

エネルギーを活用した教材開発

加藤友依*・尾高広昭**

* 可児郡御嵩町立向陽中学校 ** 岐阜大学教育学部技術教育講座

Development of Teaching Material Using Energy

Yui KATO, Hiroaki ODAKA

1. はじめに

2011年3月11日の東日本大震災から、日本のエネルギー事情¹⁾は大きく変化した。2016年12月には高速増殖原型炉「もんじゅ」の廃炉が決定し、日本の原子力発電に関する研究はほぼ停止し、また九州電力以外の原子力発電所は全て稼働を停止している。エネルギー白書2016によると2010年までは原子力発電が日本のエネルギー供給の約30パーセントを補っていたが、2011年を過ぎてから激減し、2013年には0パーセントとなり、日本の発電の87.7パーセントを火力発電で補う火力発電大国になった²⁾。今後の学校教育におけるエネルギー教育は大切であることがわかる。

中学校学習指導要領解説技術・家庭編³⁾(平成20年告示)では、改訂の基本方針「家庭科、技術・家庭科については、その課題を踏まえ、実践的・体験的な学習活動を通して、家族と家庭の役割、生活に必要な衣、食、住、情報、産業等についての基礎的な理解と技能を養うとともに、それらを活用して課題を解決するために工夫し創造できる能力と実践的な態度の育成を一層重視する観点から、その内容の改善を図る。その際、他教科等との連携を図り、社会において子どもたちが自立的に生きる基礎を培うことを特に重視する。」とある。「生きる力」を生徒が養い、自立し社会で生き抜いていくために、自分で考え、自分で工夫していくことができる「工夫し想像できる能力」が重要である。

これらの社会的背景を考慮し、本研究ではエネルギー変換における授業内で実際に使えるような題材の開発を行った。主として、エネルギー変換の基本とも言える「変換の過程」が分かりやすくなるような題材を開発し、題材を中心としてエネルギー変換やリンク機構やクランク機構、発電・送電技術について学ぶ、体系的な授業設計を目的とする。さらに、製作する中で、どうしたらより効率的に動くのか、実際に自分の身の回りの生活と関わらせることを生徒に考えさせ、工夫創造する力や興味関心を高められるような授業展開とした。

2. 技術教育におけるエネルギー変換

2.1 スターリングエンジンの題材化と意義

本研究では、次の3点に配慮しながら研究を遂行した。

- 第一に、エネルギー変換に関する正しい知識・理解
- 第二に、身のまわりの生活と関連付ける興味・関心
- 第三に、創意工夫することができる題材と授業設計

学習指導要領解説中学校技術・家庭編では、設計・製作以外にも、エネルギー変換に関する技術の適切な評価・活用が追加され、ものをつくることで終わらせず、最終的に生徒は自分のもっている知識や体験を生かして生活していくことが必要とされている。現在、中学校技術・家庭科技術分野では、エネルギー変換に関する授業の中で取り扱う題材の約70%は「電子回路」系である。また、エネルギー変換に関する授業で題材が1つのみの学校が多いことが平成25年度全日本中学校技術・家庭科研究会⁴⁾の質問紙調査結果からわかる。

テーブルタップの教材は電子回路のことを学び、保守点検のことも考えられる素晴らしい教材の1つである。だが、エネルギー変換に関する授業ではエネルギー変換のことや、力の伝達、発電の仕方、今後の日本のエネルギー利用を考えさせるなど、多くのことをより実体験として学び、そこから考える力も身に付ける必要がある。

そこで、スターリングエンジンを題材化することを研究とし、エネルギー変換の要素、クランクを使った力の伝達、電気の発電方法、安全に工具を使うこと、丁寧な製作をすることの難しさと多くのことを学ぶことができる題材であると考え。生徒が授業時間内に製作する事ができ、そこから学んだことを実生活と結び付けられる題材である。

2.2 エネルギー変換教材・教具と題材開発

2.2.1 エネルギー変換に関する教材・教具や題材⁵⁾

(1) スターリングエンジン教材に関する先行研究として、(社)日本設計工学会「教材用スターリングエンジンの実用化に関する調査研究分科会」の土田三郎(埼玉県立春日部工業高等学校)が提案したスターリングエンジンは、ダイヤフラムに大きな風船を使用し加工が容易な点特徴的である。また、木材加工ともつながっている点もあり、材料と加工の内容とエネルギー変換の内容を結びつけた教材である。だが、使用した木材はこれ以上他のものに使用することができないため、廃材になる。そのため、環境への配慮も踏まえた教育を行っていく技術教育には難しいと考える。再生器にはバルサ材を使用しているが、熱交換器としての熱を保存し、供給する役割としては不十分である。

