

ナノサイズの磁気(磁区)構造の解析や動力学的な特性の解析 LLG マイクロマグネティクスシミュレータ LLG Micromagnetics Simulator

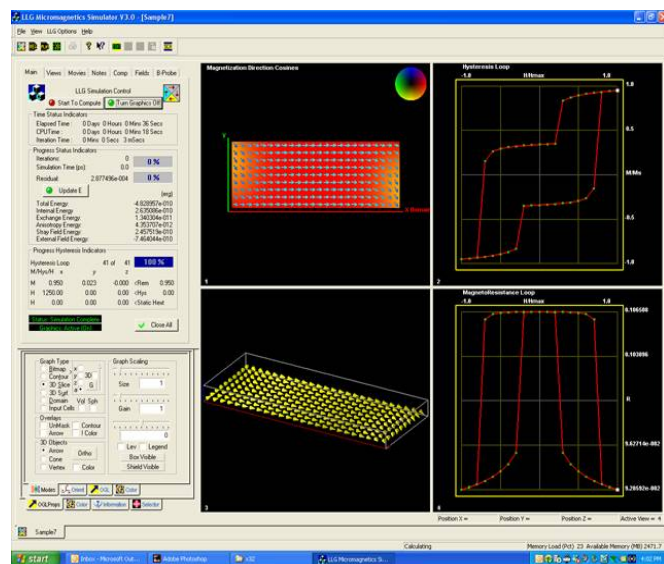
Developed by Michael R. Scheinfein

LLG Micromagnetics Simulator™ は、LLG 方程式(Landau-Lifshitz-Gilbert-Langevin equations)を relaxation (弛緩法)と integration (積分法)の両方(あるいはどちらか)を駆使して解析する、集中画像表示機能も備えたフル3次元のシミュレーションツールです。

この LLG Micromagnetics Simulator™ を使えば、表面や膜、デバイスや材料のナノ、 μ サイズの磁気(磁区)構造の解析や動力学的な特性のシミュレーションができます。

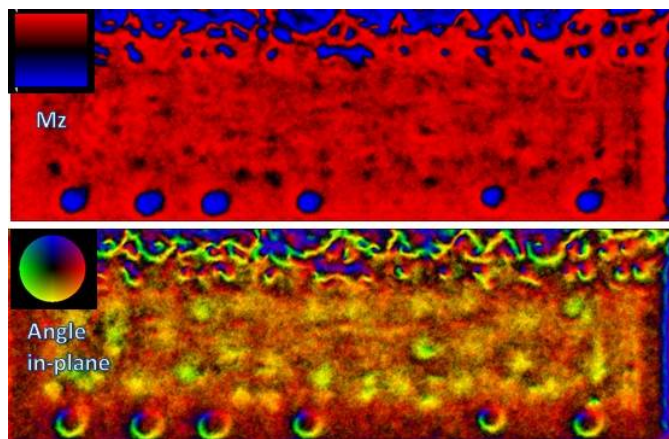
Applications:

- 保磁力、スイッチング時間、層間結合力、磁気渦や磁壁の長さといった基本特性の他、微小粒子や薄膜の平衡磁化分布もコンピュータ解析できます。
- マグネチック RAM、スピンバルブ、AMR や GMR ヘッド、磁気センサー等磁気デバイスの構造やレスポンスをシミュレーションできます。
- ロレンツ顕微鏡法や電子線ホログラフィー、SEMPA や磁気力顕微鏡法で可能になった標準磁気イメージングのコントラスト機構をコンピュータ計算できます。磁気力顕微鏡では、それによってサンプルの磁場が探針磁化の方に方向づけられ、探針が弛緩過程の一過程となる事ができます。



バージョン V4 で追加になった新機能

- **超高速計算速度:**
インタラクティブ GUI にハイパースレディングと CUDA(GPU)が完備され、CPU と GPU がデータを共有して同時に使用できる事で最速の計算速度が可能になりました。
- DMI (For Symmetry) ジャロシンスキー守谷相互作用
- スピンホール効果
- ラシュバ効果
- 異方的交換
- 異方性を誘導した時間依存 E フィールド
- スイッチダイナミクスを解析する有効場やトルク(リアルタイムの磁気回転または減衰)のイメージ
- バッチモード処理とコンソールモード処理



