

慣性モーメントを考慮したグランドアクションのタッチ調整

パート2：どのように慣性モーメントを調整できるのか、その可能性と限界

オーストラレージアンピアノ調律技術者協会ニュージーランド支部ARPT会員 中村祐司

これはピアノテクニシャンズジャーナル2014年10月号に掲載された論文を著者自身が日本語訳したものです。

パート1は、あるスタインウェイのD型の中央のC音の慣性モーメント値を計算したところで終わりました。その計算をあらためて書き写してみましょう。

- ハンマー自体の慣性モーメント値は $HSW \times L^2$ で求められるので、 $10.9 \text{ g} \times 13^2$ でした。鍵盤とハンマーのギアレシオ θ_H/θ_K は10.5でしたので、鍵盤手前で感じるハンマー由来の慣性モーメント値は202,577 gcm^2 でした。
- ウイペン自体の慣性モーメントは756 gcm^2 で鍵盤とウイペンのギアレシオ θ_W/θ_K は2.14でした。ですから鍵盤手前で感じるウイペン由来の慣性モーメント値は4,332 gcm^2 でした。
- 鍵盤の慣性モーメントは50,463 gcm^2 と計算されました。
- そこで以上の3つの部品の値を合計するとこの音のアクションは鍵盤手前で257,311 gcm^2 となったのでした。

上記の計算から得られた値により、鍵盤手前で感じる慣性モーメント値の中で、アクションを構成する3つの主要部品であるハンマー、ウイペン、そして鍵盤の中で、ハンマーによる値が一番大きいということがわかります。

しかし、現実を考えてみるとハンマーはかなり小さく、その質量を調整できる幅はかなり少ないことに気づきます。通常のようにハンマーの側面やテール面などが加工されてあるハンマーウッド部はそれ以上の加工をできる幅がとて小さいので、軽くするにしても重くするにしても、調整範囲としてはそれぞれ最大で1g程度が限界です。より多く減量するためにテールや側面をぎりぎりまで削ったり、ウッド部に穴を開けたりしてもたかが知れています。ハンマーを重くするにしても、専用鉛を入れるなどの方法がありますが、それを入れるためのスペースはかなり限られています。

もちろん、ハンマー(HSW)1gの調整は慣性モーメントに換算するとかなりの量になります。たとえば例で挙げたハンマーの重さを1g減らすと仮定すると、鍵盤手前において18,632 gcm^2 ($1\text{g} \times 13^2 \times 10.5^2$) 慣性モーメントを減らすこととなります。約10%の慣性モーメント減量に結びつくわけです。ちなみに、もうひとつのタッチを決める要素であるバランスウエイトもアクションストライクレシオを5.5とした場合、ハンマー1gの減量は5.5gの軽量化につながります

このHSWで1gという数値はタッチを軽くするには十分なものです。単純に言えば、ハンマーを1g軽くすればタッチが重いという問題は解決することができます。ただ、ハンマーの軽量化に関しては別の角度からも考察が必要です。一つは音色の問題です。もしハンマーの質量が大きく減らされると、十分な音量や音色が得られなくなる可能性があります。もう一つはハンマーストライクウエイトの、一台の中でのつながりを考えねばならないというポイントです。スタンウッド氏が提唱している通り、滑らかに調整されたハンマーストライクウエイトはタッチの均一さと共に音色の揃いも得ることができます。

この事実を考慮に入れると、現実的なハンマーの質量調整は最大でも0.7gくらいの幅しかありません。一台の中でいくつかのハンマーでは0.7gの減量をすることができても、ハンマーストライクウエイトの目標値に近いハンマーでは0.2gしか減量できないということが良くあります。なお、この調整範囲を鍵盤での慣性モーメント値で見ると3,700 gcm²から11,200 gcm²になります。

それに比べると鍵盤は固有の慣性モーメントは大きいものの、他の部品を通じて伝わるわけではないので相対的に鍵盤手前での慣性モーメント値への影響は少なくなっています。しかし鍵盤はアクション部品の中ではかなりその体積が大きく、比較的簡単に重さの調整ができるメリットがあります。たとえば後述の例で最小慣性モーメント値の計算を見ていただければわかる通り、約9,200 gcm²の削減が可能です(図版12)。この数値は慣性モーメントの調整としてはハンマーの質量調整0.5gに匹敵する有益なものと言ってよいでしょう。

