則” 図 2 (a)		漸減荷重	$\rho=0.35$	$C=0.36\%$ $C=0.13\%$	N N	予想より早い ⁽¹¹⁾ (7). 予想に一致 ⁽¹¹⁾ .	
	三段三重	"	"	"	応力上昇“重ね合せ則” 図 2 (b') ⁽⁴⁾ 応力下降“平行則” 図 2 (a')		漸増荷重後の一定応力振幅	$\rho=0.35$	$C=0.36\%$	N	予想に一致 ⁽⁷⁾	
	"	"	$C=0.17\%$	"	応力上昇“重ね合せ則” 図 2 (j') ⁽⁸⁾ 応力下降“平行則” 図 2 (i')		"	"	$C=0.13\%$	N	予想に一致 ⁽¹¹⁾	
	三段多重	$\rho=0.35$	"	"	“重ね合せ則” ⁽⁸⁾		漸減荷重後の一定応力振幅	$\rho=0.35$	$C=0.36\%$	N	予想に一致 ⁽⁷⁾	
	"	"	$C=0.36\%$	"	“平行則” ⁽⁹⁾		"	"	$C=0.13\%$	N	予想に一致 ⁽¹¹⁾	
	き裂発生後に荷重を変化させたときのき裂の進展	二段二重	$\rho=0.35$	$C=0.17\%$	N	応力上昇“重ね合せ則” 図 2 (l) ⁽⁸⁾ 応力下降“平行則” 図 2 (k)	き裂発生後に荷重を変化させたときのき裂の進展	正弦波状変動荷重後の一定応力振幅	$\rho=0.35$	$C=0.36\%$ $C=0.17\%$	N "	$\sigma_1 < \sigma_2$ のとき 予想に一致 ⁽⁷⁾ (11) "
"		"	$C=0.36\%$	N	応力上昇“重ね合せ則” 図 2 (d) ⁽⁴⁾ 応力下降“平行則” 図 2 (c)	"		"	$C=0.36\%$ $C=0.17\%$	N "	$\sigma_1 > \sigma_2$ のとき 予想に一致 ⁽⁷⁾ (11) "	
二段三重		$\rho=0.35$	$C=0.17\%$	N	応力上昇“重ね合せ則” ⁽⁸⁾ 応力下降“平行則”	破断		多段多重	$\rho=0.25$	$C=0.36\%$	N	$\Sigma(n/N) \geq 0.6$ ⁽¹²⁾
三段三重		$\rho=0.35$	$C=0.36\%$	N	応力上昇“重ね合せ則” 図 2 (d') ⁽⁴⁾ 応力下降“平行則” 図 2 (c')	二段多重後他の応力負荷		$\rho=0.35$	$C=0.34\%$	圧延のまま	低応力が σ_{w2} 以下でも影響があり, $\Sigma(n/N)$ は 0.3 まで低下する ⁽¹⁸⁾ .	
"		"	$C=0.17\%$	N	応力上昇“重ね合せ則” 図 2 (l') ⁽⁸⁾ 応力下降“平行則” 図 2 (k')	注 1) 形状欄の ρ は V 形切欠きの切欠き半径 mm 2) 熱処理欄のうち A は焼なまし, N は焼ならし, IH は高周波焼入れを意味する. 3) 試験片直径 $d=(10 \sim 11)$ mm (特に記入された場合は除く) 4) $\Sigma(n/N)$ は累積繰返し数比 5) σ_{w1} はいくら繰返しても切欠き底にき裂を発生しない応力振幅の最大値 6) σ_1 ; 一次応力, σ_2 ; 二次応力						

表 1 (その 2)

(b) 小形試験片, 回転曲げ, 応力波形の影響					
荷重の種類	調査項目	形状	材 料	熱処理	えられた結果
重 量 波	き裂の発生	$\rho = 0.25$	C=0.16%	IH	若干正弦波より寿命が短くなる ⁽¹⁴⁾ . [応力の整理法は付図(a)の Σ']
	"	$\rho = 0.5$	C=0.36%	N	応力の高いところでは正弦波とほぼ同じ寿命 ⁽¹⁶⁾
	き裂進展				応力の低いところで正弦波より早い ⁽¹⁶⁾ .
	疲れ限度				低下し 10^7 の繰返しでもおちつかないようである ⁽¹⁶⁾ .
衝撃波を途中に1回含む場合	き裂進展	$\rho = 0.35$	C=0.36%		衝撃荷重を変動荷重とみなして“平行則”を用いると実験と一致するか, または, 安全側になる ⁽¹⁶⁾ .
衝撃波を途中に含みつつ破断する場合	き裂進展および破断	$\rho = 0.35$	C=0.36%	IH A	衝撃荷重による応力を変動応力と考へて, き裂進展に対して“平行則”を用いると比較的説明しうる ⁽¹⁷⁾ .
衝撃波を毎回含む	破 断	$\rho = 0.25$	C=0.38%	A	付図(b)の Σ' で整理したとき応力の大きいときには正弦波と大差なし ⁽¹⁸⁾ .

(c) 小形試験片, 回転曲げ, 応力波形と荷重変動の組合せ

荷重の種類	調査項目	形状	材 料	熱処理	えられた結果
正弦波の荷重変動と二段二重の組合せ	破 断	$\rho = 0.35$	C=0.36%	A	“掛算則” ⁽¹⁹⁾
正弦波の荷重変動と二段多重の組合せ	破 断	$\rho = 0.35$	C=0.36%	A	“掛算則” ⁽¹⁹⁾
衝撃波を途中に含みつつ破断する場合の二段二重	き裂進展	$\rho = 0.35$	C=0.36%	A	回転曲げ応力は一定で, 衝撃応力を2種類に変えた場合, それぞれの単独の $\lambda - \log N$ 曲線について応力上昇のとき “重ね合せ則” ⁽¹⁷⁾ 応力下降のとき “平行則” ⁽¹⁷⁾