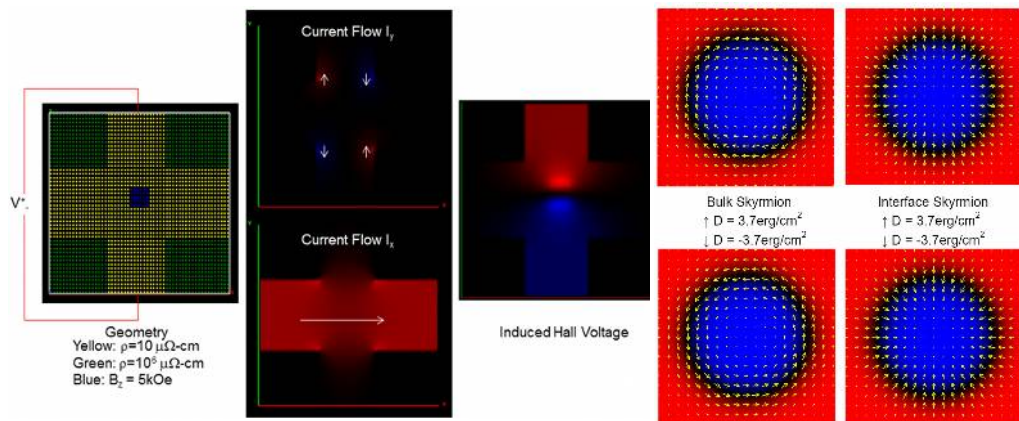
DMI 下でスピンホール効果によって誘導された Switching で CoFe/Pt 層に生成された Skyrmions

磁気スキルミオン

V4.14a から「カスタム Skyrmion オプション」が追加され、TEM ロレンツと合わせて本機能強化となりました。

もともと v4 にはスキルミオンのバルクとインタフェースを静的・動的にシミュレーションする機能がありましたので、このカスタム Skyrmion パッケージの新機能を使ってシメトリ可能などんなスキルミオンの静的・動的プロパティも探索し

研究ができるようになったのです。バルクまたはインタフェースタイプ、螺旋を変化させる事、或いは DMI ベクトル自身上で回転トランスフォーメーションを実行する事によって新しいシメトリを探索する事や、これらのもので「anti-Skyrmions」をつくる事もできます。



LLG Micromagnetics Simulator™ 機能リスト

ドキュメント類インターフェース

- 個別課題集
- 同時処理の複数課題集
- 解析と同時ムービー
- バッチモード
- ジャーナルビューア

代表的グラフィックス

- 磁化方向コサイン
- 残差
- 有効場
- 消磁場
- エネルギー密度
- 境界条件フィルド
- 電流誘起場
- 遮蔽外部場
- ヒステリシスループ
- 極ヒステリシスループ
- MR ループ (R または dR/R)
- 磁気誘導
- 磁気回転トルク
- 制動トルク
- トータルトルク
- 消散
- H (表面)
- dHdz (表面)
- d2H/dz2 (表面)
- M の発散
- インテグレートされた B
- 電流の流れ
- 位置依存外部場
- インテグレートされた電子相

入力パラメータ (パラメータ)

- 磁化
- 二次一軸異方性
- 四次一軸異方性
- 立方異方性
- 表面異方性
- 界面異方性
- 交換スティフネス
- 抵抗率
- AMR 比
- 分極
- 異方性のタイプ (立体、または一軸)
- 異方性の方向 (任意)
- 物質データベース/自動入力

境界条件

- 全任意サイドへの固定 M
- X, Y, Z, XY, XZ, YZ の周期性
- 連続 2D
- 層依存性 BC
- 位置依存性 BC

グラフィックス

- フル OpenGL 3D グラフィックス
- シングル OGL ウィンドウ
- ビットマップビューア
- 輪郭ビューア
- 3D スライス
- 3D サーフェス
- ドメイン
- ドメイン/矢印の重ね合わせ表示
- 多色ホイール
- マルチプル OGL ウィンドウとビューア
- 多数同時透視表示
- 入力セル
- 様々な輪郭
- 輪郭の表示機能
- 物質の色分け
- 多色マップ
- 可変 3D グリフ (記号)
- 2D グラフィックス
- 3D の歪みビットマップと輪郭表示
- データに、色、矢印、輪郭の重ね合わせ表示
- グラフィックスの数値データの編集
- LLG へのグラフィックスの保存と呼び出し
- 3D 動的慣性モーメント