ワイペンの重さの調整はバランスウエイトや慣性モーメント双方にとって効果的な数値は得られませんので、ここでの議論には含めません。

図版8にスタインウェイD型の中央のC音のタッチ改良を例示しました。この例ではハンマーの質量を0.4g減量し、バランスパンチングの加工によってアクションストライクレシオを0.4減らしています。そしてバランスウエイトを40gから38gに5%減らします。鍵盤手前での慣性モーメント値は8%減らすことができます。そのうち7.2%はハンマーの減量から、2.7%は鍵盤の鉛調整から効果を得ています。

8%少ない慣性モーメントと5%小さいバランスウエイトで、この音は改造後にタッチがかなり軽く感じられるであろうことが見込めるわけです。

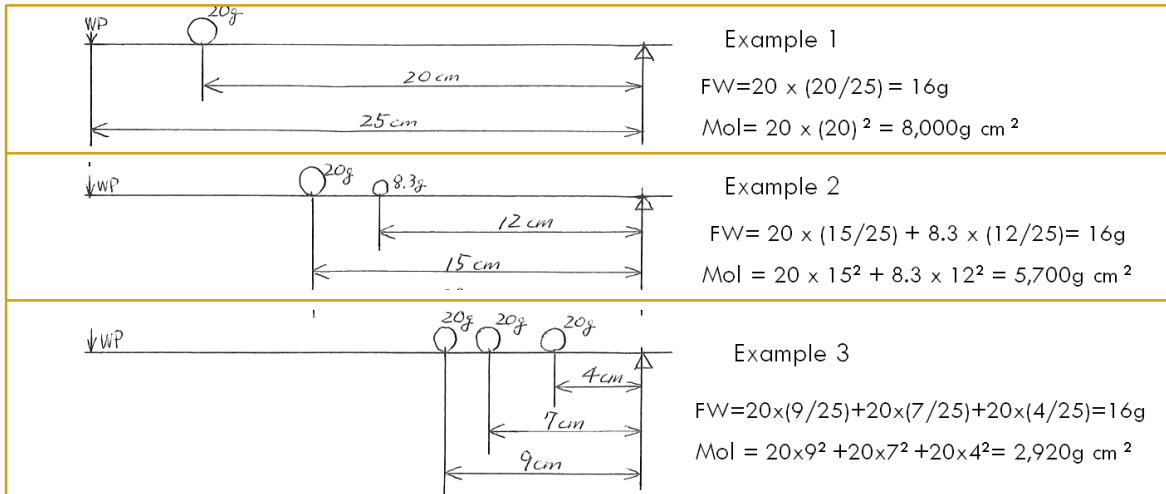
Mol values, original and after modification										
		Moment of Inertia values						contribution at key from		
		Hammer	Hammer at key	Wippen	Wippen at key	Key	Whole action at key	Hammer	Whippen	Key
Predicted Mol after modification		1,775	187,516	756	4,162	44,657	236,336	15,061	169	5,745
% deducted from original		4%		0%		11%	8%	72%	1%	27%
Original Mol (gcm ²)		1,842	202,577	756	4,332	50,403	257,311			
Hammer Strike Weight	original	10.9 grams								
	after modified	10.5 grams								
Hammer distance (cm)	original	13.0 cm								
L_{ko} : the distance between the pivot of the key and the top of the capstan screw										
		15.2 cm		14.9 cm (after cutting punching cloth)						
L_{wi} : the distance between the pivot of the wippen and the center bottom of the wippen heel										
		6.35 cm								
L_{wo} : the distance between pivot of the wippen and the contact point, jack to hammer knuckle										
		9.2 cm								
L_{hi} : the distance between contact point, the knuckle to jack and the pivot of the shank flange										
		2.1 cm								

(図版8) ハンマーの軽量化と鍵盤鉛調整によって慣性モーメント値とバランスウエイト値を共に減らすことができる。

中村フロントウエイト計算表と慣性モーメント計算表

私のやり方には2つメリットがあります。一つは一般的な技術者でも使える技術であるということです。実験をしないと測定できないのではなく、こつこつと重さを量り長さを測ることによって求めることができます。特別な機器や知識を必要とせず、多少の初等数学の知識と表計算ソフトの使い方を知っていれば使いこなしてその恩恵を受けることができます。

もう一つはスタンウッズの公式と合わせて使うことによってアクションの改善点をあぶり出し、改良した場合の想定される結果を作業前に確認できることです。下記の図版11, 12, 13に示した計算表で、静的平衡状態(バランスウエイト)と動的抵抗(慣性モーメント)を連動させながら、求めるタッチの状態をシミュレーションすることができます。それでは、具体的にどのようにやるのか見ていきましょう。