(d) 中形および大形試験片, 実物, 回転曲げ

調査項目	荷重の種類	形状	材 料	熱処理	えられた結果
	荷重変動の包絡線が正弦波または類似長方形波	$d=60$ $\rho = 1.0$	SS 41	N	$\Sigma(n/N) = 0.70 \sim 1.88$ ⁽²²⁾
破 断	二段三重	$d=24.6$ $\rho = 0.7$	C=0.39%	A	$\sigma_2 > \sigma_1 = \sigma_3$ のとき σ_2 の繰返し数を変化させると $\Sigma(n/N) = (0.5 \sim 1.6)$
		$d=8.8$ $\rho = 0.23$	C=0.39%	A	直径の大小によって傾向がかなり異なる ⁽²³⁾ .
	二段二重	$d=25$ $\rho = 0.25$	C=0.29%	A	i) 応力上昇のときには, “重ね合せ則” ⁽²⁴⁾ ii) 応力下降のときには, 応力を変化させるときのき裂が小さいときは速くなるが, 応力を変化させるときのき裂が大きいときは遅くなる ⁽²⁴⁾ .
	き裂進展				

荷重の種類	調査項目	形状	材 料	熱処理	えられた結果
重 量 波 (包絡線が正弦波状)	破 断	$d=15$ 平 滑	C=0.34%	A	Σ' で整理し, 繰返し数は一次波 (基本波) と二次波 (重量波) の中間の値となる ⁽²¹⁾
重 量 波 (包絡線が長方形波)	破 断	$d=15$ 平 滑	C=0.34%	A	Σ' で整理し, 繰返し数は重量波でほぼよい ⁽²¹⁾ .
重 量 波 (包絡線がランダム波)	破 断	$d=15$ 平 滑	C=0.34%	A	仮定を設けた計算では $\Sigma(n/N) = 0.28 \sim 0.36$ ⁽²¹⁾

(e) 平面曲げ

荷重の種類	調査項目	形状	材 料	熱処理	えられた結果
重 量 波 (包絡線が正弦波状)	破 断	実物板 ばね 平 滑	SUP 3	*	i) 試験速度の影響が多い, 速度の違いは疲労強さは低下する ⁽²⁰⁾ . ii) Σ' で整理すればよい ⁽²⁰⁾ . $\Sigma(n/N) = (0.4 \sim 2.0)$ 中村・田中の方法 ⁽⁸¹⁾ でおおよそ計算しうる ⁽¹⁸⁶⁾ .
重 量 波 (包絡線が正弦波および重量波)	破 断	平 滑	SS 41, アルミ アルミ 物, アルミ 鍛造, SC 49	熱処 理なし	試験速度の影響が大きく, 試験速度の異なるほうが寿命が小さい. しかし, 試験時間で整理すると両者は一致する ⁽²¹⁾ .
正 弦 波	試験速度の影響 破 断	$d=10$ $\rho = 0.25$	C=0.23%	IH	i) 初めに 60c/min, つぎに 1450 rpm ⁽²¹⁾ のときは $\Sigma(n/N) = 0.70$ ii) 初めに 1450 rpm, つぎに 60c/min のときは $\Sigma(n/N) = 1.24$
	周波数変化 破 断	"	"	"	

* 表面削正荒仕上後 900~950°C に加熱, 800~830°C 焼入れ, 470°C 45分焼もどし.

(f) ね じ り

荷重の種類	調査項目	形状	材 料	熱処理	えられた結果
重 量 波 (包絡線が正弦波)	破 断	$d=15$ 平 滑	C=0.34%	A	Σ' で整理し, 繰返し数は一次波 (基本波) と二次波 (重量波) の中間の値となる ⁽²¹⁾
重 量 波 (包絡線が長方形波)	破 断	$d=15$ 平 滑	C=0.34%	A	Σ' で整理し, 繰返し数は重量波でほぼよい ⁽²¹⁾ .
重 量 波 (包絡線がランダム波)	破 断	$d=15$ 平 滑	C=0.34%	A	仮定を設けた計算では $\Sigma(n/N) = 0.28 \sim 0.36$ ⁽²¹⁾

(g) そ の 他

荷重の種類	調査項目	形状	材 料	熱処理	えられた結果
曲げとねじりの組合せ ($\sigma_a = \tau_a$) (一定)	破 断	$d=8$ $\rho = 0.2$	C=0.37%	A	i) 曲げ→ねじり $\Sigma(n/N) < 1$ ⁽²⁷⁾ ii) ねじり→曲げ $n_1/N_1 < 0.1$ のとき $\Sigma(n/N) > 1$ ⁽²⁷⁾ 他は 1 より小さい. $\sigma_a \rightarrow \tau_a$ と $\tau_a \rightarrow \sigma_a$ で傾向が異なる.
曲げとねじりの組合せ ($\tau_a = \sigma/2$)	破 断	$d=8$ $\rho = 0.2$	C=0.37%	A	$\sigma_a \rightarrow \tau_a$, $\tau_a \rightarrow \sigma_a$ とも傾向は近似 $\Sigma(n/N)$ の最小は 0.3 ⁽²⁷⁾
引張圧縮で途中で温度変化 (応力一定)	き裂進展		SS 41	圧延のまま	i) T_R (常温) $\rightarrow T_L$ (-190°C) ⁽²⁸⁾ き裂が一時停留する. ii) $T_L \rightarrow T_R$ “重ね合せ則” ⁽²⁹⁾
き裂発生後温度上昇 (応力変化)	き裂進展	$d=10$ $\rho = 0.15$	C=0.29%	A	応力下降 300°C × 1h 加熱により ⁽²⁴⁾ ⁽³⁰⁾ き裂進展はあまり変化せず.
正 弦 波 (使用後の疲れ試験)	破 断	実物板 ばね			実車で使用後疲れ試験を行なったところ, 使用後の寿命は走行キロと相関性あり ⁽⁸¹⁾ . $\Sigma(n/N) = 1$ とするためには使用時の $\Sigma(n/N)$ の値を修正する必要がある ⁽⁸¹⁾ .
引張圧縮 (a) 応力下降 (b) 応力上昇 (c) 一次応力は片振圧縮 二次応力は片振引張り (d) 予圧縮 $\rightarrow \sigma_2 =$ 片振引張り (e) $\sigma_1 =$ 片振引張り $\rightarrow \sigma_2 =$ 一次応力の負の値 $\rightarrow \sigma_3 =$ 三次応力は片振引張り	き裂発生および破断	$d=25$ $\rho = 3.5$	軟 鋼		(a) $\Sigma(n/N) = 1.23, 2.83, 2, 8.7$ ⁽²⁸⁾ (b) $\Sigma(n/N) = 2.30, 2.57$ (c) $\Sigma(n/N) = 0.48 \sim 0.57$ (d) $\Sigma(n/N) = 0.57, 0.63$ (e) $\Sigma(n/N) = 0.69, 0.35, 0.57$
			高力鋼		(a) $\Sigma(n/N) = 0.92, 1.40, 1.58, 0.80$ ⁽²⁸⁾ (b) $\Sigma(n/N) = 0.72, 1.07, 0.97$ (c) $\Sigma(n/N) = 0.78, 0.71$ (d) $\Sigma(n/N) = 0.80$ (e) $\Sigma(n/N) = 1.25, 0.61, 0.86$