2.2.2 市販題材と教材・教具の製作と分析

題材開発をするにあたって、市販の題材および教材・教具の製作と分析を行った。

(1) 「お湯で動く<空き缶スターリングエンジン>模型キット」(コンセプトプラス株式会社製)

このスターリングエンジンはフリーピストンスターリングエンジンで、クランク機構を用いず、ピストンの直線運動を直接利用したものである。マグカップのお湯で動くため、サイズも小さく、構造が簡単な点特徴的である。最大で約10分動く。また、多くの先行研究と大きく異なるのが、ディスプレイサスプリングとパワーピストンスプリングを用いている点である。二部品ともファイルのように薄いプラスチックでできている。ディスプレイサスプリングはピストンが下がってきた際にディスプレイサを持ち上げる役割を担い、パワーピストンスプリングはピストンを持ち上げる力になる。

実際に現場で使うことができるのかを考えるといくつかの問題がある。まず金額であり、製作時間約20分の題材に本体価格1500円必要である。またエネルギー変換の内容では、多くの学校でははんだごてを用いた電子工作やテーブルタップの製作が行われている。題材・教材費はできる限り押さえない。また生徒自身が工夫することのできる部分も少なく、家で活用することも難しいと考える。これ

らの点から学校でこのキットを題材化することは難しいが、提示用教材として活用できる。

(2) ROCKS MOTION STIRLING ENGINE RM005

この教材は①とは異なり、完成済みスターリングエンジン教材⁶⁾である。手のひらに乗せるだけで動く低熱型であるため、一目でスターリングエンジンの動力に熱エネルギーが使われていることが分かる。視覚的にエネルギー変換が分かりやすい教材である。導入教材にすることで生徒のスターリングエンジンに関する知識が定着しやすくなる。

2.2.3 スターリングエンジン⁸⁾

スターリングエンジンはスコットランドの牧師で発明家のロバート・スターリングが発明した外熱機関である。外熱機関のため、エンジンの外側を温めることで動く。この熱源が自由な点がスターリングエンジンの良さである。理想では、熱エネルギーを運動エネルギーに変換するカルノーサイクルの実現を目的としている。仮にカルノーサイクルが実現すれば原理からすると熱効率が約 74 パーセントと非常に高い効率を生み出すことができる。目に見えぬ熱エネルギーを手軽に運動エネルギーに変換し、感じるができる。

近年で 10kW 未満のスターリングエンジン⁷⁾が 2014 年 11 月 5 日に一般用電気工作物に認定された。一般用電気工作物とは家庭用太陽光発電パネルと同様に、資格不要で誰でも自由に使用できる発電設備のことであり、電圧が低く安全性の高いものが認定される。この規制緩和により家庭でもスターリングエンジンを使った工作物を使用できるようになった。2013 年には宇宙ステーション補給機「こうのとり」にスターリングエンジンを使った冷凍・冷蔵庫が搭載され、そうりゅう型潜水艦の AIP (非大気依存) 推進機関にもスターリングエンジンが使われている。

(1) スターリングエンジンの原理

スターリングエンジンは外熱を使った気体膨張と圧縮を利用した外熱エンジンである。

1) 基本構成と動作原理

温度差を持つ 2 つのシリンダと約 90° の位相角をもつ 2 つのピストン、ヒータ・再生器・クーラと呼ばれる熱交換器、さらに円滑な連続運転を可能にするためのフライホイールから構成されている。

作動ガス (空気) の加熱行程、膨張行程、冷却行程、圧縮行程の 4 行程によってエンジンが運転する。また圧縮行程においてはフライホイールに蓄えられたエネルギーを利用してためクランク軸が回転する。爆発を利用する内熱機関とは異なり、圧縮行程においてもエンジンは駆動トルクを得ることができる。

エンジンの始動時には作動ガスの加熱により増加する方向に回転させることが必要である。回転を始めるとフライホイールを利用して加熱・膨張・冷却・圧縮行程を繰り返す。この結果出力軸よりパワーを得られる。