入力コンフィギュレーション

- デカルト格子
- 任意の固定 x、Y、z 間隔
- 固定間隔層
- 可変間隔層
- 2D グリーン関数
- 3D グリーン関数
- 連続ハミルトニアン
- 点双極子ハミルトニアン
- 原子格子
- 物質層の任意数
- 完全 3D の位置依存性

コンピュータ計算法

- 弛緩法
- 積分法
- ガウス・ザイデル積分
- 適応エッジ統合法
- 最大反復回数
- 最小反復回数
- 複合 3D FET
- 実数 2D FFT
- Euler 積分
- 回転行列積分
- 予測子-修正子積分
- 可変タイムステップ
- 可変収束基準
- エネルギー増加フラッグインジケータ
- 可変消磁 RHS 評価
- 可変磁気周波数
- 可変減衰定数
- 有限温度 (ランジュバン)
- ランダムナンバード
- 最大トルクの絶対値と平均正規化トルクの絶対値
- シングルの最大変化の絶対値と全方向コサインの平均の絶対値
- LLG へのグラフィックスの保存と呼び出し

入力 (イニシャル) コンフィギュレーション

- ユニフォーム
- 渦
- 遷移
- ランダム
- ランダムフラクション
- ファイルから
- 2D 壁

電流

- 2D モデル電流 (R から計算された)
- 3D モデル電流 (R から計算された)
- AC 電流: 重ね合わせのある、または無い
- 時間依存電流
- 時間依存電流エディター
- スピントルク

時間依存 H 場

- AC 場
- 固定時間場
- 任意波形
- 任意波形エディター

マスクエディター

位置依存パラメータ エディター

- 位置依存パラメータのカラータ
- 可変 3D 抵抗率
- 拡張メディアモデル入力エディター
- 可変表面タイリング/結合エディター
- パラメーター ヒストグラム ヴューア
- パラメータ BC ヴューア
- 減磁エッジ補正
- エッジ減磁と粗さ
- 3D Voronoi セル離散化
- パラメータマッピング用ビットマップのインポート

