

初心者向けプレス作り入門

武井康子*・鈴木和司**

Designing and Building a Press for Beginners

Yasuko TAKEI* and Kazuji SUZUKI**

Abstract

A handy, simply-designed press was built using a geared motor and a jack. The maximum force is about 1 ton. The piston can be driven at a wide range of speeds, from 70 to 0.07 mm/min, which are selected by a rotary switch on the operation panel. Based on our own experiences, we report difficulties to be expected, mistakes to avoid, and important factors to be considered in designing and building a press, with a view to give helpful advice to beginners.

Key words : uniaxial press, geared motor, jack.

はじめに

一軸定速圧縮のできる1トンプレスを設計製作した。ほとんど経験のない初心者が、理科年表と電卓を片手に理屈のみで装置を設計し、「機械も理屈で動いてる」と「機械は理屈じゃ動かない」を同時に実感することになった。最終的には絶対に失敗のない初心者向けプレスを設計することができたが、そこに至る過程で行った様々な試行錯誤を報告する。

変形実験装置をもって名古屋大学から地震研究所に移ってきて数ヶ月経った。しかし、実験に用いる有機物試料を成形するための適当なプレスが見つからずにいた。四角い型に入れた有機物の粉を、一定速度でゆっくりと一軸圧縮して押し固めたい。速度が速すぎると、空隙がつぶれずに残ってスカスカの試料になってしまう。以前の経験から、ピストンの送りは0.2mm/分くらいのゆっくりさが適当であることが分かっていた。また、有機物の粉は比較的柔らかいので、押す力は1トンもあれば十分であることも分かっていた。しかし、地震研究所で見つけた一軸定速圧縮のできるプレスは、さらに高度な機能（二軸型の変形や封圧がかけられるなど）をもつため、かえって懐のスペース

が成型用の型を置くのに十分でないなどの困難があり、目的にあったちょうど良いものがなかなか見つけられなかった。そこで、自分で作ることにした。

でき上がったプレスとその仕様を図1と表1に示す。(1)モーター、(2)スクリュージャッキ、(3)フレキシブルカップリング、(4)フレーム、の4つのパーツからなるシンプルなものである。必要な部品図はたったの6枚。組立てにもなんのテクニックもいらない超初心者向けプレスである。本報告では、このプレスの具体的な設計と、最終的な形になる前の試行錯誤を、プロの助言を交えて述べる。

プロの助言とは何か。設計の多くの部分は初心者でも理屈のみである程度つめることができる。しかしものを作るということは、その部品を実際に手に持って、組み立て、ねじを締め、動かす、ということである。部品が重くて持ち上がらなかつたり、ドライバーの入らない位置にねじ穴を付けてしまつたり、などの初歩的なヘマから、使い勝手が悪かつたり、思わぬところに力がかかつていて壊れ易かつたり、などといったヘマを少なくするためには、設計図を眺めただけで組立の手順が一つ一つ空想でき、使い勝手や力のかかり具合までが見えることが要求される。さらに、一つ一つの部品を加工するところが空想できないと、普通の工作機械や刃物では容易に加工できないような図面を不必要に描いてしまう。実体験に乏しい初心者が設計図を見る目はしばしば節穴であり、プロの助言に何度も助けられた。

また装置を作る時には、設計と「モノ探し」とが両輪となって進む。本プレスでは、以下に述べるようにモーター

1996年1月16日受付, 1996年8月26日受理.

*地球流動破壊部門, (東京大学地震研究所).

**名古屋大学理学部装置開発室.

*Division of Gromechanics, (Earthquake Research Institute, University of Tokyo).