2) γ 形スターリングエンジン

エンジンの小型が難しく、構造上、圧縮比が高められないため高出力が難しいのが問題点である。熱交換器の形式の自由度が高いことや容積費を自由に変えやすいのが特徴である。温度が低い熱源で運転する低温度差エンジンで使われることが多い。

本研究の γ 形スターリングエンジンの動作原理を図 1 に示す。

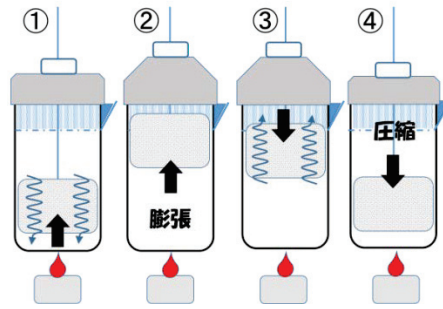


図1 γ 形スターリングエンジンの作動原理

- ① ディスプレーサが上がり、作動ガスが熱交換器（ディスプレーサ）を通り、高温になり膨張空間に流れ込む。すると、シリンダ内の圧力が高くなる。
- ② 圧力が高まり、外部（ゴム風船）に仕事をし、この時にフライホイールが駆動トルクを得る。
- ③ ディスプレーサが下がることで、膨張側にある作動ガスが熱交換器に熱を奪われ、圧縮空間に流れ込むとシリンダ内の圧力が低くなる。この時にフライホイールの駆動トルクを利用する。
- ④ 外部のゴム風船が縮み、張力を高める。

2.3 教材・教具と題材の開発の条件

本研究ではエネルギー変換の過程を分かりやすく伝えることのほか、題材としての4つの条件を考慮しつつ、研究を遂行した。

(1) 低価格

学校では教材・教材費が重要になり、高性能な題材でも高額では学校、家庭の負担が大きくなる。

(2) 簡単

題材の例として、「本棚、植木鉢」や「テーブルタップ、ラジオ」がある。これらは教師の机間巡視、計測機器によって生徒の失敗している点や修理法が明確になり、達成感が得られる題材である。

(3) 創意工夫

学習指導要領解説技術・家庭編技術分野の指導内容に「(前略)～に関する技術の適切な評価・活用について考えること。」とあり、生徒が考えることの重要性が示されている。

(4) 体系的学習

教科の特徴として、生活と密接に結びついている点から、他教科と連携をすることで、学校全体の授業が体系的になり、生徒の理解につながると考える。技術を知ることとは道徳や進路に関わる総合的な学習の時間とつなげ、エネルギーに関する問題を理科や社会と組み合わせ、深い学習が可能である。

3. スターリングエンジンの題材の開発

3.1 スターリングエンジンの種類選定

現在のスターリングエンジンの種類⁹⁾は、 β 形のほか、 α 形、 γ 形、ダブルアクティング形、フリーピストン方式があるが、これらは熱力学的に同じサイクルに基づいている。その中でも大きなトルクを生み出すことはできないが、最も金属に関わる製作工程が少なく、低温度で動く γ 形スターリングエンジンに焦点を絞った。 γ 形にもいくつか種類があるため、3種類を製作して、各々の長所・短

所について整理する。

スターリングエンジン製作の重要な要素として、密封性がある。シリンダ内の作動ガス（空気）が外に漏れてしまえば意味がなく、密封することが容易な点も題材開発において重要な点である。

3.1.1 縦型アルミ缶式スターリングエンジン

スターリングエンジンをアルミで製作する際に最も多くある構造（図2）であり、ダイヤフラムがアルミ缶と違う場所にある点の特徴である。本研究ではすぐに購入可能なビニル管のL型を使用しているが、アルミ缶とビニル管の接合が難しく、紙粘土でアルミ缶と同じ曲線を作り出し、瞬間接着剤で固定した。この作業が難しく、アルミ缶を丁寧に加工する必要があり、生徒が授業内で作ることは困難である。また、ビニル管のほかにコンロッドとダイヤフラムを連結させる部分にネジとナットを使用したため、この部分のみで200円かかる点も難点である。動作確認で動かなかったのは、空気を温めてもダイヤフラムが膨張せず、熱量の問題、加工部からの空気の漏れが問題と考えられる。