ムービービューア

- ムービーのシミュレーション
- ムービーからヒストリシスデータの抽出
- ムービーファイルの編集
- ムービーの挿入

固定場

- 静的外部場
- ピン止め磁場

層

- 層
- 固定厚層
- 可変厚層
- 物質層 (GUI) の数
- 位置依存入力
- 層の GUI からの入力

ヒステリシス ループ

- ユニフォーム
- 回転
- 非ユニフォーム
- 非ユニフォーム ヒステリシス エディター
- 任意ループ測定方向

3D 有限透過性遮蔽

- 厚さと形状
- 有限透過性
- 遮蔽ループ
- メディアへの反応
- クロストラック反応
- メディア移動
- BC マグネットのイメージング

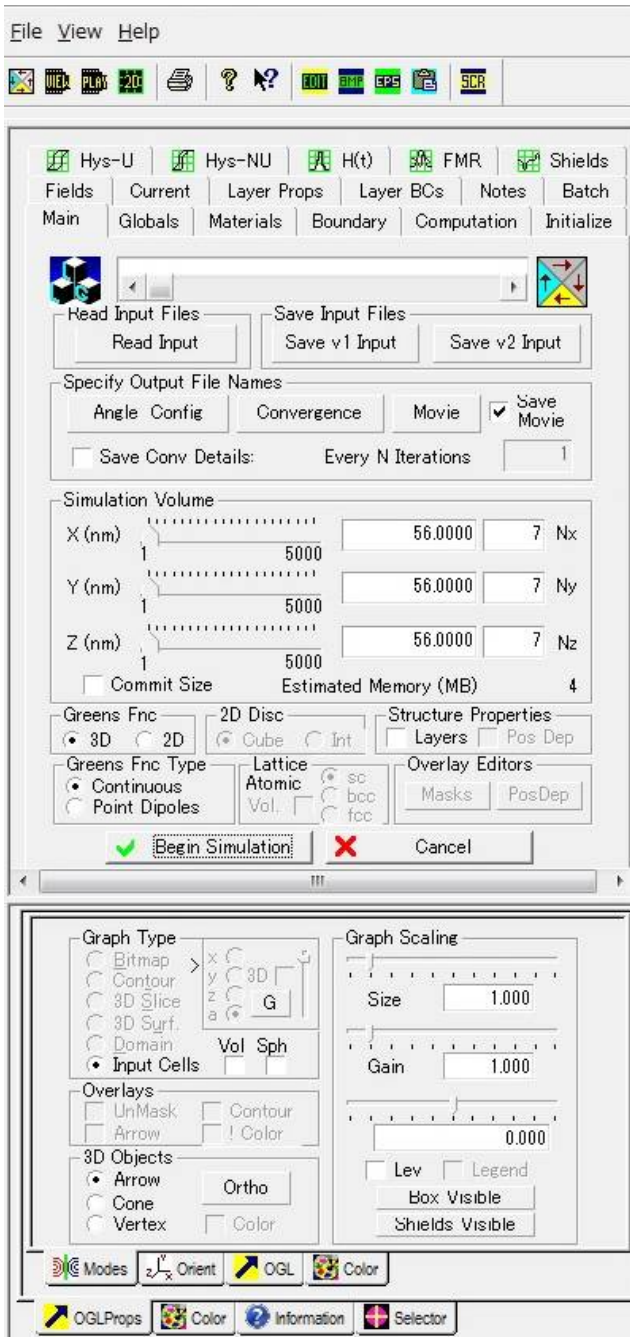
シミュレーション

- スタート、ストップと相互作用
- エネルギーと進捗の可視化
- ヒステリシス進捗の可視化
- 変化/変更の可視化
- ムービーファイルの保存
- パラメータの調整
- B プローブ

ファイルエディター

ユーティリティ

- コンピュータインフォメーション
- ディスクインフォメーション
- クロック
- 計算機能
- グラフィカルピッカー
- 持続性増強グラフィカルピッカー



主入力画面 : このメニューでは、課題の寸法、グリッドのタイプ、グリッド離散方法等の主パラメータを設定できます。

収束詳細の保存 : この機能で、過渡エネルギーと磁化をファイルに保存できます。

シミュレーションボリューム : この解析の離散化システムのシミュレーションのボリュームを設定できます。均一な3次元の離散構造には各サブエレメント内に固有の消磁効果はありませんが、不均一なグリッドにはセル内に不均一な消磁フィールドがあります。可変セルサイズは、面外の磁化コンポーネントが殆ど無い薄膜の特性を、コンピューティングする為のものです。この場合、薄いプレートレットの離散化されたエレメントが選択されますが、磁界の自己バイアスを防ぐ為に、面内で四角形となります。

グリーン関数 : LLG はフル2次元とフル3次元のマイクロ磁気学の計算ソフトウェアです。これ等の二つのコンピューターエンジン間の違いは、静磁自己場のコンピューターシミュレーション用の自由空間グリーン関数の構造にあります。大抵のシミュレーションは3次元グリーン関数を使いますが、しかしながら、2次元のグリーン関数は、2次元の対称性があるドメイン壁をシミュレーションする為のものです。

2次元の離散化 : 2次元の課題では、連続的な境界条件はメニューの「Boundary 境界」で設定できます。この目的を達成するために別の離散化スキームもあり、それによって自己場は、セル毎というよりはむしろインターフェース毎に計算されます。このオプションは、連続膜の中心部か半無限のサブストレードのトップをシミュレーションしたい場合以外、ほとんどあるいは全く興味の対象外です。

構造プロパティ層 : メニューの「Layers and Position Dependent」に詳しく説明してありますので参照下さい。

グリーン関数タイプ : 3次元のシミュレーションでは、(こちらが推奨ですが)連続的静磁気ハミルトニアン(Cont)か、点状双極子近似が使えます。これによって、最少エネルギーコンフィギュレーションを決定するにあたり、シンプルな点状双極子近似から実際の偏差を見る時に、追加のフレキシビリティが利用可能になります。その様なモデルは、解析的結果と臨界現象理論によるコンピュータ計算と比較する時に有益です。

原子格子 : LLG は原子格子のコンピュータ計算ができます。一般的には LLG はシンプルな立方体の格子で計算します。格子モードでは磁化は連続型変数として、あるいは離散双極子として処理できます。格子は、シンプルな立方体(SC)、体心立方体(bcc)または面心立方体として設定できます。