- WP: Weighting Position i.e. 13 mm from front edge of the key.
- FW=Mass of lead x (L to lead)/(L to WP)

(図版 9) 異なる鍵盤鉛の位置でフロントウエイトと慣性モーメント値がどのように変わるのか。

鍵盤鉛の位置によってフロントウエイトと慣性モーメント値は変化します。図版 9 を見てください。3 つの違うパターンで鍵盤鉛を入れた鍵盤モデルが書かれています。シンプルに考えるため鍵盤自体には重さがないと仮定します。この例 3 つともフロントウエイトは同じ 16 g ですが、慣性モーメントの値はそれぞれ違っています。

フロントウエイトは鉛の重さに（支点と鉛の距離÷支点とウエイト測定点）の値を掛けて出すことができます。たとえば例 1 では比較的鍵盤の端に近い 20 cm のところに一つ鉛があって、その重さ 20 g はウエイト測定点では $20 \times (20 \div 25) = 16 \text{ g}$ に感じるというわけです。この場合の慣性モーメントは $20 \times (20)^2 = 8,000 \text{ gcm}^2$ となります。

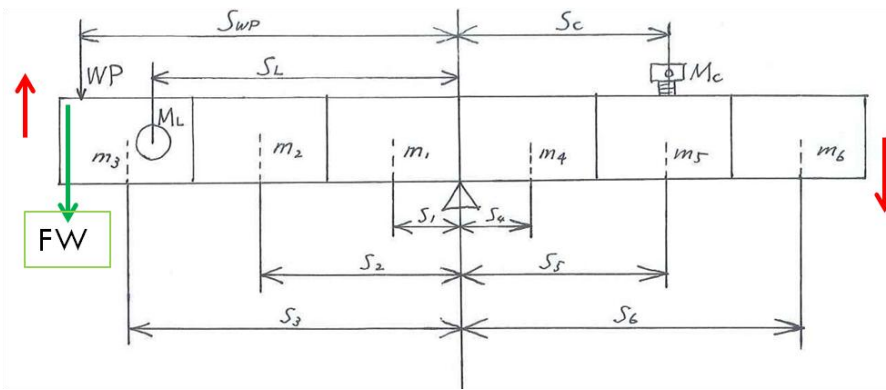
例 2 では、比較的中央に近いところに大小 1 つずつの鉛があり、フロントウエイトは 16 g です。慣性モーメントは $5,700 \text{ gcm}^2$ となります。フロントウエイトが同じながら、例 1 よりも慣性モーメント値が 29% 少なくなっています。

例 3 はバランス位置に近いところに大きな鉛 3 つがあって、やはりフロントウエイトが 16 g です。慣性モーメントは $2,920 \text{ gcm}^2$ で、例 1 に比べて 64% も減らすことができました。

タッチの感じ方は同じフロントウエイトであっても、鉛の入り方で異なります。上記例 3 の鍵盤は鍵盤の質量は重いものの慣性モーメント値が小さいので、例 1 の鍵盤より軽く動くように感じます。

実際の鍵盤では、鍵盤の後ろの重さも考慮に入れなければなりません。後ろ側の重さは手前側を持ち上げようとする力を与えますので、フロントウエイトを軽くします（図版 10）。しかし、慣性モーメントは鍵盤全体がその支点を中心に、どのように回転運動に抵抗を与えるかを示しますので、鍵盤の後ろ側もその値の一部と計算されます。

私の作成した慣性モーメント計算表からは、慣性モーメントと同時にフロントウエイトを求めることが可能です。



Mass of back side decreases Front Weight

(図版 1 0) 単純化した鍵盤のモデルで鍵盤後ろの重さがどのように鍵盤手前に働くかを示す。

図版 1 1 にフロントウエイト計算表を掲げました。スタンウッド方式によって実際に測定した値が 1 列目に、慣性モーメント計算表を利用して計算した値が 2 列目に表示されています。数グラムの差がありますが、これは問題ではなく、後で説明するとおりこれを勘案してタッチのセッティングに算入していきます。

Nakamura Front Weight spread sheet										
	40	C4	measured original FW	28.9						
A	40	C4	calculated original FW	26.7	front	49.4	back	22.7	difference	2.2
B			least inertia with new FW	22.7	front	45.4	back	22.7	desired FW	22.7
C			practical setting with new FW	22.7	front	45.4	back	22.7	desired FW	22.7
D			key stick only FW	5.8	front	28.5	back	22.7		