応力下降, 応力上昇の影響は回転曲げの場合と傾向は全く異なる. (c), (d), (e) の場合は一例を除き, $\Sigma(n/N)$ は 1 より小さい⁽²⁸⁾.

一般に、鉄道車両用台車部材に働く応力のひん度分布は、Rayleigh 分布をなすことが多い。しかるに、同一形状の部材であっても、使用される車両などにより、働く応力は必ずしも同一のひん度分布を示さず、応力ひん度分布にもばらつきを生じるのが普通である。

図 3 (a) は一例として、新幹線電車用車軸の応力ひん度分布のばらつき⁽⁸⁹⁾を示したものであり、図 6 は同じく新幹線電車用車軸に働く荷重* のばらつきを示したものである。

図 3 (a) および図 6 は比較的単純な形状の部品についての例を示したに過ぎないが、部品の数が多い部材については、応力ひん度分布などのばらつきはさらに大きくなることが予想される。

したがって、直線被害則によって寿命を算定しようとする場合には、部材にかかる応力または荷重のばらつきをどの程度まで考慮すべきかについての資料を今後数多く集積せねばならないが、実際上は困難なことが多く、推定にたよらざるをえない。

応力および荷重のばらつきに関する実際上の資料とともに、部材を構成する素材そのものの強さ、特に、疲れ強さのばらつきについての資料も集積することが必要である。多くは小形の試験片による引張強さ、衝撃強

さ、かたさなどについての資料との関連が求められているが、実用された部品についての疲れ強さとの対応を求めたものは非常に少なく、応力のばらつきと同様、実物の寿命のばらつきを解析する上で困却するこ

図 3 新幹線車軸の応力ひん度と実物車軸疲れ試験結果の比較⁽⁸⁹⁾(123)

図 4 車軸圧入部形状

図 5 S-N 曲線の比較

記号	編成	測定日				
●	S3-1	39-8-25	○	40-2-12	⊗ R1-5	40-8-4
◆		39-9-10	△	40-3-25	⊗ K8-9	40-9-27
▲		39-9-28	□	40-5-30	△ K8-11	40-10-20
■		39-10-23	◇	40-6-21	□ K8-9	40-10-20
▼		39-12-21	☆	40-6-21	◇ K8-11	40-12-14
			⊕	40-7-22	▽ K8-12	40-12-14

図 6 横圧および輪重のひん度のばらつき (新幹線電車)⁽⁸²⁾(125)

* 図 6 において、横圧とは、レールから車輪に働く水平方向荷重を意味する。

とが多い。

図7⁽¹²⁶⁾は国鉄において使用された車軸より切り出した試験片における疲れ強さのばらつきを求めたものの一例である。同一規格で購入した部品であっても、その疲れ強さにはかなりのばらつきが生じている。図7は実験数も少ないため、寿命の“散布度”は3S(S;標準偏差)程度となっているが、約40万本近く使用されている車軸全部についての寿命のばらつきを考えると、“散布度”はさらに大きくなることが考えられる。しかしながら、そのすべてのデータをうることは不可能に近く、推定すら困難なことが多い。特に、試験片についてのデータと実物についてのデータの関連を考えるならば、実際に使用される部品の疲れ強さのばらつきを正確に知ることは、不可能であろう。

2.3 工作法上のばらつき 車軸のように、圧入部を伴った部品の場合には、圧入部の強さに大きな影響を及ぼす面圧、相対すべりなどの円周上のばらつき、車軸と車輪の組合せ方によるばらつきなども無視できない。

はめ合い部のボス外周の面圧のばらつきについて、実車軸25例についての実測の結果では、圧入部面圧が5 kg/mm² から13 kg/mm² の間にばらついていた。これらのばらつきを知ることは、2.2節でのべた応力ひん度や素材の強さのばらつきを知ること以上に困難な場合が多い。また、寿命の計算を行なう上で、これらの数値を十分反映させることは、現状ではかなりむ

図7 使用済車軸から作成したV形切欠き試験片 ($D=30\phi$, $d=15\phi$, $\rho=0.25$) の疲れ試験結果⁽¹²⁶⁾

* 表面かたさ、表面残留応力から平滑材の疲れ限度 σ_{w0} を推定し、き裂発生疲れ限度 σ_{w1} との比 σ_{w0}/σ_{w1} をここでは β_f とした⁽¹²⁸⁾。

** 文献(20)の図2参照。

ずかしいようである。したがって、実物の疲れ強さを論じる場合は、かかる因子は素材または部材の疲れ強さのばらつきと同様、定性的に考慮する以外に現段階では適当な方法はみあたらない。

2.4 実物の S-N 曲線 小形の部品の場合を除き大形部品の実物の S-N 曲線を求めることは容易ではなく、一般に、試験片または実物大の試験片の疲れ強さで代用するのが普通である。