**Instrument Development Center of School of Science, Nagoya University.

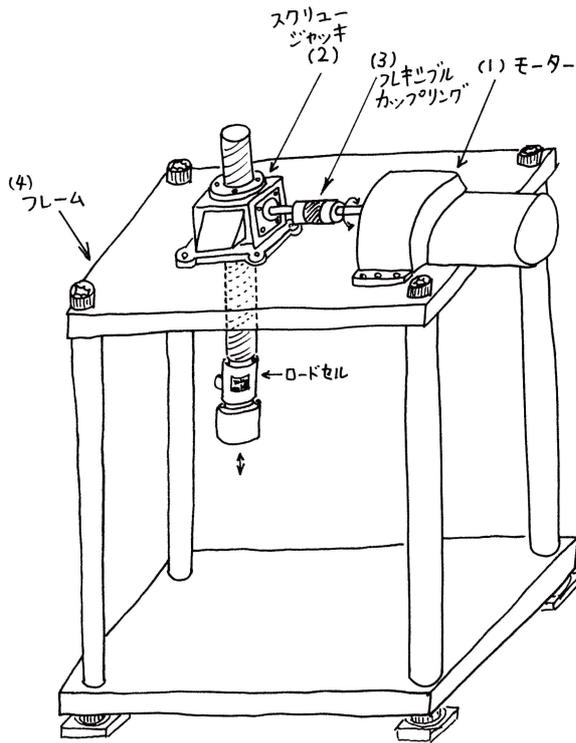


図 1. 作製した1トンプレス (仕様は表1). この絵の見どころを本報告にて説明する.

表 1. 装置の仕様

電源, 電力	3φ200V, 200W
最大推進力	1.5 tonf
ピストン速度	0.07 - 70 mm/mim
ストローク	100 mm
フレーム大きさ	400×400×550 mm
本体総重量	約 80 kg
機能	荷重上下限設定 リミットスイッチ

ピストンとなるねじ軸を1トンの推進力で動かしたい時, ジャッキの入力軸をどれくらいのトルクで回す必要があるか. ねじ軸を用いた回転運動から並進運動への変換において, トルク T が推進力 F に変換される仕組みを図3に示す. 今の場合にはさらに, 入力軸の回転をナットの回転に伝達するところにウォームギア (減速比 G) が入っているので,

$$F = 2\pi TG\eta / L \dots\dots\dots(1)$$

と書ける. L はネジ軸のピッチである. η は効率で, 摩擦などにより低下する. カタログによると, このスクリーージャッキの場合 $\eta = 0.21$ である. $G = 6, L = 5 \text{ mm}$ だから, 1トンの推進力 ($F = 10^4 \text{ N}$) を出すためにはモーターのトルクが 6.3 Nm 以上必要であるとわかる.

次に, ねじ軸を 0.2 mm/分 の速さで送りたい時, モーターの回転速度はいくつになるか. ねじ軸の送り速度を V , 入力軸の回転速度を R とすると,

$$V = RL / G \dots\dots\dots(2)$$

であるから, 0.24 rpm (rpm = 回転/分) である.

モーターというモーターのカタログを集めて仕様を眺めると, ここで計算されたトルク 6.3 Nm が非常に大きいものである. 回転速度 0.24 rpm が非常に小さいものであることが分かる. 普通, モーターは, 使用できる速度範囲がもっと速いところ (だいたい数 rpm ~ 数千 rpm の間) にあり, それより遅いところではトルクが出なかったり回転が滑らかなにならずにぎくしゃくしてしまったりする. 今の目的のように, 回転が非常に遅いところで強い力と滑らかな回転を得るには, 「減速」が必要になる. すなわち, モーター単体では安定した速度領域で回転するようにしてやり, その出力をギアによって減速して用いるのだ. 減速すれば回転の腕の長さが変わるのでその分トルクも大きくなる. 結局, 「ギア付きモーター」のカタログを集めて眺めることになった.

最終的に決めたモーターは, 200 W のサーボモーターに

とスクリーージャッキ探しが大きなポイントとなった.

モーターとスクリーージャッキ

スクリーージャッキ (図1(2)) とは, 回転運動を並進運動に変換する装置であるが, その仕掛けは「ねじ軸とナット」である. ねじ軸にナットを通し, ねじ軸をしっかり支えたままナットだけをクルクルと回すと, ナットはねじ軸を昇っていく. 逆に回すと, ナットはねじ軸を下がってくる. 今度はナットが上下方向に動かないようにして同じ高さでクルクルと回してみれば, ねじ軸の方が上下するだろう. スクリーージャッキもこの原理を用いている.