(図版 1 1) 中村フロントウエイト計算表

6、スタンウッドの公式計算表と 3 つの中村計算表を利用してアクションを調べる

私の開発したフロントウエイト計算表 (図版 1 1) と慣性モーメント計算表 (図版 1 3)、そしてスタンウッドの公式計算表 (図版 1 2) を利用してタッチを調べると、その状況に応じた可能な作業を想定してコンピュータ内でセッティングしてみることが可能です。静的な平衡の様子と動的なタッチの抵抗を同時に把握できるので、より広い視野でタッチをセットアップすることができるのです。

具体的に説明するため例をあげてみます。あるホールのコンサートピアノのタッチを変更した作業で、単純にするために中央の C 音のみのデータで説明しています。事前のタッチウエイトはダウンウエイトアップウエイト共にスタインウェイの基準値にほぼ適合していたものの、もうちょっと軽くして欲しい、もうちょっと動きを軽快にして欲しい、との要望でしたので、目標を「バランスウエイトと慣性モーメントの両方をバランス良く下げる」と設定しました。

まず、スタンウッドの公式計算表を使って検討します (図版 1 2)。

Stanwood Equation spread sheet																
				Front (BW+FW)					=	Back (WBW+HSWxR)					FW	HSW
Key #	Note	details specified	DW	UW	BW	F	FW		KR	WW	WBW	HSW	R	ceiling	index	
a	40	C4	original	51	29	40.0	11.0	28.9		0.53	17.1	9.06	10.9	5.49	30.0	#10
b			possible HSW adjustment	49	27	38.0	11.0	28.9		0.53	17.1	9.06	10.5	5.51		#9
c			possible punching cut	45	23	34.0	11.0	28.9		0.53	17.7	9.38	10.5	5.10		
d			possible releading	49	27	38.0	11.0	24.9		0.53	17.7	9.38	10.5	5.10		

(図版 1 2) スタンウッドの公式計算表 (スタンウッド、2000年)

この表を使ってハンマーストライクウエイト、ストライクレシオ、そしてバランスウエイトを変更したときの効果がわかります。

a 列には作業前のデータが入力してあります。ダウンウエイトが51 g、アップウエイトが29 g、バランスウエイトが40 g、フリクションは11 g、フロントウエイト28.9 gなどとなっています。このフロントウエイト値はスタンウッドによるフロントウエイトシーリング値(30 g)よりも小さい状態です。

私は次のような順番で何ができるか考えていきます。

1、ハンマーの重さを0.4 g減らしてみるとバランスウエイトは約2 g軽くなるはず(0.4 g × 5.5)。ハンマーの重さの調整はバランスウエイトにしか影響を及ぼしません。計算表の中では、バランスウエイトがダウンウエイトとアップウエイトによって自動的に計算されるようになっていきますので、フリクションとストライクレシオを変えないようにそれらの数値を変えます。

2、次にもう少し軽くするためにストライクウエイトを小さくしてみます。ここではスタンウッドの提案するバランスパンチングクロスを半分に切ってバランスピンの奥側に置く、という方法を行うことにします。このやり方はかなり一般的に行われるようになってきました。先の方法と同じくダウンウエイトとアップウエイトの数値を変えて、ストライクレシオが0.4下がるようにします。もちろん他の数値は変わりません。

3、上記1と2の作業でバランスウエイトを34 gに下げることができました。これは目標値よりも下がりすぎですが、次の鍵盤鉛調整による慣性モーメント調整につなげるための作戦です。鍵盤鉛調整はスタンウッドの平衡等式の左側の2つの数値、すなわちバランスウエイトとフロントウエイトの関係を变える操作です。鍵盤鉛調整をする際には、ハンマーもウイペンもストライクレシオも変化しません。ですから公式の右辺は変化しないのです。もし、鍵盤鉛を鍵盤手前に入れると、同じ量だけバランスウエイトは減り、フロントウエイトが増えます。逆に鍵盤鉛を手前から抜くとやはり同じ量だけバランスウエイトが増し、フロントウエイトが減ります。

これらの調整で24.9 gのフロントウエイトを達成できました。スタンウッドの平衡等式を使うことによって実際にアクションや鍵盤を加工しなくともこれらのことがわかるのです。