しかしながら、このような S-N 曲線を寿命計算などに使用する場合には、次のようなことがらに十分注意する必要がある。

すなわち、(i) 圧入軸の場合、従来からも多くの疲れ試験が小形試験片⁽¹²⁷⁾⁽¹²⁸⁾⁽¹³⁰⁾および大形試験片⁽¹²⁹⁾を用いて行なわれてきたが、実物大の試験片⁽¹³⁰⁾と実物の疲れ強さは必ずしも同じではなく、後者のほうが低い場合が多い。たとえば、図8*に示すように、従来からある片持はり式の疲れ試験機を用いた大形試験片または実物大の試験片の疲れ試験結果よりも、実物試験軸⁽¹²³⁾の疲れ強さはかなり低い結果がえられている。

この原因については、いまだ明らかではないが、寿命計算の際の S-N 曲線の決定にあたっては注意すべきことがらである。

(ii) 実物の板ばねについての S-N 曲線が、疲れ試験時の繰返し速度により、異なる点についても注意する必要がある**。車両のばねなどにおける応力において応力振幅の大なる部分を占める一次波は普通二サイクル前後のものが多く、重畳波は一般に(50~70)サイクルである。したがって、実物の S-N 曲線を定める場合には、重畳波を含む疲れ試験を数多く行ないこれについての資料を十分求めるとともに、応力の繰

図8 高周波焼入圧入軸の直径と β_f の関係⁽¹²³⁾

返し速度についても十分なる注意が払われねばならない。

(i), (ii) のいずれにしても, 実物の $S-N$ 曲線の決定には, 最終的には実物を用いた実働応力波形の疲れ強さに関する資料を必要とすることになり, 今後の資料の蓄積はかなり困難なことといえる。

2.5 腐食およびふん囲気 実物の疲れ強さを論じる上で無視できないものの一つに腐食およびふん囲気の影響がある。多くの研究者による実験結果では, これらの因子は, 破断はもちろん, き裂の進展に大きな影響を及ぼすことが知られているが, 一般には, 疲れ強さを低下させる方向に作用すると考えてよいようである。

しかしながら, 屋内における一般の疲れ試験においては, かかる影響が比較的無視されている場合が多い。また, これらの因子を加味した実験⁽¹³¹⁾ の場合でも, 試験時間が比較的無視されており, 一般に短い場合が多い。したがって, 実物における腐食およびふん囲気の影響とは多少異なった条件における試験といえる。

実際の品物と同様な条件下での試験が望まれるわけであるが, 現状では, かかる実験はほとんど行なわれていないので, 実物における統計データから定性的に考慮していく以外にないと考えられる。

2.6 その他 2.1~2.5 節で述べたことがら以外にも, 熱処理, 残留応力などの多くの因子を考慮せねばならないが, 実物について, かかる資料を十分求めることは, 今後多くの年月を要するのは明らかである。さらにこれらの多くの因子相互の関連についての資料を求めることは, 実際上は困難であろう。したがってこれらの因子が実物の疲れ強さに及ぼす影響については, 定性的に考慮する以外にないようである。

3. 実際の疲れ寿命の算出法について

2章でのべたように, 多くの因子が実物の疲れ強さに与える影響については, ほとんど解明されていないといえる。しかしながら, これらの多くの因子が判明し, その影響の程度が判明したとしても, その相互関係が十分解明されるには, さらに多くの時間を必要としよう。

したがって, 現状においては, 実際の品物について, 使用中における折損またはき裂発生の実例を調べ, これと単純化した寿命計算結果との比較を行なうことによって, 両者の相互関係を表わすある経験的指数を求めて実用に供する以外に, 実用的な方法はみあたらないようである。

かかる方法は, あくまで便宜的な方法であり, 2章でのべた多くの因子が材料に及ぼす影響とその相互関係が判明次第, 合理的に修正を加えることはもちろん必要なことである。

以下, 実用的な寿命の算出法について説明する。

応力ひん度が求められ, また, $S-N$ 曲線が判明すれば, 直線被害則 $\Sigma(n/N)=1$ を仮定すれば寿命の計算は一応可能である。

表1の多くの実験結果を考えると, $\Sigma(n/N)=1$ が必ずしも成り立つとは限らないが, 実際の品物についての荷重履歴やふん囲気などについてのすべてにわたっての記録をとることは, 一般には不可能に近い。そこで, ここでは便宜上, $\Sigma(n/N)=1$ を仮定し, 試験片または実物の疲れ試験によって求めた $S-N$ 曲線を実際の使用結果と計算による寿命とが一致するように修正する方法を考えた。

修正の方法としては, (i) 図9(a)のように, 基準の $S-N$ 曲線を下方に平行移動させて他の $S-N$ 曲線を引く方法⁽⁹²⁾⁽⁹⁴⁾, (ii) 図9(b)のように基準の $S-N$ 曲線の S を $1/k'$ にする方法, (iii) 文献(132)の図14の

(a) $S-N$ 曲線の修正法 (平行に引く場合) の例

(b) $S-N$ 曲線の修正法 $[(1/k')S-N$ 曲線の場合] の例

図 9

ような方法が考えられる。

これらの方法は、そのいずれも一長一短があるが、(i)の方法は $\log \sigma$ - $\log N$ 曲線を描くとき、ほぼ一点に集中するという点と、 λ - σ - N 線図*と類似しているので疲れ強さの面からみた場合には、やや合理的のように考えられる。しかし、多くの因子を考え、新しい安全係数として k' なるものを考えるという観点から、ここでは (ii)の方法について考えることとした。

すなわち、計算寿命と実際の品物の使用結果の比較

から、両者を一致させるための S - N 曲線を (ii)の方法で求め、そのときの k' の値を実用的な寿命計算の場合の安全係数として用いる方法である。

k' の値を多くの実例について求めれば、設計時の寿命計算に用いることが可能と考えられる。

つぎに S - N 曲線は修正せずに、実際の応力ひん度から累積繰返し数比 $\Sigma(n/N)$ を求め、これを実例と一致させるために修正する方法が考えられる。