ムービーを用いて解析 : 一旦シミュレーションが完了してそのムービーを保存していれば、その計算を再開できますが、そ

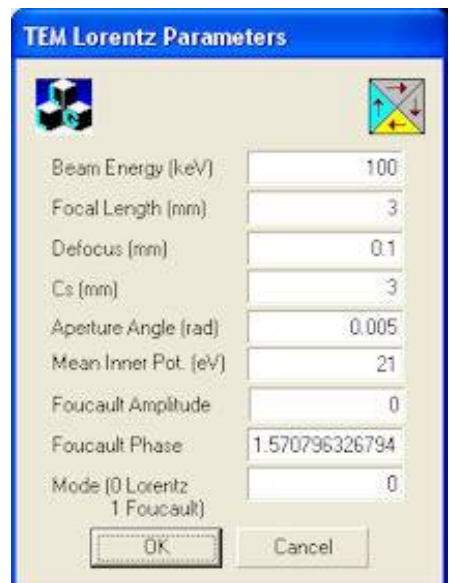
れによって、磁化を再計算する代わりに、ムービーファイルに保存される方向余弦をシミュレーションに連続してロードできます。このモードでは、ムービーを再生でき、そして有効磁界とムービーに保存された方向余弦に関するエネルギーを同時に可視化できます。全てのコンピュータ計算する層が計上されて全てのムービーファイルがロードされるので、限界となる要素は十分なメモリーが可能かという事です。このモードでは、シミュレーションを完了した後で全てのシミュレーションの詳細を精査できます。

TEM Lorentz (ロレンツ電子顕微鏡法)シミュレーション機能が追加になりました (2009年3月)

TEMに於けるロレンツコントラストは、ドメイン/ウォール構造を観察する最速の方法ですが、Fresnel propagator (フレネル伝播関数)は複雑構造ですので、解析結果を得るのは難しいことが多いのです。

この LLG 磁気シミュレータでは electron-optical phase shift(電子光学位相シフト)をコンピューティングしてその結果をグラフィック表示できますので、それを使って球面収差の効果や平均内部ポテンシャルを含んだデフォーカスされたロレンツ像を計算し、表示できます。

右図は、その TEM Lorentz 像を表示させる為に、解析を開始する前に設定するパラメータの入力画面です。



解析サンプル例題

3次元電流

このサンプル課題は電流を3次元で計算できる LLG の機能を表示しています。MRAM の課題では、電流を入力し、入力点と出力点の対称性を壊すという方法でセルを残します。これ等の非対称性はバイアスをコンフィグレーションに取り入れます;このバイアスは、LLG では近似計算法を使わず計算できます。

AMRヘッドでシールドのある伝達曲線のコンピューティング

この例題では LLG を使って、どのようにシールド付きの GMR のリードヘッドの伝達機能を計算するかを演算しています。リードヘッドの下から直接に伝達されていない場合は、有限透磁性はデバイスの漏れ磁界をシールドします。リードヘッドの下でダイナミックにスキャンされるメディア(を計算する)の為に、LLG には標準ディスク伝達モデルが組み込まれていますが、これらのモデルはヘッドの磁化や抵抗を変更できます。それ故、伝達曲線が直接計算出来る訳です。

ダイナミックビット レスポンス

このとてもシンプルな例題は、LLG で動的現象をどのようにシミュレーションできるか実演算しています;このケースではパルス磁場へのパーマロイのビットのレスポンスを表示しています。LLG には任意電流や時空のフィールドのパルスを定義できる機能があるので、実際の過渡電流の作用のモデリングが効果的にできます。

パーマロイの小板の MFM(磁気力顕微鏡)の Tip(頂点)の板相互作用

この例題は LLG のイメージコントラストモードの一例ですが、イメージングツールの一つ、磁気顕微鏡の tip(頂点)がこのサンプルに強力に結合しています。磁気顕微鏡を使ったノーマルモードのイメージングには、磁化され合計された適当な誘導体が必要です。tip(頂点)がその代表例と強力に相互作用する時、tip(頂点)そのものがシミュレーションの一部とならなければならない、またサンプルと一緒に弛緩されなければならないのです。この例は、強力に磁化された tip(頂点)が実際どのように磁化を変化させるかこのサンプルで見せているのです。

Fe/パーマロイの MRAM の、消磁結合のある層

この例題は、重い層(鉄)がピアホールで軽い層(パーマロイ)への消磁場結合しているシンプルな2層の課題を実演算しています。この極度に単純化されたサンプルのこの2層には、安定メモリ状態が達成された、異なるそれ固有の飽和保磁力があります。LLG でスイッチング曲線や MR レスポンスが直接計算できます。