本プレスで使用したスクリーージャッキを図2に示す. このジャッキでは水平についている入力軸を回転すると, $1:6$ の減速比を持つウォームギアを介してナットの回転運動に変換される. ナットが回転すると, 上に述べた原理により中心に通してあるねじ軸が上 (または下) に運動する (ねじ軸はナットにつられて回転することがないようにあらかじめ回転止めがしてあり, 上下にのみ動けるようになっている). ねじのピッチは 5 mm , すなわちナットが1回転するとねじ軸が 5 mm 上 (または下) に動く.

スクリーージャッキの入力軸はモーターによって駆動するのだが, どれくらいのトルクが出せてどれくらいの回転速度で動けるモーターが必要か, を具体的に知らないとならぬ. モーターを選べない.

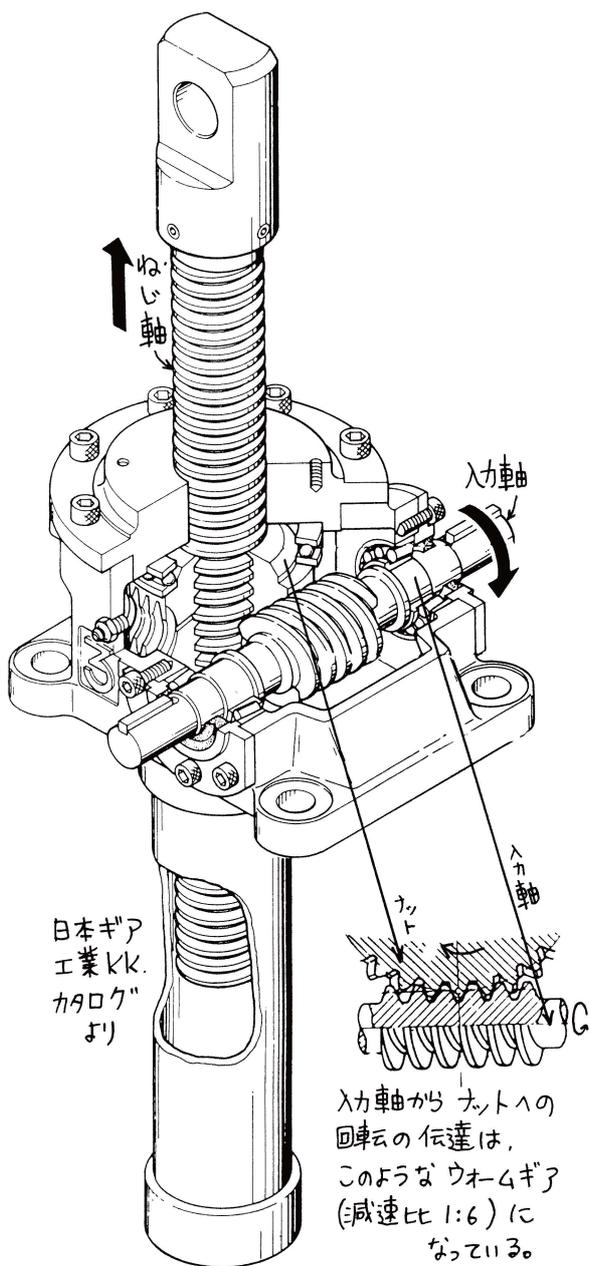


図 2. スクリュージャッキが入力軸の回転運動をねじ軸の上下運動に変換する仕組み。

30分の1のギアがついて減速してあるもの(富士電機製、一式で約27万円)である。「サーボモーター」は安定に回転できる速度範囲が大きいことが特徴で、1:1,000くらいある(安いDCモーターでは1:10位が相場であり、ステッピングモーターでもせいぜい1:数100だ)。選定したサーボモーターは単体での最高回転数が2,500rpmだから、下限は2.5rpmとなる。すなわち30分の1のギアがついた状態では、83~0.083rpmの範囲で安定した回転が得られる。(2)式から、これはピストンの送り速度にして69.4~0.069mm/minの範囲で1トンの推進力と滑らかな動きが保証されることである。速度範囲がこれだけ広いおかげ