図2 縦型アルミ缶式



図3 市販品手本型

3.1.2 市販のスターリングエンジンを手本とした試作例

市販で購入したものを手本に同じ型を製作した（図3）。特徴はアルミ缶の底部と上部を残し、間を断熱するためにファイルを使用した。この型も縦型と同じくダイヤフラム部の製作が困難である。アルミ缶からアルミを取り、小さく丸め、ビニルテープで固定する。密封性の問題が多く、空気を温めても中のディスプレイサが膨張していることを確認できなかった。全体にサイズが小さい分、細かい作業が多いため、題材には不適と考えた。

3.1.3 ゴム型スターリングエンジン（図4・大分大学工学部を参考）



図4 ゴム型

この型の特徴はアルミ缶全体をダイヤフラムと考え、ダイヤフラムとコンクロッドを一体化した型である。また、風船全体で缶を覆うため密閉の問題も少ないといえる。コンクロッドに割り箸を使用

しているため題材価格も抑えることが可能である。

アルミ缶の加工が難しいと危険性が高くなってしまいが、この型はアルミ缶上部を切断するのみである。しかし、動作確認の結果、風船が膨らみコンロッドが持ちあがったがスターリングエンジンとして動かなかった。原因として、風船が膨らんだ際と縮んだ際にコンロッドとの連動がなかった点である。シャフトの位相の 90° を確実に出す必要があると考える。

3つの試作スターリングエンジンの結果を表1に示す。

表1 各スターリングエンジン比較表

	加工難易度	価格	修理・改善
縦型アルミ缶式	やや難しい	約 400 円	かなり難しい
市販品型	難しい	約 200 円	難しい
ゴム型	簡単	約 200 円	簡単

種類選定の結果どれも動くことがなかった。しかし、試作をする中で、特に③のゴム型スターリングエンジンはもっとも製作が容易で、やり直しや改善も容易にできることが分かった。このことから最も題材に適した型であると考えた。③のゴム型スターリングエンジンに焦点を絞り、各パーツの検証を行いつつ題材開発を行った。

3.2 γ形スターリングエンジンの各パーツの検証

以下、γ形スターリングエンジンの3つのパーツを製作し比較、検証¹⁰⁾した。

3.2.1 ディスプレーサの検証

γ形スターリングエンジンにおいてディスプレーサは熱交換器の役割も担う重要な部品である。そのため、軽く、加工しやすいことを前提に3つの素材を用いて検証¹¹⁾した(表2)。

1つ目は「発泡スチロール」(図5)である。レーザーカッターを用いて、アルミ缶の直径と同じサイズになるよう加工した。また、レーザーカッターの熱で設定したサイズよりも大きく溶けてしまうため、レーザーカッター側の微調整が必要である。発泡スチロールの欠点として熱に弱い点はアルミホイールを巻くことで溶けないようにする。発泡スチロールとアルミホイールは通常の接着剤では接着が難しいため、合成ゴム系接着剤を使用した。結果は動かなかった。原因としては、発泡スチロールの特徴として空気を通さない点があるが、ディスプレーサが膨張側に下降する際に重量が足りず下降できなかったことにあると考えた。熱交換器としての役割も蓄熱性に欠ける点から、発泡スチロールはふさわしくないことがわかった。



図5 発泡スチロールのディスプレーサ

2つ目に「スポンジ(ポリウレタン)」である。ROCKS MOTION社のスターリングエンジンでもディスプ

レーサとして用いられているため、丁寧に加工することができれば使えるのではないかと考えた。まず手加工ではさみを使用して加工しようとしたが、円形に切ることが非常に難しく、使えるものにならなかった。また、断熱壁を使用する場合にウレタンは安全かもしれないが、断熱壁を使用しないと考えている今回の場合はウレタンが溶けてしまう可能性があるためこれ以上検証を行わなかった。

3 つ目に「スチールウール」である。スチールウールは蓄熱性が高く、空気を通しやすいため熱交換器としての役割を十分にこなせると考える。市販の「調理器具・金属みがき用 ボンスター」を使用した。加工方法としては、手でスチールウールをちぎり、円形にする。その際に端と端を釣り糸で繋いで形を整える。動作結をしてみたところ動いた。加工時間を短くすることのできる点も題材開発において重要である。レーザーカッターを学校に導入しているところも少ないため、手加工ができる点が長所である。