すなわち、多くの実例について、応力ひん度と実験室で求めた試験片または実物の S - N 曲線から $\Sigma(n/N)$

表 2 応力測定、きず入り、寿命計算などの実例

部 品 名	応力波形	デ ー タ 整 理 法	応 力 ひん度	最 大 応力値 kg/mm ²	材 質 熱 処 理	疲れ試験データ			計算寿命と 実際の寿命を 合せる方法		疲 れ 安全率 $\frac{\sigma_w}{\sigma}$	備 考	測 定 時 期	分 類
						試験片	実物より 作った 試験片	実物	$\Sigma(\frac{n}{N})$	k'				
阪神電鉄ノーズ ばね ⁽⁶²⁾	重畳波ね じり	Σ' , 一次波	全線 (1.78 km)	$\tau = \pm 16$ (内側)	ばね鋼			○	$\cong 1$				昭29	A
台車わく(P-6) ⁽⁴⁰⁾ ⁽⁴²⁾ ⁽⁶⁰⁾	重畳波 平面曲げ	Σ' , 一次波	一 部	$\sigma = \pm 15$	鋳 鋼	○			$\cong 1$				昭29.4	
交流電気機関車 スポーク車輪	平面曲げ 共振				鋳 鋼	台車わくの データを使用			$\cong 1$		ひん度を推定し て求めた値とほ ぼ一致する		昭32	
板車輪 ⁽⁵⁴⁾ ⁽⁵⁵⁾	三角波	全振幅 平均応力	全 線	$\sigma = -15.1$ $+3.6$	圧 延 鋼		○		$\cong 0.005$	約 2			昭32.6	B
普 通 車 軸 ⁽⁷⁷⁾ ⁽⁸⁰⁾ ⁽⁸²⁾	正 弦 波 重 重 撃	半 振 幅	多数あり	$\sigma = 10$	中炭素鋼	○	○	○		2~3			昭27 以降	
高周波焼入れ車 軸 ⁽⁸³⁾ ⁽⁸⁵⁾	"	"	"	$\sigma = 6.5$	中炭素鋼 高周波焼入 れ	○	○	○		2.3			昭39 以降	
交流電気機関車 たわみ板ばね ⁽⁸¹⁾	三重重畳 波 変 動	Σ' , 100m, 30 m, 各波ご とのピーク	全 線	$\sigma = 45$	特殊ばね鋼	○		○	$\frac{0.005}{0.007}$	2			昭38.7	
台車わく(新幹 線) ⁽⁸⁶⁾	共振波形	100m ごと の最大	全 線	$\sigma = 7.5$	溶 接 部						10 ⁸ 回での σ_w は 3 kg/mm ²		昭41	C
キハ 42500 車軸 ⁽⁴⁸⁾	ね じ り , 変 動	片 振 幅		$\tau = \pm 7$	SF 60	$d=25$ の $\tau_w=14$ kg/mm ²							昭30.3	
DT 20 台車わ く ⁽⁴⁵⁾	複 雑 波			$\sigma = \pm 10.7$	溶 接 部								昭30.10	
DT 20 台車つ りボルト ⁽⁴⁵⁾	共 振			$\sigma = \pm 10.5$									昭30.10	
台車わく (KSK)	共 振	速度と最大 値の関 係		$\sigma = 8$ (全振幅)	溶 接 部								昭29.12	D
台車わく (川・西)				$\sigma = 5$	SS 41						板ガス切断の際 の残留応力		昭29.2	
台車わく (日・京)				$\sigma = 2$	高抗張力鋼						残留応力約 +40 kg/mm ²			
電気機関車大歯 車リム部 ⁽⁶¹⁾				$\sigma = 10.6$ (全振幅) 2.5±9.4		平面曲げ							昭31	
キハ 42500 コイ ルばね ⁽⁸¹⁾ ⁽⁸²⁾	ランダム	振幅応力 に平均応 力を考慮	一 部		ばね鋼	○					事故なし		昭26	E
新幹線たわみ板 ばね ⁽⁸¹⁾ ⁽⁸⁴⁾	重畳波 変 動	片 振 幅 100m ごと	全 線	$\sigma = \pm 27$	特殊ばね鋼			○		2.6 以下	事故なし		昭39	
クランク軸の一 例				$\sigma = 8.9$ $\tau = 3.1$ $\sigma = 6.2$ $\tau = 2.0$	模型クランク 軸 ⁽¹²²⁾ $\sigma_w = 23$ kg/mm ²						2.3 3.3 4.6 5.3	事故なし	昭41	
送風機羽根車材				0~36 (設計値)	$\sigma_e > 55$ kg/mm ² $\sigma_B = 75 \sim 88$ kg/mm ²						2.5* ~3.5			

A ; 比較的計算寿命と実寿命が一致した例

B ; $\Sigma(n/N)$ または k' でかなりの修正が必要であった例

C ; 定性的に事故原因が説明できた例

D ; 疲れ限度に対して応力がかなり低い例

E ; 事故のない例

* 測定値についての値

* 応力振幅、繰返し数とき裂深さの関係を示す曲線 [文献 (10) 図 8 参照]。

N) を計算し, この値 k'' を実働応力下における $\Sigma (n/N)$ の値と考え, $\Sigma (n/N)=1$ として計算した寿命に掛けて修正する方法である。

(a) 鋳鋼台車わく σ - n 線図および σ - N 線図

〈注 1〉 事故品から切り出した試験片について平面曲げ疲れ試験を行ない, 平均応力を修正したもの。

〈注 2〉 応力ひん度の実測値に板厚 (事故品は正常のものに比べて少し薄かった) の修正を行なったものの。

(b) 板車輪の寿命計算に用いた σ - n 曲線および σ - N 曲線

図 10

図 11 a と $\Sigma (n_i/N_i)$ の関係

* 比較的短時間に疲れ破壊する例である。

** かなりの時間を経過してのち, 疲れ破壊するもので, き裂の発生する確率も少ないことが多い。

k'' は $\Sigma (n/N)=1$ として, 寿命を計算する場合に対する一種の安全係数とも考えられる。

k' および k'' の値として, どのような値をとればよいかについては, 現在のところ資料も十分とはいえず, また実験例も少ないが, 筆者らの関連した過去の事例から求めた結果によれば表 2 のようになっている。

k' の値としては, おおよそ (2~3), k'' の値としては (0.001~0.01) となっている。

実際に設計時に寿命を計算する場合, k' または k'' の値をどのように定めるかについては, 今後の資料の蓄積をまたねばならない点が多いが, k'' についての一つの考え方として, 次のような方法が考えられる。