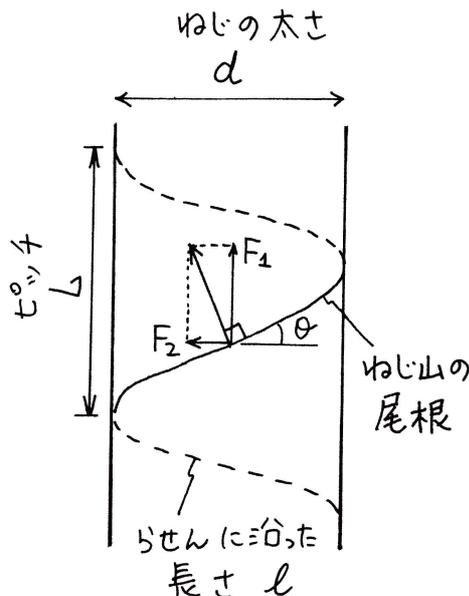


図 3. ねじがトルクを推進力に変換する仕組み。太さ d 、ピッチ L の摩擦のない理想的なねじでは、ねじ山の単位長さあたり加わる力の軸方向成分 F_1 と周方向成分 F_2 の関係が $F_2/F_1 = \tan \theta = L/(\pi d)$ となる。従ってねじ山が長さ l (らせんに沿って) で噛み合っている場合、トルク $T (=F_2 l d / 2)$ と、軸方向の推進力 $F (=F_1 l)$ の関係が $F = (2\pi/L) T$ と与えられる。

で、でき上がったプレスは使いやすい汎用の試験機になった。当初の目的のみならず、ロードセルの剛性などの試験や、試料のインデンテーションテスト(針を差し込む硬さを調べる試験)など、幅広く活躍している。

スクリュージャッキに出会うまで ~軸合わせ、中心合わせ、減速、に泣く~

最終的な結果を先に述べたが、実はこのスクリュージャッキこそ超初心者にもプレスが作れる秘密兵器なのだ。ここでは、スクリュージャッキに出会う以前の試行錯誤を報告する。回転運動を並進運動に変換する仕掛けは2の始めに述べた。原理はこのように単純だ。ねじ軸とナットを持って自分の手でやってみればすぐにできる。しかしこれを機械にやらせるとなると話はそんなに単純ではない。難しいのは「固定」だ。ナットは上下方向に動かないように固定しなくてはならないが、その場でクルクル回れなくてはならない。ピストンになるねじ軸の方は、回転しないように固定しなくてはならないが、上下方向にはスルスル動けなくてはならない。

回転するものを支えるためには「ベアリング」、上下に動くものの回転止めをするためには「リニアガイド」や「スプライン」といった部品があると知った素人の私は、これらを使って図4のような案を考えた。しかしこれを見たプロの助言は「これじゃ動かないよ」というもの。なぜなら、