表2 ディスプレーサの比較

	加工難易度	価格	動作結果
発砲スチロール	△ (レーザー加工機)	約 30 円	×
スポンジ	×	約 20 円	×
スチールウール	○	約 40 円	○

3.2.2 シリンダの検証

シリンダは簡単に加工できるアルミ缶とスチール缶の実践例があり、2 つ缶の材質で検証¹¹⁾した。

最初に「スチール缶」で検証する。スチール缶は自動販売機等で販売されている温かい飲み物や缶詰で使われている。特徴として、熱伝導性が低いこと、アルミ缶と比較すると硬い点¹²⁾がある。加工方法として学校にあるようなもので加工しようと考え、はさみで加工した。結果としてスチール缶は硬く、切断面が雑な形になってしまった。このためスチール缶のシリンダは部品として不適とした。

次に「アルミ缶」の検証をする。アルミ缶はスチール缶と比較すると熱伝導性が高く、やわらかいため加工しやすい点の特徴である。アルミ缶は手軽に手に入れることができるサイズ 2 種類で検証した。1 つ目は自動販売機等で販売されている 350mL 缶である。大きいため加工の難易度は低い。だが、缶のサイズが大きい分、作動ガスとなる空気の量も多いため、温めるための時間をかなり必要とする。2 つ目はスーパー等で販売されている 245mL 缶である。350mL 缶とは違い、細長いことが特徴的である。細長いため加工に失敗した際にやり直しが可能である。また作動ガス量が少ないため時間をかけずに作動ガスを温めることができる。350mL と 245mL の結果は 245mL の缶では動いた(表 3)。作動ガス量が少ないほど、同じ量のガスが温まった際に変化が大きいことが理由と考えられる。生徒に加工させる際には軍手等を使用し、安全面に最大限考慮する必要がある。

表3 缶の材質によるシリンダの比較

	大きさ・種類	硬さ (加工難易度)	熱伝導率(W/m K)
アルミ缶	245mL 缶有り	HV 240	204
スチール缶	フルーツ缶など	HV 480	約 70

3.2.3 クランクシャフトの検証

クランクシャフト(図6)は原理から分かるように、回転半径が大きすぎるとサイドスラストが発生するため回転半径を極力小さくする。回転する際に振動すると、トルクが余分ところに逃げるため、硬いほうがよいことも考慮に入れる。なお、クランクシャフトの検証結果を表4に示す。

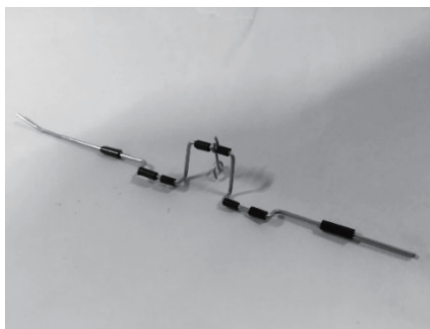


図6 試作クランクシャフト

表4 クランクシャフト比較表

	入手手段	加工難易度	動作結果
針金	100円ショップ	簡単	×
硬質ステンレス材	釣具屋	かなり難しい	○
超硬質ステンレス材	釣具屋	難しい	○

1つ目に100円ショップで購入した針金の検証を行う。100円ショップで購入できるため、準備が簡単である事がメリットである。やわらかいため生徒の力で容易に加工できる点も良いが、実際に動作させてみると回転する際に、少しずつ曲がってしまった。曲がりが大きくなればなるほどサイドスラストが大きくなる点から、この材料はシャフトとして使用できない。

1つ目の硬さの問題を踏まえ、2つ目は「高級ステンレス材 硬質ステンレス材 φ1.4mm」を検証する。針金と比較するとかなり硬く、ペンチでなければ曲げることができない。また、1.4mmと太いため、最初に決めた長さに加工しようと思っていても、予想以上に大きく曲がってしまうことがある。動作結果は動いた。加工の難しさが欠点である。

3つ目は「高級ステンレス材 超硬質ステンレス材 φ1.2mm」である。硬質よりも硬くした分、直径を細いものを用意し検証する。直径が細い分、1.4mmの時よりも曲げる時の加工が容易になった。また、曲がる際のズレも1.4mmと比較すると少ない分加工が容易になった。