表 2 からわかるように, A の部類に属するものは, たとえば図 10 (a) のように, 応力ひん度のうちかなりのひん度が疲れ限度より上にあるものが多い, かかる場合は $\Sigma (n/N)=1$ としても比較的实际の寿命と計算寿命が一致することが多い*。

しかし B の部類に属するものは図 10 (b) に示すごとく, 応力の最大値またはその近傍の応力のみがわずかに疲れ限度を越えるものが多い, かかる場合は $\Sigma (n/N)$ が 1 よりはるかに小さくなることが多い^{(133)**}。

これらの関係に着目し, 疲れ限度以上の応力ひん度の総和 $\Sigma (n_i)_{\sigma_a > \sigma_w}$ とすべての応力ひん度の総和 Σn_i の比 $\Sigma (n_i)_{\sigma_a > \sigma_w} / \Sigma n_i = a$ を求め, このときの累積繰返し数比 $\Sigma (n_i/N_i)$ との関係を図示したものが図 11 である。

なお, 図 11 には, 筆者らの一人が行なった実験結果⁽¹³⁾を“●”印で, また河本らの行なった実験結果⁽¹³⁴⁾を“○”印で併記した。

かなりのばらつきがあるが, $\Sigma (n_i/N_i)$ と a の間には, ほぼ直線 A B のごとき関係が認められる。

図 11 を用いて, a が求められれば $\Sigma (n_i/N_i)$ すなわち k'' が求められるので, $\Sigma (n/N)=1$ として計算した場合の寿命を修正する。

ここで提案した二つの方法は, いずれも現段階における便宜的な寿命計算方法であり, k' および k'' の値についても, 今後検討を必要とする点が多く, 一つの試算に過ぎないが, 今後の資料の蓄積により, 修正を加えていくことが必要である。

4. あとがき

多くの疲れ試験と応力ひん度, 応力波形, 材料の疲れ強さのばらつきなどに関する資料を求め, また, 疲れ強さに影響を与えると考えられる多くの因子とその相互関係についての資料を求めた上で, 実働荷重下における実物, 特に大形部材の疲れ寿命を求めることが

理想であるが、實際上、これらの多くの問題についての資料を完全に求めることは、短時日のうちには不可能と考えられる。

したがって、これらの資料が整備される前の簡便的な寿命の算出法として、多くの実例から次のような方法を提案した。

1) 室内における単純な疲れ試験を行なって求めた基本の $S-N$ 曲線の S の値を $1/k'$ 倍して $S-N$ 曲線を修正し、その $(1/k')S-N$ 曲線を用いて、応力ひん度と直線被害則に従って、寿命計算を行なう方法。 k' の値としては (2~3) を用いる。

2) 室内における単純な疲れ試験を行なって求めた $S-N$ 曲線と応力ひん度から、直線被害則を用いて計算した寿命を k'' 倍して実際の寿命を求める方法。 k'' の値としては (0.01~0.001) を用いる場合と、応力ひん度分布と $S-N$ 曲線の関係から、図 11 を用いて求めた値を用いる場合がある。

終わりにのぞみ、実験の遂行および本稿をまとめるにあたり、ご援助をえた前鉄道技術研究所車両構造研究室長吉峯鼎氏、川崎重工業会社、前船舶研究室長渡辺四郎氏および文献に引用させていただいた関係各位に深く感謝いたします。