メディア

この例題では、メディアや粒状材を極度に簡単にモデリングすることができる位置依存性パラメータを発生させる為に、LLG でどのように最適化できるか実演算しています。この例では、平衡ドメイン構造に、このタイプのメディアの典型である各方向に発散がある様な異方性はランダム軸配向に割り当てられています。

回転ヒステリシスループ

この例題では、LLG を使ってどのようにして回転ヒステリシスループを創り出すことができるのかを実演算しています。LLG の回転ヒステリシスループユーティリティを使って、感知(時計方向または反時計方向)やロープまわりのパス(pass)の数を任意に設定できます。

シングルスピンのダイナミック弛緩法

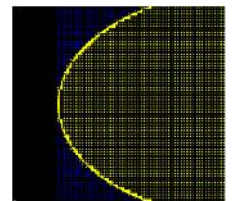
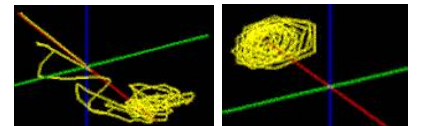
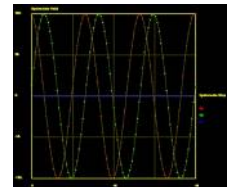
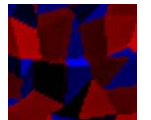
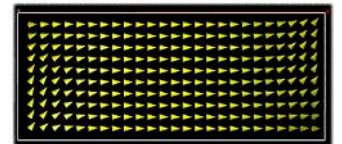
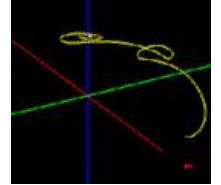
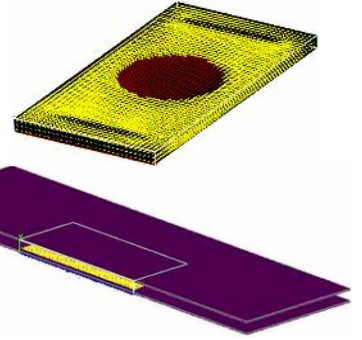
最もシンプルな例題ですが、閉形式解が存在している、磁場でのシングルスピンの弛緩法を実演算。

超微小面に移動のスピントルク

この例題では LLG の新しい機能、スピントルクを実演算しています。Slonczewski's の JMMM の論文が予測しているところによると、FM/P/FM のサンドウィッチへ垂直に方向づけられた高電流密度は、層間の角運動量を転送できます。LLG そのものはスピントルク効果や発生電流の場のトルクを常に取り入れています。その層がきつく固定されている時でさえも偏光角層の相互トルクはスピン波を発生させるので、この極度にシンプルな例題は思えるほど何時も簡単ではないと言う事を見せています。

エッジ補正

この例題は形状がある構造エッジ効果を補正する LLG の便利さを表示しています。全ての数値的方法では構造を適切に離散化する事によって概算します。Cartesian(デカルト)離散化は実行しやすく複雑な有限要素3次元グリッドアルゴリズムとは対照的に理解しやすい。エッジが Cartesian(デカルト)軸に一直線に揃わない時には Artifacts(アーチファクト)が結果として起こり得えます。LLG を使ってエッジ付近の消磁化と場の変換の両方を補正できますので、離散化によっておこる Artifacts(アーチファクト)を取り除けます。



About LLG: LLG Micromagnetics Simulator™ は、唯一の所有権者である(当時アリゾナ州立大学の物理学教授であった)Michael R. Scheinfein によって 1997 年に開発されました。最初のユーザーは企業の研究所で MRAM の研究をしていた一握りの研究者だけでしたが、今ではヨーロッパやアジア、北米の 100 を超える企業や大学等の教育機関で使われており、今ではマイクロ磁気シミュレータのワールドワイドなスタンダードとなっています。

LLG
Micromagnetics Simulator

URL: <http://llgmicro.home.mindspring.com>
E-mail: llgmicroeap@mindspring.com



日本総販売代理店

株式会社 **SGY**

URL : <http://www.sgy-inc.co.jp/>

E-mail : info@sgy-inc.co.jp

本社 : 〒102-0072 東京都千代田区飯田橋 3-7-12 松野ビル 4F
TEL:03-5212-7787 FAX:03-3265-566

東日本戦略オフィス : 〒981-3103 宮城県仙台市泉区山の寺 2-23-21

Rev.18Sep17