4. 開発したスターリングエンジンの題材

4.1 開発した題材の材料一覧と完成図

本研究にて、開発したスターリングエンジンの題材の材料一覧(表5)や写真(図7, 図9)、概念図(図8)を以下に示す。

表5 開発した題材の材料一覧

材料名	個数・サイズ	用途
245mL アルミ缶	1本	シリンダ
500mL ペットボトル	1本	冷却水入れ・シャフト支え
ペットボトルのキャップ	2個 (口元が円形)	ダイヤフラム固定・CD固定
CD	2枚	フライホイール
11インチ風船	1つ	ダイヤフラム
硬質ステンレス材	180mm	クランクシャフト
針金	300mm	コンロッド (接続棒)
ビニルテープ	任意 (少量)	ペットボトルとシリンダ固定等
スチールウール	握りこぶし半分	ディスプレイサ (再生器)
釣り糸 (ナイロンテグス)	φ0.285mm 300mm	コンロッド (接続棒)
クリアファイル	30mm の正方形	シャフト固定



図7 完成したスターリングエンジンと鋼尺

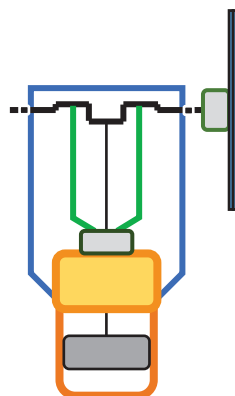


図8 スターリングエンジン概念図



図9 スターリングエンジンの題材

4.2 題材完成のための工夫すべき点

製作の作業工程を簡単にし、生徒の手で完成が可能な題材にする、工夫すべき点を3点挙げる。

- (1) ダイアフラムが安定して垂直運動のためペットボトルのキャップとねじ部使用
- (2) クランクシャフトを支える部分をペットボトル使用
- (3) 支柱となるペットボトルを冷却用冷水が貯められる構造にして効率を高める

5. まとめ

本研究では、エネルギー変換の過程が理解しやすい題材とリンク機構やクランク機構を組み合わせた題材としてスターリングエンジンを開発した。また、題材に求められる条件を低価格、簡単、創意工夫、体系的学習の4点に絞り、生徒が製作しやすく、材料や長さを検証することで動く、中学校技術・家庭科技術分野の題材として使用できるスターリングエンジン題材の開発を行った。

今後の課題は、スターリングエンジンのフライホイールに電動機を接続し、運動エネルギーから電気エネルギーへの過程を見せることが可能であり、より複合的なエネルギー変換を学習する教材・教具や題材として発展させることである。

参考文献

- 1) 経済産業省：関東経済産業局 新エネルギーとは
http://www.kanto.meti.go.jp/seisaku/enetai/index_shinene.html#e1
(最終アクセス 2017年1月10日)
- 2) 経済産業省：自然エネルギー庁 エネルギー白書 2016
- 3) 文部科学省：中学校学習指導要領解説技術・家庭編，教育図書（2008）
- 4) 全日本中学校技術・家庭科研究会：平成24年度 中学校 技術・家庭科に関する全国アンケート[技術分野] <http://ajigika.ne.jp/doc/2013eng>（最終アクセス 2017年1月15日）
- 5) Koichi Hirata：空き缶スターリングエンジンを作ろう
http://www.bekkoame.ne.jp/~khirata/japanese/mk_can.htm (最終アクセス 2016年12月20日)
- 6) ROCKS MOTION STIRLING ENGINE RM005, 取扱い説明
- 7) 経済産業省：電気事業法施行規則及び発電用火力設備に関する技術基準を定める省令の一部を改正する省令について（2014）
- 8) 浜口和洋・戸田富士夫・平田宏一：模型作りで学ぶ スターリングエンジン，オーム社（2009）
- 9) NPO 日本スターリングエンジン普及協会：スターリングエンジンとは
<http://eco-stirling.com/about-se.html>（最終アクセス 2017年12月22日）
- 10) 浜口和洋・戸田富士夫・平田宏一：模型作りで学ぶ スターリングエンジン，3.2 γ形スターリングエンジンの各パーツ検証，オーム社（2009）
- 11) 各種物質の性質：金属（固体）の性質
<http://www.hakko.co.jp/qa/qakit/html/h01020.html>（最終アクセス 2017年1月13日）
- 12) NIC アルファマジン.com
<http://alfaframe.com/mame/2584.html>（最終アクセス 2018年1月4日）