文 献

- (1) 国尾・萩原, 機械学会講演論文集, No. 198 (昭 43-9), 75.
- (2) 青木・ほか 2 名, 材料, 15-149 (昭 41-2), 95.
- (3) 青木・ほか 2 名, 機械学会論文集, 32-244 (昭 41-12), 1762.
- (4) 青木・ほか 5 名, 機械学会論文集, 34-267 (昭 43-11), 1854.
- (5) 清水・ほか 3 名, 機械学会論文集, 31-230 (昭 40-10), 1454.
- (6) 萩原・ほか 4 名, 機械学会論文集, 34-260 (昭 43-4), 596.
- (7) 萩原・ほか 3 名, 機械学会論文集, 34-264 (昭 43-8), 1356.
- (8) 青木・ほか 2 名, 機械学会講演論文集, No. 198 (昭 43-9), 79.
- (9) 青木・ほか 2 名, 機械学会論文集, 34-267 (昭 43-11), 1863.
- (10) 清水・ほか 3 名, 機械学会論文集, 30-215 (昭 39-7), 780.
- (11) 萩原・ほか 3 名, 機械学会論文集, 34-264 (昭 43-12), 2083.
- (12) 青木・ほか 3 名, 材料, 14-146 (昭 40-11), 892.
- (13) 中村・堀川, 機械学会北陸信越支部講演会講演論文集, No. 5-1 (昭 43-9), 17.
- (14) 青木・ほか 3 名, 機械学会論文集, 31-222 (昭 40-2), 187.
- (15) 村木・ほか 3 名, 機械学会講演前副集, No. 161 (昭 41-10), 81.
- (16) 村木・ほか 5 名, 機械学会論文集, 35-271 (昭 44-3), 512.
- (17) 国尾・ほか 4 名, 機械学会東海支部第 17 期講演会講演論文集, (昭 43-3), 109.
- (18) 中村・初野, 機械学会論文集, 33-256 (昭 42-12), 1893.
- (19) 萩原・ほか 3 名, 機械学会論文集, 35-271 (昭 44-3), 519.
- (20) 中村・ほか 2 名, 材料試験, 10-99 (昭 36-12), 972.
- (21) 中村・ほか 3 名, 材料試験, 10-99 (昭 36-12), 1032.
- (22) 中村・初野, 材料, 16-165 (昭 42-6), 420.
- (23) 中村・田中, 機械学会論文集, 33-256 (昭 42-12), 1902.
- (24) 中村・田中, 機械学会論文集, 35-269 (昭 44-1), 16.
- (25) 田中・ほか 4 名, 鉄道技術研究所速報, 68-1006 (昭 43-1).
- (26) 中村, 川崎技報, No. 33 (昭 43-10), 47.
- (27) 中村・ほか 2 名, 機械学会論文集, 35-278 (昭 44-10), 2012.
- (28) 恒成・中村, 機械学会関西支部第 221 回講演会講演論文集, (昭 43-11), 34.
- (29) H. Nakamura・ほか 3 名, *Proc. of 12th Jap. Cong. on Test. Mat.*, (昭 44-3), 69.
- (30) 田中・ほか 2 名, 未公表.
- (31) 中村・田中, 機械学会論文集, 32-244 (昭 41-12), 1755.
- (32) 鉄道技術研究所客貨車研究室, 鉄研中間報告, No. 60 (昭 27-1).
- (33) 鉄道技術研究所客貨車研究室, 鉄研依頼試験報告, 3-88 (昭 28-1).
- (34) 中村・ほか 2 名, 機械学会第 30 期定期総会講演会講演前副集, (昭 28-4), 25.
- (35) 鉄道技術研究所客貨車研究室, JREA 試験概要報告, (昭 28-8).
- (36) 中村・ほか 2 名, 鉄道技術研究所中間報告, 3-88 (昭 28-10).
- (37) 中村, 機械学会第 58 回講習会教材, (昭 28-10), 92.
- (38) T. Miki・ほか 2 名, *Bull. of RTRI* (Eng. Edit.) No. 1, (1955-5).
- (39) 鉄道技術研究所客貨車研究室・川崎車両会社技術部, 試験報告 (昭 29-2), “西鉄北九州線台車動的試験速報”.
- (40) 鉄道技術研究所客貨車研究室・汽車製造会社技術部, 試験報告 (昭 29-4), “P-6 台車試験報告 (第 1 次)”.
- (41) 鉄道技術研究所客貨車研究室・東急車両会社, 試験報告, (昭 29-11), “YS 台車応力測定結果”.
- (42) 鉄道技術研究所客貨車研究室・汽車製造会社技術部, 試験報告 (昭 29-11), “P-6 台車試験結果報告 (第 2 次)”.
- (43) 中村・ほか, 鉄道技術研究所完了報告, No. 5-172 (昭 30-3).
- (44) 鉄道技術研究所客貨車研究室・汽車製造会社大阪製作所技術部 KSK 技報, 4-2 (昭 30-4), 5.
- (45) 鉄道技術研究所客貨車研究室, 鉄研依頼試験報告, No. 6-94 (昭 30-10).
- (46) 中村・小西, 鉄道技術研究所依頼試験報告, No. 7-14 (昭 31-3).
- (47) 鉄道技術研究所客貨車研究室, 鉄研依頼試験報告, No. 6-164 (昭 31-3).
- (48) 中村(和)・ほか 2 名, 鉄道業務研究資料, No. 13-11 (昭 31-6).
- (49) 藤田・ほか 2 名, 鉄道技術研究所中間報告, No. 7-179 (昭 32-1).
- (50) 鉄道技術研究所客貨車研究室, 鉄研依頼試験報告, No. 57-117 (昭 32-9).
- (51) 鉄道技術研究所客貨車研究室, 鉄研依頼試験報告, No. 8-40 (昭 32-4).
- (52) 鉄道技術研究所車両構造研究室, 鉄研速報, No. 58-17 (昭 33-1).
- (53) 鉄道技術研究所車両構造研究室, 近畿車両会社, 試験報告, (昭 33-2), “小田急電鉄 KD-17 台車静荷重試験報告”.
- (54) 鉄道技術研究所車両構造研究室, 鉄研速報, No. 58-32 (昭 33-2).
- (55) 中村・小西, 材料試験, 7-55 (昭 33-4), 188.
- (56) 鉄道技術研究所車両構造研究室, 鉄研速報, No. 58-99 (昭 33-6).
- (57) 鉄道技術研究所車両構造研究室, 鉄研速報, No. 58-108 (昭 33-6).
- (58) 鉄道技術研究所車両構造研究室, 鉄研速報, No. 58-134 (昭 33-7).
- (59) 鉄道技術研究所車両構造研究室, 鉄研速報, No. 58-211 (昭 33-9).
- (60) 中村・ほか 2 名, 機械学会誌, 61-478 (昭 33-11), 1367.
- (61) 小西・中村, 機械学会論文集, 25-151 (昭 34-3), 221.
- (62) 中村, ばね論文集, No. 5 (昭 34-3), 134.
- (63) 中村・ほか 6 名, 機械学会論文集, 25-155 (昭 34-7), 695.
- (64) 中村, 材料試験協会座談会資料, (昭 34-5), 32.
- (65) 鉄道技術研究所車両構造研究室, 鉄研速報, No. 59-79 (昭 34-3).
- (66) 鉄道技術研究所車両構造研究室, 鉄研速報, No. 59-158 (昭 34-5).
- (67) 鉄道技術研究所車両構造研究室, 鉄研速報, No. 59-125 (昭 34-4).
- (68) 中村・ほか 3 名, 東海道新幹線に関する研究, 第 1 冊, (昭 35-4).
- (69) 中村, 機械学会誌, 64-513 (昭 36-10), 1419.
- (70) 中村・ほか 3 名, 東海道新幹線に関する研究, 第 2 冊, (昭 36-4), 138, 143, 153, 163.