慣性モーメントの分析

もう一度フロントウエイト計算表(図版11)を見てください。先述の通りその1列目には実際に測定したフロントウエイト28.9 gが表示されています。2列目には慣性モーメント計算表で計算されたフロントウエイト値26.7 gが表示されています。これからこの差、2.2 gを算入しながら考えていきます。

我々の想定するフロントウエイトは24.9 gでしたので、計算表から求められるであろうフロントウエイトは22.7 gであることが見込まれます。(22.7 + 2.2 = 24.9)

フロントウエイト計算表のB列とC列には図版13に示した慣性モーメント計算表のB列とC列からそれぞれ計算されたフロントウエイトが表示されています。BとCのセッティング例ではそれぞれ異なる鉛入れのパターンを持っています。

まずB列は最小の慣性モーメントを狙った鉛入れの配置です。大きい鉛をバランスピンに近めに3つ入れています。この配置でフロントウエイト22.7 gが達成され、鍵盤の慣性モーメント値は41,200 gcm²になりました。この例の計算では慣性モーメントを18%削減しながら24.9 gのフロントウエイトを達成しています。

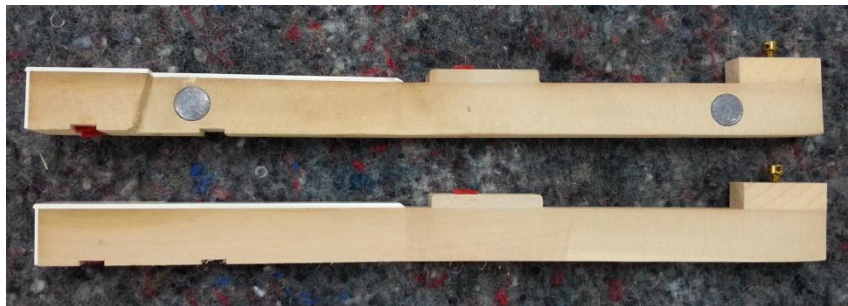
もう一つの例がC列です。これは実際の作業で最も現実的・効果的な鉛入れの配置です。一番外側にあった鉛を抜き、バランスピン近くに入れ直す方法です。この例でもフロントウエイト24.9 gを達成しながら鍵盤の慣性モーメント値を11%削減できます。

	Key #	Note	Status	Whole Inertia	FW point dstnc	Center of torque	CoG position ratio	Lead (front)											
								distance #5 (mm)	mass of lead	distance #4 (mm)	mass of lead	distance #3 (mm)	mass of lead	distance #2 (mm)	mass of lead	distance #1 (mm)	mass of lead		
A	40	C4	Original	50403	292	222.8	0.731	244	14.5	220	8.6	157	4.3						
B			least inertia	41181	292	84.7	0.278					119	19.4	85	19.4	50	19.4		
C			practical setting	44657	292	152.8	0.501			220	8.6	157	4.3	122	19.4				
D			key stick only	36548	292														

(図版13) 中村慣性モーメント(鍵盤)計算表

このように、これらの計算表を活用することにより、アクションの加工をする前にその効果を知ることができます。

これと同じ考え方をを使うとアップライトのタッチ改善にも役立たせることができます。たとえば、タッチを重くして欲しいと頼まれた場合、鍵盤のバランスピンから前後等距離に同じ鉛を入れることによって、タッチウエイトを変えずに慣性モーメントだけを大きくしてその要望を満足させることができます。図版14で示した例では大きな鉛を前後に入れてあります。このアイデア自体は特に新しいものではなく、これまでも複数のピアノ製造会社に取り入れています。しかし私の計算表を使いますと、慣性モーメントを何%重くする、という微調整が可能になるのです。たとえば下の例ではバランスウエイトやダウンウエイト・アップウエイトは変化しませんが、慣性モーメントが93%大きくなります。もちろん、鉛の大きさとバランスピンからの距離を変えることによって自在にその重さの感じを調整できます(図版15)。



(図版14) 慣性モーメントを増やすために鉛を両側に入れた鍵盤(上)

Mol calculating spread sheet				Kawai K30 E (upright)																				
key #	Note	Lead (front)		Wood (front)				Key top		Wood (back)					Capstn	Lead (back)		Mol						
		distance #1 (mm)	mass of lead	160~120	120~80	80~40	40~0	distance (mm)	mass (g)	0~40	40~80	80~120	120~160	160~200	distance capstan mm	distance #1 (mm)	mass of lead	front	back	Whole key g cm2				
40	C4			5.9	4.6	4.6	5.6	132	8.3	6.3	4.3	4.3	6.4	0.8	144.0			3251	2725	5976				
		120	19.4	5.9	4.6	4.6	5.6	132	8.3	6.3	4.3	4.3	6.4	0.8	144.0	120.0	19.4	6044	5519	11563				
		additional lead																		additional lead				