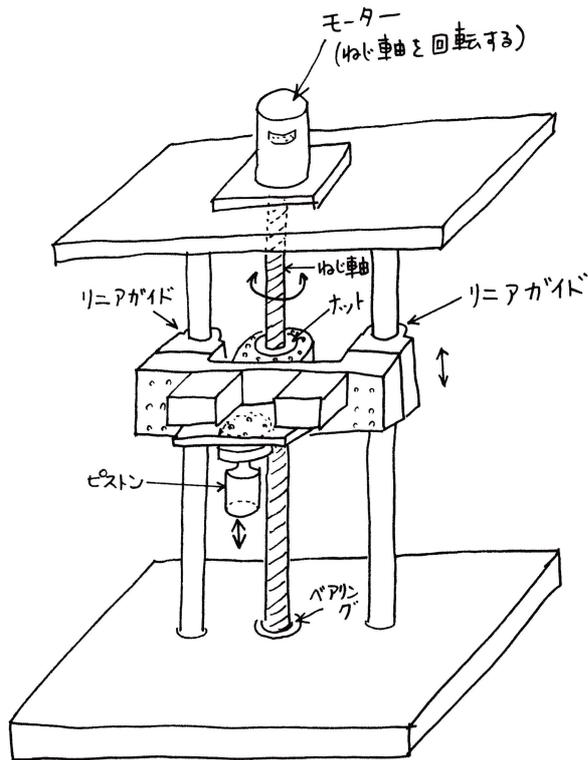


図 4. 全くの素人考えで描いた最初の案（ねじ軸を回転し、ナットを上下させるタイプ）。プロに「これじゃ動かないよ」と言われてしまった（本文参照）。

図面の上では複数の軸が「平行」だが、現実には作ればこれらの軸は加工精度の範囲内でしか「平行」にはならないからだ。複数の軸で支持する可動部が滑らかに動くためには組立時に軸を平行にする「軸合わせ」をする必要があるが、素人には難しい。また、組立時にそれが行えるためには設計図の段階で取付け穴の大きさなどに工夫がいるのだが、これもまた素人には難しそうだ。

そこで、ねじ軸とナットの支持や回転止めなどの機構を全て一つの軸上に直列に配置する方法に変更した（図5）。今度は複数の軸の平行度を気にしなくてすむが、一本の軸を複数の場所で支持する必要がでてくるため、それらの「中心合わせ」がまた難しい。

さらに困難が加わったことには、要求するピストンのおくり速度（0.2mm/min）が非常に遅いため、市販のギア付きモーターの持つ減速比（せいぜい百分の1くらいまでなのだ）では足りなくて、さらに3分の1程度の減速機構を自分で入れる必要があることが分かった。減速機構を入れるためには軸の数が増え、増えた軸の支持その他で部品数がまた増え、組み立ての順番や図面のチェックがややこしくなっていて不安だ。

このような状況で設計が難航していたとき、スクリュージャッキを見つけた。ねじ軸の回転止めや回転するナットの支持などの難しいところが既に組みあがっており、入力

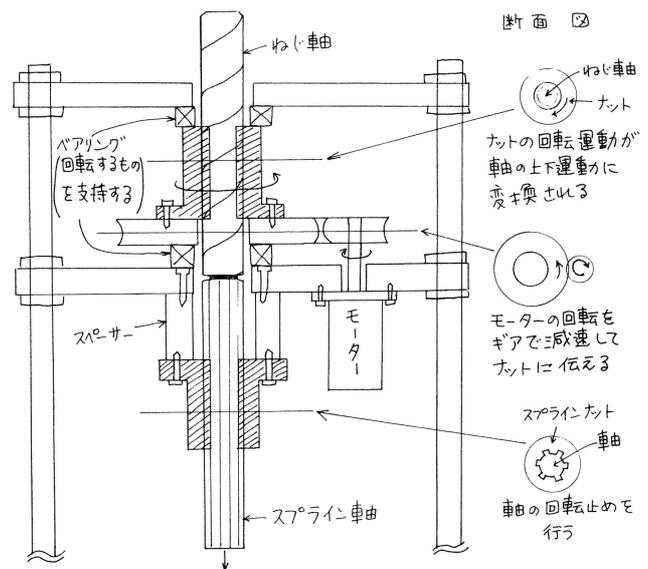


図 5. ナットの支持やねじ軸の回転止めをすべて一本の軸上で行う設計の案。ねじ軸と直列につないだスプライン軸で回転止めを行う。この設計では「中心合わせ」が難しい（本文参照）。

軸を回せば、あとはブラックボックスでねじ軸の上下運動が得られる。さらには入力軸の回転をナットに伝える部分に1:6の減速機構がついているので減速機構を自作する必要もなく、30分の1程度の減速のついた市販のギア付きモーターを買ってこれの入力軸を回せばいいだけだ。これは渡りに船だった。