- (71) 中村, 運転協会誌, 4-3 (昭 37-3), 106.
 (72) 中村・甘粕, 材料試験講演前刷集, (昭 37-5), 27.
 (73) 中村・ほか, 東海道新幹線に関する研究, 第3冊, (昭 37-4), 191.
 (74) R. Nakamura・ほか2名, *4th Int. Conf on Non-Destructive Testing*, (昭 38-9), 120.
 (75) 中村・ほか, 東海道新幹線に関する研究, 第4冊, (昭 38-4), 164, 171, 184, 190, 177, 182.
 (76) 中村・ほか, 東海道新幹線に関する研究, 第5冊, (昭 39-4), 274, 281, 284, 289, 297.
 (77) 中村・ほか2名, 機械学会論文集, 31-222 (昭 40-2), 202.
 (78) 中村, 鉄道技術研究所講演会前刷, (昭 40-12).
 (79) 中村・ほか, 東海道新幹線に関する研究, 第6冊, (昭 40-4), 156, 173, 177.
 (80) 中村・田中, 機械設計, 10-6 (昭 41-5), 34.
 (81) 中村・ほか2名, 鉄道技術研究所速報, No. 66-104 (昭 41-6).
 (82) 中村・田中, 鉄道技術研究所速報, No. 66-150 (昭 41-9).
 (83) 中村, 材料, 16-161 (昭 42-2), 71.
 (84) 中村, 材料, 16-162 (昭 42-3), 137.
 (85) 中村・ほか3名, 高速鉄道の研究, (昭 42-3), 204, 鉄道技術研究所.
 (86) 松井・ほか2名, 高速鉄道の研究, (昭 42-3), 253, 鉄道技術研究所.
 (87) 中村・ほか3名, 機械学会論文集, 33-251 (昭 42-7), 1027.
 (88) 中村・ほか2名, 材料, 17-173 (昭 43-2), 89.
 (89) 中村・ほか2名, 機械学会論文集, 34-268 (昭 43-12), 2074.
 (90) 中村・ほか3名, 機械学会論文集, 35-277 (昭 44-9), 1847.
 (91) 中村, 鉄道工場, No. 146 (昭 37-11), 11.
 (92) 中村・初野, 鉄道技術研究報告, No. 424 (昭 39-8).
 (93) 中村, 鉄道技術研究所速報, No. 64-325 (昭 39-12).
 (94) 材料学会疲労部門委員会, 金属の疲労, (昭 39-6), 190, 363, 丸善.
 (95) 中村, 機械学会第252回講習会教材, (昭 41-3), 65.
 (96) たとえば, 中沢・中村, 軸と軸接手の設計, (昭 41-9), オーム社.
 (97) 中村, 鉄道技術研究資料, 24-12 (昭 42-12), 46.
 (98) 中村, JREA 研究報告書, (昭 43-3), 72.
 (99) 中村, 車軸折損事故防止対策委員会資料, (昭 24-2).
 (100) 中村, 材料試験, 5-28 (昭 31-1), 46.
 (101) 中村, 高周波技報, (昭 25-8), 1.
 (102) 中村, 鉄道業務研究資料, 8-18 (昭 26-11), 1.
 (103) 永島・ほか5名, 材料試験協会講演会, (昭 29-5).
 (104) H. Nakamura・ほか2名, *Bull. of RTRI*, Engl. Edit. 4, (昭 32-4).
 (105) 中村, 日本金属学会第3回金属材料の強度および疲労シンポジウム資料, (昭 33-4), 12.
 (106) 中村, 機械学会誌, 61-476 (昭 33-9), 1018.
 (107) 中村・ほか2名, 機械学会論文集, 24-147 (昭 33-11), 804.
 (108) 中村・ほか4名, 機械学会論文集, 25-151 (昭 34-3), 214.
 (109) 中村, 鉄道技術研究報告, No. 82 (昭 34-7).
 (110) 中村・ほか3名, 機械学会論文集, 26-161 (昭 35-1), 91.
 (111) 機械学会誌, 63-502 (昭 35-11), 1525.
 (112) 機械学会誌, 63-502 (昭 35-11), 1540.
 (113) 中村・ほか2名, 機械学会論文集, 27-173 (昭 36-1), 47.
 (114) 中村・ほか2名, 機械学会論文集, 27-173 (昭 36-1), 54.
 (115) 中村, 機械学会誌, 64-510 (昭 36-7), 1042.
 (116) 中村, 機械学会誌, 64-510 (昭 36-7), 1054.
 (117) 中村, 日刊工業新聞社講習会資料, (昭 36-12).
 (118) 中村, 金属学会第6回金属材料の強度と疲労シンポジウム資料, (昭 36-4), 83.
 (119) 中村・小田, 住友金属工業中央研究所資料, No. 103 (昭 37-1).
 (120) 中村, 高周波焼入と疲労強度, (昭 38-1), 日刊工業新聞社.
 (121) 中村・甘粕, 機械学会論文集, 29-200 (昭 38-4), 719.
 (122) 中村・ほか2名, 機械学会論文集, 31-230 (昭 40-10), 1447.
 (123) 中村・ほか4名, 機械学会論文集, 34-268 (昭 43-12), 2092.
 (124) 田中・ほか3名, 機械学会講演論文集, No. 188 (昭 43-4), 185.
 (125) H. Nakamura & S. Tanaka, *Q.R. of RTRI*, 8-2 (昭 42-7), 1.
 (126) 田中・ほか4名, 機械学会講演論文集, No. 195 (昭 43-8), 57.
 (127) 中村, 鉄道業務研究資料, 8-9 (昭 26-4), 4.
 (128) 中村, 鉄道業務研究資料, 8-9 (昭 26-4), 7.
 (129) 中村, 機械学会論文集, 18-75 (昭 27), 64.
 (130) 中村・ほか2名, 材料試験, 7-63 (昭 33-12), 647, および住友金属工業資料, 未公表.
 (131) 北川・ほか3名, 材料試験, 11-111 (昭 37-12), 762.
 (132) 砂本・遠藤, 材料, 17-173 (昭 43-2), 128.
 (133) 川田・三沢, 材料, 17-173 (昭 43-2), 123.
 (134) 河本・ほか2名, 材料, 17-173 (昭 43-2), 97.
 (135) 中村・ほか2名, 機械学会講演論文集, No. 203 (昭 44-4), 277.
 (136) 中村・ほか3名, 機械学会関西支部第222回講演会講演論文集, No. 45-1 (昭 44-6), 31.