(図版15) 増やしたい慣性モーメント値を位置と重さを変えることによって精密に設定できる。

最後になりますが、慣性モーメント(鍵盤)計算表(図版13)の中に「トルク中心位置(Center of Torque)」と「重心位置比率(CoG Position Ratio)」という項目を見つけた方も多と思います。これはフランク・エマーソン氏が発表した論文(ピアノテクニシャンズジャーナル2013年4月号)の中で提示した数値で、鍵盤鉛の重心位置を鍵盤の長さとはべた比率です。弾き手が鍵盤に与える加速度と重力の関係から、この重心が0.429のときにもっとも効果が得られるという結果を導いています。面白いことに上記図版13での鍵盤鉛の位置設定で、実際的な鉛入れ位置(C列)で彼の提示した値に近くなっています。

終わりに

スタンウッドによるアクションの分析とタッチ改良法は、われわれピアノ技術者のアクションの理解を非常に大きく広げることに貢献しました。私の提示したやり方がそれを一層広げていくことを期待しています。特に慣性モーメントに関する技術はスタンウッドのやり方と融合させますとより大きくアクションを改善することに役立ちます。多くの技術者がこの技術をそれぞれの仕事の中で生かしていただけるものと考えています。なお、このやり方はアップライトピアノにも応用できます。

私のやり方は難しい数学や物理学の知識を必要としません。ある程度の基礎知識はさすがに必要ですが、やり方を学ぶことは難しいことではありません。この論文で紹介した計算表は必要な方には無料で差し上げています。興味のある方は yuji3804@gmail.com までご連絡ください。

(著者日本語訳注：また、文章中でも紹介した通り、私のブログ (<http://yujipiano.blogspot.co.nz/>) ではもっと基本的なことからスタンウッド方式の詳細を説明しています。シドニーで行った講演のスライドショーなども含めて載せていますので、参考にしてください。)

参考文献一覧

- Emerson, G. (April 2013). Inertia in the Grand Action: Optimal Placement of the Front Key Weight. *Piano Technicians Journal*, 26 - 28.
- Garee, A., & Marinelli, B. (n.d.). Action Touch Design. *Australasian Piano Tuners and technicians Convention 2011 Wellington, New Zealand*.
- Garee, A., & Marinelli, R. (n.d.). Downweight and Upweight Measurement. *Australasia Piano Tuners and Technicians Convention 2011 Wellington, New Zealand*.
- Hohf, B. (n.d.). Keyweights and Touch. *Australasian Piano Tuners and Technicians Convention 2011 Wellington, New Zealand*.
- Kawakita, K., & Fuji, T. (June 2006). *Design and calculation of moment of inertia for mechanical engineers*. Tokyo: Nikkan Kogyo Shinbunsha.
- Rhodes, J., & Fandrich, D. (July 2013). [Re] Creating a Touch to Die For Part 2: Inertia - The Invisible Load. *Piano Technicians Journal*, 20 - 22.
- Rhodes, J., & Fandrich, D. (September 2013). [Re] Creating a Touch to Die For Part 4: The WeightBench™ and ITF-Dip Calculator©. *Piano Technicians Journal*, 13 - 17.
- Spurlock, B. (2006). *Grand Action Touchweight, Instructional Pamphlets*. Retrieved from Spurlock Specialty Tools: http://www.spurlocktools.com/instructional_pamphlets.htm
- Stanwood, D. C. (1990, November). Factoring Friction with the Balance Weight System. *Piano Technicians Journal*.
- Stanwood, D. C. (1996). *Patent No. 5,585,582*. United States of America.
- Stanwood, D. C. (1996, June). The New Touch Weight Metrology . *Piano Technicians Journal*.
- Stanwood, D. C. (2000, April). Component Touch Weight Balancing. *Piano Technicians Journal*.

Stanwood, D. C. (2000, February). Standard Protocols of the New Touchweight Metrology. *Piano Technicians Journal*.

Stanwood, D. C. (2000, March). Through the Eyes of the New Touchweight Metrology. *Piano Technicians Journal*.

Stanwood, D. C. (2006). *The Touch Designers Tool Kit*. West Tisbury, MA, USA: Stanwood Piano Innovations Inc.