フレキシブルカップリング

ジャッキの入力軸をモーターにより回転する。この時、モーターのシャフト（回転軸）とジャッキの入力軸をがっしりとつないでしまうと大変なことになる。もちろん図面の上では二つの軸が同一直線上にくるので、理屈ではこれでいいはずだ。しかし、加工精度と取付け穴のガタのせい、実際の取付け位置には誤差が生じ、二つの軸が正確に同一直線上に乗ることはない。同一直線上にない軸を無理にねじると、モーターのシャフトには物凄い並進の力が加わり、モーターは壊れてしまう。そこでユニバーサルジョイントやフレキシブルカップリング（図1(3)）といった「トルクは伝達するが、並進の力を吸収してくれる継手」が必要になる。

用いたカップリングはマイティ社製のもの。3つのパーツが図6のように組んであり、偏角で1度、偏心で6mmまでずれている2つの軸の間で回転を伝達できる。サイズも豊富にそろっていて、径の異なる二つの軸をつなぐこともできる。

フ レ ー ム

1トンの荷重を踏ん張ることになるフレームには、強度と剛性が要求される。フレーム(図1(4))はゴツくできればゴツイ程よいのだろう。しかしそうすると重量も増える。チェンブロックもないような素人の実験室で、女性の私が組み立てるのだから、そうそう何十キロもあるような板や柱は使えない。そこで今回のフレーム設計のポイントは、必要な剛性のものをできるだけ軽く作ることであった。

実際フレームのたわみはどれくらいに押さえる必要があるのか?プロの助言は、理想的には100分の1ミリ位であるが、無理なら0.1ミリ位でもよいだろうというもの。0.1ミリといえば、普通に工作機械で部品を作るときの加工精度程度だ。

試料を1トンで圧縮すると、ジャッキを取付けた天井板には1トンの上向きの力が加わる。この力は板の端で4本の柱によって支えられる。この時の天井板のたわみを、計算式が簡単な「梁の曲げ」の式を使って見積る。

両端を単純支持された梁の中央に力Fが加わると、力の加わった点における力の方向への変位yは、

$$y = Fa^3 / (4bh^3E) \dots\dots\dots(3)$$

(ただしa, b, hは梁の長さ, 幅, 厚さ, Eは材料のヤング率)で与えられる。両端は「単純支持」としたが、実際には柱にねじ止めをして支持するので、「単純支持」よりはしっかりしている。しかし弾性論でいうところの「固定支持」として扱うためには溶接するなどの処置が必要であるとのプロの助言で、ここでは単純支持の式を用いることにし、そのずれは安全係数だと考えることにした。(3)より、天井板の厚さと重量Wが次のように与えられる。

$$h = a (F / (4byE))^{1/3} \dots\dots\dots(4)$$

$$W = \rho abh = \rho a^2 b (F / (4byE))^{1/3} \dots\dots\dots(5)$$

(5)から分かるように、一定の剛性を得るために必要な天井板の重さはa²に比例し、aをどこまで小さくできるかがフレームを軽く作るための一つのポイントになる。ピストンとなるジャッキのねじ軸を天井板の中央におき、精密機器であるモーターは天井板からはみ出さないようにする(図7a)のが理想だが、これでは天井板が800mm以上になって重くて大変だ。はみ出した機器の保護対策(ぶつけなどの危険がないように)を別に行うなどして(図7b)、1トンの力を支える部分をできるだけ小さく作る工夫が必要だ。結局、対称性を犠牲にしてジャッキの位置を少々端によせ、モーターのおしりははみ出したままでよしとすることで、天井板の広さを400×400mmまで小さくした(図1参照)。

もう一つのポイントは材料選びである。最も一般的に用いられる鉄と、軽くて加工しやすいアルミとを検討した(表2)。ヤング率を比較すると、アルミは鉄より3倍も柔らかい。しかし密度はアルミのほうが3倍も軽い。(5)式から、ヤング率は1/3乗でしか効かないが密度は1乗で効いてくるので、同じ剛性のものはアルミで作ったほうが軽くできる。結局、天井板は400×400×30のアルミと決定した。

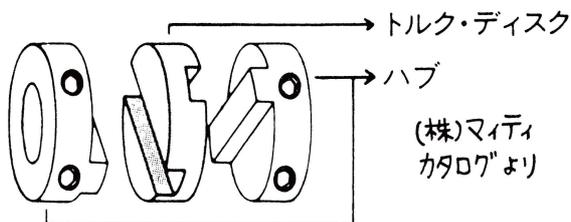


図6. フレキシブルカップリングが、同一軸上でない二つの軸の間で回転を伝達する仕組み(マイティ社のカタログより)。ハブ(アルミ製)とトルクディスク(樹脂製)の噛み合わせ部分が横滑りして並進方向の動きを吸収する。

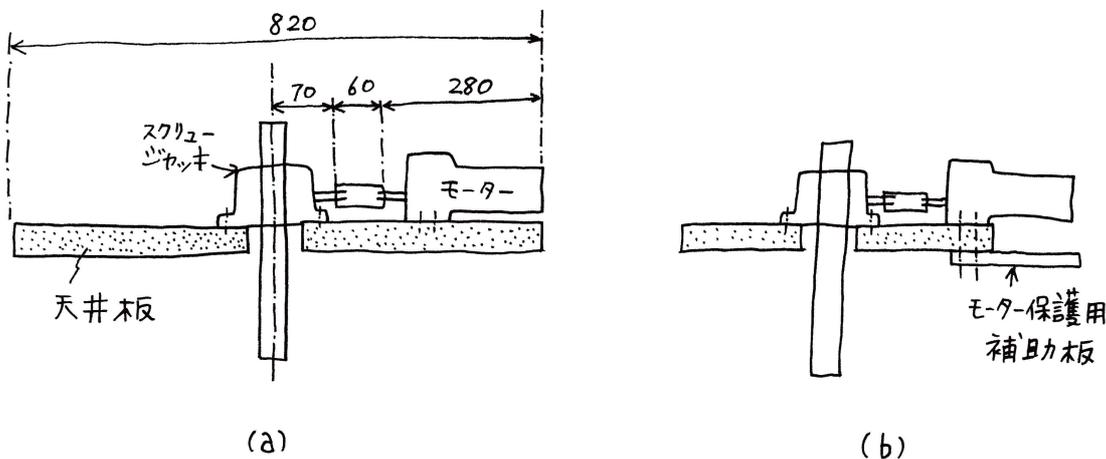


図7. 1トン荷重を支えるフレーム部分を小さくする工夫。

表 2. 1 トン荷重に対するたわみが y となる天井板の厚さと重さ

	鉄 $E=20 (\times 10^{10} \text{N/m}^2)$ $\rho=8 (\times 10^3 \text{kg/m}^3)$	アルミ $E=7$ $\rho=2.7$
$y=1(\text{mm})$	$h=12.6 \text{ mm}$ ($W=16.1 \text{ kg}$)	$h=17.9 \text{ mm}$ ($W=7.8 \text{ kg}$)
$y=0.1$	27.1 mm (34.7 kg)	38.5 mm (16.6 kg)
$y=0.01$	58.5 mm (74.9 kg)	83.0 mm (35.8 kg)

柱の高さは、実際にプレスを使用する時の都合を考えて 550 mm とし、4 本足にした。天井および床板と柱との固定には、柱側に雌ねじをきってボルトで固定するという方式を用いた (図 1 参照)。こうすれば、ボルトをしっかりと締めることによって自動的に天井と床板が平行になるので組立が非常に楽になる。

プレスを押して使用すると柱には張力が働くが、柱の強度を決めるのは一番断面積の小さいジョイント部になる。ボルトによる固定では、通常、ねじの山と谷が噛んでいる部分の総面積がボルトの断面積にほぼ等しくなるようにねじ穴の深さを決める (ボルトの太さの約 1.5 倍になる) ので、ボルトによるジョイント部の強度はボルトの断面積で決まると言える。本プレスでは、柱の固定に M20 (直径 20 ミリ) のステンレスのボルトを用いた。ステンレスの降伏応力をだいたい 100 N/mm^2 とすると、このボルト一本 (断面が約 $\pi 10^2 = 300 \text{ mm}^2$) で約 3 トンまで持ちこたえる。4 本では 12 トンになるので 1 トンプレスとしては少々安全を見すぎているかもしれない。M20 の雌ねじをきる柱には、見た目のバランスで $\phi 40 \text{ mm}$ (ϕ は直径という意味) の鉄の丸棒を用いたが、こちらあと 10 mm 位細くても M20 をきるには差し支えないだろう。(プレスを引っぱりで使う可能性がある場合には、柱の座屈も問題になるので注意。)

安全装置, 使い勝手, その他

プレスの操作, すなわち、モーターの運転は制御盤の前面パネルのスイッチで簡単に行うことができる。ピストンの速度はあらかじめ設定した 7 段階の速度 (55, 25, 10,

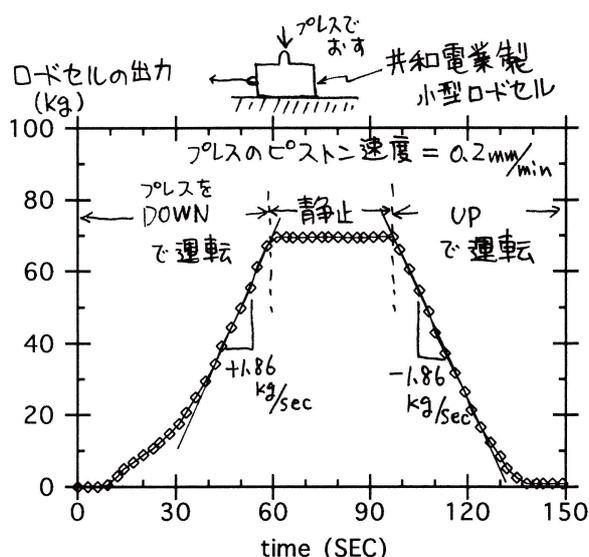


図 8. ロードセルの剛性を求める実験。ロードセルを一定速度 (0.2 mm/min) で押し、出力の時間変化を計測。ピストンがロードセルを押し始めてしばらくの間 ($t=10\sim 40 \text{ sec}$) は、被測定物と直列に入っているチリなどがつぶれるため立ち上がりが緩やかになる。傾きが直線的になっている部分から、 1.86 kg/sec の傾きが得られ、これよりロードセルの剛性は $1.86 \text{ kg sec}^{-1} / (0.2/60 \text{ mm sec}^{-1}) = 544 \text{ kg/mm}$ と求められる。

2, 0.55, 0.2, 0.08 mm/min) からロータリースイッチで選ぶほか、ボリュームにより連続的に変速したり、外部からの電圧入力で指定したりもできる。ピストンには直列にロードセル (荷重計) がついていて、現在の荷重がパネルにデジタルで表示される。上限荷重が設定でき、それを越えるとモーターが自動的に静止する。また、ピストンがストロークの端にくるとマイクロスイッチが切れてモーターが静止する。この二つの安全装置をつけたおかげで、誰でも簡単に使える汎用のプレスになった。

図 8 に本プレスを用いて行った測定の一例を紹介する。

謝辞: 東京大学生産技術研究所の佐藤剛司さんには、オリジナルのプレスをたくさん見せていただき、スクリージャッキを使うことを教えて頂いた。名古屋大学理学部装置開発室の三輪治代美さんにはカタログ集めなどで、東京大学地震研究所の浅田鉄太郎さんにはプレスの足を受ける部品の加工で、大久保天君には装置の組立とキャリブレーションで大変お世話になった。また、安田敦さんには査読によって有意義なコメントを頂いた。どうも有難うございました。